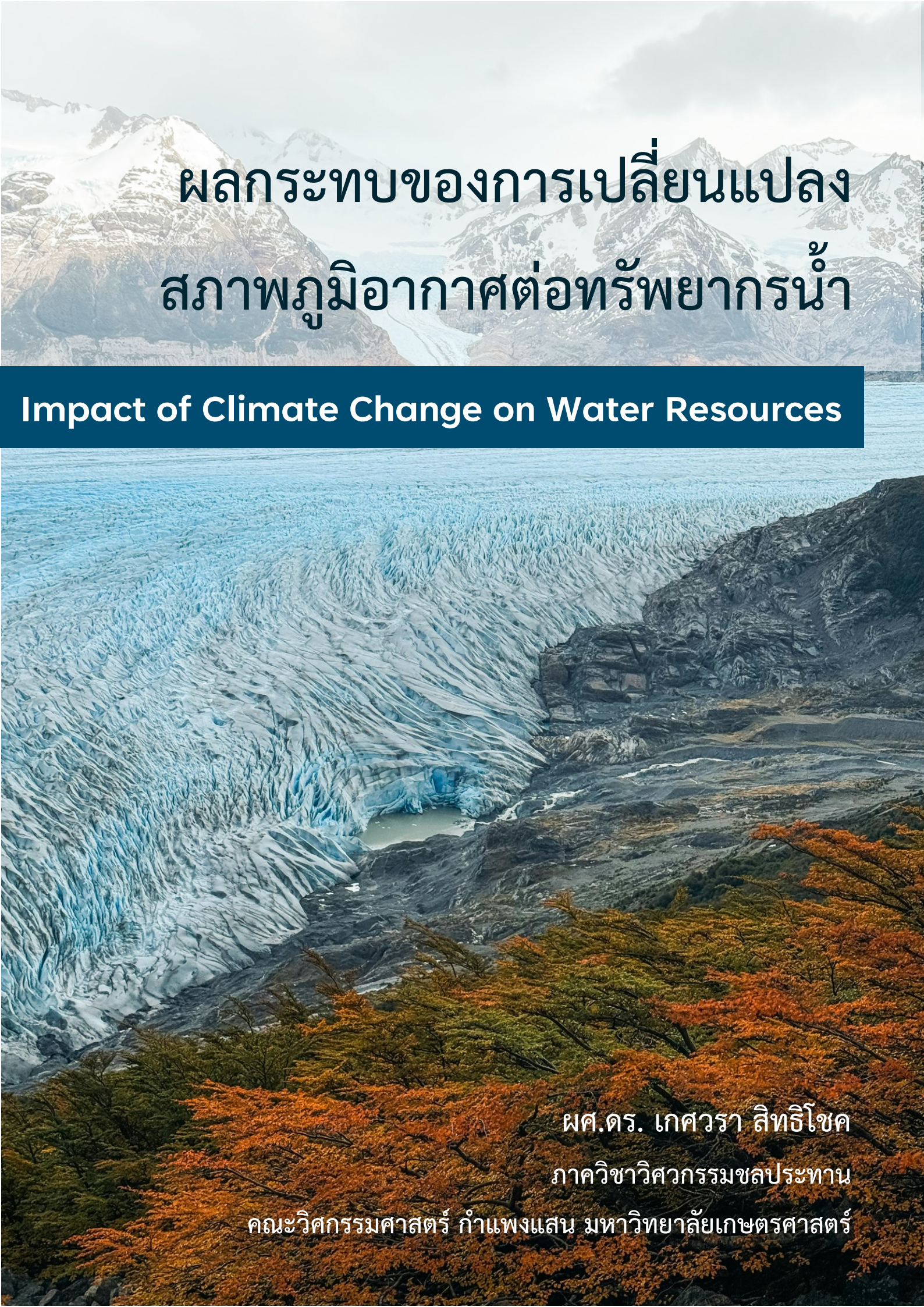
ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ

Impact of Climate Change on Water Resources



ผศ.ดร. เกศวรา สิทธิโชค

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

คณะวิศกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำนำ

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ (Impact of Climate Change on Water Resources) เป็นรายวิชาที่ถูกระบุไว้ในการศึกษาระดับปริญญาโทของภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 เนื่องจากการเล็งเห็นถึงสถานการณ์ในสภาวะปัจจุบันที่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อมนุษย์ สิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อมในหลายพื้นที่ทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลกระทบทางด้านอุทกวิทยาและการจัดการทรัพยากรน้ำ ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณและรูปแบบการเกิดฝน การเกิดภัยแล้ง และอุทกภัยที่มีความถี่และความรุนแรงที่เพิ่มสูงขึ้น

ตำราฉบับนี้เรียบเรียงขึ้นเพื่อให้นิสิตรวมถึงบุคคลที่สนใจสามารถเข้าใจถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อทรัพยากรน้ำตั้งแต่เริ่มต้นถึงสาเหตุของปัญหาสถานการณ์ของผลกระทบที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน นโยบายและมาตรการต่างๆ เพื่อแก้ไขปัญหาและแนวทางการลดผลกระทบทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติ รวมถึงขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในการประเมินถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำ นอกจากนั้นยังได้มีการระบุถึงวิธีการประเมินความอ่อนไหว ความเปราะบาง และความเสี่ยง พร้อมกับมาตรการลดผลกระทบและการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้อย่างครบถ้วน

และเนื่องด้วยการประเมินถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำจำเป็นต้องมีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยาในการประเมิน ดังนั้นจึงได้มีการระบุรายละเอียดทฤษฎีของแบบจำลองอุทกวิทยา Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ขั้นตอนการใช้แบบจำลอง การปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลอง รวมถึงวิธีการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อให้ผู้อ่านสามารถนำไปใช้เป็นคู่มือสำหรับการประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำได้ต่อไป

ผู้แต่งขอขอบพระคุณ ศ.ดร. ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล, รศ.ดร. กิตติเวช ขันติยวิชัย และ รศ.ดร. ปกรณ์ ดิษฐกิจ ผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจสอบและให้คำแนะนำในการเรียบเรียงตำราฉบับนี้เป็นอย่างสูง ผู้แต่งหวังเป็นอย่างยิ่งว่าตำราฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านเพื่อสร้างความเข้าใจถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการจัดการทรัพยากรน้ำได้ต่อไป

เกศวรา สิทธิโชค

ตุลาคม 2568

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 แนวคิดพื้นฐานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

1.1 ความหมายของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 1-1

1.2 ปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน 1-2

1.3 กลไกการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ 1-10

1.4 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำระดับโลก 1-13

1.5 การดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของหน่วยงานต่างๆ 1-24

สรุปท้ายบทที่ 1 / คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม / เอกสารอ้างอิง

บทที่ 2 ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศและมหาสมุทร

2.1 ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศและมหาสมุทรคืออะไร 2-1

2.2 ความผันแปรของระบบอากาศซีกโลกใต้ 2-4

2.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเขตมหาสมุทรแปซิฟิค 2-11

2.4 ความผันแปรของระบบมหาสมุทรอินเดีย 2-12

2.5 ระบบมรสุมและพายุ 2-14

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทร 2-15

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบการหมุนเวียนสภาพอากาศกับกระบวนการอุทกวิทยาระดับลุ่มน้ำ 2-19

สรุปท้ายบทที่ 2 / คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม / เอกสารอ้างอิง

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกและแบบจำลองภูมิอากาศโลก

3.1 ความสำคัญของสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3-1

3.2 สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก Share Socioeconomic Pathways (SSPs) 3-3

3.3 หลักการทำงานแบบจำลองภูมิอากาศโลก 3-11

3.4 ประเภทแบบจำลองภูมิอากาศโลก 3-13

3.5 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองภูมิอากาศโลก 3-18

3.6 ความไม่แน่นอนของแบบจำลองภูมิอากาศโลก 3-20

3.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก 3-23

สรุปท้ายบทที่ 3 / คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม / เอกสารอ้างอิง

บทที่ 4 การลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก

4.1 แนวคิดการลดมาตราส่วนผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก 4-1

4.2 ประเภทของการลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก 4-3

4.3 การประเมินผลการลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก 4-16

4.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้โปรแกรมลดมาตราส่วนทางสถิติ 4-20

สรุปท้ายบทที่ 4 / คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม / เอกสารอ้างอิง

บทที่ 5 กรอบการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ

5.1 แนวทางการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศระดับท้องถิ่น 5-1

5.2 แบบจำลองอุทกวิทยา 5-11

5.3 ความไม่แน่นอนของแบบจำลองอุทกวิทยา 5-22

5.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยาในการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 5-24

สรุปท้ายบทที่ 5 / คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม / เอกสารอ้างอิง

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 แบบจำลองอุทกวิทยา: Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

6.1 ทฤษฎีหลักที่เกี่ยวข้องในการคำนวณของแบบจำลอง SWAT 6-2

6.2 การคำนวณปริมาณน้ำท่าผิวดิน 6-3

6.3 การคำนวณการคายระเหย 6-14

6.4 การคำนวณน้ำในดิน 6-18

6.5 การคำนวณน้ำใต้ดิน 6-20

6.6 การเคลื่อนที่ของน้ำในลำน้ำ 6-22

สรุปท้ายบทที่ 6 / เอกสารอ้างอิง

บทที่ 7 ความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

7.1 นิยามและกรอบแนวคิดของความเปราะบางและความเสี่ยง 7-1

7.2 ดัชนีที่ใช้ในการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยง 7-5

7.3 แนวทางการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยง 7-6

7.4 การคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักและความน่าเชื่อถือทางสถิติ 7-16

7.5 กรณีศึกษาการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 7-18

สรุปท้ายบทที่ 7 / คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม / เอกสารอ้างอิง

บทที่ 8 มาตรการลดผลกระทบและการปรับตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

8.1 ความหมายและความแตกต่างของมาตรการลดผลกระทบและการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 8-1

8.2 มาตรการและเทคโนโลยีเพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 8-3

8.3 มาตรการการลดก๊าซเรือนกระจกในภาคส่วนต่างๆ 8-8

8.4 การลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย 8-12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 8 มาตรการลดผลกระทบและการปรับตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (ต่อ)

8.5 แนวคิดการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 8-21

8.6 การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสำหรับภาคส่วนต่างๆ 8-22

8.7 การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย 8-28

สรุปท้ายบทที่ 8 / คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม / เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ก – การกำกับดูแลด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ภาคผนวก ข – สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SREs และ RCPs

ภาคผนวก ค – โครงการความร่วมมือการประยุกต์ใช้แบบจำลอง GCMs

ภาคผนวก ง – ขั้นตอนการใช้งานแบบจำลอง SWAT และ SWAT-CUP

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.2.1-1	ลักษณะการดูดซับและการปล่อยรังสีของโลก	1-3
รูปที่ 1.2.1-2	ความแตกต่างของปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน	1-4
รูปที่ 1.2.3-1	สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคส่วนต่างๆ	1-9
รูปที่ 1.2.3-2	การเก็บกักคาร์บอนของป่าแต่ละประเภท	1-9
รูปที่ 1.3-1	ลักษณะของเมฆแต่ละประเภท	1-12
รูปที่ 1.3-2	ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ	1-13
รูปที่ 1.4.1-1	การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเฉลี่ยรายปี (%) ช่วงระหว่างปี 1891-2019	1-15
รูปที่ 1.4.1-2	การเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยความชื้นในดินรายปีที่ระดับ 0-5 ซม. ช่วงปี ค.ศ. 1978-2018	1-16
รูปที่ 1.4.1-3	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในลำน้ำในแต่ละแม่น้ำสายหลัก ในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1971-2010	1-17
รูปที่ 1.4.2-1	การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีและการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนสูงสุดรายวันที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 2°C (Multi-model ensembles)	1-18
รูปที่ 1.4.3-1	ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยโลกรายปีเปรียบเทียบกับช่วงศตวรรษที่ 20 (1901-2000)	1-19
รูปที่ 1.4.3-2	การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ธารน้ำแข็งของ Pedersen Glacier ใน Aialik Bay, Alaska’s Kenai Mountain ในปี ค.ศ. 1971 และ 2005	1-20
รูปที่ 1.4.3-3	การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลรายปีเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 1993-2008	1-21
รูปที่ 1.4.3-4	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลเฉลี่ยทั่วโลกรายปี เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 1971-2000	1-22
รูปที่ 1.4.3-5	ดัชนีพลังงานสะสม Accumulated Cyclone Energy Index (ACE) ในแถบมหาสมุทรแอตแลนติก	1-23
รูปที่ 2.1.1-1	ลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศของโลก	2-2
รูปที่ 2.1.1-2	ลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ Walker cell	2-2
รูปที่ 2.1.2-1	ลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำในมหาสมุทร	2-3
รูปที่ 2.2-1	Neutral phase, El Nino และ La Nina	2-5
รูปที่ 2.2.4-1	พื้นที่ตรวจวัดความกดอากาศบริเวณ Tahiti และ Dawin	2-7
รูปที่ 2.2.4-2	SOI index ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1951 – 2024	2-7

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.2.4-3	พื้นที่ Nino4, Nino3.4, Nino3 และ Nino 1+2	2-8
รูปที่ 2.2.4-4	ONI ตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1950 – 2024	2-8
รูปที่ 2.2.4-5	อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณ Nino 1+2, Nino 3 และ Nino 4	2-9
รูปที่ 2.2.4-6	Outgoing Longwave Radiation (ค.ศ. 1974 - 2024)	2-10
รูปที่ 2.2.4-7	Multivariate ENSO Index (ค.ศ. 1960-2024)	2-11
รูปที่ 2.3-1	ลักษณะของ Warm phase and Cool Phase ของดัชนี PDO	2-12
รูปที่ 2.4-1	สถานะของ Indian Ocean Dipole	2-13
รูปที่ 2.4-2	ดัชนี DMI ระหว่างช่วง ค.ศ. 1980-2019	2-13
รูปที่ 2.5-1	ลักษณะการเกิดมรสุม	2-14
รูปที่ 2.6-1	ความแปรปรวนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณ Nino-3.4 ของมหาสมุทรแปซิฟิค	2-16
รูปที่ 2.6-2	การเปลี่ยนแปลงของ ENSO index ก่อนและหลังปี ค.ศ. 1960	2-17
รูปที่ 2.6-3	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวน้ำทะเลและปริมาณฝนบริเวณ Nino-3.4 ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	2-17
รูปที่ 2.6-4	El Nino / La Nina และการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน	2-19
รูปที่ 2.7-1	ตัวอย่างแนวทางการศึกษาความสัมพันธ์และการคาดการณ์ปริมาณฝนจากดัชนีบรรยากาศ-มหาสมุทร	2-20
รูปที่ 3.1.1-1	ความสัมพันธ์ของการศึกษาทางด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	3-2
รูปที่ 3.2.1-1	ลักษณะทางเศรษฐกิจ-สังคมของแต่ละสถานการณ์ SSPs	3-7
รูปที่ 3.2.1-2	การใช้ประโยชน์ที่ดินและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละสถานการณ์ SSPs	3-9
รูปที่ 3.2.1-3	ความต้องการการดำเนินงานทางด้านการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและแนวทางการปรับตัว	3-9
รูปที่ 3.2.2-1	อุณหภูมิและระดับน้ำทะเลในแต่ละสถานการณ์ SSPs	3-10
รูปที่ 3.4-1	ลักษณะการคำนวณของแบบจำลองภูมิอากาศโลก	3-14
รูปที่ 3.6-1	อุณหภูมิต่ำสุดในพื้นที่หนึ่งในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1951-2096 จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก 24 แบบจำลอง	3-22

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.6-2	สัดส่วนความไม่แน่นอนจากทั้ง 3 แหล่งของอุณหภูมิเฉลี่ยทั่วโลก ระหว่างปี ค.ศ. 2005-2100	3-23
รูปที่ 3.6-3	สัดส่วนความไม่แน่นอนจากทั้ง 3 แหล่งของอุณหภูมิ (ซ้าย) และปริมาณฝน (ขวา) ในระดับภูมิภาค	3-24
รูปที่ 4.1-1	ภาพรวมองค์ประกอบการลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก	4-2
รูปที่ 4.2.1-1	แนวคิดการคำนวณของแบบจำลอง RCM	4-4
รูปที่ 4.2.2-1	ลักษณะของข้อมูลการปรับลดค่าอคติด้วยวิธี Delta method (รูปบน) และ Quantile mapping (รูปล่าง) ของอุณหภูมิเฉลี่ยเมือง Toronto ประเทศ Canada	4-15
รูปที่ 4.2.3-1	กระบวนการลดมาตราส่วน 3 วิธี	4-16
รูปที่ 4.3.2-1	การประมาณค่าสำหรับการคำนวณค่า r^2	4-18
รูปที่ 4.4.1-1	แบบจำลองการลดมาตราส่วน SDSM	4-22
รูปที่ 4.4.1-2	การทำงานของแบบจำลองการลดมาตราส่วน SDSM	4-24
รูปที่ 4.4.2-1	ตัวอย่างโปรแกรม CMhyd	4-26
รูปที่ 4.4.3-1	ตัวอย่างการทำงานการประยุกต์ใช้วิธีการทางสถิติร่วมกัน	4-28
รูปที่ 4.4.3-2	ตัวอย่างปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี	4-29
รูปที่ 4.4.3-3	ตัวอย่างวิธีการลดมาตราส่วนปริมาณฝนและอุณหภูมิของประเทศไทย	4-30
รูปที่ 4.4.3-4	ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน (ซ้าย) และอุณหภูมิ (ขวา) ของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2100 ภายใต้สถานการณ์ SSP3-7.0	4-31
รูปที่ 5.1-1	ขั้นตอนการประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อปัจจัยทางด้านอุทกวิทยา	5-2
รูปที่ 5.1.4-1	การตรวจสอบแบบจำลองทางอุทกวิทยากับผลลัพธ์ของแบบ GCM	5-11
รูปที่ 5.2.1-1	การแบ่งประเภทของแบบจำลองอุทกวิทยา (Model Classification)	5-13
รูปที่ 5.2.1-2	ประเภทการแบ่งลักษณะพื้นที่ของแบบจำลอง A) Lumped model, B) Semi-distributed model and C) Distributed model	5-14
รูปที่ 5.2.2-1	ลักษณะความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีสมการและค่า r ที่เป็นค่าเดียวกัน	5-19
รูปที่ 5.2.2-2	การแสดงผลเชิงรูปเพื่อประเมินความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลตรวจวัด	5-21

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.3-1	ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง	5-24
รูปที่ 5.4-1	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่งัดภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 4 สถานการณ์	5-26
รูปที่ 5.4-2	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำชีตอนบนภายใต้สถานการณ์ SSP2-4.5 และ SSP5-8.5	5-27
รูปที่ 6.1-1	วัฏจักรอุทกวิทยา	6-1
รูปที่ 6.2.1-1	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าและปริมาณฝนในแต่ละ CN	6-4
รูปที่ 6.2.2-1	การซึมของน้ำผ่านดินในภาวะปกติ (ซ้าย) และจากแบบจำลอง (ขวา)	6-11
รูปที่ 6.2.4-1	ความสัมพันธ์ระหว่าง $Surlag$ และ t_{conc}	6-14
รูปที่ 6.6.3-1	ลักษณะลำน้ำและปัจจัยสำหรับการคำนวณปริมาณน้ำในลำน้ำ	6-25
รูปที่ 7.1.2-1	องค์ประกอบของการประเมินความเสี่ยง (Risk)	7-3
รูปที่ 7.1.2-2	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยง (Risk)	7-4
รูปที่ 7.3.1-1	ระดับของความเปราะบางจากการพิจารณาความอ่อนไหว การเผชิญต่อภัยและความสามารถในการปรับตัว	7-7
รูปที่ 7.3.1-2	กระบวนการประเมินความเปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	7-9
รูปที่ 7.3.2-1	กระบวนการประเมินความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	7-11
รูปที่ 7.3.2-2	ตัวอย่างแผนที่ภัยอันตรายจากน้ำท่วมจากงานวิจัยในประเทศเอธิโอเปีย	7-13
รูปที่ 7.3.3-1	ตัวอย่างห่วงโซ่สาเหตุผลกระทบของสถานการณ์น้ำท่วม	7-15
รูปที่ 7.5.1-1	ตัวอย่างแผนที่ภัยอันตราย การเผชิญต่อภัย ความอ่อนไหว และความเสี่ยงลุ่มน้ำยม	7-23
รูปที่ 7.5.2-1	ตัวอย่างแผนที่ภัยอันตรายจากน้ำท่วมจากกรณีศึกษา Volta Basin	7-25
รูปที่ 7.5.2-2	ผลการประเมินความเสี่ยงจากกรณีศึกษา Volta Basin	7-27
รูปที่ 8.1	ความสัมพันธ์ของมาตรการลดผลกระทบ (Mitigation) และการปรับตัว (Adaptation) ต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	8-2
รูปที่ 8.2.1-1	ตลาดการซื้อขายคาร์บอนเครดิต	8-4
รูปที่ 8.4.1-1	มาตรการที่เกี่ยวข้องในการลดก๊าซเรือนกระจกของ 3 สาขาหลัก	8-15
รูปที่ 8.5-1	กระบวนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	8-22
รูปที่ 8.7.1-1	แนวคิดการจัดทำแผนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย	8-28

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.2.2-1 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน 1-6
ตารางที่ 1.2.3-1 ตัวอย่างกิจกรรมที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก 1-10
ตารางที่ 1.4.1-1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนของแต่ละพื้นที่ 1-15
ตารางที่ 3.2.1-2 สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและกิจกรรมทางการเกษตรแต่ละ SSPs 3-8
ตารางที่ 3.2.2-1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสถานการณ์ SSPs 3-11
ตารางที่ 3.4-1 หน่วยงานที่พัฒนาแบบจำลองภูมิอากาศโลก 3-15
ตารางที่ 3.5-1 ประสิทธิภาพของแบบจำลองจากค่า CMCI 3-20
ตารางที่ 3.7-1 ตัวอย่างผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่เกี่ยวเนื่องกับทรัพยากรน้ำ 3-24
ตารางที่ 3.7-2 ตัวอย่าง Metadata ของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก MRI-ESM2-0 3-25
ตารางที่ 4.2.1-1 ผลลัพธ์ของการลดมาตราส่วนของ NEX-GDDP-CMIP6 4-5
ตารางที่ 4.2.1-2 ผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ที่มีการลดมาตราส่วนของ NEX-GDDP-CMIP6 4-5
ตารางที่ 4.2.2-1 ความแตกต่างระหว่างวิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติและวิธีการลดค่าอคติ 4-8
ตารางที่ 4.3-1 ระดับการประเมินประสิทธิภาพวิธีการที่ใช้ในการลดมาตราส่วน 4-19
ตารางที่ 4.4.3-1 ตัวอย่างผลการปรับเทียบและสอบทานการลดมาตราส่วนปริมาณฝนของพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี 4-29
ตารางที่ 4.4.3-2 ผลการปรับเทียบและสอบทานการลดมาตราส่วนปริมาณฝนและอุณหภูมิของประเทศไทย 4-30
ตารางที่ 5.1.2-1 ตัวอย่างการศึกษาการเลือกใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก 5-5
ตารางที่ 5.2.2-1 ตัวอย่างแบบจำลองอุทกวิทยาและรายละเอียดของแบบจำลอง 5-15
ตารางที่ 6.2.1-1 ค่า CN สำหรับพื้นที่เพาะปลูก 6-5
ตารางที่ 6.2.1-2 ค่า CN สำหรับพื้นที่การเกษตรอื่นๆ 6-7
ตารางที่ 6.2.1-3 ค่า CN สำหรับพื้นที่เมือง 6-8
ตารางที่ 6.4-1 ปริมาณน้ำในดินของดินประเภทต่างๆ 6-18
ตารางที่ 7.1.1-1 ความแตกต่างของกรอบแนวคิดความเปราะบางระหว่าง IPCC (2007) และ IPCC (2014) 7-2
ตารางที่ 7.3.2-1 ความแตกต่างของกรอบแนวคิดในการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยง 7-9

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 7.4.1-1 ตัวอย่างการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตัวชี้วัดในดัชนีการเผชิญต่อภัยของน้ำท่วม 7-17
ตารางที่ 7.5.1-1 สรุปตัวชี้วัดจากกรณีศึกษาความเสี่ยงเชิงพื้นที่ลุ่มน้ำด้านน้ำท่วม 7-20
ตารางที่ 7.5.2-1 สรุปตัวชี้วัดจากกรณีศึกษาความเสี่ยงจากการเกิดน้ำท่วมต่อกิจกรรมการเกษตร 7-26
ตารางที่ 8.1-1 ความแตกต่างระหว่างมาตรการลดผลกระทบและแนวทางการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 8-2
ตารางที่ 8.3.2-1 ตัวอย่างปริมาณคาร์บอนในมวลชีวภาพของต้นไม้ 8-10
ตารางที่ 8.3.2-2 อัตราการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของต้นไม้ 8-11
ตารางที่ 8.4.1-1 สรุปศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกรายสาขา 8-15
ตารางที่ 8.4.2-1 รายละเอียดโครงการที่สามารถพัฒนาเพื่อเข้าสู่ T-VER 8-17
ตารางที่ 8.4.2-2 ตัวอย่างโครงการที่ได้รับการขึ้นทะเบียนโดย อบก. 8-17
ตารางที่ 8.4.3-1 แนวทางการดำเนินงานและผลการดำเนินงานโครงการ Thai Rice NAMA 8-19
ตารางที่ 8.6.2-1 แนวทางการดำเนินงานสำหรับการปรับตัวของการบริหารจัดการน้ำในระดับต่างๆ 8-26
ตารางที่ 8.7.1-1 แนวทางในการปรับตัวด้านการจัดการน้ำของประเทศไทย 8-30
ตารางที่ 8.7.1-2 แนวทางในการปรับตัวด้านการเกษตรและความมั่นคงด้านอาหาร 8-34

บทที่ 1 - แนวคิดพื้นฐานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

Chapter 1 – Basic Concept of Climate Change

บทที่ 1

แนวคิดพื้นฐานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ | Basic Concept of Climate Change

ในปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นสถานการณ์หลักที่ทั่วโลกให้ความสนใจและตระหนักถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในหลายมิติ หนึ่งในผลกระทบที่เห็นได้อย่างชัดเจน ได้แก่ ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อทรัพยากรน้ำของโลก การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลโดยตรงต่อวัฏจักรของน้ำ อุณหภูมิของโลกที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลกระทบต่ออัตราการระเหยของน้ำ และยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและปริมาณของการเกิดฝนในหลายพื้นที่ ก่อให้เกิดสถานการณ์สุดขั้ว เช่น การเกิดภัยแล้ง การเกิดน้ำท่วมที่รุนแรงและบ่อยครั้งขึ้นจากการเกิดฝนตกหนักในช่วงเวลาสั้นๆ เป็นต้น

จากความสำคัญของผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำข้างต้น ตำราฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ รวมถึงแนวทางและขั้นตอนการประเมินผลกระทบที่มีต่อทรัพยากรน้ำ โดยมีการนำเสนอการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยาควบคู่กับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกเพื่อประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อปัจจัยทางด้านอุทกวิทยา และมีรายละเอียดครอบคลุมไปถึงการประเมินความเสี่ยงและความเปราะบาง รวมถึงแนวทางการดำเนินงานสำหรับมาตรการลดผลกระทบ และแนวทางการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เพื่อสร้างองค์ความรู้ และเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

1.1 ความหมายของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือหน่วยงาน Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC ได้ให้คำนิยามของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะสภาพอากาศซึ่งสามารถอธิบายได้โดยการใช้เครื่องมือต่างๆ เช่นการทดสอบทางสถิติ โดยประเมินการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยหรือความแปรปรวนจากข้อมูลที่มีความต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน (ระยะเวลาหลายสิบปี) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเกิดได้จากธรรมชาติ จากกิจกรรมของมนุษย์ที่ส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศ หรือจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ในขณะที่กรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) ได้มีการให้คำนิยามของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในมาตราที่ 1 หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ก่อให้เกิด

องค์ประกอบของบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มเติมนอกเหนือจากความแปรปรวนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติอยู่แล้ว (IPCC, 2021)

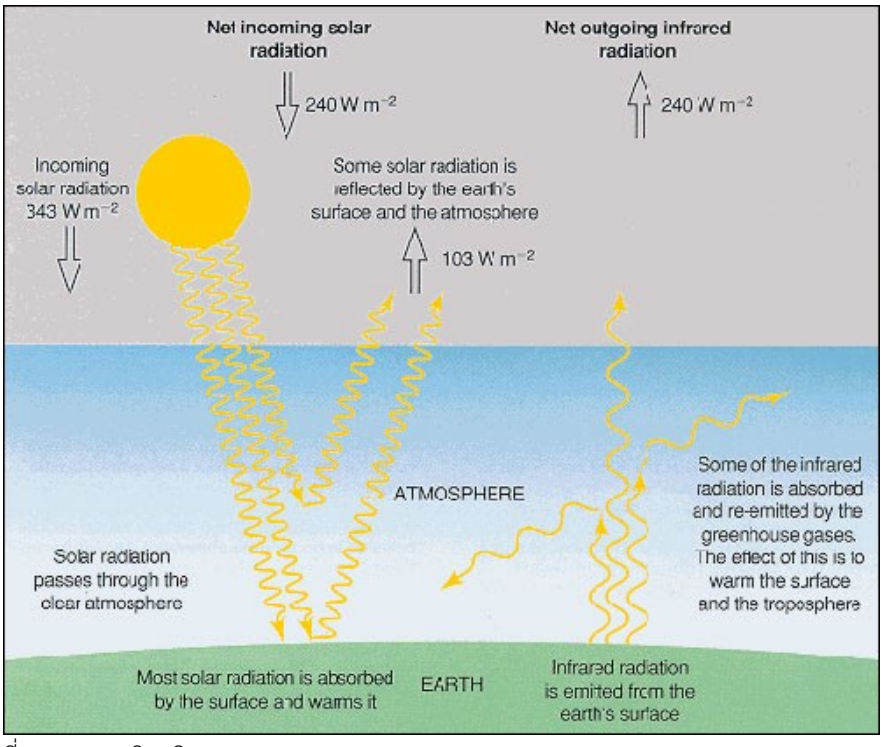
โดยส่วนใหญ่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะเกิดความเข้าใจที่สับสนกับการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Weather change) การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของภาวะอากาศในช่วงเวลาสั้นๆ หรือการเปลี่ยนแปลงที่คาดการณ์ได้ (Weather forecast) ในช่วงเวลาอันใกล้ (ชั่วโมง/วัน/สัปดาห์) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ยาวนาน ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ ได้แก่ การเกิดฝนตกหนักในช่วงเช้าและหยุดในช่วงบ่าย อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างเมื่อวานกับวันนี้ หรือการคาดการณ์จะเกิดพายุฝนในอาทิตย์หน้า เป็นต้น ในขณะที่ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงปัจจุบันเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงอดีตที่ผ่านมา หรือรูปแบบการเกิดฝนที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ฤดูฝนในพื้นที่หนึ่งตั้งแต่อดีตที่ผ่านมาปกติอยู่ในช่วงเดือน ก.ค. - ต.ค. แต่ในช่วงปัจจุบันเกิดฝนตกในช่วงเดือน ธ.ค. - ม.ค. หลายปีติดต่อกัน เป็นต้น

1.2 ปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน

1.2.1 ความแตกต่างของปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน

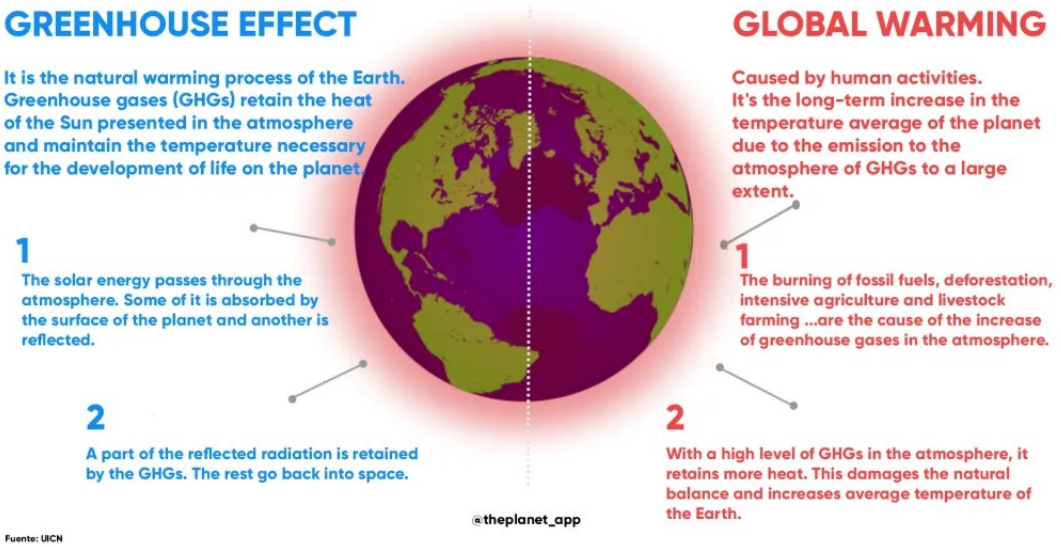
เมื่อกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจำเป็นต้องมีความเข้าใจถึงปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) และภาวะโลกร้อน (Global warming) ควบคู่ไปด้วยกัน เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อมของโลกในปัจจุบัน ปรากฏการณ์เรือนกระจกหรือภาวะเรือนกระจกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติส่งผลให้อุณหภูมิโลกไม่ต่ำเกินไป และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ปรากฏการณ์เรือนกระจกเกี่ยวเนื่องกับพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ การดูดซับและการสะท้อนกลับของพลังงานรังสีที่ส่องมายังโลก โดยรังสีแสงอาทิตย์ประมาณ 30% ที่ส่องมายังโลกจะสะท้อนกลับไปนอกโลก ส่วนรังสีแสงอาทิตย์ในส่วนที่เหลือจะถูกดูดซับโดยชั้นบรรยากาศ พื้นผิวโลก และก๊าซต่างๆรวมถึงไอน้ำที่สะสมอยู่ที่ชั้นบรรยากาศได้มีการยอมให้รังสีคลื่นสั้นบางชนิดผ่านมายังพื้นผิวโลก รังสีบางส่วนเมื่อตกกระทบผิวโลกจะเกิดการสะท้อนกลับออกไปนอกชั้นบรรยากาศส่วนหนึ่ง พื้นผิวโลกและสิ่งมีชีวิตจะดูดกลืนรังสีไว้ส่วนหนึ่ง หลังจากนั้นจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปรังสีคลื่นยาวช่วงอินฟราเรดแผ่กระจายขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ โดยส่วนหนึ่งจะแผ่กระจายออกนอกชั้นบรรยากาศ ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งชั้นบรรยากาศจะมีการดูดซับและการคายพลังงานออกมา (**รูปที่ 1.2.1-1**)

ปรากฏการณ์เรือนกระจกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเพื่อช่วยให้อุณหภูมิของโลกอยู่ในภาวะที่เหมาะสม แต่ในปัจจุบันโลกกำลังเผชิญกับสภาวะที่เรียกว่าภาวะโลกร้อน ซึ่งภาวะโลกร้อนจะมีความแตกต่างกับปรากฏการณ์เรือนกระจกอยู่ในหลายส่วน ถึงแม้ว่าลักษณะที่เกิดขึ้นคือการทำให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ภาวะโลกร้อนเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากช่วงของการปฏิวัติอุตสาหกรรมในช่วงกลางศตวรรษที่ 18 การเพิ่มขึ้นของการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากกระบวนการอุตสาหกรรม และการขนส่งก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลไกที่สามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มีจำนวนที่ลดลงจากการลดลงของพื้นที่ป่าไม้ ซึ่งเป็นแหล่งกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญ รวมถึงกิจกรรมของมนุษย์อื่นๆที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่นๆเพิ่มขึ้น เช่น ไนตรัสออกไซด์ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (รายละเอียดก๊าซเรือนกระจกแสดงดังหัวข้อ 1.2.2) **รูปที่ 1.2.1-2** แสดงรายละเอียดความแตกต่างของปรากฏารณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน จากช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรมพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้น ในช่วงปี ค.ศ. 1880 – 1980 พบว่าอุณหภูมิโลกเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 0.07 °C ในทุก 10 ปี และในช่วง 40 ปีที่ผ่านมาอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นประมาณ 0.18 °C ทุก 10 ปี (Turrentine, 2021)



ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2567)

รูปที่ 1.2.1-1 ลักษณะการดูดซับและการปล่อยรังสีของโลก



ที่มา: The Planet App (2024)

รูปที่ 1.2.1-2 ความแตกต่างของปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน

1.2.2 ก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) หมายถึงก๊าซที่อยู่บริเวณชั้นบรรยากาศของโลกและทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิของโลกให้สมดุล ก๊าซเรือนกระจกสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการดูดซับความร้อน และก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ระยะเวลาที่ก๊าซอยู่ในชั้นบรรยากาศ และความสามารถในการเก็บกักความร้อนของก๊าซแต่ละชนิด การแสดงผลการเก็บกักความร้อนของก๊าซเรือนกระจกประเภทต่างๆจะถูกแสดงผลให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (Carbon dioxide equivalent: CO_2e) โดยการเปรียบเทียบค่าก๊าซเรือนกระจกอื่นๆด้วยค่าศักยภาพที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential: GWP) ซึ่งจะถูกคำนวณจากค่าพลังงานทั้งหมดที่ก๊าซเหล่านั้นเก็บกักไว้ในช่วงเวลา 100 ปี (GWP 100) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1 ตัน

ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และก๊าซที่มีสารประกอบของคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) โดยก๊าซแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางเคมี การดูดซับพลังงานรังสี การสะสม และการสลายออกจากชั้นบรรยากาศที่แตกต่างกัน Denchak (2023) ได้ระบุถึงลักษณะของก๊าซเรือนกระจกต่างๆดังนี้

- คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2): ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้จากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน เกิดจากภาคการขนส่ง และการผลิตไฟฟ้า ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็นสัดส่วนประมาณ 80% ของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่คงอยู่ได้เป็นระยะเวลานาน โดยเมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ 40% จะยังคงอยู่ได้มากกว่า 100 ปี ในขณะที่ 20% และ 10% ของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมาสามารถอยู่ได้ถึง 1,000 และ 10,000 ปี ตามลำดับ

- มีเทน (CH_4): ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติและสามารถเกิดได้จากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเกษตร การปศุสัตว์ การย่อยสลายซากสิ่งมีชีวิต การเผาไหม้จากก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น มีช่วงเวลาในการคงตัวอยู่ในชั้นบรรยากาศที่สั้นกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคงตัวอยู่ประมาณ 12 ปี แต่อย่างไรก็ตามเมื่อประเมินถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานความร้อนของปรากฏการณ์เรือนกระจกพบว่าก๊าซมีเทนมีความสามารถในการดูดซับพลังงานความร้อนได้มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 เท่า (GWP 1:28) (IPCC, 2013)

- ไนตรัสออกไซด์ (N_2O): ก๊าซไนตรัสออกไซด์เกิดขึ้นโดยธรรมชาติจากการย่อยสลายซากสิ่งมีชีวิตในดินโดยแบคทีเรีย และสามารถเกิดได้จากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น จากการเกษตร อุตสาหกรรมที่มีการใช้องค์ประกอบของกรดไนตริก หรือสารเคมีที่เกี่ยวข้อง ก๊าซไนตรัสออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีความสามารถในการเก็บกับความร้อนได้สูงมาก และสามารถคงตัวอยู่ในบรรยากาศได้เป็นระยะเวลาที่ยาวนานมากกว่า 100 ปี โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า GWP ของคาร์บอนไดออกไซด์กับไนตรัสออกไซด์พบว่ามีค่าอยู่เท่ากับ 1:265 (IPCC, 2013)

- ก๊าซที่มีสารประกอบของคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC): เป็นก๊าซที่เกิดจากกระบวนการในการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การใช้ประโยชน์เป็นตัวทำความเย็นในเครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น น้ำยาดับเพลิง การผลิตสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า เป็นต้น โดยก๊าซในกลุ่ม CFC นี้มีก๊าซที่มีความสำคัญหลัก ได้แก่ Hydrofluorocarbon (HFCs), Perfluorocarbons (PFCs), Sulfur hexafluoride (SF_6) และ Nitrogen trifluoride (NF_3) โดยค่า GWP ของก๊าซดังกล่าวแสดงดัง**ตารางที่ 1.2.2-1**

ตารางที่ 1.2.2-1 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential: GWP)

ก๊าซเรือนกระจก	สมการเคมี	GWP
Carbon dioxide	CO_2	1
Methane	CH_4	28
Nitrous oxide	N_2O	265
Sulphur hexafluoride	SF_6	23500
Nitrogen trifluoride	NF_3	16100
HFC-23*	CHF_3	12400
Perfluoromethane*	CF_4	6630

หมายเหตุ: * ตัวอย่างจากหลายองค์ประกอบ

ที่มา: IPCC (2013)

1.2.3 กิจกรรมที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจกสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ อย่างไรก็ตามการพัฒนาเทคโนโลยี และการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกส่งผลให้เกิดกิจกรรมต่างๆที่ก่อให้เกิดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก หลังจากช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรมโดยเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1750 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงปี ค.ศ. 1750-2019 มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากถึง 47% ในขณะที่ก๊าซมีเทนและไนตรัสออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้น 156% และ 23% ตามลำดับ (Denchek, 2023) โดยกิจกรรมที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกมีรายละเอียดดังนี้

(1) ภาคการเกษตร

กิจกรรมการเกษตรเป็นกิจกรรมหลักของมนุษย์ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก โดยทั่วโลกมีพื้นที่การเกษตรประมาณ 32,000 ล้านไร่ หรือคิดเป็นประมาณ 40-50% ของพื้นโลก ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการทำการเกษตรได้แก่ ก๊าซมีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ (อบก., 2558) ก๊าซมีเทนจะเกิดเมื่อมีการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด เช่น จากการทำการปศุสัตว์โดยเกิดจากการย่อยอาหารของสัตว์ การหมักมูลสัตว์ รวมถึงการเพาะปลูกโดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกข้าวที่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการเตรียมแปลงนา ซึ่งจะต้องมีการขังน้ำในแปลงเพื่อย่อยสลายตอซังข้าว เป็นต้น ในขณะที่ก๊าซไนตรัสออกไซด์เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนที่มากเกินความจำเป็น สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคการเกษตรเกิดขึ้นเนื่องจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ และจากการเผาเศษซากพืชซากสัตว์ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการเกษตร

จากรายงานขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization: FAO) ได้ระบุว่าในช่วงปี พ.ศ. 2543-2564 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการเกษตรเพิ่มมากขึ้นถึง 14% (มกอช., 2566) สำหรับประเทศไทย (**รูปที่ 1.2.3-1**) พบว่าภาคการเกษตรปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 15.69% จากการปลดปล่อยทั้งหมดของประเทศ โดยการปลูกข้าวและการระเหยของไนโตรเจนจากดินก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุดเท่ากับ 51.28% และ 14.90% ตามลำดับ

(2) ภาคป่าไม้และการใช้ประโยชน์ที่ดิน

ภาคป่าไม้เป็นภาคที่มีความสำคัญเกี่ยวเนื่องกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากภาคป่าไม้เป็นแหล่งในการดูดซับและเก็บกักคาร์บอนไดออกไซด์ โดยต้นไม้จะสะสมคาร์บอนอยู่ในส่วนลำต้นมากที่สุด 49% รองลงมาคือส่วนรากและกิ่ง 27% และ 21% ตามลำดับ และสุดท้ายในส่วนใบจะมีการสะสมคาร์บอนน้อยที่สุด 3% นอกจากนั้นป่าไม้แต่ละประเภทจะมีความสามารถในการเก็บกักคาร์บอนเหนือพื้นดิน/ใต้พื้นดินได้แตกต่างกัน เช่น ป่าดิบเขาสามารถเก็บกักคาร์บอนเหนือพื้นดิน/ใต้พื้นดินเท่ากับ 20.94 และ 4.58 ตัน/ไร่ ในขณะที่ป่าเบญจพรรณจะเก็บกักคาร์บอนเหนือพื้นดิน / ใต้พื้นดินเท่ากับ 15.62 และ 4.54 ตัน/ไร่ (มูลนิธิไทยรักษ์ป่า, 2562) **รูปที่ 1.2.3-2** แสดงการเก็บกักคาร์บอนของป่าไม้แต่ละประเภทที่แตกต่างกัน

(3) ภาคการใช้พลังงานและการขนส่ง

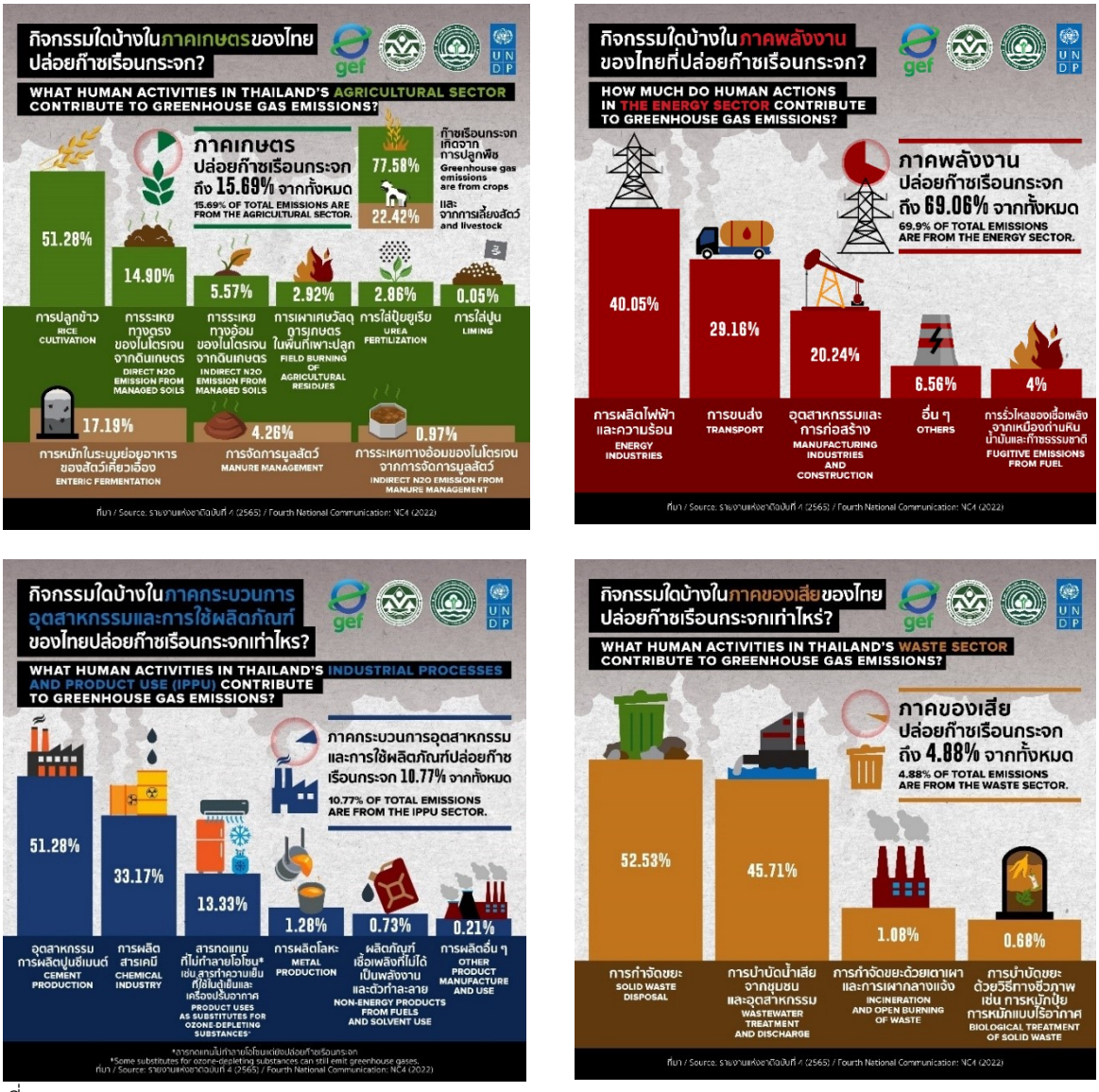
กิจกรรมที่เกี่ยวเนื่องกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศของภาคการใช้พลังงานและการขนส่ง ได้แก่ การผลิตกระแสไฟฟ้า การเผาไหม้เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมพลังงานและการคมนาคมขนส่งประเภทต่างๆ ได้แก่ การขนส่งทางอากาศ การขนส่งทางราง การขนส่งทางถนน และการขนส่งทางน้ำ โดยในการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ จากรายงานแห่งชาติฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2565) ได้มีการประเมินถึงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยและพบว่าภาคพลังงานมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด 69.06% โดยเมื่อพิจารณาในแต่ละส่วนพบว่ากิจกรรม 3 อันดับแรกที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด ได้แก่ การผลิตไฟฟ้าและความร้อน (40.05%) รองลงมา ได้แก่ การขนส่ง และอุตสาหกรรมและการก่อสร้าง ซึ่งมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 29.16% และ 20.24% ตามลำดับ (**รูปที่ 1.2.3-1**)

(4) ภาคอุตสาหกรรม

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบได้แก่ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง (Direct emission) ซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การใช้พลังงาน เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า และการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกิจกรรมการขนส่งภายในโรงงาน (2) การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิต เช่น การเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบต่างๆไปเป็นผลิตภัณฑ์ของโรงงานซึ่งจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางด้านเคมี และกายภาพส่งผลให้เกิดก๊าซเรือนกระจก (3) การจัดการน้ำเสียอุตสาหกรรมจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะระบบบำบัดทางชีวภาพ และ (4) การรั่วไหลของสารต่างๆ เช่นสารทำความเย็น และสารดับเพลิง เป็นต้น และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (Indirect emission) ได้แก่ การนำเข้าพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนจากภายนอกโรงงาน (อบก., 2562) **ตารางที่ 1.2.3-1** แสดงกิจกรรมประเภทต่างๆในภาคอุตสาหกรรมและก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้น และจาก**รูปที่ 1.2.3-1** แสดงให้เห็นว่าอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกในอัตราส่วนสูงสุด 51.28% เมื่อเปรียบเทียบกับอุตสาหกรรมประเภทอื่น

(5) ภาคของเสีย

อัตราส่วนของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคของเสียมีสัดส่วนที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับภาคส่วนอื่นๆ โดยภาคของเสียมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการในการกำจัดขยะประเภทต่างๆ และการบำบัดนำเสียแบบไร้อากาศ ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้น ได้แก่ ก๊าซมีเทนที่เกิดจากการฝังกลบขยะและการบำบัดน้ำเสีย และการเผาขยะที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนตัวอย่างเช่น สารประกอบจากพลาสติกก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสัดส่วนการเกิดก๊าซเรือนกระจกจากภาคของเสียของประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ 4.88% (**รูปที่ 1.2.3-1**) โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการจัดการขยะ (52.53%) รวมถึงการฝังกลบขยะที่ก่อให้เกิดก๊าซมีเทน การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการคัดแยก รวบรวม และขนส่งขยะมูลฝอยก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ รองลงมาได้แก่การบำบัดน้ำเสีย (45.71%) และการเผาขยะกลางแจ้ง (1.08%) ตามลำดับ



ที่มา: สผ. (2565)

รูปที่ 1.2.3-1 สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคส่วนต่างๆ



ที่มา: มูลนิธิไทยรักษ์ป่า (2562)

รูปที่ 1.2.3-2 การเก็บกักคาร์บอนของป่าแต่ละประเภท

ตารางที่ 1.2.3-1 ตัวอย่างกิจกรรมที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก

กิจกรรม	ชนิดก๊าซเรือนกระจก
การใช้พลังงาน	
-การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในหม้อไอน้ำ (Boiler)	CO_2, CH_4, N_2O
-การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ไอน้ำ	CO_2, CH_4, N_2O
-การเผาไหม้เชื้อเพลิงในยานพาหนะ	CO_2, CH_4, N_2O
-การเผาไหม้มวลชีวภาพหรือก๊าซชีวภาพ	CH_4, N_2O
การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิต	
-กระบวนการ Calcination ในการผลิตปูนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในวัตถุดิบ ที่ป้อนเข้าสู่หม้อเผาปูนซีเมนต์	CO_2
-กระบวนการเติม Carbon ในเตาหลอมเหล็ก	CO_2
การจัดการน้ำเสียอุตสาหกรรม	
-การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบบ่อหมักไร้อากาศ	CH_4
-การนำตะกอนหรือของเสียมาหมักทำสารปรับปรุงดิน	CH_4, N_2O
-การรวบรวมและเผาทำลายก๊าซชีวภาพ	CH_4

ที่มา: อบก. (2562)

1.3 กลไกการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ

ทรัพยากรน้ำอยู่ในทุกส่วนขององค์ประกอบของโลก ได้แก่ ชั้นบรรยากาศ พื้นดิน ทะเล และชั้นใต้ดิน การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปแบบต่างๆจากแหล่งหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่งเรียกว่าเป็นวัฏจักรของน้ำหรือวัฏจักรทางด้านอุทกวิทยา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศมีผลกระทบโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณและรูปแบบของน้ำในแต่ละแหล่งรายละเอียดดังนี้

(1) การเปลี่ยนแปลงของการระเหยและปริมาณฝน

อุณหภูมิของโลกที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลโดยตรงต่ออัตราการระเหยของน้ำ เมื่ออัตราการระเหยของน้ำเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝน หิมะ หรือลูกเห็บ (Precipitation) ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ของโลก ในบางพื้นที่อาจเกิดฝนตกหนักมากกว่าค่าเฉลี่ยปกติ ในขณะที่บางพื้นที่อาจประสบปัญหาความแห้งแล้ง ผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกได้มีการคาดการณ์ว่าในพื้นที่ที่อยู่บริเวณชายฝั่งอาจเกิดปริมาณฝนที่เพิ่มสูงมากขึ้น ในขณะที่บริเวณเขตแผ่นดินอาจพบกับความแห้งแล้ง นอกจากนั้นอุณหภูมิที่สูงขึ้นร่วมกับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นสำหรับพื้นที่ที่มีความชื้นและสารอาหารที่เหมาะสมกับพืช ส่งผลให้พืชมีกระบวนการเร่งการเจริญเติบโต และยังส่งผลต่อเนื่องให้พืชมีการคายน้ำเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช (NCAR, 2024)

(2) การเปลี่ยนแปลงของเมฆ

ลักษณะการเกิดเมฆและรูปแบบของเมฆส่งผลโดยตรงต่อสภาพอากาศของโลก เมฆบางชนิดจะช่วยปกป้องโลกจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ส่งผลให้พื้นผิวโลกมีอุณหภูมิที่ต่ำลง ตัวอย่างเช่น Stratus clouds เป็นเมฆที่มีลักษณะหนาอยู่ต่ำใกล้พื้นดิน และ Cumulus clouds มีลักษณะฟู ช่วยป้องกันรังสีจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นโลก (**รูปที่ 1.3-1**) ในขณะที่เมฆบางชนิดมีลักษณะที่ยอมให้รังสีของดวงอาทิตย์สามารถส่องผ่านลงมาสู่พื้นดินได้ง่าย แต่เมื่อเกิดการสะท้อนกลับของรังสีเมฆนั้นจะกักเก็บความร้อนไว้ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้น เช่น Cirrus clouds ซึ่งเป็นเมฆที่อยู่สูงจากพื้นผิวโลกประมาณ 20 กม. (**รูปที่ 1.3-1**) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการเกิดเมฆ NCAR (2024) ได้มีการระบุว่าแบบจำลองภูมิอากาศของโลกได้มีการคาดการณ์ถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเมฆในอนาคตอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปแบบดังกล่าวส่งผลต่อเนื่องให้เกิดอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการกักเก็บความร้อนของเมฆที่เปลี่ยนแปลงไป

(3) การเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์สุดขั้ว

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะสภาพอากาศ (Weather) ในหลายพื้นที่ทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดการเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์สุดขั้ว (Extreme events) ที่เกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงของทรัพยากรน้ำ อัตราการระเหยของน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้นในอากาศเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นปริมาณฝนที่ตกลงสู่พื้นดินทั้งในช่วงเวลาการเกิดฝนทั่วไปและการเกิดฝนเมื่อเกิดพายุในรูปแบบต่างๆจึงเพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดสถานการณ์น้ำท่วม ในขณะที่อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดความแห้งแล้งในบางพื้นที่ของโลก ส่งผลต่อเนื่องถึงการเพาะปลูกและการขาดแคลนน้ำใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคของมนุษย์

(4) การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล

การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลเกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยมีสาเหตุหลักที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การละลายของแผ่นน้ำแข็งหรือธารน้ำแข็ง โดยการละลายของแผ่นน้ำแข็งหรือธารน้ำแข็งส่งผลโดยตรงให้ระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น และยังส่งผลให้ปริมาณน้ำในลำน้ำเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งน้ำในแม่น้ำจะไหลลงสู่ทะเลส่งผลต่อเนื่องให้ระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้นอีกทางหนึ่ง จากหลักฐานการเปลี่ยนแปลงขนาดของธารน้ำแข็งอาร์คติกและธารนำแข็งกรีนแลนด์พบว่ามีขนาดที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงหลักฐานที่แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล นอกจากนั้นการขยายตัวของน้ำทะเลอันเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาตรของน้ำทะเลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเนื่องถึงบริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลที่มีความเสี่ยงอาจเกิดน้ำท่วมได้



Stratus clouds



Cumulus clouds

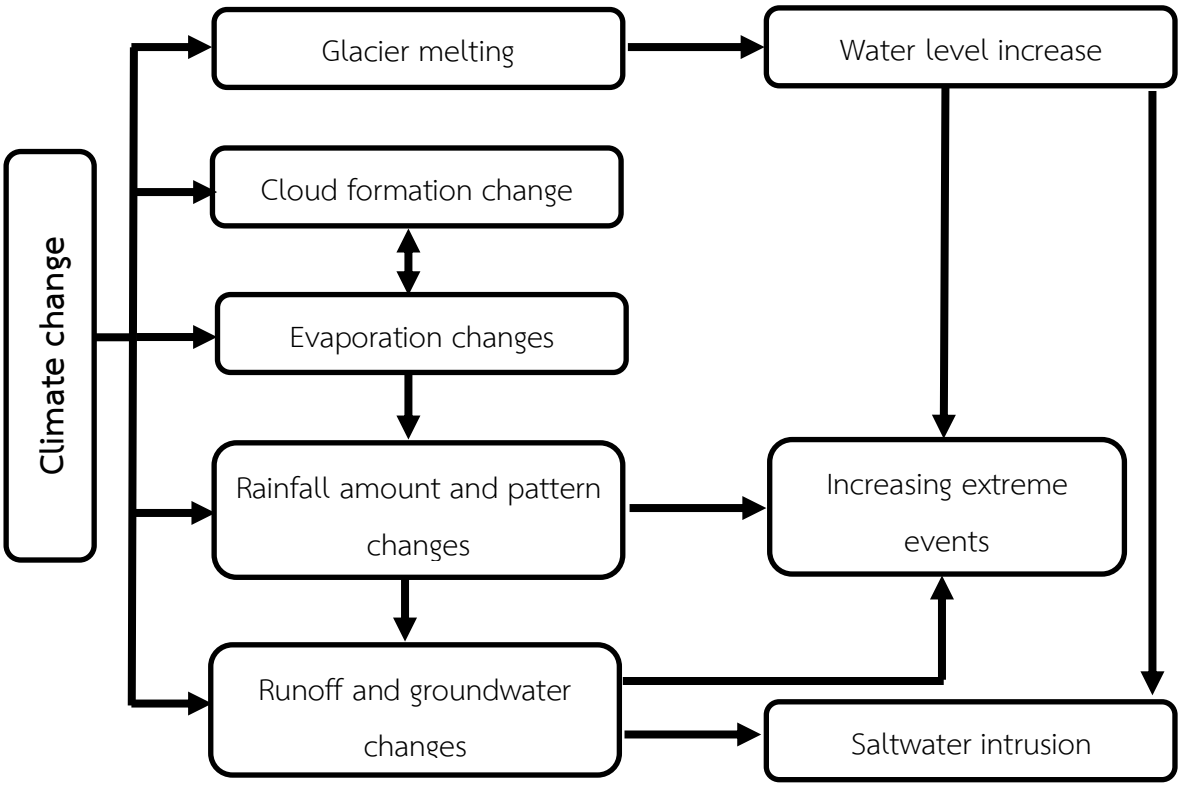


Cirrus clouds

รูปที่ 1.3-1 ลักษณะของเมฆแต่ละประเภท
ที่มา: NCAR (2024)

(5) การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน

จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเกิดเมฆ การเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบของการเกิดฝน รวมถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราการคายระเหย ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดนี้ส่งผลต่อเนื่องถึงปริมาณน้ำผิวดิน โดยในพื้นที่ที่อยู่ในเขตใกล้เคียงกับพื้นที่ปกคลุมด้วยธารน้ำแข็งมีความเสี่ยงที่ปริมาณน้ำท่าอาจมีปริมาณที่มากก่อให้เกิดเหตุการณ์อุทกภัยเนื่องด้วยการละลายของธารน้ำแข็ง ในขณะที่บางพื้นที่ได้รับผลกระทบจากปริมาณฝนที่ลดลงส่งผลให้ปริมาณน้ำผิวดินมีปริมาณที่ลดลงก่อให้เกิดภัยแล้ง นอกจากนั้นปริมาณน้ำใต้ดินยังได้รับผลกระทบโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน ปริมาณน้ำผิวดิน รวมถึงการระเหยที่เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในส่วนต่างๆดังกล่าวข้างต้นส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำที่ซึมผ่านดิน (Infiltration) และปริมาณน้ำที่เก็บกักในดินและไหลออกจากชั้นดินลงสู่แหล่งน้ำ **รูปที่ 1.3-2** สรุปรายละเอียดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำ



รูปที่ 1.3-2 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ

1.4 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำระดับโลก

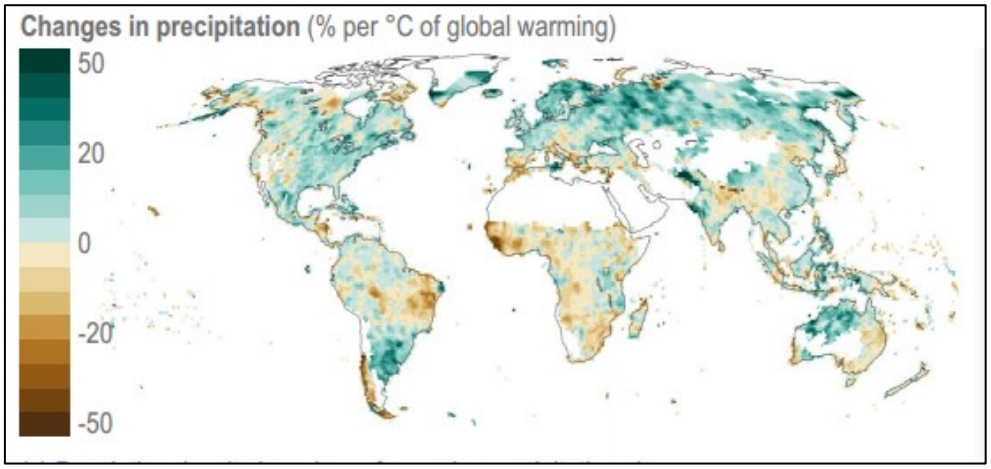
จากรายงานของ IPCC (2022) ได้ระบุว่ากิจกรรมของมนุษย์ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และได้ส่งผลต่อวัฏจักรอุทกวิทยาซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อความมั่นคงทางด้านน้ำ (Water security) การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อหลายพื้นที่บนโลกโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของทรัพยากรน้ำทั้งในเรื่องของปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มสูงขึ้น การขาดแคลนน้ำ เหตุการณ์สุดขั้วต่างๆ (Extreme event) ที่เกิดขึ้นหลายครั้งและมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น โดยจากรายงานดังกล่าวยังได้ระบุถึงความเป็นไปได้ในระดับสูง (High confidence) ของสถานการณ์ต่างๆที่มีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ตัวอย่างเช่น ตั้งแต่ในช่วงปี ค.ศ. 1950 เป็นต้นมาพบว่าในหลายพื้นที่ของโลกได้รับผลกระทบจากปริมาณฝนที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก มีประชากรมากกว่า 700 ล้านคนทั่วโลกอาศัยอยู่ในพื้นที่ที่มีปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีที่เพิ่มสูงขึ้น เช่น พื้นที่ทางตะวันตกของยุโรป ประเทศจีน ญี่ปุ่น บราซิล และออสเตรเลีย เป็นต้น นอกจากนั้นพื้นที่ด้านเหนือของเส้นศูนย์สูตรยังพบว่าปริมาณน้ำในลำน้ำมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยทางด้านสภาพภูมิอากาศเป็นสำคัญ

ในขณะที่ประชากรอีกมากกว่า 700 ล้านคนประสบกับปัญหาในเรื่องของการขาดแคลนน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านการเกษตรในหลายพื้นที่ทั่วโลก ในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1983-2009 พบว่าพื้นที่ 3 ใน 4 ของพื้นที่เกษตรกรรมทั่วโลกประสบปัญหาผลผลิตที่ลดลง เนื่องด้วยความแห้งแล้งทางสภาพภูมิอากาศ และในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1970-2019 พบว่าเหตุการณ์ภัยพิบัติต่างๆที่เกิดขึ้น 7% ของเหตุการณ์ทั้งหมดเกี่ยวเนื่องกับการขาดแคลนน้ำ โดยที่ 34% ของผู้เสียชีวิตจากเหตุการณ์ภัยพิบัติเกี่ยวเนื่องกับการขาดแคลนน้ำเกิดขึ้นในทวีปแอฟริกา ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศร่วมกับการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและมลพิษทางด้านน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมโทรมของระบบนิเวศน้ำจืด ซึ่งส่งผลต่อเนื่องถึงสิ่งมีชีวิตหลายสายพันธุ์ และก่อให้เกิดอุบัติการณ์ของการระบาดของโรคต่างๆเพิ่มมากขึ้น (Caretta et al., 2022)

1.4.1 การเปลี่ยนแปลงทางด้านอุทกวิทยาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากอดีตถึงปัจจุบัน

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบโดยตรงต่อวัฏจักรอุทกวิทยาในระดับโลก Caretta et al., (2022) ได้มีการระบุถึงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจากข้อมูลการตรวจวัดภูมิอากาศที่ได้จากสถานีตรวจวัด จากเรดาห์ตรวจวัดอากาศ รวมถึงการตรวจวัดโดยดาวเทียม ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบของการเกิดฝนทั่วโลกมีการเปลี่ยนแปลง (**รูปที่ 1.4.1-1**) โดยพบว่าในบางพื้นที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนรายปีและรายฤดูกาล ในขณะที่บางพื้นที่มีปริมาณฝนดังกล่าวลดลง ในหลายพื้นที่ยังพบปริมาณฝนตกหนัก และในอีกหลายพื้นที่พบเหตุการณ์ทั้งปริมาณฝนที่ตกหนักและการขาดแคลนปริมาณฝน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาของการเกิดปริมาณฝนตกหนัก และยังพบภาวะแล้งในระหว่างช่วงดังกล่าว **ตารางที่ 1.4.1-1** แสดงพื้นที่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในแต่ละสถานการณ์ (Caretta et al., 2022)

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนร่วมกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration) ซึ่งการคายระเหยของน้ำนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพภูมิอากาศแล้ว ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ได้แก่ ลักษณะสภาพพื้นที่ การใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงลักษณะของระบบนิเวศผิวพื้น โดยการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เกษตรกรรมรวมถึงพื้นที่ป่าไม้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าของการคายระเหย ในช่วงระหว่างปี 1980s จนถึงช่วงต้นของ 2010s มีการเพิ่มขึ้นของอัตราการคายระเหยอยู่ระหว่าง 0.5-1.5 มม./ปี



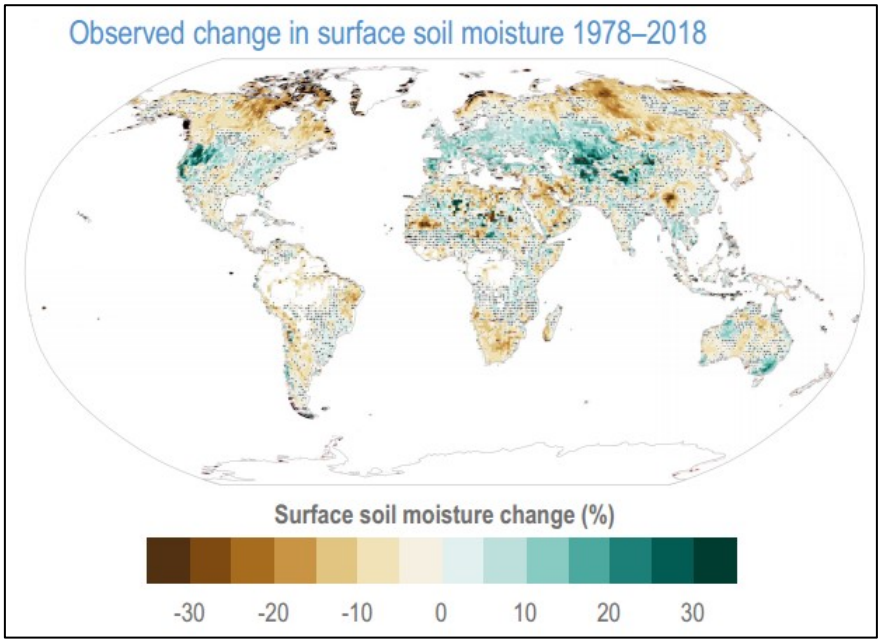
ที่มา: Caretta et al. (2022)

รูปที่ 1.4.1-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเฉลี่ยรายปี (%) ช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1891-2019

ตารางที่ 1.4.1-1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนของแต่ละพื้นที่

รูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน	พื้นที่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง
การเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนตกหนัก (Heavy precipitation increase)	อเมริกาเหนือ, พื้นที่ส่วนใหญ่ของยุโรป, พื้นที่ส่วนใหญ่ของอินเดีย บางส่วนของเอเชียเหนือและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้, พื้นที่ด้านใต้ของทวีปอเมริกาใต้, พื้นที่ด้านใต้ของแอฟริกา และพื้นที่ส่วนเหนือ กลาง และตะวันตกของออสเตรเลีย
การลดลงของปริมาณฝน (Heavy precipitation decrease)	ตะวันออกของทวีปออสเตรเลีย, ตะวันออกเฉียงเหนือของอเมริกาใต้ และตะวันตกของแอฟริกา
การเพิ่มขึ้นของจำนวนวันที่ไม่มีฝน (Consecutive dry days increase)	พื้นที่ส่วนใหญ่ด้านตะวันตก ตะวันออก และด้านใต้ของแอฟริกา, ตะวันออกและตะวันตกเฉียงใต้ของอเมริกาใต้ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้
การลดลงของจำนวนวันที่ไม่มีฝน (Consecutive dry days increase)	ด้านเหนือของทวีปอเมริกา

การเปลี่ยนแปลงของการคายระเหยข้างต้นร่วมกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนและกิจกรรมของมนุษย์ในเรื่องของการชลประทาน ส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินและความแห้งแล้งบริเวณพื้นผิวดิน ค่าความชื้นของดินในหลายพื้นที่ทั่วโลกซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยการใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลด้วยดาวเทียม (Satellite remote sensing) พบว่าในช่วงหลังของช่วงปี 1970s จนถึงช่วงหลังของปี 2010s มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินเพิ่มขึ้น-ลดลง ในแต่ละพื้นที่มากถึง 20% (**รูปที่ 1.4.1-2**)



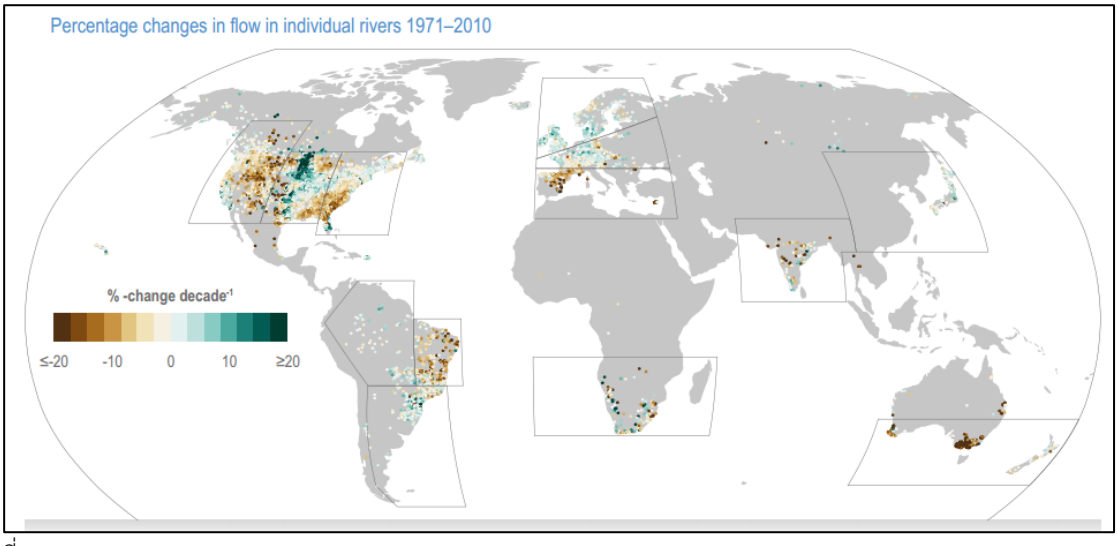
ที่มา: Caretta et al. (2022)

รูปที่ 1.4.1-2 การเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยความชื้นในดินรายปีที่ระดับ 0-5 ซม. ช่วงปี ค.ศ. 1978-2018

พื้นที่ที่มีน้ำแข็งปกคลุมเป็นพื้นที่ที่มีความอ่อนไหวและเปราะบางเป็นอย่างสูงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พื้นที่ที่มีน้ำแข็งปกคลุมประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ หิมะ (Snow) ธารน้ำแข็ง (Glacier) และ ชั้นดินเยือกแข็ง (Permafrost) ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวกำลังละลายตั้งแต่ในช่วงปลายศตวรรษที่ 20 จนปัจจุบัน ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศในพื้นที่บริเวณช่วงละจิจูดในระดับกลาง-สูง และพื้นที่บริเวณเทือกเขา

ปริมาณฝน อุณภูมิ และการคายระเหยที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อเนื่องถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในลำน้ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถเห็นได้เมื่อพิจารณาในแต่ละส่วนของภูมิภาคบนโลก ตัวอย่างดัง**รูปที่ 1.4.1-3** แต่ยังไม่สามารถระบุได้ถึงการเปลี่ยนแปลงในระดับค่าเฉลี่ยของโลก ปริมาณฝนที่เปลี่ยนแปลงส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในลำน้ำขนาดใหญ่ในช่วงปี ค.ศ. 1950-2010 บริเวณด้านเหนือของทั้งทวีปเอเชียและทวีปยุโรป ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในลำน้ำในพื้นที่ขั้วโลกยังเกี่ยวเนื่องกับการละลายของพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยน้ำแข็งอีกด้วย

ถึงแม้ว่าปริมาณน้ำในลำน้ำจะเกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ แต่ในบางพื้นที่ยังพบว่ากิจกรรมของมนุษย์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำ โดยจาก 40 ลุ่มน้ำหลักของโลกมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในลำน้ำที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศประมาณ 75% และพบว่าเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ 25% นอกจากนั้นในพื้นที่บริเวณตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศยุโรปพบว่า การเปลี่ยนแปลงของการใช้ประโยชน์ที่ดินและความต้องการปริมาณน้ำเพื่อการชลประทานเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลให้ปริมาณน้ำในลำน้ำมีปริมาณลดลง

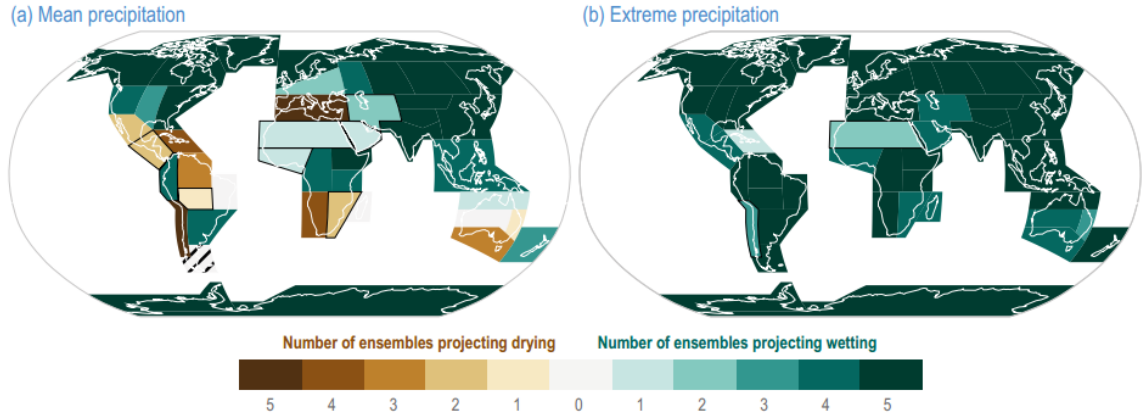


ที่มา: Caretta et al. (2022)

รูปที่ 1.4.1-3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในลำน้ำในแต่ละแม่น้ำสายหลัก ในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1971-2010

1.4.2 การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงทางด้านอุทกวิทยาเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต

จากข้อมูลการตรวจวัดทางด้านสภาพภูมิอากาศและอุทกวิทยาด้วยวิธีการต่างๆจากช่วงอดีตถึงปัจจุบันในหัวข้อข้างต้นแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านปริมาณและรูปแบบของปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณฝน ปริมาณน้ำในลำน้ำ การคายระเหย เป็นต้น นอกจากการประเมินเหตุการณ์ที่ผ่านมาแล้วยังได้มีการคาดการณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสภาพทางอุทกวิทยาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCM) โดยพบว่าในอนาคตหากไม่มีมาตรการลดระดับของก๊าซเรือนกระจกอย่างจริงจัง อุณหภูมิของโลกที่เพิ่มสูงขึ้นจะเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อวัฏจักรอุทกวิทยาทั้งในระดับโลกและระดับภูมิภาค รวมถึงการเพิ่มขึ้นของเหตุการณ์สุดขั้วภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบต่างๆ (รายละเอียดดังบทที่ 3) ภาพฉายของปริมาณฝนเฉลี่ยรายปี (Projected annual mean precipitation) จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นรูปธรรมในหลายพื้นที่ของโลก โดยที่จะมีปริมาณฝนที่เพิ่มขึ้นและลดลงเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้น 1.5°C ตัวอย่างเช่น พื้นที่ Sahel ทวีปเอเชีย รวมถึงบางส่วนของกรีนแลนด์ แอนตาร์กติกา และพื้นที่ทางเหนือของอเมริกาเหนือจะมีปริมาณฝนเพิ่มขึ้นประมาณ 20-30% ในขณะที่พื้นที่ของอเมริกาใต้และทางใต้ของแอฟริกาจะมีปริมาณฝนที่ลดลง นอกจากนั้นยังได้มีการคาดการณ์ถึงปริมาณฝนตกหนักที่เพิ่มมากขึ้น (**รูปที่ 1.4.2-1**) ควบคู่ไปกับช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้นของการเกิดการขาดแคลนน้ำ



ที่มา: Caretta et al. (2022)

รูปที่ 1.4.2-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีและการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนสูงสุดรายวันที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 2°C (Multi-model ensembles)

การฉายภาพอนาคตของการคายระเหยพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝน ปริมาณความชื้นในดิน ร่วมกับการคายน้ำของพืชที่ลดลงเนื่องด้วยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของการคายระเหยมีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ที่ค่อนข้างสูง เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละพื้นที่และยังคงไม่สามารถสรุปผลกระทบในระดับโลกได้อย่างชัดเจน สำหรับภาพฉายของค่าความชื้นในดินพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเมื่อระดับอุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาในกลุ่มของ CMIP6 (รายละเอียดดังบทที่ 3) พบว่าค่าปริมาณความชื้นของดินจะลดลง 40% เมื่ออุณหภูมิของโลกเพิ่มขึ้น 4°C ในพื้นที่ของอเมซอน พื้นที่ทางใต้ของแอฟริกา และพื้นที่ทางตะวันตกของทวีปยุโรป

สำหรับภาพฉายของปริมาณน้ำในลำน้ำพบว่าจะเกิดขึ้นมากในบริเวณพื้นที่ที่มีหิมะและธารน้ำแข็งปกคลุม การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในลำน้ำจะพบได้ในหลายพื้นที่ทั่วโลกเมื่ออุณหภูมิโลกเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่ทางตอนเหนือของโลก และพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำในลำน้ำลดลง ได้แก่ พื้นที่ในแถบเมดิเตอเรเนียนและทางใต้ของแอฟริกา และหากอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นสูง 4°C พื้นที่ประมาณร้อยละ 10 ของพื้นที่ทั่วโลกจะประสบปัญหาการเพิ่มขึ้นและลดลงของปริมาณน้ำในลำน้ำอย่างรุนแรงและมีนัยสำคัญ (Caretta et al., 2022)

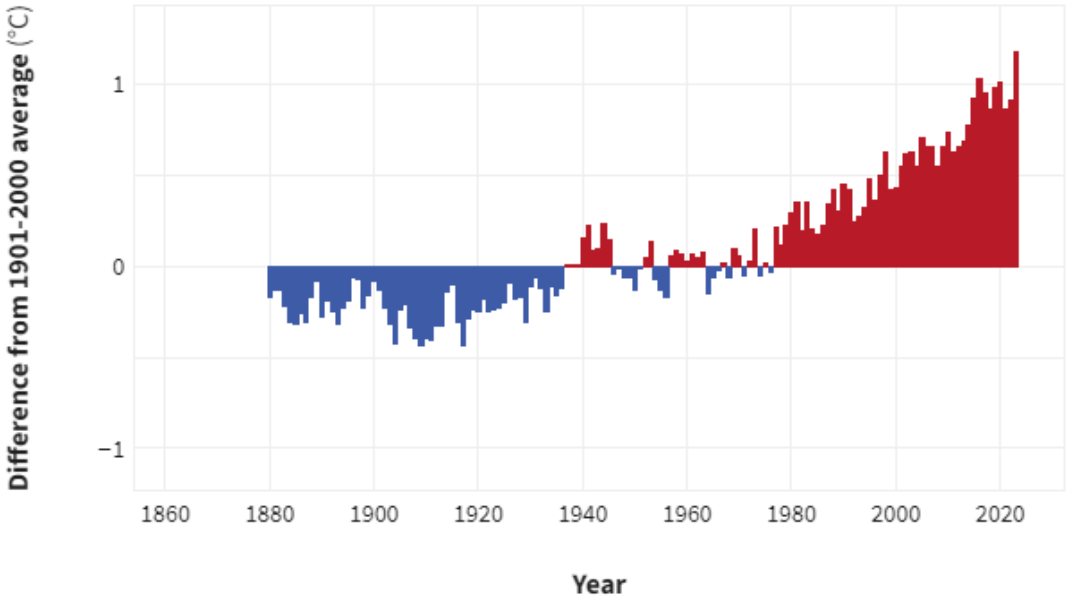
1.4.3 หลักฐานการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

จากนิยามของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (หัวข้อ 1.1) ได้ระบุถึงลักษณะอากาศหรือองค์ประกอบต่างๆที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเวลาที่ยาวนาน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกจากสถานการณ์ภาวะโลกร้อนได้ถูกบันทึกไว้โดยหลายหน่วยงาน โดยมีหลายเหตุการณ์ที่

แสดงให้เห็นถึงลักษณะสภาพอากาศของโลกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมากนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รายละเอียดดังนี้

(1) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโลกเป็นหลักฐานการเปลี่ยนแปลงทางด้านสภาพภูมิอากาศที่ชัดเจน และมีการนำข้อมูลในเรื่องของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกไปใช้เป็นตัวกำหนดทางด้านนโยบายเพื่อผลักดันให้เกิดการป้องกันการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นประมาณ 0.06 °C ในทุก 10 ปีตั้งแต่ปี ค.ศ. 1850 และมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ปี ค.ศ. 1982 ประมาณ 0.20 °C นอกจากนั้นยังได้มีการระบุว่าปี ค.ศ. 2023 เป็นปีที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกมีค่าสูงที่สุดนับตั้งแต่ได้มีการบันทึกไว้เมื่อปี ค.ศ. 1850 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในช่วงศตวรรษที่ 20 (ค.ศ.1901-2000) ที่มีค่าเท่ากับ 13.9 °C พบว่า ปี ค.ศ. 2023 มีอุณหภูมิเฉลี่ยโลกสูงขึ้นมากกว่า 1.18 °C และเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงก่อนปฏิวัติอุตสาหกรรม (ค.ศ. 1850-1900) พบว่าปี ค.ศ. 2023 มีอุณหภูมิเฉลี่ยโลกสูงขึ้นมากกว่า 1.35 °C และช่วงปีที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยโลกสูงที่สุดได้แก่ช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (ค.ศ.2014-2023) (Lindsey and Dahlman, 2024) **รูปที่ 1.4.3-1** แสดงความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยโลกเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยช่วงศตวรรษที่ 20 (ค.ศ. 1901-2000) ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยโลกเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมากหลังจากปี ค.ศ. 2000



ที่มา: Lindsey and Dahlman (2024)

รูปที่ 1.4.3-1 ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยโลกรายปีเปรียบเทียบกับช่วงศตวรรษที่ 20 (ค.ศ. 1901-2000)

(2) การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล

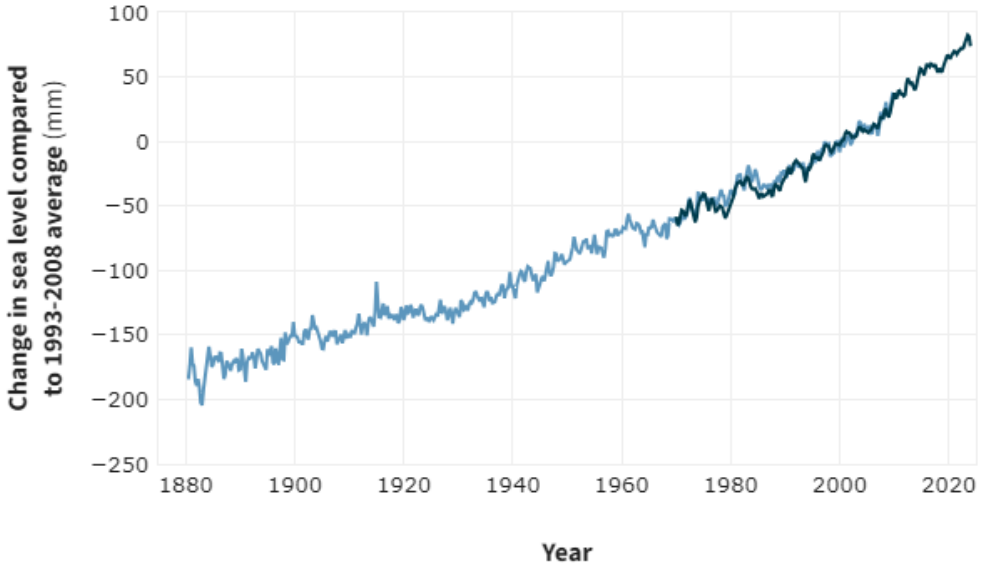
ระดับน้ำทะเลที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการละลายของธารน้ำแข็งร่วมกับอุณหภูมิของน้ำทะเลที่เพิ่มสูงขึ้น โดยธารน้ำแข็งในพื้นที่กรีนแลนด์ลดลงประมาณ 34 พันล้านตันต่อปี ในช่วงปี ค.ศ. 1992-2001 และมีการลดลงที่เพิ่มมากขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 2012-2016 เท่ากับ 247 พันล้านตันต่อปี ในขณะที่พื้นที่บริเวณแอนตาร์กติกมีการลดลงของธารน้ำแข็งประมาณ 51 พันล้านตันต่อปีในช่วงปี ค.ศ. 1992-2001 และเพิ่มขึ้นเป็น 199 พันล้านตันต่อไปในช่วงปี ค.ศ. 2012-2016 **รูปที่ 1.4.3-2** แสดงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ธารน้ำแข็งบริเวณพื้นที่อลาสก้าจากช่วงปี ค.ศ. 1917 และปี ค.ศ. 2005

การละลายของธารน้ำแข็งส่งผลโดยตรงต่อระดับน้ำทะเลที่เพิ่มสูงขึ้น โดยระดับน้ำทะเลเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 21-24 ซม. ตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1880 โดยในช่วงปี ค.ศ. 2006-2015 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลอย่างรวดเร็วประมาณ 3.6 มม./ปี ซึ่งเพิ่มขึ้นจากช่วงก่อนหน้าที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นระดับน้ำทะเลอยู่ที่ 1.4 มม./ปี และในปี ค.ศ. 2022 ระดับน้ำทะเลมีค่า 101.2 มม. ซึ่งเป็นระดับที่มีค่าสูงที่สุดจากการตรวจวัดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1993 (Lindsey, 2022) **รูปที่ 1.4.3-3** แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของช่วงปี ค.ศ. 1993-2008



ที่มา: Lindsey (2022)

รูปที่ 1.4.3-2 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ธารน้ำแข็งของ Pedersen Glacier ใน Aialik Bay, Alaska's Kenai Mountain ในปี 1971 และ 2005



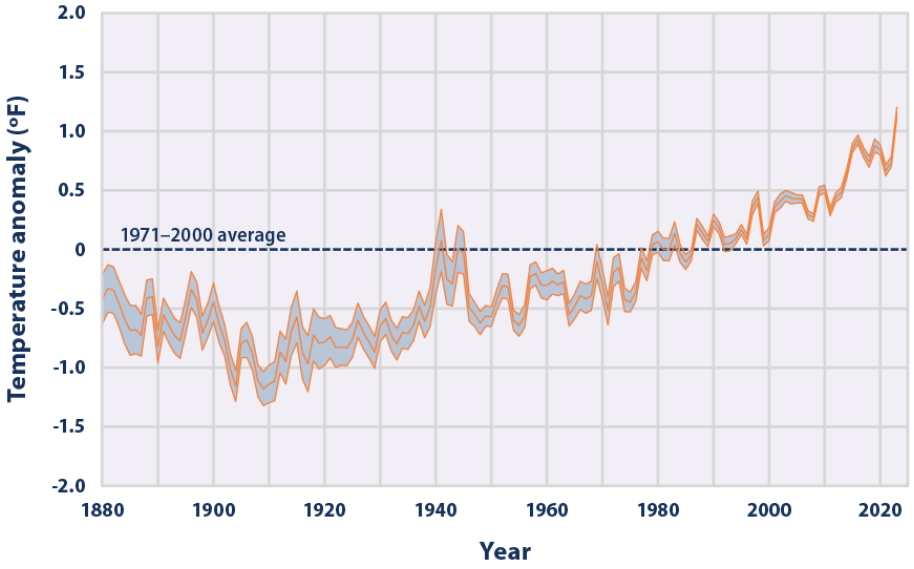
ที่มา: Lindsey (2022)

รูปที่ 1.4.3-3 การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลรายปีเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 1993-2008

(3) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวน้ำทะเล

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลเป็นปัจจัยหนึ่งที่ชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก อุณหภูมิผิวน้ำทะเลมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงศตวรรษที่ 20 และยังคงเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 0.14 °F และจากการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิผิวน้ำทะเลอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1880 ถึงปัจจุบัน พบว่าในปี ค.ศ. 2023 อุณหภูมิผิวน้ำทะเลมีค่าการเพิ่มขึ้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาที่ผ่านมา (**รูปที่ 1.4.3-4**)

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลส่งผลโดยตรงต่อระบบนิเวศทางทะเล เช่น ส่งผลต่อการย้ายถิ่นฐานและการขยายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในทะเล นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลเป็นระยะเวลายาวนานยังส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงของระบบการหมุนเวียนของมหาสมุทร (Ocean circulation) ซึ่งส่งผลต่อปริมาณแร่ธาตุและธาตุอาหารของสิ่งมีชีวิต การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลยังส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสภาพอากาศ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของไอน้ำบริเวณทะเลส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณฝน อาจเกิดฝนตกหนักในบางพื้นที่ และก่อให้เกิดความแห้งแล้งในบางพื้นที่ (EPA (a), 2024) **รูปที่ 1.4.3-4** แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลเฉลี่ยทั่วโลกรายปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1880-2023 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 1971-2000 โดยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



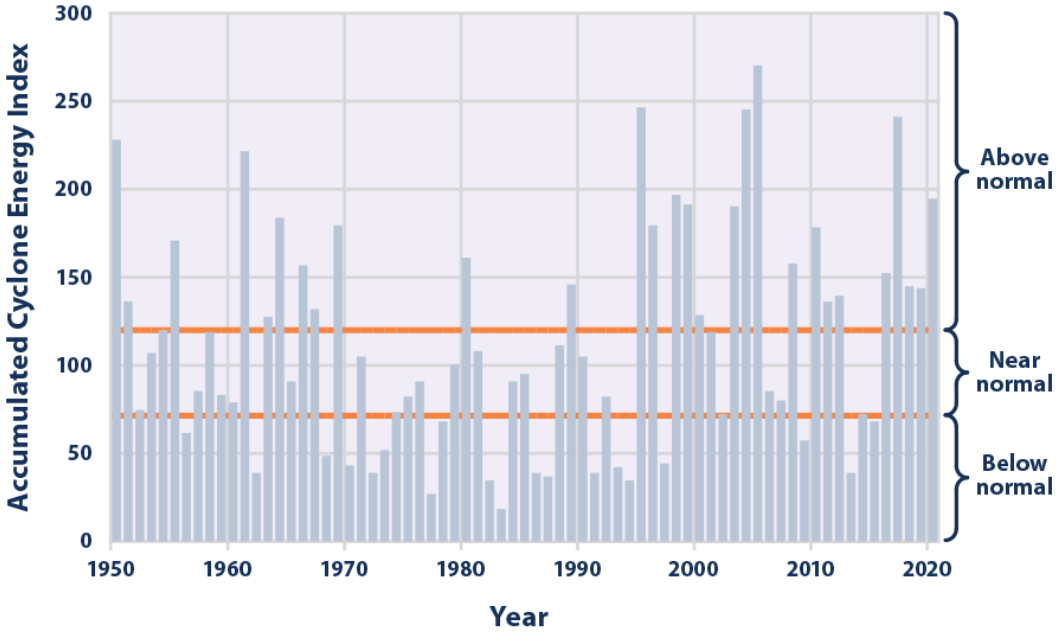
ที่มา: EPA (a) (2024)

รูปที่ 1.4.3-4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลเฉลี่ยทั่วโลกรายปี เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 1971-2000

(4) การเพิ่มขึ้นของเหตุการณ์สุดขั้ว

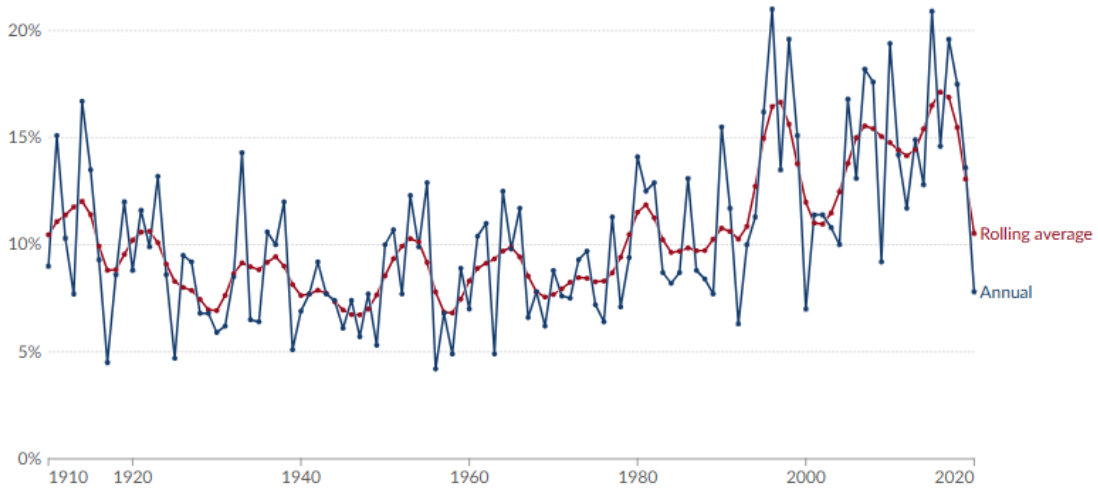
เหตุการณ์สุดขั้วหมายถึงเหตุการณ์ทางด้านสภาวะอากาศที่มีความรุนแรงผิดปกติและเมื่อเกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ สิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก เช่น การเกิดปริมาณฝนตกหนักรุนแรง การเกิดพายุหรือทอร์นาโด การเกิดคลื่นความร้อน และความแห้งแล้งที่ต่อเนื่องยาวนานขึ้น เป็นต้น สถานการณ์สุดขั้วเกิดขึ้นเนื่องจากความแปรปรวนของสภาพอากาศซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดย RSS (2024) ได้มีการระบุถึงการกำหนดเหตุการณ์สุดขั้วซึ่งสามารถกำหนดได้ในหลายรูปแบบ เช่น ค่าที่กำหนดขึ้นจากการประเมินถึงผลกระทบที่รุนแรง เช่น อุณหภูมิที่สูงเกิน 40 °C ส่งผลกระทบต่อประชาชนในแถบพื้นที่ที่อุณหภูมิส่วนใหญ่อยู่ในระดับต่ำหรือค่าที่สูงหรือต่ำที่โอกาสเกิดขึ้นมีน้อยมาก เช่น โอกาสการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวมีเพียง 5% จากข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้ในอดีต หรือค่าสูงที่สุดที่เคยเกิดขึ้นมาเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่มีมาในอดีต เป็นต้น

ตัวอย่างการเกิดเหตุการณ์สุดขั้ว ได้แก่ ความรุนแรงของการเกิดพายุไซโคลนในแถบมหาสมุทรแอตแลนติก (ความรุนแรง ช่วงเวลา และความถี่ของการเกิดพายุ) แสดงดัง**รูปที่ 1.4.3-5** โดยจะเห็นได้ว่าความรุงแรงของพายุไซโคลนที่เกิดขึ้นหลังจากปี ค.ศ. 1995 – 2020 มีความรุนแรงที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงอดีตที่ผ่านมา และแนวโน้มของเหตุการณ์สุดขั้ว เช่น ปริมาณฝนสูงสุดของแต่ละวัน (Extreme one-day precipitation) ในประเทศสหรัฐอเมริกามีสัดส่วนเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1995 – 2020 เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาในอดีต (**รูปที่ 1.4.3-6**)



ที่มา: EPA (b) (2024)

รูปที่ 1.4.3-5 ดัชนีพลังงานสะสม Accumulated Cyclone Energy Index (ACE) ในแถบมหาสมุทรแอตแลนติก



ที่มา: Ritchie (2024)

รูปที่ 1.4.3-6 ปริมาณฝนสูงสุดรายวัน (Extreme one-day precipitation) ในประเทศสหรัฐอเมริกา

1.5 การดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของหน่วยงานต่างๆ

เนื่องด้วยการแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจำเป็นต้องได้รับความร่วมมือจากหลายประเทศทั่วโลก จึงได้มีหน่วยงานระดับนานาชาติที่เป็นหน่วยงานหลักในการสร้างความร่วมมือค้นคว้าและศึกษาวิจัยเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น ได้แก่ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 กลุ่มหลักได้แก่ การศึกษาด้านวิทยาศาสตร์พื้นฐาน การศึกษาด้านผลกระทบ ความเปราะบาง และการปรับตัวทางด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการศึกษาทางด้านมาตรการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ นอกจากนั้นยังมีหน่วยงานนานาชาติอื่นที่เกี่ยวข้องตัวอย่างเช่น United Nations Environment Programme (UNEP) และ World Meteorological Organization (WMO) โดยมีรายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก)

นอกจากนั้นประเทศไทยยังเป็นประเทศหนึ่งที่ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเช่นเดียวกันกับอีกหลายประเทศ ดังนั้นประเทศไทยจึงได้มีการกำหนดนโยบายเพื่อรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและมีหน่วยงานหลักที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก เป็นต้น (ภาคผนวก ก) และประเทศไทยยังได้เข้าเป็นหนึ่งในประเทศที่ให้สัตยาบันต่ออนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และร่วมเป็นภาคีของพิธีสารเกียวโตและความตกลงปารีส (รายละเอียดดังภาคผนวก ก) โดยได้มีการดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในหลายส่วน

1.5.1 ด้านนโยบายและแผนระดับชาติ

การดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยได้ถูกนำเข้าสู่นโยบายในระดับประเทศ โดยได้มีแผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2558-2593 เมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 ซึ่งมีการแบ่งเป้าหมายของแผนออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ เป้าหมายระยะสั้น (ปีเป้าหมาย พ.ศ. 2559), ระยะกลาง (ปีเป้าหมาย พ.ศ. 2563) และระยะยาว (ปีเป้าหมาย พ.ศ. 2593) และมีแนวทางการดำเนินงาน 3 เรื่องหลักได้แก่ การดำเนินงานด้านการปรับตัวต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, แนวทางการดำเนินงานด้านการลดก๊าซเรือนกระจกและส่งเสริมการเติบโตที่ปล่อยคาร์บอนต่ำ และ การสร้างขีดความสามารถด้านการบริหารจัดการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รายละเอียด**รูปที่ 1.5.1-1**

1.5.2 การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก

ประเทศไทยได้มีการจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกตามพันธกรณีของอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยได้มีการจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก 5 ภาคส่วน ได้แก่ ภาคพลังงาน ภาคกระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ ภาคการเกษตร ภาคป่าไม้และการใช้ประโยชน์ที่ดิน และภาคของเสีย โดยจะถูกรายงานในรายงานแห่งชาติ (National Communication: NC) และรายงานความก้าวหน้ารายสองปี (Biennial Update Report: BUR)

นอกจากนั้นในช่วงก่อนปี พ.ศ. 2563 ยังได้มีการดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมของประเทศ (Nationally Appropriate Mitigation Actions: NAMAs) โดยได้ระบุว่าประเทศไทยจะลดก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 7-20 จากกรณีปกติภายในปี พ.ศ. 2563 จากสาขาพลังงานและขนส่ง และระยะหลังปี พ.ศ. 2563 ได้ดำเนินการภายใต้การมีส่วนร่วมที่ประเทศกำหนด (Nationally Determined Contribution: NDC) โดยกำหนดเป้าหมายที่ร้อยละ 20-25 จากกรณีปกติภายในปี พ.ศ. 2573 จากสาขาพลังงานและขนส่ง, กระบวนการทางอุตสาหกรรมและผลิตภัณฑ์ และการจัดการของเสีย (พิเชษฐ์, 2564)



ที่มา: ดัดแปลงจาก สผ. (2558)

รูปที่ 1.5.1-1 แนวทางการดำเนินงานภายใต้แผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

1.5.3 การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ประเทศไทยได้รับผลกระทบในหลายด้านจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากการที่อุณหภูมิโลกเพิ่มสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น น้ำท่วม ภัยแล้ง ภัยธรรมชาติ และการเกิดเหตุการณ์สุดขั้วแบบต่อเนื่องดังนั้น สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจึงได้มีการจัดทำแผนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (National Adaptation Plan: NAP) ซึ่งมีสาขาที่ครอบคลุมทั้งสิ้น 6 สาขา (การจัดการน้ำ, อุทกภัย, ภัยแล้ง / การเกษตรและความมั่นคงทางอาหาร / การท่องเที่ยว / สาธารณสุข / การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ / การตั้งถิ่นฐานและความมั่นคงของมนุษย์ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับแผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยในแผนการปรับตัวฯดังกล่าวจะมีการระบุถึงเป้าหมาย ตัวชี้วัด และแนวทางในการดำเนินการของแต่ละสาขา

สรุปบทที่ 1
แนวคิดพื้นฐานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

- การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) คือความแปรปรวนของสภาพอากาศที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อมนอกเหนือจากการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติเกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนาน ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม แตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Weather change) ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของลักษณะอากาศที่เป็นอยู่ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ

- ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) เป็นปรากฏการณ์ตามธรรมชาติที่ช่วยควบคุมอุณหภูมิโลกให้ไม่ต่ำเกินไป อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต โดยมีกระบวนการดูดซับรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกของก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) ในขณะที่ภาวะโลกร้อน (Global warming) เป็นปรากฏการณ์ที่มีปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศที่มากเกินไป ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้น

- ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), มีเทน (CH_4), ไนตรัสออกไซด์ (N_2O),ก๊าซที่มีสารประกอบของคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) โดยก๊าซที่มีสารประกอบของ CFC มีค่าศักยภาพที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential: GWP) สูงที่สุด (6,630-23,500) รองลงมาคือก๊าซไนตรัสออกไซด์ (265)

- กิจกรรมของมนุษย์ที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบ่งออกได้เป็น 5 กิจกรรมหลัก ได้แก่ ภาคการเกษตร (จากการทำปศุสัตว์ การปลูกข้าว การใช้ปุ๋ยที่มากเกินความจำเป็น) ภาคการใช้พลังงานและการขนส่ง (จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล, การผลิตไฟฟ้า, การขนส่งในรูปแบบต่างๆ) ภาคอุตสาหกรรม (การเผาไหม้เชื้อเพลิง, ปฏิกิริยาจากกระบวนการผลิต, การรั่วไหลของสาร) ภาคของเสีย (การกำจัดขยะ, การบำบัดน้ำเสีย, การใช้เครื่องจักรในกระบวนการจัดการขยะ) และภาคป่าไม้และการใช้ประโยชน์ที่ดิน (ดูดซับและเก็บกักคาร์บอนไดออกไซด์)

- การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณและรูปแบบการเกิดฝน โดยส่งผลกระทบต่อการระเหยของน้ำ การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการเกิดเมฆ การเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์สุดขั้ว การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล และการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน

- การเปลี่ยนแปลงทางด้านอุทกวิทยาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่น การเพิ่มขึ้นของปริมาณฝนตกหนัก การลดลงของปริมาณฝน การเพิ่มขึ้นของจำนวนวันที่ไม่มีฝน และการลดลงของจำนวนวันที่ไม่มีฝน เป็นต้น

- หลักฐานของสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก ได้แก่ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยโลก เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงก่อนการปฏิวัติอุตสาหกรรม (1850-1900) มากกว่า 1.35 °C ในปี 2023 อัตราการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล (1.4 มม./ปี) อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณภูมิผิวน้ำทะเล (0.14 °F) และการเพิ่มขึ้นของเหตุการณ์สุดขั้ว (Extreme event)

- ประเทศไทยมีแผนระดับชาติที่เกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่สำคัญ ได้แก่ แผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2558-2593 โดยมุ่งเน้น 3 เรื่องเป็นสำคัญ ได้แก่ การปรับตัวต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แนวทางการดำเนินงานด้านการลดก๊าซเรือนกระจกและส่งเสริมการเติบโตที่ปล่อยคาร์บอนต่ำ และการสร้างขีดความสามารถด้านการบริหารจัดการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม

1. จงอธิบายกระบวนการของชั้นบรรยากาศในสภาวะธรรมชาติและสภาวะที่ก่อให้เกิดสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบอยู่ในปัจจุบัน

2. จงอธิบายพร้อมทั้งยกตัวอย่างเพื่อให้เข้าใจถึงความแตกต่างของปรากฏการณ์เรือนกระจกและภาวะโลกร้อน

3. จากกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (UNFCCC) จงเลือกอภิปรายโดยการยกตัวอย่างประกอบสิ่งที่ประเทศไทยต้องดำเนินการตามพันธกิจ 1 เรื่อง พร้อมทั้งค้นคว้าถึงผลการดำเนินงานดังกล่าว

4. จงค้นคว้าโดยเลือกเหตุการณ์สุดขั้ว (Extreme event) ที่เกิดขึ้นกับประเทศไทย พร้อมทั้งหาข้อมูลทางสถิติมาประกอบและอธิบายความเกี่ยวเนื่องที่ก่อให้เกิดเหตุการณ์นั้นๆกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

5. จากรายงานแห่งชาติฉบับที่ 4 (Thailand's Fourth National Communication) จงยกตัวอย่างข้อมูลหรือรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ

เอกสารอ้างอิง

กรมอุตุนิยมวิทยา (ศูนย์ภูมิอากาศ). 2567. การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของโลกและประเทศไทย. http://climate.tmd.go.th/content/article/10

พิเชษฐ์ ฐานชัยภูมิ. 2564. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. https://www.onep.go.th.

สผ. (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม). 2558. แผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2558-2593.

สผ. (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม). 2565. รายงานแห่งชาติฉบับที่ 4 (Fourth National Communication: NC4). https://eservice.dcce.go.th/media/details?media_group_code=10&media_type_id=32&media_id=4920

อบก.(องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก). 2558. การจัดทำโครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย สาขาการเกษตร (สวนผลไม้).

อบก.(องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก). 2562. มาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม.

มกอช.(สำนักงานมาตรฐานสินค้าการเกษตรและอาหารแห่งชาติ). 2566. FAO เผยภาคการเกษตรปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้น 14% ในรอบ 20 ปี. https://warning.acfs.go.th/th/early-warning/view/?page=9242

มูลนิธิไทยรักษ์ป่า. 2562. การเก็บกักคาร์บอนของป่าแต่ละประเภท. https://thairakpa.org/ .

Caretta, M.A., A. Mukherji, M. Arfanuzzaman, R.A. Betts, A. Gelfan, Y. Hirabayashi, T.K. Lissner, J. Liu, E. Lopez Gunn, R. Morgan, S. Mwanga, and S. Supratid, 2022: Water. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 551–712, doi:10.1017/9781009325844.006.

Denchak, M. 2023. [Natural Resources Defense Council]. Greenhouse Effect 101. https://www.nrdc.org/stories/greenhouse-effect-101#causes

EPA (a). 2024. Climate Change Indicators: Sea Surface Temperature. https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-sea-surface-temperature

EPA (b). 2024. Climate Change Indicators: Tropical Cyclone Activity https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-sea-surface-temperature

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC . 2021. Annex VII: Glossary [Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestvedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.)]. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2215–2256, doi:10.1017/9781009157896.022.

IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

Lindsey, R. and Dahlman, L. 2024. Climate Change: global Temperature (NOAA). https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature

Lindsey, R. 2022. Climate Change: Global Sea Level (NOAA). https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level

NCAR (National Center for Atmospheric Research). 2024. Impacts of Climate Change. https://scied.ucar.edu/learning-zone/climate-change-impacts

RSS (Royal Statistical Society). 2024. Climate Change Explainers. https://rss.org.uk/policy-campaigns/policy/climate-change-explainers/explainer-extreme-weather/

Ritchie, H. 2024. How are extreme weather events and the climate evolving in the United States? Published online at OurWorldingData.org. https://ourworldindata.org/us-weather-climate

Turrentine, A. 2021. Global Warming 101. Natural Resources Defense Council (NRDC). https://www.nrdc.org/stories/global-warming-101#warming

The Planet App. 2024. Greenhouse effect and Global warming. https://theplanetapp.com/challenges/?lang=en

บทที่ 2 - ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศและมหาสมุทร

Chapter 2 – Atmospheric-Oceanic Circulation System

บทที่ 2

ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศและมหาสมุทร | Atmospheric-Oceanic Circulation System

2.1 ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศและมหาสมุทรคืออะไร

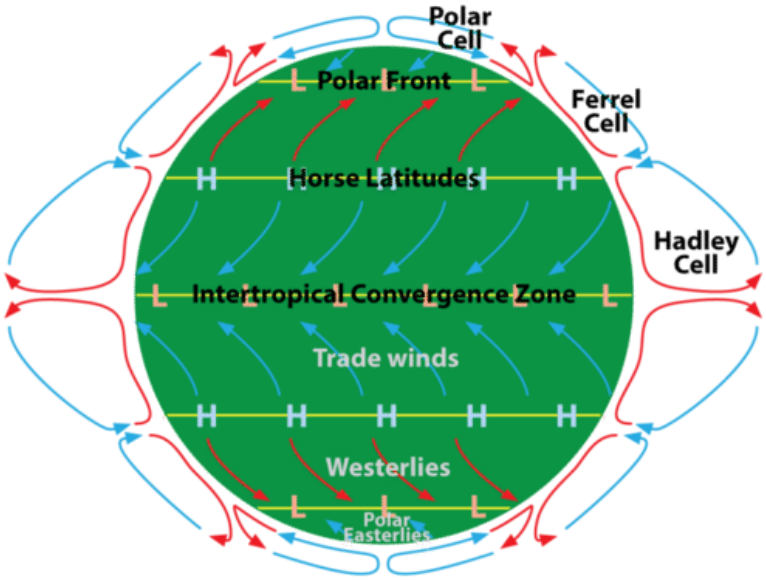
ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ (Atmospheric circulation) หมายถึงการเคลื่อนที่ของมวลอากาศในชั้นบรรยากาศของโลก ในขณะที่ระบบการหมุนเวียนของมหาสมุทร (Oceanic circulation) หมายถึงการเคลื่อนที่ของน้ำในมหาสมุทร ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศและมหาสมุทร (Atmospheric – Oceanic circulation system) เป็นกระบวนการสำคัญในการรักษาสมดุลของระบบนิเวศและระบบภูมิอากาศของโลก เกี่ยวข้องกับลักษณะภูมิอากาศในแต่ละเขตพื้นที่ของโลก เช่น เขตพื้นที่แห้งแล้ง พื้นที่ฝนตกชุก พื้นที่หนาวเย็น และการเกิดพายุในพื้นที่ต่างๆ รวมถึงลักษณะระดับน้ำทะเลในมหาสมุทรแต่ละพื้นที่ของโลก เป็นต้น

2.1.1 ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ (Atmospheric circulation)

เนื่องด้วยการได้รับความร้อนที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณของพื้นผิวโลก โดยพื้นที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรจะได้รับความร้อนมากกว่าบริเวณขั้วโลก และเมื่อมวลอากาศได้รับความร้อนจะมีความหนาแน่นที่ลดลงและลอยตัวสูงขึ้น ในขณะที่บริเวณขั้วโลกมีอุณหภูมิที่ต่ำส่งผลให้มวลอากาศมีความหนาแน่นสูงและจมลง ส่งผลต่อเนื่องให้มวลอากาศลอยตัวจากบริเวณเส้นศูนย์สูตรไปจมลงบริเวณขั้วโลกเหนือและใต้ การลอยตัวขึ้นและจมลงของมวลอากาศบริเวณเส้นศูนย์สูตร 0 - 30° เรียกว่า Hadley cell บริเวณ 30°-60° และ 60° ถึงบริเวณขั้วโลกเรียกว่า Ferry cell และ Polar cell ตามลำดับ

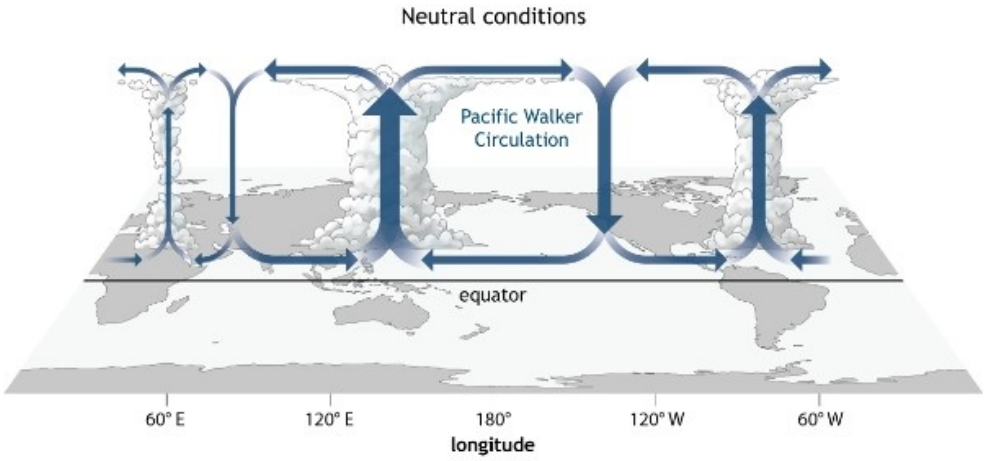
การเคลื่อนที่ของมวลอากาศนอกเหนือจากการเคลื่อนที่เนื่องจากการรับความร้อนของแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกันแล้ว การหมุนของโลกยังมีผลต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศด้วยเรียกว่า Coriolis effect โดยในแต่ละบริเวณละติจูดที่ต่างกันจะมีความเร็วที่แตกต่างกันก่อให้เกิดลักษณะการไหลเวียนของอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนตามละติจูด ได้แก่ บริเวณเส้นศูนย์สูตร 0-30° โดยลักษณะลมบริเวณนี้เรียกว่า Trade wind แบ่งเป็น the Northeast trade winds เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เหนือเส้นศูนย์สูตร และ the Southeast trade winds เกิดขึ้นบริเวณด้านใต้เส้นศูนย์สูตรบริเวณ 30°-60° และ 60° ถึงบริเวณขั้วโลกเรียกว่า Westerlies และ Polar easterlies ตามลำดับ (**รูปที่ 2.1.1-1**)

ลักษณะการหมุนเวียนของอากาศที่สำคัญบริเวณที่เกิดลม Trade wind ณ เส้นศูนย์สูตร 0-30° เรียกว่า Walker cell ซึ่งเป็นการหมุนเวียนของมวลอากาศบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิคในเขตเส้นศูนย์สูตรที่เกี่ยวเนื่องกับปรากฏการณ์ El Nino และ La Nina (รายละเอียดในส่วนถัดไป) Walker cell เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิและความกดอากาศ โดยในสภาพปกติบริเวณความกดอากาศสูง-อุณหภูมิต่ำจะเกิดขึ้นทางด้านตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิค และเกิดความกดอากาศต่ำ-อุณหภูมิสูงบริเวณด้านตะวันตกของมหาสมุทร ซึ่ง Trade wind ซึ่งเป็นลมบริเวณพื้นผิวโลกจะเกิดการพัดพาจากพื้นที่ด้านตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิคไปยังตะวันตก (**รูปที่ 2.1.1-2**)



ที่มา: Brouwer et al. (2024)

รูปที่ 2.1.1-1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศของโลก



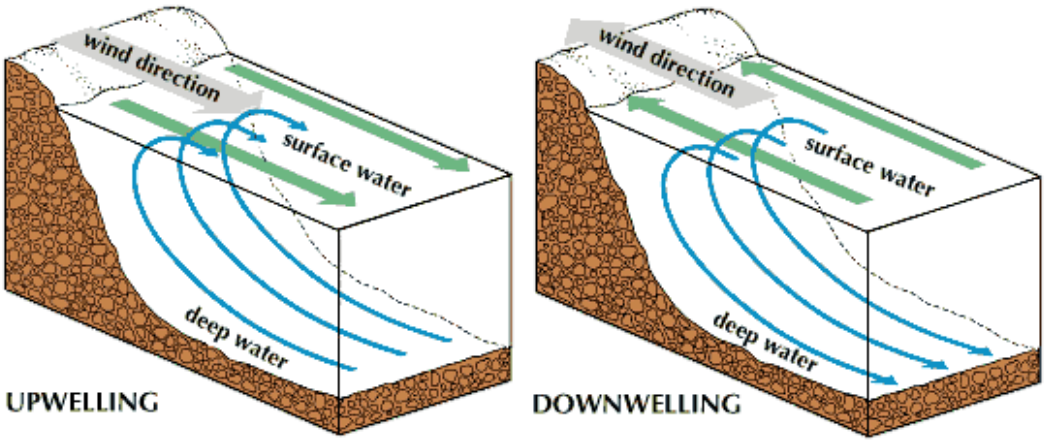
ที่มา: NOAA Climate.gov (2025)

รูปที่ 2.1.1-2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ Walker cell

2.1.2 ระบบการหมุนเวียนของมหาสมุทร (Oceanic circulation)

ระบบการหมุนเวียนของมหาสมุทรเป็นปัจจัยหลักที่เกี่ยวเนื่องกับลักษณะสภาพอากาศ เนื่องด้วยการหมุนเวียนของมหาสมุทรก่อให้เกิดกระบวนการเก็บและการถ่ายเทความร้อน รวมถึงการเคลื่อนที่ของสารต่างๆ และน้ำจืดทั่วโลก กระบวนการหมุนเวียนของมหาสมุทรสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ กระบวนการที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของลมโดยเฉพาะลมบริเวณพื้นผิวโลก ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำพื้นผิว (Surface currents) และกระบวนการเคลื่อนที่แบบช้าซึ่งเกิดจากความหนาแน่นของมหาสมุทรในแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกันเกิดเป็นการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำลึก (Deep currents)

ลักษณะการเคลื่อนที่ของลมบริเวณด้านเหนือและด้านใต้ของเส้นศูนย์สูตร (the Northern and Southern hemisphere) จะมาพบกันบริเวณเส้นศูนย์สูตร (**รูปที่ 2.1.1-1**) ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลน้ำมาบรรจบกันเรียกว่า Convergence ในขณะที่ Divergence คือการเคลื่อนที่ของมวลน้ำในมหาสมุทรที่มีลักษณะแยกออกจากกัน โดยการเกิด Divergence ของกระแสน้ำจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำบริเวณด้านล่างขึ้นมาบริเวณผิวน้ำเรียกว่า Upwelling phase ในขณะที่ Convergence จะส่งผลให้มวลน้ำที่อยู่บริเวณผิวน้ำจมตัวลงเรียนกว่า Downwelling phase (**รูปที่ 2.1.2-1**) ซึ่งทั้ง 2 ระบบมีลักษณะการเคลื่อนที่ที่ซับซ้อนและก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจากความร้อนในบริเวณที่ละติจูดต่ำ (Low latitude) ไปยังบริเวณละติจูดสูง (High Latitude)



ที่มา: uniqueias.org

รูปที่ 2.1.2-1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำในมหาสมุทร

2.2 ความผันแปรของระบบอากาศซีกโลกใต้

ความผันแปรของระบบอากาศซีกโลกใต้ (El Noni Southern Oscillation: ENSO) เป็นลักษณะปรากฏการณ์สภาพภูมิอากาศตามธรรมชาติที่เกิดในบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิค มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงระบบสภาพภูมิอากาศระดับโลก (Large-scale circulation) ในหลายปัจจัย ตัวอย่างเช่น ความกดอากาศ อุณหภูมิผิวน้ำทะเล ความเร็วลม ปริมาณฝน ซึ่งถึงแม้ว่า ENSO เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิค แต่สามารถส่งผลกระทบได้ในหลายพื้นที่ทั่วโลก ENSO จะมีลักษณะของระบบบรรยากาศและมหาสมุทรที่สำคัญ 3 รูปแบบ ได้แก่ ในช่วงสภาวะปกติ (Neutral phase) ปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Nino) และปรากฏการณ์ลานีญา (La Nina) (**รูปที่ 2.2-1**) รายละเอียดดังนี้

2.2.1 สภาวะปกติ (Neutral phase)

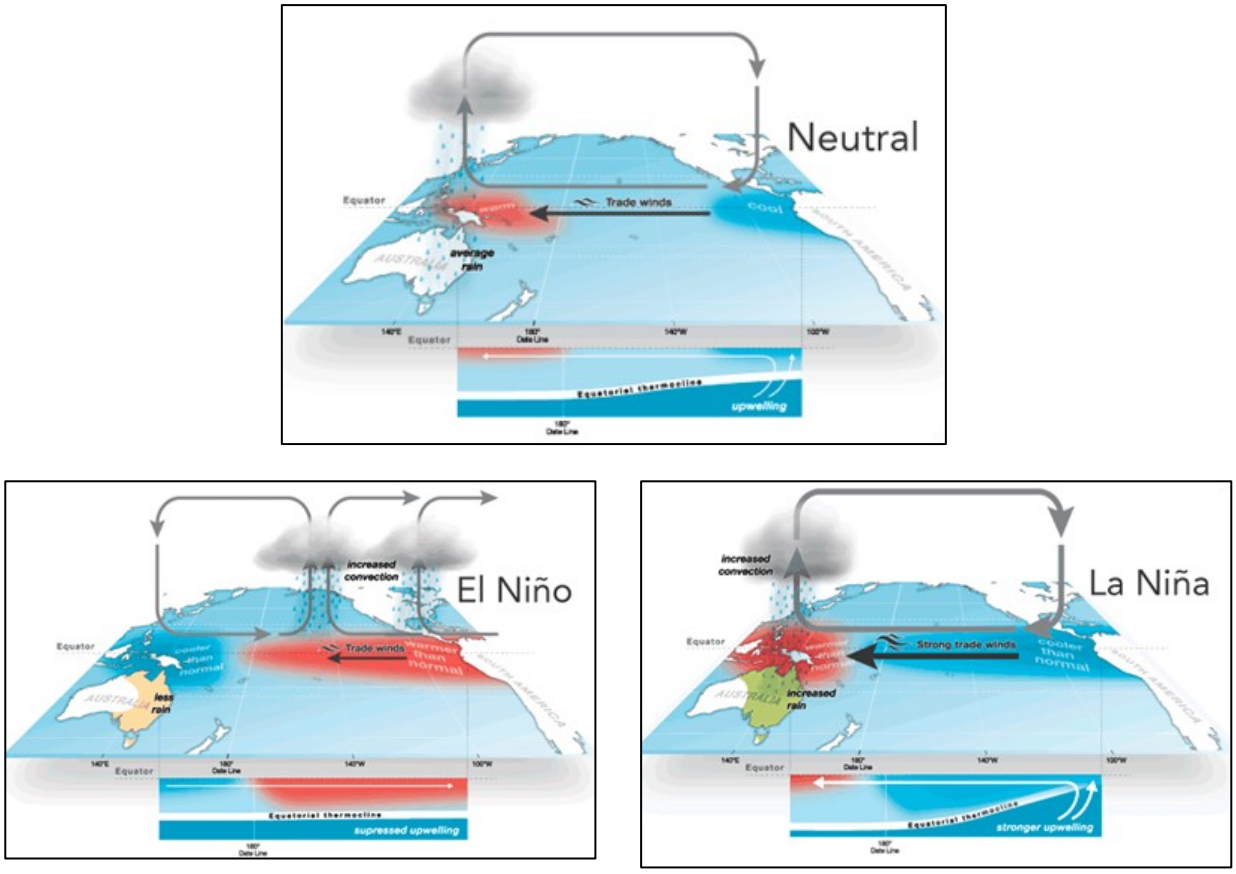
ในช่วงสภาวะปกติของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Normal phase บริเวณด้านตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิค เขตพื้นที่ชายฝั่งของเขตประเทศเปรูในทวีปอเมริกาใต้จะมีอุณหภูมิต่ำและค่าความกดอากาศที่สูง ในขณะที่ด้านตะวันตกของมหาสมุทรเขตพื้นที่บริเวณประเทศอินโดนีเซียและออสเตรเลียมีค่าความกดอากาศที่ต่ำกว่า (อุณหภูมิสูงกว่าด้านฝั่งตะวันออกของมหาสมุทร) ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ลมสินค้าตะวันออกเฉียงใต้ (Trade wind) พัดจากบริเวณชายฝั่งประเทศเปรู (ด้านตะวันออกของมหาสมุทร) ไปยังประเทศอินโดนีเซียและออสเตรเลีย (ตะวันตกของมหาสมุทร) ทิศทางของกระแสลมดังกล่าวส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ เกิดการพัดพากระแสน้ำด้านบนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังด้านตะวันตกของมหาสมุทร ส่งผลให้เกิดความชุ่มชื้นและฝนตกชุก ในขณะที่ด้านตะวันออกของมหาสมุทรแถบประเทศเปรูมีกระแสน้ำเย็นจากด้านล่างที่ขึ้นมาแทนที่ (Upwelling) ส่งผลให้พื้นที่บริเวณนี้มีความแห้งแล้ง แต่จะมีความอุดสมบูรณ์จากแร่ธาตุอาหาร และทรัพยากรทางทะเล

2.2.2 ปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Nino)

ปรากฏการณ์เอลนีโญจะมีลักษณะทิศทางที่ตรงข้ามกับในช่วงของสภาวะปกติข้างต้น โดยที่ในบางช่วงเวลากระแสลมสินค้าตะวันออกเฉียงใต้เกิดอ่อนกำลังลง ส่งผลให้กระแสลมมีการเปลี่ยนทิศทางไปยังทิศทางตรงข้าม (โดยมีทิศทางจากด้านตะวันตกของมหาสมุทรไปยังด้านตะวันออกของมหาสมุทร) ดังนั้นกระแสน้ำอุ่นที่เคยพัดจากชายฝั่งเปรูไปยังประเทศอินโดนีเซียและออสเตรเลียจะมีลักษณะที่ตรงกันข้าม อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณประเทศเปรูจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น พื้นที่ในบริเวณนี้จะมีความชุ่มชื่นและเกิดฝนตกหนัก ความสมบูรณ์ของธาตุอาหารและทรัพยากรทางทะเลจะลดลง เนื่องจากกระแสน้ำเย็นด้านล่างไม่สามารถขึ้นมาแทนที่กระแสน้ำอุ่นได้ ในขณะที่แทบประเทศอินโดนีเซียและออสเตรเลียจะเกิดความแห้งแล้ง

2.2.3 ปรากฏการณ์ลานีญา (La Nina)

ปรากฏการณ์ลานีญาเป็นปรากฏการณ์ลักษณะเดียวกันกับระบบสภาพอากาศที่อยู่ในช่วงของสภาวะปกติ (Normal phase) แต่จะมีความแตกต่างตรงที่มีลักษณะความรุนแรงที่มากกว่า โดยลมสินค้าที่พัดจากทางตะวันออกไปยังตะวันตกของมหาสมุทรมีความรุนแรงที่เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ ส่งผลให้บริเวณประเทศอินโดนีเซียและออสเตรเลียมีระดับน้ำทะเลที่เพิ่มสูงขึ้น ฝนตกชุกเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่บริเวณชายฝั่งของประเทศเปรูจะเกิดความแห้งแล้งอย่างรุนแรง



ที่มา: Australian Climate Influences (2013)

รูปที่ 2.2-1 Neutral phase, El Nino และ La Nina

2.2.4 การประเมินสถานะของปรากฏการณ์ ENSO

สถานการณ์ของปรากฏการณ์ ENSO สามารถประเมินได้จากหลายปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับบรรยากาศและมหาสมุทร โดยหน่วยงาน National Centers for Environmental Information (NCEI) ภายใต้หน่วยงาน National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ได้มีการระบุดัชนีที่ใช้ในการประเมินสถานการณ์ ENSO ไว้ดังนี้

(1) Southern Oscillation Index (SOI)

ในการประเมินถึงสถานการณ์ของ ENSO ทั้ง 3 สถานการณ์ในแต่ละช่วงเวลาจะสามารถประเมินได้โดยการตรวจวัดค่าความกดอากาศที่แตกต่างกัน ณ บริเวณ Tahiti และ Darwin (**รูปที่ 2.2.4-1**) โดยดัชนีที่ใช้ประเมิน ENSO นี้เรียกว่า SOI (Southern Oscillation Index) ค่าความกดอากาศที่แตกต่างกันระหว่างพื้นที่ทางด้านตะวันตก (Tahiti) และตะวันออก (Darwin) ของมหาสมุทรแปซิฟิคสามารถบอกได้ถึงความผันแปรของสภาพอากาศท้องถิ่นของแต่ละพื้นที่ โดยหากค่า SOI มีค่าต่ำกว่าศูนย์ (Negative phase) หมายถึงค่าความกดอากาศบริเวณ Tahiti จะมีค่าต่ำกว่าช่วงปกติ ในขณะที่ความกดอากาศบริเวณ Darwin จะมีค่าสูงกว่าปกติซึ่งหมายถึงปรากฏการณ์เอลนีโญ และหากมีค่ามากกว่าศูนย์ (Positive phase) จะเป็นในทิศทางตรงข้ามก่อให้เกิดปรากฏการณ์ลานีญา (**รูปที่ 2.2.4-2**) การคำนวณค่า SOI จากความกดอากาศระหว่าง Tahiti และ Darwin แสดงดังสมการที่ 2.2.4-1 ถึงสมการที่ 2.2.4-4

$$SOI = \frac{[sSLP_{Tahiti} - sSLP_{Darwin}]}{\sigma_{monthly}} \quad [2.2.4\text{-}1]$$

$$sSLP = \frac{[aSLP - mSLP]}{\sigma} \quad [2.2.4\text{-}2]$$

$$\sigma = \sqrt{\sum(aSLP - mSLP)^2/N} \quad [2.2.4\text{-}3]$$

$$\sigma_{monthly} = \sqrt{\sum(sSLP_{Tahiti} - sSLP_{Darwin})^2/N} \quad [2.2.4\text{-}4]$$

โดยที่

SLP : ค่าความกดอากาศ (Sea level pressure)

$sSLP$: ค่าความกดอากาศมาตรฐาน (Standardized SLP)

$aSLP$: ค่าความกดอากาศแท้จริง (Actual SLP)

σ : ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

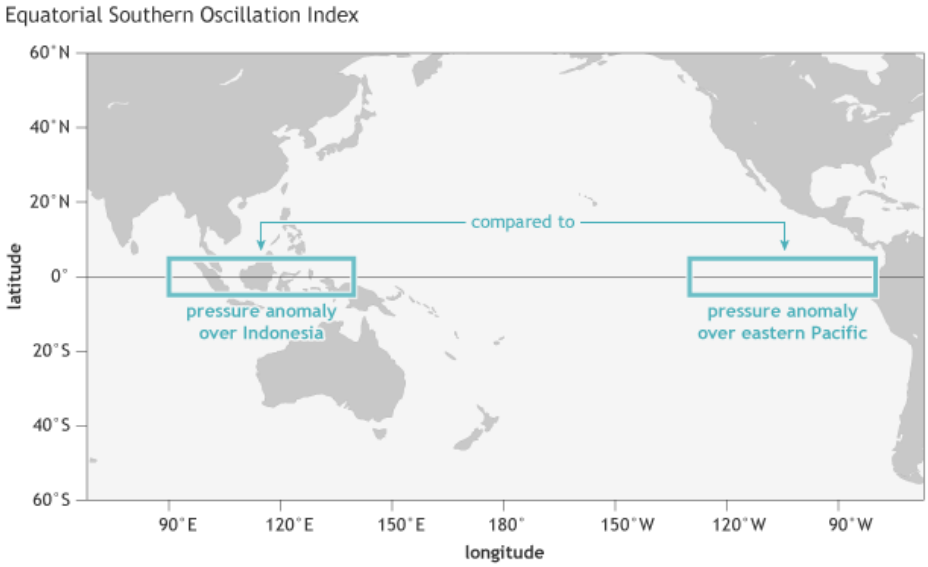
N : จำนวนเดือน

(2) Equatorial Pacific Sea Surface Temperature (SST)

ปรากฏการณ์ ENSO เกี่ยวเนื่องโดยตรงกับอุณหภูมิผิวน้ำทะเลของมหาสมุทรแปซิฟิคบริเวณเส้นศูนย์สูตร (Equator) โดยการประเมินค่าอุณหภูมิบริเวณเส้นศูนย์สูตรดังกล่าวถูกแบ่งออกเป็นแต่ละพื้นที่ย่อยเรียกว่า Nino (**รูปที่ 2.2.4-3**) หากเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Sea surface temperature anomaly) บริเวณพื้นที่ Nino 3.4 จะเรียกดัชนีนั้นว่า Oceanic Nino Index (ONI) ซึ่งดัชนี ONI จะเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยทุก 3 เดือน หากค่า ONI มีค่า

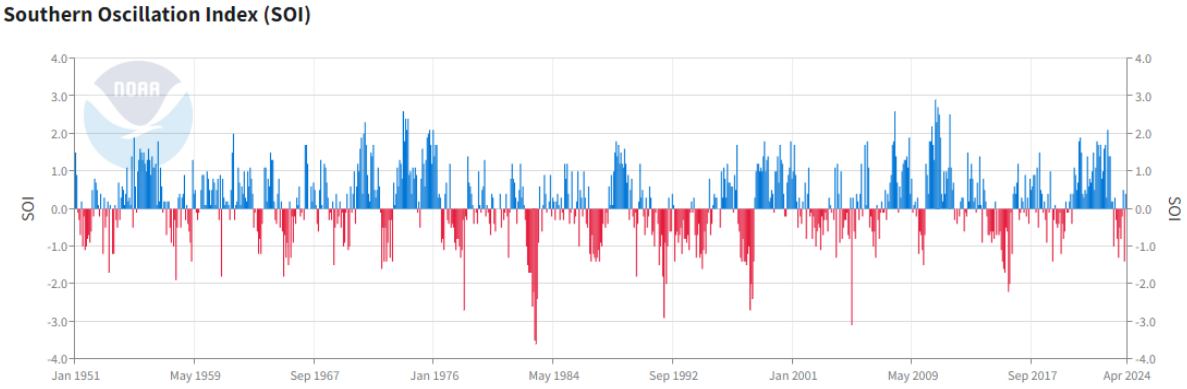
มากกว่า +0.5 °C หมายถึงอยู่ในช่วงของปรากฏการณ์เอลนีโญ (Positive SST) ในขณะที่หากค่า ONI มีค่าต่ำกว่า -0.5 °C หมายถึงอยู่ในช่วงของปรากฏการณ์ลานีญา (Negative SST) (**รูปที่ 2.2.4-4**) และสามารถพิจารณาความรุนแรงของเอลนีโญและลานีญา ได้โดยที่

- El Nino (La Nina) ในระดับอ่อน (Weak) : มีค่า ONI อยู่ในช่วง +0.5 ถึง +0.9 (-0.5 ถึง -0.9)
- El Nino (La Nina) ในระดับปานกลาง (Moderate) : มีค่า ONI อยู่ในช่วง +1.0 ถึง +1.4 (-1.0 ถึง -1.4)
- El Nino (La Nina) ในระดับรุนแรง (Strong) : มีค่า ONI อยู่ในช่วง > +1.5 (< -1.5)



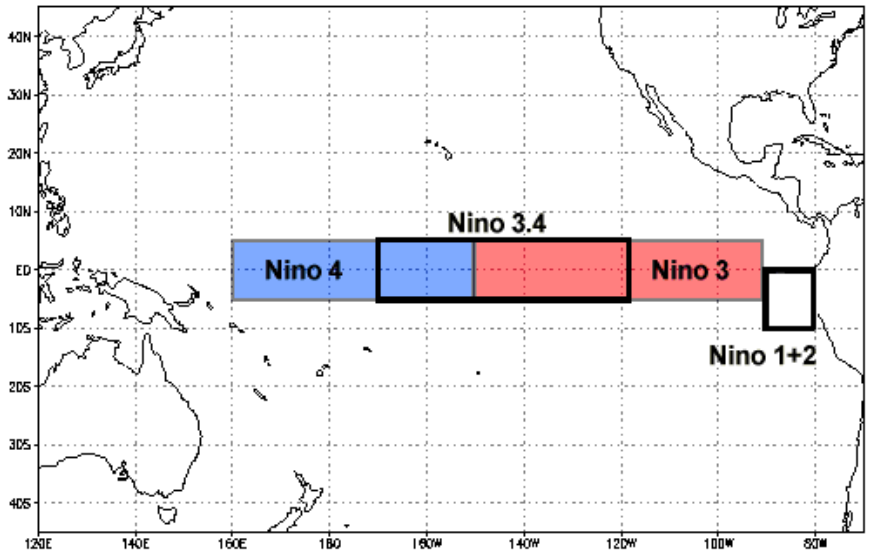
ที่มา: Barnston (2015)

รูปที่ 2.2.4-1 พื้นที่ตรวจวัดความกดอากาศบริเวณ Tahiti และ Dawin



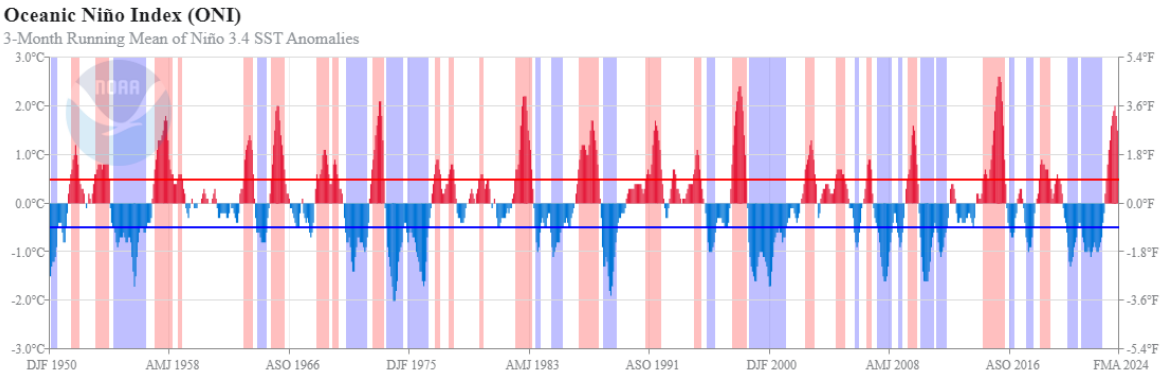
ที่มา: NCEI-NOAA (2024)

รูปที่ 2.2.4-2 SOI index ตั้งแต่ปี 1951 – 2024



ที่มา: NCEI-NOAA (2024)

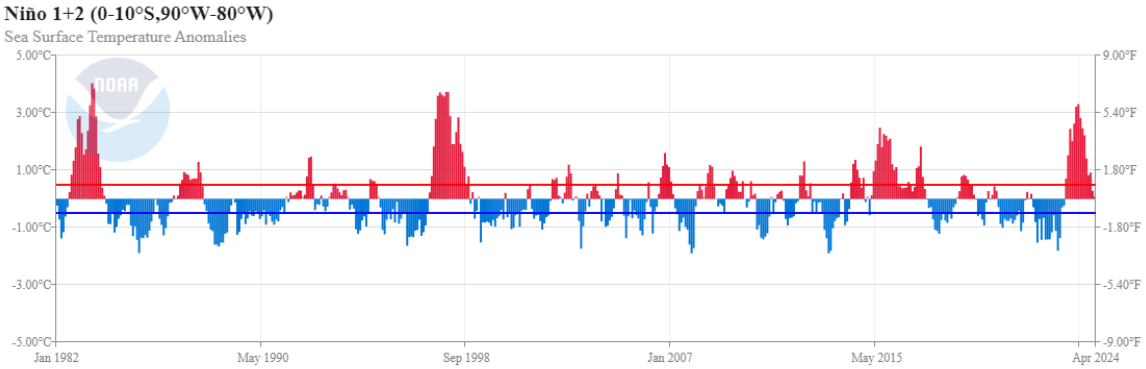
รูปที่ 2.2.4-3 พื้นที่ Nino4, Nino3.4, Nino3 และ Nino 1+2



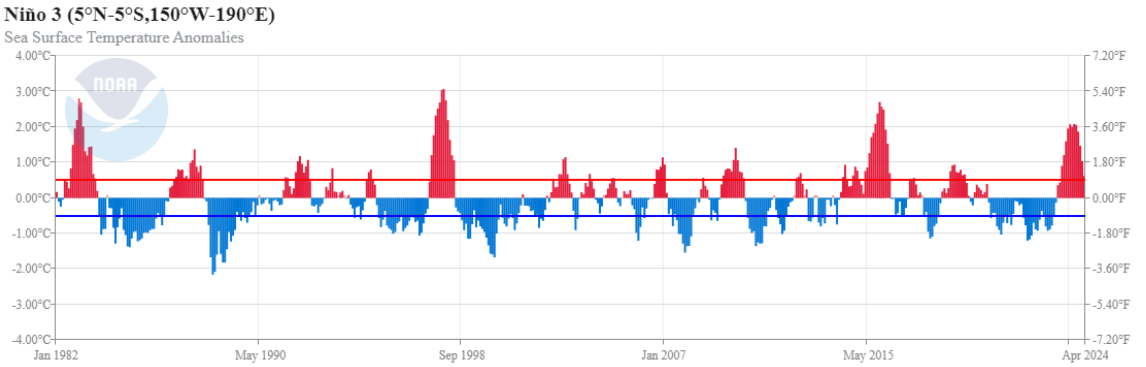
ที่มา: NCEI-NOAA (2024)

รูปที่ 2.2.4-4 ONI ตั้งแต่ช่วงปี 1950 - 2024

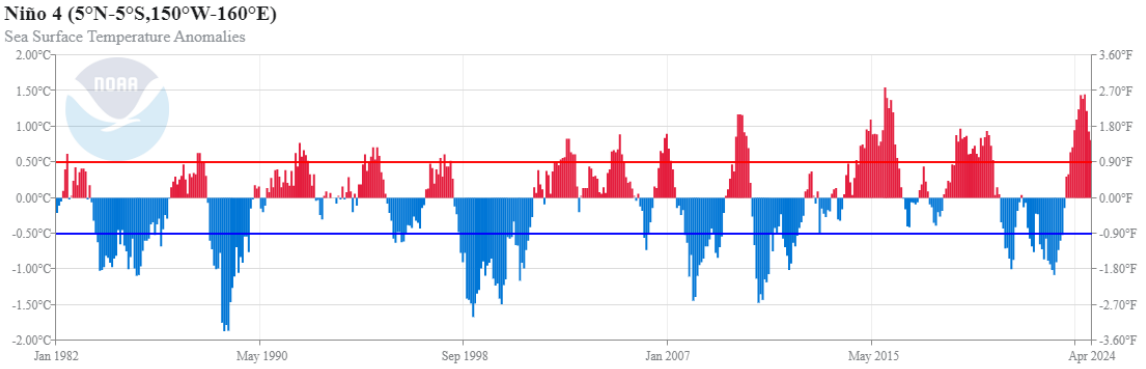
นอกจากค่า ONI ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิบริเวณ Nino 3.4 แล้ว อุณหภูมิบริเวณอื่น เช่น Nino 1+2, Nino 3 และ Nino 4 ก็ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินถึงปรากฏการณ์ของ ENSO เช่นเดียวกัน โดยลักษณะการประเมินสถานการณ์ ENSO ของค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการประเมินผลจากค่าของ ONI **รูปที่ 2.2.4-5** แสดงตัวอย่างค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ Nino 1+2, Nino 3 และ Nino 4



Source: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices



Source: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices



Source: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices

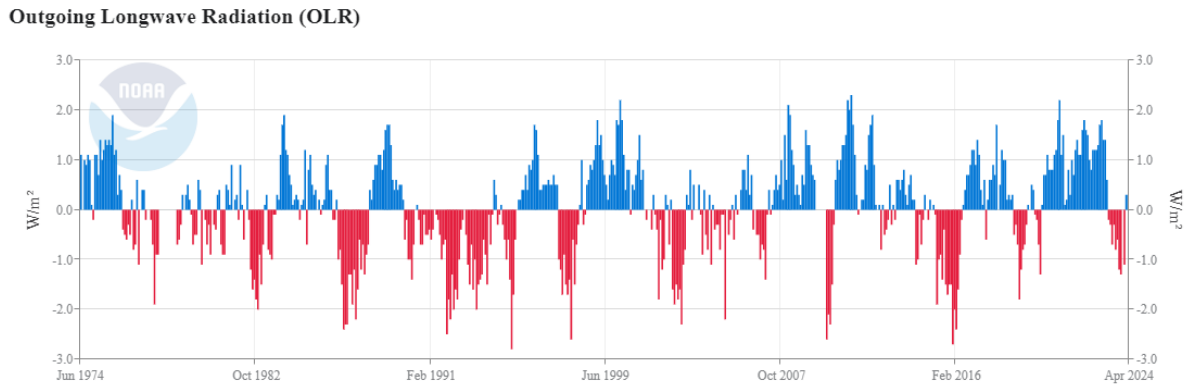
ที่มา: NCEI-NOAA (2024)

รูปที่ 2.2.4-5 อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณ Nino 1+2, Nino 3 และ Nino 4

(3) Outgoing Longwave Radiation (OLR)

รังสีแสงอาทิตย์คลื่นยาวที่ออกนอกโลก (Outgoing Longwave Radiation: OLR) คือค่าพลังงานรังสีที่ตรวจวัดบริเวณชั้นบรรยากาศที่สูงที่สุด (Exosphere) บริเวณพื้นที่ลองติจูดที่ 160 °E - 160 °W โดยการใช้เครื่องมือ Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) ค่าที่ตรวจวัดได้จะบ่งบอกถึงลักษณะการพาความร้อนของมวลอากาศ (Convection) และการปกคลุมของเมฆ โดยหากมีการเคลื่อนที่ของมวลอากาศมากในบริเวณพื้นที่ตอนกลางและตะวันออกของ

มหาสมุทรแปซิฟิก มีกลุ่มเมฆด้านบนที่อุณหภูมิเย็นกว่า และมีรังสีคลื่นยาวที่ออกนอกโลกที่น้อยกว่า จะบ่งบอกถึงปรากฏการณ์ของเอลนีโญ ในขณะที่ปรากฏการณ์ลานีญาจะมีลักษณะที่ตรงข้ามกับสถานการณ์ข้างต้น **รูปที่ 2.2.4-6** แสดงการเปลี่ยนแปลงของรังสีคลื่นยาว

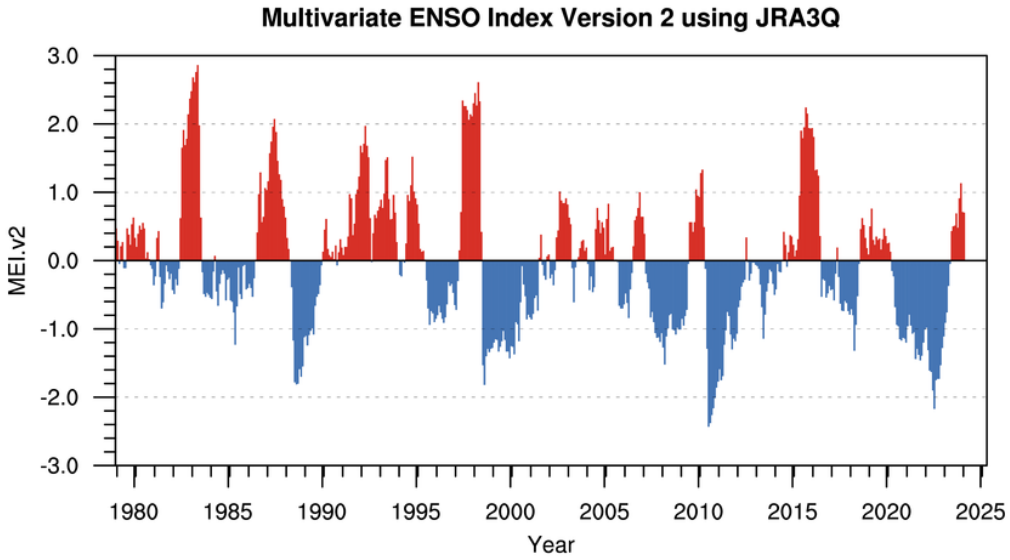


ที่มา: NCEI-NOAA (2024)

รูปที่ 2.2.4-6 Outgoing Longwave Radiation (1974 - 2024)

(4) Multivariate ENSO Index (MEI)

ดัชนี MEI หรือ Multivariate ENSO Index (**รูปที่ 2.2.4-7**) เป็นดัชนีประเมินสถานการณ์ ENSO โดยมีการพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวเนื่องกับปรากฏการณ์ ENSO หลายตัวแปรร่วมกัน ได้แก่ ความกดอากาศระดับน้ำทะเล (Sea level pressure) การเคลื่อนที่ของอากาศในแนวตั้งและแนวนอน อุณหภูมิผิวน้ำทะเล (Sea surface temperature) และรังสีคลื่นยาวแสงอาทิตย์ที่ออกนอกโลก (OLR) ตัวแปรทั้งหมดข้างต้นถูกคำนวณร่วมกันโดยวิธีการทางสถิติ ได้แก่ Principal component (PC) โดยการปรับค่าของตัวแปรทั้งหมดให้อยู่ในระดับเดียวกัน (Data normalization) จากนั้นจะพิจารณาเมทริกซ์แรกที่แสดงค่าร่วมกันมากที่สุด (Co-variance) (วิธีการคำนวณ Principal component แสดงดังบทที่ 4) ค่า MEI จะถูกคำนวณโดยการพิจารณาทุก 2 เดือน ตัวอย่างเช่น ธันวาคม-มกราคม, มกราคม-กุมภาพันธ์ และ กุมภาพันธ์-มีนาคม เป็นต้น (NCAR, 2022)



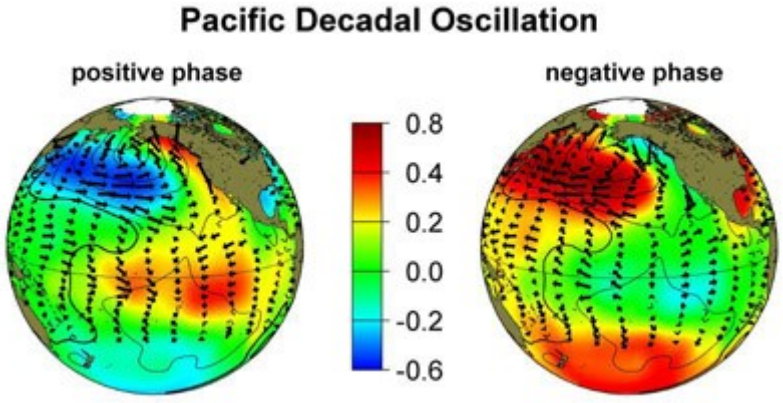
ที่มา: NCAR (2022)

รูปที่ 2.2.4-7 Multivariate ENSO Index (1960-2024)

2.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเขตมหาสมุทรแปซิฟิค

ในบริเวณเขตแปซิฟิคยังมีดัชนีที่มีความสำคัญนอกเหนือจาก ENSO ได้แก่ ดัชนี PDO (Pacific Decadal Oscillation) PDO เป็นดัชนีที่บอกถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลในระยะยาว (ประมาณ 20-30 ปี) ของมหาสมุทรแปซิฟิค และมีความแตกต่างจากดัชนีที่ใช้ในการประเมินปรากฏการณ์ ENSO โดยที่ PDO จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลทั้งมหาสมุทรแปซิฟิคในขณะที่ดัชนีที่ใช้ในการประเมินปรากฏการณ์ ENSO จะพิจารณาบริเวณเขตเส้นศูนย์สูตรเป็นสำคัญ

PDO ถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ ช่วง Cool phase และ Warm phase ในช่วง Cool phase อุณหภูมิผิวน้ำทะเลรวมถึงอุณหภูมิน้ำของมหาสมุทรแปซิฟิคมีค่าที่ต่ำในบริเวณพื้นที่ด้านตะวันออกของบริเวณเขตศูนย์สูตรของมหาสมุทร ในขณะที่บริเวณด้านเหนือ ตะวันตก และด้านใต้ของมหาสมุทรอุณหภูมิจะสูงกว่าปกติ ปรากฏการณ์ของ Cool phase เคยเกิดขึ้นในช่วงระหว่างปี 1947-1976 (29 ปี) ในขณะที่ในช่วง Warm phase บริเวณด้านตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิคจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า และบริเวณด้านตะวันออกจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งเคยเกิดขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1977-1999 (22 ปี) อย่างไรก็ตามในช่วงปัจจุบันได้มีการค้นพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ PDO จาก Warm phase ไปยัง Cool phase จะมีการเปลี่ยนแปลงที่สั้นลง ตัวอย่างเช่นในช่วงปี ค.ศ. 1999-2002 เกิดปรากฏการณ์ Warm phase และหลังจากนั้นในช่วงปี ค.ศ. 2003-2005 เกิดปรากฏการณ์ Cool phase (California Institute of Technology, 2024) **รูปที่ 2.3-1** แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของ PDO ในแต่ละรูปแบบ



ที่มา: California Institute of Technology (2024)

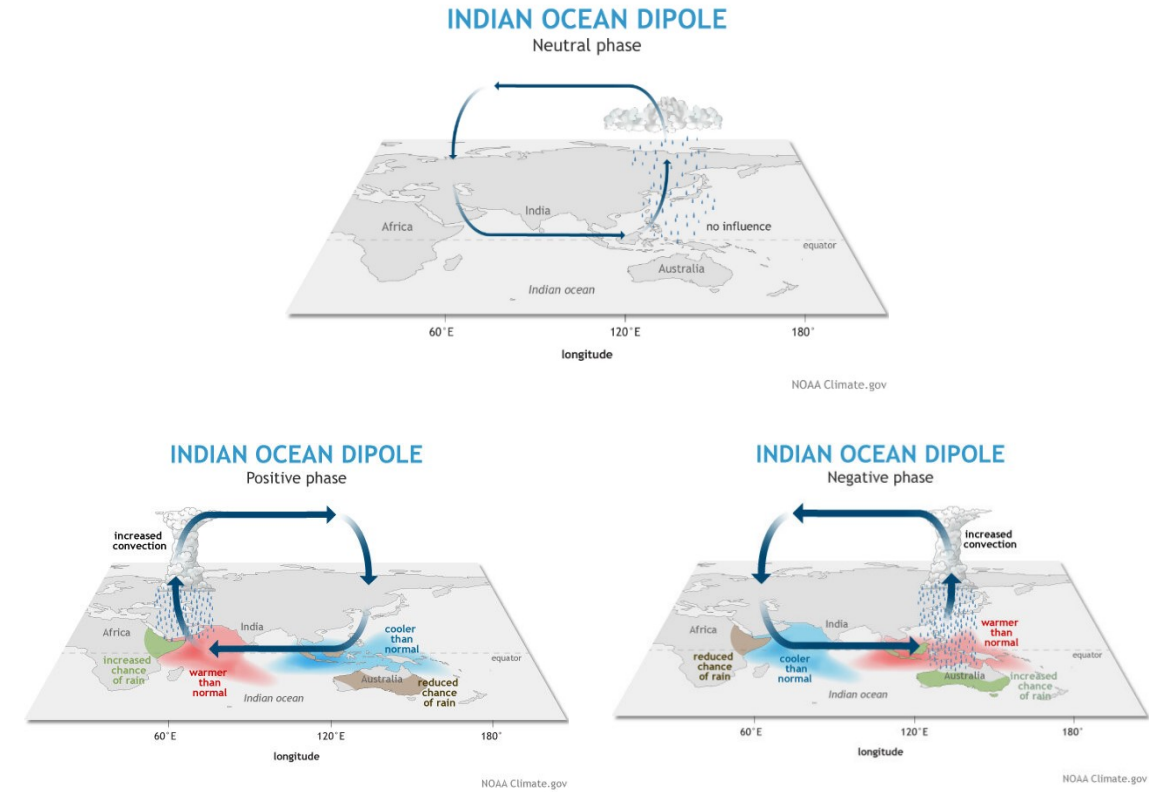
รูปที่ 2.3-1 ลักษณะของ Warm phase and Cool Phase ของดัชนี PDO

2.4 ความผันแปรของระบบมหาสมุทรอินเดีย

การผันแปรของอุณหภูมิในเขตมหาสมุทรอินเดีย หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Indian Ocean Dipoles Indices (IOD) คือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณมหาสมุทรอินเดียเขตร้อน บริเวณตะวันออก และตะวันตกของมหาสมุทร การประเมินค่าของ IOD จะทำการตรวจวัดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลเรียกว่า Dipole Model Index (DMI) บริเวณ 2 พื้นที่ได้แก่ IOD ด้านตะวันตกบริเวณ 50°E – 70 °E และ 10°S – 10 °N ในขณะที่ IOD ตะวันออกจะทำการตรวจวัดบริเวณ 90°E – 110 °E และ 10°S – 10 °N

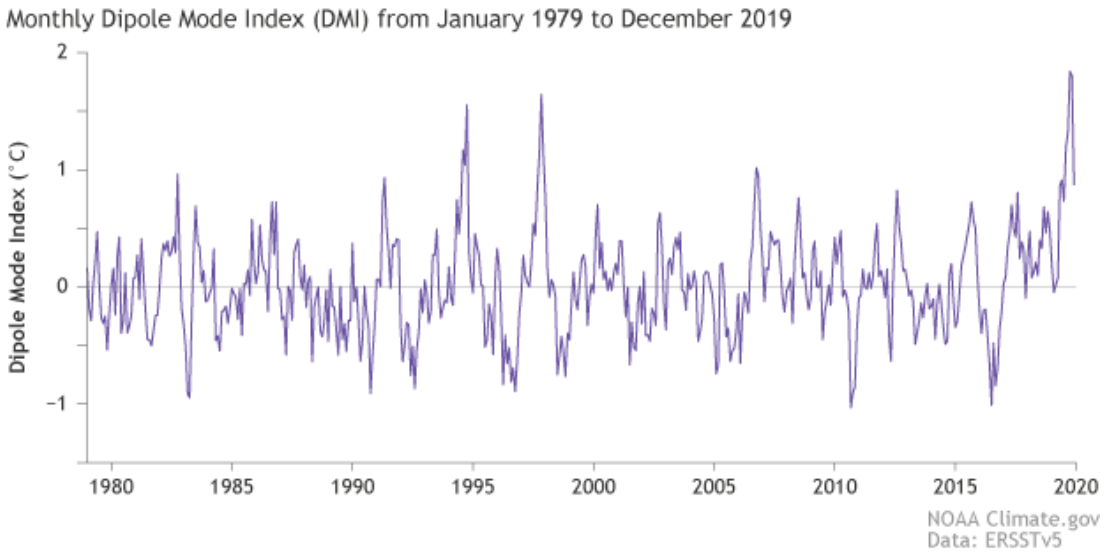
จากการตรวจวัดอุณหภูมิดังกล่าวข้างต้นสามารถแบ่งสถานะของ IOD ได้เป็น 3 สถานะ ได้แก่ Positive IOD ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อบริเวณตะวันตกของมหาสมุทรอินเดียมีอุณหภูมิผิวน้ำทะเลที่สูงกว่าบริเวณด้านตะวันออก ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ (Convection) และฝนบริเวณด้านตะวันตกของมหาสมุทรอินเดีย ได้แก่ บริเวณแอฟริกาตะวันออก คาบสมุทรอาหรับ และก่อให้เกิดความแห้งแล้งบริเวณแถบประเทศออสเตรเลีย และอินโดนีเซีย

สำหรับ Negative IOD จะมีลักษณะที่ตรงข้ามกับช่วงของ Positive phase โดยที่บริเวณตะวันออกของมหาสมุทรอินเดียจะมีปริมาณฝนตกหนักในขณะที่ความแห้งแล้งจะเกิดบริเวณด้านตะวันตกของมหาสมุทร มากกว่าช่วง Neutral phase ซึ่งช่วง Neutral phase มีลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศในรูปแบบเดียวกันกับในช่วงของ Negative phase **รูปที่ 2.4-1** แสดงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณมหาสมุทรอินเดีย และ**รูปที่ 2.4-2** แสดงค่าของดัชนี DMI ที่ใช้ในการประเมินสถานะของ IOD โดยที่หากมีค่ามากกว่าศูนย์แสดงถึง Positive phase และค่าที่ต่ำกว่าศูนย์แสดงถึง Negative phase



ที่มา: Johnson (2020)

รูปที่ 2.4-1 สถานะของ Indian Ocean Dipole

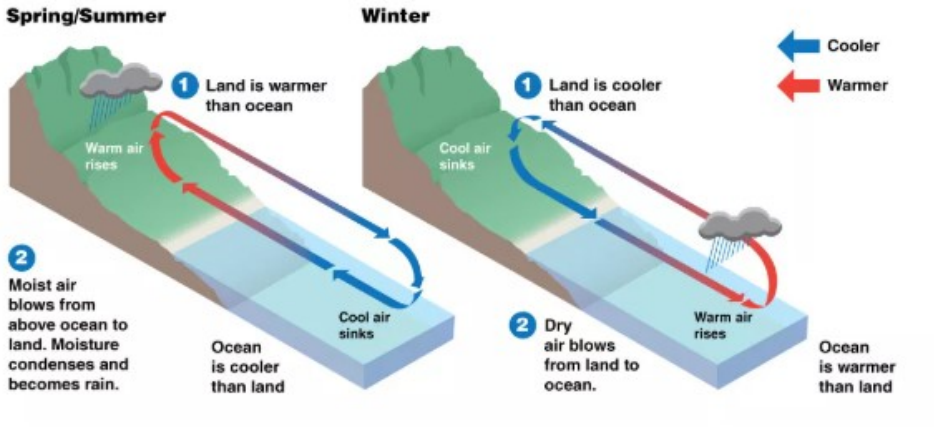


ที่มา: Johnson (2020)

รูปที่ 2.4-2 ดัชนี DMI ระหว่างช่วง 1980-2019

2.5 ระบบมรสุมและพายุ

ระบบมรสุม (Monsoon) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความกดอากาศระหว่างพื้นดินกับมหาสมุทร สามารถเกิดได้ทั้งในช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาว ในช่วงฤดูร้อนบริเวณแผ่นดินจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเร็วกว่าบริเวณมหาสมุทร ก่อให้เกิดความกดอากาศต่ำในแผ่นดิน อากาศจะลอยตัวสูงขึ้นและส่งผลให้อากาศชื้นจากมหาสมุทรถูกดึงเข้ามายังแผ่นดิน เมื่ออากาศที่ลอยตัวสูงขึ้นเย็นตัวลงจะเกิดการควบแน่น และเกิดเป็นฝนตกหนักที่ต่อเนื่อง ในขณะที่มรสุมฤดูหนาวจะมีลักษณะตรงข้าม ลมจะพัดออกจากพื้นดินสู่มหาสมุทร **รูปที่ 2.5-1** แสดงลักษณะของการเกิดมรสุม



ที่มา: NOAA (2025)

รูปที่ 2.5-1 ลักษณะการเกิดมรสุม

พายุ (Storm) คือการเคลื่อนที่ของมวลอากาศเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิในบรรยากาศโดยรอบ โดยมวลอากาศร้อนจะลอยตัวสูงขึ้นและมวลอากาศบริเวณด้านข้างที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเข้ามาแทนที่ในแนวราบ โดยส่วนใหญ่จะเกิดในพื้นที่ที่มีความกดอากาศต่ำก่อให้เกิดกระแสลมพัดเข้าหาจุดศูนย์กลางของบริเวณดังกล่าว เกิดการหมุนเวียนของอากาศเกิดกระแสการเคลื่อนที่ของลมและการก่อตัวของเมฆ พายุแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่

1) พายุฝนฟ้าคะนอง (Thunderstorm) เป็นพายุที่เกิดขึ้นเป็นประจำในพื้นที่ร้อนชื้นบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรของโลก เกิดจากเมฆขนาดใหญ่ก่อตัวในแนวดิ่ง (Cumulonimbus) โดยมวลอากาศร้อนที่ลอยตัวสูงขึ้นก่อนที่จะเย็นตัวลงจะเกิดการควบแน่นและกลั่นตัวเป็นไอน้ำ ความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นในช่วงการลอยตัวของกระแสอากาศในก้อนเมฆ และเมื่อเกิดการลดลงของอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ เกิดเป็นพายุฝนฟ้าคะนอง

2) พายุหมุนเขตร้อน (Tropical Cyclone) เป็นพายุขนาดใหญ่ ก่อตัวขึ้นบริเวณผิวน้ำทะเลแถบเส้นศูนย์สูตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเกินกว่า 100 กม. มีความเร็วลมสูงสุดใกล้จุด

ศูนย์กลางประมาณ 50-250 กม./ชม. โดยจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาในเขตซีกโลกเหนือและหมุนตามเข็มนาฬิกาในเขตซีกโลกใต้ พายุหมุนเขตร้อนแบ่งตามความเร็วลมใกล้ศูนย์กลางออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- ดีเปรสชั่น (Tropical depression): เป็นพายุที่มีความเร็วต่ำสุด มีความเร็วลมใกล้จุดศูนย์กลางไม่เกิน 63 กม./ชม. กระแสลมที่เกิดมีความรุนแรงต่ำ แต่ก่อให้เกิดฝนตกหนักได้
- พายุโซนร้อน (Tropical storm): เป็นพายุที่ก่อตัวขึ้นในทะเลก่อนที่จะเคลื่อนเข้าหาฝั่ง ความเร็วลมไม่เกิน 118 กม./ชม. ก่อให้เกิดลมกระโชกแรงและฝนตกหนัก
- ไต้ฝุ่น (Typhoon) หรือ เฮอริเคน (Hurricane): เป็นพายุที่มีความเร็วลมสูงกว่า 118 กม./ชม. มีตาพายุที่ชัดเจน เป็นพายุที่มีความรุนแรงมากสามารถสร้างความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม สิ่งมีชีวิต และทรัพย์สินได้เป็นอย่างมาก

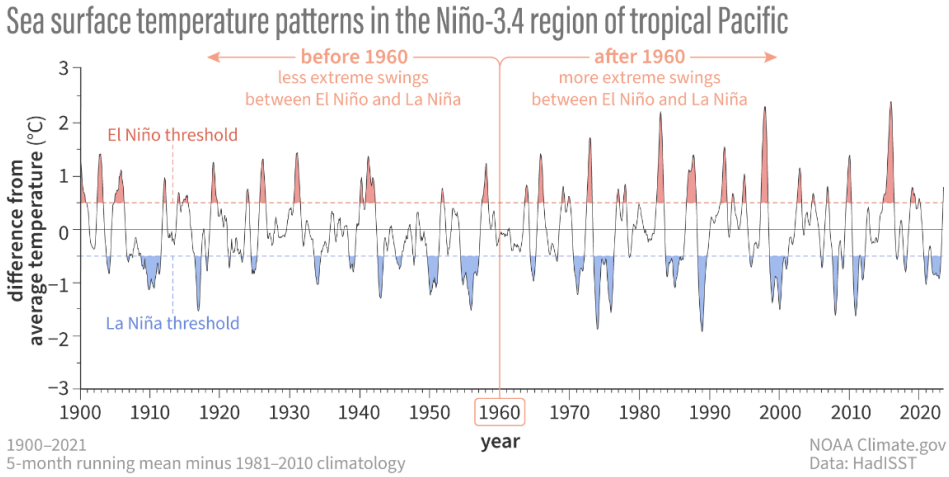
3) พายุทอร์นาโด (Tornado) เป็นพายุที่เกิดจากการปะทะกันของมวลอากาศร้อนและมวลอากาศเย็น โดยปกติพบบริเวณทวีปอเมริกาเหนือและมหาสมุทรแอตแลนติก ร้อยละ 90 ของพายุทอร์นาโดจะเกิดบนแผ่นดิน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางค่อนข้างเล็กรัศมีประมาณ 50-500 เมตร แต่มีความเร็วลมที่แรงตั้งแต่ 300-500 กม./ชม. เป็นพายุที่ก่อตัวรวดเร็วและคาดการณ์การก่อตัวของพายุได้ยาก

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทร

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะของบรรยากาศและมหาสมุทร ลักษณะการหมุนเวียนของลมในชั้นบรรยากาศที่เรียกว่า Walker Cell หรือ Walker Circulation ของโลก รวมถึงการเคลื่อนที่ของลมค้า (Trade wind) และการเคลื่อนตัวของมวลอากาศบริเวณด้านตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิคจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องด้วยอุณหภูมิของโลกที่เพิ่มสูงขึ้น (Heede and Fedorov, 2023) อย่างไรก็ตามความเกี่ยวเนื่องกันระหว่างสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกับระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทร โดยเฉพาะอย่างยิ่งปรากฏการณ์ ENSO ยังอยู่ในระหว่างการศึกษาเพื่อแสดงถึงหลักฐานที่ชัดเจน รายงานของ IPCC Sixth Assessment Report (AR6) ของกลุ่มงานที่ 1 (Working group 1: The Physical Science Basis) ระบุว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของโลกส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของการเกิดปรากฏการณ์ ENSO (IPCC, 2021) **รูปที่ 2.6-1** แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลเฉลี่ยบริเวณ Nino-3.4 ของมหาสมุทรแปซิฟิค และพบว่าหลังช่วงปี 1960 จนถึงช่วงปัจจุบันมีความแปรปรวนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวน้ำทะเลมากกว่าก่อนช่วงปี 1960 อย่างไรก็ตามความแปรปรวนที่เกิดขึ้น

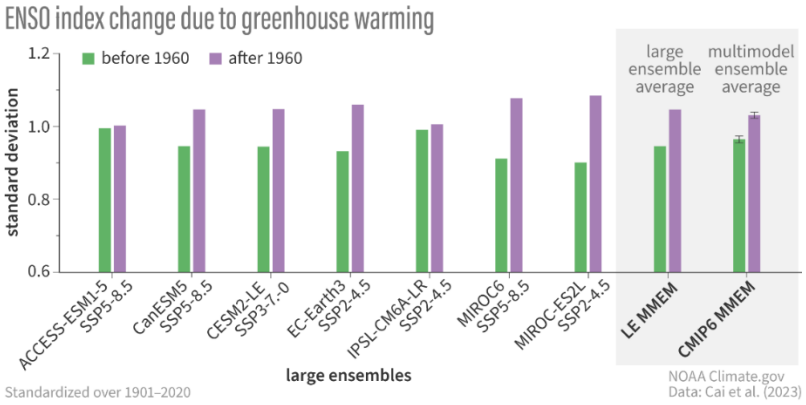
อาจเกิดได้จาก 2 สาเหตุได้แก่ เกิดจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรืออาจเกิดโดยการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ (Natural variability)

จากการศึกษาของ Cai et al. (2023) ได้ทำการศึกษาถึงการความแปรปรวนของการเกิดปรากฏการณ์ ENSO โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลกหลายแบบจำลอง และทำการศึกษาตั้งแต่ช่วงอดีตที่ผ่านมา ผลจากการศึกษาพบว่าลักษณะปรากฏการณ์ ENSO มีความแปรปรวนเพิ่มมากขึ้นประมาณ 10% ตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1960 จากการสะสมปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศที่เพิ่มสูงขึ้น ปรากฏการณ์ El Nino และ La Nina ที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งจะมีความรุนแรงที่เพิ่มมากขึ้น และมีความถี่ของการเกิดที่เพิ่มสูงขึ้น (**รูปที่ 2.6-2**) นอกจากนั้นจากรายงาน IPCC (2021) ได้มีการคาดการณ์ความแปรปรวนของปรากฏการณ์ ENSO ภายใต้สถานการณ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 5 สถานการณ์ (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5) (สถานการณ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกแสดงรายละเอียดในบทที่ 3) เปรียบเทียบกับช่วงเวลาในอดีตโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวน้ำทะเลและการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนบริเวณ Nino-3.4 พบว่า แต่ละสถานการณ์ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของอุณหภูมิและปริมาณฝนในบริเวณดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้น (**รูปที่ 2.6-3**)



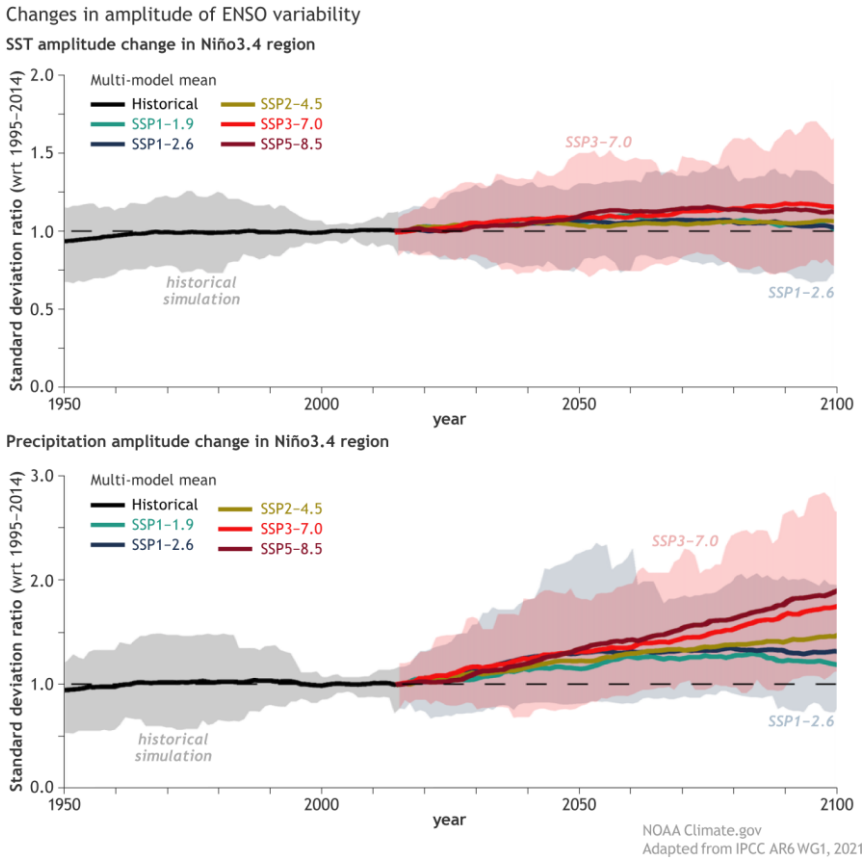
ที่มา: NOAA Climate.gov (https://www.climate.gov/media/15358)

รูปที่ 2.6-1 ความแปรปรวนของการเปลี่ยนแปลงอุณภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณ Nino-3.4 ของมหาสมุทรแปซิฟิค



ที่มา: NOAA Climate.gov (https://www.climate.gov/media/15358)

รูปที่ 2.6-2 การเปลี่ยนแปลงของ ENSO index ก่อนและหลังปี ค.ศ. 1960



ที่มา: NOAA Climate.gov (https://www.climate.gov/media/15358)

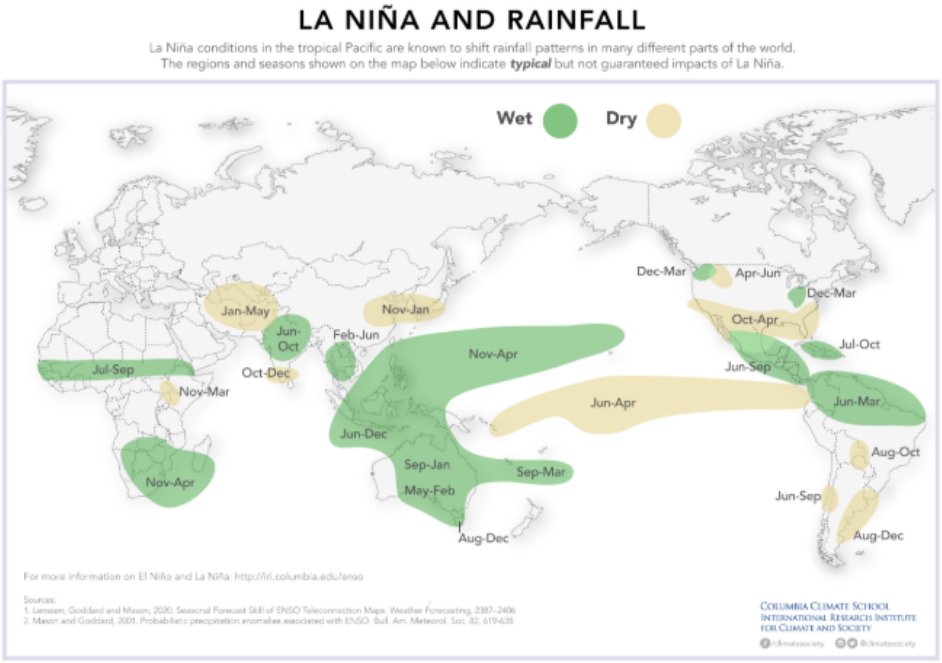
รูปที่ 2.6-3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวน้ำทะเล (บน) และปริมาณฝนบริเวณ Nino-3.4 (ล่าง) ภายใต้สถานการณ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การเปลี่ยนแปลงระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศและมหาสมุทรส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในหลายพื้นที่ทั่วโลก ปรากฏการณ์ของเอลนีโญและลานีญาส่งผลกระทบต่อเนื่องในหลายปัจจัยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของสถานการณ์ที่เกิดขึ้น WHO (2023) ได้ระบุถึงผลกระทบของปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญาที่มีต่อสภาพภูมิอากาศในหลายพื้นที่ เช่น ในแถบแอฟริกาเอลนีโญก่อให้เกิดความแห้งแล้งในเขตตอนใต้ของทวีป และในบางพื้นที่ของเขต Sahel ในขณะที่บริเวณตะวันออกของแอฟริกาในเขตศูนย์สูตรจะเกิดฝนตกเป็นระยะเวลาสั้นๆ ประมาณช่วงเดือนตุลาคม-ธันวาคม แต่เมื่อเกิดปรากฏารณ์ลานีญาจะเกิดฝนตกมากกว่าปกติบริเวณตอนใต้ของทวีปแอฟริกาและจะเกิดความแห้งแล้งกว่าปกติบริเวณเขตศูนย์สูตรและบริเวณตะวันออกของทวีปในช่วงเดือนธันวาคม – กุมภาพันธ์

ปริมาณฝนที่ตกจะลดลงบริเวณเอเชียใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แต่ในบริเวณด้านตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิคและตอนกลางของเอเชียจะมีปริมาณฝนตกเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดเอลนีโญ ในขณะที่ลานีญาจะส่งผลให้ปริมาณฝนแถบประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย และฟิลิปินส์เพิ่มมากขึ้น แต่บริเวณตอนกลางของทวีปเอซียปริมาณฝนจะลดลง

ในบริเวณแถบทวีปอเมริกาและอเมริกาใต้พบว่าเอลนีโญ ส่งผลให้เกิดปริมาณฝนตกหนักในแถบอเมริกากลางและทางด้านเหนือของเปรูและเอกวาดอร์ รวมถึงด้านเหนือและตะวันออกเฉียงใต้ของแถบอเมริกาใต้ ในขณะที่ลานีญาส่งผลให้เกิดความแห้งแล้งในพื้นที่ดังกล่าว **รูปที่ 2.6-4** แสดงผลของปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในหลายพื้นที่ทั่วโลก

นอกจากการปรากฏการณ์ของ ENSO แล้วอุณหภูมิผิวน้ำทะเลของทั้งพื้นที่มหาสมุทรแปซิฟิค (PDO) ก็ส่งผลต่อลักษณะสภาพภูมิอากาศโดยหากค่า PDO อยู่ในช่วง Warm (Cool) Phase จะส่งผลให้เกิดสถานการณ์ฝนตกหนัก (ความแห้งแล้ง) บริเวณพื้นที่ฝั่งตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิค และจะเกิดความแห้งแล้ง (ฝนตกหนัก) บริเวณเขตเอเชียและออสเตรเลีย (Hamlington et al., 2019) ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ PDO จะมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของ ENSO ในขณะที่ IOD ส่งผลต่อลักษณะสภาพอากาศ โดยในช่วง Negative IOD จะเกิดฝนตกหนักในพื้นที่บริเวณทางด้านตะวันออกของมหาสมุทรอินเดีย และยังส่งผลไปถึงสภาพอากาศในบริเวณอื่นทั่วโลก เช่น ทวีปอเมริกา ที่จะมีลักษณะสภาพอากาศเช่นเดียวกับสถานการณ์การเกิดลานีญาของ ENSO



ที่มา: IRI-Columbia Climate School (2023)

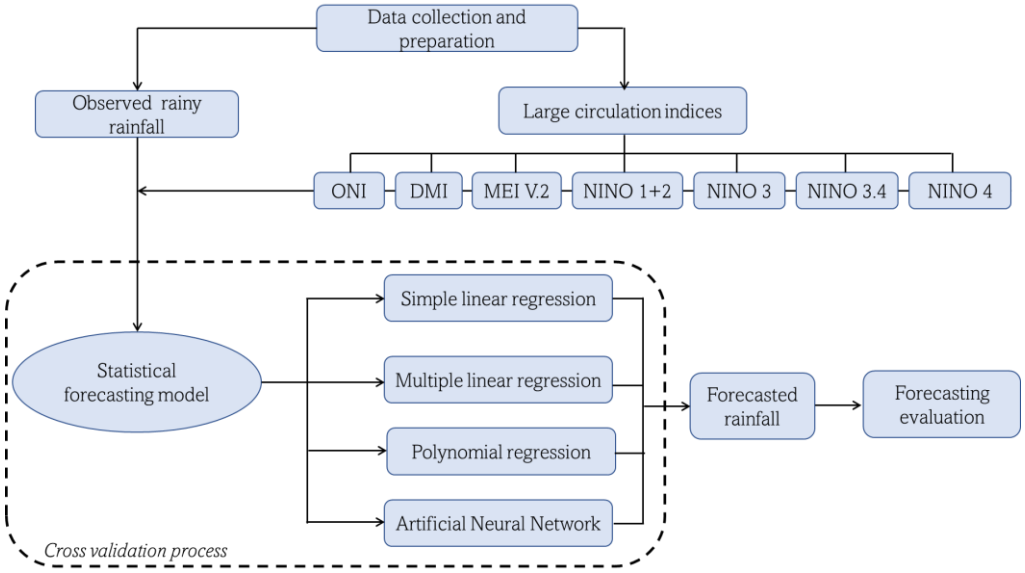
รูปที่ 2.6-4 El Nino / La Nina และการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบการหมุนเวียนสภาพอากาศกับกระบวนการอุทกวิทยาระดับลุ่มน้ำ

จากหัวข้อข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีความเกี่ยวเนื่องกับระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทร และมีผลต่อเนื่องถึงลักษณะสภาพภูมิอากาศในหลายพื้นที่ทั้งในพื้นที่ใกล้เคียงของปรากฏการณ์ดังกล่าวรวมถึงพื้นที่ที่ห่างไกล สำหรับความสัมพันธ์ของระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทรที่มีต่อพื้นที่ที่ห่างไกลเรียกว่าความสัมพันธ์ระยะไกล (Teleconnection) โดยระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทรมีผลกระทบต่อกระบวนการอุทกวิทยาในระดับลุ่มน้ำ ซึ่งได้มีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวในหลายพื้นที่ทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ

วิธีการทางสถิติได้ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินถึงความสัมพันธ์ของดัชนีบรรยากาศ-มหามุทรปริมาณฝน รวมถึงการคาดการณ์ปริมาณฝนล่วงหน้าทั้งในประเทศไทยและในหลายพื้นที่ทั่วโลก โดยในประเทศไทย Sittichok et al. (2024) ได้มีการประยุกต์ใช้ดัชนีการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทร 7 ดัชนี (ONI, DNI, MEI V.2, Nino4, Nino3.4, Nino3, Nino1+2) รวมถึงข้อมูลปริมาณฝนในอดีต เพื่อทำการประเมินและคาดการณ์ถึงปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีโดยใช้วิธีการทางสถิติทั้งในรูปแบบของการถดถอยเชิงเส้น การถดถอยไม่เชิงเส้น รวมถึงการใช้ Machine learning model ในการประเมินและคาดการณ์ปริมาณฝนล่วงหน้า 12-18 เดือน **รูปที่ 2.7-1** แสดงตัวอย่างแนวทางการคาดการณ์ปริมาณฝนดังกล่าว โดยผลการศึกษาพบว่าดัชนี DMI และ NINO มีอิทธิพลต่อ

ปริมาณฝนในประเทศไทยสามารถใช้คาดการณ์ปริมาณฝนในพื้นที่ศึกษาได้อยู่ในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีอื่น นอกจากนั้นยังพบว่า Machine learning model และการถดถอยไม่เชิงเส้นให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการเลือกใช้วิธีการทางสถิติในรูปแบบของการถดถอยเชิงเส้น



ที่มา: Sittichok et al. (2024)

รูปที่ 2.7-1 ตัวอย่างแนวทางการศึกษาความสัมพันธ์และการคาดการณ์ปริมาณฝนจากดัชนีบรรยากาศ-มหาสมุทร

นอกจากนั้นดัชนี ONI, SOI, DNI, Nino1+2, Nino3, Nino3.4, Nino4 รวมถึงดัชนีการเปลี่ยนแปลงของระดับผิวน้ำทะเล (Sea surface height anomaly) เรียกว่า South China Sea Index (SCSI) ได้ถูกนำมาประเมินถึงความสัมพันธ์และคาดการณ์ปริมาณฝนในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยโดย Buathong et al. (2024) เครื่องมือทางสถิติ ได้แก่ Pearson correlation analysis และ Empirical Orthogonal Function (EOF) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Principal Component Analysis (PCA) รวมถึงการใช้วิธีการที่เรียกว่า Autoregressive integrated moving average (ARIMA) ของแบบจำลอง SARIMAX model ถูกนำมาใช้ในการคาดการณ์ปริมาณฝน ผลการศึกษาพบว่า SCSI และ Nino 3 เป็นดัชนีที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อปริมาณฝนในพื้นที่ศึกษา

ดัชนีบรรยากาศ-มหาสมุทร ONI และ ดัชนี Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO) ซึ่งเป็นดัชนีที่คำนวณจาก Outgoing longwave radiation และ ความเร็วลมที่ระดับความกดอากาศ 850 และ 250 hPa บริเวณพื้นที่อ่าวเบงกอลและตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิค จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก 19 แบบจำลอง (รายละเอียดแบบจำลองดังบทที่ 3) ถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรตั้งต้นสำหรับการศึกษาถึงความสัมพันธ์กับดัชนีปริมาณฝนสุดขั้ว (Extreme rainfall) ของพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดย Abatan et al. (2023)

ซึ่งแบบจำลองแต่ละกลุ่มจะแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีบรรยากาศ-มหาสมุทร และดัชนีปริมาณฝนที่แตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่พบว่าดัชนีปริมาณฝนสุดขั้วมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบริเวณอ่าวเบงกอลในช่วงของการปรากฏการณ์ลานีญาและในช่วง Neutral ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิค

จากการศึกษาเพื่อประเมินความสัมพันธ์ของดัชนีบรรยากาศ-มหาสมุทรและลักษณะสภาพภูมิอากาศท้องถิ่นพบว่า ดัชนีที่มีอิทธิพลต่อภูมิอากาศท้องถิ่นจะมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ นอกจากนั้นการเลือกใช้วิธีการทางสถิติรวมถึงช่วงเวลาที่ใช้ในการศึกษาจะส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษา เนื่องด้วยวิธีการทางสถิติจะมีความอ่อนไหวต่อข้อมูลที่นำมาใช้ในการศึกษา ดังนั้นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาไปใช้ในการคาดการณ์เพื่อการบริหารจัดการน้ำจำเป็นต้องมีการทวนสอบข้อมูล วิธีการศึกษา รวมถึงการปรับปรุงข้อมูลให้เป็นปัจจุบันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องในการใช้งานต่อไป

สรุปบทที่ 2
ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศและมหาสมุทร

- ความผันแปรของระบบอากาศซีกโลกใต้ (El Noni Southern Oscillation: ENSO) เป็นระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทรที่มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงระบบสภาพภูมิอากาศของโลก เกิดขึ้นบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิค และส่งผลกระทบไปได้ในหลายพื้นที่ทั่วโลก ENSO สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงสภาวะปกติ (Neutral phase) ปรากฏการณ์เอลนิโญ (El-Nino) และปรากฏการณ์ลาณีญา (La-Nina)

- ช่วงสภาวะปกติ (Neutral phase) บริเวณด้านตะวันออกของมหาสมุทรแปซิฟิคจะมีอุณหภูมิต่ำและค่าความกดอากาศที่สูง ในขณะที่บริเวณด้านตะวันตกจะมีลักษณะที่ตรงข้ามซึ่งส่งผลให้ลมสินค้าตะวันออกเฉียงใต้พัดจากด้านตะวันออกไปยังด้านตะวันตกของมหาสมุทรส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ เกิดการพัดพากระแสน้ำด้านบนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังด้านตะวันตกของมหาสมุทรส่งผลให้เกิดความชุ่มชื้นและฝนตกชุก ในขณะที่ด้านตะวันออกมีความแห้งแล้ง

- ปรากฏการณ์เอลนีโญ (El-Nino) มีลักษณะทิศทางที่ตรงข้ามกับในช่วงของสภาวะปกติ ในบางช่วงเวลากระแสลมสินค้าตะวันออกเฉียงใต้เกิดอ่อนกำลังลง ส่งผลให้กระแสลมมีการเปลี่ยนทิศทางไปยังทิศทางตรงข้าม อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณด้านตะวันออกของมหาสมุทรจะสูงขึ้น พื้นที่ในบริเวณนี้จะมีความชุ่มชื้นและเกิดฝนตกหนัก ความสมบูรณ์ของธาตุอาหารและทรัพยากรทางทะเลจะลดลงเนื่องจากกระแสน้ำเย็นด้านล่างไม่สามารถขึ้นมาแทนที่กระแสน้ำอุ่นได้ ในขณะที่ด้านตะวันตกของมหาสมุทรจะเกิดความแห้งแล้ง

- ปรากฏการณ์ลานีญา (La-Nina) เป็นปรากฏการณ์ลักษณะเดียวกันกับในช่วงของสภาวะปกติ แต่จะมีความแตกต่างที่มีค่าความรุนแรงที่มากกว่า โดยลมสินค้าที่พัดจากทางตะวันตกไปยังตะวันออกของมหาสมุทรมีความรุนแรงที่เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ ส่งผลให้บริเวณประเทศอินโดนีเซียและออสเตรเลียมีระดับน้ำทะเลที่เพิ่มสูงขึ้น ฝนตกชุกเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่บริเวณชายฝั่งของประเทศเปรูจะเกิดความแห้งแล้งอย่างรุนแรง

- ดัชนีที่ใช้ในการประเมินสถานการณ์ของ ENSO ประกอบไปด้วย Southern Oscillation Index (SOI) ซึ่งอธิบายถึงความกดอากาศที่แตกต่างกัน, Ocean Nino Index (ONI) อธิบายถึงอุณหภูมิผิวน้ำทะเล (Equatorial Pacific Sea Surface Temperature (SST)) ซึ่งหากค่า ONI มีค่า

มากกว่า +0.5 °C คือปรากฏการณ์เอลนีโญ (Positive SST) ในขณะที่หากค่า ONI มีค่าต่ำกว่า -0.5 °C คือปรากฏการณ์ลานีญา (Negative SST), รังสีแสงอาทิตย์คลื่นยาวที่ออกนอกโลก (Outgoing Longwave Radiation: OLR) และ Multivariate ENSO Index (MEI) เป็นการประเมินสถานการณ์โดยพิจารณาตัวแปรหลายตัวร่วมกัน

- Pacific Decadal Oscillation (PDO) เป็นดัชนีที่บอกถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลในระยะยาว (ประมาณ 20-30 ปี) ของมหาสมุทรแปซิฟิค PDO ถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ ช่วง Cool phase คืออุณหภูมิผิวน้ำทะเลรวมถึงอุณหภูมิน้ำของมหาสมุทรแปซิฟิคมีค่าที่ต่ำในบริเวณพื้นที่ด้านตะวันออกของบริเวณเขตศูนย์สูตรของมหาสมุทร ในขณะที่บริเวณด้านเหนือ ตะวันตก และด้านใต้ของมหาสมุทรอุณหภูมิจะสูงกว่าปกติ ในขณะที่ในช่วง Warm phase บริเวณด้านตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิคจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า และบริเวณด้านตะวันออกจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น

- Indian Ocean Dipoles Indices (IOD) คือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณมหาสมุทรอินเดียเขตร้อนด้านตะวันออกและตะวันตกของมหาสมุทร โดยการตรวจวัดความแตกต่างของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลด้านตะวันออกและตะวันตกเรียกว่า Dipole Model Index (DMI) IOD แบ่งได้ 3 สถานะ ได้แก่ Positive IOD ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อบริเวณตะวันตกของมหาสมุทรอินเดียมีอุณหภูมิผิวน้ำทะเลที่สูงกว่าบริเวณด้านตะวันออก ก่อให้เกิดฝนบริเวณด้านตะวันตกของมหาสมุทรอินเดีย ได้แก่ บริเวณแอฟริกาตะวันออก คาบสมุทรอาหรับ และก่อให้เกิดความแห้งแล้งบริเวณแถบประเทศออสเตรเลีย และอินโดนีเซีย ในขณะที่ Negative IOD จะมีลักษณะที่ตรงข้ามกับช่วงของ Positive phase สำหรับช่วง Neutral phase มีลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลอากาศในรูปแบบเดียวกันกับในช่วงของ Negative phase

- ความสัมพันธ์ระยะไกล (Teleconnection) คือความสัมพันธ์ของระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทรที่มีต่อพื้นที่ที่ห่างไกลเรียกว่าความสัมพันธ์ระยะไกล สามารถประเมินได้โดยวิธีทางสถิติหลายวิธี โดยวิธีที่นิยมใช้ได้แก่ Pearson correlation, Regression analysis} Principle Component Analysis (PCA) และ Machine learning model

- ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทรส่งผลกระทบต่อหลายพื้นที่และหลายปัจจัยทั่วโลก ได้แก่ ผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศการเกิดความแห้งแล้งและ ปริมาณฝนที่ผิดปกติ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพในการเกิดคลื่นความร้อนรวมถึงการเกิดไฟป่าในหลายพื้นที่ และส่งผลต่อความมั่นคงด้านอาหาร

- การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ-มหาสมุทร อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลส่งผลต่อปรากฏการณ์ ENSO ที่จะมีความแปรปรวนเพิ่มมากขึ้น ความถี่และความรุนแรงของปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญามีความถี่และความรุนแรงที่เพิ่มสูงขึ้น

คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม

1. จงอธิบายกระบวนการของปรากฏการณ์ ENSO และผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่ต่างๆของโลก

2. จงค้นคว้าและอธิบายดัชนีบรรยากาศ-มหาสมุทรที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกนอกเหนือจากปรากฏการณ์ ENSO อีก 3 ดัชนี

3. จงอธิบายถึงความแตกต่างของการเลือกใช้วิธีการสถิติที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีบรรยากาศ-มหาสมุทรกับสภาพภูมิอากาศท้องถิ่น

4. จงค้นคว้าความสัมพันธ์ของการเกิดปรากฏการณ์ El-Nino และ La-Nina กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนของประเทศไทย พร้อมทั้งอธิบายและให้หลักฐานที่เกี่ยวเนื่องกับปรากฏการณ์ดังกล่าว

5. จงทดสอบการใช้วิธีการทางสถิติกับข้อมูลปริมาณฝนของประเทศไทยกับดัชนีบรรยากาศ-มหาสมุทรโดยการเลือกวิธีการทางสถิติ 1 วิธี (สามารถดาวน์โหลดข้อมูลปริมาณฝนและดัชนีได้จาก https://www.ncei.noaa.gov/maps/daily/ / https://psl.noaa.gov/enso/data.html)

เอกสารอ้างอิง

Australian Climate Influences. 2013. Bureau of Meteorology Australian Government.

Abatan, A.A., Collins, M., Babel, M.S., Khadka, D. and De Silva, Y.K. 2023. Sub-seasonal to seasonal drivers of dry extreme rainfall events over Northeast Thailand. Frontiers in Climate, doi.org/10.3389/fclim.2022.1031226

Brouwer, N., Connuck, H., Dubniczki, H., Gownaris, N., Howard, A., Olmsted, C., Wetzel. D., Whittinghill, K., Wilson, A., Zallek, T.2024. Ecology for All. https://bio.libretexts.org/Courses/Gettysburg_College/01%3A_Ecology_for_All/02%3A_The_Physical_Environment/2.06%3A_Atmospheric_and_Oceanic_Circulation

Barnston, A. 2015. Why are these so many ENSO indexes, instead of just one? NOAA Climate Prediction Center. https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/why-are-there-so-many-enso-indexes-instead-just-one

Buathong, K., Moonchai, S., Saenton, S. Supapakorn, T. and Rojsiraphisal, T. 2024. Predictive model for northern Thailand rainfall using Nino indexes and sea surface height anomalies in the South China Sea. Journal of Marine Science and Engineering, 12(35).

California Institute of Technology. 2024. El Nino / La nina Watch & PDO. https://sealevel.jpl.nasa.gov/data/el-nino-la-nina-watch-and-pdo/pacific-decadal-oscillation-pdo/#:~:text=The%20Pacific%20Decadal%20Oscillation%20(PDO,or%20a%20'warm'%20phase.

Cai, W., Ng, B., Geng, T. et al. 2023. Anthropogenic impacts on twentieth-century ENSO variability changes. Nat Rev Earth Environ 4, 407–418. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00427-8

Hamlington, B.D., Cheon, S.H., Piecuch, C.G., Karnauskas, K.B., Thompson, P.R., Kim, K.-Y., Reager, J.T., Landerer, F.W. and Frederikse, T. 2019. The dominant global modes of recent internal sea level variability. Journal of Geophysical Research: Oceans., 124 (4).

Heede, U.K. and Fedorov, A.V. 2023. Towards understanding the robust strengthening of ENSO and more frequent extreme EL Nino events in CMIP6 global warming simulations. Climate Dynamics, 61: 3047-3060.

IRI, Columbia Climate School. 2023. El Nino / La Nina and rainfall. https://iri.columbia.edu/wp-content/uploads/2023/05/ELNINO-RAINFALL-2023.pdf

IPCC. 2021. Climate Change 2021 The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Reported of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

Johnson, N. 2020. Meet ENSO's neighbor, the Indian Ocean Dipole. Science & Information for a Climate Smart Nation. https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/meet-enso%E2%80%99s-neighbor-indian-ocean-dipole

NCEI-NOAA (National Centers for Environmental Information). 2024. El Nin/Southern Oscillation Index. https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi

NCAR (National Center for Atmospheric Research). 2022. The climate data guide: multivariate ENSO index. Retrieved from https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/multivariate-enso-index

NOAA (National Environmental Satellite Data, and Information Service). 2025. What is a Monsoon. https://www.nesdis.noaa.gov/about/k-12-education/severe-weather/what-monsoon

Sittichok, K., Rattanapan, N. and Sakulkaew, R. 2024. Long-term seasonal rainfall forecasting using regression analysis and artificial neural network with large-scale circulation indices. ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports, 27(3). e252507.

WHO. 2023. El Nino Southern Oscillation (ENSO). Fact sheets. https://www.who.int/news-room/fact-sheets

บทที่ 3 – สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกและแบบจำลองภูมิอากาศโลก

Chapter 3 – Greenhouse Gas Emission Scenarios and General Circulation Models

บทที่ 3

สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกและแบบจำลองภูมิอากาศโลก | Greenhouse Gas Emission Scenarios and General Circulation Models

3.1 ความสำคัญของสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก

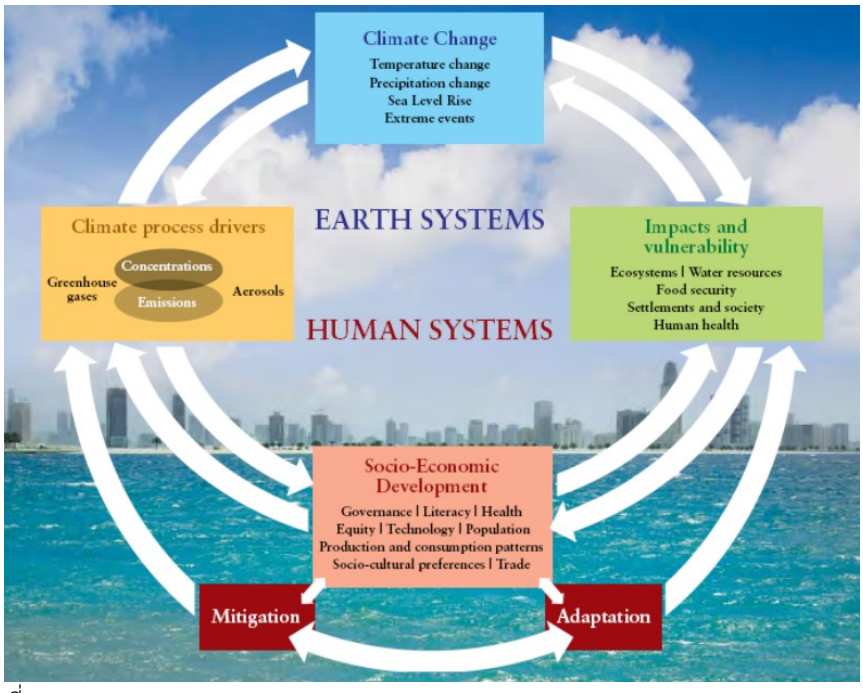
การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งตัวแปรที่ก่อให้เกิดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่แตกต่างกันนั้นประกอบไปด้วยหลายตัวแปร ได้แก่ การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคม รวมถึงการพัฒนาและการเปลี่ยนแปลงการใช้เทคโนโลยีในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวข้างต้นมีความผันแปรที่ค่อนข้างสูง และเป็นการยากที่จะสามารถคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นการสร้างสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวในหลากหลายรูปแบบจึงมีความสำคัญต่อการประเมินถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกในอนาคตที่แตกต่างกันออกไป ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานการณ์สามารถนำไปใช้ในการประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้น ผลกระทบที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม รวมถึงการศึกษาถึงแนวทางการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก และการปรับตัวที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ (IPCC, 2000) สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเกี่ยวข้องกับหลายกลุ่มงานที่ศึกษาทางด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มงานหลัก 3 กลุ่ม ดังนี้

- กลุ่มงานทางด้านแบบจำลองสภาพภูมิอากาศ (Climate model: CM) ซึ่งทำการศึกษาทางด้านผลกระทบจากสภาวะโลกร้อนที่มีต่อภูมิอากาศโลก และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

- กลุ่มงานทางด้านแบบจำลองเพื่อการประเมินผลแบบบูรณาการ (Integrated assessment model: IAM) เป็นกลุ่มงานที่ศึกษาและประเมินถึงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสถานการณ์ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกกับลักษณะทางด้านเศรษฐกิจและสังคม (Socio-economics)

- กลุ่มงานทางด้านการศึกษาถึงผลกระทบ การปรับตัวและความเปราะบางที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Impact, vulnerability and adaptation): การศึกษาในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่อยู่ในระดับภูมิภาค ซึ่งจำเป็นต้องนำองค์ความรู้จากหลากหลายด้านเข้ามาศึกษาร่วมกัน ได้แก่ ด้านสังคม เศรษฐกิจ วิศวกรรม และวิทยาศาสตร์พื้นฐาน เป็นต้น

โดยจากลักษณะการศึกษาข้างต้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้ดัง**รูปที่ 3.1.1-1**



ที่มา: Wayne (2013)

รูปที่ 3.1.1-1 ความสัมพันธ์ของการศึกษาทางด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก หรือ Emission scenarios ถูกกำหนดขึ้นครั้งแรกโดย IPCC ในปี ค.ศ. 1992 (IS92) เพื่อเป็นการระบุถึงความเป็นไปได้ของปริมาณก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas: GHGs) ในอนาคต และการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นจากปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่แตกต่างกัน จากนั้นได้เริ่มมีการพัฒนารูปแบบของสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกครั้งสำคัญในปี ค.ศ. 1996 และมีการจัดเผยแพร่รายงาน Special Report on Emission Scenarios (SRES) ในปี ค.ศ. 2000 จากสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SRES ซึ่งได้ถูกใช้ในรายงานการประเมินสถานการณ์ด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Assessment Report) ครั้งที่ 3 the Third Assessment Report (TAR) และ ครั้งที่ 4 Assessment Report Four (AR4) ในปี ค.ศ. 2007 จากนั้น IPCC ได้มีการพัฒนาสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพื่อใช้ในรายงานการประเมินด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ IPCC Fifth Assessment Report (AR5) เรียกว่า Representative Concentration Pathways (RCPs) ในปี ค.ศ. 2014 (รายละเอียด SRES และ RCPs แสดงดังภาคผนวก ข) และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสถานการณ์จาก RCPs เพิ่มเติมเป็น Shared Socio-Economic Concentration Pathways (SSPs) ซึ่งถูกใช้ในรายงาน IPCC Sixth Assessment Report (AR6) ในปี ค.ศ. 2021 โดยมีรายละเอียดของสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SSPs ดังหัวข้อถัดไป

3.2 สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก Share Socio-economic Pathways (SSPs)

3.2.1 รูปแบบสถานการณ์ SSPs

สถานการณ์สำหรับการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ Share Socio-economic Pathways (SSPs) เป็นสถานการณ์ที่ถูกกำหนดขึ้นและใช้ในการประเมินผลกระทบโดยแบบจำลองภูมิอากาศโลกในรายงานการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศฉบับที่ 6 (Assessment Report: AR6) การพัฒนาสถานการณ์ SSPs ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1) การกำหนดกรอบแนวทางของสถานการณ์ SSP: ในขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดลักษณะพื้นฐานสถานการณ์ของแต่ละ SSPs โดยมุ่งเน้นถึงการเปลี่ยนแปลงทางด้านเศรษฐกิจและสังคมในอนาคต โดยจำเป็นต้องมีการระบุถึงปัจจัยที่สำคัญหลักได้แก่ สภาพเศรษฐกิจและสังคม จำนวนประชากร การพัฒนาเทคโนโลยี วิถีชีวิต แนวนโยบายต่างๆ รวมถึงแนวทางของการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก และการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รายละเอียดกรอบแนวทางของแต่ละ SSP แสดงดัง**ตารางที่ 3.2.1-1**

ตารางที่ 3.2.1-1 สรุปลักษณะของแต่ละสถานการณ์ SSP

สถานการณ์	รายละเอียด
SSP1 (Sustainability)	สถานการณ์นี้จะให้ความสนใจในเรื่องของมาตรการในการลดก๊าซเรือนกระจก การพัฒนาวิธีการในการปรับตัว รวมถึงให้ความสำคัญในเรื่องของสิ่งแวดล้อม มีการให้ความสำคัญทางด้านการศึกษาและสุขภาพของประชากร เพื่อให้ประชากรมีความเป็นอยู่ที่ดี ความเหลื่อมล้ำที่เกิดขึ้นภายในสังคมลดลง แนวทางในการบริโภคมุ่งเน้นไปในทางที่ใช้ทรัพยากรและพลังงานที่ลดน้อยลง สถานการณ์ SSP1 หรือ SSP1-1.9 (ระดับพลังงานของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 1.9 W/m^2 ในปีค.ศ. 2100) เป็นสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับความตกลงทางปารีสที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิโลกไม่ให้เพิ่มมากกว่า 1.5 °C สถานการณ์ SSP1 หรือ SSP1-2.6 (ระดับพลังงานของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 2.6 W/m^2 ในปีค.ศ. 2100) เป็นสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับ RCP2.6

สถานการณ์	รายละเอียด
SSP2 (Middle of the Road)	สถานการณ์นี้จะมีลักษณะรูปแบบของสังคม เศรษฐกิจ และการใช้เทคโนโลยีต่างๆของโลกมีความใกล้เคียงกับที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน ในหลายประเทศมีความสนใจในเรื่องของการพัฒนาอย่างยั่งยืนแต่ยังไม่ประสบความสำเร็จ มีความพยายามในการใช้ทรัพยากรและพลังงานที่ลดน้อยลงแต่ยังคงประสบปัญหาเรื่องความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อม จำนวนของประชากรที่เพิ่มขึ้นอยู่ในระดับปานกลาง และมีแนวโน้มที่ลดลงในช่วงครึ่งหลังของศตวรรษ ยังคงมีความไม่เท่าเทียมกันในสังคม และต้องมีการพัฒนาแนวทางเพื่อลดความเปราะบางและการเปลี่ยนแปลงทางด้านสิ่งแวดล้อมในระดับหนึ่ง สถานการณ์ SSP2 หรือ SSP2-4.5 (ระดับพลังงานของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 2.4 W/m^2 ในปีค.ศ. 2100) เป็นสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับ RCP4.5
SSP 3 (Regional Rivalry)	การแข่งขันระหว่างประเทศเกิดขึ้นค่อนข้างสูงในสถานการณ์นี้ ซึ่งเกิดจากความขัดแย้งระหว่างภูมิภาคและกระแสของชาตินิยมที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แต่ละประเทศมุ่งเน้นในเรื่องของความมั่นคงภายในประเทศ โดยเฉพาะการให้ความสำคัญในเรื่องของความมั่นคงทางด้านอาหารและพลังงาน มีการลงทุนให้กับทางด้านการศึกษาและการพัฒนาเทคโนโลยีที่ลดลง การเติบโตทางเศรษฐกิจลดลง การเจริญเติบโตของประชากรลดลงในประเทศที่มีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม แต่ประชากรเพิ่มสูงขึ้นในประเทศที่กำลังพัฒนา ยังคงมีปัญหาในเรื่องของความเหลื่อมล้ำที่ค่อนข้างสูง และสิ่งแวดล้อมมีสภาพเสื่อมโทรมเป็นอย่างมากในบางภูมิภาค เนื่องจากไม่มีการให้ความสำคัญในเรื่องของการรักษาสิ่งแวดล้อมในระดับนานาชาติ สถานการณ์ SSP3 หรือ SSP3-7.0 (ระดับพลังงานของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 7.0 W/m^2 ในปีค.ศ. 2100) เป็นสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับปานกลาง
SSP4 (Inequality)	สภาวะของความไม่เท่าเทียมกันในสังคมจะเกิดขึ้นสูงในสถานการณ์นี้ ความร่วมมือกันในด้านต่างๆทั้งในเรื่องของการลงทุน เศรษฐกิจระหว่างประเทศจะลดลง มีความขัดแย้งภายในสังคมที่เพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาเทคโนโลยีในสถานการณ์นี้อยู่ในระดับที่สูง มีการลงทุนในเรื่องของพลังงานที่มีการใช้ถ่านหินและน้ำมัน แต่ยังคงมีการตระหนักในส่วนของการใช้

สถานการณ์	รายละเอียด
	พลังงานจากแหล่งพลังงานที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำ นโยบายทางด้านสิ่งแวดล้อมจะมุ่งเน้นไปในระดับท้องถิ่นที่อยู่ในกลุ่มคนที่มีรายได้กลางจนถึงมีรายได้สูง
SSP5 (Fossil-fueled development)	สถานการณ์นี้จะมีการแข่งขันทางด้านการพัฒนานวัตกรรมและมีความร่วมมือทางสังคมเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีให้ไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน มีการค้าขายกันระหว่างประเทศมากยิ่งขึ้น ให้ความสำคัญต่อการลงทุนทางด้านสุขภาพ การศึกษา เพื่อยกระดับสภาพความเป็นอยู่ในสังคม แต่ในขณะเดียวกันก็มีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ควบคู่ไปกับการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก และมีการเร่งรัดการใช้ทรัพยากรอื่นๆที่มีอยู่ ซึ่งจากปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้มีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วและจำนวนประชากรของโลกเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก และจะไปลดลงในช่วงปลายของศตวรรษที่ 21 แต่ได้มีการตระหนักและจัดการปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นในระดับท้องถิ่นได้อย่างสำเร็จ เช่น ปัญหามลพิษทางด้านอากาศ และสามารถที่จะจัดการระบบทางด้านสังคมและระบบนิเวศวิทยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ สถานการณ์ SSP5 หรือ SSP5-8.5 (ระดับพลังงานของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 8.5 W/m^2 ในปีค.ศ. 2100) เป็นสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับ RCP8.5

ที่มา: Riahi et al. (2017)

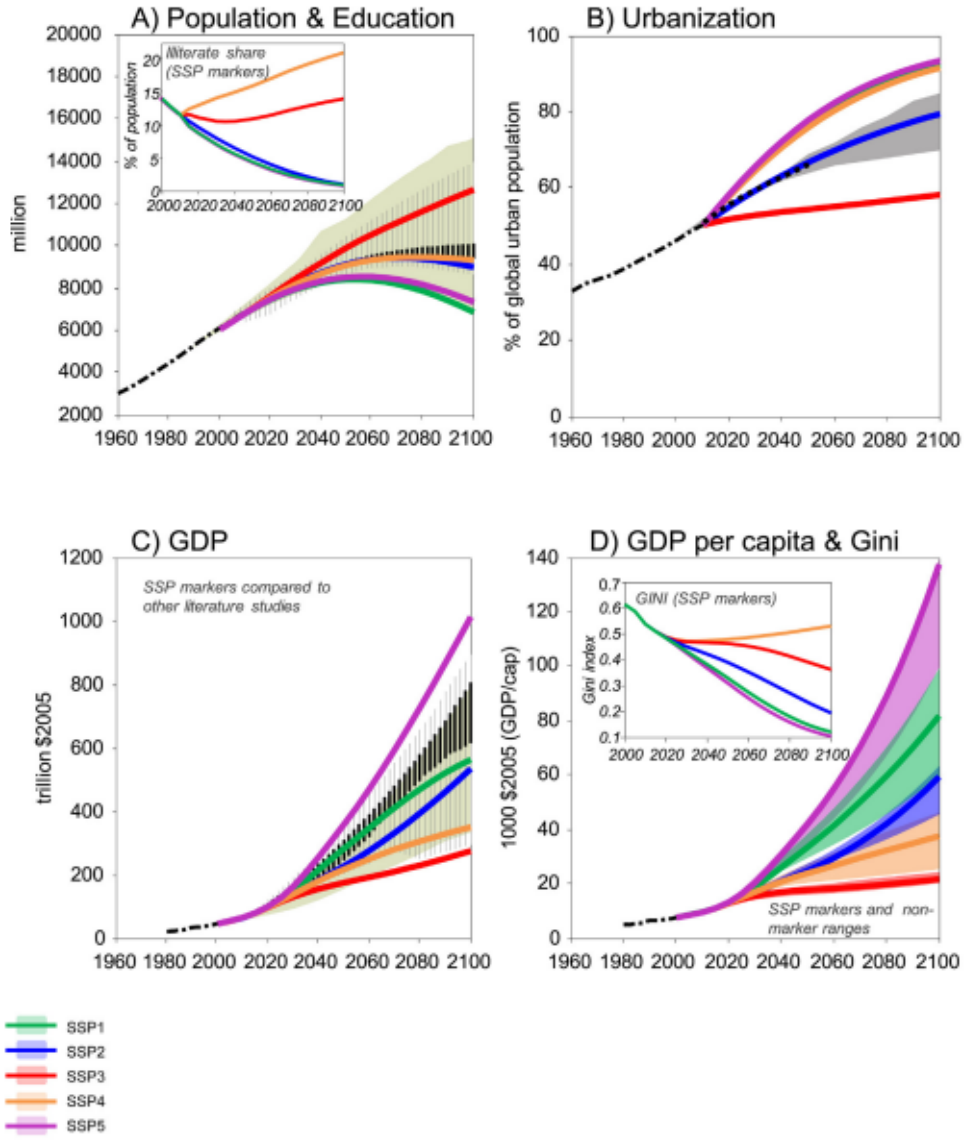
2) การกำหนดข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากกรอบแนวทางที่กำหนด: ในขั้นตอนนี้จะเป็นการการนำกรอบแนวคิดข้างต้นมากำหนดให้เป็นปัจจัยและข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative assumption) ที่เกี่ยวข้อง โดยปัจจัยหลักที่ถูกกำหนดได้แก่ ความต้องการใช้พลังงานทั้งหมด ต้นทุนพลังงานถ่านหิน เทคโนโลยีทางด้านพลังงาน กิจกรรมทางการเกษตร และการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน **ตารางที่ 3.2.1-2** แสดงตัวอย่างการกำหนดข้อมูลเชิงคุณภาพของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินของแต่ละสถานการณ์ SSPs

3) การกำหนดรายละเอียดเชิงปริมาณ: ปัจจัยที่ถูกกำหนดข้างต้นรวมถึงข้อมูลในรูปแบบเชิงคุณภาพ (การขยายพื้นที่ทางการเกษตร มาก น้อย ปานกลาง) จะถูกนำมาแปลผลให้เป็นเชิงปริมาณซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ จำนวนประชากร การศึกษา การขยายตัวของเมือง และการพัฒนาทางเศรษฐกิจ (**รูปที่ 3.2.1-1**) ตัวอย่างเช่น ภาพฉาย (Projection) ของจำนวนประชากรจะใช้แบบจำลองการประเมินประชากรในหลายมิติโดยการตั้งสมมติฐานในหลายรูปแบบ เช่น อัตรา

การเติบโต อัตราการตาย การย้ายถิ่นฐาน เป็นต้น โดยข้อมูลที่ประเมินได้จะต้องสอดคล้องในลักษณะรูปแบบของแต่ละสถานการณ์ โดยจะเห็นได้ว่า SSP1 และ SSP5 มีจำนวนประชากรประมาณ 7 ล้านคนในปี ค.ศ. 2100 และจำนวนประชากรสูงสุดเกิดขึ้นในสถานการณ์ SSP3 โดยมีจำนวนประชากรประมาณ 12.6 พันล้านคน ในขณะที่มีการขยายตัวของเมืองเท่ากับ 60% (SSP3), 80% (SSP2) และ 92% (SSP1, SSP4, SSP5) และมีภาพฉาย GDP ที่สูงที่สุดคือสถานการณ์ SSP5 ซึ่งมีสถานการณ์ที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและมีค่าเฉลี่ยรายได้ประชากรสูงที่สุด

4) การพัฒนาสถานการณ์พื้นฐานของ SSP: การพัฒนาสถานการณ์พื้นฐานของ SSP เกี่ยวเนื่องกับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ การใช้พลังงาน การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งต่อเนื่องไปถึงการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศ โดยสำหรับสถานการณ์พลังงานของ SSPs จะครอบคลุมทั้งการใช้พลังงาน และแหล่งพลังงานซึ่งเกี่ยวเนื่องกับสมมติฐานของ SSPs ที่ถูกกำหนดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี การเติบโตทางเศรษฐกิจ แหล่งพลังงานทางเลือกต่างๆ รวมถึงแหล่งพลังงานดั้งเดิมในการใช้ถ่านหิน เช่น SSP3 และ SSP5 มีการใช้พลังงานหลายรูปแบบรวมถึงการเพิ่มขึ้นของการใช้ถ่านหิน ซึ่งจำเป็นอย่างมากที่ต้องมีมาตรการเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก ในขณะที่ SS1 และ SSP4 มีการใช้พลังงานทดแทนและมีการลดการปลดปล่อย CO_2 ในขณะที่ SSP2 เป็นสถานการณ์ที่มีความสมดุลของการใช้พลังงาน สำหรับการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจะพิจารณาในเรื่องของพื้นที่การเกษตร และความต้องการของภาคอุตสาหกรรมซึ่งจะมีความแตกต่างกันในแต่ละ SSPs ตัวอย่างเช่น SSP1 เป็นสถานการณ์ที่มีความยั่งยืนในการใช้ประโยชน์ที่ดินเนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของประชากรที่ต่ำ มีการจัดการผลผลิตทางด้านการเกษตรที่มีประสิทธิภาพ มีการจัดการขยะที่เหมาะสม **รูปที่ 3.2.1-2** แสดงตัวอย่างลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละสถานการณ์

5) การพัฒนาสถานการณ์ SSPs โดยพิจารณากลยุทธ์การลดก๊าซเรือนกระจก: เพื่อให้ปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศลดลงจำเป็นต้องมีนโยบายรวมถึงมาตรการที่เกี่ยวข้องในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งในส่วนของพลังงาน อุตสาหกรรม และการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับมาตรการต่างๆจะถูกนำเข้าสู่แบบจำลอง IAM เช่น การใช้พลังงานสะอาดแทนการใช้พลังงานจากถ่านหิน หรือวิธีการในการอนุรักษ์พลังงาน รวมถึงการนำแนวทางการดักเก็บ CO_2 มาใช้เพื่อลดปริมาณก๊าซในชั้นบรรยากาศ ทางด้านกิจกรรมทางการเกษตร ได้แก่ การลดการปลดปล่อย CH_4 และ N_2O รวมถึงการลดการตัดไม้ทำลายป่า **รูปที่ 3.2.1-3** แสดงความต้องการการดำเนินงานทางด้านการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในแต่ละสถานการณ์ SSP ที่แตกต่างกัน



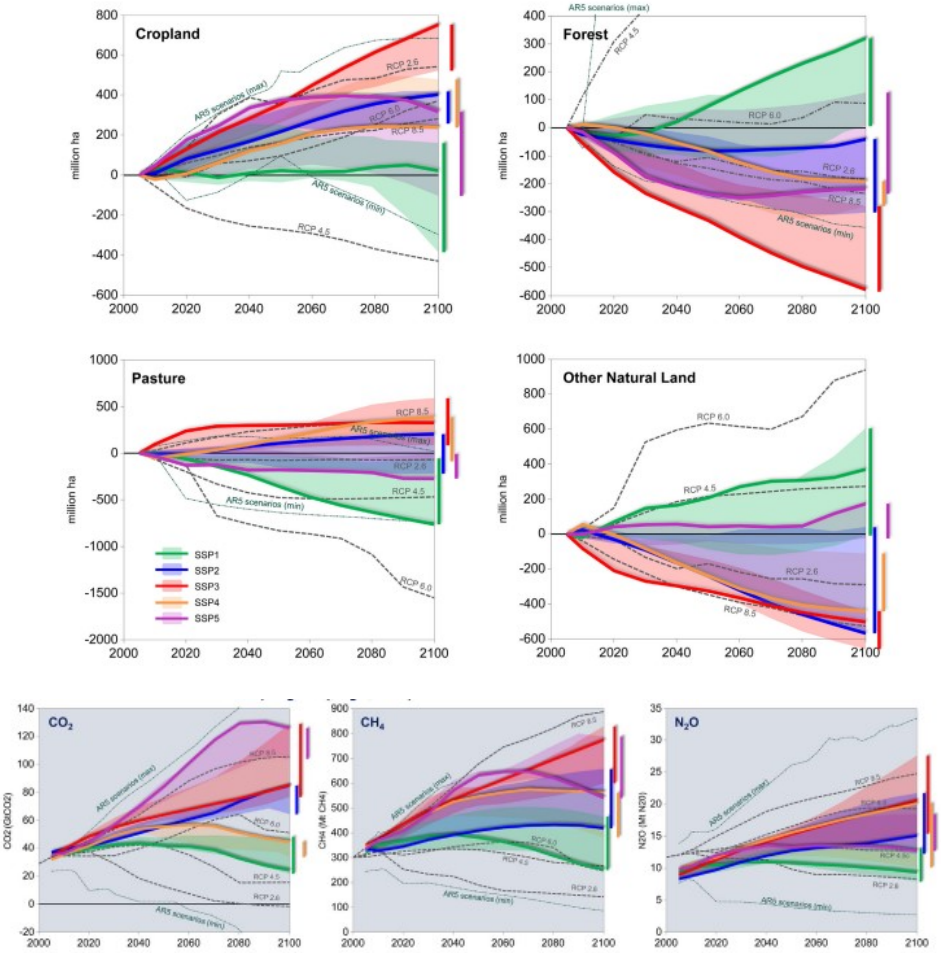
ที่มา: Riahi et al. (2017)

รูปที่ 3.2.1-1 ลักษณะทางเศรษฐกิจ-สังคมของแต่ละสถานการณ์ SSPs

ตารางที่ 3.2.1-2 สมมติฐานการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและกิจกรรมทางการเกษตรแต่ละ SSPs

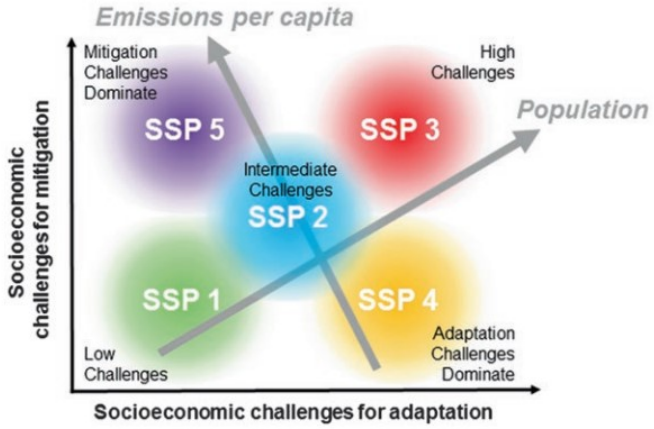
	SSP1			SSP2			SSP3			SSP4			SSP5		
	การแบ่งกลุ่มรายได้ของแต่ละประเทศ														
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
ข้อกำหนดของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน	เข้มงวด			ปานกลาง			ไม่เข้มงวด			ไม่เข้มงวด	ปานกลาง	เข้มงวด	ปานกลาง		
<u>กิจกรรมทางการเกษตร</u>															
การขยายตัวของพื้นที่ทางการเกษตร	รวดเร็ว	รวดเร็ว	ปานกลาง	ปานกลาง			ช้า			ช้า	ปานกลาง	รวดเร็ว	รวดเร็ว		
ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการผลิตอาหาร	น้อย			ปานกลาง			สูง			ปานกลาง			สูง		
การค้าระหว่างประเทศ	มุ่งเน้นการค้าระดับโลก			มุ่งเน้นระดับภูมิภาค			มุ่งเน้นระดับภูมิภาค			มีข้อจำกัดในการค้า	มุ่งเน้นการค้าระดับโลก	มุ่งเน้นการค้าระดับโลก	มุ่งเน้นการค้าระดับโลก		

ที่มา: Riahi et al. (2017)



ที่มา: Riahi et al. (2017)

รูปที่ 3.2.1-2 การใช้ประโยชน์ที่ดินและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละสถานการณ์ SSPs



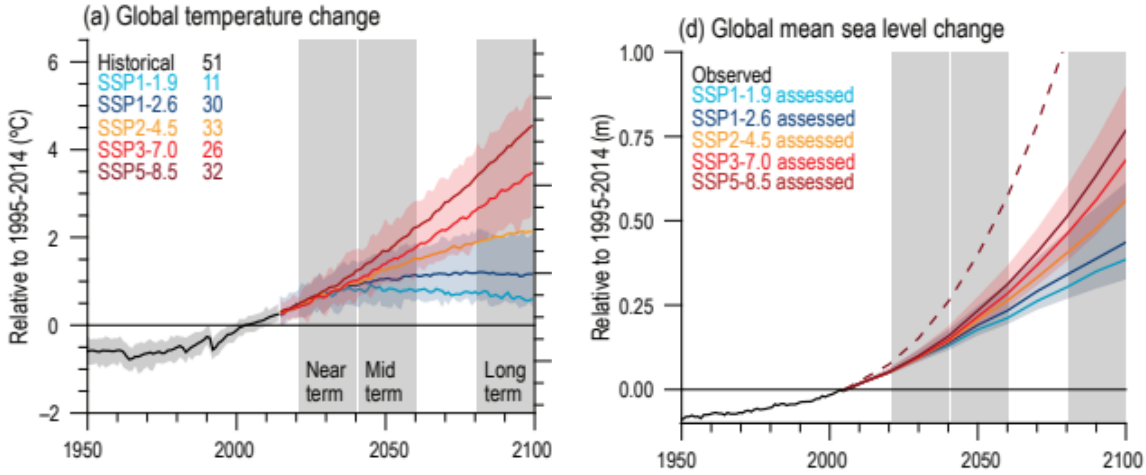
ที่มา: O'Sullivan (2018)

รูปที่ 3.2.1-3 ความต้องการการดำเนินงานทางด้านการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก และแนวทางการปรับตัว

3.2.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้สถานการณ์ SSPs

สถานการณ์ SSPs ที่ถูกกำหนดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกโดยการใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลกจากหลายแบบจำลอง (CMIP6) (รายละเอียดหัวข้อ 3.4) ซึ่งได้มีการประเมินการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกแบ่งเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ในช่วงระยะใกล้ (Near-term) อยู่ในช่วงปี ค.ศ. 2021-2040 ช่วงระยะกลาง (Mid-term) ค.ศ. 2041-2060 และในช่วงระยะไกล (Long-term) ค.ศ. 2081-2100 โดยจะมีการเปรียบเทียบกับช่วงอดีต 2 ช่วง ได้แก่ ในปี ค.ศ. 1995-2014 ซึ่งเป็นช่วงอดีตที่ผ่านมาไม่นาน และในช่วงอดีตก่อนยุคการปฏิวัติอุตสาหกรรมระหว่างปี ค.ศ. 1850-1990 (IPCC, 2021)

ผลจากแบบจำลอง CMIP6 พบว่าแนวโน้มของอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นในระยะยาว และมีค่าสูงขึ้นมากกว่าการทดสอบของแบบจำลอง CMIP5 โดย SSP2-4.5 SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 1.5-1.6 °C เฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 2030 และจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2.0 °C สำหรับสถานการณ์ SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 เฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 2030 และอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 3.0 °C สำหรับสถานการณ์ SSP5-8.5 เฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 2060 (**ตารางที่ 3.2.2-1**) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละสถานการณ์ในช่วงเวลาเดียวกันจะพบว่า อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุดสำหรับสถานการณ์ SSP5-8.5 และอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นในอัตราต่ำที่สุดสำหรับสถานการณ์ SSP1-1.9 โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงต้นของระยะเวลาช่วงระยะกลางเป็นต้นไป (**รูปที่ 3.2.2-1**) นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาถึงระดับน้ำทะเลจะพบว่าแนวโน้มของระดับน้ำทะเลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยในช่วงปี ค.ศ. 2081-2100 ระดับน้ำทะเลมีแนวโน้มสูงขึ้นประมาณ 0.46-0.74 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับระดับน้ำทะเลในช่วงปี ค.ศ. 1995-2014 และจะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.30-0.54 เมตร ภายใต้สถานการณ์ SSP1-2.6 เป็นต้น (Lee et al , 2021)



ที่มา: Lee et al (2021)

รูปที่ 3.2.2-1 อุณหภูมิและระดับน้ำทะเลในแต่ละสถานการณ์ SSPs

ตารางที่ 3.2.2-1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสถานการณ์ SSPs

Scenario	Near term, 2021-2040		Midterm, 2041-2060		Long term, 2081-2100	
	Best estimate	Very likely range (°C)	Best estimate	Very likely range (°C)	Best estimate	Very likely range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

ที่มา: IPCC (2021)

3.3 หลักการทำงานแบบจำลองภูมิอากาศโลก

แบบจำลองภูมิอากาศโลกมีชื่อภาษาอังกฤษว่า Global Climate Models (GCM) หรือ General Circulation Models (GCM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินสภาพอากาศของโลก ประกอบไปด้วยสมการที่เกี่ยวเนื่องกับปฏิกิริยาหรือปฏิสัมพันธ์ของหลากหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาพภูมิอากาศของโลก ได้แก่ ส่วนของชั้นบรรยากาศ (Atmospheric component) ประกอบไปด้วยการคำนวณเรื่องของเมฆ ละอองลอย การส่งผ่านความร้อน และการเคลื่อนที่ของไอน้ำของทั้งโลก ส่วนของพื้นดิน (Land surface component) ได้แก่ ลักษณะของสภาพภูมิประเทศ การใช้ประโยชน์ที่ดิน บริเวณพื้นที่ที่มีหิมะปกคลุม แหล่งกักเก็บน้ำ เป็นต้น ส่วนของมหาสมุทร (Ocean component) เกี่ยวเนื่องกับการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ ลักษณะทางเคมีและชีวธรณีของมหาสมุทร เนื่องจากมหาสมุทรเป็นแหล่งเก็บกักความร้อนและคาร์บอนในระบบภูมิอากาศโลก และสุดท้ายได้แก่ ส่วนประกอบของทะเลที่ปกคลุมไปด้วยน้ำแข็ง ซึ่งจะเกี่ยวเนื่องกับการสะท้อนและการดูดซับรังสีจากดวงอาทิตย์ รวมถึงการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างมหาสมุทรและชั้นบรรยากาศ (GFDL, 2022) องค์ความรู้หรือสมการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกใช้ในแบบจำลอง GCM สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

- ระบบภูมิอากาศพลวัตร (The dynamic of climate system) เป็นระบบที่อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของมวลอากาศและการส่งผ่านพลังงานของทั่วโลก

- ฟิสิกส์ของระบบภูมิอากาศ (The physics of climate system) เป็นระบบทางด้านลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางด้านฟิสิกส์ของภูมิอากาศ เช่น การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในส่วนของชั้นบรรยากาศ การระเหย หรือหลักการทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์

- ความสัมพันธ์ของระบบชั้นบรรยากาศกับปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ปฏิสัมพันธ์ของชั้นบรรยากาศและมหาสมุทร ลักษณะทางด้านภูมิประเทศที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ เป็นต้น

ตัวอย่างสมการที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง GCM ได้แก่ ทฤษฎีของเทอร์โมไดนามิกส์ (First law thermodynamics) หรือกฎอนุรักษ์พลังงาน ที่มีหลักการที่ว่า พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปหรือถูกถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำให้สูญสลายไปได้ หรือองค์ความรู้ที่เกี่ยวเนื่องกับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศและความดันไอน้ำของชั้นบรรยากาศ ได้แก่ สมการ Clausius-Clapeyron Equation องค์ความรู้ทางด้านของไหลซึ่งจะรวมไปถึงคุณสมบัติของก๊าซ ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่นของก๊าซ รวมถึงการศึกษาทางด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศซึ่งต้องมีองค์ความรู้ที่เกี่ยวเนื่องกับภาวะเรือนกระจกในการควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวโลก ได้แก่ สมการ Stefan-Boltzmann Law เป็นต้น GCM เป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยการใช้ภาษาทางด้านคอมพิวเตอร์ เช่น ภาษา Fortran และ ภาษา C มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งการประมวลผลของแบบจำลอง GCM จำเป็นต้องใช้ประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณที่สูงมาก เนื่องจากความซับซ้อนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อสภาพภูมิอากาศ (CIESIN, 1995; McSweeney and Hausfather, 2018)

แบบจำลอง GCM จะอธิบายและประเมินลักษณะสภาพภูมิอากาศในรูปแบบของ Three dimensional grid โดยจะมีความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution) อยู่ที่ประมาณ 100-600 กิโลเมตร และในแต่ละกริดจะมีการคำนวณโดยการแบ่งเป็นชั้น (Vertical layer) ประมาณ 10-20 ชั้นขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ และประมาณ 30 ชั้นลงสู่มหาสมุทร (**รูปที่ 3.3-1**) (IPCC, 2022a) แบบจำลอง GCM สามารถใช้งานได้ในหลายวัตถุประสงค์ เช่น การคาดการณ์สภาพอากาศ (Weather forecasting) การประเมินสภาพอากาศในปัจจุบัน และการประยุกต์ใช้ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก หลักการทำงานของแบบจำลอง GCM สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ขั้นตอนหลัก (Bralower and Bice, 2022) ดังนี้

1) การแบ่งพื้นที่หรือกริดเซลล์ในการคำนวณ: แบบจำลอง GCM จะทำการแบ่งกริดเซลล์ในการคำนวณทั้งในส่วนของชั้นบรรยากาศและมหาสมุทรในรูปแบบของ 3-D grid โดยจะมีขนาดของกริด (Horizontal scale) อยู่ที่ประมาณ 2°x2° (ละติจูด x ลองจิจูด) และมีจำนวนชั้นของเซลล์สูงขึ้นไปในชั้นบรรยากาศ และลงไปตามความลึกของมหาสมุทรประมาณ 20-40 ชั้น (Vertical layers) ซึ่งจะมีจำนวนเซลล์ที่ต้องคำนวณทั้งสิ้นประมาณ 500,000 เซลล์

2) ในแต่ละเซลล์ที่คำนวณจะมีการกำหนดลักษณะทางกายภาพของเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆตัวอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ค่าความเค็มของมหาสมุทร และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจก เป็นต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นการกำหนดโดยพิจารณาถึงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบัน

3) แบบจำลองจะทำการคำนวณค่าความกดอากาศ (Pressure) ในแต่ละกริดเซลล์ โดยพิจารณาจากค่าของอุณหภูมิ ค่าความเค็ม และค่าความชื้นสัมพัทธ์ ร่วมกับลักษณะการหมุนของโลกซึ่งจะเป็นการประเมินถึงค่าความเร็วลมในแต่ละกริดเซลล์ โดยเกี่ยวเนื่องถึงความสัมพันธ์ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปัจจัยดังกล่าวกับกริดเซลล์ที่อยู่ข้างเคียง

4) ขั้นตอนถัดมาแบบจำลองจะทำการประเมินถึงการก่อตัวของเมฆจากปัจจัยของอุณหภูมิ ความกดอากาศ รูปแบบการเคลื่อนที่ของอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งลักษณะรูปแบบของการเกิดเมฆจะเกี่ยวเนื่องกับค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณแสงที่วัตถุสะท้อนหรือดูดซับไว้ (Albedo)

5) แบบจำลองยังสามารถคำนวณถึงอัตราการระเหย (Evaporation) ปริมาณฝนและหิมะ (Precipitation) ปริมาณน้ำท่า (Runoff) ซึ่งอัตราการระเหยและปริมาณฝนเกี่ยวเนื่องกับการถ่ายทอดพลังงาน (Heat transfer) ที่เกิดขึ้นบนโลก

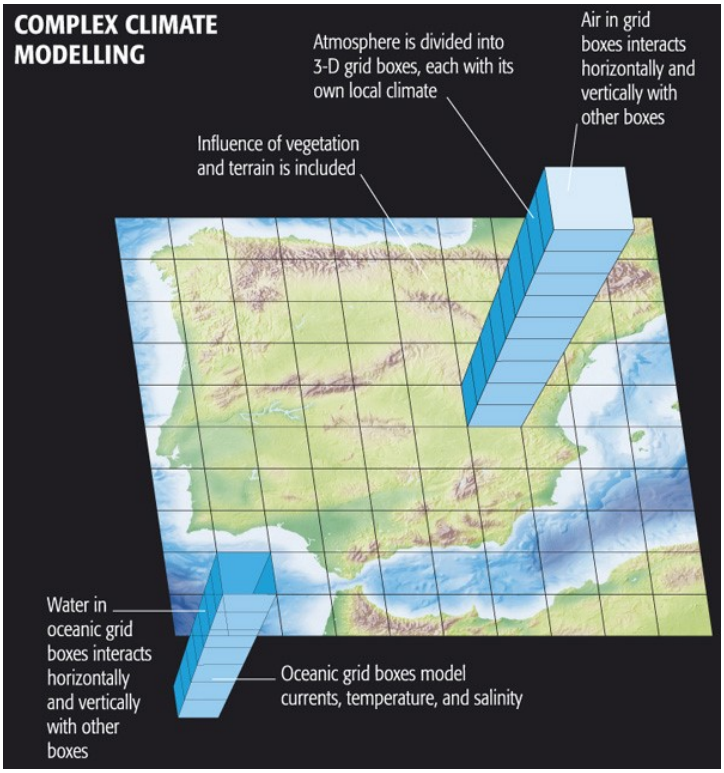
6) แบบจำลองยังสามารถคำนวณรายละเอียดอื่นๆ ซึ่งจะมีความแตกต่างกันไปในแต่ละแบบจำลอง เช่น การสังเคราะห์แสงของพืช การแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างพืช ดิน บรรยากาศ และมหาสมุทร เป็นต้น

3.4 ประเภทของแบบจำลองภูมิอากาศโลก

แบบจำลอง GCM เริ่มต้นมาจากแบบจำลอง Energy Balance Models (EBM) เป็นการคำนวณพื้นฐานของสมดุลด้านพลังงาน โดยยังไม่มีการพิจารณาลักษณะทางด้านสภาพภูมิอากาศทั้งหมดในแบบจำลอง มีเพียงแต่การจำลองถึงสมดุลพลังงานของรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกและสะท้อนกลับออกไป ปัจจัยทางด้านสภาพภูมิอากาศที่ถูกพิจารณาในแบบจำลอง EBM มีเพียงแต่อุณหภูมิพื้นผิวเพียงอย่างเดียว ซึ่งหลังจากการพัฒนาของแบบจำลอง EBM ได้มีการพัฒนาแบบจำลอง Radiative Convective Models ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองการส่งผ่านพลังงานผ่านชั้นบรรยากาศในแต่ละชั้นความสูงที่แตกต่างกัน

จากการพัฒนาแบบจำลอง Radiative Convection Models จึงเข้าสู่การพัฒนาแบบจำลอง GCM โดยพิจารณาถึงลักษณะทางฟิสิกส์ของสภาพบรรยายากาศ การไหลของอากาศ และไอน้ำในบรรยากาศ รวมถึงการส่งผ่านความร้อนในชั้นบรรยากาศเอง และระหว่างชั้นบรรยากาศกับมหาสมุทร ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาแบบจำลอง แบบจำลองภูมิอากาศโลกถูกพัฒนาให้มีการคำนวณระบบของโลก (Earth System) ในลักษณะที่มีการแยกส่วน และมีการคำนวณแบบแบ่งเป็นกริดแต่ละชั้น แบบจำลอง Atmospheric General Circulation Model (AGCM) จะเป็นการคำนวณโดยพิจารณา

ถึงลักษณะของชั้นบรรยากาศเพียงอย่างเดียว ในขณะที่แบบจำลอง Oceanic General Circulation Model (OGCM) เป็นการคำนวณโดยพิจารณาถึงระบบของมหาสมุทรเพียงอย่างเดียวเช่นเดียวกัน หลังจากนั้นจึงได้มีการพัฒนาแบบจำลอง Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model (AOGCM) ให้สามารถคำนวณถึงความสัมพันธ์ของชั้นบรรยากาศ มหาสมุทร และพื้นดิน ในการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกันเพื่อประเมินถึงระบบของโลกได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น (McSweeney and Hausfather, 2018) ซึ่งในแต่ละช่วงเวลามีการพัฒนาของแบบจำลองให้มีความสามารถในการคำนวณปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องได้เพิ่มมากขึ้น แบบจำลองภูมิอากาศโลกได้ถูกพัฒนาขึ้นในหลายหน่วยงานจากหลายประเทศ โดยชื่อของแบบจำลองโดยส่วนใหญ่จะถูกตั้งตามชื่อของหน่วยงานที่พัฒนาแบบจำลอง ตัวอย่างของหน่วยงานและแบบจำลองภูมิอากาศโลกแสดงดัง **ตารางที่ 3.4-1**



Credit: Mann & Kump, Dire Predictions: Understanding Climate Change, 2nd Edition

รูปที่ 3.3-1 ลักษณะการคำนวณของแบบจำลองภูมิอากาศโลก

ตารางที่ 3.4-1 หน่วยงานที่พัฒนาแบบจำลองภูมิอากาศโลก

ลำดับที่	หน่วยงาน	ประเทศ	ความละเอียด
1	Atmospheric and Environmental Research (AER)	US	10 km
2	Research Center for Environmental Changes (AS-RCEC)	UK	25-100 km
3	Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research (AWI)	Germany	25-250 km
4	Beijing Climate Centre (BCC)	Chaina	25-250 km
5	Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)	UK	
6	Chinese Academy of Sciences (CAS)	China	10-10000 km
7	Center for Climate Change Research, Indian Institute of Tropical Meteorology (CCCR-IITM)	India	250 km
8	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)	Canada	10-500 km
9	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC)	Italy	25-100 km
10	Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM)	France	25-250 km
11	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)	Australia	25-250 km
12	Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)	Germany	20-250 km
13	Deutscher Wetterdienst (DWD)	Germany	50-100 km
14	Lawrence Livermore National Laboratory and others (E3SM)	USA	100 km

ลำดับที่	หน่วยงาน	ประเทศ	ความละเอียด
15	EC-Earth consortium (EC-EARTH)	Sweden - other countries	10-250 km
16	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)	UK	25-100 km
17	First Institute of Oceanograph and Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology (FIO-QLNM)	China	100-10000 km
18	HAMMOZ-Consortium (HAMMOZ)	Germany – other countries	250 km
19	Coordinate working group (INM)	Germany – other countries	100 km
20	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	France	10-500 km
21	Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST)	Korea	250 km
22	Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)	USA	100 km
23	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology – and others (MIROC)	Japan	10-500 km
24	Met Office Hadley Centre (MOHC)	UK	10-250 km
25	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Germany	50-250 km
26	Meteorological Research Institute (MRI)	Japan	25-500 km
27	Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	USA	10-250 km
28	National Center for Atmospheric Research (NCAR)	USA	25-250 km

ลำดับที่	หน่วยงาน	ประเทศ	ความละเอียด
29	NorESM Climate modeling Consortium consisting of CICERO – others (NCC)	Norway-other countries	100-250 km
30	Natural Environment Research Council (NERC)	UK	10-250 km
31	National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration (NIMS-KMA)	Korea	100-250 km
32	National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA)	New Zealand	250 km
33	National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (NOAA-GFDL)	USA	10-250 km
34	National Taiwan University (NTU)	Taiwan	100 km
35	Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST)	China	100-250 km
36	Atmospheric and Environmental Research and others (RTE-RRTMGP-Consortium)	USA	10 km
37	Oak Ridge National Laboratory – and others (RUBISCO)	USA	50 km
38	Seoul National University (SNU)	Korea	100 km
39	Department of Earth System Science, Tsinghua University (THU)	China	100 km
40	Department of Geosciences, University of Arizona (UA)	USA	250 km
41	Department of Earth System Science, University of California Irvine (UCI)	USA	100 km

ลำดับที่	หน่วยงาน	ประเทศ	ความละเอียด
42	Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara (UCSB)	USA	100 km
43	Universitat Hamburg (UHH)	Germany	10 km

ที่มา: World Climate Research Programme (2024)

การประยุกต์ใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลกสามารถช่วยในการประเมินลักษณะของสภาพภูมิอากาศได้หลายกรณี ซึ่งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั่วโลกได้มีการดำเนินงานความร่วมมือในการประยุกต์ใช้และพัฒนาแบบจำลองภูมิอากาศโลก พร้อมทั้งแลกเปลี่ยนแนวทาง รวมถึงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นเรียกว่า the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) ซึ่งเป็นความร่วมมือของ the World Climate Research Programme (WCRP) โดยผลที่ได้จากความร่วมมือในการประเมินสภาพภูมิอากาศจะถูกนำไปใช้ในการประเมินผลโดยคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) (IPCCb, 2022(b)) ซึ่ง CMIP มีการดำเนินงาน 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) การศึกษาวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศทั่วไป โดยใช้ชื่อว่า DECK (Diagnostic, Evaluation and Characterization of Kilma) รวมถึงการศึกษาข้อมูลในอดีตตั้งแต่ปี ค.ศ. 1850 – ปัจจุบัน (CMIP historical simulations) 2) การจัดกลุ่มการศึกษาจากแบบจำลองในหลายแบบจำลอง CMIP-Endorsed Model Intercomparison Projects (MIPs) และ 3) การรวบรวมและเผยแพร่ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง รวมถึงการจัดทำ Model Ensemble (Eyring et al. 2016) ภาคผนวก ค แสดงรายละเอียดความร่วมมือในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

3.5 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองภูมิอากาศโลก

เนื่องจากแบบจำลอง GCM สามารถให้ผลลัพธ์ได้ตั้งแต่อดีต-ปัจจุบัน และมีการคาดการณ์ผลไปถึงอนาคตภายใต้สถานการณ์ต่างๆตามแต่การตั้งค่าตั้งต้นในแบบจำลอง ดังนั้นในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะสามารถทำการตรวจสอบได้จากข้อมูลในช่วงอดีตที่มีข้อมูลการตรวจวัดเรียกว่า Hindcast ซึ่งหากแบบจำลองมีความสามารถในการจำลองผลที่เกิดขึ้นในอดีตได้ดีจะแสดงถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์ผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตได้ (Hewer eat al., 2021) ในการดำเนินงานแบบจำลองจะถูกตั้งค่าเริ่มต้นจากข้อมูลต่างๆที่มีลักษณะที่เป็นจริงในอดีต จากนั้นจึงทำการตรวจสอบผลลัพธ์จากปัจจัยที่เลือกไว้และมีค่าตรวจวัดเพื่อทำการเปรียบเทียบความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลอง ซึ่งปัจจัย

ส่วนใหญ่ที่ถูกใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง เช่น อุณหภูมิผิวน้ำทะเล อุณหภูมิชั้นบรรยากาศ ปริมาณฝน ลักษณะรูปแบบของการเกิดพายุ เป็นต้น (McSweeney, and Hausfather, 2018) อย่างไรก็ตามในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง GCM ควรมีการคำนึงถึงพื้นที่ที่ทำการศึกษาเนื่องจากแต่ละแบบจำลองจะแสดงถึงประสิทธิภาพของแต่ละพื้นที่ศึกษาที่แตกต่างกัน (Macadam et al. 2010) นอกจากนั้นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัดในพื้นที่จำเป็นต้องมีการดำเนินงานในขั้นตอนการลดมาตราส่วนของข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM ก่อนที่จะทำการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง เนื่องจากแบบจำลอง GCM มีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่ค่อนข้างต่ำดังที่ได้ระบุไว้ข้างต้น ซึ่งวิธีการลดมาตราส่วนข้อมูลผลลัพธ์ของแบบจำลองแสดงดังบทที่ 4

วิธีการที่ใช้ในการประเมินแบบจำลองได้แก่ Climate Model Confidence Index (CMCI) (Hewer eat al., 2021) (สมการที่ 3.5-1) ซึ่งเป็นการประเมินลักษณะทางสถิติของผลลัพธ์จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ตรวจวัดในช่วงอดีต ได้แก่ ค่าเฉลี่ยข้อมูลตรวจวัด (μ_{obs}) ค่าเฉลี่ยผลลัพธ์จากแบบจำลอง (μ_{mod}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลตรวจวัด (σ_{obs}) โดยสามารถแบ่งช่วงประสิทธิภาพของแบบจำลองออกได้เป็น 4 ช่วง แสดงดัง**ตารางที่ 3.5-1**

$$CMCI = \frac{|\mu_{obs} - \mu_{mod}|}{\sigma_{obs}} \quad [3.5\text{-}1]$$

นอกจากการใช้ค่า CMCI แล้ว วิธีการสถิติได้แก่การใช้ Student's t test, F-test, Root mean square error (RMSE), Bias และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (*r*) (สมการที่ 3.5-2 ถึง 3.5-6) ก็สามารถใช้ในการประเมินถึงค่าความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองในช่วงอดีตกับค่าตรวจวัดได้เช่นกัน (Hewer eat al., 2021; Bokke et al., 2017) ซึ่งสำหรับ Student's t test และ F-test สามารถพิจารณาได้ถึงความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญที่ 95% (P-value < 0.05) โดยที่ N_{obs} และ N_{mod} ได้แก่ จำนวนข้อมูลตรวจวัดและผลลัพธ์จากแบบจำลองตามลำดับ และ Mod, Obs, cov_{MO} ได้แก่ ข้อมูลผลลัพธ์จากแบบจำลอง ข้อมูลจากการตรวจวัด และ Covariance ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองและข้อมูลตรวจวัด

$$t = \frac{\mu_{obs} - \mu_{mod}}{\sqrt{\frac{\sigma_{obs}^2}{N_{obs}-1} + \frac{\sigma_{mod}^2}{N_{mod}-1}}} \quad [3.5\text{-}2]$$

$$F = \frac{\sigma_{mod}^2}{\sigma_{obs}^2} \quad [3.5\text{-}3]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(Mod - Obs)^2} \quad [3.5\text{-}4]$$

$$Bias = \frac{1}{n}\sum(Mod - Obs) \quad [3.5\text{-}5]$$

$$r = \frac{cov_{MO}}{\sigma_{mod} \cdot \sigma_{obs}} \quad [3.5\text{-}6]$$

ตารางที่ 3.5-1 ประสิทธิภาพของแบบจำลองจากค่า CMCI

CMCI	Definition
0-0.25	Good
0.26-0.50	Satisfactory
0.51-1.00	Unsatisfactory
0.51-1.00	Poor
>1.00	Unacceptable

3.6 ความไม่แน่นอนของแบบจำลองภูมิอากาศโลก

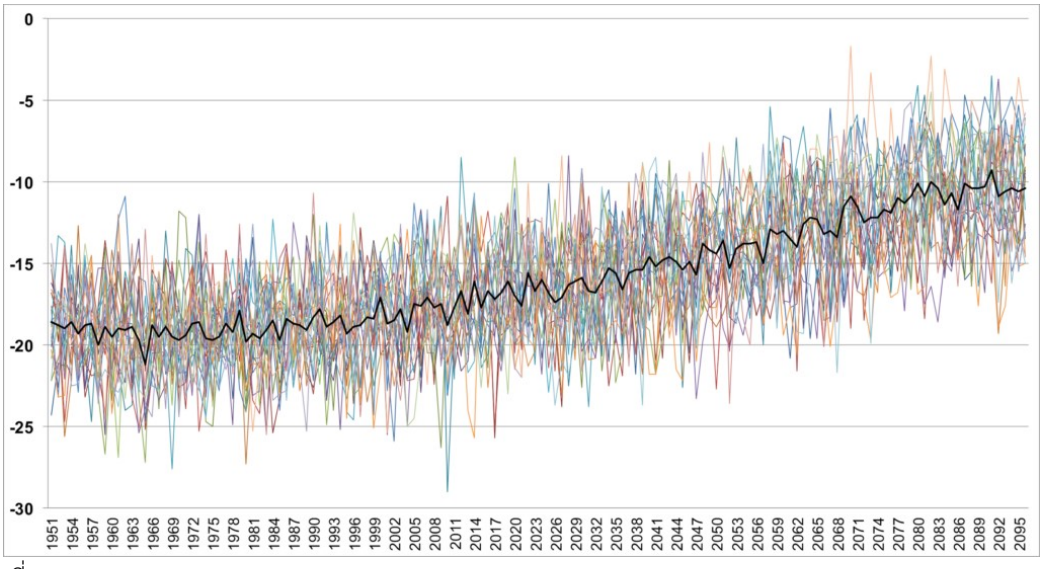
แบบจำลองภูมิอากาศโลกถูกใช้งานเพื่อประเมินถึงปัจจัยต่างๆของโลก (รายละเอียดผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองในหัวข้อ 3.7) ทั้งในสถานการณ์อดีต ปัจจุบัน รวมถึงสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองอาจเกิดความคลาดเคลื่อนหรือไม่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงที่ควรจะเป็น ในหลายครั้งของการประเมินผลจากแบบจำลองหลายแบบจำลองพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าที่แตกต่างกัน (**รูปที่ 3.6-1** แสดงผลอุณหภูมิต่ำสุดในพื้นที่หนึ่งในช่วงระหว่างปี 1951 – 2096 จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก 24 แบบจำลอง) ลักษณะดังกล่าวคือความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Model Uncertainties) ซึ่งความไม่แน่นอนของแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่ใช้ในการประเมินถึงผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ดังนี้

- **ความไม่แน่นอนจากแบบจำลอง (Model uncertainty)**

ความคลาดเคลื่อนหรือผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองในแต่ละแบบจำลองที่เกิดจากความไม่แน่นอนของแบบจำลองเองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ โครงสร้างภายในของแบบจำลองเอง (Intra-model variability) และเกิดจากลักษณะความแปรปรวนของผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลอง (Inter-model variability) ความคลาดเคลื่อนในรูปแบบแรกเกิดจากโครงสร้างของแบบจำลองและการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (Model structure / parameterization)

เนื่องด้วยความซับซ้อนของลักษณะบรรยากาศของโลกส่งผลให้การกำหนดโครงสร้างของแบบจำลองในการคำนวณกระบวนการต่างๆให้ถูกต้องแม่นยำตรงตามสภาพความเป็นจริงเป็นไปได้ยาก ในบางส่วนจำเป็นต้องมีการใช้การกำหนดค่าพารามิเตอร์แทนการคำนวณในกระบวนนั้นโดยตรง ตัวอย่างเช่น การคำนวณเรื่องของการพาความร้อนในชั้นบรรยากาศ (Convection) จะเกิดในพื้นที่ที่มีขนาดเล็ก และเล็กกว่ากริดเซลล์สำหรับการคำนวณของแบบจำลองจึงต้องใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameterization) ให้กับแบบจำลอง (Hakala et al. (2019) ซึ่งส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้ของแบบจำลอง

นอกจากนั้นเนื่องด้วยหน่วยงานหรือองค์กรที่พัฒนาแบบจำลองทั่วโลกมีการกำหนดสมมติฐาน ลักษณะทางกายภาพ ความละเอียดเชิงพื้นที่และเวลา การกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นของแบบจำลอง (Initial conditions) รวมถึงเงื่อนไขอื่นๆของแบบจำลอง (Boundary conditions) ที่อาจเหมือนกันในบางส่วนและมีความแตกต่างกันในบางส่วนสำหรับการคำนวณในแบบจำลองภูมิอากาศโลก ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้ที่ถึงแม้จะเป็นปัจจัยเดียวกันในพื้นที่เดียวกันและช่วงเวลาเดียวกัน เช่น อุณหภูมิ หรือปริมาณฝนในพื้นที่หนึ่งก็จะมีความแตกต่างกันก่อให้เกิดความแปรปรวนของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองในหลายแบบจำลอง (**รูปที่ 3.6-1**)



ที่มา: ClimateWest (2022)

รูปที่ 3.6-1 อุณหภูมิต่ำสุดในพื้นที่หนึ่งในช่วงระหว่างปี 1951 – 2096 จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก 24 แบบจำลอง

- **ความไม่แน่นอนจากความแปรปรวนของสภาพอากาศ (Internal climate variability)**

ชั้นบรรยากาศของโลกเป็นระบบที่มีความซับซ้อน (Chaotic system) ซึ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆในระบบเพียงเล็กน้อยจะส่งผลก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศในหลายรูปแบบ ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงและก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคาดการณ์ในอนาคต จากการศึกษาในปัจจุบันพบว่าในหลายพื้นทั่วโลกความแปรปรวนของสภาพอากาศในแต่ละรอบปีเกี่ยวเนื่องกับการผันแปรของปรากฏการณ์ ENSO ซึ่งส่งผลต่อการคำนวณและการคาดการณ์ลักษณะสภาพภูมิอากาศในอนาคต Deser et al. (2012) ได้มีการทดสอบโดยการใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลกเพียงแบบจำลองเดียวโดยการตั้งเงื่อนไขการเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยและมีการทดสอบในหลายครั้ง ผลลัพธ์ที่ได้ของการทดสอบในแต่ละครั้งมีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ลักษณะความแปรปรวนของสภาพอากาศในระบบภูมิอากาศเองสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากการพิจารณารูปแบบสภาพอากาศในแต่ละภูมิภาค และในช่วงเวลาระยะสั้น (ในช่วงรายฤดูกาล) มากกว่าในช่วงระยะเวลายาวนาน (ช่วง 10 ปี หรือมากกว่า)

- **ความไม่แน่นอนจากสถานการณ์ก๊าซเรือนกระจก (Scenario uncertainty)**

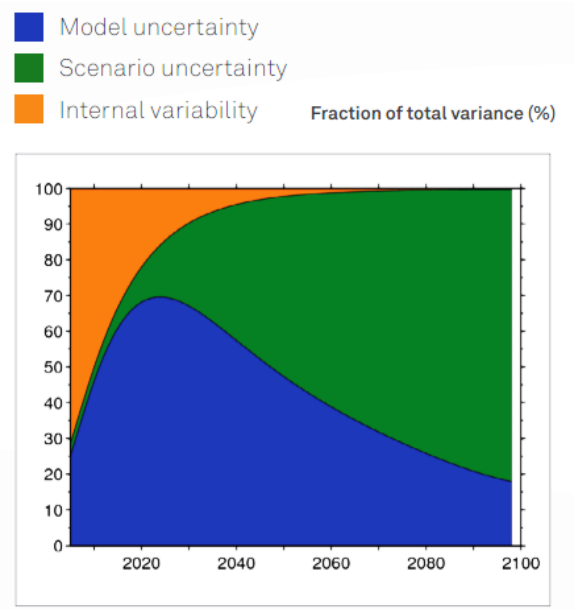
ในการประเมินถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นที่มีต่อปัจจัยต่างๆโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลกจำเป็นต้องมีการนำเข้าข้อมูลปริมาณก๊าซเรือนกระจกในอนาคตของแต่ละสถานการณ์ตามที่กำหนด ซึ่งปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่กำหนดขึ้นเกิดจากการวิเคราะห์ลักษณะต่างๆของกิจกรรมมนุษย์ เช่น สภาพเศรษฐกิจ-สังคม การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน จำนวนของประชากร การใช้พลังงาน เทคโนโลยีรวมถึงการใช้มาตรการต่างๆเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก โดยลักษณะสถานการณ์ต่างๆเหล่านี้ไม่มีความแน่นอนสามารถเปลี่ยนแปลงได้และคาดการณ์ได้ยาก ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองซึ่งคาดการณ์ถึงการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆในอนาคตจึงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นจริง

ความไม่แน่นอนของแบบจำลองที่เกิดขึ้นจากทั้ง 3 สาเหตุข้างต้นจะมีระดับความสำคัญที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่แตกต่างกัน จากการทดสอบความไม่แน่นอนของแบบจำลองโดยการพิจารณาค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างช่วงเวลา 2005-2100 ในระดับโลก (Global scale) แสดงดัง**รูปที่ 3.6-2** พบว่าในช่วงอนาคตระยะใกล้ความแปรปรวนของลักษณะบรรยากาศเองส่งผลต่อความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสูงที่สุด และจะลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วงอนาคตอันไกลที่ความไม่แน่นอนจากสถานการณ์ก๊าซเรือนกระจกส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองมากที่สุด

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลลัพธ์อื่นๆ เช่น อุณหภูมิ และปริมาณฝน (**รูปที่ 3.6-3**) ในพื้นที่ระดับภูมิภาคพบว่า อุณหภูมิในช่วงฤดูแล้งที่ได้จากแบบจำลองมีความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแปรปรวนของลักษณะบรรยากาศเองสูงที่สุด นอกจากนั้นในช่วงอนาคตตั้งแต่อนาคตช่วงใกล้จนถึงปี 2100 ยังได้รับผลจากความไม่แน่นอนจากสถานการณ์ก๊าซเรือนกระจก ซึ่งผลที่ได้นี้แตกต่างจากการคาดการณ์ปริมาณฝนที่ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่เกิดความแปรปรวนของลักษณะบรรยากาศเองมากที่สุดตั้งแต่ช่วงอดีตถึงอนาคต เนื่องด้วยปริมาณฝนเกิดจากอิทธิพลของกระบวนการพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamics) ของบรรยากาศและมหาสมุทร และมีความเชื่อมโยงกับสมดุลพลังงานซึ่งเกี่ยวเนื่องกับก๊าซเรือนกระจกที่น้อยกว่าอุณหภูมิ ส่งผลให้ความไม่แน่นอนจากสถานการณ์ก๊าซเรือนกระจกจึงมีผลน้อยกว่า (ClimateWest, 2022)

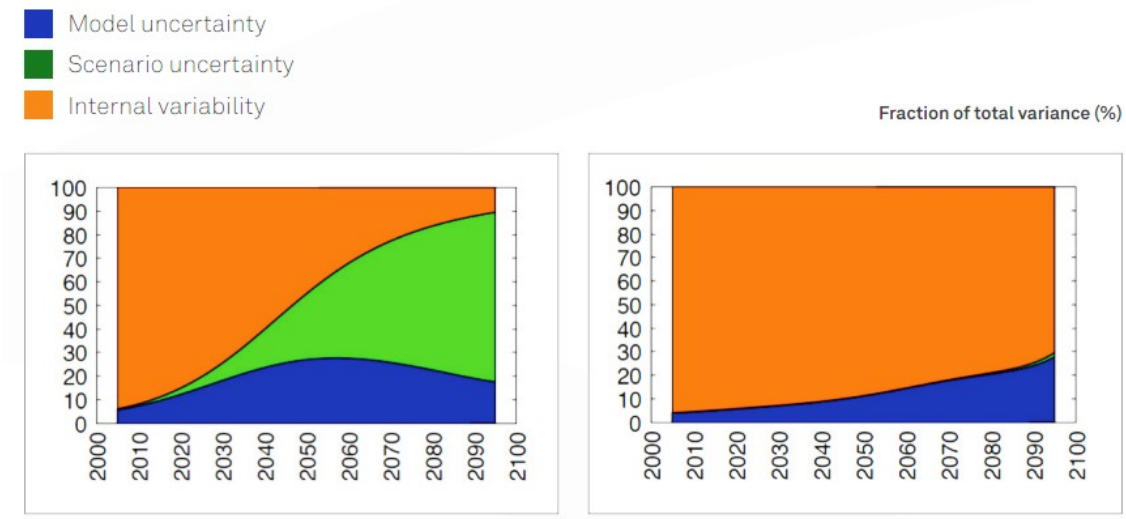
3.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก

แบบจำลองภูมิอากาศโลกสามารถให้ผลลัพธ์จากการคำนวณได้หลายปัจจัย ซึ่งผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นรวมถึงความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial resolution) และช่วงเวลาที่ทำการคำนวณจะขึ้นอยู่กับหน่วยงานที่พัฒนาแบบจำลอง ผลลัพธ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลกในปัจจุบัน (CMIP6) สามารถดาวน์โหลดได้จาก https://aims2.llnl.gov/search ซึ่งเป็นเว็บไซต์ของ Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) จากข้อมูลของ World Climate Research Programme (2024) ได้มีการนำเสนอผลลัพธ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลกจากทั้งสิ้น 43 หน่วยงาน (รายละเอียดดัง **ตารางที่ 3.4-1**)



ที่มา: ClimateWest (2022)

รูปที่ 3.6-2 สัดส่วนความไม่แน่นอนจากทั้ง 3 แหล่งของอุณหภูมิเฉลี่ยทั่วโลกระหว่างปี 2005-2100



ที่มา: Barrow and Sauchyn (2019)

รูปที่ 3.6-3 สัดส่วนความไม่แน่นอนจากทั้ง 3 แหล่งของอุณหภูมิ (ซ้าย) และปริมาณฝน (ขวา) ในระดับภูมิภาค

ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกจะมีความละเอียดที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10 กม. – 10,000 กม. และมีความละเอียดช่วงเวลาตั้งแต่รายชั่วโมงจนถึงรายปี ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีมากกว่า 100 ปัจจัย ซึ่งแต่ละแบบจำลองจะมีกรณีการศึกษา ความละเอียดของพื้นที่และช่วงเวลาจนกระทั่งปัจจัยที่ได้แตกต่างกันไป โดยตัวอย่างผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทางด้านทรัพยากรน้ำและงานทางด้านการชลประทานแสดงรายละเอียดดัง**ตารางที่ 3.7-1**

ตารางที่ 3.7-1 ตัวอย่างผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่เกี่ยวเนื่องกับทรัพยากรน้ำ

ลำดับที่	Standard Name	ความหมาย
1	Air temperature	อุณหภูมิอากาศ
2	Change in groundwater	การเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดิน
3	Change in river storage	การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้ำ
4	Evaporation	การระเหย
5	Rainfall flux	ปริมาณฝน
6	River discharge	อัตราการไหลของน้ำในลำน้ำ
7	Runoff flux	ปริมาณน้ำท่า

ผลลัพธ์ของแบบจำลองโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไฟล์ .nc ซึ่งข้อมูลที่ได้มาจะมีขนาดใหญ่เนื่องด้วยเป็นผลลัพธ์การคำนวณของพื้นที่ทั้งโลก แต่ละข้อมูลของแบบจำลองจะประกอบไปด้วยรายละเอียด (Metadata) ที่ระบุถึงข้อมูลต่างๆของผลลัพธ์นั้นๆ ตัวอย่างเช่น สถานการณ์ที่ทำการคำนวณ (ScenarioMIP) ระยะเวลาของผลลัพธ์ที่ได้จาก (datetime_start/datetime_stop) ชื่อปัจจัย (variable) เป็นต้น ตัวอย่างรายละเอียดผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก

(Metadata) ของปริมาณฝนจากแบบจำลอง MRI-ESM2-0 (CMIP6.ScenarioMIP.MRI.MRI-ESM2-0.ssp126.r1i1p1f1.Omon.prra.gn) จากหน่วยงาน Meteorological Research Institute ประเทศญี่ปุ่น แสดงดัง**ตารางที่ 3.7-2**

ตารางที่ 3.7-2 ตัวอย่าง Metadata ของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก MRI-ESM2-0

	รายละเอียดของผลลัพธ์จากแบบจำลอง	**คำอธิบาย**
mip-era	CMIP6	ค่าถูกกำหนดเป็น "CMIP6" สำหรับผลลัพธ์ทั้งหมดที่มาจาก CMIP6 ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองเก่าหรือใหม่
activity_drs	ScenarioMIP	กลุ่มย่อยของการศึกษาใน CMIP6
institution_id	MRI	หน่วยงานเจ้าของแบบจำลอง
source_id	MRI-ESM2-0	ชื่อแบบจำลอง
experiment_id	ssp126	สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก
member_id	r1i1p1f1	เงื่อนไขตั้งต้นของการรันแบบจำลอง
table_id	Omon	ตารางความถี่ของข้อมูล (รายเดือน)
variable_id	prra	ชื่อรหัสของข้อมูล (Precipitation)
grid_label	gn	กริด (พื้นที่) ของข้อมูล
frequency	mon	ความถี่ข้อมูล (รายเดือน)
realm	atmos	องค์ประกอบของระบบภูมิอากาศ (atmos=ชั้นบรรยากาศ)
product	model-output	ผลลัพธ์ของแบบจำลอง
nominal_resolution	100 km	ความละเอียดเชิงพื้นที่
source_type	AOGCM,AER,CHEM	ประเภทของแบบจำลองที่ใช้งาน
grid	native ocean tri-polar grid with 360x363 ocean cells	ลักษณะกริดของข้อมูล
creation_date	2019-12-18T23:01:38Z	วันที่ได้ผลลัพธ์จากแบบจำลอง
variant_label	r1i1p1f1	เงื่อนไขตั้งต้นของการรันแบบจำลอง
sub_experiment_id	none	กลุ่มการศึกษาย่อยที่ได้ผลลัพธ์จากแบบจำลอง
further_info_url	https://furtherinfo.es-doc.org/CMIP6.MRI.MRI-ESM2-0.ssp126.none.r1i1p1f1	รายละเอียดข้อมูลเพิ่มเติม

	รายละเอียดของผลลัพธ์จากแบบจำลอง	คำอธิบาย
activity_id	ScenarioMIP	กลุ่มย่อยของการศึกษาใน CMIP6
data_spaces_version	01.00.31	เวอร์ชันของแบบจำลอง
title	CMIP6.ScenarioMIP.MRI.MRI-ESM2-0.ssp126.r1i1p1f1.Omon.prra.gn	ชื่อผลลัพธ์ของแบบจำลอง
experiment_title	update of RCP2.6 based on SSP1	สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก
model_cohort	Registered	มีการลงทะเบียนในกลุ่มของแบบจำลอง
data_node	esgf-data1.llnl.gov	Node สำหรับจัดเก็บข้อมูล
index_node	esgf-node.llnl.gov	Index สำหรับจัดเก็บข้อมูล
master_id	CMIP6.ScenarioMIP.MRI.MRI-ESM2-0.ssp126.r1i1p1f1.Omon.prra.gn	ชื่อข้อมูลของแบบจำลอง
instance_id	CMIP6.ScenarioMIP.MRI.MRI-ESM2-0.ssp126.r1i1p1f1.Omon.prra.gn.v20210329	ชื่อข้อมูลของแบบจำลองโดยรวมถึงเวอร์ชันของแบบจำลอง
id	CMIP6.ScenarioMIP.MRI.MRI-ESM2-0.ssp126.r1i1p1f1.Omon.prra.gn.v20210329|esgf-data1.llnl.gov	ชื่อข้อมูลของแบบจำลองรวมถึงเวอร์ชันและแหล่งดาวน์โหลดแบบจำลอง
short_description	MRI-ESM2-0 output prepared for CMIP6	ชื่อแบบจำลองและกลุ่มการศึกษา
replica	true	การคำนวณซ้ำของแบบจำลอง
latest	true	ผลลัพธ์เป็นเวอร์ชันล่าสุดของแบบจำลอง
type	Dataset	ประเภทของผลลัพธ์
project	CMIP6	กลุ่มการศึกษา
version	20210329	เวอร์ชั่นของการศึกษา
dataset_id_template	%(mip_era)s.%(activity_drs)s.%(institution_id)s.%(source_id)s.%(experiment_id)s.%(member_id)s.%(table_id)s.%(variable_id)s.%(grid_label)s	การตั้งชื่อผลลัพธ์แบบจำลอง
directory_format_template	%(root)s/%(mip_era)s/%(activity_drs)s/%(institution_id)s/%(source_id)s/%(experiment_id)s/%(member_id)s/%(table_id)s/%(variable_id)s/%(grid_label)s/%(version)s	การตั้งชื่อกลุ่มผลลัพธ์ของแบบจำลอง
variable_long_name	Rainfall Flux where Ice Free Ocean over Sea	ชื่อปัจจัย

	รายละเอียดของผลลัพธ์จากแบบจำลอง	คำอธิบาย
cf_standard_name	rainfall_flux	ชื่อย่อปัจจัย
variable_units	kg m-2 s-1	หน่วย
variable	prra	รหัสของปัจจัย
datetime_start	2015-01-16T00:00:00Z	วันที่เริ่มต้นของผลลัพธ์แบบจำลอง
datetime_end	2300-12-16T00:00:00Z	วันสิ้นสุดของผลลัพธ์แบบจำลอง
number_of_files	2	จำนวนไฟล์
size	1071330226	ขนาดไฟล์
access	HTTPServer,OPENDAP,GridFTP,Globus	ระบบการเข้าถึงข้อมูล
citation_url	http://cera-www.dkrz.de/WDCC/meta/CMIP6/CMIP6.ScenarioMIP.MRI.MRI-ESM2-0.ssp126.r1i1p1f1.Omon.prra.gn.v20210329.json	การอ้างอิงผลลัพธ์จากแบบจำลอง
xlink	http://cera-www.dkrz.de/WDCC/meta/CMIP6/CMIP6.ScenarioMIP.MRI.MRI-ESM2-0.ssp126.r1i1p1f1.Omon.prra.gn.v20210329.json|Citation|citation,http://hdl.handle.net/hdl:21.14100/42ef88d7-5dfe-3b76-a3a9-4f305f1fddbc|PID|pid	แหล่งข้อมูล
pid	hdl:21.14100/42ef88d7-5dfe-3b76-a3a9-4f305f1fddbc	การระบุรหัสของข้อมูลเพื่อเข้าถึงและเชื่อมโยงข้อมูล
version	1696907963021656000	รายละเอียดไฟล์
retracted	false	การยกเลิกข้อมูล (false: ไม่มีการยกเลิกข้อมูล)
timestamp	2021-04-13T07:05:41.639Z	ช่วงเวลาในการแก้ไขเพิ่มเติมข้อมูลล่าสุด

แบบจำลอง GCM นับว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญต่อการศึกษาด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ อย่างไรก็ตามจากรายละเอียดข้างต้นจะเห็นได้ว่าแบบจำลอง GCM มีการพัฒนาจากหลายหน่วยงานในหลายประเทศ ซึ่งก่อให้เกิดความแตกต่างกันทั้งทางด้านแนวคิด ทฤษฎีที่ใช้ในแบบจำลอง รวมถึงความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่จะมีความแตกต่างกันไป

ดังนั้นการประยุกต์ใช้แบบจำลอง GCM จำเป็นต้องมีกระบวนการพิจารณาเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมกับพื้นที่ รวมถึงจำเป็นต้องมีกระบวนการเพื่อให้ความละเอียดของแบบจำลองเหมาะสมกับพื้นที่ที่สนใจศึกษา โดยเฉพาะพื้นที่ขนาดเล็กในระดับลุ่มน้ำหรือระดับท้องถิ่น โดยกระบวนการปรับค่าความละเอียดของแบบจำลอง และแนวทางในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง ได้แก่ การคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม รวมถึงกระบวนการในการประเมินเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำ แสดงรายละเอียดดังบทที่ 4 และ บทที่ 5 ต่อไป

สรุปบทที่ 3
สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกและแบบจำลองภูมิอากาศโลก

- สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีความสำคัญสำหรับการศึกษาด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เพื่อช่วยให้เข้าใจถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในระยะยาวจากการดำเนินงานต่างๆ ณ ปัจจุบันหรือในช่วงอนาคตอันใกล้ และสามารถนำมาใช้พัฒนาถึงแนวทางการปรับตัวของมนุษย์และการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ

- สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเริ่มเผยแพร่ในรายงาน Special Report on Emission Scenarios (SRES) ในปี 2000 และถูกใช้ในรายงาน IPCC Thid Assessment Report (AR3) และ IPCC Fourth Assessment Report (AR4) สถานการณ์ Representative Concentration Pathways (RCPs) ถูกใช้ในรายงาน IPCC Fifth Assessment Report (AR5) เผยแพร่ในปี ค.ศ. 2014 และปัจจุบันมีการพัฒนาสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็น Shared Socio-Economic Concentration Pathways (SSPs) และถูกใช้ในรายงาน IPCC Sixth Assessment Report (AR6) ในปี 2021

- กระบวนการพัฒนาสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Share Socioeconomic Pathways : SSPs) ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การกำหนดกรอบแนวทางของสถานการณ์ SSP (2) การกำหนดข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากกรอบแนวทางที่กำหนด (3) การกำหนดรายละเอียดเชิงปริมาณ (4) การพัฒนาสถานการณ์พื้นฐาน SSPs (5) การพัฒนาสถานการณ์ SSPs โดยพิจารณากลยุทธ์การลดก๊าซเรือนกระจก

- ตัวแปรที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสถานการณ์ต่างๆ (Driving forces) ได้แก่ จำนวนประชากร การเติบโตทางเศรษฐกิจ การใช้พลังงาน การพัฒนาทางเทคโนโลยี การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน การปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศ และนโยบายด้านต่างๆเช่นมาตรการลดก๊าซเรือนกระจก เป็นต้น

- สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SSPs มีการแบ่งสถานการณ์ออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 และ SSP5 ซึ่งสถานการณ์ SSP5-8.5 มีการปลดปล่อย CO_2 สูงสุดเท่ากับ 1,135.2 ppm และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 4.4 °C ในปี ค.ศ. 2100 ในขณะที่ SSP1-1.9 มีการปลดปล่อย CO_2 ต่ำสุดเท่ากับ 393.5 ppm และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1.4 °C

- แบบจำลองภูมิอากาศโลก (General Circulation Model / Global Climate Models: GCM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินสภาพอากาศประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลักได้แก่ ส่วนของชั้นบรรยากาศ (Atmospheric component), ส่วนของพื้นดิน (Land surface component) และส่วนของมหาสมุทร (Ocean component)

- GCM จะคำนวณและประเมินลักษณะสภาพภูมิอากาศในรูปแบบของ 3-dimensional grid โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่อยู่ที่ประมาณ 10-600 กม. แบบจำลอง GCM ถูกประยุกต์ใช้งานในหลายวัตถุประสงค์ เช่น การประเมินสภาพอากาศในปัจจุบัน และการคาดการณ์สภาพอากาศอนาคต (Weather forecasting) รวมถึงการสร้างภาพฉายของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาพอากาศภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก

- หลักการทำงานของแบบจำลอง GCM สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การแบ่งพื้นที่หรือกริดเซลล์ในการคำนวณ, 2) การกำหนดลักษณะทางกายภาพเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ รังสีดวงอาทิตย์, 3) แบบจำลองทำการคำนวณค่าความกดอากาศในแต่ละกริดเซลล์จากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง, 4) แบบจำลองประเมินการก่อตัวของเมฆจากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง, 5) แบบจำลองคำนวณปัจจัยต่างๆสำหรับสภาพอากาศ เช่น การระเหย ปริมาณฝน การถ่ายทอดพลังงาน และ 6) แบบจำลองคำนวณค่าปัจจัยอื่นๆที่แตกต่างกันแต่ละแบบจำลอง เช่น การแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่าง พืช ดิน บรรยากาศ มหาสมุทร เป็นต้น

- Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) เป็นความร่วมมือระดับนานาชาติในการพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก พร้อมทั้งมีการแลกเปลี่ยนแนวทางการพัฒนาและผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำไปใช้ในการประเมินผลโดยคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)

- ผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM จะถูกประเมินความถูกต้องก่อนนำไปใช้งานโดยกระบวนการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ตั้งแต่ช่วงอดีต-ปัจจุบันเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด Hindcast ซึ่งหากแบบจำลองมีความสามารถในการจำลองผลที่เกิดขึ้นในอดีตได้ดีจะแสดงถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์ผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตได้

- การประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องของแบบจำลอง GCM ควรมีการคำนึงถึงพื้นที่ที่ทำการศึกษาเนื่องจากแต่ละแบบจำลองจะมีประสิทธิภาพสำหรับพื้นที่ศึกษาที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองกับข้อมูลตรวจวัดในพื้นที่จำเป็นต้องมีการดำเนินงานในขั้นตอนการลดมาตราส่วนของข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM ก่อนที่จะทำการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง เนื่องจากผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM โดยส่วนใหญ่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่ค่อนข้างต่ำ

- วิธีการในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองสามารถประเมินได้โดยการใช้วิธีการทางสถิติ ตัวอย่างเช่น การใช้ดัชนี Climate Model Confidence Index (CMCI), Student's t test, *F*-test, Root mean square error (RMSE), Bias และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (*r*) เป็นต้น โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองในช่วงอดีตเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดในช่วงเวลาเดียวกัน

- ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง GCM (Uncertainty) คือผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM อาจเกิดความคลาดเคลื่อนหรือไม่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จาก 3 สาเหตุหลัก ได้แก่ ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Model uncertainty) ความไม่แน่นอนจากความแปรปรวนของสภาพอากาศ (Internal climate variability) และความไม่แน่นอนจากสถานการณ์ก๊าซเรือนกระจกที่เป็นข้อมูลนำเข้าสู่แบบจำลอง (Scenario uncertainty) ความไม่แน่นอนจากโครงสร้างหรือการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองเอง รวมถึงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองแต่ละแบบจำลองที่แตกต่างกันเนื่องด้วยการตั้งสมติฐานและวิธีการพัฒนาของแบบจำลองที่แตกต่างกัน (Model uncertainty)

- ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM มีมากกว่า 100 ปัจจัย มีความละเอียดเชิงพื้นที่ตั้งแต่ 10 กม.-10,000 กม. และมีความถี่ของข้อมูลตั้งแต่รายชั่วโมง - รายปี ซึ่งผลลัพธ์ของแบบจำลอง GCM ของการศึกษา CMIP6 สามารถดาวน์โหลดได้จาก https://aims2.llnl.gov/search

- การนำผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ไปใช้ในการศึกษาต่อจำเป็นต้องมีการพิจารณารายละเอียดของแบบจำลอง (Metadata) ซึ่งมีการระบุถึงรายละเอียดต่างๆของผลลัพธ์ ตัวอย่างเช่น ช่วงเวลาและความถี่ ความละเอียดเชิงพื้นที่ หน่วยของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง เป็นต้น

คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม

1. จงอธิบายความแตกต่างของสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก Special Report on Emission Scenarios (SRES), Representative Concentration Pathways (RCPs) และ Shared Socio-Economic Concentration Pathways (SSPs)

2. จากสถานการณ์ SSPs จงอธิบายการเชื่อมโยงของมาตรการลดก๊าซเรือนกระจก (Mitigation) และการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Adaptation) กับแต่ละสถานการณ์ของ SSPs

3. จงอธิบายลักษณะของแบบจำลองภูมิอากาศโลก และวิธีการคำนวณของแบบจำลองโดยสังเขป

4. จงอธิบายรายละเอียดและความสำคัญของ Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)

5. หากต้องการตรวจสอบประสิทธิภาพและความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองควรมีขั้นตอนการดำเนินงานอย่างไร

6. จงอธิบายความหมายของความไม่แน่นอนของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (Uncertainty) พร้อมทั้งอธิบายถึงสาเหตุของความไม่แน่นอนดังกล่าว

7. จงค้นคว้าโดยการดาวน์โหลดผลลัพธ์ของแบบจำลองภูมิอากาศโลกจากเว็บไซต์ต่อไปนี้ พร้อมทั้งอธิบายรายละเอียดของข้อมูลที่ดาวน์โหลดมาโดยละเอียด (https://aims2.llnl.gov/search)

เอกสารอ้างอิง

Bralower, T. and Bice, D. 2022. Introduction to General Circulation Models. https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/1012

Bokke, A. S., Taye, M.T., Willems, P. and Siyoum, S.A. 2017. Validation of general climate models (GCMs) over upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. Atmospheric and Climate Sciences, 7, 65-75.

Barrow, E.M. and Sauchyn, D.J. 2019. Uncertainty in climate projections and time of emergence of climate signals in the western Canadian Prairies. Internation Journal of Climatology, https://doi.org/10.1002/joc.6079

ClimateWest. 2022. Understanding and Accommodating Uncertainty in Climate Change Data: A Primer. https://climatewest.ca/publications/uncertainty-in-climate-change-data-primer/

Consortium for International Earth Science Information Network (CIESIN). 1995. Thematic Guide to Integrated Assessment Modeling of Climate Change [online]. University Center, Mich. http://sedac.ciesin.org/mva/iamcc.tg/TGHP.html

Deser, C., Knutti, R., Solomom, S. and Phillips, A.S. 2012. Communication of the role of natural variability in future north American climate. Nature Climate Change, 2, 775-779.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E. 2016. Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9, 1937-1958.

GFDL. 2022. Climate Modelling. https://www.gfdl.noaa.gov/climate-modeling/

Hakala, K., Addor, N., Teutschbein, C., Vis, M., Dakhlaoui, H. and Seibert, J. 2019. Hydrological modeling of climate change impacts. Encyclopedia of Water: Science, Technology, and Society. DOI: 10.1002/9781119300762.wsts0062.

Hewer, M.J., Beech, N. and Gough, W.A. 2021. Development and validation of the climate model confidence index (CMCI): measuring ability to reproduce historical climate conditions. Theoretical and Applied Climatology, 144, 1059-1075. https://doi.org/10.1029/2010GL043877

Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, 2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and NearTerm Information. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, doi:10.1017/9781009157896.006.

Mann, M. 2022. From Meteorology to Mitigation: Understanding Global Warming. https://www.e-education.psu.edu/meteo469/

Macadam, I., Pitman, A., Whetton, P. and Abramowitz, G. 2010. Ranking climate models by performance using actual values and anomalies: Implication for climate change impact assessments. Geophysical Resources Letter, 37, L16704, 1-6.

McSweeney, R. and Hausfather, Z. 2018. Climate modelling (How do climate models work?). https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work/

O'Sullivan, J. 2018. Synergy between population policy, climate adaptation and mitigation. Pathways to a Sustainable Economy (M.Hossain et al., eds.). Springer International Publishing AG.

Riahi,K., et al. 2017. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emission implications: an overview. Global Environmental Changes, 42, 153-168.

IPCC. 2000. Special Report on Emission Scenarios. ISBN: 0-521-80081-1 hardback.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.

IPCC(a). 2022. What is a GCM.
https://www.ipccdata.org/guidelines/pages/gcm_guide.html

IPCC(b). 2022. AR5 GCM data
https://www.ipccdata.org/sim/gcm_monthly/AR5/index.html

Wayne, G. 2013. The Beginner's guide to representative concentration pathways. Skeptical science. https://skepticalscience.com/docs/RCP_Guide.pdf

บทที่ 4 – การลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก

Chapter 4 – Downscaling of General Circulation Model Outputs

บทที่ 4

การลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก

Downscaling of General Circulation Model Outputs

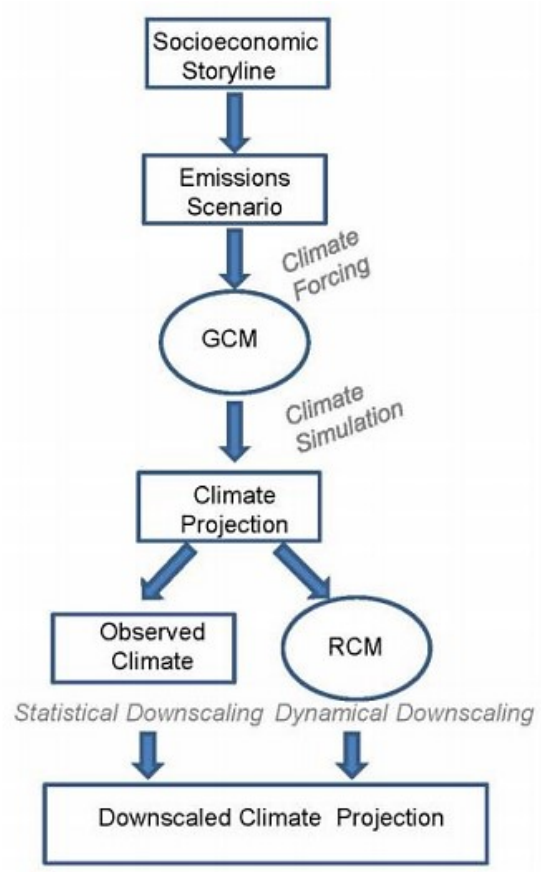
จากรายละเอียดดังบทที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (General Circulation Model: GCM) สามารถแสดงผลลัพธ์ได้ในหลายปัจจัย และแต่ละแบบจำลองจะมีค่าความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial resolution) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการนำผลลัพธ์ที่ได้จาก GCM ไปใช้ในการศึกษาเพื่อประเมินถึงผลกระทบในรูปแบบต่างๆ จำเป็นต้องมีการปรับค่าของผลลัพธ์ที่ได้ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ที่ต้องการศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 แนวคิดการลดมาตรส่วนผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก

ถึงแม้ว่า GCM สามารถที่จะประเมินผลลัพธ์ที่มีความสำคัญในการศึกษาถึงผลกระทบของลักษณะสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แต่เนื่องจากแบบจำลอง GCM ส่วนใหญ่ในปัจจุบันยังให้ผลลัพธ์เชิงพื้นที่ที่มีความละเอียดต่ำ ผลลัพธ์ดังกล่าวไม่ได้มีการพิจารณานำลักษณะสภาพพื้นที่ในระดับท้องถิ่น เช่น ความสูง-ต่ำของพื้นที่ แหล่งน้ำ สิ่งปกคลุมดิน เข้ามาใช้ในการคำนวณ ดังนั้นการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับท้องถิ่นจึงยากต่อการใช้ผลลัพธ์ที่ได้จาก GCM จึงจำเป็นต้องมีปรับปรุงผลลัพธ์ที่ได้ดังกล่าวให้เหมาะสมต่อการใช้งานในระดับท้องถิ่น การลดมาตราส่วนผลลัพธ์ของแบบจำลอง GCM (จากนี้ไปจะใช้คำว่า “การลดมาตราส่วน”) หมายถึงการนำข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำ (มากกว่า 100 กม.) มาผ่านกระบวนการที่เหมาะสม เพื่อให้ข้อมูลดังกล่าวมีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆในระดับท้องถิ่นหรือระดับภูมิภาค (Regional and local scale) (Trazaska and Schnarr, 2014) จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจในการประเมินถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งการลดมาตราส่วนนั้นสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบเชิงพื้นที่และเชิงเวลา (Temporal scale) ตัวอย่างเช่น ข้อมูลปริมาณฝนรายวันจากแบบจำลอง INM-CM4-8 จากหน่วยงาน Institute for Numerical Mathematics ประเทศรัสเซีย และ MRI-ESM2-0 จากหน่วยงาน Meteorological Research Institute ประเทศญี่ปุ่น ที่มีการประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศตามสถานการณ์ SSP ใน Tier 1 ครบทุกสถานการณ์ มีความละเอียดของข้อมูลในรูปแบบของกริดที่ 100 x 100 ตร.กม. ซึ่งหากต้องนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการศึกษาในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี-ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งมีพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 6,000 ตร.กม. หรือ พื้นที่ลุ่มเจ้าพระยาที่มีพื้นที่ประมาณ 20,000 ตร.กม.

ข้อมูลที่นำมาใช้ได้จะมีเพียง 1-2 ชุดข้อมูลตามลำดับ ซึ่งไม่ครอบคลุมถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยด้านภูมิอากาศและอุทกวิทยาในพื้นที่ดังกล่าว เป็นต้น

ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการลดมาตราส่วนนั้นถูกตั้งอยู่บนสมมติฐานของการนำข้อมูลสภาพภูมิอากาศระดับโลก (Large-scale climatic/atmospheric features) มาพิจารณาหรือวิเคราะห์ร่วมกับลักษณะสภาพภูมิอากาศและสภาพพื้นที่ในระดับท้องถิ่น ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของผลลัพธ์ที่ได้จากการลดมาตราส่วนสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในส่วนของกระบวนการการลดมาตราส่วนเอง และการนำผลลัพธ์จากการลดมาตราส่วนไปวิเคราะห์ต่อเนื่องถึงสถานการณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต องค์ประกอบในภาพรวมของกระบวนการลดมาตราส่วนแสดงดัง**รูปที่ 4.1-1** โดยผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่สนใจ (รายละเอียดดังบทที่ 3) จากนั้นผลลัพธ์ที่ได้หากอยู่ในรูปแบบเชิงพื้นที่ที่มีความละเอียดต่ำจำเป็นต้องผ่านกระบวนการลดมาตราส่วน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีหลักแสดงดังหัวข้อถัดไป



ที่มา: Daniels et al. 2012

รูปที่ 4.1-1 ภาพรวมองค์ประกอบการลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก

4.2 ประเภทของการลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก

วิธีการในการลดมาตราส่วนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีหลักได้แก่ วิธีการทางพลวัตร (Dynamical downscaling) วิธีการทางสถิติ (Statistical downscaling) และวิธีการพลวัตร-สถิติ (Hybrid downscaling) ซึ่งเป็นการนำวิธีการลดมาตราส่วนทั้ง 2 ข้างต้นมาใช้ร่วมกัน ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นการใช้วิธีการทางพลวัตรในขั้นแรก จากนั้นผลที่ได้จากการลดมาตราส่วนทางพลวัตรถูกนำมาลดมาตราส่วนต่อในกระบวนการลดมาตราส่วนทางสถิติ โดยมีรายละเอียดของวิธีการลดมาตราส่วนทั้ง 3 วิธีดังนี้

4.2.1 การลดมาตราส่วนแบบพลวัตร (Dynamical downscaling)

1) แนวคิดการลดมาตราส่วนแบบพลวัตร

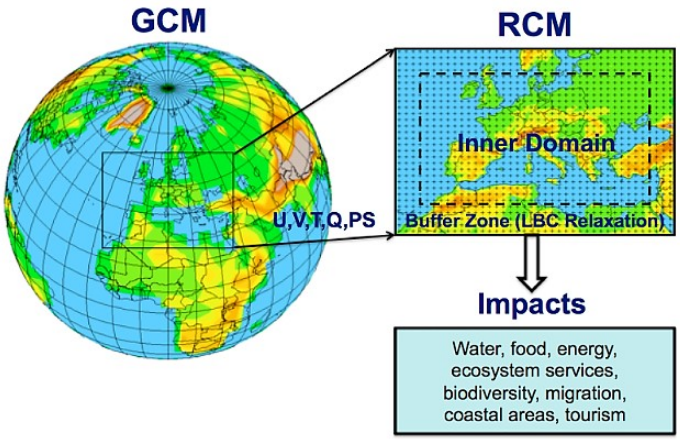
แนวทางการลดมาตราส่วนแบบพลวัตรคือการนำปัจจัยทางด้านภูมิอากาศที่เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลอง GCM ตัวอย่างเช่น ค่าความกดอากาศ ความเร็วลม อุณหภูมิ หรือค่าความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น มาเข้าสู่แบบจำลองการคำนวณสภาพภูมิอากาศระดับภูมิภาค (Regional Climate Model: RCM) ซึ่งแบบจำลอง RCM จะมีกระบวนการคำนวณคล้ายคล้ายคลึงกับแบบจำลอง GCM แตกต่างกันที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ที่แบบจำลอง RCM จะมีการคำนวณที่ละเอียดกว่า สามารถที่จะนำข้อมูลในระดับท้องถิ่น เช่น ลักษณะสภาพพื้นที่ และสิ่งปกคลุมพื้นผิว มาพิจารณาในการคำนวณได้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในระดับเชิงพื้นที่ที่มีความละเอียดใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงมากที่สุด แบบจำลอง RCM ได้ถูกประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมาใช้สำหรับการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รวมถึงการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการปรับตัวและมาตรการเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อไปในอนาคต

เนื่องด้วยแบบจำลอง RCM จะทำการคำนวณในความละเอียดเชิงพื้นที่ที่สูงมากกว่าแบบจำลอง GCM แต่ครอบคลุมพื้นที่ที่น้อยกว่า โดยพิจารณาเป็นแต่ละพื้นที่ที่ศึกษา หรือแต่ละภูมิภาค (Domain) รวมถึงพิจารณาปัจจัยพื้นผิวต่างๆอย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น (**รูปที่ 4.2.1-1**) ส่งผลให้มีขั้นตอนการคำนวณที่ซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณที่มาก จำเป็นต้องมีการใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงในการคำนวณ นอกจากนั้นขั้นตอนการสอบเทียบแบบจำลอง (Model calibration) ยังมีความซับซ้อนค่อนข้างมาก (Trazaska and Schnarr, 2014)

2) กระบวนการพื้นฐานของแบบจำลอง RCMs

แบบจำลอง RCM จะทำการคำนวณโดยการพิจารณาผลลัพธ์ของ GCM ในรูปแบบของเครือข่ายหรือกริดเซลล์ (Nested) โดยมีการกำหนดค่าตั้งต้น (Initial conditions : IC) และขอบเขต

การคำนวณของแบบจำลอง (Lateral boundary conditions: LBC) ที่ได้มาจากข้อมูลการตรวจวัด (Reanalysis observations) หรือจากแบบจำลอง GCM โดยใช้เทคนิคการคำนวณในรูปแบบของการพยากรณ์อากาศเชิงตัวเลข (Numerical Weather Prediction: NWP)



ที่มา: Giorgi (2019)

รูปที่ 4.2.1-1 แนวคิดการคำนวณของแบบจำลอง RCM

แบบจำลอง RCM จะทำการคำนวณปัจจัยต่างๆในระยะยาวในพื้นที่ที่กำหนดหรือพื้นที่ที่สนใจ โดยมีการกำหนดค่าเริ่มต้นและขอบเขตการคำนวณของแบบจำลอง (Initial / lateral boundary conditions) ที่ได้มาจากข้อมูลการตรวจวัด (Reanalysis observations) หรือจากแบบจำลอง GCM เช่น ข้อมูลอุณหภูมิผิวน้ำทะเล (Sea surface temperature: SST) ถูกใช้เป็นค่าที่กำหนดขอบเขตการคำนวณบริเวณพื้นที่มหาสมุทร เป็นต้น สำหรับบริเวณพื้นดินจะมีการกำหนดขอบเขตการคำนวณที่แตกต่างกันไปในแต่ละแบบจำลอง โดยจะใช้ค่าของลักษณะพื้นผิวของพื้นดินและค่าความชื้นของดินเป็นตัวกำหนด นอกจากนั้นข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยาที่ใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นในพื้นที่ที่กำหนดสำหรับการคำนวณการคาดการณ์ปัจจัยต่างๆล่วงหน้า ได้แก่ องค์ประกอบการเคลื่อนที่ของลม (Wind component) อุณหภูมิ (Temperature) ไอน้ำ (Water vapor) และความกดอากาศ (Surface pressure) ซึ่งการลดมาตราส่วนแบบพลวัตรโดยการใช้แบบจำลอง RCM เป็นการส่งต่อข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง GCM ไปยังแบบจำลอง RCM ทิศทางเดียว (One-way nesting) และจะเพิ่มความละเอียดของการคำนวณในพื้นที่ที่กำหนด

3) ผลลัพธ์ของแบบจำลอง RCM

ในปัจจุบันได้มีหลายหน่วยงานในหลายรูปแบบทั้งหน่วยงานเดียวหรือการรวมกลุ่มในการดำเนินงานเพื่อจัดทำการลดมาตราส่วนผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM โดยผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการสร้างสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปัจจุบัน CMIP6 (รายละเอียดดังบทที่ 3)

ได้มีหน่วยงานหลักที่เผยแพร่ผลลัพธ์ที่ได้จากการลดมาตราส่วนสถานการณ์ดังกล่าวได้แก่ NASA Center for Climate Simulation หรือในชื่อของ NEX-GDDP-CMIP6 โดยมีความละเอียดของข้อมูลเท่ากับ 25x25 ตร.กม. ช่วงเวลาตั้งแต่ 1/1/1950 ถึง 31/12/2100 มีปัจจัยทั้งสิ้น 9 ปัจจัย แสดงดัง **ตารางที่ 4.2.1-1** และมีแบบจำลอง GCM ที่ได้ทำการลดมาตราส่วนทั้งสิ้น 35 แบบจำลอง แสดงดัง **ตารางที่ 4.2.1-2**

ตารางที่ 4.2.1-1 ผลลัพธ์ของการลดมาตราส่วนของ NEX-GDDP-CMIP6

Variable	abbreviation	unit
Near-surface relative humidity	hurs	Percentage
Near-surface specific humidity	huss	Dimensionless ratio (kg/kg)
Precipitation (mean of the daily precipitation rate)	pr	Kg m^{-2} s^{-1}
Surface Downwelling Longwave Radiation	rlds	W m-2
Surface Downwelling Shortwave Radiation	rsds	W m-2
Daily-Mean Near-Surface Wind Speed	sfcWind	m s-1
Daily Near-Surface Air Temperature	tas	Degrees Kelvin
Daily Maximum Near-Surface Air Temperature	tasmax	degrees Kelvin
Daily Minimum Near-Surface Air Temperature	tasmin	degrees Kelvin

ที่มา: Thrasher et al. (2022)

ตารางที่ 4.2.1-2 ผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ที่มีการลดมาตราส่วนของ NEX-GDDP-CMIP6

	GCM	Institution
1	ACCESS-CM2	Australian Community Climate and Earth System Simulator, Australia
2	ACCESS-ESM1-5	
3	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China
4	CanESM5	The Canadian Earth System Model version5, Canada
5	CESM2-WACCM	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada
6	CESM2	
7	CMCC-CM2-SR5	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Italy
8	CMCC-ESM2	
9	CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Meteorologiques, France
10	CNRM-ESM2-1	

	GCM	Institution
11	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth consortium
12	EC-Earth3	
13	FGOALS-g3	Institute of Atmospheric Physics, China
14	GFDL-CM4	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
15	GFDL-CM4_gr2	
16	GFDL-ESM4	
17	GISS-E2-1-G	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA
18	HadGEM3-GC31-LL	Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services, UK
19	HadGEM3-GC31-MM	
20	IITM-ESM	Indian Institute of Tropical Meteorology, India
21	INM-CM4-8	Coordinate working group, Germany – other countries
22	INM-CM5-0	
23	IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France
24	KACE-1-0-G	National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) and Korea Meteorologica, Republic of Korea
25	KIOST-ESM	Korea Institute of Ocean Science and Technology, Republic of Korea
26	MIROC-ES2L	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology – and others, Japan
27	MIROC6	
28	MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany
29	MPI-ESM1-2-LR	
30	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Japan
31	NESM3	Nanjing University of Information Science and Technology, China
32	NorESM2-LM	NorESM Climate modeling Consortium consisting of CICERO – others
33	NorESM2-MM	
34	TaiESM1	Research Center for Environmental Changes, Taiwan
35	UKESM1-0-LL	Met Office Hadley Centre, UK

ที่มา: Thrasher et al. (2022)

4.2.2 การลดมาตราส่วนทางสถิติ (Statistical Downscaling)

1) แนวคิดการลดมาตราส่วนทางสถิติ

วิธีการลดมาตราส่วนผลลัพธ์จาก GCM โดยวิธีการทางสถิติคือการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากผลลัพธ์ของ GCM ในช่วงอดีต (Predictors) กับข้อมูลในระดับท้องถิ่นหรือระดับภูมิภาค (Predictands) ลักษณะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในอดีตจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการฉายภาพในอนาคตสำหรับพื้นที่ศึกษา ข้อดีของการลดมาตราส่วนทางสถิติคือสามารถได้ผลลัพธ์ในระดับสถานี (Station-scale) และมีวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง RCM ที่จะเป็นต้องคำนวณกระบวนการทางฟิสิกส์ของลักษณะสภาพบรรยากาศและความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นกับลักษณะสภาพพื้นที่ในระดับภูมิภาค

อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้วิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติจำเป็นต้องมีการพิจารณาถึงลักษณะของกระบวนการที่เกิดขึ้น ได้แก่ ความสัมพันธ์ทางสถิติที่ถูกสร้างขึ้นจากสถานการณ์ปัจจุบันจะถูกตั้งสมมติฐานว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป (Stationary assumption) นอกจากนั้นผลลัพธ์ที่ได้จาก GCM จะถูกกำหนดให้เป็นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากลักษณะสภาพภูมิอากาศและเป็นผลลัพธ์ในอนาคตเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้น

2) หลักการคำนวณของการลดมาตราส่วนทางสถิติ

วิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติสามารถทำได้ในหลายวิธี โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักได้แก่ Direct transfer function, Weather classification และ Weather generator โดยมีรายละเอียดของวิธีการลดมาตราส่วนในแต่กลุ่มดังนี้

(1) Direct transfer function: วิธีการลดมาตราส่วนในรูปแบบของ Direct transfer function จะเป็นการใช้วิธีการทางสถิติในรูปแบบของสมการถดถอย (Regression models) โดยเป็นการสร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM และข้อมูลในระดับท้องถิ่นทั้งที่เป็นเชิงเส้นตรงและไม่ใช่เส้นตรง (Linear/Non-linear regression) วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ได้แก่ Multiple regression, Principal correlation analysis (PCA), Canonical correlation analysis (CCA) และ Delata method เป็นต้น

(2) Weather classification schemes: เป็นการจัดกลุ่มเพื่อจำแนกลักษณะสภาพภูมิอากาศ โดยในเบื้องต้นข้อมูลสภาพภูมิอากาศระดับโลกซึ่งเป็นผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM จะถูกพิจารณาและจำแนกกลุ่ม “States” จากนั้นข้อมูลในอดีตที่เป็นผลลัพธ์จาก GCM จะถูกพิจารณาเพื่อจัดเข้ากลุ่มที่กำหนดไว้ และข้อมูลระดับท้องถิ่นจะถูกพิจารณากับกลุ่มที่กำหนดไว้ของข้อมูลอดีตของ GCM ท้ายสุดผลลัพธ์ในอนาคตภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะถูกจัดเข้ากลุ่มเพื่อให้

สอดคล้องกับที่ระบุไว้ วิธีการนี้เหมาะสมสำหรับการลดมาตราส่วนที่ข้อมูลไม่ได้อยู่ในรูปแบบของการแจกแจงแบบปกติ เช่น ข้อมูลปริมาณฝนรายวัน และข้อมูลท้องถิ่นที่สนใจจำเป็นต้องมีช่วงเวลาข้อมูลในอดีตที่ยาวนานไม่น้อยกว่า 30 ปี (Trazaska and Schnarr, 2014) วิธีทางสถิติสำหรับวิธีการลดมาตราส่วนในรูปแบบนี้ได้แก่ Analog method, Cluster analysis, Self-organizing map (SOM) และ Artificial neural network (ANN) เป็นต้น

(3) Weather generators: การลดมาตราส่วนโดยวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งการลดมาตราส่วนแบบเชิงพื้นที่ (Spatial downscaling) และการลดมาตราส่วนเชิงเวลา (Temporal downscaling) ตัวอย่างเช่นการลดมาตราส่วนข้อมูลจากในรูปแบบรายเดือนหรือรายปีของผลลัพธ์จาก GCM เช่น อุณหภูมิ หรือปริมาณฝน ให้เป็นข้อมูลรายวัน เป็นต้น วิธีการทางสถิติสำหรับใช้ในการลดมาตราส่วนแบบ Weather generators ได้แก่ LARS-WG, MarkSim GCM และ NHMM เป็นต้น

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการนำวิธีการลดค่าอคติ (Bias correction method) เข้ามาใช้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้จากผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลกที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำ (Humphries et al., 2024; Verma et al., 2023) เนื่องด้วยเป็นวิธีการที่มีความซับซ้อนน้อย สามารถใช้งานได้ง่ายกว่าการลดมาตราส่วนทางสถิติ แต่การใช้วิธีการลดค่าอคิติยังคงมีความแตกต่างจากวิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติที่มีการดำเนินงานอยู่ในปัจจุบันในหลากหลายประเด็น และมีข้อจำกัดการใช้งานรายละเอียดแสดงดัง**ตารางที่ 4.2.2-1**

ตารางที่ 4.2.2-1 ความแตกต่างระหว่างวิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติและวิธีการลดค่าอคติ

	วิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติ (Statistical downscaling)	**วิธีการลดค่าอคติ (Bias correction)**
วัตถุประสงค์หลักของวิธีการ	ปรับปรุงข้อมูลที่มีความละเอียดต่ำจากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM ให้มีความละเอียดเพิ่มมากขึ้น	ปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้ใกล้เคียงกับข้อมูลในพื้นที่ที่มีการตรวจวัด
ลักษณะการดำเนินงาน	การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจากแบบจำลอง GCM ที่มีความละเอียดต่ำ (Large-scale predictors) กับข้อมูลตรวจวัดในพื้นที่ (Local-scale predictand)	ใช้กระบวนการปรับค่าทางสถิติระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ให้มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัด

	วิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติ (Statistical downscaling)	วิธีการลดค่าอคติ (Bias correction)
ปัจจัยที่ศึกษา	สามารถใช้ผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM (Large-scale predictors) ได้หลายปัจจัยเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลตรวจวัดในพื้นที่	ผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ที่ต้องการลดค่าสถิติต้องเป็นปัจจัยเดียวกันกับข้อมูลตรวจวัด
การใช้งาน	มีการใช้งานเพื่อลดมาตราส่วนผลลัพธ์จาก GCM โดยตรง หรือใช้ลดมาตราส่วนสำหรับข้อมูลที่ผ่านการลดมาตราส่วนแบบพลวัตรแล้ว	นิยมใช้สำหรับข้อมูลที่ผ่านการลดมาตราส่วนมาแล้วทั้งจากการลดมาตราส่วนแบบพลวัตรและการลดมาตราส่วนทางสถิติ
ข้อดี	สามารถใช้ในการลดขนาดของข้อมูลให้เหมาะสมกับพื้นที่ โดยมีการพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัย	มีความซับซ้อนในการใช้งานน้อย สามารถใช้เพื่อปรับค่าสถิติของข้อมูล 2 ชุดที่เป็นปัจจัยเดียวกันให้มีความสอดคล้องกันได้
ข้อจำกัด	มีความซับซ้อนในการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการลดค่าอคติ	สามารถปรับค่าสถิติของปัจจัยที่ศึกษา เช่น ค่าเฉลี่ย ความแปรปรวน หรือการกระจายตัวของชุดข้อมูล ได้เพียงอย่างเดียว ไม่มีการพิจารณาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง
วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้	Regression analysis, Markov model, Neural network	Delta method, Quantile mapping,

3) ตัวอย่างการคำนวณการลดมาตราส่วนทางสถิติ

วิธีการทางสถิติที่ใช้เพื่อการลดมาตรส่วนผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกมีหลายวิธี โดยในส่วนนี้จะนำเสนอตัวอย่างการคำนวณวิธีการลดมาตรส่วนทางสถิติและการลดค่าอคติที่ไม่ซับซ้อนและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ได้แก่ วิธี Simple linear regression, Multiple linear regression, Principle component analysis (PCA), Delta-Change, Linear scaling และ Quantile mapping รายละเอียดดังนี้

(1) Simple linear regression

การลดมาตราส่วนโดยการใช้วิธีการเชิงเส้น Simple linear regression แสดงดังสมการที่ 4.2.2-1 โดยการพิจารณาข้อมูลจากปัจจัยต้น (Predictor: $\boldsymbol{x}$) ที่เป็นข้อมูลที่ได้จาก

แบบจำลอง GCM กับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในระดับท้องถิ่น (Predictand: y) เช่นการลดมาตราส่วนของอุณหภูมิของสถานี X จากข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง GCM ดังตัวอย่างที่ 4.2.2-1

$$y = \alpha + \beta x \qquad [4.2.2\text{-}1]$$

ตัวอย่างที่ 4.2.2-1: การลดมาตราส่วนอุณหภูมิโดยวิธีการ Simple linear regression

Observation (y)	Historical (x)	Linear regression	Parameters	Downscaled ($\hat{y}$) [Cal 1]	Future scenario ($\acute{x}$)	Projection ($\acute{y}$) [Cal 2]
y_i	x_i	$y_{i\ (i=1:n)} = \alpha + \beta x_{i\ (i=1:n)}$	α, β	$\hat{y}_i$		
y_{i+1}	x_{i+1}			$\hat{y}_{i+1}$		
y_{i+2}	x_{i+2}			$\hat{y}_{i+2}$		
y_{i+3}	x_{i+3}			$\hat{y}_{i+3}$		
...	...			...		
y_n	x_n			$\hat{y}_n$		
					$\acute{x}_k$	$\acute{y}_k$
					$\acute{x}_{k+1}$	$\acute{y}_{k+1}$
					$\acute{x}_{k+2}$	$\acute{y}_{k+2}$
					$\acute{x}_{k+3}$	$\acute{y}_{k+3}$
					...	...
					$\acute{x}_m$	$\acute{y}_m$

หมายเหตุ: Cal 1 → $\hat{y}_{i\ (i=1:n)} = \alpha + \beta x_{i\ (i=1:n)}$

Cal 2 → $\acute{y}_{k\ (k=1:m)} = \alpha + \beta \acute{x}_{k\ (k=1:m)}$

(2) Multiple linear regression

การลดมาตราส่วนโดยวิธีการ Multiple linear regression (สมการที่ 4.2.2-2) มีความคล้ายคลึงกับวิธีการของ Simple linear regression แตกต่างกันที่ข้อมูลปัจจัยต้น (Predictor: x) ที่ได้จากแบบจำลอง GCM สามารถพิจารณาใช้หลายปัจจัยร่วมกันได้ อย่างไรก็ตาม การนำปัจจัยหลายปัจจัยมาใช้ร่วมกันจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต้นไม่ให้มีความสัมพันธ์ร่วมกัน (Multicollinearity) ก่อนที่จะนำปัจจัยนั้นมาลดมาตราส่วนกับข้อมูลตรวจวัดที่ได้ในระดับท้องถิ่น (Predictand: y) โดยวิธีการอย่างง่ายที่ทำการตรวจสอบความสัมพันธ์ร่วมกันของปัจจัยต้นได้แก่การทดสอบ Correlation matrix ในแต่ละคู่ของตัวแปรต้น และพิจารณาถึงค่า Correlation coefficient (r) โดยหากค่า |r| มีค่ามากกว่า 0.7 ขึ้นไป แสดงว่าตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์กันสูง การลดมาตราส่วนโดย Multiple linear regression แสดงดังตัวอย่างที่ 4.2.2-2

โดยที่ $x_{j=1:p}$ x คือปัจจัยต้น ตัวที่ j จากจำนวนทั้งหมด p ตัว และ β คือพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับปัจจัยต้นนั้นๆ

$$y = \alpha + \beta_j x_j + \beta_{j+1} x_{j+1} + \cdots + \beta_p x_p \quad [4.2.2\text{-}2]$$

(3) Principle component analysis (PCA)

วิธีการทางสถิติ Principle component analysis (PCA) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Empirical orthogonal function (EOF) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการลดมาตราส่วนทางสถิติของข้อมูล ซึ่ง PCA สามารถนำมาใช้ได้ถึงแม้ว่าปัจจัยต้นจะมีความสัมพันธ์กัน (Multicollinearity) ซึ่งจะแตกต่างจาก Multiple linear regression ที่ไม่สามารถนำปัจจัยต้นที่มีความสัมพันธ์กันมาใช้ร่วมกันได้ โดยขั้นตอนการคำนวณ PCA จำเป็นต้องเริ่มต้นจากการทำ Anomalies ของข้อมูลเพื่อปรับข้อมูลของทุกปัจจัยต้น (Predictor: x) ให้อยู่ในช่วงเดียวกัน จากนั้นจึงคำนวณค่าความแปรปรวน (Variance) และความแปรปรวนร่วม (Covariance) (สมการที่ 4.2.2-3) ของปัจจัยต้นแต่ละปัจจัยทั้งหมดในรูปแบบของเมทริกซ์ ($[S]$) ซึ่งชุดข้อมูลความแปรปรวนร่วมจะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่า Eigenvector (e') และ Eigenvalue (λ') ดังสมการที่ 4.2.2-4 และ 4.2.2-5 ตามลำดับ จากนั้นชุดข้อมูลใหม่ที่มีความแปรปรวนร่วมของข้อมูลทั้งหมดจะถูกคำนวณขึ้นเรียกว่า Principle component (PC) ดังสมการที่ 4.2.2-6 ซึ่งจำนวนของชุดของ PC (u_m) ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับจำนวนของปัจจัยต้นที่ใช้ในการคำนวณ ($u_m, m = 1{:}\, P$) และจำนวนข้อมูลจะเท่ากับจำนวนข้อมูลตั้นต้น โดย PC แรกหรือ PC1 จะมีค่าความแปรปรวนร่วมของจำนวนปัจจัยต้นทั้งหมดสูงที่สุด และ PC2, PC3 ... PC_p จะมีค่าความแปรปรวนร่วมลดหลั่นลงมา

$$Cov(x_1 x_2) = \left[\sum_{i=1}^{n} \left(x'_{i,1} - \bar{x}_1\right)\left(x'_{i,2} - \bar{x}_2\right)\right]/(n-1) \quad [4.2.2\text{-}3]$$

$$[S]e' = \lambda e' \quad [4.2.2\text{-}4]$$

$$[S] - \lambda\,[I]e' = 0 \quad [4.2.2\text{-}5]$$

$$u_m = e_m'^T x' \; (m = 1,2,3 \ldots P) \quad [4.2.2\text{-}6]$$

เมื่อชุดข้อมูลใหม่ได้ถูกคำนวณขึ้นโดยวิธีการ PCA แล้ว จากนั้นวิธีการคำนวณจะถูกนำไปใช้ในรูปแบบของ Multiple linear regression (ตัวอย่างที่ 4.2.2-2) โดยที่จำนวน PC ที่เลือกใช้เป็นตัวแปรตั้งต้นจะถูกใช้เป็นปัจจัยต้นใหม่ในการลดมาตราส่วนของข้อมูล

ตัวอย่างที่ 4.2.2-2: การลดมาตราส่วนอุณหภูมิโดยวิธีการ Multiple linear regression

Observation	Historical	Historical	...	Historical	Multiple	Parameters	Downscaled ($\hat{y}$)	Future	Future	...	Future	Projection
(y)	(x_j)	(x_{j+1})		(x_p)	linear regression		[Cal 1]	scenario ($\acute{x}_j$)	scenario ($\acute{x}_{j+1}$)		scenario ($\acute{x}_p$)	($\acute{y}$) [Cal 2]
					$y = \alpha + \beta_j x_j + \beta_{j+1} x_{j+1} + \cdots + \beta_p x_p$	$\alpha, \beta_j, \beta_{j+1}, \ldots, \beta_p$						
y_i	$x_{j,i}$	$x_{j+1,i}$	...	$x_{p,i}$			$\hat{y}_i$					
y_{i+1}	$x_{j,i+1}$	$x_{j+1,i+1}$	....	$x_{p,i+1}$			$\hat{y}_{i+1}$					
y_{i+2}	$x_{j,i+2}$	$x_{j+1,i+2}$	...	$x_{p,i+2}$			$\hat{y}_{i+2}$					
y_{i+3}	$x_{j,i+3}$	$x_{j+1,i+3}$	...	$x_{p,i+3}$			$\hat{y}_{i+3}$					
...	...	...	...	...			...					
y_n	$x_{j,n}$	$x_{j+1,n}$	...	$x_{p,n}$			$\hat{y}_n$					
								$\acute{x}_{j,k}$	$\acute{x}_{j+1,k}$	...	$\acute{x}_{p,k}$	$\acute{y}_k$
								$\acute{x}_{j,k+1}$	$\acute{x}_{j+1,k+1}$	...	$\acute{x}_{p,k+1}$	$\acute{y}_{k+1}$
								$\acute{x}_{j,k+2}$	$\acute{x}_{j+1,k+2}$	...	$\acute{x}_{p,k+2}$	$\acute{y}_{k+2}$
								$\acute{x}_{j,k+3}$	$\acute{x}_{j+1,k+3}$	...	$\acute{x}_{p,k+3}$	$\acute{y}_{k+3}$
								...	...	...	...	...
								$\acute{x}_{j,m}$	$\acute{x}_{j+1,m}$	...	$\acute{x}_{p,m}$	$\acute{y}_m$

หมายเหตุ: Cal 1 $\rightarrow \hat{y}_{i\,(i=1:n)} = \alpha + \beta_j x_{j,i(i=1:n)} + \beta_{j+1} x_{j+1,i(i=1:n)} + \cdots + \beta_p x_{p,i(i=1:n)}$

Cal 2 $\rightarrow \acute{y}_{i\,(i=1:m)} = \alpha + \beta_j \acute{x}_{j,k(k=1:m)} + \beta_{j+1} x_{j+1,k+1(k=1:n)} + \cdots + \beta_p x_{p,m(k=1:m)}$

(4) Delta method / Change factor method

การลดค่าอคติด้วยวิธีการ Delta method หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Change factor method เป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยพิจารณาความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง GCM ในอนาคต (D^F) กับข้อมูลในอดีต (D^{hist}) หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณกับข้อมูลตรวจวัดในช่วงอดีต (D^{obs}) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ลดค่าอคติแล้วในพื้นที่ศึกษาในอนาคต ($D^{bc,F}$) สมการที่ 4.2.2-7 แสดงวิธีการคำนวณโดยวิธี Delta method ซึ่งสำหรับการลดมาตรส่วนอุณหภูมิและปริมาณฝนแสดงดังสมการที่ 4.2.2-8 และ 4.2.2-9 ตามลำดับ โดยอุณหภูมิจะสามารถลดค่าอคติได้ (T_{bc}) โดยวิธีการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างอุณหภูมิ (Absolute change method) ซึ่งต้องมีข้อมูลอุณหภูมิตรวจวัด (T_{obs}) ข้อมูลอุณหภูมิจากแบบจำลอง GCM ในอดีต (T_{hist}) และในอนาคตตามสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (T_{future}) μ_m คือค่าเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว และ t คือช่วงเวลาที่ศึกษา ตัวอย่างการปรับค่าอคติของอุณหภูมิแสดงดัง**รูปที่ 4.2.2-1**

$$D^{bc,F} = \partial D^{obs} \; ; \; \partial = D^{hist}/D^F \qquad [4.2.2\text{-}7]$$

$$T_{bc}(t) = T_{obs}(t) + (\mu_m T_{future}\,(t) - \mu_m T_{hist}\,(t)) \qquad [4.2.2\text{-}8]$$

ในขณะที่การลดมาตราส่วนปริมาณฝน (P_{bc}) จะใช้วิธีการคำนวณการเปลี่ยนแปลงในลักษณะสัมพัทธ์ (Relative change method) เช่นเดียวกับการลดมาตราส่วนอุณหภูมิที่ต้องมีการรวบรวมข้อมูลปริมาณฝนตรวจวัดท้องถิ่น (P_{obs}) รวมถึงข้อมูลปริมาณฝนที่คำนวณได้จากแบบจำลอง GCMs ในอดีต (P_{hist}) และข้อมูลปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สถานการณ์ต่างๆ (P_{future})

$$P_{bc}(t) = P_{obs}(t)\; x \frac{\mu_m P_{future}\,(t)}{\mu_m P_{hist}\,(t)} \qquad [4.2.2\text{-}9]$$

(5) Linear scaling

วิธีการ Linear scaling เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดค่าอคติเพื่อการปรับแก้ข้อมูลจากแบบจำลอง GCM ให้สอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัดในช่วงอดีต โดยเป็นการปรับค่าเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว โดยการคำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรใวจวัดและข้อมูลจากแบบจำลอง GCM โดยจากตัวแปรที่ใช้ในวิธีการ Delta method ก่อนหน้าสามารถแสดงถึงการคำนวณวิธีการ Linear scaling ได้ดังสมการที่ 4.2.2-10 สำหรับอุณหภูมิ และ 4.2.2-11 สำหรับปริมาณฝน

$$T_{bc}(t) = T_{future}(t) + (\mu_m T_{obs}\ (t) - \mu_m T_{hist}\ (t)) \quad [4.2.2\text{-}10]$$

$$P_{bc}(t) = P_{future}(t)\ x\ \frac{\mu_m P_{obs}\ (t)}{\mu_m P_{hist}\ (t)} \quad [4.2.2\text{-}11]$$

(6) Quantile mapping

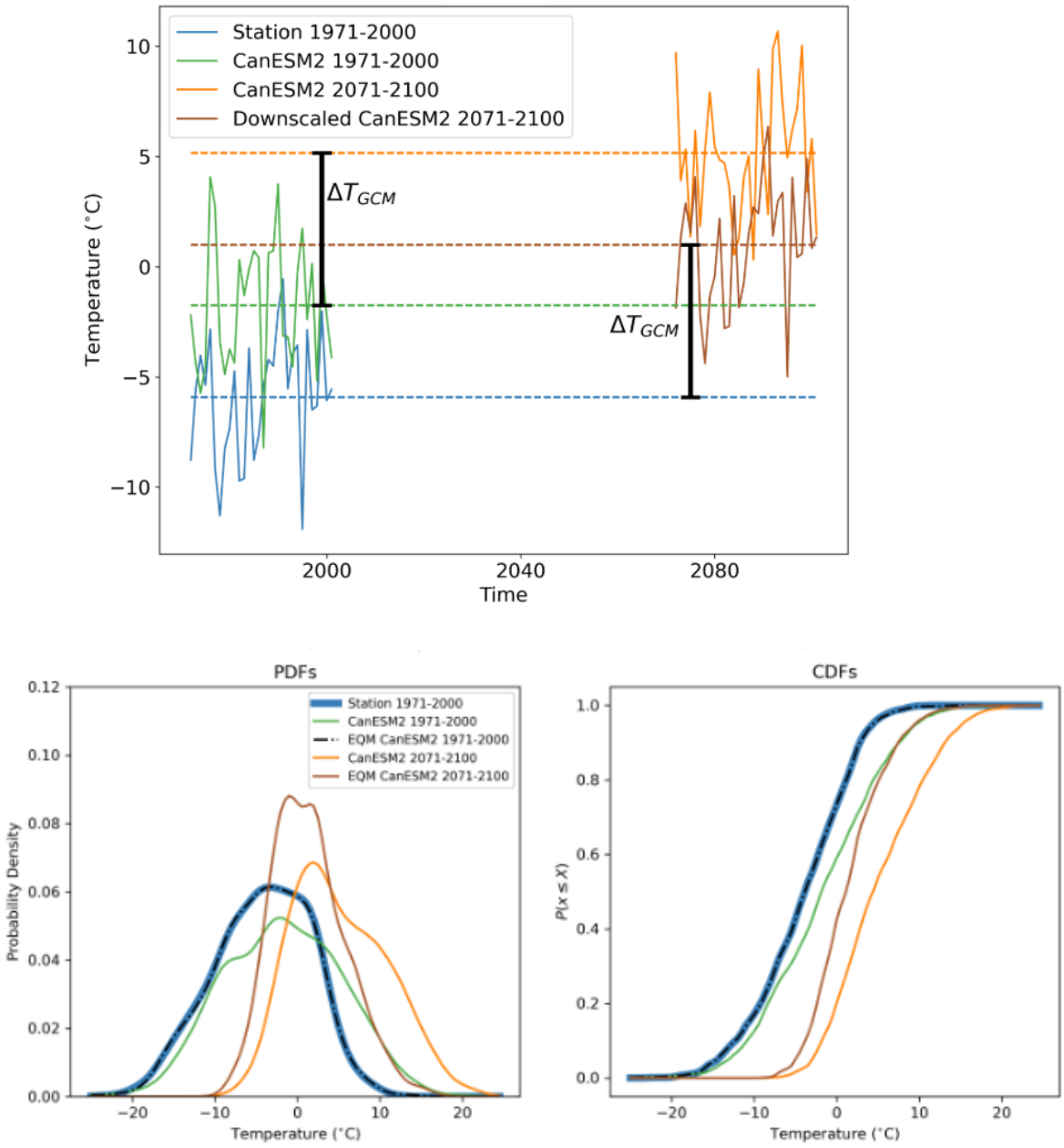
การลดค่าอคติด้วยวิธีการ Quantile mapping เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการลดมาตราส่วน มีหลักการในการใช้วิธีการแบบ Non-parametric method ซึ่งประมาณค่าการแจกแจงฟังก์ชันสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ของข้อมูลการตรวจวัดในอดีตและข้อมูลจากแบบจำลอง GCM เพื่อให้ข้อมูลจากแบบจำลอง GCM มีลักษณะการกระจายตัวที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด โดยในการคำนวณจะมีการพิจารณาคู่ค่า Quantile ที่อยู่ในระดับเดียวกันกับข้อมูลทั้ง 2 ชุด วิธีการลดค่าอคติของอุณหภูมิแสดงดังสมการที่ 4.2.2-12 โดยที่ T_{bias} คืออุณหภูมิที่ได้ทำการลดค่าอคติแล้ว T_{mod} คือข้อมูลจากแบบจำลอง GCM F_{mod} คือ CDF ของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง และ F_{obs}^{-1} คือ ส่วนกลับของ CDF ของข้อมูลตรวจวัด รูปที่ 4.2.2-1 แสดงการปรับค่าอคติของวิธี Quantile mapping

$$T_{bc} = F_{obs}^{-1}(F_{mod}(T_{mod})) \quad [4.2.2\text{-}12]$$

4.2.3 การลดมาตราส่วนโดยวิธีการพลวัตร-สถิติ (Hybrid downscaling)

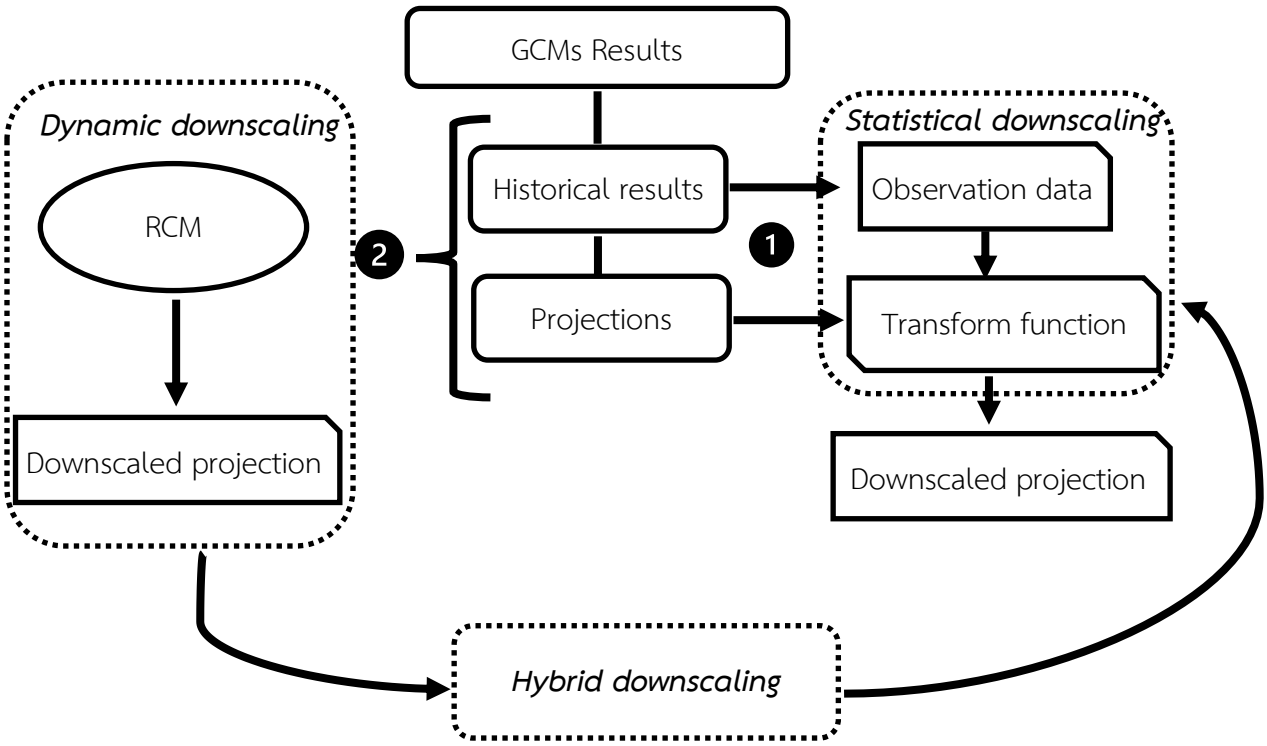
การลดมาตราส่วนโดยวิธีการพลวัตร-สถิติ (Hybrid downscaling) เป็นวิธีการที่นำกระบวนการลดมาตราส่วนทั้ง 2 วิธีการหลักข้างต้นมาใช้ควบคู่กัน โดยการประยุกต์ใช้วิธีการนี้จำเป็นต้องมีการพิจารณาถึงความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM ควบคู่กับความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้สุดท้ายหากมีการใช้แบบจำลอง RCM ซึ่งเป็นวิธีการลดมาตราส่วนโดยพลวัตร

หากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM มีความละเอียดมากหรืออยู่ในระดับเดียวกับการใช้งานแบบจำลอง RCM สามารถลดมาตราส่วนโดยไปใช้งานวิธีการทางสถิติได้เลย (ตามหมายเลข 1) แต่หากผลลัพธ์จากแบบจำลองที่ได้จาก GCM มีความละเอียดน้อย สามารถประยุกต์ใช้วิธีการพลวัตร-สถิติควบคู่กันได้ (ตามหมายเลข 2) อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยการคำนวณที่ซับซ้อนของแบบจำลอง RCM และจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะที่สูง การเข้าถึงแบบจำลอง RCM อาจเป็นไปได้ยากในบางพื้นที่ จึงจำเป็นต้องมีการใช้งานการลดมาตราส่วนทางสถิติเพียงอย่างเดียว (ตามหมายเลข 1) กระบวนการลดมาตราส่วนทั้ง 3 วิธีแสดงดัง**รูปที่ 4.2.3-1**



ที่มา: Morris et al. (2023)

รูปที่ 4.2.2-1 ลักษณะของข้อมูลการปรับลดค่าอคติด้วยวิธี Delta method (รูปบน) และ Quantile mapping (รูปล่าง) ของอุณหภูมิเฉลี่ยเมือง Toronto ประเทศ Canada



รูปที่ 4.2.3-1 กระบวนการลดมาตราส่วน 3 วิธี

4.3 การประเมินผลการลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก

เมื่อดำเนินการลดมาตราส่วนข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จาก GCM เพื่อให้มีค่าที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับท้องถิ่นแล้ว จำเป็นต้องมีการประเมินค่าความถูกต้องของผลที่ได้จากการลดมาตราส่วน เนื่องด้วยการลดมาตราส่วนโดยวิธีการต่างๆจะให้ผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกัน ซึ่งกระบวนการในการประเมินผลการลดมาตราส่วนจะมีการแบ่งช่วงการศึกษาข้อมูลตรวจวัดในอดีตออกเป็น 2 ช่วงได้แก่ ช่วงการปรับเทียบ (Calibration) หมายถึงกระบวนการทำงานที่สามารถทำให้แบบจำลองได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงหรือข้อมูลตรวจวัดในช่วงอดีต โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ในวิธีการที่เลือกใช้ หรือเลือกใช้ปัจจัย (Predictors) ที่เหมาะสมแก่การลดมาตราส่วน และช่วงการสอบทานแบบจำลอง (Verification) หมายถึงกระบวนการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ได้ผ่านกระบวนการปรับเทียบมาแล้ว โดยใช้ชุดข้อมูลที่ไม่ได้ใช้ในช่วงปรับเทียบ (Independent dataset) เพื่อประเมินถึงความสามารถของแบบจำลองในการปรับเทียบ ตัวอย่างวิธีการปรับเทียบและสอบทานการลดมาตราส่วนแสดงรายละเอียดใน Onarun et al (2023) และมีผลการศึกษาโดยสรุปดังหัวข้อ 4.4.3 สำหรับวิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ในการประเมินผลการลดมาตราส่วนมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 Pearson's correlation (r)

การประเมินความถูกต้องจากผลการลดมาตราส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลกด้วยวิธีการ Pearson's correlation method (r) เป็นการวัดความสัมพันธ์เชิงเส้นของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและผลที่ได้จากการลดมาตราส่วน มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยหากข้อมูลมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน (Positive linear relationship) ค่า r จะมีค่ามากกว่า 0 และเข้าใกล้ 1 ในขณะที่หากข้อมูลมีความสัมพันธ์ในทิศทางที่ตรงกันข้าม (Negative linear relationship) ค่า r จะมีค่าน้อยกว่า 0 และเข้าใกล้ -1 ซึ่งหากข้อมูลทั้ง 2 ชุดมีค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นกันน้อย ค่า r ที่ได้จะเข้าใกล้ 0 และหากค่าที่ได้เท่ากับ 0 แสดงว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุดไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ซึ่งสำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการลดมาตราส่วนแบบจำลองโลก (Sim) กับข้อมูลชุดที่ได้จากการตรวจวัด (Obs) ควรมีค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 วิธีการคำนวณแสดงดังสมการที่ 4.3.1-1 โดยที่ Obs_i และ Sim_i คือค่าตรวจวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณของชุดข้อมูลที่ i โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n โดยที่ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด และ $\overline{Obs}$ และ $\overline{Sim}$ คือค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลตรวจวัดและค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามลำดับ

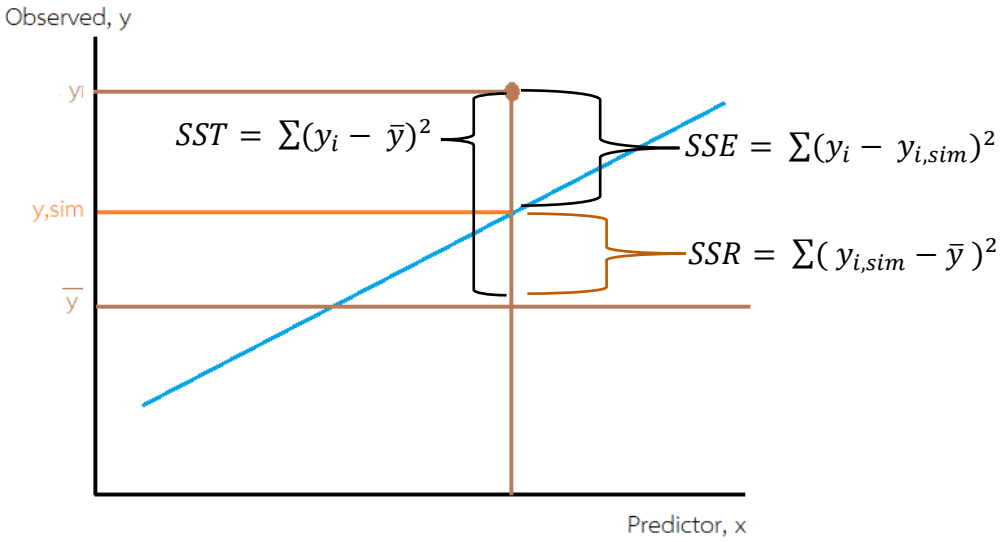
$$r = \frac{\sum(Obs_i - \overline{Obs})(Sim_i - \overline{Sim})}{\sqrt{\sum(Obs_i - \overline{Obs})^2 \ \sum(Sim_i - \overline{Sim})^2}} \qquad [4.3.1\text{-}1]$$

4.3.2 Coefficient of determination (r^2)

ผลการลดมาตราส่วนแบบจำลองภูมิอากาศโลกยังสามารถประเมินได้จากค่า r^2 (สมการที่ 4.3.2-1 และ 4.3.2-2) โดยค่า r^2 สามารถประเมินได้ว่าความแปรปรวนของข้อมูลจากการตรวจวัด (Obs) สามารถถูกอธิบายได้จากสมการที่สร้างขึ้นจากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดกับผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCMs มากหรือน้อยเพียงใด ค่า r^2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 โดยที่หากมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการอธิบายถึงความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดได้ดี จากรูปที่ 4.3.2-1 และสมการที่ 4.3.2-1 และ 4.3.2-2 อธิบายถึงการคำนวณค่า r^2 โดยที่ SST (Total sum of squares) คือความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูลตรวจวัด SSE (Sum of square error) และ SSR (Sum of square regression) คือความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้จากแบบจำลอง และความแปรปรวนของข้อมูลที่อธิบายจากแบบจำลองตามลำดับ y_i และ $y_{i,sim}$คือข้อมูลตรวจวัด และข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่ i โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n โดยที่ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด และ $\bar{y}$ คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัด

$$SST = SSE + SSR \quad [4.3.2\text{-}1]$$

$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{sum\ of\ sqaures\ exaplined\ by\ regression}{total\ sum\ of\ squares} \quad [4.3.2\text{-}2]$$



รูปที่ 4.3.2-1 การประมาณค่าสำหรับการคำนวณค่า r^2

4.3.3 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) คือ ดัชนีที่ใช้ในการบอกค่าความแม่นยำของแบบจำลอง (Model Accuracy) หรือประสิทธิภาพ-ประสิทธิผลของแบบจำลอง (Model Performance) โดยแสดงความสัมพันธ์ของความแปรปรวนระหว่างปริมาณฝนตรวจวัดกับปริมาณฝนจากแบบจำลอง ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง -∞ ถึง 1 หากค่า NSE เท่ากับ 1 แบบจำลองสามารถคาดคะเนได้โดยไม่ได้ความผิดพลาด ค่า NSE อยู่ระหว่าง 0-1 แสดงว่าแบบจำลองสามารถคาดคะเนโดยมีค่าแม่นยำกว่าการใช้ค่าเฉลี่ย หากค่า NSE = 0 แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยมีความแม่นยำไม่ต่างจากการคาดคะเนโดยใช้ค่าเฉลี่ย และหากค่า NSE<0 แบบจำลองสามารถคาดคะเนค่าโดยมีความแม่นยำน้อยกว่าการคาดคะเนโดยใช้ค่าเฉลี่ย (วราวุธ, 2553) โดยการคำนวณแสดงดังสมการที่ 4.3.3-1 โดยที่ โดยที่ Obs_i และ Sim_i คือค่าตรวจวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณของชุดข้อมูลที่ i โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n โดยที่ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด และ $\overline{Obs}$ และ $\overline{Sim}$ คือค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลตรวจวัดและค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามลำดับ

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Obs_i - Sim_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Obs_i - \overline{Sim_i})^2} \quad [4.3.3\text{-}1]$$

4.3.4 Root mean square error (RMSE)

การประเมินผลค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลการตรวจวัดระหว่างท้องถิ่นและผลที่ได้จากการลดมาตราส่วน GCM ซึ่งผลที่ได้จะสามารถบอกได้ถึงค่าความคลาดเคลื่อนในหน่วยของปัจจัยที่สนใจ ค่า RMSE ที่มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการลดมาตราส่วนมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด สมการที่ 4.3.4-1 แสดงสมการคำนวณค่า RMSE โดยที่ Obs_i และ Sim_i คือค่าตรวจวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณของชุดข้อมูลที่ i โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n โดยที่ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Obs_i - Sim_i)^2} \quad [4.3.4\text{-}1]$$

4.3.5 Percent bias (PBIAS)

ค่า PBIAS เป็นค่าที่ใช้ประเมินความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและข้อมูลที่ได้จากการลดมาตราส่วน GCMs โดยค่าของ PBIAS จะมีให้ค่าเป็นร้อยละ (%) มีค่าอยู่ระหว่าง 0-100% หากค่าที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าผลของการลดมาตราส่วนมีค่าความแตกต่างที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการตรวจวัด สมการที่ 4.3.5-1 แสดงวิธีการคำนวณค่า PBIAS โดยที่ Obs_i และ Sim_i คือค่าตรวจวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณของชุดข้อมูลที่ i โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n โดยที่ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

$$PBIAS = \frac{\sum(Obs_i - Sim_i)}{\sum Obs_i} x100 \quad [4.3.5\text{-}1]$$

ซึ่งในการศึกษาการลดมาตราส่วนผลลัพธ์ที่ได้จาก GCMs ได้มีการระบุถึงระดับความถูกต้องของค่าที่ยอมรับได้จากกระบวนการลดมาตราส่วนรายละเอียดแสดงดัง**ตารางที่ 4.3-1**

ตารางที่ 4.3-1 ระดับการประเมินประสิทธิภาพวิธีการที่ใช้ในการลดมาตราส่วน

Classification	r	PBIAS
Very good	0.75-1.00	<±10
Good	0.65-0.75	±10 - ±15
Satisfactory	0.60-0.65	±15 - ±25
Unsatisfactory	<0.50	>±25

ที่มา: Ozbuldu and Irvem (2021)

4.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้โปรแกรมการลดมาตราส่วนทางสถิติ

เนื่องจากวิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติเป็นวิธีการที่มีความซับซ้อนที่น้อยกว่าวิธีการลดมาตราส่วนทางพลวัตร สามารถทำได้ง่ายโดยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ทั่วไป เช่น Excel, MATLAB และ SPSS เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีโปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อการลดมาตราส่วนโดยเฉพาะ โดยในส่วนนี้จะนำเสนอโปรแกรมทางสถิติที่ใช้ในการลดมาตราส่วน 2 โปรแกรม ได้แก่ SDSM และ CMhyd โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 Statistical downscaling model (SDSM)

แบบจำลองลดมาตราส่วน Statistical downscaling model (SDSM) (**รูปที่ 4.4.1-1**) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Wilby et al, 2002 (https://www.sdsm.org.uk) มีการทำงานโดยรูปแบบการดำเนินงานในการลดมาตราส่วนของแบบจำลองประกอบด้วย 7 ฟังชันก์หลัก ได้แก่ การควบคุมคุณภาพและการแปลงข้อมูล การคัดเลือกตัวแปร การปรับเทียบแบบจำลอง การจำลองสภาพอากาศ การวิเคราะห์ทางสถิติ การสร้างกราฟ การพยากรณ์สภาพอากาศในอนาคต (Wilby and Dawson,2007) (**รูปที่ 4.4.1-2**) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การควบคุมคุณภาพ (Quality control) และแปลงข้อมูล (Data transformation) คือ การนำข้อมูลตรวจวัดรายวันมาตรวจสอบค่าทางสถิติเบื้องต้นรวมถึงการตรวจสอบข้อมูลที่ขาดหาย

2) การคัดเลือกตัวแปร (Screen variables) คือ การคัดเลือกตัวแปรชุดตัวแปรภูมิอากาศ NCEP ที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณตรวจวัดรายสถานี ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการลดมาตราส่วน โดยค่าที่นำมาพิจารณาในการเลือกตัวแปรประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบแยกส่วน (Partial correlation coefficient) และค่าความเชื่อมั่น p-value

3) ปรับเทียบแบบจำลอง (Calibrate model) คือ การสร้างแบบจำลองการลดมาตราส่วนด้วยสมการการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM เฉพาะตัวแปรที่ได้รับการคัดเลือกจากขั้นตอนก่อนหน้าในช่วงปีที่เป็นช่วงข้อมูลอดีต และข้อมูลตรวจวัดรายสถานีเข้าสู่แบบจำลอง โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นรูปแบบไฟล์ *.PAR สร้างขึ้นเพื่อจัดเก็บพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของแบบจำลองแต่ละสถานีซึ่งไฟล์ข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

4) จำลองสภาพอากาศ (Weather generator) คือ การนำไฟล์ที่ได้จากขั้นตอนการปรับเทียบมาสร้างแบบจำลองปริมาณฝนจากตัวแปรที่ได้รับการคัดเลือก ซึ่งสามารถทำการสังเคราะห์

ชุดข้อมูลปริมาณฝนได้สูงสุด 100 ชุด โดยสามารถเลือกช่วงปีที่สนใจได้ และสามารถแบ่งช่วงข้อมูลออกเป็น 2 ช่วงได้แก่ ช่วงปรับเทียบและทวนสอบข้อมูล เพื่อตรวจสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง SDSM กับข้อมูลตรวจวัด โดยช่วงการปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลองขึ้นอยู่กับการเก็บข้อมูลของสถานีตรวจวัดปริมาณฝนแต่ละสถานี

5) การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analyses) คือ การนำไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง SDSM ด้วยตัวแปรที่ได้รับการคัดเลือก ในฟังชันก์ Weather generator หรือไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองปริมาณฝนอนาคตด้วยผลลัพธ์ภูมิอากาศจาก GCMs ในฟังชันก์ Scenario generation รวมถึงข้อมูลตรวจวัดรายสถานีมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ โดยสามารถเลือกค่าที่จะแสดงผลได้ เช่น ข้อมูลเฉลี่ยรายวัน ค่าสูงสุด-ต่ำสุดของข้อมูล ค่าความแปรปรวน ค่ากลาง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นต้น โดยสามารถแสดงผลเป็นได้ทั้งรายเดือน รายฤดูกาล และรายปี ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีรูปแบบเป็นไฟล์ *.TXT

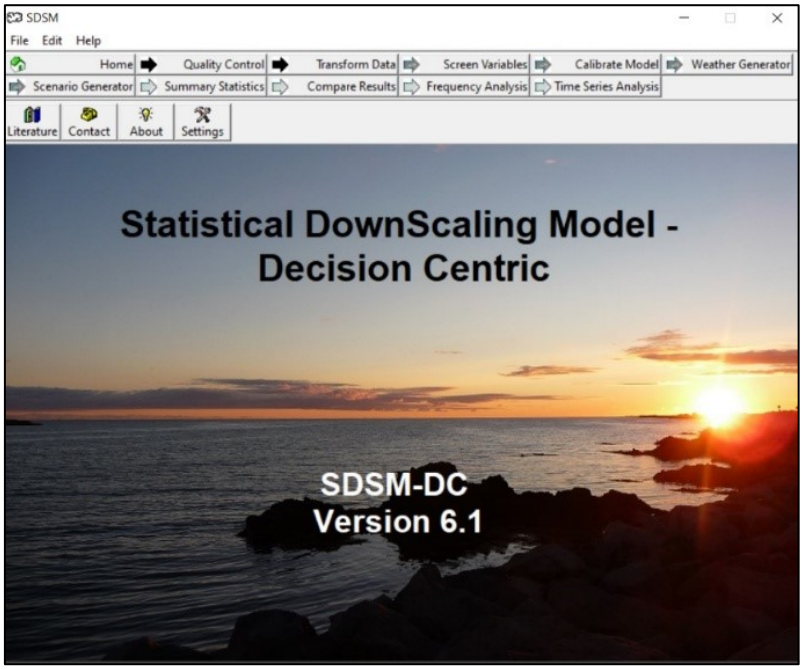
6) การสร้างกราฟ (Graphing model output) คือ การนำไฟล์ *.TXT ที่ได้จากการการวิเคราะห์ทางสถิติมาแสดงผลในรูปแบบกราฟแท่ง หรือกราฟเส้น ซึ่งสามารถแสดงการเปรียบเทียบของข้อมูล 2 ชุดได้

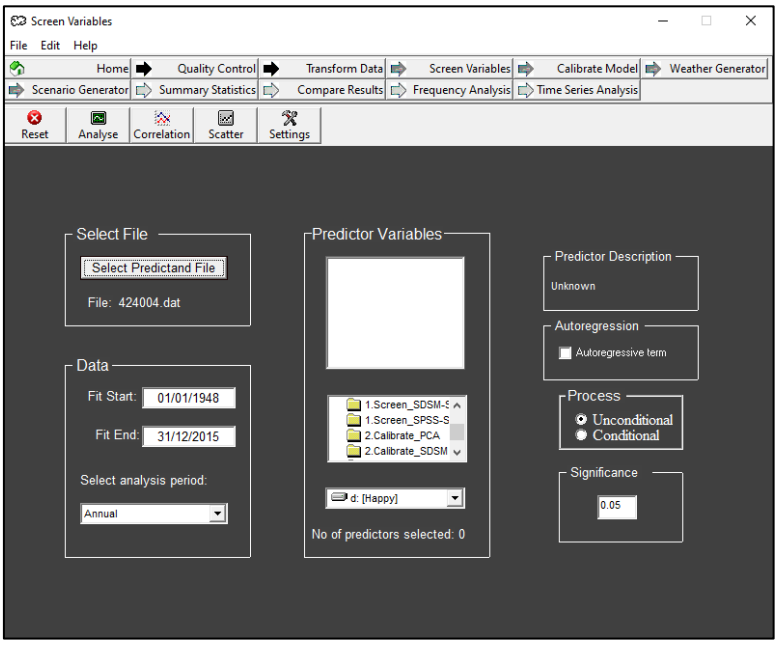
7) การจำลองสภาพภูมิอากาศในอนาคต (Scenario generation) คือ การนำไฟล์ชุดตัวแปรที่คัดเลือกจากขั้นตอนการปรับเทียบแบบจำลอง (*.PAR) มาจำลองปริมาณฝนอนาคตโดยใช้ค่าผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ภายใต้สถานการณ์ต่างๆ ซึ่งสามารถจำลองข้อมูลรายวันได้ครั้งละสูงสุด 100 ชุด

แบบจำลองการลดมาตราส่วน SDSM เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วยการใช้วิธีการทางสถิติในรูปแบบของการถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression: MLR) มาใช้ในการดำเนินงาน โดยเป็นการนำเข้าตัวแปรต้นหลายตัวแปร (ตัวแปรภูมิอากาศที่ได้รับการคัดเลือก) เพื่อประเมินความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม ดังสมการที่ (4.4.1-1) ซึ่งแบบจำลอง SDSM เป็นแบบจำลองที่มีการนำไปใช้ในการศึกษาการย่อส่วนข้อมูลสภาพภูมิอากาศอย่างแพร่หลายในหลายพื้นที่ตัวอย่างเช่น เกศวรา และคณะ (2561); Ebenezer et al (2021); Qudsiya and Patil, (2021*)* และ Onarun et al (2023)

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + e \qquad [4.4.1\text{-}1]$$

เมื่อ Y คือ ตัวแปรตาม (ปริมาณฝนจากแบบจำลอง)
X คือ ตัวแปรต้น (ค่าตัวแปรภูมิอากาศที่ได้รับการคัดเลือก)
b คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการประมาณการตัวนั้นๆ





รูปที่ 4.4.1-1 แบบจำลองการลดมาตราส่วน SDSM

4.4.2 Climate model data for hydrological modeling (CMhyd)

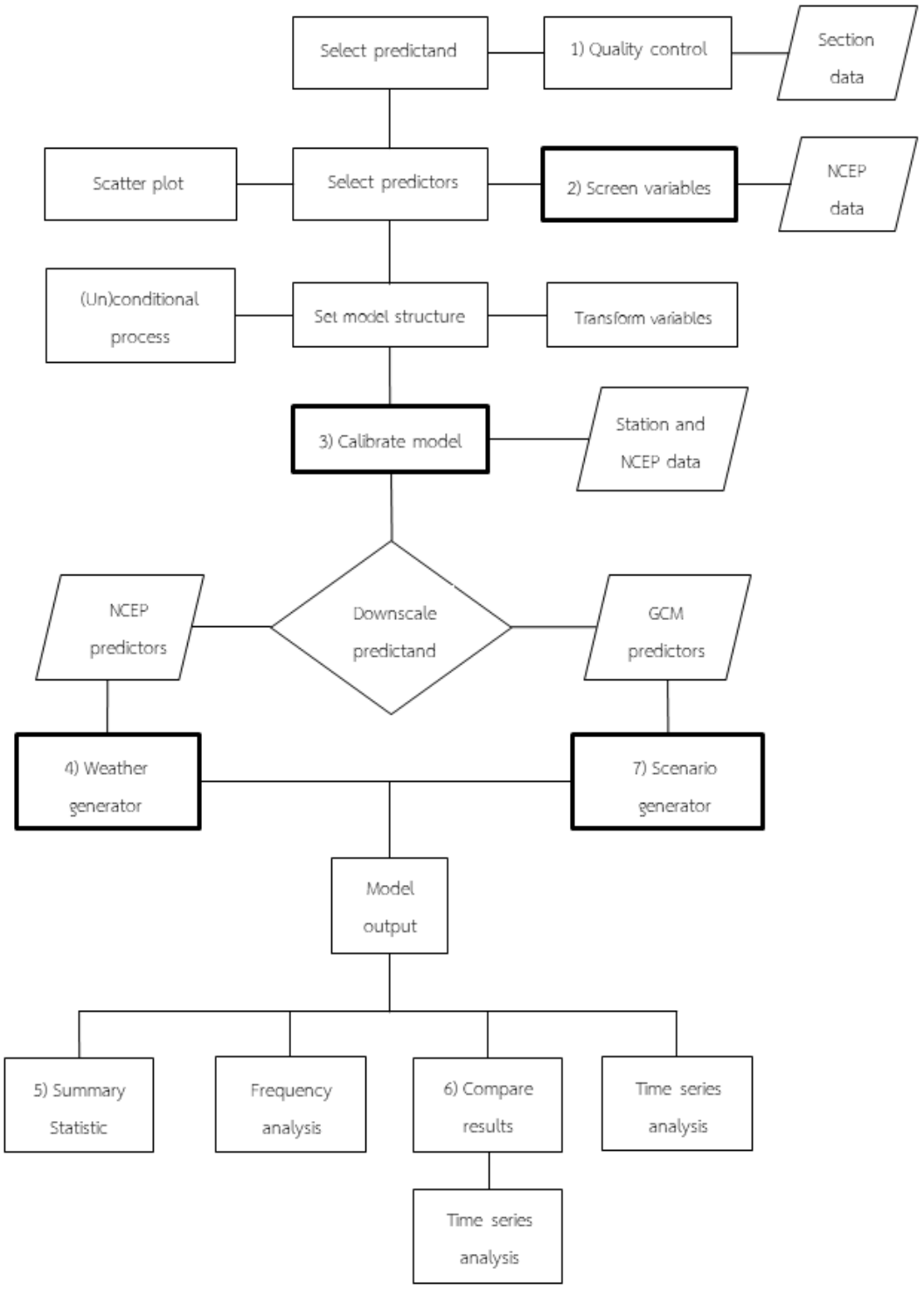
โปรแกรม CMhyd (**รูปที่ 4.4.2-1**) เป็นโปรแกรมทางสถิติสำหรับการลดค่าอคติผลลัพธ์ของแบบจำลอง GCM 2 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณฝน และอุณหภูมิ ซึ่งจะมีความแตกต่างกับแบบจำลอง SDSM ที่ผ่านมาในเรื่องของการเลือกใช้ผลลัพธ์ของแบบจำลอง GCM มาใช้ในการลดมาตราส่วน โดยแบบจำลอง SDSM สามารถเลือกปัจจัยอื่นๆที่เป็นคนละปัจจัยกับตัวแปรตรวจวัดในระดับท้องถิ่นที่ได้

จากการตรวจวัดได้ เช่น หากต้องการลดมาตราส่วนข้อมูลปริมาณฝนที่ได้จากแบบจำลอง GCM แบบจำลอง SDSM จะคัดเลือกตัวแปรอื่นๆรวมถึงตัวแปรฝนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณฝนตรวจวัดระดับท้องถิ่น ในขณะที่ CMhyd จำเป็นต้องทำการคัดเลือกปัจจัยจาก GCMs เป็นปัจจัยเดียวกันกับข้อมูลท้องถิ่น ตัวอย่างเช่นในกรณีเดียวกันกับการลดมาตราส่วนข้างต้น หากต้องการลดมาตราส่วนข้อมูลฝนจาก GCM เฉพาะตัวแปรฝนจาก GCM และข้อมูลฝนตรวจวัดท้องถิ่น จะถูกนำมาผ่านกระบวนการทางสถิติเพื่อลดมาตรส่วน โปรแกรม CMhyd มีกระบวนการทำงานทั้งสิ้น 5 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังนี้ (Rathjens et al., 2016)

- การจัดเตรียมข้อมูลตรวจวัด: ข้อมูลตรวจวัดที่สนใจจะต้องมีการจัดเตรียมในรูปแบบของ ASCII file จำนวนทั้งสิ้น 2 ชุดข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลตรวจวัดที่สนใจ เช่น ปริมาณฝนหรืออุณหภูมิ เป็นต้น และต้องมีการจัดเตรียมชุดข้อมูลที่ระบุรายละเอียดของสถานีตรวจวัด ได้แก่ ชื่อสถานีตำแหน่งที่ตั้งสถานี (ละติจูดและลองจิจูด) และระดับความสูงของสถานี (Elevation) เป็นต้น

- การจัดการข้อมูลผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM: ข้อมูลจากแบบจำลอง GCM ในรูปแบบของ netCDF (.nc files) จะถูกนำเข้าสู่โปรแกรม ซึ่งโปรแกรม CMhyd สามารถรับข้อมูลในรูปแบบดังกล่าวได้แล้ว ยังสามารถรับข้อมูลจากการลดมาตราส่วนโดยวิธีการพลวัตรได้อีกด้วย

- กระบวนการลดมาตราส่วน: เมื่อจัดเตรียมข้อมูลและนำเข้าข้อมูลเสร็จสิ้นจะเข้าสู่กระบวนการลดมาตราส่วน โดยมีวิธีการทางสถิติให้เลือกหลายวิธีขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ต้องการลดมาตราส่วน หากเป็นตัวแปรที่เป็นอุณหภูมิจะมีวิธีการลดมาตราส่วนทั้งหมด 4 วิธี ได้แก่ Linear scaling (additive), Delta change correction (additive), Variance scaling of temperature และ Distribution mapping of precipitation and temperature ในขณะที่หากเป็นปริมาณฝนจะสามารถเลือกวิธีลดมาตราส่วนได้ทั้งสิ้น 5 วิธี ได้แก่ Linear scaling (multiplicative), Delta-change correction (multiplicative), Precipitation local intensity scaling, Power transformation of precipitation และ Distribution mapping of precipitation and temperature สมการที่ 4.4.2-1 ถึง สมการที่ 4.4.2-3 แสดงตัวอย่างสมการที่ใช้ในการคำนวณในโปรแกรม CMhyd



ที่มา: Wilby and Dawson (2007)

รูปที่ 4.4.1-2 การทำงานของแบบจำลองการลดมาตราส่วน SDSM

- การแสดงผลการลดมาตราส่วน: ขั้นตอนสุดท้ายโปรแกรมจะทำการแสดงผลลัพธ์การลดมาตรส่วน โดยสามารถแสดงผลได้ในรูปแบบกราฟ เพื่อเปรียบเทียบผลกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

- Linear scaling

$$\hat{P}_{sim,m,d} = P_{sim,m,d}\ x\ [\frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{sim,m})}] \quad [4.4.2\text{-}1]$$

- Local intensity scaling

$$s_m = \frac{\mu(P_{obs,m,d}|P_{obs,m,d}>0)}{\mu(P_{sim,m,d}|P_{sim,m,d}>P_{thres,m})}$$

$$\hat{P}_{sim,m,d} = \begin{cases} P_{sim,m,d}\ x\ s_m \mid P_{sim,m,d} > P_{thres,m} \\ 0 \mid P_{sim,m,d} < P_{thres,m} \end{cases} \quad [4.4.2\text{-}2]$$

- Distribution mapping (Quantile mapping)

$$\hat{P}_{sim,m,d} = ecdfP_{obs}^{-1}(ecdfP_{sim}(P_{sim}(t))) \quad [4.4.2\text{-}3]$$

โดยที่

$\hat{P}_{sim,m,d}$ = ปริมาณฝนของเดือน m วันที่ d จากแบบจำลอง GCMs ช่วงอดีตที่ผ่านการลดมาตราส่วน

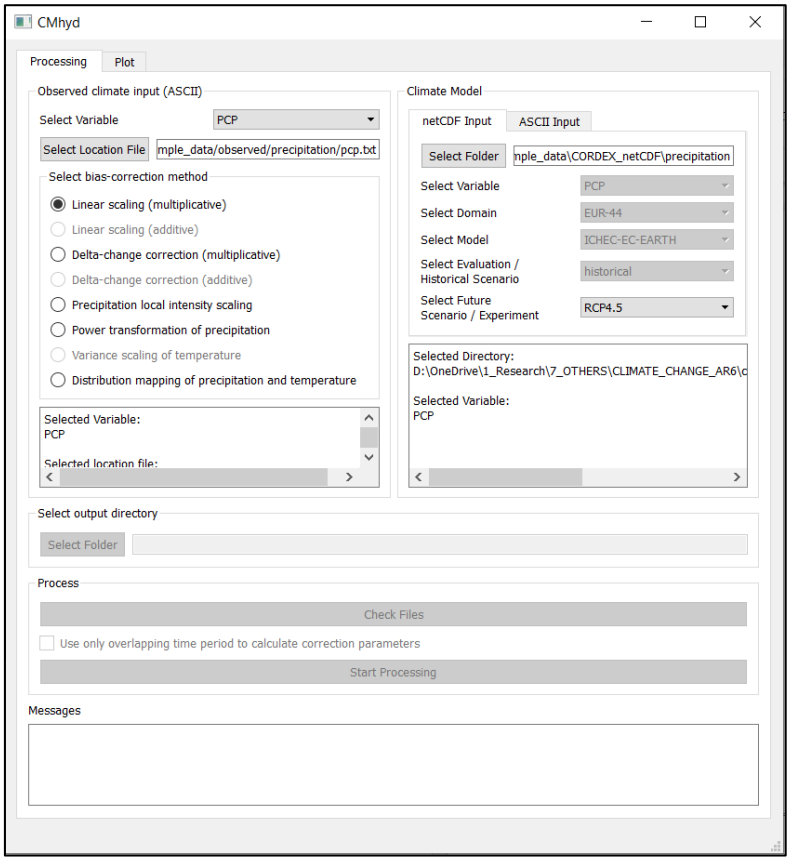
$P_{sim,m,d}$ = ปริมาณฝนของเดือน m วันที่ d จากแบบจำลอง GCMs ช่วงอดีต

$P_{obs,m}$ = ปริมาณฝนตรวจวัดของเดือน m

$P_{thres,m}$ = ปริมาณฝนที่กำหนดของ m

$ecdfP_{sim}$ = Empirical cumulative distribution function ของปริมาณฝนจากแบบจำลอง GCMs

$ecdfP_{obs}^{-1}$ = Inverse of Empirical cumulative distribution function ของปริมาณฝนตรวจวัด



รูปที่ 4.4.2-1 ตัวอย่างโปรแกรม CMhyd

4.4.3 การประยุกต์ใช้วิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติในประเทศไทย

เนื่องด้วยประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำ ดังนั้นในการศึกษาถึงผลกระทบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น รวมถึงการวางแนวทางในการปรับตัว จึงได้มีการนำข้อมูลจากแบบจำลอง GCM มาใช้ประเมินผลในระดับลุ่มน้ำ ซึ่งจากการใช้ข้อมูลดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนารวมถึงประยุกต์ใช้วิธีการลดมาตราส่วนในหลายวิธีกับหลายปัจจัยเพื่อการประเมินผลในระดับลุ่มน้ำได้อย่างเหมาะสม ซึ่งการศึกษาในประเทศไทยมีการศึกษาทั้งในรูปแบบของการพัฒนาและเปรียบเทียบวิธีการลดมาตราส่วนที่เหมาะสม และการศึกษาทั้งในระดับประเทศและระดับลุ่มน้ำ รวมถึงการนำแนวทางที่เหมาะสมดังกล่าวมาใช้ในการประเมินปัจจัยที่ศึกษาภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยมีตัวอย่างการศึกษาในประเทศไทยดังนี้

การลดมาตราส่วนหลายวิธีได้ถูกนำมาศึกษาและพัฒนาสำหรับข้อมูลปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนในการศึกษาของ Cheevaprasert et al. (2020) โดยได้นำเทคนิคการลดมาตราส่วนทางสถิติ 3 วิธี ได้แก่ Modified Markov Model และ Regression analysis ใน 2 รูปแบบ ได้แก่ใน

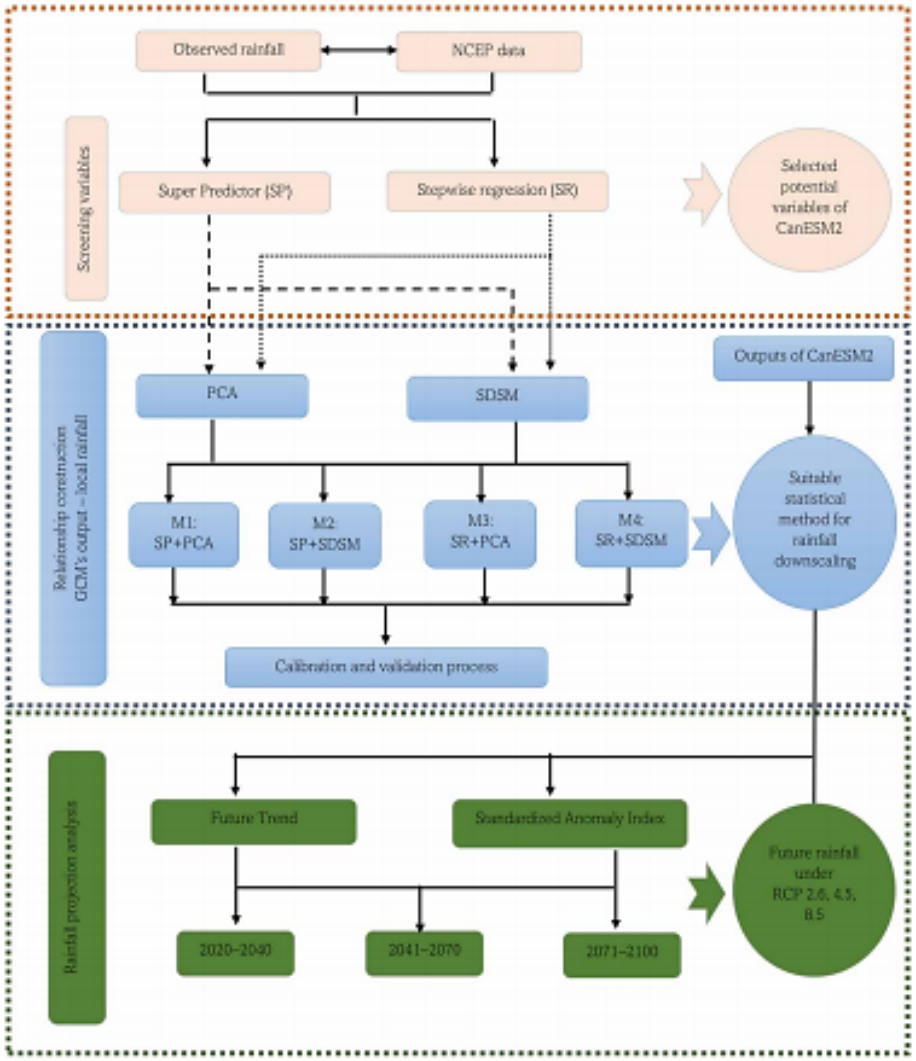
รูปแบบของสมการความสัมพันธ์ชุดเดียวสำหรับทุกวันในแต่ละปี และสมการความสัมพันธ์สำหรับแต่ละวัน (366 สมการ) โดยในกระบวนการศึกษาได้มีการใช้วิธีการ Stepwise regression เพื่อคัดเลือกตัวแปรบรรยากาศที่มีนัยสำคัญทางสถิติ พร้อมกับได้นำค่าความชื้นสะสม (Wetness Indicators) ในช่วง 30,90 และ 365 วัน มาใช้เป็นตัวแปรเพิ่มเติม (Predictors) ซึ่งได้มีการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลองโดยการใช้ค่า RMSE ในการประเมินผลความคลาดเคลื่อน ผลการศึกษาพบว่าการนำตัวแปรค่าความชื้นสะสมมาใช้สามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำในการลดมาตราส่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และวิธีการลดมาตรส่วนที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดได้แก่วิธี Modified Markov Model

นอกจากนั้นการพัฒนาแนวทางการลดมาตราส่วนของปริมาณฝนได้ถูกศึกษาในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีในงานวิจัยของ Onarun et al (2023) โดยการนำวิธีการในการเลือกตัวแปรต้น (Predictors) จำนวน 26 ตัวแปร จำนวน 2 วิธี ได้แก่ Super predictor method และ Stepwise regression จากแบบจำลอง GCM CanESM2 ของโครงการ CMIP5 จากนั้นตัวแปรที่ได้รับการคัดเลือกจะถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์กับปริมาณฝนโดยพิจารณาเลือกใช้วิธีการ 2 วิธี ได้แก่ แบบจำลอง Statistical Downscaling Model (SDSM) (รายละเอียดดังหัวข้อที่ 4.4.1) และ Principal Component Analysis (PCA) (รายละเอียดดังหัวข้อที่ 4.2) ผลการคัดเลือกตัวแปรจาก 26 ตัวแปร พบว่า อัตราการไหลของอากาศที่ระดับความดันบรรยากาศ 850 hpa (Geostrographic airflow velocity at 850 hpa) ค่าการแยกตัวของมวลอากาศที่ระดับความดันบรรยากาศ 850 hpa (Divergence at 850 hpa) และค่าปริมาณฝนที่ได้จากแบบจำลองเป็นปัจจัยหลักสำหรับใช้เป็นตัวแปรต้นในการย่อส่วน **รูปที่ 4.4.3-1** แสดงกระบวนการพัฒนาการลดมาตราส่วนโดยวิธีการทางสถิติร่วมกันจำนวนทั้งสิ้น 4 วิธี

การศึกษานี้ได้มีการปรับเทียบและสอบทานวิธีการที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นทั้ง 4 วิธี โดยได้มีการแบ่งช่วงการปรับเทียบช่วงปี 1985-1995 และช่วงการสอบทานในช่วงปี 1996-2005 (**ตารางที่ 4.4.3-1)** พร้อมกับได้นำวิธีการที่มีค่าสอดคล้องใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดในช่วงอดีตมากที่สุด (การใช้วิธีการ Super Predictor + SDSM) ไปใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงฝนในอนาคตของสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3 สถานการณ์ (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) เปรียบเทียบกับช่วงข้อมูลในอดีต แสดงดัง**รูปที่ 4.4.3-2**

การลดมาตราส่วนยังได้มีการศึกษาเพื่อลดมาตราส่วนในระดับประเทศในงานวิจัยของ Prathom and Champrasert (2023) โดยการประยุกต์ใช้วิธีการทางสถิติได้แก่ เทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ร่วมกับการใช้เทคนิค Invers Distance Weight ร่วมกับ Artificial Neural Neural Network (**รูปที่ 4.4.3-3**) โดยได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของการลดมาตราส่วนด้วยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ที่ได้ของปริมาณฝนและอุณหภูมิเป็นระยะเวลา 30 ปีจากการลดมาตราส่วนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด ร่วมกับการตรวจสอบโดยการแบ่งช่วงการปรับเทียบและการสอบทาน

ออกเป็น 2 ช่วง โดยประเมินจากค่า Coefficient of determination (r^2), RMSE และ Mean Absolute Error (MAE) (ผลการปรับเทียบและทวนสอบแสดงดัง**ตารางที่ 4.4.3-2**) จากนั้นจึงได้มีการประเมินการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย SSP1-2.6 และ SSP3-7.0 โดยมีตัวอย่างการประเมินการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนและอุณหภูมิของประเทศไทยแสดงดัง**รูปที่ 4.4.3-4**

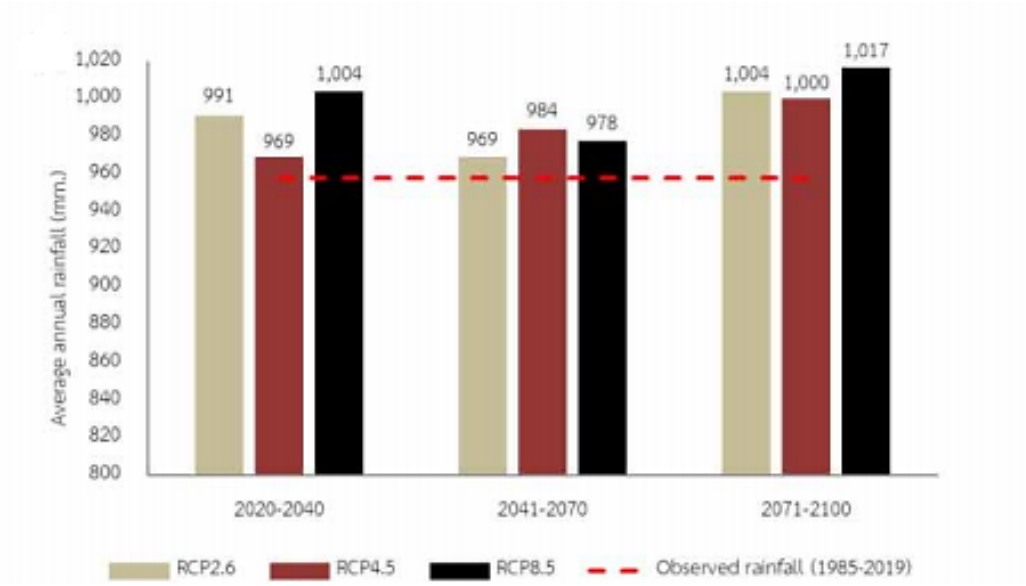


ที่มา: Onarun et al. (2023)

รูปที่ 4.4.3-1 ตัวอย่างการทำงานการประยุกต์ใช้วิธีการทางสถิติร่วมกัน

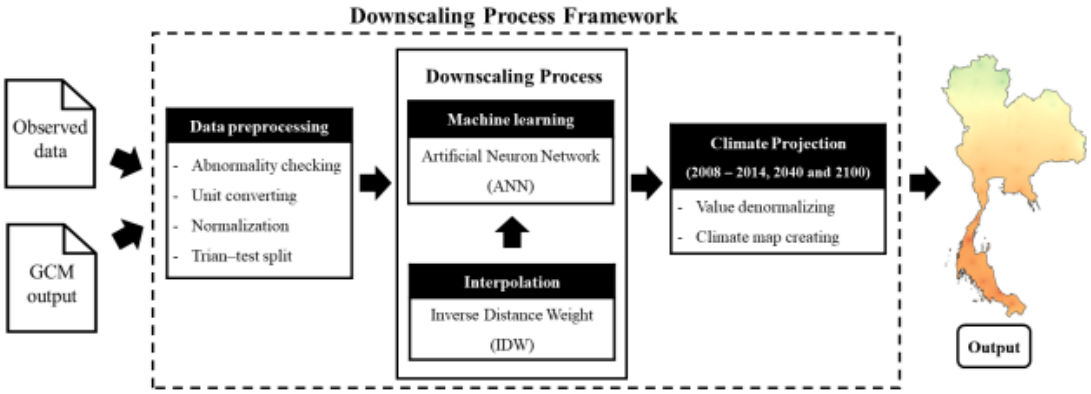
ตารางที่ 4.4.3-1 ตัวอย่างผลการปรับเทียบและสอบทานการลดมาตราส่วนปริมาณฝนของพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี

Station code		M1 (SP–PCA)			M2 (SP–SDSM)			M3 (SR–PCA)			M4 (SR–SDSM)		
		R^2	NSE	RMSE	R^2	NSE	RMSE	R^2	NSE	RMSE	R^2	NSE	RMSE
424004	Cal	0.55	0.53	72.66	0.60	0.60	66.86	0.71	0.66	62.09	0.62	0.62	65.27
	Val	*0.52*	*0.51*	*66.08*	*0.65*	*0.65*	*55.75*	*0.68*	*0.65*	*55.51*	*0.65*	*0.65*	*55.56*
465002	Cal	0.50	0.47	78.57	0.63	0.62	66.29	0.64	0.58	69.55	0.65	0.64	65.05
	Val	*0.26*	*0.25*	*92.18*	*0.53*	*0.53*	*72.89*	*0.47*	*0.43*	*80.02*	*0.51*	*0.50*	*74.81*
465004	Cal	0.43	0.41	78.54	0.58	0.57	66.76	0.59	0.55	68.63	0.64	0.63	62.26
	Val	*0.28*	*0.28*	*80.92*	*0.53*	*0.52*	*65.91*	*0.40*	*0.40*	*74.15*	*0.48*	*0.46*	*70.25*
465005	Cal	0.35	0.33	56.37	0.50	0.44	51.33	0.53	0.48	49.35	0.52	0.47	50.00
	Val	*0.24*	*0.12*	*88.13*	*0.54*	*0.53*	*64.53*	*0.46*	*0.31*	*78.02*	*0.51*	*0.53*	*66.71*
465006	Cal	0.44	0.42	67.08	0.54	0.52	61.09	0.58	0.56	58.44	0.57	0.58	58.65
	Val	*0.36*	*0.42*	*74.66*	*0.64*	*0.67*	*56.05*	*0.53*	*0.55*	*62.34*	*0.62*	*0.62*	*57.50*
465010	Cal	0.33	0.33	75.80	0.40	0.40	72.09	0.56	0.50	65.57	0.50	0.50	66.02
	Val	*0.20*	*0.18*	*82.74*	*0.55*	*0.54*	*62.05*	*0.38*	*0.35*	*74.08*	*0.51*	*0.51*	*64.36*
465012	Cal	0.45	0.44	57.75	0.56	0.50	54.16	0.72	0.65	46.05	0.56	0.48	55.29
	Val	*0.21*	*0.19*	*100.49*	*0.51*	*0.50*	*78.97*	*0.48*	*0.35*	*90.05*	*0.63*	*0.60*	*72.78*
465201	Cal	0.50	0.47	77.60	0.56	0.55	71.00	0.59	0.55	71.22	0.60	0.60	67.56
	Val	*0.39*	*0.39*	*74.26*	*0.62*	*0.61*	*58.91*	*0.53*	*0.51*	*66.24*	*0.63*	*0.62*	*58.19*
500202	Cal	0.41	0.40	81.87	0.50	0.49	75.14	0.55	0.51	74.00	0.56	0.55	70.60
	Val	*0.21*	*0.19*	*93.27*	*0.42*	*0.42*	*79.25*	*0.45*	*0.43*	*78.26*	*0.42*	*0.43*	*78.25*
500301	Cal	0.46	0.46	71.77	0.59	0.59	62.56	0.70	0.67	56.00	0.61	0.61	61.10
	Val	*0.24*	*0.23*	*100.58*	*0.47*	*0.47*	*83.76*	*0.47*	*0.46*	*84.32*	*0.47*	*0.47*	*83.61*



ที่มา: Onarun et al. (2023)

รูปที่ 4.4.3-2 ตัวอย่างปริมาณฝนในอนาคตภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี



ที่มา: Prathom and Champrasert (2023)

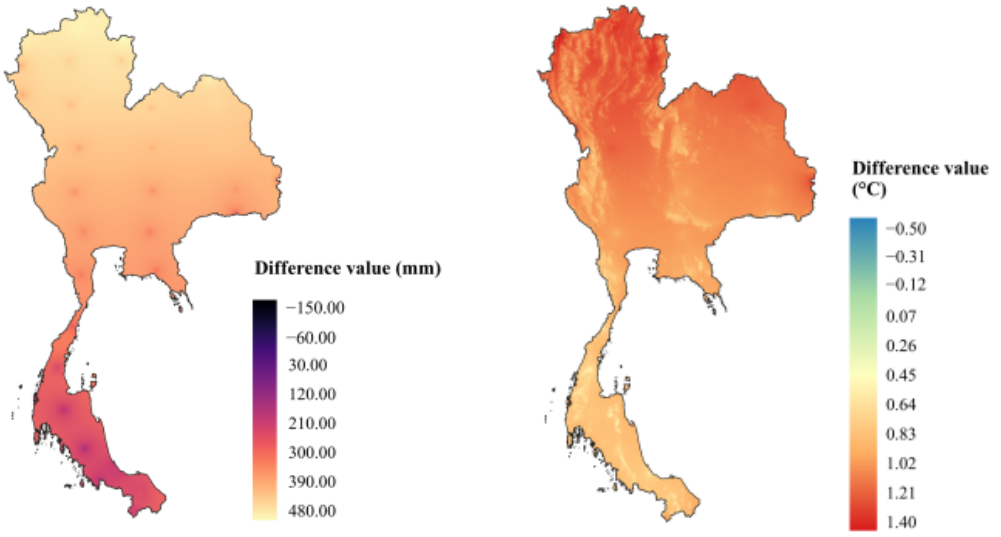
รูปที่ 4.4.3-3 ตัวอย่างวิธีการลดมาตราส่วนปริมาณฝนและอุณหภูมิของประเทศไทย

ตารางที่ 4.4.3-2 ผลการปรับเทียบและสอบทานการลดมาตราส่วนปริมาณฝนและอุณหภูมิของประเทศไทย

Metrics	Temperature			Precipitation		
	Train	Validation	Test	Train	Validation	Test
R^2	0.7571	0.7458	0.7322	0.7045	0.7216	0.7013
RMSE	0.0909	0.0975	0.0891	0.0457	0.0463	0.0369
MAE	0.0617	0.0673	0.0616	0.0306	0.0311	0.0271

ที่มา: Prathom and Champrasert (2023)

จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นได้ว่าการศึกษาเรื่องการลดมาตราส่วนทางสถิติในประเทศไทยมีการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในระดับลุ่มน้ำและระดับประเทศ วิธีการทางสถิติหลากหลายวิธีได้ถูกพัฒนาและประยุกต์ใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำ สำหรับการนำกระบวนการลดมาตราส่วนนั้นไปใช้ในการประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการเลือกใช้วิธีการลดมาตราส่วนจำเป็นต้องพิจารณาหลายปัจจัยเกี่ยวเนื่องกัน เช่น ความครบถ้วนของข้อมูลที่นำมาใช้อ้างอิง ความยากและซับซ้อนของวิธีการที่ใช้ รวมถึงความเข้าใจในวิธีการทางสถิติที่ผู้ใช้งานเลือกใช้ อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญในกระบวนการลดมาตราส่วนคือการประเมินความแม่นยำและถูกต้องของข้อมูลที่ได้ ซึ่งในทุกครั้งที่เลือกใช้จำเป็นต้องมีการพิจารณาผลการประเมินความถูกต้องให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เพื่อให้การประเมินถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสามารถนำไปใช้ในการศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยทางด้านอุทกวิทยาต่างๆ เช่น ปริมาณน้ำท่า ปริมาณน้ำใต้ดิน หรือการคายระเหย ได้อย่างถูกต้อง



ที่มา: Prathom and Champrasert (2023)

รูปที่ 4.4.3-4 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน (ซ้าย) และอุณหภูมิ (ขวา) ของประเทศไทยในปี 2100 ภายใต้สถานการณ์ SSP3-7.0

สรุปบทที่ 4
การลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก

- การลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลกเป็นกระบวนการเพื่อจัดการผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำ (Low resolution) ให้เหมาะสมกับการศึกษาต่างๆในพื้นที่ระดับท้องถิ่นหรือพื้นที่ที่มีขนาดเล็ก โดยวิธีการลดมาตราส่วนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีหลัก ได้แก่ การลดมาตราส่วนแบบพลวัตร (Dynamic downscaling) การลดมาตราส่วนทางสถิติ (Statistical downscaling) และการลดมาตราส่วนโดยการใช้ทั้ง 2 วิธีข้างต้นร่วมกัน (Dynamic-Statistical downscaling)

- การลดมาตราส่วนแบบพลวัตร (Dynamical downscaling) คือการนำผลลัพธ์จาก GCM มาเข้าสู่แบบจำลองการคำนวณสภาพภูมิอากาศระดับภูมิภาค (Regional Climate Models: RCM) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีกระบวนการคำนวณคล้ายคลึงกับแบบจำลอง GCM แต่จะมีความละเอียดเชิงพื้นที่มากกว่า ข้อดีของแบบจำลอง RCM คือให้ความแม่นยำที่สูงเนื่องด้วยการใช้ลักษณะทางกายภาพขององค์ประกอบภูมิอากาศเช่นเดียวกับแบบจำลอง GCM แต่มีความซับซ้อนของการคำนวณและต้นทุนของกระบวนการทำงานที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางสถิติ

- การลดมาตราส่วนทางสถิติ (Statistical downscaling) คือการใช้วิธีการคำนวณทางสถิติวิธีต่างๆหลากหลายวิธีเพื่อลดมาตรส่วนผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM การลดมาตราส่วนทางสถิติมีความซับซ้อนของการคำนวณและของกระบวนการทำงานที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการลดมาตราส่วนแบบพลวัตร แต่จะให้ค่าความแม่นยำที่ต่ำกว่าเช่นเดียวกัน เนื่องด้วยกระบวนการคำนวณขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณภาพของข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณ

- การลดมาตราส่วนโดยการใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกัน (Dynamic-Statistical downscaling) เป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้เมื่อการลดมาตราส่วนโดยแบบจำลอง RCM มีความละเอียดไม่เพียงพอต่อพื้นที่ที่ต้องการศึกษา จึงสามารถนำวิธีการทางสถิติมาใช้เพิ่มเติมเพื่อลดมาตราส่วนให้มีความละเอียดเพิ่มสูงขึ้นในระดับสถานีที่ตรวจวัดปัจจัยต่างๆได้

- วิธีการทางสถิติที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการลดมาตราส่วนผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM มีหลากหลายวิธี ตัวอย่างเช่น Delta method, Regression analysis, Principle Component Analysis (PCA) เป็นต้น โดยการนำวิธีการต่างๆมาใช้งานสามารถเลือกใช้เพียงวิธีเดียว หรือนำแต่ละวิธีมาประยุกต์ใช้ร่วมกันได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยและลักษณะของข้อมูล

- ในการดำเนินการลดมาตราส่วนทางสถิติในปัจจุบันได้มีการนำวิธีการลดค่าอคติ (Bias correction) มาประยุกต์ใช้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล เนื่องด้วยมีความซับซ้อนในการใช้งานน้อย สามารถใช้งานได้อย่างสะดวก อย่างไรก็ตามการลดค่าอคติเป็นวิธีการในการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเพียงอย่างเดียวของปัจจัยเดียวกันระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM และข้อมูลจากการตรวจวัด

- ในกระบวนการประเมินผลการลดมาตราส่วนจำเป็นต้องมีการแบ่งช่วงข้อมูลการศึกษาเพื่อตรวจสอบ โดยการแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงการปรับเทียบ (Calibration) คือช่วงกระบวนการที่ปรับค่าพารามิเตอร์ในวิธีการที่เลือกใช้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิง จากนั้นจึงนำจึงนำวิธีการและพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับแก้มาใช้ในการสอบทานแบบจำลอง (Verification) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ได้ผ่านการปรับเทียบมาแล้ว โดยช่วงเวลาของชุดข้อมูลที่ใช้ใน 2 กระบวนการนี้ต้องเป็นช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

- เมื่อทำการลดมาตราส่วนผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM แล้วจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยวิธีการทางสถิติที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องหลากหลายวิธี ตัวอย่างเช่น Pearson's correlation (r), Coefficient of determination (r^2), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Root Mean Square Error (RMSE) และ Percent bias (PBIAS) เป็นต้น

- ในปัจจุบันมีการพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีกระบวนการใช้งานไม่ซับซ้อนสำหรับการลดมาตราส่วนทางสถิติ ตัวอย่างเช่นแบบจำลอง Statistical Downscaling Model – Decision Centric (SDSM-DC) และ Climate model data for hydrological modeling (CMhyd) เป็นต้น

- การศึกษาการลดมาตราส่วนในประเทศไทยได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในระดับพื้นที่ลุ่มน้ำและในระดับประเทศ โดยมีการประยุกต์ใช้วิธีการที่หลากหลาย ซึ่งการเลือกใช้วิธีการลดมาตราส่วนที่เหมาะสมจำเป็นต้องมีการพิจารณาหลายปัจจัย เช่น ความครบถ้วนของข้อมูลที่นำมาใช้อ้างอิง ความยากและซับซ้อนของวิธีการที่เลือกใช้ รวมถึงความเข้าใจในวิธีการทางสถิติของผู้ใช้งาน เป็นต้น

คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม

1. จงอธิบายความสำคัญของการลดมาตราส่วนผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM พร้อมทั้งระบุวิธีการลดมาตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในพื้นที่ระดับลุ่มน้ำ

2. หากต้องการอธิบายถึงความถูกต้องของข้อมูลที่ได้หลังจากการลดมาตราส่วนจะต้องใช้วิธีการใดในการประเมินถึงความถูกต้องดังกล่าว

3. จงยกตัวอย่างวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการลดมาตราส่วนผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM มา 3 วิธี พร้อมทั้งระบุรายละเอียดการคำนวณของแต่ละวิธี และค้นคว้าเพิ่มเติมถึงการใช้งานและความถูกต้องของผลที่ได้จากการลดมาตราส่วนดังกล่าว

4. จากข้อมูล https://www.ncei.noaa.gov/access/search/data-search/daily-summaries?pageNum=1 และ . https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/
   จงประยุกต์ใช้แบบจำลอง CMhyd เพื่อลดมาตราส่วนผลลัพธ์ดังกล่าว โดยการเลือกใช้วิธีการทางสถิติอย่างน้อย 3 วิธี

5. จากผลที่ได้ในข้อ 4 จงเปรียบเทียบความแตกต่างของวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการลดมาตราส่วนโดยการเลือกวิธีการที่ใช้ในการประเมินความถูกต้องอย่างน้อย 3 วิธี

เอกสารอ้างอิง

เกศวรา สิทธิโชค, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร์, นิธิรัชต์สงวนเดือน และ ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์. 2561. ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วราวุธ วุฒิวณิชย์. 2553. การวิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ Nash-Sutcliffe Efficiency และ R2. วันชูชาติ. วารสารสมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์.4 มกราคม 2553. น.78.

Cheevaprasert, S., Mehrotra, R., Thianpopirug, S., and Sriwongsitanon, N. 2020. An evaluation of statistical downscaling techniques for simulating daily rainfall occurrences in the Upper Ping River Basin. Hydrology, 7, 63, doi:10.3390/hydrology7030063

Daniels, A. E., Morrison, J. F., Joyce, L. A., Crookston, N. L., Chen, S. C., & McNulty, S. G. 2012. *Climate projections FAQ* (Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-277WWW). Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Ebenezer K. Siabi, Amos T. Kabobah, Komlavi Akpoti, Geophery K. Anornu, Mark Amo-Boateng, Emmanuel K. Nyantakyi. 2021. Statistical downscaling of global circulation models to assess future climate changes in the Black Volta basin of Ghana. Environmental Challenges, vol.5. doi: 10.1016/j.envc.2021.100299.

Giorgi, F. (2019). Thirty years of regional climate modeling: Where are we and Where are we going next? Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124, 5696-5723.

Humphries,U.W., Waqas, M., Hlaing, P.T., Dechpichai, P., Wangwongchai, A. 2024. Assessment of CMIP6 GCMs for selecting a suitable climate model for precipitation projections in Southern Thailand. Results in Engineering, 23, 102417.

Morris, M., Smith, Karen and Kushner, P. (2023). UTCDW Guidebook (University of Toronto Climate Downscaling Workflow). https://utcdw.physics.utoronto.ca/UTCDW_Guidebook/README.html

Onarun, T, Thepprasit, C. and Sittichok, K. 2023. Development of statistical downscaling methods for the assessment of rainfall characteristics under climate change scenarios. Journal of Water and Climate Change, 14(9), 2970.

Ozbuldu, M. and Irvem, A. 2021. Evaluating the effect of the statistical downscaling method on monthly precipitation estimates of global climate models. Global NEST Journal, 23, 2, 232-240.

Qudsiya B.A.H. Farooqui, L.G. Patil. 2021. Assessment of Climate Change Impacts on Precipitation and Temperature Using SDSM Based on CanESM2 Predictors for Nanded, Maharashtra, India. International Research Journal of Engineering and Technology, vol.8, pp.78-85.

Prathom, C. and Champraset, P. 2023. General circulation model downscaling using interpolation – machine learning model combination – case study: Thailand. Sustainability, 15, 9668, https://doi.org/10.3390/su15129668

Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R. Chaubey, I., Arnold, J.G. 2016. CMhyd User Manual. In association with PURDUE University, USDA, Texas A&M AGRILIFE and Texas A&M University.

Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A. et al. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. Sci Data 9, 262. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4

Trazaska, S. and Schnarr, E. 2014. A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections. African and Latin American Resilience to Climate Change Project.

Verma, S., Kumar, K., Verma, M.K., Prased, A.D., Mehta, D. and Rathnayake, U. 2023. Comparative analysis of CMIP5 and CMIP6 in conjunction with the hydrological processes of reservoir catchment, Chhattisgarh, India. Journal of Hydrology: Regional Studies, 50, 101533.

Wilby RL, Dawson CW, Barrow EM. 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Environ Model Software, vol.17, pp.145–157

Wilby, R.L. and Dawson, C.W. (2007) SDSM User Manual—A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts.

Zhang, Q., Li, Y.P., Huang, G.H., Wang, H., Li, Y.F., Liu, Y.R. and Shen, Z.Y. 2022. A novel statistical downscaling approach for analyzing daily precipitation and extremes under the impact of climate change: Application to an arid region. Journal of Hydrology, 615, 128730.

บทที่ 5 – กรอบการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ

Chapter 5 – Framework for Assessing Climate Change Impact on Water Resources

บทที่ 5

กรอบการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ | Framework for Assessing Climate Change Impact on Water Resources

จากรายละเอียดในบทที่ 3 ที่ได้กล่าวถึงสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission scenarios) และแบบจำลองภูมิอากาศโลก (General Circulation Models: GCM) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และบทที่ 4 ที่ได้กล่าวถึงกระบวนการลดมาตราส่วน (Downscaling) เพื่อปรับปรุงให้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกเหมาะสมต่อการใช้งานในระดับท้องถิ่นหรือระดับลุ่มน้ำ ในบทนี้ได้นำเสนอกรอบแนวคิดและวิธีการสำหรับการประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ โดยได้มีการเชื่อมโยงแต่ละขั้นตอนการดำเนินงานของรายละเอียดในแต่ละบทที่ผ่านมาเข้ากับแบบจำลองอุทกวิทยา (Hydrological model) เพื่อประเมินถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อทรัพยากรน้ำซึ่งเป็นแนวทางที่มีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาด้านการจัดการทรัพยากรน้ำและการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

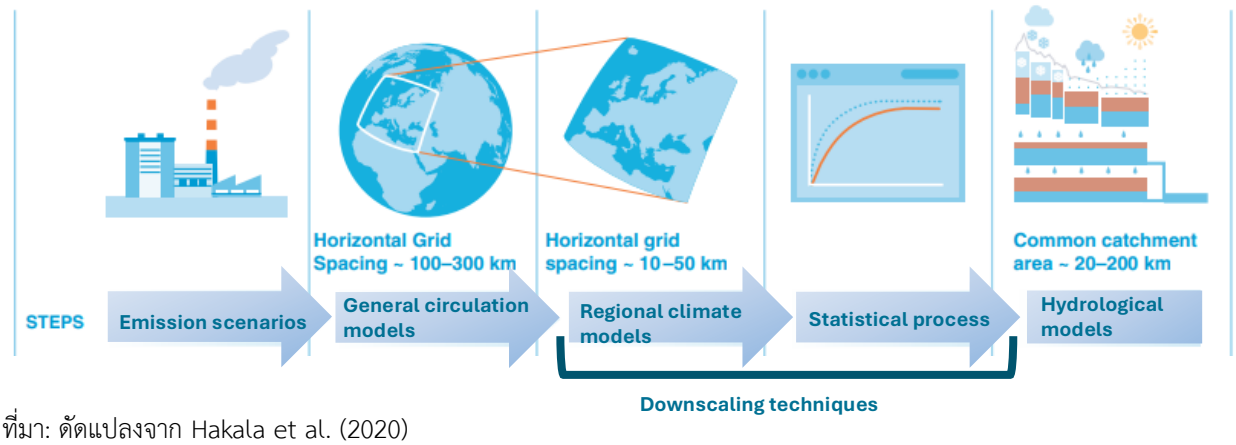
5.1 แนวทางการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำระดับท้องถิ่น

จากหัวข้อข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงทางสภาพอากาศและอุทกวิทยาในแต่ละภูมิภาคจะมีความแตกต่างกัน และจะยิ่งมีความแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อพิจารณาในแต่ละท้องถิ่นหรือแต่ละพื้นที่ที่มีขนาดเล็กเนื่องด้วยความแตกต่างทางลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ เช่น ระดับความสูงของพื้นที่ สิ่งปกคลุมดิน สิ่งปลูกสร้าง แหล่งน้ำ เป็นต้น การประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อลักษณะทางอุทกวิทยาโดยทั่วไปแล้วจะประเมินโดยนำผลลัพธ์ทางด้านสภาพภูมิอากาศจากสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ได้จากแบบจำลอง GCM ไปประเมินต่อเนื่องถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยการใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยา ซึ่งโดยมีขั้นตอนการพัฒนาที่สำคัญ 3 ขั้นตอน ได้แก่

- การคัดเลือกสถานการณ์ที่สนใจเพื่อประเมินถึงผลกระทบที่มีต่อทรัพยากรน้ำหรือปัจจัยทางด้านอุทกวิทยาอื่นๆ
- การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางด้านอุทกวิทยา

- การเชื่อมโยงสาเหตุ-ผลกระทบที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสภาพภูมิอากาศและระบบทางด้านอุทกวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไป

ขั้นตอนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับท้องถิ่น หรือในพื้นที่ที่ศึกษาขนาดเล็กแสดงดัง**รูปที่ 5.1-1** และมีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาในแต่ละส่วนดังนี้



ที่มา: ดัดแปลงจาก Hakala et al. (2020)

รูปที่ 5.1-1 ขั้นตอนการประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อปัจจัยทางด้านอุทกวิทยา

5.1.1 การเลือกสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission scenario selection)

สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคตจะถูกประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของทางด้านสังคม เศรษฐกิจ-สังคม การใช้พลังงาน การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน การเพิ่มขึ้นของประชากร และมาตรการที่ใช้เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เป็นต้น (รายละเอียดดังบทที่ 3) โดยผลลัพธ์ของสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่แตกต่างกันจะมีความแตกต่างกันไป การเลือกสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะมีความแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์การศึกษา ตัวอย่างเช่น หากต้องการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูงสุด สถานการณ์ที่เลือกศึกษาจะเป็นสถานการณ์ RCP8.5 (CMIP5) หรือ SSP5-8.5 (CMIP6) เป็นต้น หรือการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัยทางด้านอุทกวิทยาเมื่อมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่แตกต่างกันออกไป

สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีการกำหนดล่าสุดจาก IPCC จะถูกคัดเลือกนำมาใช้ในการศึกษา เนื่องด้วยเป็นสถานการณ์ที่ได้รับการพิจารณาจากปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องให้ครอบคลุมกับสถานการณ์ปัจจุบันและเงื่อนไขต่างๆที่จะเป็นไปได้ในอนาคต รวมถึงการพัฒนาทางด้านการ

คำนวณปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องที่คอมพิวเตอร์ในปัจจุบันสามารถคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยสถานการณ์ล่าสุดในปัจจุบัน ได้แก่ รูปแบบสถานการณ์ SSP (Share Socioeconomic Pathways: SSPs) (รายละเอียดดังบทที่ 3) ตัวอย่างเช่น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบการเกิดฝนในพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 (Sittichok and Thepprasit, 2022) การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ SSP2-4.5 และ SSP5-8.5 ต่อดัชนีฝนสุดขั้วในประเทศไทย (วินัย และคณะ 2564) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนสูงสุดรายวันพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยภายใต้สถานการณ์ SSP1-2.6 และ SSP3-7.0 (เทพไท และ กุลปราโมช, 2568) เป็นต้น

จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเลือกใช้สถานการณ์ย่อยภายใต้สถานการณ์ SSP นั้นมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการศึกษาในแต่ละพื้นที่ เช่น การศึกษาในภาพใหญ่เพื่อต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างของทั้ง 4 สถานการณ์หลัก (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) หรือต้องการศึกษาเพื่อพิจารณาถึงรูปแบบเหตุการณ์ใดๆเป็นสำคัญ เช่นศึกษาสถานการณ์ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด (SSP5-8.5) เปรียบเทียบกับสถานการณ์ที่มีระดับปานกลาง (SSP2-4.5) หรือในระดับต่ำ (SSP1-2.6) เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วยังมีการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบระหว่างสถานการณ์หลัก SSP (CMIP6) และ RCP (CMIP5) เพื่อประเมินถึงความแตกต่างของผลกระทบที่เกิดขึ้นจากรูปแบบของสถานการณ์ที่พัฒนาขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เช่น การศึกษาของอิศเรศ และเอกสิทธิ์ (2566) ในการเปรียบเทียบสมดุลน้ำระหว่างสถานการณ์ SSP5-8.5, RCP8.5 และ RCP4.5 หรือการศึกษาในพื้นที่ต่างประเทศซึ่งมีการเปรียบเทียบระหว่าง SSP2-4.5/RCP4.5 ซึ่งเป็นสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับปานกลาง และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระดับสูง SSP5-8.5 /RCP5-8.5 และได้มีการสรุปถึงค่าอคติ (Bias) ที่เกิดขึ้นจากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและพบว่าผลลัพธ์จากโครงการ CMIP6 มีค่าอคติที่ต่ำกว่า CMIP5 (Hamed et al., 2022; Verma et al., 2023)

5.1.2 การเลือกแบบจำลองภูมิอากาศโลก (General Circulation Model selection)

แบบจำลอง GCM เป็นแบบจำลองที่จำลองระบบสภาพภูมิอากาศของโลก โดยการนำองค์ประกอบจากหลายส่วนมาคำนวณร่วมกัน ตัวอย่างเช่น บรรยากาศของโลก มหาสมุทร และลักษณะสภาพภูมิประเทศ ซึ่งแบบจำลอง GCM ที่พัฒนาขึ้นของแต่ละหน่วยงานจะมีความแตกต่างกันทั้งในเรื่องของวิธีการคำนวณและโครงสร้างของแบบจำลอง ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองถึงแม้จะพิจารณาในสถานการณ์เดียวกันก็จะมีความแตกต่างกัน (รายละเอียดของแบบจำลอง GCM แสดงดังบทที่ 3) โดยความร่วมมือระดับนานาชาติของโครงการ CMIP ได้นำผลลัพธ์รวมถึงวิธีการและแนวทางการพัฒนา GCM มาพัฒนาแบบจำลองร่วมกันมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จาก

แบบจำลองมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการเลือกแบบจำลอง GCM ที่นำมาใช้ในการประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจึงมีความสำคัญ

การประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากหลายหน่วยงานและหลายพื้นที่จะมีการเลือกใช้แบบจำลองที่มีความหลากหลายไม่ว่าจะอยู่ในสถานการณ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในช่วงเวลาใด (CMIP5 และ CMIP6 เป็นต้น) จำนวนแบบจำลอง GCM ที่เลือกใช้ในการศึกษาโดยส่วนใหญ่มีตั้งแต่ 3 แบบจำลองจนถึงมากกว่า 10 แบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองที่ให้ผลในช่วงอดีตที่ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดในพื้นที่ในแต่ละการศึกษาจะมีความแตกต่างกันออกไป **ตารางที่ 5.1.2-1** แสดงตัวอย่างการเลือกใช้แบบจำลอง GCM สำหรับการศึกษาในแต่ละพื้นที่ เช่น การศึกษาของ Ali et al. (2025) ได้มีการเลือกใช้แบบจำลอง GCM ทั้งสิ้น 35 แบบจำลองในการประเมินถึงลักษณะทางอุทกวิทยา ได้แก่ ปริมาณน้ำท่า การคายระเหย การซึมของน้ำลงดิน ในพื้นที่ของบังคลาเทศ การศึกษาที่ประเทศอินเดียในการประเมินทางด้านอุทกวิทยาที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีการใช้แบบจำลอง GCM 13 แบบจำลองของ CMIP6 และ 16 แบบจำลองของ CMIP5 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ma et al. (2024) ได้มีการประเมินถึงปริมาณน้ำท่าและตะกอนในพื้นที่ลุ่มน้ำโขงโดยมีการใช้แบบจำลองทั้งของ CMIP5 และ CMIP6 อย่างละ 7 แบบจำลอง และยังพบว่าการเลือกใช้แบบจำลองร่วมกัน (Ensemble model) จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Verma et al.,2023) จากงานวิจัยของ Knutti et al. (2013) อ้างอิงใน Hakala et al. (2020) ได้ระบุว่าจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากโครงการ CMIP5, CMIP3 และ CMIP2 พบว่าการนำผลลัพธ์จากแบบจำลองมาใช้ร่วมกัน (Model ensembles) จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุด

สำหรับในประเทศไทยเช่นการศึกษาของ Humphries et al. (2024) ได้มีการเลือกใช้แบบจำลอง GCMs 3 แบบจำลองใน CMIP6 ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยในการคาดการณ์ปริมาณฝนในอนาคตและพบว่า CNRM-ESM2-1 เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ นอกจากนั้นยังมีการศึกษาของ Sittichok (2022) ที่ได้ทำการประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจำนวน 10 แบบจำลองใน CMIP6 โดยผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง CMCC-CM2 ให้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ซึ่งจากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นได้ว่าการคัดเลือกแบบจำลองจะมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับการพิจารณาถึงการใช้แบบจำลองดังกล่าวในพื้นที่ศึกษาที่ใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษาหลัก รวมถึงการเข้าถึงข้อมูลของแบบจำลอง เป็นต้น

ตารางที่ 5.1.2-1 ตัวอย่างการศึกษาการเลือกใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก

แบบจำลอง	Ali et al. (2025)		Verma et al.(2023)		Ma et al. (2024)		Humphries et al. (2024)		Sittichok et al. (2022)	
	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง
ACCESS-CM2	6	●	6	●						
ACCESS-ESM1-5	6	●	6	●						
BCC-CSM2-MR	6	●	6	●						
CAMS-CSM1-0							6	●		
CanESM2 (IITM)			5	●	5	●				
CanESM2 (SMHI)			5	●						
CanESM5	6	●	6	●	6	●	6	●		
CESM2	6	●								
CESM2-WACCM	6	●							6	●
CMCC-CM2-SR5	6	●							6	●
CMCC-ESM2	6	●							6	●
CNRM-CM5 (IITM)			5	●						
CNRM-CM5 (SMHI)			5	●						
CNRM-CM6-1	6	●					6	●		
CNRM-ESM2-1	6	●					6	●		
CSRIO-Mk3-6-0 (IITM)			5	●						
CSRIO-Mk3-6-0 (SMHI)			5	●						

แบบจำลอง	Ali et al. (2025)		Verma et al.(2023)		Ma et al. (2024)		Humphries et al. (2024)		Sittichok et al. (2022)	
	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง
CM5A-LR (IITM)			5	●						
CM5A-LR (SMHI)			5	●						
EC-EARTH			5	●						
EC-EARTH3	6	●	6	●						
EC-EARTH3-Veg	6	●	6	●						
FGOALS-g3	6	●								
GFDL-CM4_gr2	6	●								
GFDL-CM4	6	●								
GFDL-ESM2M (IITM)			5	●						
GFDL-ESM2M (SMHI)			5	●						
GFDL-ESM4	6	●							6	●
GISS-E2-1-G	6	●								
HadGEM3-GC31-LL	6	●								
HadGEM3-GC31-MM	6	●								
IITM-ESM	6	●								
KACE-1-0-G	6	●								
KIOST-ESM	6	●								
MIROC5 (SMHI)			5	●	5	●				
MIROC6	6	●			6	●				

แบบจำลอง	Ali et al. (2025)		Verma et al.(2023)		Ma et al. (2024)		Humphries et al. (2024)		Sittichok et al. (2022)	
	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง
MIROC-ES2L	6	●								
MPI-ESM-LR (REMO)			5	●	5	●				
MPI-ESM-LR (SMHI)			5	●						
MPI-ESM-LR (IITM)			5	●						
MPI-ESM1-2-HR	6	●	6	●	6	●			6	●
MPI-ESM1-2-LR	6	●	6	●	6	●				
MPI-ESM-MR					5	●				
MPI-ESM2-0	6	●								
MRI-CGCM3					5	●				
MRI-ESM2–0			6	●	6	●			6	●
NESM3	6	●								
NorESM1-M			5	●	5	●				
NorESM2-LM	6	●	6	●	6	●				
NorESM2-MM	6	●	6	●					6	●
INM-CM4–8	6	●	6	●					6	●
INM-CM5–0	6	●	6	●					6	●
IPSL-CM5A-LR					5	●				
IPSL-CM6A-LR	6	●			6	●	6	●		
TaiESM1	6	●							6	●

แบบจำลอง	Ali et al. (2025)		Verma et al.(2023)		Ma et al. (2024)		Humphries et al. (2024)		Sittichok et al. (2022)	
	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง	CMIP	แบบจำลอง
UKESM1-0-LL	6	●								

5.1.3 การลดมาตราส่วนผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM (Downscaling process)

เมื่อทำการคัดเลือกแบบจำลองและสถานการณ์ที่จะทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำแล้ว จำเป็นต้องมีการพิจารณาถึงความละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM ว่ามีความละเอียดเพียงพอต่อการศึกษาหรือไม่ ซึ่งในปัจจุบันแบบจำลอง GCM บางแบบจำลองสามารถให้ผลลัพธ์ที่ละเอียดได้ในระดับ 100 ตร.กม. สำหรับผลลัพธ์บางประเภทข้อมูล เช่น อุณหภูมิผิวน้ำทะเล (Sea surface temperature) และ อุณหภูมิพื้นผิว (Surface temperature) เป็นต้น แต่โดยทั่วไปแล้วแบบจำลอง GCM ในปัจจุบันให้ผลลัพธ์ที่มีความละเอียดประมาณอยู่ในช่วงมากกว่า 250 ตร.กม. ซึ่งหากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM ไม่สอดคล้องหรือมีความละเอียดที่ไม่เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษาจำเป็นต้องมีการลดมาตราส่วนผลลัพธ์ที่ได้โดยวิธีการต่างๆ เช่น การประยุกต์ใช้แบบจำลอง RCM หรือการใช้วิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติโดยวิธีต่างๆ เช่น การลดค่าอคติของข้อมูล (Bias correction) วิธีการของการลดค่าอคติสามารถถูกนำไปใช้ได้เช่นเดียวกันกับการลดมาตราส่วนของผลลัพธ์แบบจำลอง โดยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สนใจความแตกต่างของมาตราส่วน และพื้นที่ศึกษา (Maraun and Widmann (2018) อ้างอิงใน Hakala et al. (2020) ได้ระบุว่าวิธีการลดค่าอคติเป็นวิธีการทางสถิติมีหลากหลายวิธีด้วยกัน โดยวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดมาตรส่วนผลลัพธ์ของแบบจำลอง GCM ที่ผ่านการลดมาตรส่วนแบบพลวัตร (RCM) มาแล้วได้แก่วิธีการ Quantile mapping หรือมีชื่อเรียกอีกแบบหนึ่งว่า Distribution mapping, Probability mapping (รายละเอียดการลดมาตราส่วนแสดงดังบทที่ 4)

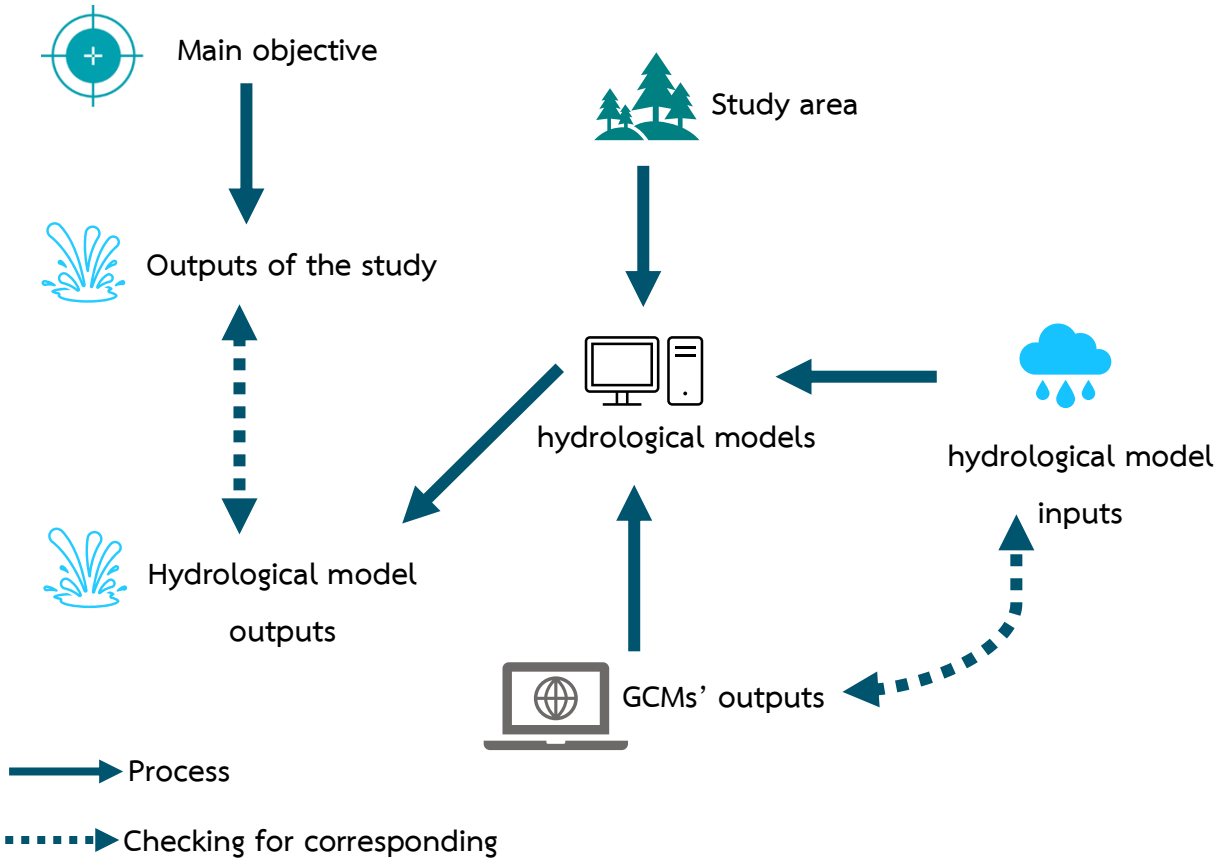
เนื่องจากการเลือกใช้วิธีการลดมาตราส่วนจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความละเอียดของข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ได้มาจากแบบจำลอง GCM การเข้าถึงแบบจำลองการคำนวณสภาพภูมิอากาศระดับภูมิภาค (RCM) ที่ใช้ในการลดมาตราส่วนเชิงพลวัตร หรือการเข้าถึงข้อมูลตรวจวัดของปัจจัยต่างๆ สำหรับการเลือกใช้วิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติ เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับท้องถิ่นจะเห็นการเลือกใช้วิธีการลดมาตราส่วนในหลายรูปแบบทั้งการเลือกใช้เพียงวิธีใดวิธีหนึ่ง หรือการใช้หลากหลายวิธีร่วมกัน ตัวอย่างเช่น Verma et al. (2023) และ Ali et al. (2025) ได้เลือกใช้วิธีการทางสถิติ Bias correction methods ในการประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ในขณะที่ Humphries et al. (2024) ได้มีการเปรียบเทียบวิธีการทางสถิติหลายวิธีได้แก่ Delta-change, Empirical quantile mapping และ Quantile mapping เพื่อตรวจสอบถึงวิธีการลดมาตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในการประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนในสถานการณ์ต่างๆภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รวมถึงการพัฒนาวิธีการลดมาตราส่วนเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลในสถานการณ์ความเป็นจริงมากที่สุด จากงานของ Onarun et al. (2023) ได้มี

การพัฒนาวิธีการลดมาตราส่วนทางสถิติในหลายรูปแบบโดยการใช้วิธีการทางสถิติหลายวิธีร่วมกัน ได้แก่ Super predictor, Stepwise regression, Principal component analysis และ Statistical downscaling model (SDSM) โดยพบว่า การเลือกใช้ Stepwise regression และ SDSM ให้ผลลัพธ์ของข้อมูลปริมาณฝนจากแบบจำลอง GCM ที่ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดในช่วงอดีตมากที่สุด

จะเห็นได้ว่าการเลือกใช้วิธีการลดมาตราส่วนจะมีวิธีการที่หลากหลายขึ้นอยู่กับความเชี่ยวชาญของผู้ที่ศึกษาและวิธีการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นในยุคปัจจุบันยังมีการพัฒนาวิธีการรวมถึงแบบจำลองที่สามารถลดมาตราส่วนข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM ได้อย่างรวดเร็ว ลดความยุ่งยากในการคำนวณ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการลดมาตราส่วนข้อมูลแล้วจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้โดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดในอดีต เพื่อให้การประเมินที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

5.1.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยา (Hydrological modeling application)

แบบจำลองอุทกวิทยาเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้เพื่อประเมินถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีผลต่อปัจจัยทางด้านอุทกวิทยาต่างๆ เช่น ปริมาณน้ำในลำน้ำ ปริมาณน้ำท่าผิวดิน และปริมาณน้ำใต้ดิน เป็นต้น นอกจากนั้นยังสามารถประเมินถึงสมดุลน้ำในแต่ละพื้นที่ได้อีกด้วย จาก**รูปที่ 5.1-1** จะเห็นได้ว่าแบบจำลองอุทกวิทยาเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่จะให้ผลลัพธ์ของปัจจัยทางอุทกวิทยาสนใจ แต่อย่างไรก็ตามการเลือกใช้แบบจำลองถึงแม้จะเป็นขั้นตอนสุดท้ายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำ แต่จริงๆแล้วแบบจำลองอุทกวิทยาเป็นขั้นตอนแรกที่จำเป็นต้องพิจารณาเนื่องด้วยการเลือกใช้แบบจำลองเกี่ยวข้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาเนื่องจากแต่ละแบบจำลองจะมีความสามารถในการประเมินผลทางอุทกวิทยาที่แตกต่างกันออกไป เช่น การประเมินปริมาณน้ำท่า ปริมาณน้ำใต้ดิน และสภาพน้ำท่วม เป็นต้น รวมถึงข้อมูลที่จะนำเข้าสู่แบบจำลองอุทกวิทยาก็จะมีความแตกต่างกันออกไป ซึ่งจะเกี่ยวเนื่องกับการพิจารณาการคัดเลือกปัจจัยที่ถูกคำนวณจากแบบจำลอง GCM ที่แต่ละแบบจำลองจะมีความหลากหลาย แบบจำลองทางอุทกวิทยามีหลายรูปแบบและหลายแบบจำลองที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ **รูปที่ 5.1.4-1** แสดงแนวคิดการเลือกใช้แบบจำลองอุทกวิทยากับการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และรายละเอียดของแบบจำลองอุทกวิทยาแสดงดังหัวข้อที่ 5.2 และบทที่ 6



รูปที่ 5.1.4-1 การตรวจสอบแบบจำลองทางอุทกวิทยากับผลลัพธ์ของแบบ GCMs

5.2 แบบจำลองอุทกวิทยา

แบบจำลอง (Modeling) หมายถึงสิ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นตัวแทนของระบบหรือลักษณะต่างๆของสิ่งที่อยู่บนโลก ดังนั้นแบบจำลองอุทกวิทยา (Hydrological modeling) จึงหมายถึงเครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและสร้างความเข้าใจถึงลักษณะที่เกี่ยวเนื่องกับกระบวนการทางด้านอุทกวิทยาที่เป็นอยู่บนโลก แบบจำลองอุทกวิทยาจะนำทฤษฎีทางด้านอุทกวิทยาในส่วนต่างๆ ตัวอย่างเช่น การคายระเหย การซึมของน้ำผ่านผิวดิน และการไหลของน้ำ มาใช้ในการคำนวณเพื่อประเมินถึงปัจจัยในแต่ละส่วนที่สนใจ โดยในแต่ละส่วนจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ในการคำนวณที่แตกต่างกัน รายละเอียดของแบบจำลองอุทกวิทยาแสดงได้ดังนี้

5.2.1 การแบ่งประเภทของแบบจำลอง (Model classification)

แบบจำลองอุทกวิทยาสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการพิจารณาลักษณะของแบบจำลอง โดยสามารถแบ่งการพิจารณาออกได้เป็น 3 รูปแบบหลักได้แก่ การพิจารณากระบวนการในการคำนวณของแบบจำลอง (Process description) การพิจารณาลักษณะพื้นที่ของ

แบบจำลอง (Spatial representation) และกระบวนการพิจารณาแนวทางการใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลอง (Randomness) แสดงดัง**รูปที่ 5.2.1-1** และมีรายละเอียดดังนี้

(1) การพิจารณากระบวนการคำนวณของแบบจำลอง แบบจำลองสามารถถูกจัดกลุ่มได้โดยการพิจารณากระบวนการคำนวณซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม (Devi et al., 2015) ดังนี้

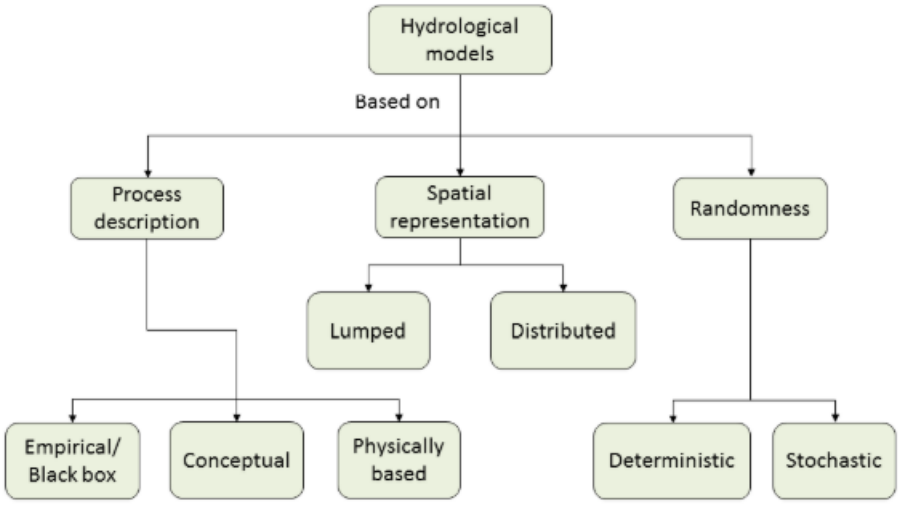
- **Empirical / Black box:** เป็นกระบวนการคำนวณของแบบจำลองโดยพิจารณาลักษณะข้อมูล หรือความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆของปัจจัยที่สนใจศึกษา โดยไม่ได้นำกระบวนการทางอุทกวิทยาของพื้นที่ศึกษา หรือของลุ่มน้ำเข้ามาใช้ในการคำนวณ กระบวนการรูปแบบนี้จะเกี่ยวเนื่องกับการสร้างสมการในการคำนวณ (Mathematical equation) เพียงอย่างเดียว ตัวอย่างเช่น การคำนวณในรูปแบบของ Unit hydrograph การสร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการถดถอย (Regression analysis) หรือการใช้วิธีการทางสถิติอื่นๆ เช่น Artificial Neural network หรือ Fuzzy regression เป็นต้น
- **Conceptual model / Parametric model:** แบบจำลองในรูปแบบนี้จะนำกระบวนการทางอุทกวิทยามาพิจารณาใช้ในการคำนวณ โดยจะพิจารณาในแต่ละส่วนของลุ่มน้ำหรือพื้นที่ศึกษา เช่น ปริมาณฝน การซึมน้ำของดิน การเคลื่อนที่ของน้ำในดิน การระเหย ปริมาณน้ำผิวดิน เป็นต้น แบบจำลองในรูปแบบนี้จะยังคงมีการสร้างสมการ (Empirical) ในการคำนวนในบางส่วน จำเป็นต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ (Model calibration) เพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องและแม่นยำ
- **Physically based model:** แบบจำลองรูปแบบนี้จะพิจารณากระบวนการทางกายภาพ (Physical process) มาใช้ในการคำนวณ กระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำจะถูกคำนวณโดยสมการ Finite equation ข้อมูลและค่าพารามิเตอร์ที่ต้องนำเข้าสู่แบบจำลองหรือที่ต้องกำหนดค่าเริ่มต้นจะมีจำนวนมากกว่าแบบจำลองใน 2 รูปแบบแรก โดยมีตัวอย่างข้อมูลได้แก่ ปริมาณความชื้นในดินเริ่มต้น ความลึกของน้ำในดินเริ่มต้น ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ เครือข่ายลำน้ำ แบบจำลองในรูปแบบนี้จะมีพารามิเตอร์เป็นจำนวนมากที่ต้องทำการปรับแก้ค่าเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและแม่นยำ สามารถให้ผลลัพธ์ได้ในหลายปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับทางด้านอุทกวิทยา

(2) การพิจารณาการกำหนดลักษณะพื้นที่ของแบบจำลอง แบบจำลองจะถูกจัดกลุ่มโดยพิจารณาจากการกำหนดพื้นที่ลุ่มน้ำหรือพื้นที่ศึกษาเพื่อนำมาคำนวณ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ (**รูปที่ 5.2.1-2**) ดังนี้

- **Lumped model:** แบบจำลองในรูปแบบนี้จะพิจารณาพื้นที่ลุ่มน้ำหรือพื้นที่ศึกษาทั้งหมดมีลักษณะพื้นที่เดียวกัน (a single unit) ดังนั้นหากพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีลักษณะซับซ้อน มีความแตกต่างทางลักษณะกายภาพที่สูงอาจมีข้อจำกัดในการใช้แบบจำลองในรูปแบบนี้

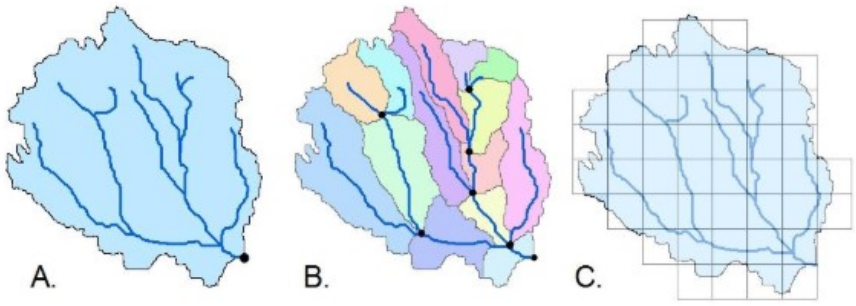
- **Semi-distributed model:** แบบจำลองจะพิจารณาในแต่ละส่วนของพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นลักษณะของ Lumped model ในหลายๆรูปแบบ โดยจะมีการแบ่งกลุ่มตามลักษณะสภาพพื้นที่ของลุ่มน้ำ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของแต่ละลุ่มย่อยที่มีลักษณะสภาพพื้นที่ที่แตกต่างกันจะมีลักษณะที่ต่างกัน

- **Distribution model:** แบบจำลองในรูปแบบ Distributed model จะมีการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำหรือพื้นที่ศึกษาออกเป็นช่องหรือเป็นกริด ซึ่งแต่ละกริดจะมีความแตกต่างกันหรือเหมือนกันขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพพื้นที่ในแต่ละช่อง และความละเอียดของการแบ่งกริดของลุ่มน้ำ แบบจำลองประเภทนี้จะมีความซับซ้อน มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องมากแต่จะให้ความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองอยู่ในระดับสูง



ที่มา: Quang (2016)

รูปที่ 5.2.1-1 การแบ่งประเภทของแบบจำลองอุทกวิทยา (Model Classification)



ที่มา: Sitterson (2018)

รูปที่ 5.2.1-2 ประเภทการแบ่งลักษณะพื้นที่ของแบบจำลอง A) Lumped model, B) Semi-distributed model and C) Distributed model

(3) การพิจารณาผลลัพธ์ของแบบจำลอง: ประเภทของแบบจำลองยังสามารถแบ่งได้จากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง โดยที่หากแบบจำลองมีลักษณะการคำนวณที่แน่นอน ไม่มีการสุ่มหรือการใช้วิธีการสถิติที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้การคำนวณแบบจำลองดังกล่าวจะเรียกว่า Deterministic model คือจะให้ค่าผลลัพธ์เพียง 1 ชุด เมื่อนำเข้าข้อมูล 1 ชุด แต่หากแบบจำลองสามารถให้ผลลัพธ์ข้อมูลได้หลายชุด (มากกว่า 1 ชุด) เมื่อนำเข้าข้อมูล 1 ชุด โดยผลลัพธ์นั้นมาจากกระบวนการคำนวณในรูปแบบสุ่มหรือรูปแบบอื่นๆ แบบจำลองดังกล่าวเรียกว่า Stochastic model

5.2.2 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้แบบจำลอง (Step for model application)

ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางด้านอุทกวิทยาเพื่อประเมินถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

(1) การระบุถึงปัญหาและปัจจัยที่สนใจ

ในการศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจำเป็นต้องมีการระบุถึงปัญหาในพื้นที่ที่ศึกษาหรือสิ่งที่สนใจในการศึกษา เนื่องด้วยลักษณะทางด้านอุทกวิทยามีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และเกี่ยวโยงในเรื่องของการจัดการน้ำในหลายมิติ เช่น ปริมาณน้ำท่าผิวดิน (Surface runoff) ปริมาณน้ำในลำน้ำ (Streamflow) ปริมาณน้ำใต้ดิน (Ground water) ปริมาณตะกอนในลำน้ำ (Sediment) และคุณภาพน้ำ โดยการพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ เช่น ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (Biochemical oxygen demand, BOD) ปริมาณออกซิเจนในลำน้ำ (Dissolve oxygen, DO) เป็นต้น ซึ่งปัญหาที่พบในพื้นที่และปัจจัยทางอุกทวิทยาที่สนใจจะถูกนำไปพิจารณาในขั้นตอนการเลือกแบบจำลองต่อไป

(2) การเลือกใช้แบบจำลองอุทกวิทยา

แบบจำลองอุทกวิทยาจะถูกประยุกต์ใช้ในหลายวัตถุประสงค์ของการศึกษาหรือการประเมินทางด้านทรัพยากรน้ำ เช่น การประเมินเรื่องของการบริหารจัดการน้ำ น้ำท่วม-น้ำแล้ง การคาดการณ์ปริมาณและคุณภาพน้ำจากผลกระทบด้านต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นการเลือกใช้แบบจำลองอุทกวิทยาจึงจำเป็นต้องพิจารณาจากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น ผลลัพธ์ที่ต้องการได้จากการใช้แบบจำลองจากการระบุถึงปัญหาและปัจจัยที่สนใจในหัวข้อที่ผ่านมา ข้อมูลที่จำเป็นต้องนำเข้าสู่แบบจำลอง (Input data) กับข้อมูลที่มีในพื้นที่ศึกษา ทฤษฎีหรือสมการพื้นฐานในแบบจำลอง พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลองที่จำเป็นต้องมีการปรับเทียบ (Model calibration) เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดข้างต้นจะส่งผลถึงความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง ระยะเวลา และความยาก-ง่ายในการปรับเทียบแบบจำลอง โดย Nesru (2023) ได้มีการสรุปลักษณะสำคัญของแบบจำลองอุทกวิทยาแต่ละแบบจำลองที่นิยมใช้ในการศึกษาทางด้านอุทกวิทยาดัง**ตารางที่ 5.2.2-1** จากนั้นจึงต้องมีการตั้งค่าแบบจำลองในเบื้องต้นโดยการนำเข้าข้อมูลทั้งหมดที่แบบจำลองต้องใช้ในการคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองในการคำนวณเบื้องต้นนี้จะยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากแบบจำลองยังไม่ได้ถูกปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อให้เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 5.2.2-1 ตัวอย่างแบบจำลองอุทกวิทยาและรายละเอียดของแบบจำลอง

แบบจำลอง	รายละเอียดของแบบจำลอง
SWAT	- แบบจำลองทางกายภาพสำหรับการศึกษาในระดับลุ่มน้ำ ในรูปแบบของ Semi-Distributed model - สามารถใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของการใช้ที่ดินที่มีต่อปัจจัยทางด้านอุทกวิทยา การพัดพาของตะกอน รวมถึงมลพิษทางน้ำ โดยมีการแบ่งพื้นที่ในลุ่มน้ำออกเป็นหน่วยย่อย HRU (Hydrological Responses Units: HRUs)
MIKE-SHE	- แบบจำลองทางกายภาพในรูปแบบของ Distributed model สามารถจำลองกระบวนการอุกทวิทยาในลุ่มน้ำได้ โดยมีการแบ่งพื้นที่ตามประเภทการใช้ที่ดิน ประเภทของดินและปริมาณฝนในพื้นที่ - สามารถจำลองการใช้น้ำในพื้นที่ รวมถึงระบบชลประทานได้ในหลายรูปแบบ แต่ต้องมีการนำเข้าข้อมูลหลายประเภทในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง
HBV	- แบบจำลองรูปแบบ Semi-distributed model ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยทางอุทกวิทยา - มีการนำเข้าข้อมูลที่น้อย กระบวนการของแบบจำลองไม่ซับซ้อน

แบบจำลอง	รายละเอียดของแบบจำลอง
TOPMODEL	- เป็นแบบจำลองรูปแบบ Semi-distributed model สำหรับการคำนวณระดับน้ำในดิน หรือปริมาณน้ำในดินในแต่ละช่วงเวลา - ประยุกต์ใช้ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ (Gridded Elevation data) เป็นหลักในการคำนวณปริมาณน้ำท่า
APEX	- เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่หรือลุ่มน้ำขนาดเล็ก สามารถคำนวณได้ในพื้นที่ระดับแปลงนา - จำลองผลกระทบของการใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงการจัดการที่ดินในรูปแบบต่างๆ เช่น การใช้ปุ๋ยหรือสารเคมี การอนุรักษ์ดินและน้ำในพื้นที่ ที่ส่งผลกระทบต่อการปนเปื้อนของน้ำ รวมถึงการสูญเสียหน้าดิน
AnnAGNPS	- เป็นแบบจำลองสำหรับการประเมินผลกระทบจากกิจกรรมทางการเกษตรที่มีต่อปริมาณและคุณภาพของน้ำ - แบบจำลองถูกใช้ควบคู่กับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินผลทางด้านอุทกวิทยาในพื้นที่ศึกษา
GSSHA	- เป็นแบบจำลองทางกายภาพ Distributed model ครอบคลุมการจำลองทางด้านอุทกวิทยา คุณภาพน้ำ และการพัดพาของตะกอนโดยมีการพิจารณาพารามิเตอร์ทางด้านชลศาสตร์ร่วมด้วย - ในกระบวนการคำนวณมีการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็นส่วนที่เท่ากัน (Finite-difference grid)
DHVSM	- แบบจำลองทางกายภาพในรูปแบบของ Distributed model จำลองกระบวนการทางอุกวิทยาของลุ่มน้ำโดยการใช้ข้อมูลภูมิประเทศ (Digital Elevation Map: DEM) - สามารถคำนวณปัจจัยทางอุกทกวิทยาได้ในทุกจุดของลุ่มน้ำ
PLM	- เป็นแบบจำลองที่พิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ชีวภาพ และลักษณะทางด้านเศรษฐกิจและสังคม (Socioeconomic) ของลุ่มน้ำร่วมกัน - การคำนวณของแบบจำลองมีรูปแบบเป็นกริดเซลล์
HYPE	- เป็นแบบจำลองทางกายภาพในรูปแบบของ Semi-distributed model โดยมีการแบ่งการคำนวณเป็นลุ่มน้ำย่อย - พิจารณาลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำย่อยหลายปัจจัยร่วมกัน เช่น ธรณีสันฐาน การใช้ประโยชน์ที่ดิน ประเภทของดิน และลักษณะภูมิประเทศ

แบบจำลอง	รายละเอียดของแบบจำลอง
HEC-HMS	- เป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อคำนวณปัจจัยทางอุทวิทยาทั้งในรูปแบบเหตุการณ์ต่อเนื่อง (Continuous-based) และแต่ละเหตุการณ์ (Event-based) - มีการพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับวัฏจักรอุทกวิทยาในหลายปัจจัย
WetSpa	- เป็นแบบจำลองทางกายภาพในรูปแบบของ Distributed model เพื่อประเมินปัจจัยทางด้านอุทกวิทยาในระดับลุ่มน้ำ - คำนวณการไหลของน้ำโดยพิจารณาถึงปัจจัยทางด้านพืช บรรยากาศและลักษณะของดินที่เปลี่ยนแปลงและแตกต่างกัน
VIC	- เป็นแบบจำลองทางกายภาพในรูปแบบของ Semi-distributed model มีการประยุกต์ใช้สมการสมดุลน้ำและสมดุลพลังงานในการคำนวณปัจจัยทางอุทกวิทยา - มีการคำนวณการเกิดน้ำท่าโดยการพิจารณาการซึมของน้ำผ่านดิน และระดับการอิ่มตัวของน้ำในดิน (Hortonian-flow)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Nesru (2023)

(3) การวิเคราะห์ความอ่อนไหว การปรับเทียบ และทวนสอบแบบจำลอง

เมื่อตั้งค่าแบบจำลองเบื้องต้นเสร็จสิ้นจำเป็นต้องมีการปรับเทียบแบบจำลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองที่เหมาะสมกับพื้นที่ โดยในการปรับค่าพารามิเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- **การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง (Sensitivity analysis):** คือการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อผลลัพธ์ของแบบจำลอง ซึ่งหากแบบจำลองที่เลือกใช้มีความซับซ้อนในการคำนวน และมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก ควรมีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองเพื่อให้สามารถระบุถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลลัพธ์ที่ได้ในเบื้องต้น ขั้นตอนนี้จะช่วยให้การปรับค่าแบบจำลองในขั้นตอนถัดไปมีความชัดเจนและสะดวกยิ่งขึ้น

- **การปรับเทียบแบบจำลอง (Model calibration):** คือการประมาณค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองให้มีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงของพื้นที่ศึกษามากที่สุด ขั้นตอนการปรับเทียบแบบจำลองเป็นขั้นตอนที่ต้องดำเนินการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องใน

การคำนวณ โดยในการปรับเทียบแบบจำลองผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองจะถูกตรวจสอบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดจริงในพื้นที่ศึกษา ตัวอย่างเช่น ข้อมูลตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำ ข้อมูลตรวจวัดปริมาณตะกอน หรือค่าของคุณภาพน้ำต่างๆเป็นต้น

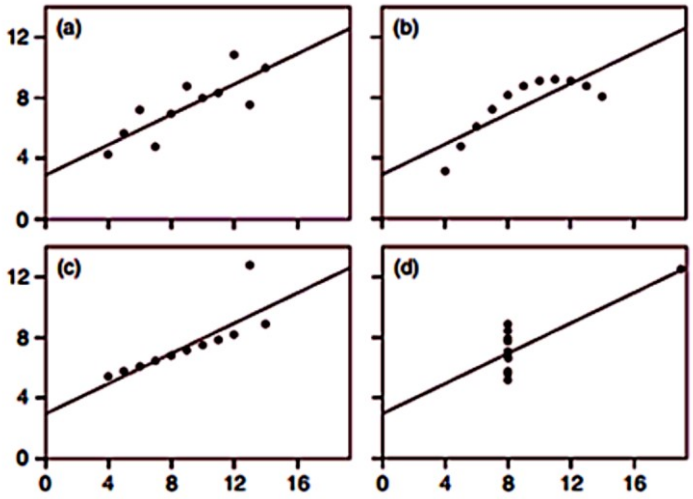
นอกจากนั้นในการปรับเทียบแบบจำลอง ช่วงข้อมูลที่ต้องการนำมาใช้ในการปรับเทียบควรมีการแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เพื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ในช่วงที่ 1 ให้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดมากที่สุด จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากช่วงที่ 1 มาใช้ในแบบจำลองเพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ในช่วงที่ 2 กับค่าที่ตรวจวัด

- **การทวนสอบแบบจำลอง (Model validation):** คือการประเมินผลของพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าในขั้นตอนของการปรับเทียบแบบจำลอง ซึ่งจากการปรับเทียบแบบจำลองของข้อมูลในช่วงที่ 1 ผลของพารามิเตอร์ที่ได้จะถูกนำมาใช้ในช่วงที่ 2 และประเมินค่าความถูกต้องและแม่นยำกับค่าที่ตรวจวัดทางวิธีการทางสถิติ (รายละเอียดในหัวข้อถัดไป) การดำเนินงานดังกล่าวเป็นการป้องกันการเกิดค่าอคติ (Bias) ในการแบ่งช่วงของข้อมูลเพื่อให้พารามิเตอร์ที่ได้จากช่วงการปรับเทียบเป็นคนละช่วงกับในช่วงของการทวนสอบ

(4) การประเมินผลของแบบจำลอง

จากขั้นตอนการปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลองจะต้องมีการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งวิธีการประเมินผลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ การใช้วิธีการคำนวณทางสถิติ (Model evaluation statistics) และการแสดงผลในรูปแบบของกราฟ (Graphical techniques) โดย Moriasi et al. (2007) ได้แบ่งวิธีการคำนวณออกเป็น 3 กลุ่ม และมีตัวอย่างวิธีการทางสถิติ ดังนี้

-**Standard regression**: เป็นการประเมินผลลัพธ์โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด และผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองในรูปแบบของสมการถดถอย โดยมีค่าทางสถิติที่ควรพิจารณาได้แก่ Pearson's correlation coefficient (r) และ Coefficient of determination (r^2) (รายละเอียดดังหัวข้อที่ 4.3) ค่า r และ r^2 ได้รับความนิยมอย่างมากในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ค่าสถิติทั้ง 2 ตัวข้างต้นมีความอ่อนไหวกับข้อมูลที่เป็นค่าสุดโต่ง (Extreme value) และไม่สามารถประเมินได้ถึงสัดส่วนความแตกต่างระหว่างข้อมูลตรวจวัดและผลลัพธ์จากแบบจำลอง **รูปที่ 5.2.2-1** แสดงข้อมูลที่มีค่าสมการความสัมพันธ์และค่า r ที่เป็นค่าเดียวกันแสดงให้เห็นถึงความอ่อนไหวของการใช้ค่าทางสถิติ



ที่มา: Wilks (1995)

รูปที่ 5.2.2-1 ลักษณะความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีสมการและค่า r ที่เป็นค่าเดียวกัน

-**Dimensionless:** การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยวิธีนี้มีวิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่ Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) ซึ่งแสดงค่าสัดส่วนระหว่างค่าความแปรปรวนของข้อมูลความแตกต่างของข้อมูลตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลอง เปรียบเทียบกับความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด ค่า NSE จะสามารถบอกได้ถึงข้อมูลทั้ง 2 ชุดข้อมูลดังกล่าวมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือน้อย โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง -∞ ถึง 1 โดยที่หากค่าเข้าใกล้ 1 แสดงถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ดี สามารถให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้ ในขณะที่หากค่าต่ำกว่า 0 หมายถึงค่าเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าที่ดีกว่าและควรนำมาใช้ในการพิจารณามากกว่าการใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ใช้งานยังคงต้องมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองให้ใช้งานได้

-**Error index:** การใช้วิธีการ Error index เป็นการบอกถึงค่าของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด โดยวิธีการที่สามารถใช้เพื่อตรวจสอบค่าความผิดผลาดที่เกิดขึ้นมีหลายวิธี ตัวอย่างเช่น Mean square error (MSE), Root mean square error (RMSE) และ Mean absolute error (MAE) เป็นต้น (สมการที่ 5.2.2-1 ถึง 5.2.2-3) การประเมินโดยการใช้วิธีการดังกล่าวสามารถประเมินผลความคลาดเคลื่อนได้อย่างชัดเจน เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จะบอกหน่วยการตรวจวัดของข้อมูลที่สนใจ ซึ่งหากผลที่ได้มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าเท่ากับที่ได้จากการตรวจวัด แสดงว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพที่ดี ในขณะที่หากค่าที่ได้มี

ค่ายิ่งมากกว่า 0 แสดงให้เห็นว่ามีค่าความผิดพลาดที่เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ Obs_i และ Sim_i คือค่าตรวจวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณของชุดข้อมูลที่ i โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n โดยที่ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

$$MSE = \frac{1}{n}\sum(y_i^{sim} - y_i^{obs})^2 \quad [5.2.2\text{-}1]$$

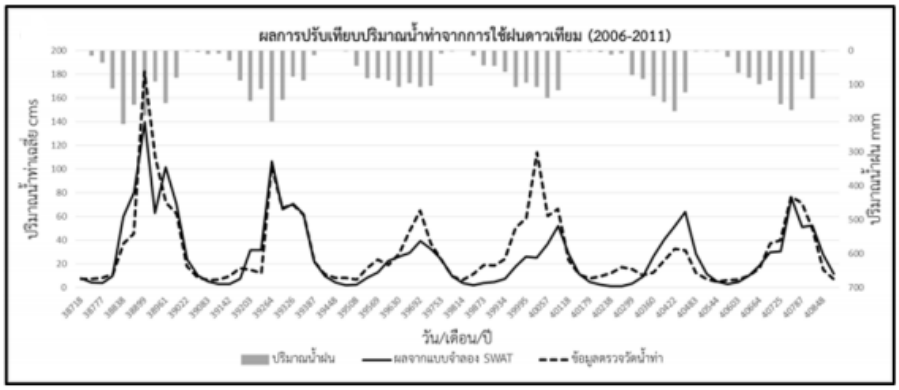
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(y_i^{sim} - y_i^{obs})^2} \quad [5.2.2\text{-}2]$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum|\sum(y_i^{sim} - y_i^{obs}| \quad [5.2.2\text{-}3]$$

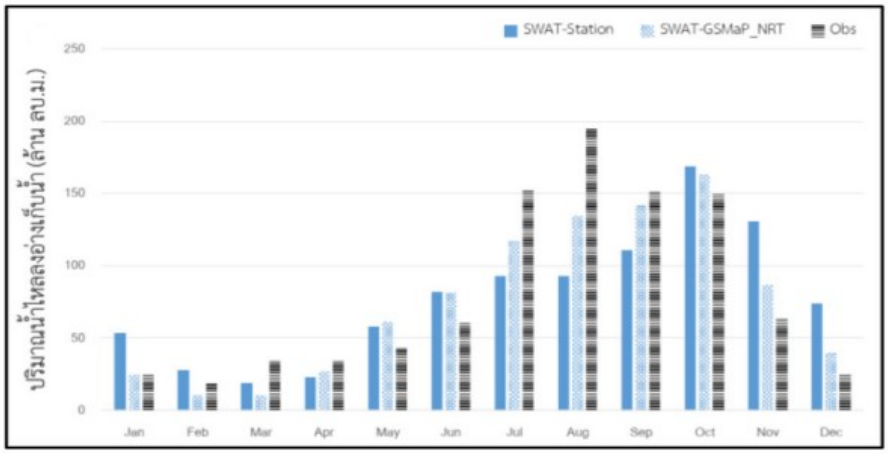
นอกจากวิธีการดังกล่าวข้างต้นแล้ว Percent bias (PBIAS) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดย PBIAS จะทำการประเมินผลลัพธ์ของแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งจะสามารถบอกได้ถึงผลลัพธ์ของแบบจำลองว่ามีค่าที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด โดยหากค่า PBIAS มีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าผลจากแบบจำลองมีค่าที่ต่ำกว่าที่ได้จากการตรวจวัด (Underestimation) และหากค่าน้อยกว่า 0 จะเป็นในทิศทางตรงข้าม (Over estimation) ซึ่งค่าที่แสดงว่าแบบจำลองให้ผลที่ดีมีค่าใกล้เคียงกับค่าตรวจวัด PBIAS จะมีค่าเท่ากับหรือเข้าใกล้ 0

-**Graphical techniques:** วิธีการของ Graphical techniques เป็นการแสดงผลในเชิงรูปภาพเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองกับค่าตรวจวัด ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นนอกเหนือจากการใช้วิธีการทางสถิติ ตัวอย่างเช่นจาก**รูปที่ 5.2.2-1** ข้างต้นหากไม่มีการแสดงผลในเชิงรูปภาพแสดงค่าความสัมพันธ์ของข้อมูล อาจส่งผลให้เกิดการประเมินผลของแบบจำลองผิดพลาดเนื่องด้วยในทุกรูปดังกล่าวข้างต้นมีค่าความสัมพันธ์ (r) ที่เท่ากัน วิธีการแสดงผลในเชิงรูปภาพสามารถแสดงได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่นการแสดงผลในรูปแบบของอนุกรมเวลา (Time series) และการใช้ Boxplot เป็นต้น **รูปที่ 5.2.2-2** แสดงตัวอย่างการนำเสนอรูปภาพ (a) และ (b) คือการนำเสนอในรูปแบบของอนุกรมเวลาในรูปแบบของข้อมูลรายปี และรายเดือนตามลำดับ โดยการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองอุทกวิทยาและข้อมูลตรวจวัด ในขณะที่ (c) คือการนำเสนอในรูปแบบ Boxplot เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลตรวจวัดและผลลัพธ์จากแบบจำลองทางสถิติ

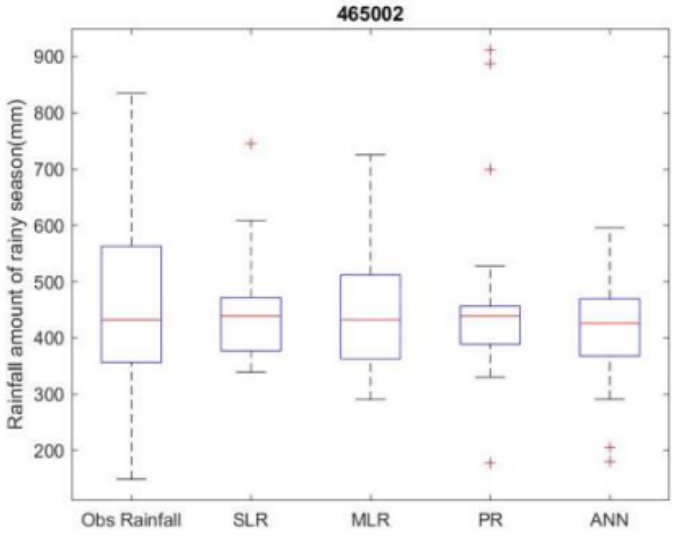
(a)



(b)



(c)



ที่มา: (a), (b) เกศวรา และคณะ (2565) และ (c) Sittichok et al. (2024)

รูปที่ 5.2.2-2 การแสดงผลเชิงรูปเพื่อประเมินความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและข้อมูลตรวจวัด

(5) การนำผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลกมาใช้ในแบบจำลองอุทกวิทยา

เมื่อทำการตั้งค่า ปรับเทียบ และทวนสอบแบบจำลอง รวมถึงการประเมินผลแบบจำลองเสร็จสิ้น และพบว่าแบบจำลองสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในพื้นที่ศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขั้นตอนต่อมาจะเป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM มาใช้ในแบบจำลองอุทกวิทยาเพื่อประเมินถึงปัจจัยทางอุทกวิทยาที่สนใจ ซึ่งจากรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อ 3.7 แสดงรายละเอียดถึงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก โดยมีตัวอย่างผลลัพธ์ที่เกี่ยวเนื่องกับปัจจัยทางด้านอุทกวิทยาและทรัพยากรน้ำแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.7-1 ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาผ่านกระบวนการลดมาตราส่วนและการลดค่าอคติ (รายละเอียดดังบทที่ 4) จากนั้นจะถูกนำเข้าสู่แบบจำลองที่ผ่านการประเมินแล้วว่ามีความน่าเชื่อถือและถูกต้องในรูปแบบของข้อมูลนำเข้า (Input data) เพื่อประเมินถึงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากอิทธิพลของข้อมูลที่นำเข้าตามสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (รายละเอียดดังบทที่ 3) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานแบบจำลองเพื่อประเมินผลภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแสดงดังหัวข้อที่ 5.4

5.3 ความไม่แน่นอนของแบบจำลองอุทกวิทยา

แบบจำลองอุทกวิทยาที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมีความซับซ้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งจากกระบวนการการคำนวณที่ซับซ้อนประกอบกับการใช้ข้อมูลในการคำนวณที่มีความหลากหลาย ส่งผลให้ผลลัพธ์ของแบบจำลองมีความไม่แน่นอน (Uncertainty) เกิดขึ้น ซึ่งการวิเคราะห์ถึงความไม่แน่นอนของแบบจำลองสามารถระบุได้ถึงข้อจำกัดของแบบจำลองที่เลือกใช้และแนวทางการพัฒนาเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว รวมถึงสามารถช่วยให้ทราบแนวทางการจัดเก็บข้อมูลและการนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ได้อย่างเหมาะสมสำหรับสถานการณ์ปัจจุบัน และการคาดการณ์ในอนาคต ซึ่งความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสามารถเกิดขึ้นได้จากปัจจัยต่างๆดังนี้

(1) พารามิเตอร์ในแบบจำลอง (Parameter uncertainty)

แบบจำลองอุทกวิทยาแต่ละแบบจำลองมีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีและวิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน ซึ่งการคำนวณดังกล่าวมีพารามิเตอร์ที่ต้องมีการปรับค่าให้เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่ (Effective parameters) เพื่อความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองอาจเกิดขึ้นได้จากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมส่งผลให้เกิดการคำนวณที่ไม่ถูกต้อง ขั้นตอนการประเมินค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับพื้นที่จะอยู่ในขั้นตอนของการปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลอง ตัวอย่างแบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) รวมถึงพารามิเตอร์แสดงดังบทที่ 6

(2) โครงสร้างของแบบจำลอง (Model structural uncertainty)

การจำลองระบบอุทกวิทยาของแบบจำลองอุทกวิทยาแต่ละแบบจำลองให้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดนั้นเป็นไปได้ยากเนื่องด้วยข้อจำกัดด้านต่างๆ เช่น องค์ความรู้และปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวเนื่องกับอุทกวิทยา รวมถึงกระบวนการและทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละส่วนของอุทกวิทยา เป็นต้น ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ของแต่ละแบบจำลองมีค่าที่แตกต่างกัน เกิดความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่ได้ ซึ่ง Moges et al. (2020) ได้ระบุว่าโครงสร้าง กระบวนการคำนวณ รวมถึงทฤษฎีที่ใช้ในแบบจำลองเป็นสาเหตุหลักของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นต่อผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง

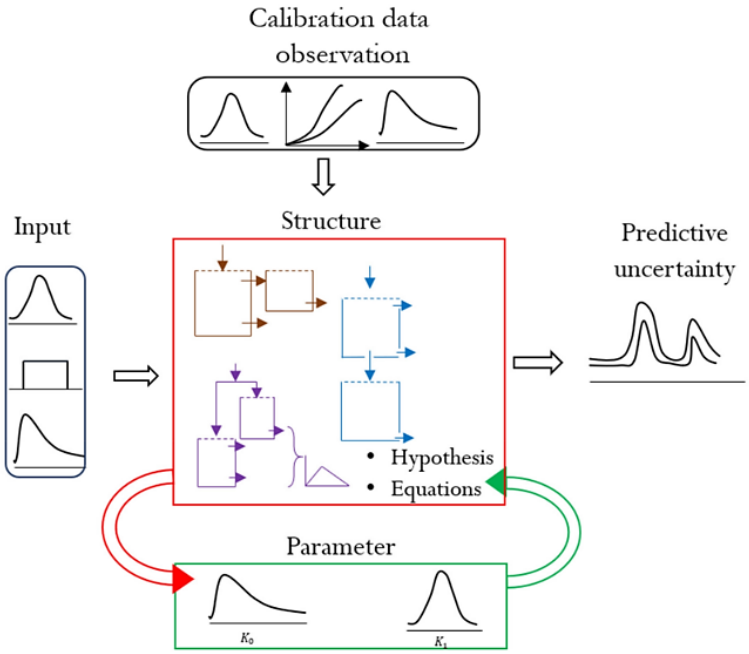
(3) ข้อมูลนำเข้า (Input data)

ข้อมูลที่นำเข้าสู่แบบจำลองเพื่อใช้ในการคำนวณประกอบไปด้วยหลายประเภทข้อมูล ตัวอย่างเช่น ข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยา คุณสมบัติของดิน ลักษณะความสูง-ต่ำของพื้นที่ และการใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น ซึ่งความสมบูรณ์และถูกต้องของข้อมูลดังกล่าวส่งผลต่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง และส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง โดย McMillan et al. (2018) อ้างอิงใน Moges et al. (2020) ระบุว่า ข้อมูลที่ขาดความสมบูรณ์ส่งผลต่อผลลัพธ์ของแบบจำลองประมาณ 10-40%

(4) ข้อมูลตรวจวัด (Observed data)

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดมีความจำเป็นที่ต้องใช้ในกระบวนการปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลองในการปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ข้อมูลตรวจวัดที่ใช้ในการปรับเทียบแบบจำลองส่วนใหญ่ ได้แก่ อัตราการไหล ระดับน้ำในลำน้ำ และระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น เนื่องด้วยข้อมูลดังกล่าวถูกใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นที่จะต้องนำใช้ในการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของแบบจำลอง หากข้อมูลตรวจวัดมีความไม่สมบูรณ์หรือมีข้อผิดพลาดจะส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนการปรับเทียบ และยังส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองอีกด้วย

ปัจจัยต่างๆข้างต้นส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง (Predictive uncertainty) ซึ่งความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการในการจัดการเพื่อลดความไม่แน่นอนจากปัจจัยข้างต้นทั้งหมดให้ลดน้อยที่สุด เพื่อให้สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองไปใช้ในการจัดการทางด้านทรัพยากรน้ำได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ **รูปที่ 5.3-1** แสดงปัจจัยที่เกี่ยวเนื่องกับความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง



ที่มา: Moges et al. (2020)

รูปที่ 5.3-1 ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง

5.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยาในการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ระดับลุ่มน้ำ

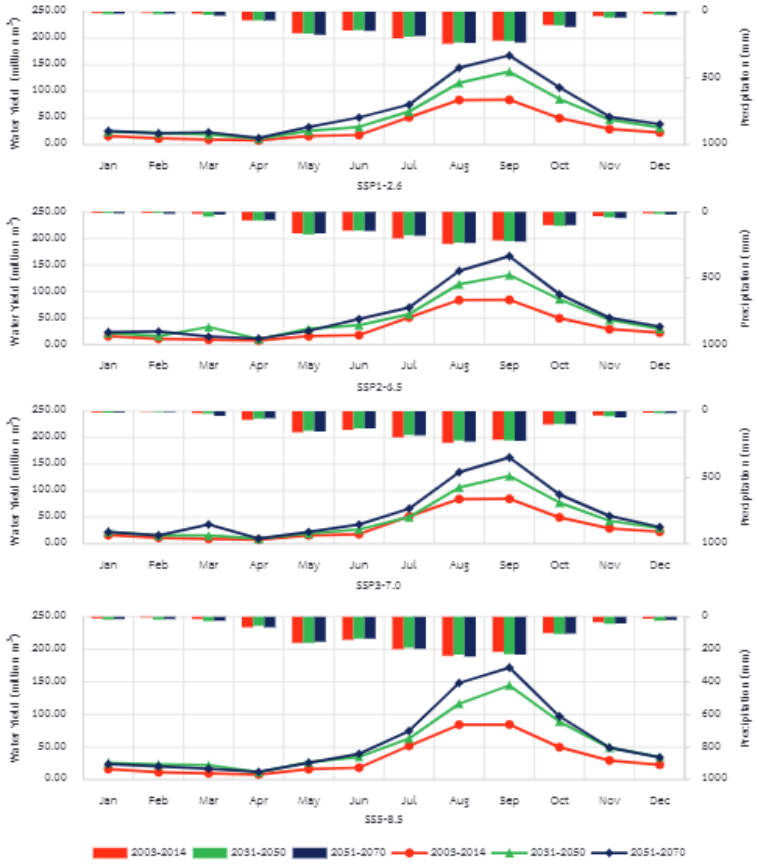
สำหรับการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำ การศึกษาผลกระทบในระดับลุ่มน้ำเป็นการศึกษาที่มีความสำคัญต่อการจัดการทรัพยากรน้ำเป็นอย่างมาก เนื่องด้วยพื้นที่ในระดับลุ่มน้ำเป็นลักษณะพื้นฐานของกระบวนการทางอุทกวิทยาทั้งปริมาณฝนที่เกิดขึ้น การไหลบ่าของน้ำทั้งผิวดิน การไหลของน้ำใต้ดิน และการสูญเสียน้ำในรูปแบบต่างๆ รวมถึงเกี่ยวเนื่องกับปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่ที่ต้องมีการวางแผนและการบริหารจัดการที่เหมาะสมเพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น

แบบจำลองอุทกวิทยาในปัจจุบันมีหลากหลายแบบจำลองที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับทรัพยากรน้ำได้ หนึ่งในแบบจำลองที่ได้ถูกประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางได้แก่แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในการศึกษาพื้นที่ในระดับลุ่มน้ำ รายละเอียดทฤษฎีของแบบจำลอง SWAT รวมถึงวิธีการใช้งาน การตั้งค่าแบบจำลอง การปรับเทียบและสอบเทียบแบบจำลองแสดงดังบทที่ 6 และภาคผนวก ง

ปัจจัยทางด้านอุทกวิทยาในพื้นที่ลุ่มน้ำหลายพื้นที่ของประเทศไทยได้ถูกประเมินโดยกระบวนการศึกษาด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการประยุกต์ใช้ผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ตามกระบวนการที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อ 5.1 และการประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองอุทกวิทยา ตัวอย่างเช่น จากการศึกษาของ Namracha et al. (2568) ได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่งัด จังหวัดเชียงใหม่ โดยได้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อศึกษาปริมาณน้ำท่าร่วมกับผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM 10 แบบจำลอง ของสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก 4 สถานการณ์ ได้แก่ SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 โดยในกระบวนการศึกษาได้มีการเลือกใช้ปัจจัยอุณหภูมิ และปริมาณฝนจากแบบจำลองที่ได้มีการลดมาตราส่วนทางพลวัตรแล้วจาก NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6) และได้มีการปรับแก้ค่าอคติของข้อมูลโดยวิธี Linear scaling method ผลจากจากการศึกษาพบว่าลุ่มน้ำแม่งัดมีปริมาณน้ำท่าในอนาคตภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพิ่มขึ้นในทุกสถานการณ์ โดยภายใต้สถานการณ์ SSP1-2.6 และ SSP2-4.5 มีลักษณะการกระจายตัวของการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำท่าอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่ SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 มีลักษณะการเพิ่มขึ้นที่แปรปรวนสูงโดยปริมาณน้ำท่าจะเพิ่มขึ้นในฤดูฝนและลดต่ำลงในฤดูแล้งส่งผลให้เกิดความเสี่ยงทั้งน้ำท่วมและภัยแล้งในพื้นที่ **รูปที่ 5.4-1** แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่ารายเดือนภายใต้สถานการณ์แต่ละสถานการณ์ในอนาคต

การศึกษาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศยังได้ถูกศึกษาร่วมกับการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT ในการศึกษาของ Khadka et al. (2023) เพื่อประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าผิวดิน อัตราการคายระเหย และปริมาณน้ำทั้งหมด (Water yield) ในพื้นที่ลุ่มน้ำมูลของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย กระบวนการที่ใช้ในการศึกษามีการดำเนินงานตามที่แสดงในหัวข้อ 5.1 โดยมีนำผลลัพธ์ของสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SSP5-8.5 จากแบบจำลอง GCM จำนวนทั้งสิ้น 8 แบบจำลอง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองได้ถูกนำมาปรับค่าอคติโดยวิธีการ Quantile mapping ก่อนนำเข้าสู่แบบจำลอง SWAT ผลการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำท่าผิวดินมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น 33% จากปริมาณฝนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่หากมีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่โดยการเปลี่ยนเป็นพื้นที่เมืองเพิ่มขึ้นด้วยปริมาณน้ำท่าอาจเพิ่มสูงขึ้นถึง 38-87% ดังนั้นจึงควรมีการพิจารณามาตรการการปรับตัวที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันปริมาณน้ำท่าที่อาจเพิ่มขึ้นในอนาคต เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hormwichian et al. (2023) ที่ได้ทำการประเมินการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศร่วมกับการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีผลกระทบต่อน้ำท่าภายใต้สถานการณ์ SSP2-4.5 และ SSP5-8.5 จากแบบจำลอง GCM 3 แบบจำลองในพื้นที่ลุ่มน้ำชีตอนบน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยการประยุกต์แบบจำลอง CMhyd และเลือกใช้วิธีการ Linear scaling เพื่อการปรับค่าอคติ และใช้แบบจำลอง

SWAT ในการประเมินปริมาณน้ำท่า ผลการศึกษาพบว่าในอนาคตปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สถานการณ์ SSP5-8.5 **รูปที่ 5.4-2** แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่ารายปีภายใต้สถานการณ์ SSP2-4.5 และ SSP5-8.5

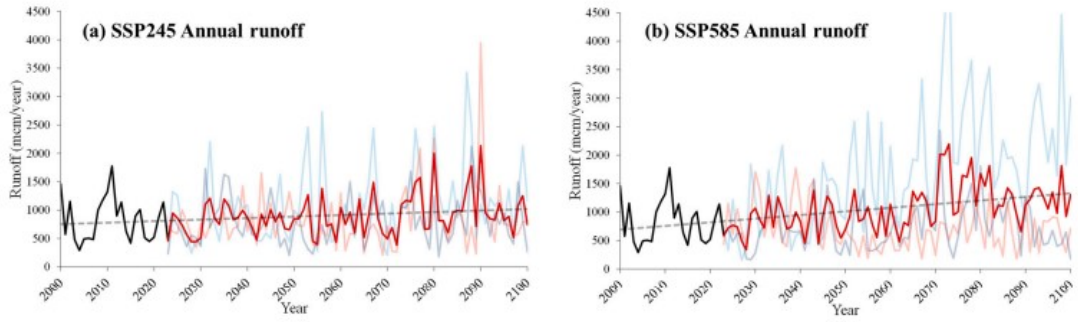


ที่มา: Namracha et al. (2568)

รูปที่ 5.4-1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่งัดภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 4 สถานการณ์

นอกจากเรื่องผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อปริมาณน้ำท่าแล้ว ปริมาณน้ำใต้ดินก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ได้รับผลกระทบเช่นกัน Pinsri et al. (2022) ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยา SWAT ร่วมกับแบบจำลอง MODFLOW ในการศึกษาเรื่องน้ำใต้ดิน ภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก 2 สถานการณ์ได้แก่ SSP2-4.5 และ SSP5-8.5 จากแบบจำลอง GCM จำนวน 5 แบบจำลอง ในพื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษจังหวัดตากของประเทศไทย (Tak Special Economic zone) ข้อมูลปริมาณฝนและอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง GCM ได้ถูกนำมาปรับค่าอคติโดยวิธีการ Linear scaling โดยผลจากการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำที่ถูกเติมสู่ใต้ดิน (groundwater recharge) รวมถึงปริมาณน้ำใต้ดิน (groundwater storage) มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคตใน

บางส่วนของพื้นที่ศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบัน ในขณะที่ในบางพื้นที่โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการทำเกษตรกรรมพบว่าปริมาณน้ำที่ถูกเติมสู่ใต้ดินจะมีปริมาณลดลงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำการเกษตรในพื้นที่



ที่มา: Hormwichian et al. (2023)

รูปที่ 5.4-2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำชีตอนบน ภายใต้สถานการณ์ SSP2-4.5 และ SSP5-8.5

จากผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยาร่วมกับข้อมูลผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่แตกต่างกัน พบว่า การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีอิทธิพลโดยตรงต่อกระบวนการทางอุทกวิทยาภายในลุ่มน้ำ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณฝนส่งผลให้ปริมาณน้ำท่าหรือการไหลของน้ำในแม่น้ำมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่แตกต่างกัน บางพื้นที่อาจมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากฝนที่ตกหนักบ่อยครั้งมากขึ้น ขณะที่บางพื้นที่อาจมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากช่วงแล้งยาวนานขึ้นและอัตราการระเหยที่สูงขึ้น นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวยังส่งผลต่อการซึมผ่านของน้ำลงสู่ชั้นใต้ดินและปริมาณน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำคัญในการอุปโภคบริโภคและเกษตรกรรม โดยลักษณะและระดับของการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ ภูมิอากาศในท้องถิ่น และสมมติฐานของแบบจำลอง GCM ที่ใช้ในการศึกษา

ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าในอนาคตบางพื้นที่ของประเทศไทยอาจเผชิญความเสี่ยงจากอุทกภัยที่รุนแรงมากขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำฝนและการไหลบ่าผิวดินที่เพิ่มขึ้น ขณะที่อีกหลายพื้นที่อาจมีความเสี่ยงต่อ ภัยแล้งและการขาดแคลนน้ำ จากการลดลงของน้ำต้นทุนและการซึมเติมของน้ำใต้ดินดังนั้น เพื่อรองรับความไม่แน่นอนและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น ควรมีการศึกษาและประเมินความเปราะบาง (Vulnerability) และความเสี่ยง (Risk) ของพื้นที่ต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างเป็นระบบ รวมทั้งกำหนดมาตรการการปรับตัว (Adaptation measures) ที่เหมาะสมต่อบริบทของแต่ละลุ่มน้ำ ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับแนวทางการประเมินความเปราะบางและการปรับตัวจะอธิบายไว้ใน บทที่ 7 และบทที่ 8 ตามลำดับ

สรุปบทที่ 5
กรอบการประเมินผลกระทบ
การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ

- การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีผลต่อทรัพยากรน้ำในระดับท้องถิ่นประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักที่สำคัญ ได้แก่ การคัดเลือกสถานการณ์ที่สนใจเพื่อประเมินถึงผลกระทบที่มีต่อปัจจัยทางด้านอุทกวิทยา การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางด้านอุทกวิทยา และการเชื่อมโยงสาเหตุ – ผลกระทบที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสภาพภูมิอากาศและระบบทางด้านอุทกวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไป

- ขั้นตอนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีผลต่อทรัพยากรน้ำในระดับท้องถิ่นเริ่มจากการคัดเลือกสถานการณ์การการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การคัดเลือกแบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCM) การลดมาตราส่วนผลลัพธ์แบบจำลอง GCMs แบบพลวัตร และการลดมาตราส่วนทางสถิติ และการประยุกต์แบบจำลองอุทกวิทยา

- การคัดเลือกสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการศึกษา ซึ่งแต่ละการศึกษาจะมีการคัดเลือกสถานการณ์ที่แตกต่างกันออกไปทั้งในรูปแบบของ CMIP5 และ CMIP6 โดยในการศึกษาโดยส่วนใหญ่จะเป็นการเปรียบเทียบแต่ละสถานการณ์เช่นการเปรียบเทียบระหว่าง SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 และ SSP5-8.5 รวมถึงการเปรียบเทียบระหว่าง SSP5-8.5 และ RCP8.5 หรือ SSP2-4.5 และ RCP 4.5

- การเลือกแบบจำลอง GCM ที่จะนำมาใช้ขึ้นอยู่กับแต่ละการศึกษาซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีการใช้ผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ตั้งแต่ 3 แบบจำลองจนถึงมากกว่า 10 แบบจำลอง รวมถึงการใช้ผลลัพธ์ของทุกแบบจำลองร่วมกัน (Ensembles) ซึ่งการเลือกใช้แบบจำลอง GCM จะมีการพิจารณาหลากหลายรูปแบบ เช่น แบบจำลองที่มีการศึกษามาแล้วพบว่าเหมาะสมกับพื้นที่ศึกษา การทดลองใช้แบบจำลองที่สามารถเข้าถึงข้อมูลของแบบจำลองได้ การพิจารณาถึงสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่แบบจำลองคำนวณ เป็นต้น

- การลดมาตราส่วนผลลัพธ์จากแบบจำลองในแต่ละการศึกษาจะมีการใช้วิธีการที่แตกต่างกันออกไป ทั้งในรูปแบบของพลวัตร (Regional Climate Models: RCMs) และการลดมาตราส่วนทางสถิติ ซึ่งมีการใช้ทั้งวิธีเดียวหรือหลายวิธีร่วมกัน และในการลดมาตราส่วนจะต้องมีการประเมินความถูกต้องของผลลัพธ์ในทุกครั้งที่ทำการศึกษา

- การประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยาจำเป็นต้องมีการพิจารณาเลือกแบบจำลองที่มีความสอดคล้องของผลลัพธ์ที่แบบจำลองสามารถคำนวณได้กับวัตถุประสงค์ของแบบจำลอง รวมถึงการพิจารณาถึงข้อมูลนำเข้าที่แบบจำลองอุทกวิทยาที่เลือกจำเป็นต้องใช้ในการคำนวณ เนื่องด้วยข้อมูลที่นำเข้าแบบจำลองอุทกวิทยาต้องมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลอง GCM

- ขั้นตอนการประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยาประกอบไปด้วย การคัดเลือกแบบจำลองซึ่งต้องให้มีความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาและพื้นที่ศึกษา การนำเข้าข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองอุทกวิทยา การปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลอง การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองอุทกวิทยา และการนำเข้าผลลัพธ์จากแบบจำลอง GCM ที่ผ่านการลดมาตราส่วนเรียบร้อยแล้วเข้าสู่แบบจำลองอุทกวิทยา เพื่อประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหลายรูปแบบ

คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม

1. จงอธิบายขั้นตอนการประยุกต์ใช้ข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อประเมินถึงสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงทรัพยากรน้ำจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่างๆ

2. จงอธิบายความแตกต่างของแบบจำลองอุทกวิทยา และค้นคว้าคัดเลือกแบบจำลองอุทกวิทยา 1 แบบจำลองพร้อมทั้งระบุประเภทของแบบจำลอง ข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง พารามิเตอร์ที่ต้องทำการปรับแก้ และผลลัพธ์ที่ได้สุดท้ายของแบบจำลองที่ทำการคำนวณ

3. จงอธิบายถึงความแตกต่างของความหมายและกระบวนการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง การปรับเทียบ และการทวนสอบแบบจำลอง

4. จงยกตัวอย่างและอธิบายถึงวิธีการทางสถิติที่มีการใช้อย่างกว้างขวางในการประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองอย่างน้อย 3 วิธี พร้อมทั้งระบุถึงความแตกต่าง ข้อดี และข้อจำกัดของวิธีการดังกล่าว

5. จงอธิบายถึงความหมายและประเภทของความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของแบบจำลองอุทกวิทยา พร้อมทั้งคัดเลือกการศึกษาที่มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยา และอธิบายถึงความเป็นไปได้ของความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการศึกษานั้น

เอกสารอ้างอิง

เกศวรา สิทธิโชค, จุติเทพ วงษ์เพ็ชร, แพรววดี หงษาวง และธีรศักดิ์ ซ้ายอ่อน. 2565. การศึกษาความแตกต่างของปริมาณน้ำท่าและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT จากการใช้ข้อมูลฝนตรวจวัดและข้อมูลฝนภาพถ่ายดาวเทียม. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ., 45(1),107-123.

เทพไทย ไชยทอง และกุลปราโมช ประทุมชัย. 2568. การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณฝนสูงสุดรายวันในอนาคตสำหรับภาคใต้ของประเทศไทยภายใต้แบบจำลองภูมิอากาศโลก CMIP6. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 35(2), 1-18.

วินัย เชาว์วิวัฒน์, กนกศรี ศรินนภากร และสมพินิจ เหมืองทอง. 2564. การประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อค่าดัชนีฝนสุดขั้นของประเทศทยด้วยค่าความเป็นไปได้. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26.

อิศเรศ กะการดี และเอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย. 2566. ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกต่อสมดุลน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำลำเสียวโดยใช้แบบจำลอง SWAT+. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 29(2), 14-24.

Ali, M.H., Biswas, P., Hassan, S.M.Q. and Islam, M.A. 2025. Climate change and its impacts on hydrological regimes over the Bengal delta. Results in Engineering, 25, 103861.

Devi G.K., Ganasri, B.P. and Dwarakish, G.S. 2015. A review of hydrological models. Aquatic Procedia, 1001-1007.

Hakala, K., Addor, N., Teutschbein, C., Vis, M., Dakhlaoui, H. and Seibert, J. 2020. Hydrological modeling of climate change impacts. Encyclopedia of Water: Science, Technology and Society. DOI: 10.1002/978119300762.wsts0062.

Hamed, M.M., Nashwan, M.S. and Shiru, M.S. 2022. Comparison between CMIP5 and CMIP6 models over MENA region using historical simulations and future projections. Sustainability,14, 10375.

Hormwichian, R., Kaewplang, S., Kangrang, A., Supakosol, J., Boonrawd, K., Sriworamat, K., Muangthong, S., Songsaengrit, S. and Prasanchum, H. 2023. Understanding the interactions of climate and land use changes with runoff components in spatial-temporal dimensions in the Upper Chi Basin, Thailand. Water, 15, 3345, https://doi.org/10.3390/ w15193345

Humphries,U.W., Waqas, M., Hlaing, P.T., Dechpichai, P., Wangwongchai, A. 2024. Assessment of CMIP6 GCMs for selecting a suitable climate model for precipitation projections in Southern Thailand. Results in Engineering, 23, 102417.

Khadka, D., Babel, M.S. and Kamalamma, A.G. 2023. Assessing the impact of climate and land-use Changes on the hydrological cycle using the SWAT model in the Mun River Basin in Thailand. Water, 15, 3672, https://doi.org/10.3390/w15203672

Knutti, R., Masson, D., and Gettelman, A. 2013. Climate model genealogy: Geenration CMIP5 and how we get there. Geophysical Research Letter 40: 1194–1199. doi:10.1002/grl.50256.

Ma, D., Bai, Z., Xu, Y.P., Gu, H. and Gao, C. 2024. Assessing streamflow and sediment responses to future climate change over the Upper Mekong River Basin: A comparison between CMIP5 and CMIP6 models. Journal of Hydrology: Regional Studies, 52, 101685.

Maraun, D. and Widmann, M. 2018. Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research. Cambridge: Cambridge University Press.

McMillan, H.; Westerberg, I.K.; Krueger, T. 2018. Hydrological data uncertainty and its implications. Wiley Interdiscip. Rev. Water, 5, 1319.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50(3), 885-900.

Moges, E., Demissie, Y., Larsen, L. and Yassin, F. 2020. Review: sources of hydrological model uncertainties and advances in their analysis. Water, 13(28), 1-23.

Namracha, P., Plangoen, P., Supriyasilp, T. and Sinsabvarodom, C. 2025. Assessment of climate change impact on the streamflow in Mae Ngat Basin, Chiangmai. Science and Engineering Connect, 48(3), 194-223.

Nesru, M. 2023. A review of model selection for hydrological studies. Arabian Journal of Geosciences, 16, 102.

Onarun, T, Thepprasit, C. and Sittichok, K. 2023. Development of statistical downscaling methods for the assessment of rainfall characteristics under climate change scenarios. Journal of Water and Climate Change, 14(9), 2970.

Pinsri, P., Shrestha, S., KC., S., Mohanasundaram, S., Virdis, S.G.P., Lai Nguyen, T.P. and Chaowiwat, W. 2022. Assessing the future climate change, land use change and abstraction impacts on groundwater resources in the Tak Special Economic Zone, Thailand. Environmental Research, 211, 113026.

Quang, N.H. 2016. Modelling Soil Erosion, Flash Flood Prediction and Evapotranspiration in Northern Vietnam. Dissertation within the doctoral program of Geoscience/Geography of the Georg-August University School of Science (GAUSS).

Sittichok, K., Rattanapan, N. and Sakulkaew, R. 2024. Long-term seasonal rainfall forecasting using regression analysis and artificial neural network with large – scale Circulation indices. ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports, 27(3), e253507.

Sittichok, K. and Thepprasit, C. 2022. The differences of precipitation characteristics among GCMs over Southeast Asis under AR6 climate change scenarios. ASEAN J. Sci. Tech. Report, 25(1), 11-23.

Sittichok, K. 2022. Future rainfall characteristics under AR6 climate change scenarios, case study of Pasak River Basin, Thailand, Engineering for Rural Development, Jelgava.

Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R. Wolfe, K. and Avant, B. 2018. An overview of rainfall-runoff model types. 9th International Congress on Environmental Modelling and Software, Collins, Colorado, USA.

Verma, S., Kumar, K., Verma, M.K., Prased, A.D., Mehta, D. and Rathnayake, U. 2023. Comparative analysis of CMIP5 and CMIP6 in conjunction with the hydrological processes of reservoir catchment, Chhattisgarh, India. Journal of Hydrology: Regional Studies, 50, 101533.

Wilks, D.S. 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: an Introduction, first edition, Academic press. California: A Division of Harcourt Brace & Company.

บทที่ 6 – แบบจำลองอุทกวิทยา: Soil and Water Assessment Tool

Chapter 6 – Hydrological Modeling: Soil and Water Assessment Tool

บทที่ 6

Hydrological modeling: Soil and Water Assessment Tool	แบบจำลองอุทกวิทยา: Soil and Water Assessment Tool

แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) เป็นแบบจำลองทางด้านอุทก-วิทยาพัฒนาโดยหน่วยงาน Agriculture Research Service (ARS) ภายใต้หน่วยงานหลักของ United States Department of Agriculture (USDA) แบบจำลอง SWAT พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการพัฒนาและการจัดการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่หนึ่งๆที่จะมีผลต่อแหล่งน้ำ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณตะกอน และสารเคมีที่เกิดขึ้นในพื้นที่เนื่องจากกิจกรรมทางการเกษตร ซึ่งแบบจำลอง SWAT สามารถประยุกต์ใช้ได้กับพื้นที่ขนาดเล็ก จนถึงพื้นที่ขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนในเรื่องของกลุ่มชุดดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน และการจัดการทรัพยากรต่างๆที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำ

แบบจำลอง SWAT เป็นแบบจำลองทางกายภาพ โดยการใช้ข้อมูลทางกายภาพที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ศึกษามาใช้ในการประเมินปัจจัยที่ผู้ใช้สนใจ เช่น ข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยา คุณสมบัติของดิน ลักษณะของพื้นที่ศึกษา และประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น การใช้แบบจำลอง SWAT สามารถช่วยในการประเมินปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับทางด้านอุทกวิทยาที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด หรือในพื้นที่ที่ไม่สามารถติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดได้ นอกจากนั้นยังสามารถประเมินความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพต่างๆในพื้นที่ที่มีผลต่อปัจจัยทางด้านอุทกวิทยาที่ศึกษาได้อีกด้วย

แบบจำลอง SWAT มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับการประเมินลุ่มน้ำในหลายส่วนทั้งในส่วนของการประเมินถึงปริมาณน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำโดยการใช้หลักการของสมดุลน้ำ เพื่อการพิจารณาปริมาณน้ำในส่วนต่างๆของพื้นที่ลุ่มน้ำ การประเมินในส่วนของคุณภาพน้ำทั้งปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และออกซิเจนที่ละลายน้ำทั้งในส่วนของลำน้ำและแหล่งกักเก็บน้ำ รวมถึงการประเมินถึงการชะล้างพังทลายของดิน

ภาคผนวก ง แสดงขั้นตอนการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT โดยใช้กรณีศึกษาของลุ่มน้ำลำภาชีเป็นตัวอย่างสำหรับการจัดสร้างแบบจำลอง ซึ่งลุ่มน้ำลำภาชีเป็นลุ่มน้ำย่อยลุ่มน้ำหนึ่งของลุ่มน้ำแม่กลอง โดยมีรายละเอียดการจัดเตรียมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องสำหรับการนำข้อมูลเข้าแบบจำลอง ได้แก่ ข้อมูลลักษณะพื้นที่ศึกษา ข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยา ข้อมูลทางด้านอุทกวิทยา รวมถึงขั้นตอนการปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลอง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด สามารถนำไปใช้ในการประเมินด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องกับทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำได้

รายละเอียดในบทนี้จะระบุถึงทฤษฎีหลักที่ใช้ในแบบจำลอง SWAT เพื่อการประเมินน้ำท่า และมีตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อการประเมินถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำแสดงดังบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.4

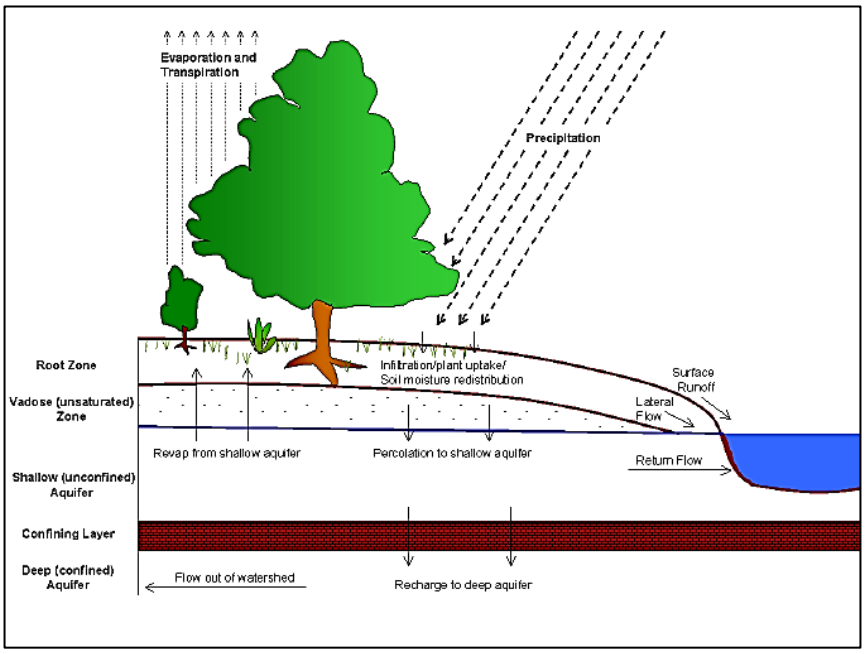
6.1 ทฤษฎีหลักที่เกี่ยวข้องในการคำนวณของแบบจำลอง SWAT

แบบจำลอง SWAT เป็นแบบจำลองประเภท Physical based model โดยมีการพิจารณาใช้ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำที่ศึกษา รวมถึงข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยทางด้านอุกวิทยามาใช้ในการคำนวณ หลักการที่สำคัญของแบบจำลอง SWAT คือการใช้หลักสมดุลน้ำมาคำนวณสถานการณ์ต่างๆในพื้นที่ลุ่มน้ำ โดยการคำนวณของแบบจำลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนพื้นดิน (Land phase) ซึ่งใช้หลักการคำนวณทางด้านวัฏจักรอุทกวิทยา (Hydrological cycle) (**รูปที่ 6.1-1**) เพื่อประเมินถึงปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ปริมาณน้ำในพื้นที่ ปริมาณการชะล้างพังทลายของดิน ธาตุอาหารและสารเคมีต่างๆที่จะลงสู่แหล่งน้ำ จากนั้นส่วนที่ 2 ได้แก่ ส่วนของลำน้ำ (Routing phase) ได้แก่ ส่วนของการเคลื่อนที่ของน้ำ ตะกอน รวมถึงธาตุอาหารและสารเคมีต่างๆที่เคลื่อนที่ในลำน้ำจะถูกคำนวณ SWAT ใช้ Manning Equation ในการคำนวณอัตราการไหลและความเร็วของน้ำในลำน้ำ สำหรับปริมาณน้ำในลำน้ำ SWAT จะใช้วิธีการคำนวณ 2 วิธี ได้แก่ Variable storage routing method และ Muskingum routing method สมการที่ 6.1.-1 แสดงสมการสมดุลน้ำ (Water balance equation) ที่ใช้ในแบบจำลอง SWAT

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad [6.1\text{-}1]$$

โดยที่

- SW_t คือปริมาณน้ำสุดท้ายที่คงเหลืออยู่ในดิน (มม.)
- SW_0 คือปริมาณน้ำเริ่มต้นที่อยู่ในดินของวันที่ *i* (มม.)
- t คือช่วงเวลา (วัน)
- R_{day} คือปริมาณน้ำฝนของวันที่ *i* (มม.)
- Q_{surf} คือปริมาณน้ำผิวดินของวันที่ *i* (มม.)
- E_a คือปริมาณน้ำที่สูญเสียเนื่องจากการระเหยและการคายน้ำของพืช (Evapotranspiration) (มม.)
- W_{seep} คือปริมาณน้ำที่สูญเสียออกจากหน้าตัดดิน (Soil profile) ของวันที่ *i* (มม.)
- Q_{gw} คือปริมาณน้ำใต้ดินของวันที่ *i* (มม.)



ที่มา: Neistch et al. (2009)

รูปที่ 6.1-1 วัฏจักรอุทกวิทยา

6.2 การคำนวณปริมาณน้ำท่าผิวดิน

โดยทั่วไปปริมาณน้ำท่าผิวดินเกิดขึ้นเมื่อปริมาณน้ำที่มีอยู่ที่ผิวดินมีปริมาณสูงกว่าอัตราการซึมผ่านน้ำของดิน (Infiltration rate) โดยในช่วงแรกหากดินแห้งอัตราการซึมผ่านน้ำของดินจะมีค่าสูงมาก น้ำสามารถซึมผ่านได้ดีจนถึงในช่วงเวลาหนึ่งเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ น้ำจะไม่สามารถซึมผ่านดินได้อีกต่อไป และเกิดน้ำท่าผิวดินขึ้น แบบจำลอง SWAT มีวิธีการในการคำนวณน้ำท่าผิวดินที่เกิดขึ้น 2 วิธีซึ่งสามารถเลือกใช้วิธีใดวิธีหนึ่งได้ ได้แก่ SCS Curve Number Method (SCS) และ Green & Amp Infiltration Method (G&A) โดยหลักการคำนวณของ 2 วิธีดังกล่าวมีรายละเอียดโดยสรุปดังนี้

6.2.1 SCS Curve Number Method (SCS)

สมการของ SCS เริ่มใช้งานมาตั้งแต่ช่วงปี 1950 โดยเป็นสมการที่ใช้ในการประเมินถึงปริมาณน้ำท่าผิวดินที่เกิดขึ้นจากลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและคุณสมบัติของดินในหลายลักษณะ สมการที่ 6.2.1-1 แสดงสมการ SCS

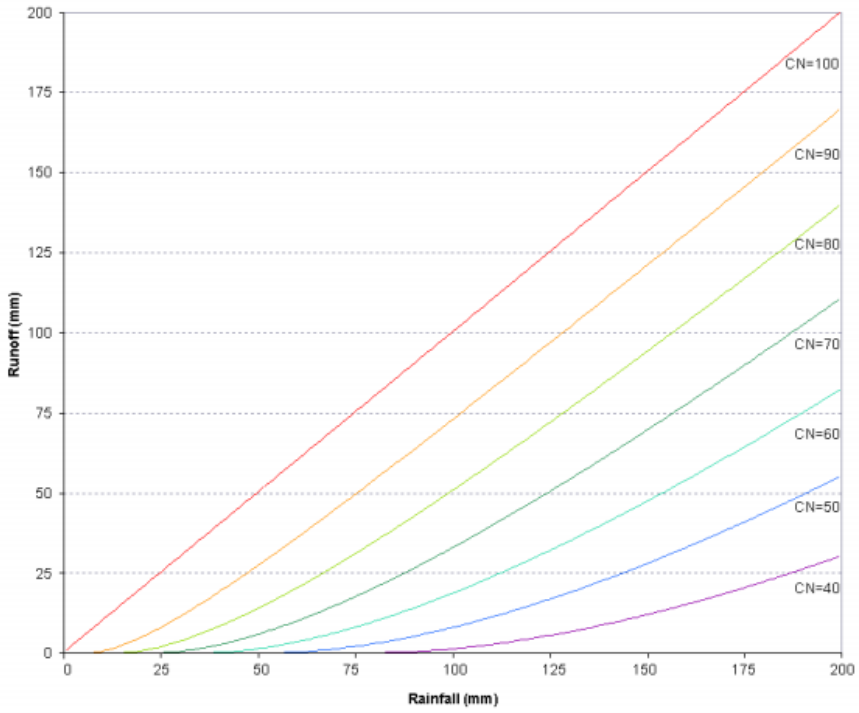
$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \qquad [6.2.1\text{-}1]$$

โดยที่ Q_{surf} คือปริมาณน้ำท่าผิวดิน (mm H_2O), R_{day} คือปริมาณฝนรายวัน (mm H_2O), I_a ปริมาณน้ำผิวดินเริ่มต้น (mm H_2O), และ S คือ Retention parameter (mm H_2O) ซึ่ง

แปรผันตามคุณสมบัติของดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน ความชันในพื้นที่ รวมถึงลักษณะความชื้นในดิน โดย S สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.2.1-2

$$S = 25.4(\frac{100}{CN} - 10) \quad [6.2.1\text{-}2]$$

จากสมการที่ 6.2.1-1 ค่า I_a โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ $0.2S$ และค่า CN ได้แก่ค่า Curve Number ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CN กับปริมาณฝน (mm) และปริมาณน้ำท่า (mm) แสดงดัง**รูปที่ 6.2.1-1** ซึ่งค่า CN เกี่ยวข้องกับการซึมของน้ำผ่านดิน (Soil's permeability) การใช้ประโยชน์ที่ดิน และลักษณะความชื้นในดินก่อนหน้าช่วงเวลาที่คำนวณ (Antecedent Moisture Condition) รวมถึงค่าความชันของพื้นที่ (โดยจากการคำนวณทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 5%) โดยที่ค่า CN สำหรับค่าความชื้น II (Moisture Condition II) แสดงดัง**ตารางที่ 6.2.1-1** ถึง **ตารางที่ 6.2.1-3**



ที่มา: Neistch et al. (2009)

รูปที่ 6.2.1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าและปริมาณฝนในแต่ละ CN

ตารางที่ 6.2.1-1 ค่า CN สำหรับพื้นที่เพาะปลูก (Neistch et al., 2009))

ลักษณะการปกคลุมของพื้นที่ (Cover)			Hydrologic Soil Group			
การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use)	**การจัดการที่ดิน (Treatment of practice)**	**สภาพทางอุทกวิทยา (Hydrologic condition)**	**A**	**B**	**C**	**D**
พื้นที่ที่ไม่มีการเพาะปลูก ช่วงพักดิน (Fallow)	-ไม่มีพืชปกคลุม (Bare soil)	-	77	86	91	94
	-มีพืชปกคลุมเล็กน้อย (Crop residual cover)	แย่ (Poor)	76	85	90	93
		ดี (Good)	74	83	88	90
พืชไร่ (Row crops)	-การปลูกเรียงแถวตรง (Straight row)	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	-การปลูกเรียงแถวตรง มีพืชปกคลุมดิน (Straight row / residue)	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	-การปลูกแนวคอนทัวร์ (Contoured)	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
พืชไร่ (Row crops)	-การปลูกแนวคอนทัวร์ มีพืชปกคลุมดิน (Contoured / residue)	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	-การปลูกแนวคอนทัวร์และขั้นบันได (Contoured & terraced)	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81
	-การปลูกแนวคอนทัวร์และขั้นบันได มีพืชปกคลุม (Contoured & terraced/residue)	Poor	65	73	79	81
		Good	61	70	77	80
	-การปลูกเรียงแถวตรง (Straight row)	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	-การปลูกเรียงแถวตรง มีพืชปกคลุมดิน (Straight row / residue)	Poor	64	75	83	86
		Good	60	72	80	84

ลักษณะการปกคลุมของพื้นที่ (Cover)			Hydrologic Soil Group			
การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use)	**การจัดการที่ดิน (Treatment of practice)**	**สภาพทางอุทกวิทยา (Hydrologic condition)**	**A**	**B**	**C**	**D**
การเพาะปลูกพืชไร่ ประเภทธัญพืช (Small grains)	-การปลูกแนวคอนทัวร์ (Contoured)	Poor	63	74	82	85
		Good	61	73	81	84
	-การปลูกแนวคอนทัวร์ มีพืชปกคลุมดิน (Contoured / residue)	Poor	62	73	81	84
		Good	60	72	80	83
	-การปลูกแนวคอนทัวร์และขั้นบันได (Contoured & terraced)	Poor	61	72	79	82
		Good	59	70	78	81
	-การปลูกแนวคอนทัวร์และขั้นบันได มีพืชปกคลุม (Contoured & terraced/residue)	Poor	60	71	78	81
		Good	58	69	77	80
การเพาะปลูกพืชหมุนเวียน พืชตระกูลถั่วแบบหว่าน และแบบหยอดเมล็ด (Closed-seeded or broadcast legumes or rotation)	-การปลูกเรียงแถวตรง (Straight row)	Poor	66	77	85	89
		Good	58	72	81	85
	-การปลูกแนวคอนทัวร์ (Contoured)	Poor	64	75	83	85
		Good	55	6	78	83
	-การปลูกแนวคอนทัวร์และขั้นบันได (Contoured & terraced)	Poor	63	73	80	83
		Good	51	67	76	80

ที่มา: Neistch et al. (2009)

ตารางที่ 6.2.1-2 ค่า CN สำหรับพื้นที่การเกษตรอื่นๆ

การปกคลุมพื้นที่ (Cover)		**Hydrologic Soil Group**			
ประเภทการปกคลุม (Cover Type)	**สภาพทางอุทกวิทยา (Hydrologic condition)**	**A**	**B**	**C**	**D**
ทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ พื้นที่ปกคลุมด้วยหญ้า พื้นที่มีพืชปกคลุมต่อเนื่องสำหรับให้สัตว์เลี้ยงกินหญ้า (Pasture, grassland, or range – continuous forage for grazing)	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
พื้นที่ปกคลุมด้วยหญ้า มีการตัดหญ้าเพื่อไปใช้เลี้ยงสัตว์ (Meadow-continuous grass, protected from grazing and generally mowed hay)		30	58	71	78
พื้นที่ปกคลุมด้วยพุ่มไม้ วัชพืช และหญ้าธรรมชาติ (Brush-brush-weed-grass mixture with brush the major element)	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
พื้นที่ผสมระหว่างไม้ยืนต้นและหญ้าปกคลุมดิน (Woods-grass combination (orchard or tree farm))	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
ไม้ยืนต้น พื้นที่ป่า (Woods)	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30	55	70	77
พื้นที่เกษตรกรรม ประกอบด้วยสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ เช่น อาคาร ทางเดิน และถนน เป็นต้น (Farmsteads – buildings, lanes, driveways, and surrounding lots)		59	74	82	86

ที่มา: Neistch et al. (2009)

ตารางที่ 6.2.1-3 ค่า CN สำหรับพื้นที่เมือง

Cover			Hydrologic Soil Group			
Cover Type	Hydrologic condition	Average % impervious area	A	B	C	D
พื้นที่เขตเมือง (Fully developed urban areas)						
พื้นที่เปิดโล่ง เช่น สนามหญ้า สวนสาธารณะ สนามกอลฟ์ เป็นต้น (Open spaces (lawns, parks, golf course, cemeteries, etc.))	Poor		68	79	86	89
	Fair		49	69	79	84
	Good		39	61	74	80
พื้นที่ที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ (Impervious areas):						
- ลานจอดรถคอนกรีต, หลังคา, ทางรถวิ่ง(Paved parking lots, roofs, driveways, etc.)			98	98	98	98
- ถนนลาดยาง ถนนคอนกรีต, คูระบายน้ำ (Paved streets and roads; open ditches)			83	89	92	93
- ถนนลูกรัง (Gravel streets and roads)			76	85	89	91
- ถนนดิน (Dirt streets and roads)			72	82	87	89
พื้นที่เขตเมือง (Urban districts):		85%	89	92	94	95
- เขตพาณิชยกรรมและธุรกิจ (Commercial and business)		72%	81	88	91	93
- เขตอุตสาหกรรม (Industrial)						
- เขตที่อยู่อาศัย แบ่งตามขนาดที่ดิน(Residential districts by average lot size)		65%	77	85	90	92

Cover			Hydrologic Soil Group			
Cover Type	Hydrologic condition	Average % impervious area	A	B	C	D
1/8 acre (0.05 ha) or less (town house)		38%	61	75	83	87
1/4 acre (0.10 ha)		30%	57	72	81	86
1/3 acre (0.13 ha)		25%	54	70	80	85
1/2 acre (0.20 ha)		20%	51	68	79	84
1 acre (0.40 ha)		12%	46	65	77	82
2 acres (0.81 ha)						
พื้นที่กำลังพัฒนา (Developing urban areas)						
พื้นที่ที่ปรับระดับ ไม่มีพืชคลุมดิน (Newly grade areas (pervious areas only, no vegetation))			77	86	91	94

ที่มา: Neistch et al. (2009)

จากตารางด้านบนจะเห็นได้ว่ามีการระบุถึง Hydrologic Soil Groups หรือการแบ่งกลุ่มลักษณะการซึมน้ำผ่านดิน (Infiltration) แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม โดยการแบ่งกลุ่มพิจารณาจากลักษณะการเกิดขึ้นของปริมาณน้ำท่าและลักษณะของสิ่งปกคลุมดิน ดังนี้

A: กลุ่ม A หรือกลุ่มที่มีการเกิดขึ้นของปริมาณน้ำท่าที่ต่ำ หมายถึงลักษณะดินในกลุ่มน้ำมีอัตราการซึมของน้ำลงในดิน (Infiltration rate) ที่สูงเมื่อดินมีความชื้นอยู่ในระดับหนึ่ง ดินมีการระบายน้ำที่ดี ดินมีลักษณะมีความละเอียดปานกลางจนถึงมีความละเอียดต่ำ การเคลื่อนที่ของน้ำในดินอยู่ในระดับสูง

B: การซึมของน้ำลงในดินในกลุ่มนี้อยู่ในระดับปานกลางเมื่อดินมีความชื้นอยู่ในระดับหนึ่ง ดินมีการระบายน้ำได้ดีปานกลาง ดินมีลักษณะมีความละเอียดปานกลางจนถึงมีความละเอียดต่ำ การเคลื่อนที่ของน้ำในดินอยู่ในระดับปานกลาง

C: การซึมของน้ำลงในดินอยู่ในระดับต่ำเมื่อดินมีความชื้นอยู่ในระดับหนึ่ง ลักษณะของเนื้อดินมีความละเอียดปานกลาง การเคลื่อนที่ของน้ำในดินอยู่ในระดับต่ำ

D: กลุ่มสุดท้ายมีการเกิดขึ้นของปริมาณน้ำท่าที่สูง อัตราการซึมของน้ำลงในดินต่ำเมื่อดินมีความชื้นอยู่ในระดับหนึ่ง ลักษณะดินส่วนใหญ่ประกอบด้วยดินเหนียวมีความละเอียดที่สูง มีอัตราการการเคลื่อนที่ของน้ำในดินอยู่ในระดับต่ำมาก

วิธีการคำนวณ SCS Curve Number พิจารณาถึงความชื้นในดินช่วงก่อนหน้าที่พิจารณา โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่ I – ดินแห้ง (Wilting point), II - ความชื้นระดับปานกลาง และ III – ความชื้นเต็มความจุของดิน (Field capacity) ซึ่งหากดินมีลักษณะแห้งหรือมีความชื้นเต็มความจุของดินสามารถแปลงค่า CN ได้ โดยนำค่า SCS Curve Number ที่ได้จากในตารางซึ่งเป็นระดับความชื้นปานกลางสามารถนำมาคำนวณได้ดังนี้

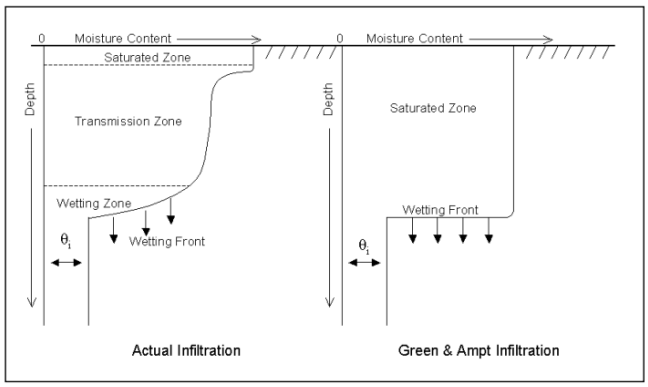
$$CN_1 = CN_2 - \frac{20.(100-CN_2)}{(100-CN_2+\exp[2.533-0.0636.(100-CN_2)])} \quad [6.2.1\text{-}3]$$

$$CN_3 = CN_2 . \exp[0.00673.(100-CN_2)] \quad [6.2.1\text{-}4]$$

6.2.2 Green & Ampt Infiltration Method

วิธีการคำนวณของ Green & Ampt Infiltration Method (G&A) เป็นการประเมินการซึมของน้ำลงในดินและปริมาณน้ำท่าที่ผิวดิน โดยการคำนวณวิธีนี้ได้มีการตั้งสมมติฐานให้ดินทั้งหมดมีลักษณะเดียวกัน (Homogeneous Soil Profile) และความชื้นในดินก่อนหน้ามีรูปแบบเดียวกันตลอดทั้งหน้าตัดดิน เมื่อเกิดการซึมของน้ำลงในดิน แบบจำลองได้มีการกำหนดให้ในส่วนของ Wetting zone (**รูปที่ 6.2.2-1**) มีลักษณะอิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งจะมีค่าความชื้นที่แตกต่างกันกับชั้นดินในชั้นถัดมา

แบบจำลอง SWAT ใช้วิธีการ G&A จากการพัฒนาของ Mein and Larson (1973) ในการคำนวณปริมาณน้ำท่าผิวดิน แต่การเลือกใช้วิธีการ G&A จำเป็นต้องมีการนำเข้าข้อมูลปริมาณฝนที่มีความถี่มากกว่ารายวันเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณการซึมของน้ำลงสู่ดินในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละวัน สมการหลักของ G&A ในการคำนวณการแสดงดังสมการที่ 6.2.2-1



ที่มา: Neistch et al. (2009)

รูปที่ 6.2.2-1 การซึมของน้ำผ่านดินในภาวะปกติ (ซ้าย) และจากแบบจำลอง (ขวา)

$$f_{inf,t} = K_e \cdot (1 + \frac{\varphi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{inf,t}}) \quad [6.2.2\text{-}1]$$

โดยที่ $f_{inf,t}$ คืออัตราการซึมของน้ำสู่ดินในช่วงเวลา t (mm/hr), K_e คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำผ่านดิน (mm/hr), φ_{wf} ความลึกของหน้าตัดดินที่มีความชื้น (Wetting front metric potential) (mm), $\Delta\theta_v$ คือการเปลี่ยนแปลงความชื้นของหน้าตัดดิน (Wetting front) (mm/mm) และ $F_{inf,t}$ คือปริมาณการซึมของน้ำลงสู่ดินสะสม การคำนวณ $f_{inf,t}$ จะเป็นการพิจารณาปริมาณการซึมน้ำสู่ดินสะสม $F_{inf,t}$ ของช่วงเวลาก่อนหน้า ซึ่ง $f_{inf,t}$ สามารถคำนวณได้จาก dF_{inf}/dt

สัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดิน (K_e) (สมการที่ 6.2.2-2) สามารถคำนวณได้จากการพิจารณาค่าของสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านดินในภาวะดินอิ่มตัว (Saturated Hydraulic Conductivity: K_{sat}) และลักษณะของการปกคลุมดินโดยพิจารณาค่า CN ในขณะที่ค่าของ φ_{wf} คำนวณจากคุณสมบัติของดิน ได้แก่ ช่องว่างภายในดิน (Porosity) และสัดส่วนของดินเหนียวและดินทราย

$$K_e = \frac{56.82 \cdot {K_{sat}}^{0.286}}{1 + 0.051 \exp(0.062 . CN)} - 2 \quad [6.2.2\text{-}2]$$

การคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชื้นของหน้าตัดดิน (Wetting front) $\Delta\theta_v$ คำนวณจากความชื้นในดิน ณ จุดที่ดินเหี่ยวเฉาถาวร (Wilting point) (SW) (mm H_2O), จุดที่มีน้ำเต็มในดิน (Field capacity) (mm H_2O) (FC) และช่องว่างภายในดิน (mm/mm) ($\emptyset_{soil}$) ดังสมการที่ 6.2.2-3

$$\Delta\theta_v = \left(1 - \frac{SW}{FC}\right) * (0.95 * \emptyset_{soil}) \quad [6.2.2\text{-}3]$$

6.2.3 ปริมาณน้ำท่าสูงสุด (Peak runoff rate)

ปริมาณน้ำท่าสูงสุดคืออัตราของปริมาณน้ำท่าผิวดินที่เกิดขึ้นในช่วงของเหตุการณ์ฝนหนึ่งๆที่สนใจ โดยใช้วิธีการคำนวณ ได้แก่ Modified Rational Method โดยวิธีการของ Rational Method เป็นวิธีการที่ใช้อย่างกว้างขวางในการออกแบบคูน้ำ และระบบการควบคุมระบายน้ำ ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานโดยมีปริมาณน้ำฝนเริ่มต้นเท่ากับ i ณ เวลาที่ $t = 0$ และคำนวณไปต่อเนื่อง อัตราปริมาณน้ำท่าจะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงระยะเวลาที่น้ำท่าไหลจากจุดที่ไกลที่สุดของลุ่มน้ำผ่านจุดปากแม่น้ำ (Time of Concentration) $t = t_{conc}$ (hr) เมื่อพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยที่สนใจเป็นพื้นที่ที่ก่อให้เกิดน้ำท่า ณ ปากแม่น้ำ (สมการที่ 6.2.3-1)

$$q_{peak} = \frac{C.i.Area}{3.6} \quad [6.2.3\text{-}1]$$

โดยที่ q_{peak} คือปริมาณน้ำท่าสูงสุด (m^3/s), C คือสัมประสิทธิ์น้ำท่า (Runoff coefficient), i ความเข้มของฝน (mm/hr) และ $Area$ คือพื้นที่ลุ่มน้ำที่สนใจ ซึ่งสัมประสิทธิ์น้ำท่า C สามารถคำนวณได้จากปริมาณน้ำท่าผิวดิน (Q_{surf}) (mm H_2O) และปริมาณฝนในวันหนึ่งๆ (mm H_2O) ดังสมการที่ 6.2.3-2

$$c = \frac{Q_{surf}}{R_{day}} \quad [6.2.3\text{-}2]$$

สำหรับค่าความเข้มฝน i (mm/hr) คือค่าปริมาณฝนเฉลี่ยในช่วงเวลาของ t_{conc} (R_{tc}) (mm/hr) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.2.3-3

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{conc}} \quad [6.2.3\text{-}3]$$

โดยแบบจำลอง SWAT ได้คำนวณค่า R_{tc} จาก Hershfield (1961) ซึ่งได้มีการพิจารณาค่า R_{tc} เปรียบเทียบกับสัดส่วนปริมาณฝนรายวัน (R_{day}) ดังสมการที่ 6.2.3-4 โดยที่มีการประเมินถึงค่าสัดส่วนของปริมาณฝนเฉลี่ยในช่วงเวลาของ t_{conc} (α_{tc}) ดังสมการที่ 6.2.3-5 โดยที่ $\alpha_{0.5}$ คือปริมาณความเข้มฝนสูงสุดในช่วงเวลาครึ่งชั่วโมง

$$R_{tc} = \alpha_{tc}.R_{day} \quad [6.2.3\text{-}4]$$

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp[2.t_{conc}.\ln(1 - \alpha_{0.5})] \quad [6.2.3\text{-}5]$$

ระยะเวลาที่น้ำท่าไหลจากจุดที่ไกลที่สุดของลุ่มน้ำผ่านจุดปากแม่น้ำ (Time of Concentration) (t_{conc}) สามารถคำนวณได้จากการพิจารณาช่วงเวลาทั้งหมดของการเกิดปริมาณน้ำท่าผิวดิน (โดยการประเมินจากปริมาณน้ำท่าจากจุดที่ไกลที่สุดของลุ่มน้ำจนถึงลำน้ำของลุ่มน้ำ) (t_{ov}) (hr) และช่วงเวลาของลำน้ำ (โดยการประเมินจากปริมาณน้ำจากต้นน้ำของลำน้ำจนกระทั่งถึงจุดทางออกของลุ่มน้ำ) t_{ch} (hr) ดังสมการที่ 6.2.3-6 และ t_{ov} และ t_{ch} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.2.3-7 และ 6.2.3-8

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad [6.2.3\text{-}6]$$

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} . n^{0.6}}{18 . slp^{0.3}} \quad [6.2.3\text{-}7]$$

$$t_{ch} = \frac{0.62 . L . n^{0.75}}{area^{0.125} . slp_{ch}^{0.6}} \quad [6.2.3\text{-}8]$$

โดยที่ L_{sp} ความยาวลาดเทของลุ่มน้ำ (Subbasin slope length) (m), n คือค่า Manning's roughness coefficient, slp คือค่าเฉลี่ยความชันลุ่มน้ำ (m m^{-1}), L คือความยาว ลำน้ำจากจุดที่ไกลจากจุดออกลุ่มน้ำมากที่สุด (Km), $area$ คือพื้นที่ลุ่มน้ำ (km^2) และ slp_{ch} คือความลาดชันของลำน้ำ (m m^{-1})

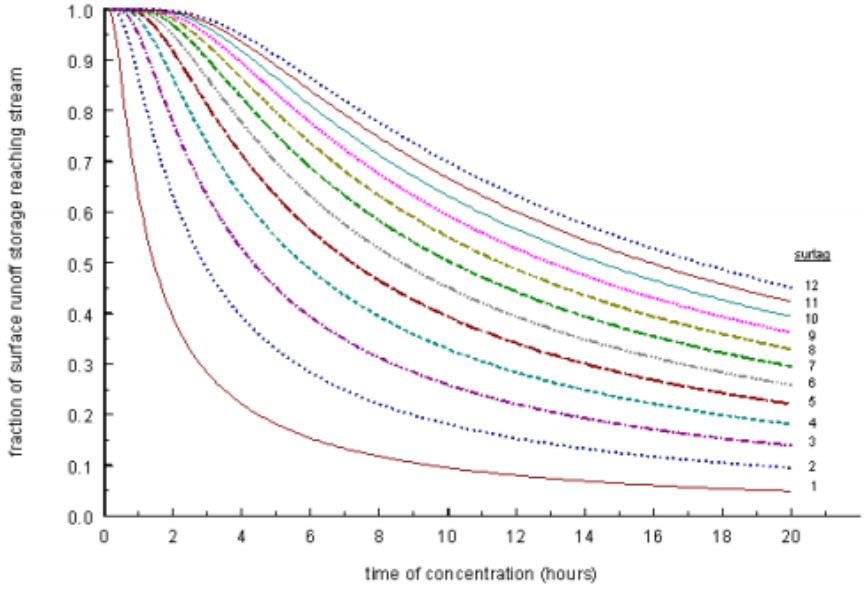
จากสมการข้างต้น SWAT ปรับวิธีการคำนวณจาก Rational formula เป็น Modified Rational formula เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำท่าสูงสุด (q_{peak}) ดังสมการที่ 6.2.3-9

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} . Q_{surf} . Area}{3.6 . t_{conc}} \quad [6.2.3\text{-}9]$$

6.2.4 Surface runoff lag

สำหรับลุ่มน้ำย่อยที่มีขนาดใหญ่และระยะเวลาที่น้ำท่าไหลจากจุดที่ไกลที่สุดของลุ่มน้ำจนกระทั่งถึงจุดออกของลุ่นน้ำนั้น (t_{conc}) มีระยะเวลามากกว่า 1 วัน ดังนั้นในช่วงเวลา 1 วันจะยังคงมีปริมาณน้ำท่าบางส่วนอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำ SWAT มีการคำนวณสัดส่วนของปริมาณน้ำท่าที่อยู่ในลุ่มน้ำ ($Q_{stor,i-1}$) (mm H_2O) ก่อนหน้าวันที่พิจารณา และปริมาณน้ำท่าที่ออกจากลุ่มน้ำย่อยลงสู่แม่น้ำสายหลัก Q_{surf} (mm H_2O) โดยการคำนวณจากค่าของปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นทั้งหมดของ ลุ่มน้ำย่อยในวันหนึ่ง (Q'_{surf}) (mm H_2O) ค่าสัมประสิทธิ์ Surface runoff lag ($Surlag$) และค่า t_{conc} (hr) ดังสมการที่ 6.2.4-1 และความสัมพันธ์ระหว่างค่า $Surlag$ และ t_{conc} แสดงดัง**รูปที่ 6.2.4-1** โดยที่หากค่า $Surlag$ มีค่าลดลงแสดงให้เห็นถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยมีค่ามากขึ้น

$$Q_{surf} = \left(Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}\right).(1 - \exp[\frac{-surlag}{t_{conc}}]) \qquad [6.2.4\text{-}1]$$



รูปที่ 6.2.4-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Surlag$ และ t_{conc}

6.3 การคำนวณการคายระเหย

การคายระเหยเป็นกระบวนการหนึ่งในวัฏจักรอุทกวิทยาโดยแบ่งเป็นการคายน้ำจากพืชและการระเหยของน้ำที่จากพื้นดินหรือน้ำที่ค้างอยู่ตามที่ต่างๆ คิดเป็นประมาณ 62% จากปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่ลุ่มน้ำ กระบวนการคายระเหยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ ศักย์การคายระเหย (Potential Evapotranspiration) และการคายระเหยแท้จริง (Actual Evapotranspiration) โดยในแบบจำลอง SWAT มีกระบวนการคำนวณดังนี้

6.3.1 ศักย์การคายระเหย (Potential evapotranspiration)

ศักย์การคายระเหย (Potential Evapotranspiration: PET) หมายถึงอัตราการคายน้ำของพืชสูงสุดรวมถึงการระเหยของน้ำจากพื้นดินและส่วนอื่นๆในบริเวณข้างเคียงในกรณีที่มีน้ำอย่างไม่จำกัด การคำนวณค่าของ PET สามารถคำนวณได้หลายวิธีโดยในแบบจำลอง SWAT ได้มีการระบุวิธีการคำนวณให้สามารถเลือกใช้ได้ 3 วิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อมูลนำเข้าและความซับซ้อนของวิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน ดังนี้

- **Penman-Monteith method**

วิธีการคำนวณของ Penman-Monteith เป็นวิธีการที่ถูกตั้งไว้เป็นวิธีเริ่มต้นการคำนวนในแบบจำลอง SWAT โดยการใช้ข้อมูลนำเข้าได้แก่ การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation) อุณหภูมิบรรยากาศ (Air Temperature) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) และความเร็วลม (Wind Speed) ดังสมการที่ 6.3.1-1 รายละเอียดการคำนวณของสมการ Penman-Monteith ในคู่มือ FAO-56

$$\lambda E_o = \frac{\Delta(H_{net}-G)+ \rho_{air} .c_p . (e_z^0-e_z)/r_a}{\Delta+\gamma(1+r_c/r_a)} \quad [6.3.1\text{-}1]$$

- **Priestley-Taylor method**

การหาค่า PET โดยวิธีของ Priestley-Taylor มีความซับซ้อนน้อยกว่าการคำนวณโดยวิธี Penman-Monteith แต่มีความเหมาะสมสำหรับการคำนวณในกรณีที่พื้นผิวมีความชื้นหรือบริเวณโดยรอบมีความชื้นค่อนข้างสูง (Humid Condition) แต่สำหรับกรณีในพื้นผิวที่มีความแห้งแล้ง (Semi-arid / Arid Condition) การประมาณค่า PET โดยวิธีนี้จะให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็น สมการที่ 6.3.1-2 แสดงวิธีการคำนวณของ Priestley-Taylor

$$\lambda E_o = \alpha_{pet} . \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} . (H_{net} - G) \quad [6.3.1\text{-}2]$$

- **Hargreaves method**

วิธีการของ Hargreaves เป็นวิธีการที่ใช้ข้อมูลนำเข้าในการคำนวณ PET ที่น้อยที่สุด โดยปัจจัยที่สำคัญได้แก่อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยของบรรยากาศ สมการที่ 6.3.1-3 แสดงวิธีการคำนวณค่า PET ของ Hargreaves method

$$\lambda E_o = 0.0023. H_0 . (T_{mx} - T_{mn})^{0.5}. (\overline{T_{av}} + 17.8) \quad [6.3.1\text{-}3]$$

โดยที่

λ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent Heat Flux Density) (MJ/m^2/day)

E_o อัตราการคายระเหย (mm/day)

Δ ความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa/°C)

H_{net} พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์สุทธิที่พื้นผิว (MJ/m^2/day)

G	พลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดิน	(MJ/m^2/day)
ρ_{air}	ความหนาแน่นของอากาศ	(kg/m^3)
c_p	ความจุความร้อนเฉพาะของอากาศ	(MJ/kg^2. ºC)
γ	ค่าคงที่ของเทอมความชื้น (Psychrometric constant)	(kPa/ºC)
e_z^0	ความดันไอน้ำอิ่มตัว	(kPa)
e_z	ความดันไอน้ำจริงในอากาศ	(kPa)
r_a	ความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่ชั้นการไหลเวียนอากาศ	(s/m)
r_c	ความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำชั้นพื้นผิว	(s/m)
H_0	การแผ่รังสีนอกชั้นบรรยากาศ	(MJ/kg^2)
T_{mx}	อุณหภูมิสูงสุดในวันหนึ่งๆ	(ºC)
T_{mn}	อุณหภูมิต่ำสุดในวันหนึ่งๆ	(ºC)
$\overline{T_{av}}$	อุณหภูมิเฉลี่ยในวันหนึ่งๆ	(ºC)

6.3.2 การคายระเหยแท้จริง (Actual Evapotranspiration)

เมื่อมีการคำนวณค่า PET เสร็จสิ้นจากนั้น SWAT จะทำการคำนวณค่าการคายระเหยแท้จริง (Actual Evapotranspiration) โดยเริ่มต้นจากการคำนวณการระเหยของปริมาณฝนที่ตกลงมาและอยู่บริเวณใบหรือส่วนต่างๆของพืช จากนั้นจึงคำนวณค่าสูงสุดของการคายน้ำของพืชและการระเหยของน้ำจากพื้นที่โดยรอบ แล้วจึงคำนวณค่าการระเหยแท้จริง ดังนี้

- **การระเหยของน้ำจากส่วนต่างๆของพืช (Evaporation of Intercepted Rainfall)**

การระเหยของน้ำที่ค้างอยู่ในส่วนเรือนยอดและส่วนต่างๆของพืชมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับพื้นที่ที่เป็นป่า หรือมีการปลูกพืชอยู่หนาแน่น ซึ่งการระเหยน้ำในส่วนนี้ในบางครั้งยังพบว่ามีอัตราการระเหยที่มากกว่าการคายน้ำของพืช โดยการคำนวณสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี โดย SWAT จะพิจารณาจากค่า PET หากค่า PET (E_o) มีค่าน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ค้างอยู่ที่เรือนยอด (R_{INT}) ดังนั้น

$$E_a = E_{can} = E_o$$

$$R_{INT(f)} = R_{INT(i)} - E_{can} \qquad [6.3.2\text{-}1]$$

แต่หากค่า PET (E_o) มีค่ามากกว่าปริมาณน้ำที่ค้างอยู่ที่เรือนยอด (R_{INT}) ดังนั้น

$$E_{can} = R_{INT(i)} \quad [6.3.2\text{-}2]$$

$$R_{INT(f)} = 0 \quad [6.3.2\text{-}3]$$

โดยที่

E_a	อัตราการคายระเหยแท้จริง	(mm/day)
E_{can}	อัตราการคายระเหยของน้ำที่ค้างที่เรือนยอด	(mm/day)
E_o	อัตราการคายระเหย	(mm/day)
$R_{INT(i)}$	ปริมาณน้ำเริ่มต้นที่ค้างอยู่ที่เรือนยอดในวันหนึ่ง	(mm H_2O)
$R_{INT(f)}$	ปริมาณน้ำที่ค้างอยู่ที่เรือนยอดในวันหนึ่ง	(mm H_2O)

- **การคายน้ำของพืช (Transpiration)**

การคายน้ำของพืชในส่วนนี้จะถูกคำนวณในแบบจำลอง SWAT เมื่อมีการเลือกใช้วิธีการคำนวณ PET โดยวิธี Priestley-Taylor method และ Hargreaves method ดังสมการที่ 6.3.2-4 และ 6.3.2-5 โดยที่ E_t และ E_0' คือการคายน้ำของพืชสูงสุด (mm H_2O) และ ค่า PET ที่มีการปรับค่าสำหรับการระเหยของน้ำที่ค้างที่เรือนยอด (mm H_2O) และ LAI หมายถึงดัชนีพื้นที่เรือนยอด

$$E_t = \frac{E_0' .LAI}{3.0} ; 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad [6.3.2\text{-}4]$$

$$E_t = E_0' \quad ; LAI \geq 3.0 \quad [6.3.2\text{-}5]$$

- **การระเหยของน้ำจากดิน (Evaporation from the Soil)**

การระเหยของน้ำจากดินขึ้นอยู่กับพื้นที่โดยรอบของพืชที่มีการปกคลุมโดยส่วนต่างๆของพืช ค่าการระเหยของน้ำจากดินสูงสุดสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 6.3.2-6 และ 6.3.2-7 โดยที่ E_s และ E_0' คือการระเหยจากดินสูงสุด (mm H_2O) และ ค่า PET ที่มีการปรับค่าสำหรับการระเหยของน้ำที่ค้างที่เรือนยอด (mm H_2O), COV_{sol} ดัชนีพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยดิน และ CV คือ ค่าชีวมวล (Biomass) และมวลสารต่างๆบนดิน (kg/ha)

$$E_s = E_0' . COV_{sol} \quad [6.3.2\text{-}6]$$

$$COV_{sol} = \exp(-5.0\ x\ 10^{-5} . CV) \quad [6.3.2\text{-}7]$$

6.4 การคำนวณน้ำในดิน

เมื่อน้ำลงสู่ชั้นใต้ดินจะมีการเคลื่อนที่ได้หลายลักษณะ เช่น จากพืชดูดน้ำไปใช้ หรือเกิดการระเหย การเคลื่อนที่ของน้ำในดินตามชั้นดินต่างๆจนกระทั่งน้ำเติมเข้าสู่ชั้นดินที่อุ้มน้ำ หรือการเคลื่อนที่ของน้ำในดินตามแนวลาดเทและออกสู่ลำน้ำ ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำในดินขึ้นอยู่กับประเภทของเนื้อดิน คุณสมบัติและโครงสร้างของดิน เนื้อดินสามารถแบ่งได้หลายประเภทแต่เนื้อดินหลักที่สำคัญ ได้แก่ ดินทราย (Sand) ดินร่วน (Loam) และดินเหนียว (Clay) โดยที่ดินทรายมีการระบายน้ำเร็วที่สุด มีปริมาณน้ำเพียง 15% ที่อยู่ในดินทรายในจุดความชื้นชลประทาน (Field capacity: FC) ในขณะที่ดินร่วนและดินเหนียวมีปริมาณน้ำเท่ากับ 58% และ 68%

นอกจากนั้นระดับความชื้นในดินเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญกับการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน ระดับความชื้นดินที่มีความสำคัญ ได้แก่ จุดดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) เป็นจุดที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำและมีน้ำส่วนเกินอยู่ภายในดิน ความชื้นชลประทาน (Field capacity: FC) หมายถึงระดับของปริมาณน้ำในดินที่มีอยู่หลังจากที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำและน้ำส่วนเกินได้ระบายออกหมดโดยแรงดึงดูดของโลก ซึ่งเป็นความจุสูงสุดในการดูดยึดความชื้นของดินในสภาพธรรมชาติ และสามารถใช้เพื่อบอกระดับความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และจุดเหี่ยวเฉาถาวร (Permanent wilting point: PWP) เป็นระดับความชื้นในดินที่พืชไม่สามารถดูดมาใช้ให้เพียงพอสำหรับการคายน้ำ โดยพืชจะเริ่มมีการเหี่ยวเฉาถาวร ซึ่งจะมีแรงดึงความชื้นประมาณ 15 บรรยากาศ หรือ -1.5 เมกะปาสคาล **ตารางที่ 6.4-1** แสดงปริมาณน้ำที่อยู่ในดินประเภทต่างๆ และความแตกต่างของปริมาณความชื้นดินในแต่ละระดับความชื้น

ตารางที่ 6.4-1 ปริมาณน้ำในดินของดินประเภทต่างๆ

		ปริมาณน้ำในดิน (สัดส่วนโดยปริมาตร)		
ชนิดดิน	**สัดส่วนดินเหนียว**	**Saturation**	**Field capacity**	**Permanent Wilting Point**
ดินทราย	3%	0.40	0.06	0.02
ดินร่วน	22%	0.50	0.29	0.05
ดินเหนียว	47%	0.60	0.41	0.20

ที่มา: Neistch et al. (2009)

6.4.1 การเคลื่อนที่ของน้ำในดิน (Percolation)

การเคลื่อนที่ของน้ำในดินจะถูกคำนวณในแบบจำลอง SWAT ในแต่ละชั้นดิน โดยน้ำที่เคลื่อนที่ในชั้นดินเป็นน้ำที่เกินจากระดับ FC ของชั้นนั้นๆ และชั้นดินด้านล่างที่มีปริมาณน้ำไม่ได้อยู่ในระดับจุดอิ่มตัวด้วยน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.4.1-1 และ 6.4.1-2

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \; ; SW_{ly} > FC_{ly} \qquad [6.4.1\text{-}1]$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \qquad ; SW_{ly} \leq FC_{ly} \qquad [6.4.1\text{-}2]$$

โดยที่ $SW_{ly,excess}$ คือน้ำที่เคลื่อนที่ออกจากชั้นดินในวันหนึ่งๆ (mm H_2O), SW_{ly} คือปริมาณน้ำทีมีอยู่ในชั้นดิน (mm H_2O) และ FC_{ly} คือปริมาณน้ำในชั้นดิน ณ ระดับความชื้น FC (mm H_2O) ซึ่งปริมาณน้ำที่เคลื่อนที่จากชั้นดินหนึ่งไปยังชั้นดินที่ต่ำว่าสามารถคำนวณได้จากวิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นดินดังสมการที่ 6.4.1-3

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot [1 - \exp[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}]] \qquad [6.4.1\text{-}3]$$

โดยที่ $W_{perc,ly}$ คือปริมาณน้ำที่เคลื่อนที่ในชั้นดินชั้นล่างในวันหนึ่งๆ (mm H_2O), Δt คือช่วงเวลาที่คำนวณ (ชั่วโมง) และ TT_{perc} เวลาในการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน (ชั่วโมง) สมการที่ 6.4.1-4 เป็นการคำนวณเวลาในการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน (TT_{perc}) (mm H_2O) ซึ่งคำนวณจากปริมาณน้ำในชั้นดิน ณ ระดับความชื้นที่จุดอิ่มตัวด้วยน้ำ (SAT_{ly}) (mm H_2O), ปริมาณน้ำในชั้นดิน ณ ระดับความชื้นที่จุด FC (FC_{ly}) (mm H_2O) และ K_{sat} คือค่าการเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Hydraulic Conductivity) (mm/hr)

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \qquad [6.4.1\text{-}4]$$

6.4.2 Lateral flow

การเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นดิน Lateral Flow เกิดขึ้นในบริเวณที่มีค่า K_{sat} ที่สูงบริเวณผิวดินและในชั้นดินถัดมาน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้หรือมีการซึมผ่านได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งในชั้นดินนี้จะมีการสะสมของน้ำที่เป็นแหล่งของ Lateral Flow โดยปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจะไหลออกสู่ลำน้ำจากการคำนวณ Lateral Flow ในแบบจำลอง SWAT (Q_{lat}) คำนวณจากสมการที่ 6.4.2-1 โดยที่ $\emptyset_d$ คือค่าความพรุนของดินที่สามารถให้น้ำระบายผ่านได้ (mm/mm), L_{hill} คือค่าความยาวของพื้นที่ที่เป็นเนินเขา (m) และ slp ระดับความสูงต่อหน่วยระยะทาง

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot [\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\emptyset_d \cdot L_{hill}}] \qquad [6.4.2\text{-}1]$$

หากลุ่มน้ำมีขนาดใหญ่และมีระยะเวลาของ t_{conc} มากกว่า 1 วัน ซึ่งปริมาณน้ำเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่จะออกสู่ลำน้ำสายหลัก โดยแบบจำลอง SWAT คำนวณ Lateral Flow ในสถานการณ์ดังกล่าวดังสมการที่ 6.4.2-2 Q'_{lat} คือปริมาณน้ำ Lateral Flow ที่เกิดขึ้นในลุ่มน้ำ, $Q_{latstor,i-1}$ คือปริมาณน้ำ Lateral Flow ที่เกิดขึ้นในวันก่อนหน้า และ TT_{lag} ช่วงเวลาการเกิด Lateral Flow สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1.2-3 จาก L_{hill} คือค่าความยาวของพื้นที่ที่เป็นเนินเขา (m) และ $K_{sat,mx}$ คือค่าการซึมของน้ำผ่านดินที่สูงที่สุดของหน้าตัดดิน

$$Q_{lat} = \left(Q'_{lat} + Q_{latstor,i-1}\right).\left[1 - \exp\left[\frac{-1}{TT_{lag}}\right]\right] \qquad [6.4.2\text{-}2]$$

$$TT_{lag} = 10.4 \,.\, \frac{L_{hill}}{K_{sat,mx}} \qquad [6.4.2\text{-}3]$$

6.5 การคำนวณน้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดินคือปริมาณน้ำที่อยู่ในชั้นดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Zone) โดยระดับน้ำใต้ดินคือระดับความลึกที่แรงดันระหว่างน้ำและดินโดยรอบมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ น้ำจะเข้าสู่ชั้นน้ำใต้ดินโดยกระบวนการซึมของน้ำลงผ่านดิน (Infiltration) และการเคลื่อนที่ของน้ำในดิน (Percolation) และจะเคลื่อนออกจากชั้นน้ำใต้ดินไปยังลำน้ำหรือแหล่งน้ำข้างเคียง แต่อาจมีน้ำเคลื่อนตัวขึ้นจากระดับน้ำใต้ดินเข้าสู่ชั้นด้านบนซึ่งเป็นโซนเหนือระดับน้ำใต้ดินที่มีความอิ่มตัว

แบบจำลอง SWAT จำลองระดับน้ำใต้ดินใน 2 ส่วนได้แก่ ชั้นน้ำตื้น (Shallow Aquifer) เป็นชั้นน้ำบาดาลแบบที่น้ำไม่ถูกกักเก็บและไหลออกไปในช่องทางหลักหรือในลุ่มน้ำย่อย ส่วนชั้นน้ำลึก (Deep Aquifer) เป็นชั้นน้ำบาดาลที่น้ำถูกกักเก็บในระดับลึกเกิดการไหลของลำน้ำในบริเวณที่อยู่นอกพื้นที่ลุ่มน้ำ

6.5.1 ชั้นน้ำใต้ดินระดับตื้น (Shallow Aquifer)

การคำนวณสมดุลน้ำในชั้นน้ำตื้น (Shallow Aquifer) แสดงดังสมการที่ 6.5.1-1 แบบจำลอง SWAT มีการพิจารณาถึงปริมาณน้ำในชั้นน้ำตื้นในวันก่อนหน้า ($aq_{sh,i-1}$) (mm H_2O), ปริมาณน้ำที่เติมเข้าสู่ในชั้นน้ำตื้น ($w_{rchrg,sh}$) (mm H_2O), ปริมาณน้ำใต้ดิน (Q_{gw}) (mm H_2O) ที่เข้าสู่ลำน้ำหลัก, ปริมาณน้ำที่เข้าสู่ชั้นดินเมื่อเกิดการขาดแคลนน้ำ w_{revap} (mm H_2O) และปริมาณน้ำที่ถูกสูบออกจากชั้นน้ำตื้น ($w_{pump,sh}$) (mm H_2O)

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \qquad [6.5.1\text{-}1]$$

ปริมาณน้ำที่เติมเข้าสู่ในชั้นน้ำตื้น ($w_{rchrg,sh}$) คำนวณจากสมการที่ 6.5.1-2 ซึ่งความแตกต่างของปริมาณน้ำในชั้นน้ำตื้นกับปริมาณน้ำที่เข้าสู่ชั้นน้ำลึก (w_{deep}) โดยที่ $w_{rchrg,sh}$ และ w_{deep} คำนวณจากสมการที่ 6.5.1-2 ถึงสมการที่ 6.5.1-5

$$w_{rchrg,sh} = w_{rchrg,i} - w_{deep} \quad [6.5.1\text{-}2]$$

ปริมาณน้ำที่เติมเข้าสู่ชั้นน้ำตื้นในวันหนึ่งๆ ($w_{rchrg,i}$) คำนวณจากสมการที่ 6.5.1-3 พิจารณาจากปริมาณน้ำที่ออกจากหน้าตัดดินชั้นล่างสุด (w_{seep}) ในวันที่ i (mm H_2O) ตามสมการที่ 6.5.1-4 และ δ_{gw} (วัน) คือระยะเวลาการระบายน้ำของชั้นหินที่อยู่ด้านบนซึ่งแบบจำลอง SWAT จะประมาณค่าจากผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณปริมาณน้ำที่เติมเข้าสู่ชั้นน้ำตื้นและค่าตรวจวัด และค่าของปริมาณน้ำเติมเข้าสู่ชั้นน้ำตื้นในวันก่อนหน้า ($w_{rchrg,i-1}$)

$$w_{rchrg,i} = \left(1 - \exp\left[-\frac{1}{\delta_{gw}}\right]\right).w_{seep} + \exp\left[-\frac{1}{\delta_{gw}}\right].w_{rchrg,i-1} \quad [6.5.1\text{-}3]$$

$$w_{seep} = w_{perc,ly=n} + w_{crk,btm} \quad [6.5.1\text{-}4]$$

$$w_{deep} = \beta_{deep}.w_{rchrg} \quad [6.5.1\text{-}5]$$

ปริมาณน้ำใต้ดินในชั้นน้ำตื้นก่อให้เกิดการไหลพื้นฐาน (Base Flow) (Q_{gw}) ซึ่งจะไหลออกสู่ลำน้ำสายหลักหรือลำน้ำอื่นๆที่อยู่ในลุ่มน้ำ ซึ่งน้ำดินในชั้นนี้จะไหลเข้าสู่ลำน้ำหลักก็ต่อเมื่อปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในชั้นน้ำตื้นมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนดให้กับแบบจำลอง การคำนวณปริมาณน้ำใต้ดิน (Q_{gw}) ในวันหนึ่ง (i) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 6.5.1-6 โดยคำนวณจาก K_{sat} คือค่าการเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นดินน้ำตื้น (Saturated Hydraulic Conductivity) (mm/day), L_{gw} คือระยะทางจากเส้นแบ่งลุ่มน้ำจนถึงลำน้ำสายหลักของลุ่มน้ำ (m) และ h_{wtbl} คือระดับความลึกของระดับน้ำใต้ดิน (m)

$$Q_{gw} = \frac{8000.\ K_{sat}}{L_{gw}^2}.h_{wtbl} \quad [6.5.1\text{-}6]$$

w_{revap} (mm H_2O) เป็นตัวแปรในแบบจำลอง SWAT โดยเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำใต้ดินในชั้นน้ำตื้นที่เคลื่อนที่เข้าสู่เขตชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้านบนในช่วงเวลาที่ชั้นดินด้านบนอยู่ในสภาวะแห้งแล้งก่อให้เกิดการระเหยและการแพร่ของน้ำจากชั้นน้ำตื้นขึ้นด้านบน หรือน้ำชั้นน้ำตื้นสามารถออกจากชั้นนี้ได้จากพืชที่มีรากลึกที่สามารถดึงน้ำได้โดยตรงจากชั้นน้ำบาดาล w_{revap} จะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน และจะเกิดขึ้นได้เมื่อปริมาณน้ำที่กักเก็บในชั้นน้ำบาดาลหรือชั้นน้ำตื้นมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด สมการที่ 6.5.1-7 แสดงการคำนวณค่า w_{revap} ที่สูงที่สุด $w_{revap,mx}$ (mm H_2O) และค่า w_{revap} ในแต่ละวันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.5.1-8 ถึง

6.5.1-10 โดยที่ aq_{sh} (mm H_2O) และ $aq_{shthr,rvp}$ (mm H_2O) คือค่า ปริมาณน้ำที่กักเก็บในวันเริ่มต้น (i) และ ระดับน้ำขั้นต่ำในชั้นน้ำตื้นที่ถูกกำหนดเพื่อให้เกิดกระบวนการการเคลื่อนที่ของน้ำ w_{revap}

$$w_{revap,mx} = \beta_{rev} \cdot E_o \quad [6.5.1\text{-}7]$$

$$w_{revap} = 0 \quad ; aq_{sh} \leq aq_{shthr,rvp} \quad [6.5.1\text{-}8]$$

$$w_{revap} = w_{revap,mx} - aq_{shthr,rvp} \quad ; aq_{shthr,rvp} \leq aq_{sh} < (aq_{shthr,rvp} + w_{revap,mx}) \quad [6.5.1\text{-}9]$$

$$w_{revap} = w_{revap,mx} \quad ; aq_{sh} \geq (aq_{shthr,rvp} + w_{revap,mx}) \quad [6.5.1\text{-}10]$$

$w_{pump,sh}$ คือปริมาณน้ำที่เป็นแหล่งน้ำสำหรับใช้เพื่อการเกษตรหรือกิจกรรมอื่นๆที่ถูกนำออกจากแหล่งน้ำชั้นตื้นซึ่งสามารถนำเข้าได้ในแบบจำลอง SWAT

6.5.2 ชั้นน้ำใต้ดินระดินลึก (Deep Aquifer)

การพิจารณาสมดุลน้ำของชั้นน้ำใต้ดินในระดับลึกในแต่ละวัน ($aq_{dp,i}$) (mm H_2O) พิจารณาจากปัจจัย 3 ส่วนได้ แก่ ปริมาณน้ำใต้ดินในวันก่อนหน้า ($aq_{dp,i-1}$) (mm H_2O) ปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในชั้นน้ำใต้ดินในระดับลึก (w_{deep}) (mm H_2O) และปริมาณน้ำที่เป็นแหล่งน้ำสำหรับใช้เพื่อการเกษตรหรือกิจกรรมอื่นๆที่ถูกนำออกจากแหล่งน้ำชั้นน้ำใต้ดินระดับลึกซึ่งสามารถนำเข้าได้ในแบบจำลอง SWAT ($w_{pump,dp}$) (mm H_2O)

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + w_{deep} - w_{pump,dp} \quad [6.5.2\text{-}1]$$

6.6 การเคลื่อนที่ของน้ำในลำน้ำ

การไหลในช่องทางน้ำเปิดหรือลำน้ำในลุ่มน้ำแบบจำลอง SWAT คำนวณความเร็วและอัตราการไหลโดยสมการ Manning's Equation และการคำนวณการเคลื่อนที่ของน้ำในลำน้ำต่างๆ (Channel Network) แบบจำลอง SWAT มีวิธีการที่ใช้ในการคำนวณ 2 วิธี ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในลำน้ำ (Variable Storage) และ Muskingum Routing Method ซึ่งเป็นการคำนวณการเคลื่อนที่ Kinematic Wave Modelรายละเอียดดังนี้

6.6.1 สมการ Manning's Equation

การอัตราการไหลโดยสมการ Manning's Equation แสดงดังสมการที่ 6.6.1-1 และความเร็วของกระแสน้ำ แสดงดังสมการที่ 6.6.1-2 โดยอัตราการไหลของน้ำในลำน้ำ (q_{ch}) (m^3/s) และความเร็วของกระแสน้ำ (v_c) (m/s) คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ (A_{ch}) (m^2), ค่า Hydraulic Radius ($R_{ch}^{2/3}$) (m), ค่าความลาดชันของลำน้ำ ($slp_{ch}^{1/2}$) (m/m) และสัมประสิทธิ์ Manning (n)

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} . R_{ch}^{2/3} . slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad [6.6.1\text{-}1]$$

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} . slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad [6.6.1\text{-}2]$$

จากสมการที่ 6.6.1-1 ค่า R_{ch} คำนวณโดยสมการที่ 6.6.1-3 โดยมีปัจจัยพื้นที่หน้าตัดลำน้ำ (A_{ch}) และค่า Wetted Perimeter (m) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 6.6.1-4 โดย คือความกว้างของท้องน้ำ W_{btm} (m) และ z_{ch}^2 คือส่วนกลับของความชันลำน้ำ และ $depth$ (m) คือความลึกของลำน้ำ

$$R_{ch} = \frac{A_{ch}}{P_{ch}} \quad [6.6.1\text{-}3]$$

$$P_{ch} = W_{btm} + 2 . depth . \sqrt{1 + z_{ch}^2} \quad [6.6.1\text{-}4]$$

6.6.2 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในลำน้ำ (Variable Storage Routing Method)

การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในลำน้ำแต่ละช่วงที่กำหนดจะถูกคำนวณโดยสมการ Continuity Equation (สมการที่ 6.6.2-1) โดยพิจารณาปริมาณน้ำที่เข้าในช่วงเวลาหนึ่ง (V_{in}) (m^3 H_2O) และปริมาณน้ำออกในช่วงเวลาหนึ่ง (V_{out}) (m^3 H_2O) ของลำน้ำที่กำหนดเป็นหลัก

$$V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad [6.6.2\text{-}1]$$

โดยสมการที่ 6.6.2-1 เมื่อพิจารณาจากอัตราการไหลเข้าในช่วงเวลาเริ่มต้น ($q_{in,1}$) (m^3/s) และช่วงเวลาสุดท้ายที่พิจารณา ($q_{in,2}$) (m^3/s) และอัตราการไหลออกในช่วงเวลาเริ่มต้น ($q_{out,1}$) (m^3/s) และช่วงเวลาสุดท้ายที่พิจารณา ($q_{out,2}$) (m^3/s) รวมถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในช่วงเวลาที่เริ่มต้น ($V_{stored,1}$) (m^3 H_2O) และปริมาณน้ำที่มีอยู่ในช่วงเวลาสุดท้าย ($V_{stored,2}$) (m^3 H_2O) แสดงดังสมการที่ 6.6.2-2 และเมื่อพิจารณาอัตราการไหลเข้าเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่ง ($q_{in,ave} = \frac{q_{in,1} + q_{in,2}}{2}$) จากสมการที่ 6.6.2-2 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 6.6.2-3

$$\Delta t.\left[\frac{q_{in,1}+q_{in,2}}{2}\right]-\Delta t.\left[\frac{q_{out,1}+q_{out,2}}{2}\right]=V_{stored,2}-V_{stored,1} \quad [6.6.2\text{-}2]$$

$$q_{in,ave}+\frac{V_{stored,1}}{\Delta t}-\frac{q_{out,1}}{2}=\frac{V_{stored,2}}{\Delta t}+\frac{q_{out,2}}{2} \quad [6.6.2\text{-}3]$$

ซึ่งการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในลำน้ำต้องพิจารณาระยะเวลาการเดินทางของน้ำ (TT) (s) ดังสมการที่ 6.6.2-4 และเมื่อนำค่า (TT) แทนค่าในสมการที่ 6.6.2-3 จะแสดงดังสมการที่ 6.6.2-5 และจากสมการที่ 6.6.2-5 สามารถเขียนใหม่ได้แสดงดังสมการที่ 6.6.2-6 โดยที่ $\left[\frac{2.\Delta t}{2.TT+\Delta t}\right]=SC$ (Storage Coefficient) สุดท้ายสามารถคำนวณปริมาณน้ำในช่วงเวลาสุดท้ายได้ดังสมการที่ 6.6.2-7

$$TT=\frac{V_{stored}}{q_{out}}=\frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}}=\frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}} \quad [6.6.2\text{-}4]$$

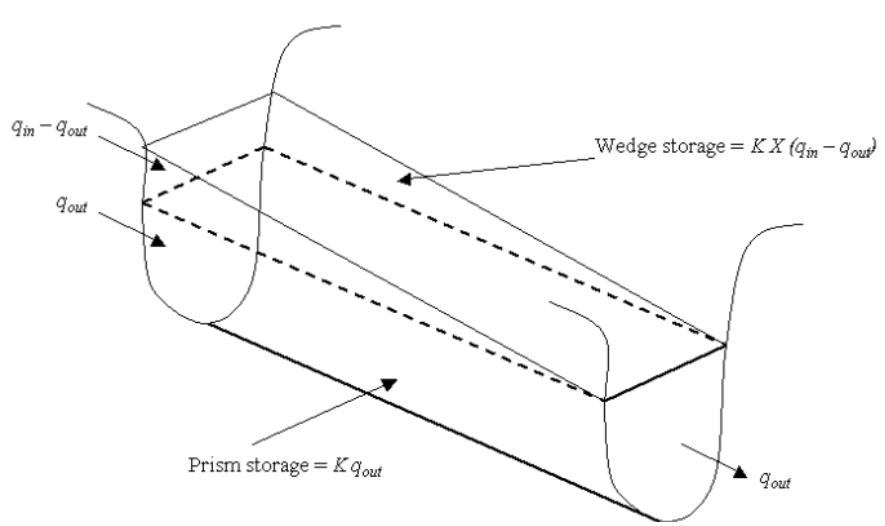
$$q_{in,ave}+\frac{V_{stored,1}}{\left[\frac{\Delta t}{TT}\right].\left[\frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}}\right]}-\frac{q_{out,1}}{2}=\frac{V_{stored,2}}{\left[\frac{\Delta t}{TT}\right].\left[\frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}}\right]}+\frac{q_{out,2}}{2} \quad [6.6.2\text{-}5]$$

$$q_{out,2}=\left[\frac{2.\Delta t}{2.TT+\Delta t}\right].q_{in,ave}+\left[1-\frac{2.\Delta t}{2.TT+\Delta t}\right].q_{out,1} \quad [6.6.2\text{-}6]$$

$$V_{out,2}=SC.(V_{in}+V_{stored,1}) \quad [6.6.2\text{-}7]$$

6.6.3 Muskingum Routing Method

วิธีการของ Muskingum Routing Method เป็นการคำนวณเคลื่อนที่ของน้ำแสดงดัง**รูปที่ 6.6.3-1** และปริมาณน้ำที่มีอยู่ (V_{stored}) (m^3 H_2O) แสดงดังสมการที่ 6.6.3-1 โดยที่ค่า K คือ ช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำอยู่ในลำน้ำ (s) และ X คือค่าถ่วงน้ำหนักความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเข้า (q_{in}) (m^3 H_2O) ปริมาณน้ำออก (q_{out}) (m^3 H_2O) สำหรับการพิจารณาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในลำน้ำที่กำหนด ซึ่งจากสมการที่ 6.6.3-1 เมื่อนำไปพิจารณาร่วมกับสมการที่ 6.6.3-2 (สมการ Continuity Equation) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 6.6.3-2 โดยที่ค่า K แสดงดังสมการที่ 6.6.3-3 และ c_k



ที่มา: Neistch et al. (2009)

รูปที่ 6.6.3-1 ลักษณะลำน้ำและปัจจัยสำหรับการคำนวณปริมาณน้ำในลำน้ำ

$$V_{stored} = K.q_{out} + K.X.\ (q_{in} + q_{out}) \quad [6.6.3\text{-}1]$$

$$q_{out,2} = C_1.q_{in,2} + C_2.q_{in,1} + C_3.q_{out,1} \quad [6.6.3\text{-}2]$$

$$K = \frac{1000.L_{ch}}{c_k}\ ;\ c_k = \frac{5}{3}\left[\frac{R_{ch}^{\frac{2}{3}}.slp_{ch}^{\frac{1}{2}}}{n}\right] = \frac{5}{3}.v_c \quad [6.6.3\text{-}3]$$

โดยที่ C_1 , C_2 และ C_3 แสดงดังสมการที่ 6.7-4 ถึง 6.7-6 ($C_1 + C_2 + C_3 = 1$) และเมื่อพิจารณาค่า C_1 , C_2 และ C_3 ร่วมกับสมการที่ 6.7-2 ปริมาณน้ำออกในช่วงเวลาสุดท้ายแสดงดังสมการที่ 6.6.3-7

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2.K.X}{2.K.(1-X) + \Delta t} \quad [6.6.3\text{-}4]$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2.K.X}{2.K.(1-X) + \Delta t} \quad [6.6.3\text{-}5]$$

$$C_3 = \frac{2.K.(1-X) - \Delta t}{2.K.(1-X) + \Delta t} \quad [6.6.3\text{-}6]$$

$$V_{out,2} = C_1.V_{in,2} + C_2.V_{in,1} + C_3.V_{out,1} \quad [6.6.3\text{-}7]$$

คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม

1. จงอธิบายถึงปัจจัยหลักที่ต้องนำเข้าสู่แบบจำลอง SWAT (Input data) พร้อมทั้งอธิบายโดยสังเขปถึงความสำคัญของแต่ละปัจจัยในการคำนวณในแบบจำลอง

2. ในการคำนวณปริมาณน้ำท่าผิวดินของแบบจำลอง SWAT จงอธิบายถึงความแตกต่างหลักของวิธีการ SCS Curve Number Method (SCS) และวิธีการ Greem & Ampt Method

3. จงอธิบายถึงความแตกต่างของปัจจัยนำเข้า (Input data) และวิธีการที่ใช้ในการคำนวณการคายระเหยของ Penman-Monteith method, Priestley-Taylor method และ Hargreaves method

4. ประยุกต์ใช้แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool (SWAT) เพื่อประเมินถึงปริมาณน้ำท่าต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อย่างน้อย 2 สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก

5. จัดทำรายงานแสดงผลการศึกษาตามข้อที่ 4 พร้อมทั้งวิเคราะห์และอภิปรายผลการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

Neitsch, S.L., Arnold, J.R., Kiniry J.R., Williams, J.R. 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406. Texas A&M University System College Station, Texas.

Me, W., Abell, J.M. and Hamilton, D.P. (2015). Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. Hydrology and Earth System Sciences, 19, 4127-4147.

บทที่ 7 – ความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

Chapter 7 – Climate Change Vulnerability and Risks

บทที่ 7

ความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ | Climate Change Vulnerability and Risks

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในหลายมิติ ความแปรปรวนของลักษณะอากาศ (Climate variability) และการเพิ่มขึ้นของเหตุการณ์สุดขั้วในหลายรูปแบบส่งผลต่อการสูญเสียชีวิต ทรัพย์สิน รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ อย่างไรก็ตามผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นส่งผลในแต่ละพื้นที่ที่หรือแต่ละชุมชนที่แตกต่างกัน เนื่องด้วยในแต่ละกลุ่มประชากร พื้นที่ และชุมชนมีความเปราะบางและความเสี่ยงที่จะได้รับผลกระทบที่แตกต่างกัน ดังนั้นการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยงที่จะเกิดผลกระทบเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสามารถหาวิธีการรับมือกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากบทที่ 5 ได้นำเสนอผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อทรัพยากรน้ำโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยาร่วมกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งแสดงเห็นว่าสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่างๆมีผลกระทบก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางอุทกวิทยาในหลายด้าน ทั้งการเปลี่ยนแปลงปริมาณและรูปแบบการเกิดฝนซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบถึงปริมาณน้ำผิวดิน ปริมาณน้ำใต้ดิน รวมถึงการเกิดภัยพิบัติในรูปแบบต่างๆ ทั้งทางด้านอุทภัยและภัยแล้ง ดังนั้นการประเมินถึงความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศจึงมีส่วนสำคัญในการพิจารณาหาแนวทางการจัดการด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อไปในอนาคต

7.1 นิยามและกรอบแนวคิดของความเปราะบางและความเสี่ยง

7.1.1 นิยามและกรอบแนวคิดของความเปราะบาง

ในการประเมินถึงความเปราะบางและความเสี่ยงของระบบ ชุมชน สิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานทางสังคม เศรษฐกิจและวัฒนธรรม ในพื้นที่หนึ่งๆที่กำหนดไว้ (ต่อไปจะใช้ในคำว่าระบบ) จำเป็นต้องเข้าใจถึงความหมายของทั้งความเปราะบางและความเสี่ยงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยความเปราะบาง (Vulnerability: V) หมายถึงระบบทางธรรมชาติหรือระบบสังคมที่มีความอ่อนไหวและถูกทำลายจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากนิยามนี้สามารถระบุได้ถึงความหมายของความอ่อนไหวของระบบ (Sensitivity: S) และการเผชิญต่อภัย (Exposure: E) ซึ่งจากนั้น IPCC ได้มีการขยายขอบเขตความหมายของความเปราะบางหมายถึงระดับ

ของผลกระทบทางลบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รวมถึงความแปรปรวนของลักษณะอากาศและเหตุการณ์สุดขั้ว ที่ระบบ สภาพแวดล้อม หรือชุมชนหนึ่งไม่สามารถที่จะรับมือกับผลกระทบดังกล่าวได้ (IPCC, 2007) โดยจะเห็นได้ว่าความหมายของความเปราะบางมีเพิ่มมากขึ้นจากความอ่อนไหวและการเผชิญต่อภัย ได้มีการเพิ่มความสามารถในการรับมือผลกระทบ (Adaptive Capacity: AC) ให้เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในความหมายของเปราะบางที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Ludena et al., 2015)

อย่างไรก็ตาม IPCC (2014) ได้มีการปรับปรุงกรอบนิยามของความเปราะบาง โดยเน้นให้ความเปราะบางเป็นส่วนหนึ่งของการประเมินความเสี่ยง โดยที่มีการแยกในส่วนของการเผชิญต่อภัย (E) ออกจากความเปราะบาง (V) ซึ่งจะเป็นการเน้นในส่วนของลักษณะภายในของระบบเอง จากนั้นผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในส่วนของการประเมินความเสี่ยง **ตารางที่ 7.1.1-1** แสดงความแตกต่างของกรอบแนวคิดความเปราะบางระหว่าง IPCC (2007) และ IPCC (2014) ซึ่งกรอบแนวคิดความเปราะบางของ IPCC (2014) ได้ถูกนำมาใช้งานต่อใน IPCC (2022)

ตารางที่ 7.1.1-1ความแตกต่างของกรอบแนวคิดความเปราะบางระหว่าง IPCC (2007) และ IPCC (2014)

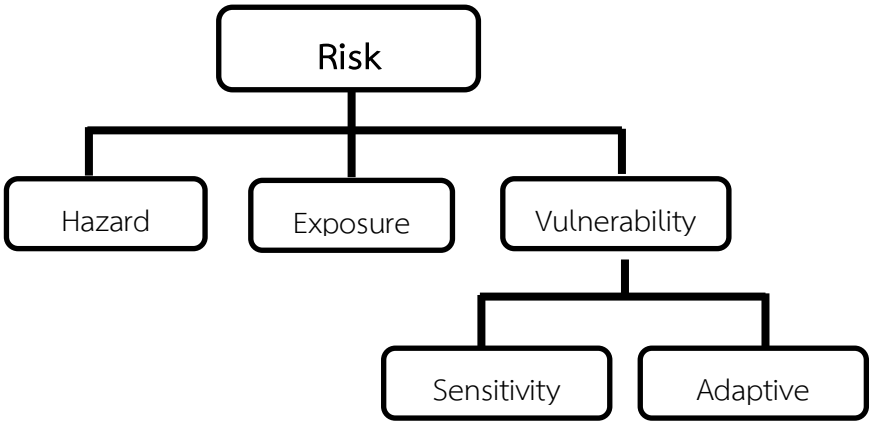
กรอบแนวคิด IPCC (2007)	กรอบแนวคิด IPCC (2014)
องค์ประกอบของความเปราะบางประกอบด้วย - การเผชิญต่อภัย (Exposure) - ความอ่อนไหวของระบบ (Sensitivity) - ความสามารถในการปรับตัว (Adaptive Capacity)	องค์ประกอบของความเปราะบางประกอบด้วย - ความอ่อนไหวของระบบ (Sensitivity) - ความสามารถในการปรับตัว (Adaptive Capacity) โดยความเปราะบางจะถูกนำไปประเมินร่วมกันกับความเสี่ยง ซึ่งการเผชิญต่อภัย (Exposure) จะอยู่ในการประเมินความเสี่ยง
ความเปราะบางจะพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในท้ายสุดหลังจากการพิจารณาการเผชิญภัย (E) เนื่องด้วยความอ่อนไหว (S) และความสามารถในการปรับตัวของระบบ (AC)	ความเปราะบางจะพิจารณาถึงจุดอ่อนของระบบและแนวโน้มของความสามารถในการปรับตัว (S และ AC)
มุ่งเน้นที่การประเมินถึงการเผชิญต่อภัย (E) และผลลัพธ์ทางด้านลบที่เกิดขึ้นกับระบบ	มุ่งเน้นในการประเมินถึงสถานะภายในของระบบ
พิจารณาการเผชิญต่อภัย (E) หมายถึงภัยอันตราย (H) ที่ได้รับ	พิจารณาการเผชิญต่อภัย (E) แยกจากการประเมินความเปราะบาง

กรอบแนวคิด IPCC (2007)	กรอบแนวคิด IPCC (2014)
การเผชิญต่อภัย (E) หมายถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากภัยอันตราย (H) ซึ่งเป็นปัจจัยตั้งต้นของการเผชิญต่อภัย	การเผชิญต่อภัย (E) หมายถึงตำแหน่งที่ตั้งซึ่งได้รับผลกระทบจากภัยอันตราย ดังนั้น E ถูกพิจารณาเชิงพื้นที่ และภัยอันตราย (H) เป็นปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อ E และความเปราะบาง (V) เป็นส่วนหนึ่งที่ก่อให้เกิดความเสี่ยง

ที่มา: Sharma et al., 2018

7.1.2 นิยามและกรอบแนวคิดของความเสี่ยง

ความเสี่ยง (Risk) หมายถึงโอกาสที่จะเกิดผลกระทบกับระบบซึ่งผลลัพธ์ที่เกิดจะมีความไม่แน่นอน และลักษณะผลลัพธ์ที่เกิดจะมีความหลากหลาย โดยความเสี่ยงจะเกิดจากความน่าจะเป็นหรือโอกาสของเหตุการณ์อันตรายต่างๆที่อาจเกิดขึ้นพิจารณาร่วมกับผลกระทบหากเหตุการณ์นั้นๆเกิดขึ้น ซึ่งการประเมินความเสี่ยงเป็นการพิจารณาดัชนีร่วมกัน 3 ดัชนี ได้แก่ ความเปราะบาง (Vulnerability), การเผชิญต่อภัย (Exposure) และ อันตราย (Hazard) **รูปที่ 7.1.2-1** แสดงองค์ประกอบของการประเมินความเสี่ยง ซึ่งเป็นองค์ประกอบตาม IPCC (2014) โดยที่การเผชิญต่อภัย (E) จะถูกแยกออกจากการประเมินความเปราะบางและนำมาใช้ในการประเมินถึงความเสี่ยง (R)

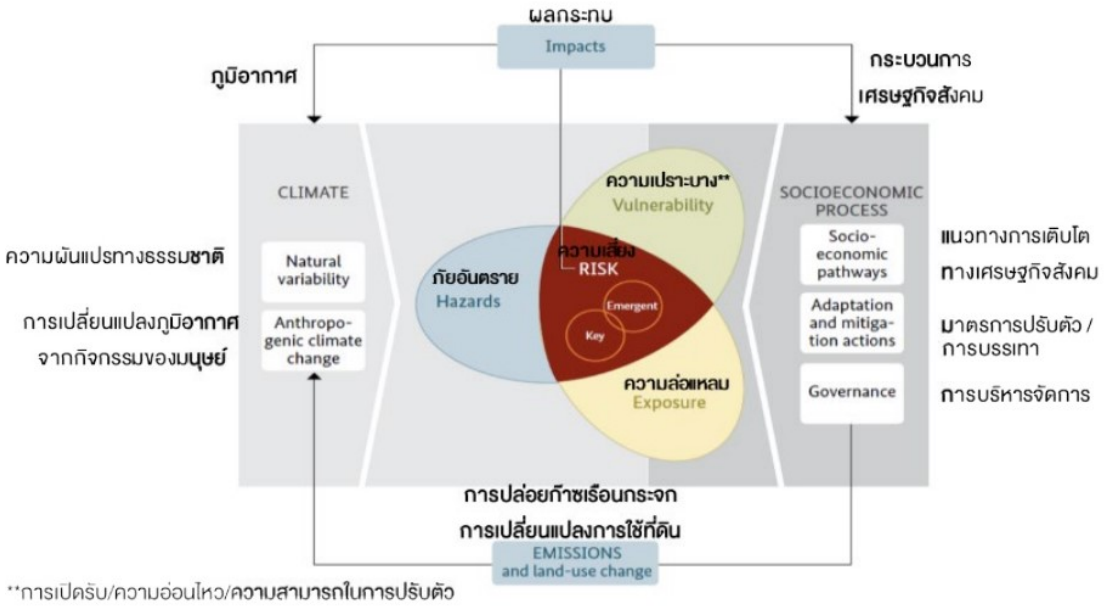


ที่มา: Sharma et al., 2018

รูปที่ 7.1.2-1 องค์ประกอบของการประเมินความเสี่ยง

ในการประเมินความเสี่ยงจำเป็นต้องมีการประเมินดัชนีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดข้างต้น โดยมีปัจจัยที่เป็นส่วนเกี่ยวเนื่อง ได้แก่ ลักษณะความแปรปรวนทางด้านภูมิอากาศที่สามารถเกิดขึ้นได้จากทั้งธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ ปัจจัยทางด้านสังคมในเรื่องของการเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมของชุมชน การใช้มาตรการเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก หรือมาตรการเพื่อปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการบริหารจัดการของระบบนั้น นอกจากนั้นยังต้องมีการพิจารณา

ถึงสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละพื้นที่หรือแต่ละช่วงเวลารวมถึงการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ การเชื่อมโยงปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวเนื่องแสดงดัง**รูปที่ 7.1.2-2**



ที่มา: องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (GIZ) (2565)

รูปที่ 7.1.2-2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยง (Risk)

การประเมินความเสี่ยงและความเปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีส่วนสำคัญหลักในการประเมินถึงสภาวะที่ระบบ ชุมชน หรือสิ่งแวดล้อมจะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยความสำคัญของการประเมินความเปราะบางได้แก่

(1) การประเมินความเปราะบางจะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาแนวทางการปรับตัวสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

(2) ผลของการประเมินความเปราะบางสามารถนำไปจัดลำดับความสำคัญของพื้นที่หรือชุมชนที่จำเป็นต้องได้รับการช่วยเหลือหรือพัฒนาแนวทางการปรับตัวได้

(3) รายละเอียดที่ได้จากการประเมินความเปราะบางสามารถนำไปขอสนับสนุนงบประมาณจากหน่วยงานต่างๆเพื่อช่วยเหลือในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพื่อบรรเทาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น

(4) ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำเสนอต่อกรรมการภายใต้อนุสัญญาว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกตามข้อตกลงปารีส (Paris Agreement) มาตราที่ 9 ที่ได้กำหนดให้แต่ละประเทศมีการประเมินผลกระทบและความเปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

7.2 ดัชนีที่ใช้ในการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยง

จากนิยามความเปราะบางข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลกระทบทางลบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะส่งผลในแต่ละระบบหรือแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกันเนื่องด้วยลักษณะสภาพสิ่งแวดล้อม ความเป็นอยู่ ชุมชนหรือวิถีชีวิตที่แตกต่างกัน ซึ่งดัชนีที่ใช้ในการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยงประกอบไปด้วย 5 ดัชนี ดังนี้

1) **การเผชิญต่อภัย (Exposure)**: การเผชิญต่อภัยหมายถึงระบบใดๆ เช่น ชุมชน สิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานทางสังคม เศรษฐกิจและวัฒนธรรมที่อาจได้รับผลกระทบทางลบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับถิ่นที่อยู่ ลักษณะภูมิอากาศ ภูมิประเทศของแต่ละพื้นที่ ลักษณะของการเผชิญต่อภัยเป็นลักษณะที่เกิดเหตุการณ์สภาพภูมิอากาศภายนอกมากระทบกับระบบ ตัวอย่างเช่น ชุมชนที่มีถิ่นที่อยู่บริเวณใกล้ชายฝั่งจะมีโอกาสได้รับผลกระทบทางลบจากการเกิดเหตุการณ์สุดขั้ว เช่น ความรุนแรงของพายุ และการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำ มากกว่าบริเวณชุมชนที่อยู่ในเขตพื้นที่ห่างไกลชายฝั่ง เป็นต้น

2) **ความอ่อนไหว (Sensitivity)**: ระดับความอ่อนไหวหมายถึงลักษณะของระบบใดๆ เมื่อได้รับผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วและในระดับที่สูง ซึ่งความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะภายในของระบบนั้นๆ ตัวอย่างเช่น ชุมชนที่ตั้งอยู่ริมทะเลที่พึ่งพาทางเศรษฐกิจโดยการท่องเที่ยวจะมีความอ่อนไหวมากเมื่อได้รับผลกระทบจากเหตุการสุดขั้วเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่น การเกิดพายุรุนแรง มากกว่าชุมชนที่ตั้งอยู่ริมทะเลและมีลักษณะของชุมชนที่ประชาชนส่วนใหญ่มีอาชีพอยู่ในพื้นที่อื่น

3) **ความสามารถในการปรับตัว (Adaptive Capacity)**: ความสามารถในการปรับตัวหมายถึงความสามารถในการปรับตัวต่อผลกระทบหรือสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของระบบใดๆ เช่น ลักษณะสภาพอากาศที่แปรปรวน หรือการเกิดความรุนแรงของสภาพอากาศ เป็นต้น ให้สามารถดำรงอยู่ได้ โดยระบบใดๆที่สามารถปรับตัวได้จำเป็นต้องอาศัยปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น งบประมาณ การศึกษาวิจัย เทคโนโลยี และทรัพยากรต่างๆที่มีในระบบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น หากเกิดเหตุการณ์สุดขั้วในชุมชนหนึ่งบ่อยครั้งมากกว่าในอดีตที่ผ่านมา เช่น การเกิดพายุหรือซึนามิ หากชุมชนมีงบประมาณและมีความเข้าใจเทคโนโลยีที่ดีจะสามารถหาแนวทางป้องกันเพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ เช่น การติดตั้งระบบเตือนภัยและการฝึกซ้อมเพื่อรับมือกับเหตุการณ์

4) ภัยอันตราย (Hazard): ภัยอันตรายมีความหมายถึงการเกิดขึ้นของเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติหรือจากการกระทำของมนุษย์ซึ่งส่งผลกระทบทางด้านลบในรูปแบบต่างๆ เช่น การเสียชีวิต บาดเจ็บ หรือเป็นเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต รวมถึงส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สินสาธารณูปโภค การดำรงชีวิตของมนุษย์ ระบบนิเวศและทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ซึ่งในส่วนของเหตุการณ์ที่เกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ได้แก่ การเกิดความแห้งแล้ง การเกิดอุทกภัย หรือการเกิดพายุต่างๆ เป็นต้น

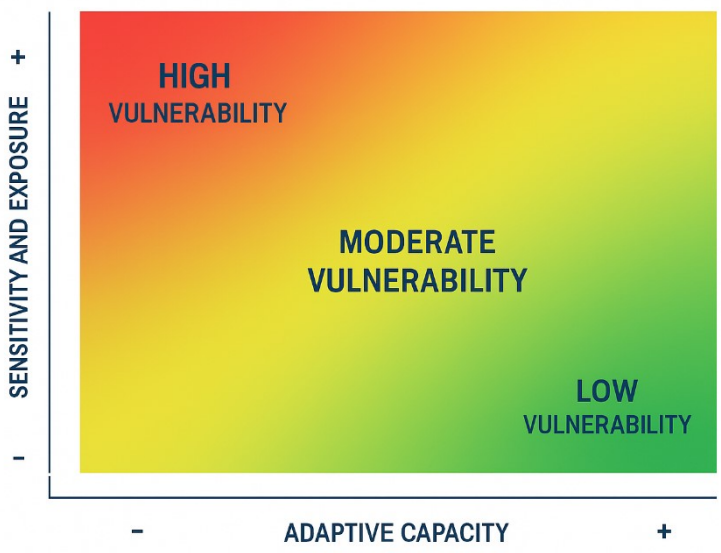
5) ผลกระทบ (Impact): ผลกระทบหมายถึงผลที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ต่างๆที่มีต่อระบบธรรมชาติและมนุษย์ โดยทั่วไปผลกระทบจะเกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิต สภาพความเป็นอยู่ สุขภาพ สังคม-วัฒนธรรม รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ซึ่งในความหมายที่เกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศผลกระทบที่เกิดขึ้นจะมุ่งเน้นไปถึงเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งๆ และในพื้นที่หนึ่งๆ ที่มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งในการพิจารณาจะพิจารณาผลที่เกิดขึ้นทั้งในช่วงเวลาที่เกิดเหตุการณ์และหลังจากเหตุการณ์นั้นๆสิ้นสุด

7.3 แนวทางการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยง

7.3.1 กรอบแนวคิดและกระบวนการการประเมินความเปราะบาง

ในการประเมินความเปราะบางในรูปแบบเดิมของ IPCC (2007) ต้องนำเอาดัชนีความเปราะบาง 3 ดัชนีมาใช้ในการประเมิน จากสมการที่ 7.3.1-1 แสดงให้เห็นว่าความเปราะบางขึ้นอยู่กับการเผชิญต่อภัย (Exposure: E) ความอ่อนไหว (Sensitivity: S) และความสามารถในการปรับตัว (Adaptive Capacity: AC) โดยที่หากระบบมีการการเผชิญต่อภัยและมีค่าความอ่อนไหวที่สูง ในขณะที่ความสามารถในการปรับตัวที่ต่ำ แสดงว่าระบบนั้นมีความเปราะบางที่สูง ในขณะที่หากระบบมีความสามารถในการปรับตัวสูง ในขณะที่มีการเผชิญต่อภัยและความอ่อนไหวที่ต่ำแสดงให้เห็นว่าระบบนั้นเป็นระบบที่มีความเปราะบางที่ต่ำ **รูปที่ 7.3.1-1** แสดงระดับความเปราะบางซึ่งขึ้นอยู่กับการประเมินร่วมกันระหว่างความอ่อนไหว-การเผชิญต่อภัย และความสามารถในการปรับตัว ซึ่งจะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าระบบ ชุมชน หรือสิ่งแวดล้อมมีความสามารถในการปรับตัวที่สูง (Adaptive Capacity มีค่าที่เป็นบวกสูงมาก) แต่หากระบบนั้นๆ ยังคงมีความอ่อนไหวและมีการเผชิญต่อภัยที่สูง (Sensitivity / Exposure ที่มีค่าเป็นบวกสูงมาก) ระบบนั้นก็ยังคงมีค่าความเปราะบางที่สูง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศสามารถที่จะส่งผลกระทบต่อระบบและก่อให้เกิดผลลัพธ์ด้านลบต่อระบบได้

$$Vulenerability = f(exposure(+); Sensitivity\ (+); Adaptive\ capacity\ (-)) \qquad [7.3.1\text{-}1]$$



รูปที่ 7.3.1-1 ระดับของความเปราะบางจากการพิจารณาความอ่อนไหว การเผชิญต่อภัย และความสามารถในการปรับตัว

อย่างไรก็ตาม IPCC (2017) และ IPCC (2022) มีแนวทางการประเมินความเปราะบางโดยตัดส่วนของดัชนีการเผชิญต่อภัย (E) ออกจากการพิจารณา และใช้ดัชนีเพียง 2 ดัชนี ได้แก่ ความอ่อนไหว (S) และความสามารถในการปรับตัว (AC) เข้ามาประเมินความเปราะบาง ซึ่งดัชนีทั้ง 2 นี้มีความแตกต่างในการประเมินความเปราะบางอย่างชัดเจน จะเห็นได้ว่าความอ่อนไหวมีความผันแปรตรงกับความเปราะบางโดยที่เมื่อความอ่อนไหวของระบบเพิ่มขึ้นความเปราะบางก็จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการปรับตัวจะมีลักษณะที่ตรงข้ามกับความเปราะบาง แสดงดังสมการที่ 7.3.1-2

$$Vulnerability = fSensitivity\ (+); Adaptive\ capacity\ (-)) \qquad [7.3.1\text{-}2]$$

โดยที่ $$\mathrm{V} \propto \mathrm{S}; V \propto \frac{1}{AC} \rightarrow V = f\left[S, \frac{1}{AC}\right]$$

สำหรับกระบวนการประเมินความเปราะบางสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กระบวนการหลัก (**รูปที่ 7.3.1-2**) ได้แก่ การกำหนดขอบเขตการประเมิน (Scoping the assessment) การประเมินความเปราะบาง (Conducting the assessment) และการนำผลลัพธ์จากการประเมินไปใช้ในการวางแผนการปรับตัว (Implementation for adaptation) (Sharma et al. (2018) มีรายละเอียดดังนี้

(1) การกำหนดขอบเขตการประเมิน: กระบวนการกำหนดขอบเขตการประเมินเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นกระบวนการที่จะกำหนดระบบ เช่น พื้นที่ ชุมชน และสิ่งแวดล้อมหนึ่งๆ ที่สนใจที่จะประเมินความเปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เนื่องจากลักษณะของแต่ละระบบจะมีลักษณะของตัวระบบ ความอ่อนไหว ความสามารถในการปรับตัวของ

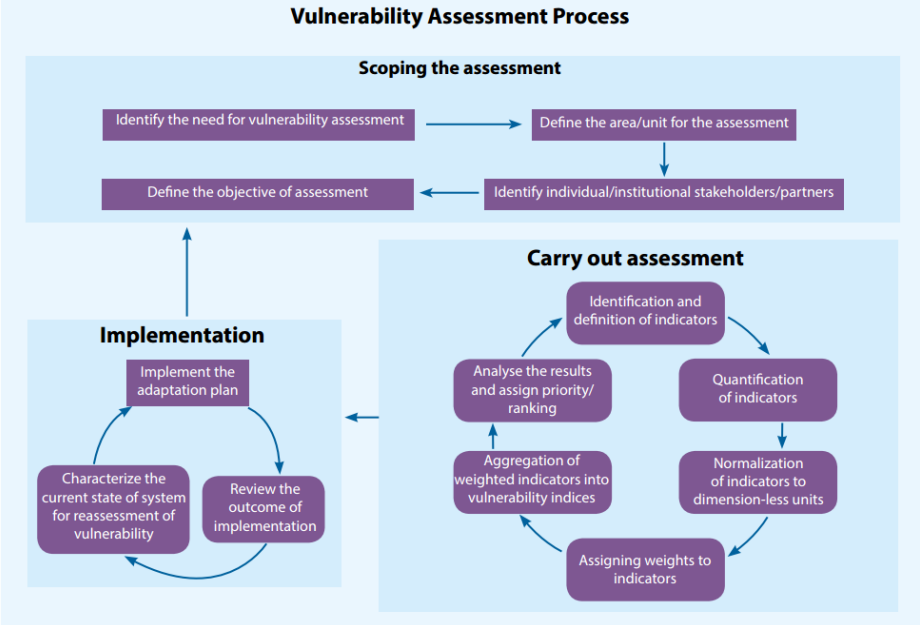
ระบบที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งขั้นตอนในการกำหนดขอบเขตการประเมินได้แก่ (1) การประเมินถึงความจำเป็นในการประเมินความเปราะบางในภาพรวม (2) การกำหนดพื้นที่หรือระบบที่ต้องการประเมิน (3) การกำหนดผู้มีส่วนได้เสียที่มีต่อระบบที่เลือกรวมถึงหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง และ (4) การกำหนดวัตถุประสงค์ในการประเมิน

(2) การประเมินความเปราะบาง: หลังจากได้มีการกำหนดขอบเขตการประเมินเสร็จสิ้น ขั้นตอนถัดไปจะเป็นการประเมินความเปราะบางตามขอบเขตดังกล่าว มีขั้นตอนการประเมินทั้งสิ้น 6 ขั้นตอน เริ่มจาก (1) การกำหนดตัวชี้วัดและให้คำนิยามของตัวชี้วัดที่จะใช้ประเมินความเปราะบางที่เกี่ยวข้องและเหมาะสมกับขอบเขตที่กำหนดไว้ โดยในการกำหนดตัวชี้วัดต้องพิจารณาถึงผู้มีส่วนได้เสีย และการเข้าถึงข้อมูลของแต่ละตัวชี้วัด (2) รวบรวมข้อมูลของตัวชี้วัดที่ได้กำหนดขึ้นจากขั้นตอนก่อนหน้า (3) ปรับข้อมูลตัวชี้วัดที่มีระดับข้อมูลที่แตกต่างกันให้อยู่ในระดับเดียวกัน (Normalization) (4) การกำหนดน้ำหนักให้แต่ละตัวชี้วัด โดยต้องมีการพิจารณาความสำคัญของตัวชี้วัดแต่ละตัวต่อความเปราะบาง และอาจให้น้ำหนักในแต่ละตัวชี้วัดที่ไม่เท่ากัน (5) คำนวณผลที่ได้จากตัวชี้วัดที่มีการถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกัน และ (6) วิเคราะห์ผลและประเมินผลความเปราะบาง

(3) การนำผลลัพธ์จากการประเมินความเปราะบางไปใช้ในการวางแผนการปรับตัว: ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินความเปราะบางจะสามารถบอกได้ถึงความเปราะบางของระบบที่ทำการกำหนดขอบเขต ซึ่งหากขอบเขตที่กำหนดมีหลายระบบที่เกี่ยวข้อง จะสามารถบอกได้ถึงระดับความสำคัญของแต่ละระบบเนื่องจากความเปราะบางที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการปรับตัวให้เหมาะสมกับระบบและพื้นที่นั้นๆได้

7.3.2 กรอบแนวคิดและกระบวนการประเมินความเสี่ยง

ในการประเมินความเสี่ยงจำเป็นต้องพิจารณาความสำคัญของดัชนีที่เกี่ยวข้องทั้ง 5 ดัชนีที่ระบุในนิยาม โดยที่ความเปราะบางและภัยอันตรายเมื่อนำมาประเมินร่วมกันจะหมายถึงผลกระทบ (I) ของเหตุการณ์หนึ่งๆที่มีต่อระบบที่สนใจ และสมการที่ 7.3.2-1 แสดงถึงดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยง ซึ่งความเปราะบาง ภัยอันตราย การเผชิญต่อภัย และความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นดัชนีที่แปรผันตรงกับความเสี่ยงทั้งหมด ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินความเปราะบางจะถูกนำมาใช้ต่อเนื่องในการประเมินความเสี่ยง โดยความแตกต่างของแนวคิดในการรประเมินความเสี่ยงและการประเมินความเปราะบางแสดงดัง**ตารางที่ 7.3.2-1**



ที่มา: Sharma et al. (2018)

รูปที่ 7.3.1-2 กระบวนการประเมินความเปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

$$Risk = f[Vulnerability\ (V); Hazard\ (H); \{Probability\ of\ the\ occurrence\ of\ a\ hazard\ (P)\}; Exposure] \quad [7.3.2\text{-}1]$$

Impact (I)

ตารางที่ 7.3.2-1 ความแตกต่างของกรอบแนวคิดในการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยง

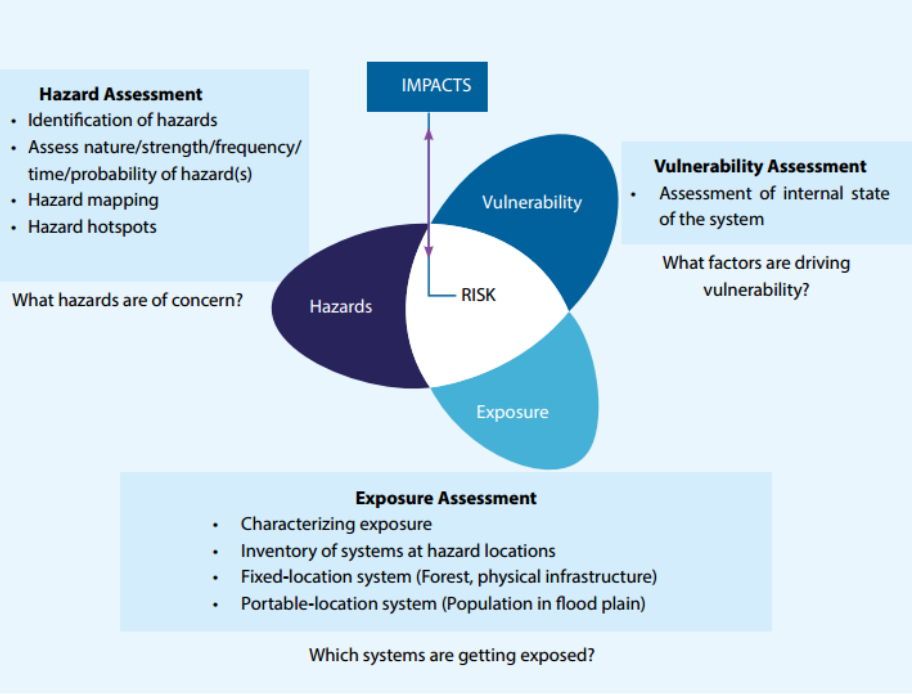
	กรอบแนวคิดการประเมินความเปราะบาง	**กรอบแนวคิดการประเมินความเสี่ยง**
กรอบแนวคิดการประเมิน	การประเมินความเปราะบางในสภาวะปัจจุบัน	การประเมินความเสี่ยงภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ
องค์ประกอบของดัชนีที่ใช้ในการประเมิน	ความอ่อนไหว (S) และความสามารถในการปรับตัว (AC)	ภัยอันตราย (H) การเผชิญต่อภัย (E) และความเปราะบาง (V)
ข้อมูลที่ใช้ในการประเมิน	ข้อมูลของตัวชี้วัดที่ระบุของแต่ละดัชนี	- ข้อมูลตัวชี้วัดที่ระบุของการประเมินความเปราะบาง - ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากแบบจำลอง

	กรอบแนวคิดการประเมินความเปราะบาง	กรอบแนวคิดการประเมินความเสี่ยง
แหล่งข้อมูล	ข้อมูลจากการเก็บรวบรวมในพื้นที่และจากข้อมูลทุติยภูมิขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงการที่ประเมิน	- ข้อมูลจากการเก็บรวบรวมในพื้นที่และจากข้อมูลทุติยภูมิขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงการที่ประเมิน - ข้อมูลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกสำหรับประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในสถานการณ์ต่างๆ
ประโยชน์ของการประเมิน	- สนับสนุนการการตัดสินใจในการลดความเปราะบางของระบบ หรือชุมชนหนึ่งๆ - ช่วยในการจัดลำดับความสำคัญของระบบเพื่อสนับสนุนการช่วยเหลือระบบที่มีความเปราะบางที่สูงกว่า - ระบุปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความเปราะบางของระบบเพื่อนำไปใช้ในการวางแผนเพื่อลดความเปราะบาง - สนับสนุนการวางแผนในการลดความเปราะบางในสถานการณ์ปัจจุบัน	- สนับสนุนการประเมินภาพรวมของความเสี่ยงสำหรับความเปราะบางของระบบ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการสื่อสารกับผู้มีส่วนได้เสียเพื่อหาแนวทางแก้ไขร่วมกัน - สามารถใช้ในการประเมินเปรียบเทียบความเสี่ยงโครงการในสถานการณ์ปัจจุบันและภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ - สามารถนำไปใช้ในการสร้างกลยุทธ์เพื่อลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น - เพื่อจัดหามาตรการที่เหมาะสมในการลดความเสี่ยง
ข้อจำกัดของการประเมิน	- ไม่ได้พิจารณาถึงสถานการณ์อันตรายในอนาคตที่อาจเกิดขึ้น พิจารณาเพียงสถานะของระบบในปัจจุบัน - ผู้ประเมินต้องมีประสบการณ์และทักษะในการประเมินซึ่ง	- ข้อมูลที่นำมาใช้ในการประเมินมีปริมาณมาก - การจัดหามาตรการการปรับตัวที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นจากความเสี่ยงเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ

	กรอบแนวคิดการประเมินความเปราะบาง	กรอบแนวคิดการประเมินความเสี่ยง
	จะขึ้นอยู่กับประเภทของระบบที่ต้องการประเมิน	- ผู้ประเมินต้องมีประสบการณ์และทักษะในการประเมิน รวมถึงศักยภาพของแบบจำลองที่ใช้ในการประเมินข้อมูลภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ที่มา: Sharma et al. (2018)

สำหรับกระบวนการประเมินความเสี่ยงสามารถแบ่งการประเมินออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ การประเมินความเปราะบาง (V), การประเมินภัยอันตราย (H) และการเผชิญต่อภัย (E) (**รูปที่ 7.3.2-1**) นอกจากนั้นยังต้องมีการประเมินถึงความน่าจะเป็นที่จะเกิดภัยอันตรายที่มีต่อระบบในพื้นที่หรือชุมชนนั้นๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้



ที่มา: Sharma et al. (2018)

รูปที่ 7.3.2-1 กระบวนการประเมินความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

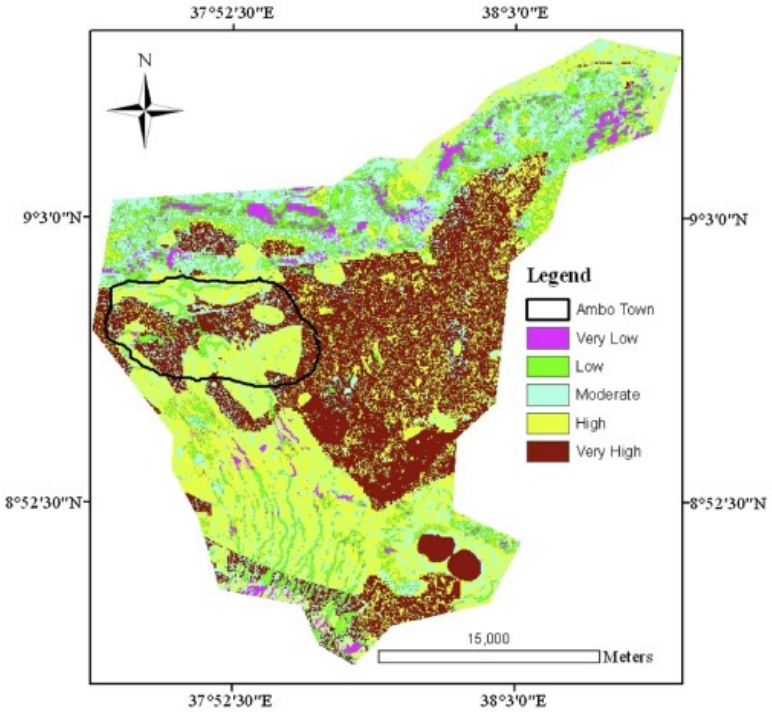
(1) การประเมินภัยอันตราย (Hazard Assessment): ภัยอันตรายในบริบทของการประเมินความเสี่ยงของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะเกี่ยวเนื่องกับอันตรายของลักษณะสภาพอากาศในแต่ละเหตุการณ์หนึ่งหรือแนวโน้มที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะยาวที่ส่งผลกระทบต่อระบบ ชุมชน พื้นที่ หรือสิ่งแวดล้อมหนึ่งๆ ตัวอย่างของภัยอันตรายที่เกิดขึ้น ได้แก่

สถานการณ์ฝนตกหนักที่ก่อให้เกิดน้ำท่วม การเกิดฝนทิ้งช่วงซึ่งก่อให้เกิดภัยแล้ง การเกิดพายุรุนแรง ส่งผลกระทบต่อคนและสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยการประเมินภัยอันตรายเริ่มจากการระบุถึงประเภทของภัยอันตรายที่จะส่งผลกระทบต่อระบบ จากนั้นจึงประเมินถึงลักษณะและผลกระทบที่เกิดจากภัยอันตรายที่ระบุ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนได้แก่

- **การประเมินความเสี่ยงในสภาวะปัจจุบัน**: ในการประเมินความเสี่ยงในสภาพปัจจุบันจะเป็นการรวบรวมและตรวจสอบข้อมูลการเกิดเหตุการณ์ในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันของภัยอันตรายนั้นๆที่ส่งผลกระทบต่อระบบ เช่น ความรุนแรงของผลกระทบ ความถี่ที่เกิดเหตุการณ์ ช่วงเวลาที่เกิด รวมถึงความน่าจะเป็นที่เกิดเหตุการณ์นั้น

- **การประเมินความเสี่ยงในอนาคต:** ในการประเมินความเสี่ยงในอนาคตต้องประเมินภัยอันตรายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยการใช้ข้อมูลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของภัยอันตรายที่ได้จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก (รายละเอียดบทที่ 3) โดยระบุถึงความรุนแรงของผลกระทบ ความถี่ ช่วงเวลา และความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในขอบเขตของช่วงเวลาในอนาคตที่ต้องการพิจารณา

ซึ่งหากการศึกษาความเสี่ยงเป็นการศึกษาของระบบในพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น ความเสี่ยงของกิจกรรมการเกษตรในระดับประเทศ ภัยอันตรายเช่นเหตุการณ์น้ำท่วมที่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตร การทำแผนที่ระบุพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทั้งในอดีตที่ผ่านมา (การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลในอดีต หรือการใช้ผลลัพธ์จากแบบจำลองภูมิอากาศโลก) จะสามารถช่วยให้สามารถระบุพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น **รูปที่ 7.3.2-2** แสดงแผนที่ภัยอันตรายจากน้ำท่วมในการศึกษาในพื้นที่ลุ่มน้ำของประเทศเอธิโอเปีย โดยการใช้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัย ได้แก่ ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน ความสูง-ต่ำของพื้นที่ ความลาดชัน การระบายน้ำในพื้นที่ เป็นต้น



ที่มา: Ogato et al. (2020)

รูปที่ 7.3.2-2 ตัวอย่างแผนที่ภัยอันตรายจากน้ำท่วมจากงานวิจัยในประเทศเอธิโอเปีย

(2) การประเมินการเผชิญต่อภัย (Exposure assessment): จากนิยามของการเผชิญต่อภัยหมายถึงระบบที่อยู่ในพื้นที่หนึ่งๆที่มีโอกาสได้รับผลกระทบ ซึ่งในการประเมินการเผชิญต่อภัยมีกระบวนการในการประเมินโดยเริ่มจากการระบุถึงลักษณะของการเผชิญต่อภัยซึ่งเป็นการพิจารณาถึงระบบในพื้นที่ศึกษาว่ามีโอกาสได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ใดได้บ้าง เช่น กิจกรรมการเกษตรในพื้นที่ลุ่มน้ำหนึ่งอาจได้รับผลกระทบจากน้ำท่วม (หากอยู่ในพื้นที่ลาดลุ่มต่ำ) ดินถล่ม (หากพื้นที่อยู่ใกล้เคียงพื้นที่ลาดชัน) หรือการขาดแคลนน้ำ (หากอยู่นอกพื้นที่ชลประทาน) เป็นต้น จากนั้นจึงระบุถึงระดับภัยอันตรายที่กระทบต่อกิจกรรมการเกษตรในแต่ละพื้นที่ย่อยๆที่จะได้รับ

(3) การประเมินความเปราะบาง (Vulnerability assessment): ในส่วนของการประเมินความเปราะบางแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 7.3.1

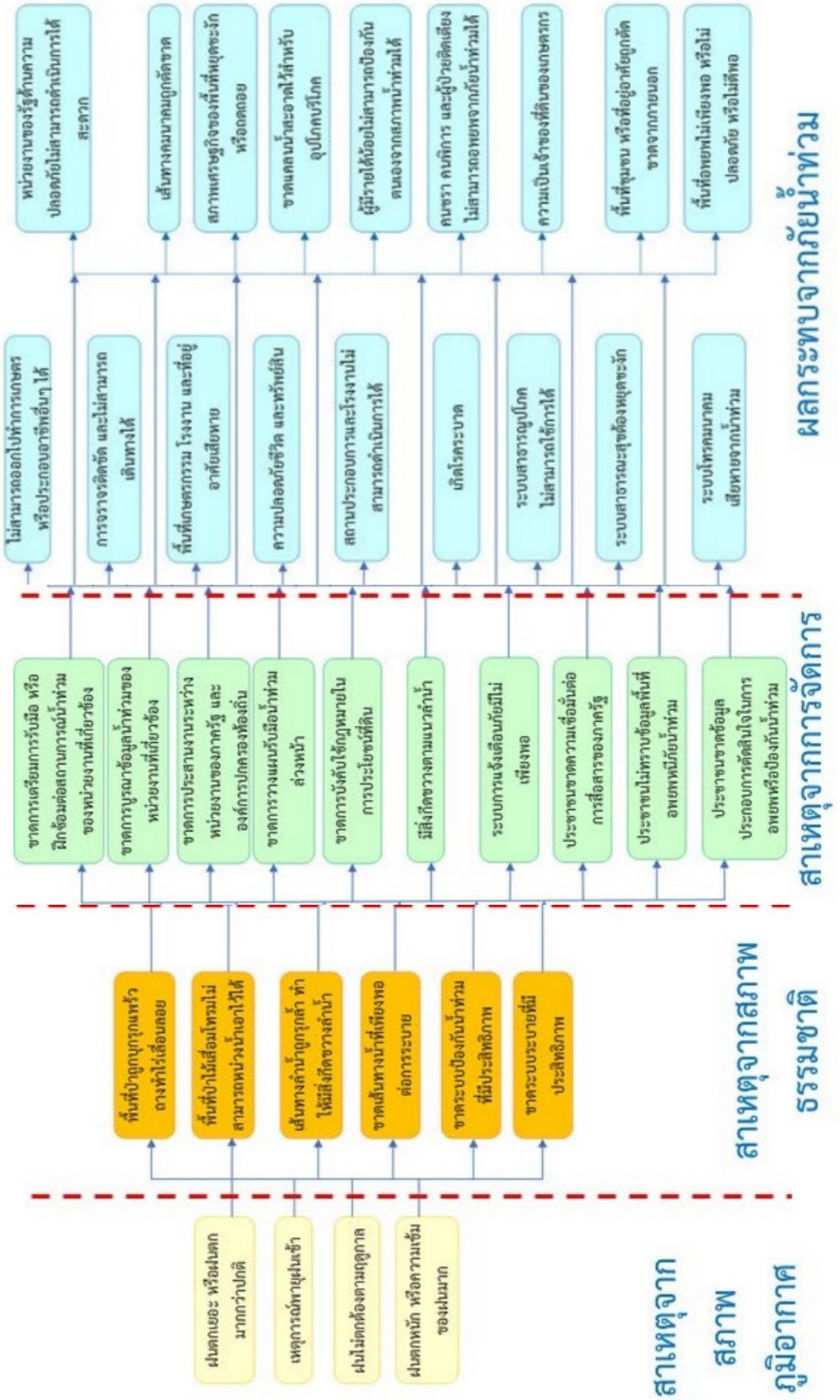
เมื่อทำการประเมินครบทั้ง 3 ส่วนข้างต้นแล้วจากนั้นจึงทำการประเมินความเสี่ยงโดยผลลัพธ์ของการประเมินความเสี่ยงสามารถแสดงได้ในหลายรูปแบบได้แก่ การแสดงผลในเชิงแผนที่ การแสดงผลในรูปแบบของค่าดัชนีชี้วัด หรือการแสดงผลในรูปแบบของตารางและกราฟ เป็นต้น ตัวอย่างการประเมินความเสี่ยงและความเปราะบางแสดงในหัวข้อ 7.5

7.3.3 หลักการประเมินห่วงโซ่ของสาเหตุและผลกระทบ

กระบวนการประเมินห่วงโซ่ของสาเหตุและผลกระทบเป็นกระบวนการที่สำคัญเพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อระบบ ชุมชน หรือสิ่งแวดล้อมที่จะส่งผลให้เกิดความเปราะบางและความเสี่ยง โดยในกระบวนการประเมินห่วงโซ่ของสาเหตุและผลกระทบควรเป็นการดำเนินการร่วมกันระหว่างนักวิชาการ หน่วยงานราชการ หน่วยงานเอกชน ภาคประชาชน และกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอื่นๆในพื้นที่เพื่อสนับสนุนข้อมูลที่มีความสำคัญ เช่น ลักษณะสภาพความเป็นอยู่ของชุมชนในพื้นที่ สาธารณูปโภคต่างๆ สภาพแวดล้อมของพื้นที่ รวมถึงสภาพเศรษฐกิจ-สังคม

องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (GIZ) (2565) ได้ระบุถึงหลักการพัฒนาห่วงโซ่ของสาเหตุและผลกระทบโดยเริ่มจากการหาสาเหตุของการเกิดภัยอันตรายจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งจำเป็นต้องมีการระบุถึงสาเหตุของการเกิดภัยอันตรายจากสภาพแวดล้อมอื่นๆ หรือสภาพแวดล้อมที่เป็นอยู่เดิมร่วมด้วย เช่น ลักษณะและรูปแบบของการเกิดปริมาณฝนในพื้นที่เป็นผลที่เกิดจากสภาพภูมิอากาศ ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้เสื่อมโทรม และเส้นทางลำน้ำถูกรุกล้ำขัดขวางการไหลของน้ำเป็นลักษณะของการเกิดภัยอันตรายจากสภาพธรรมชาติ และการขาดการประสานงานระหว่างหน่วยงานรัฐ ข้อมูลจากหน่วยงานรัฐขาดความน่าเชื่อถือเป็นผลที่เกิดขึ้นจากการจัดการ เป็นต้น

เมื่อระบุสาเหตุที่ก่อให้เกิดภัยอันตรายเสร็จสิ้น จากนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากภัยอันตรายนั้นๆ โดยผลกระทบที่เกิดจำเป็นต้องพิจารณาให้ครบถ้วนในทุกมิติ ทั้งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สิน ระบบสาธารณูปโภค ผลกระทบทางด้านสุขภาพ เช่น การเกิดโรคระบาด หรือการเกิดโรคต่างๆระหว่างการเกิดเหตุการณ์ กิจการต่างๆต้องมีการหยุดดำเนินการซึ่งจะส่งผลกระทบต่อรายได้ของทั้งเจ้าของกิจการและลูกจ้าง เป็นต้น ซึ่งข้อมูลทั้งสาเหตุของการเกิดภัยและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจะถูกนำไปพิจารณาต่อในการระบุถึงภัยอันตราย (H) การเผชิญต่อภัย (E) และความเปราะบาง (V) จาก**รูปที่ 7.3.3-1** แสดงให้เห็นถึงห่วงโซ่ของสาเหตุและผลกระทบในการประเมินความเสี่ยงภัยอันตราย



ที่มา: องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (GIZ) (2565)

รูปที่ 7.3.3-1 ตัวอย่างห่วงโซ่สาเหตุผลกระทบของสถานการณ์น้ำท่วม

7.4 การคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักและความน่าเชื่อถือทางสถิติ

ในการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยงจำเป็นต้องมีการกำหนดตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องในแต่ละดัชนี ซึ่งการพิจารณาตัวชี้วัดในแต่ละพื้นที่และแต่ละกิจกรรมที่ต้องการพิจารณาจะมีความแตกต่างกัน (รายละเอียดดังกรณีศึกษาในหัวข้อที่ 7.5) ตัวชี้วัดที่กำหนดขึ้นทั้งหมดจะต้องถูกนำมาวิเคราะห์ค่าน้ำหนักและความน่าเชื่อถือทางสถิติและต้องมีการพิจารณาถึงลักษณะของประเภทข้อมูล โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณสำหรับแต่ละตัวชี้วัดดังนี้

7.4.1 การพิจารณาประเภทของข้อมูลตัวชี้วัด

ประเภทข้อมูลตัวชี้วัดที่กำหนดจะมีอยู่หลายรูปแบบโดยหากเป็นข้อมูลที่ตรวจวัดหรือข้อมูลที่ทำการเก็บรวบรวมจะมีหน่วยและช่วงค่าของข้อมูลที่แตกต่างกัน เช่น ข้อมูลปริมาณฝนรายวันหน่วยจะเป็น มม. ข้อมูลปริมาณน้ำในแหล่งกักเก็บน้ำหน่วยเป็นล้าน ลบ.ม. เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องทำการปรับข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบสเกลมาตรฐานปกติ (Normalized) อยู่ในช่วงระหว่าง 0-1 ดังสมการที่ 7.4.1-1 โดยที่ x_i, x_{min} และ x_{max} คือค่าของข้อมูลในช่วงเวลา i, ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดของข้อมูลชุดนั้นๆที่พิจารณา

$$x_{normalized} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \qquad [7.4.1\text{-}1]$$

หากข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ได้มาจากการประเมินในรูปแบบของแบบสอบถามเพื่อประเมินความคิดเห็น เช่น การประเมินความเข้มแข็งของชุมชนในการรับมือกับสถานการณ์น้ำท่วม หรือ การได้รับข้อมูลข่าวสารอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอในการแจ้งเตือนภัย แบบสอบถามจะถูกออกแบบให้เป็นคะแนนที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0-5 โดยที่ 0=ชุมชนมีความเข้มแข็งมาก / ชุมชนได้รับการเตือนภัยตลอดเวลา และ 5=ชุมชนไม่มีความเข้มแข็ง / ไม่เคยได้รับการเตือนภัย คะแนนที่ได้ทั้งหมดจากการทำแบบสอบถามในแต่ละตัวชี้วัดจะถูกนำมาเฉลี่ย โดยผลที่ได้จะแสดงให้เห็นว่าหากมีค่าคะแนนที่มากเข้าใกล้ 1 ตัวชี้วัดนั้นๆจะส่งผลให้พื้นที่นั้นมีค่าความเสี่ยงที่เพิ่มสูงขึ้น ข้อมูลในทุกรูปแบบจะต้องถูกนำมาปรับให้เป็นค่าที่อยู่ระหว่าง 0-1 เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณได้ในเกณฑ์มาตรฐานเดียวกัน

7.4.2 การถ่วงน้ำหนักของข้อมูล

เนื่องด้วยการวิเคราะห์ความเปราะบางและความเสี่ยงประกอบด้วยหลากหลายตัวชี้วัด และยังประกอบด้วยดัชนีทั้งหมด 4 ดัชนี (ภัยอันตราย (H) การเผชิญต่อภัย (E) ความอ่อนไหว (S) และความสามารถในการปรับตัว (AC)) ซึ่งตัวชี้วัดแต่ละตัวจะมีค่าความสำคัญที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงต้องมีการถ่วงน้ำหนักความสำคัญของแต่ละตัวชี้วัดเพื่อให้การคำนวณความเสี่ยงในขั้นตอนสุดท้าย

มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยค่าความสำคัญของแต่ละตัวชี้วัดจะได้มาจากการสอบถามผู้มีส่วนได้เสียประชาชน และหน่วยงานต่างๆในพื้นที่ การให้ค่าความสำคัญของแต่ละตัวชี้วัดจะมีค่าตั้งแต่ 1= ตัวชี้วัดนั้นมีความสำคัญน้อย และ 5 = ตัวชี้วัดนั้นมีความสำคัญมากที่สุด เมื่อได้ค่าคะแนนจากการวิเคราะห์มาแล้วสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติได้หลากหลายรูปแบบ เช่น Structural Equation Modelling (SEM) และ Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) โดยผลจากการให้ค่าความสำคัญของแต่ละตัวชี้วัดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 และค่าความสำคัญจะถูกนำมาปรับให้เป็นค่าถ่วงน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง โดยค่าของแต่ละดัชนีต้องมีผลรวมเท่ากับ 1 **ตารางที่ 7.4.1-**1

ตารางที่ 7.4.1-1 ตัวอย่างการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตัวชี้วัดในดัชนีการเผชิญต่อภัยของสถานการณ์น้ำท่วม

ตัวชี้วัด	ค่าความสำคัญจากแบบจำลอง SEM (I_i)	ค่าถ่วงน้ำหนัก ($W_i = \frac{I_i}{\sum I}$)
จำนวนแหล่งน้ำ	0.468	0.061
การพัฒนาแหล่งน้ำ	0.625	0.081
พื้นที่ชุ่มน้ำ	0.624	0.081
จำนวนบ่อฝังกลบ	0.686	0.089
ความหนาแน่นของเส้นทางคมนาคม	0.771	0.100
จำนวนประชากรทั้งหมด	0.609	0.079
จำนวนโรงพยาบาลและสถานีอนามัย	0.675	0.087
ผลผลิตทางการเกษตร	0.611	0.079
จำนวนบ่อบาดาล	0.655	0.085
จำนวนแหล่งท่องเที่ยวน้ำตก	0.704	0.091
จำนวนแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติและโบราณสถาน	0.590	0.076
จำนวนสถานประกอบการ	0.700	0.091
ผลรวม ($\sum I$)	**7.718**	**1**

ที่มา: ดัดแปลงจากองค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (GIZ) (2565)

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่าเป็นการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของดัชนีของการเผชิญต่อภัย ซึ่งสำหรับดัชนีของภัยอันตราย (H) และดัชนีความเปราะบาง (V) จะมีการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักในรูปแบบเดียวกัน

7.4.3 การคำนวณค่าความเสี่ยง

ในการคำนวณค่าความเสี่ยงจำเป็นต้องมีการคำนวณองค์ประกอบของดัชนีความเสี่ยงทั้งหมดก่อน ซึ่งต้องนำค่าของแต่ละตัวชี้วัดของข้อมูล (ในหัวข้อที่ 7.4.1) ที่ผ่านการปรับค่าให้เป็นมาตรฐานเรียบร้อยแล้วมาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 7.4.2 ในทุกดัชนีโดยการใช้วิธีการตัวชี้วัดร่วม (Composite index: CI) แสดงดังสมการที่ 7.4.3-1 โดยที่ x คือดัชนีองค์ประกอบของความเสี่ยง (H, E, V) และ i คือจำนวนตัวชี้วัดทั้งหมดมีจำนวน n ของดัชนีนั้นๆ และ W คือค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการคำนวณของแต่ละตัวชี้วัด จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณค่าความเสี่ยงดังสมการที่ 7.4.3-2 โดยที่ CI_H, CI_E, และ CI_V คือค่าของผลลัพธ์ของการคำนวณตัวชี้วัดที่ทำการถ่วงน้ำหนักแล้วของดัชนี ภัยอันตราย (H) การเผชิญต่อภัย (E) และความเปราะบาง (S) ตามลำดับ

$$CI_x = \frac{(S_{x,i} * W_{x,i}) + (S_{x,i} * W_{x,i}) \ldots + (S_{x,n} * W_{x,n})}{\sum_{i=1}^{n} W} \quad [7.4.3\text{-}1]$$

$$Risk = \frac{(CI_H + CI_E + CI_V)}{3} \quad [7.4.3\text{-}2]$$

7.5 กรณีศึกษาการประเมินความความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

7.5.1 กรณีศึกษาการประเมินความเสี่ยงและความเปราะบางในพื้นที่ลุ่มน้ำ

การประเมินความเสี่ยงและความเปราะบางจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเชิงพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นการดำเนินงานที่มีความซับซ้อน เนื่องจากในพื้นที่ลุ่มน้ำหนึ่งๆมีกิจกรรมการดำรงชีวิตของชุมชนในหลากหลายมิติ จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาในหลายกิจกรรมร่วมกันในบริบทของทรัพยากรน้ำและความมั่นคงด้านน้ำ ซึ่งหลักการในการประเมินจะเป็นแนวทางเดียวกับรายละเอียดข้างต้น โดยจะต้องประกอบไปด้วย 3 ดัชนีหลัก ได้แก่ ภัยอันตราย (H) การเผชิญต่อภัย (E) และความเปราะบาง (V) โดยองค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (GIZ) (2565) ได้ทำการประเมินความเสี่ยงและความเปราะบางในพื้นที่ลุ่มน้ำยมของประเทศไทยในสถานการณ์น้ำท่วม โดยมีรายละเอียดแนวทางการประเมินดังนี้

(1) การประเมินภัยอันตราย (H): การประเมินภัยอันตรายต้องมีการพิจารณาถึงตัวชี้วัดที่ก่อให้เกิดผลกระทบในพื้นที่ซึ่งจากกรณีศึกษานี้ได้มีการคัดเลือกตัวชี้วัด ได้แก่ ตัวชี้วัดฝนสุดขั้ว ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ใช้ในการบ่งบอกถึงเหตุการณ์ของสถานการณ์น้ำท่วมและภัยแล้ง โดยจะถูกคำนวณจากข้อมูลตรวจวัดปริมาณฝนรายวันในพื้นที่ลุ่มน้ำจำนวนอย่างน้อย 30 ปี และการนำข้อมูลปริมาณฝนจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่ผ่านการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนแล้วมาใช้ในการคำนวณภายใต้

สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่างๆ (รายละเอียดบทที่ 5) ซึ่งมีตัวชี้วัดย่อยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

- ระยะเวลาที่แห้งแล้งอย่างต่อเนื่อง
- ระยะเวลาที่ฝนตกต่อเนื่อง
- จำนวนวันฝนตกหนัก
- จำนวนวันฝนตกหนักมาก
- สัดส่วนปริมาณฝนจากเหตุการณ์ฝนตกหนัก
- ปริมาณฝนสูงสุดในรอบหนึ่งวัน
- ปริมาณฝนสูงสุดในรอบ 5 วัน
- ดัชนีความแรงฝนอย่างง่าย

(2) การประเมินการเผชิญต่อภัย (E): ในการประเมินการเผชิญต่อภัยของกรณีศึกษานี้ ได้พิจารณารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวเนื่องกับลักษณะที่ตั้งและความเป็นอยู่ของชุมชนหรือสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสที่จะได้รับผลกระทบจากภัยอันตรายดังกล่าว ได้แก่ จำนวนแหล่งน้ำที่มีอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำ โครงการหรือแนวทางการพัฒนาแหล่งน้ำ พื้นที่ชุ่มน้ำ ความหนาแน่นของเส้นทางคมนาคม ผลผลิตทางการเกษตร จำนวนของสถานประกอบการ และจำนวนบ่อน้ำบาดาล เป็นต้น โดยทำการรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานรัฐทั้งส่วนกลางและส่วนภูมิภาค รวมถึงได้มีการสำรวจเพิ่มเติมจากการสอบถามผู้มีส่วนได้เสียจากภาคส่วนต่างๆ ทั้งภาครัฐ ภาคประชาน รวมถึงสถานการประกอบการต่างๆ

(3) การประเมินความเปราะบาง (V): การประเมินความเปราะบางได้มีแบ่งกลุ่มตัวชี้วัดออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ตัวชี้วัดสำหรับดัชนีความอ่อนไหว (S) ซึ่งกรณีศึกษานี้ได้มีการพิจารณาถึงความลาดชันของพื้นที่ พื้นที่ที่อยู่ในเขตเมืองที่เกิดน้ำท่วมซ้ำซาก พื้นที่ในเขตเศรษฐกิจที่ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วม จำนวนครัวเรือนในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ และสำหรับดัชนีความสามารถในการปรับตัว (AC) ได้มีการพิจารณาถึงระบบการเตือนภัยและการมีมาตรการในการรองรับและช่วยเหลือ การมีส่วนร่วมต่อการวางแผนการปรับตัวของประชาชน มีการเตรียมความพร้อมการรับมือด้วยการให้ความรู้และการฝึกอบรม เป็นต้น

ในการพิจารณาตัวชี้วัดจำเป็นต้องมีการพิจารณาถึงทิศทางของตัวชี้วัดที่จะส่งผลต่อค่าความเสี่ยงที่เกิดขึ้น โดยบางตัวชี้วัดเมื่อมีเพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้ค่าความเสี่ยงลดลง เช่น จำนวนบ่อบาดาลในดัชนีการเผชิญต่อภัยส่งผลเป็นทิศทางเชิงลบสำหรับการประเมินความเสี่ยง เนื่องด้วยหากมีบ่อบาดาลเป็นจำนวนมากมีโอกาสที่จะสามารถเก็บกักน้ำได้มากหากเกิดสถานการณ์แล้ง เช่นเดียวกับขีดความสามารถในระบบการระบายน้ำของคลองที่ถูกสร้างขึ้น หากพื้นที่นั้นมีระบบระบายน้ำที่มีขีดความสามารถในการระบายน้ำสูงผลกระทบก็จะลดลง ในขณะที่ตัวชี้วัดความยากจนในดัชนีความ

อ่อนไหวมีสูงจะส่งผลก่อให้เกิดความสามารถในการปรับตัวได้ยาก และส่งผลให้ค่าความเสี่ยงเพิ่มสูงขึ้น **ตารางที่ 7.5.1-1** สรุปตัวชี้วัดจากกรณีศึกษาความเสี่ยงเชิงพื้นที่ลุ่มน้ำด้านน้ำท่วม

ตารางที่ 7.5.1-1 สรุปตัวชี้วัดจากกรณีศึกษาความเสี่ยงเชิงพื้นที่ลุ่มน้ำด้านน้ำท่วม

ภัยอันตราย (H)	**การเผชิญต่อภัย (E)**	**ความเปราะบาง (V)**	
		ความอ่อนไหว (S)	**ความสามารถในการปรับตัว (AC)**
ปริมาณฝนสูงสุดรอบหนึ่งวัน	จำนวนแหล่งน้ำในพื้นที่	ความลาดชันในพื้นที่	พื้นที่ที่มีการเตือนภัยและมาตรการช่วยเหลือน้ำท่วม
ปริมาณฝนสูงสุดรอบห้าวัน	โครงการพัฒนาแหล่งน้ำ	พื้นที่เขตเมืองที่เกิดน้ำท่วมซ้ำซากต่อพื้นที่ทั้งหมด	การมีส่วนร่วมต่อการวางแผนการปรับตัวของประชาชน
จำนวนวันที่ฝนตกต่อเนื่อง (> 1 มม.)	พื้นที่ชุ่มน้ำ	พื้นที่เศรษฐกิจและชุมชนที่ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วม	การเตรียมความพร้อมและการรับมือด้วยการให้ความรู้และฝึกอบรม
จำนวนวันที่ฝนตกหนัก (≥ 35 มม.)	จำนวนบ่อฝังกลบขยะ	พื้นที่เกษตรที่ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วม	การบูรณาการระหว่างหน่วยงานในพื้นที่
ข้อมูลปริมาณฝนสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำ 50 ปี	ความหนาแน่นของเส้นทางคมนาคม	ประชากรในครัวเรือนพื้นที่น้ำท่วม	การบูรณาการระหว่างหน่วยงานระดับจังหวัด
ปริมาณน้ำหลากสูงสุด	จำนวนประชากรทั้งหมด	มูลค่าความเสียหายจากอุทกภัย	การบูรณาการหน่วยงานระดับกระทรวง
ความรุนแรงของฝนในช่วงฤดูฝน	จำนวนโรงพยาบาลและสถานีอนามัย	ระบบสาธารณูปโภคไม่สามารถใช้การได้เมื่อเกิดน้ำท่วม	ความพร้อมของการจัดการและระบบเตือนภัยในพื้นที่
ความรุนแรงของฝนนอกช่วงฤดูฝน	ผลผลิตทางการเกษตร	มูลค่าความเสียหายจากการเกิดอุทกภัย	ลักษณะของสิ่งก่อสร้างที่อยู่อาศัยหรือสาธารณูปโภค
จำนวนชั่วโมงฝนตกในวันที่ฝนตก	จำนวนบ่อบาดาล	จำนวนประชาชนที่ไม่สามารถทำงานได้ในภาวะน้ำท่วม	ความพร้อมของการบริหารจัดการจุดอพยพ

ภัยอันตราย (H)	**การเผชิญต่อภัย (E)**	**ความเปราะบาง (V)**	
		ความอ่อนไหว (S)	**ความสามารถในการปรับตัว (AC)**
สถานการณ์น้ำท่วมหนัก	จำนวนแหล่งท่องเที่ยวน้ำตก	จำนวนกิจการที่ไม่สามารถเปิดดำเนินการได้	ประสิทธิภาพการสื่อสารข้อมูลการแจ้งเตือนภัยและให้ความช่วยเหลือของภาครัฐ
ความถี่ของเหตุการณ์น้ำล้นตลิ่ง	จำนวนแหล่งท่องเที่ยวธรรมชาติและโบราณสถาน	สัดส่วนพื้นที่เกษตรนอกเขตชลประทานต่อพื้นที่ทั้งหมด	ความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่แจ้งเตือน
ลักษณะการเกิดน้ำท่วมในพื้นที่	จำนวนสถานประกอบการ	ความสมบูรณ์ของป่า	ดัชนีความยากจนของคนในพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซาก
ความถี่เหตุการณ์น้ำล้นอ่างเก็บน้ำ		ความสามารถในการระบายน้ำของระบบคลองธรรมชาติ	จำนวนประชากรกลุ่มเปราะบางในพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซาก
ความถี่เหตุการณ์น้ำท่วมน้ำแล้งในพื้นที่เดียวกัน		สภาพการระบายน้ำของดิน	การเตรียมความพร้อมรับมือของภาคอุตสาหกรรม
ระยะเวลาที่น้ำท่วมขัง		พื้นที่ชลประทาน	การปรับตัวโดยการเปลี่ยนพันธุ์พืช และปรับปฏิทินการเพาะปลูก
ระดับความลึกของน้ำท่วม		ปริมาณน้ำผิวดินเก็บกักเฉลี่ยรายปี	ความเข้มแข็งระหว่างชุมชนและภาครัฐ
		ความสามารถของโครงสร้างพื้นฐานในปัจจุบันในการรองรับน้ำท่วม	
		ขีดความสามารถในการระบายน้ำของระบบคลองที่สร้างขึ้น	
		ความสามารถในการสำรองน้ำส่วนบุคคล	

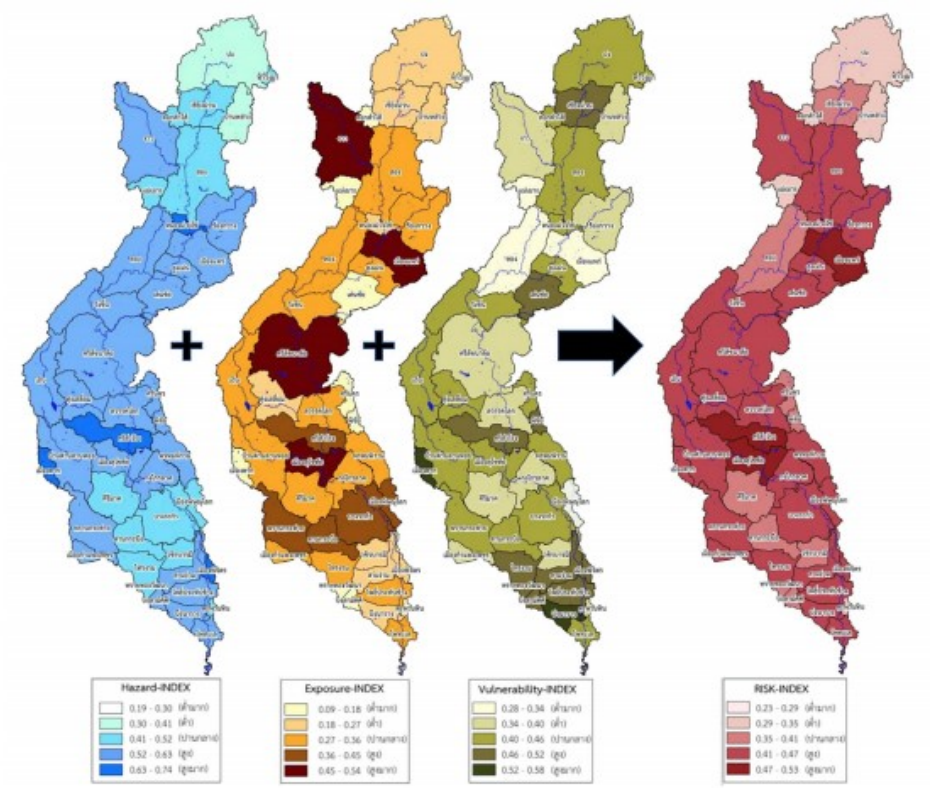
ภัยอันตราย (H)	การเผชิญต่อภัย (E)	ความเปราะบาง (V)	
		ความอ่อนไหว (S)	ความสามารถในการปรับตัว (AC)
		ลักษณะของทรัพย์สินที่สามารถทนน้ำได้ ความสามารถในการทนน้ำของพืชในพื้นที่เกษตร ความสามารถในการรับมือน้ำท่วมในส่วนของพื้นที่พืชไร่/พืชสวน	

ที่มา: ดัดแปลงจาก องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (GIZ) (2565)

(4) การประเมินความเสี่ยง (R): ในการประเมินความเสี่ยงของพื้นที่ลุ่มน้ำยมในการเกิดสถานการณ์น้ำท่วมได้นำตัวชี้วัดที่กำหนดไว้จากขั้นตอนก่อนหน้าไปคำนวณตามรูปแบบการคำนวณในหัวข้อที่ 7.4 และประเมินในเชิงแผนที่โดยการใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เป็นเครื่องมือช่วยในการประเมิน โดยแผนที่ทั้ง 3 ดัชนี ได้แก่ ภัยอันตราย (H) การเผชิญต่อภัย (E) และความเปราะบาง (V) ได้ถูกจัดทำขึ้นจากนั้นจึงได้นำมาซ้อนทับเพื่อนำเสนอภาพรวมเชิงพื้นที่ของลุ่มน้ำย่อยสำหรับสถานการณ์ความเสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบจากสถานการณ์น้ำท่วมรายละเอียดแสดงดัง**รูปที่ 7.5.1-1**

7.5.2 กรณีศึกษาการประเมินความเสี่ยงและความเปราะบางด้านการเกษตร

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อกิจกรรมทางการเกษตรโดยตรงเนื่องจากเป็นกิจกรรมที่จำเป็นต้องพึ่งพาปริมาณฝน รวมถึงลักษณะทางสภาพอากาศอื่นๆ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำที่มากเกินไปก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลผลิตและต่อเนื่องไปยังความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สิน ในขณะที่ภาวะน้ำแล้งส่งผลกระทบต่อผลผลิตเช่นเดียวกัน โดยปริมาณผลผลิตจะลดลงเนื่องด้วยปริมาณน้ำที่ไม่เพียงพอที่จะให้แก่พืช นอกจากนั้นอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ก็ยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชอีกด้วย



ที่มา: องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (GIZ) (2565)

รูปที่ 7.5.1-1 ตัวอย่างแผนที่ภัยอันตราย การเผชิญต่อภัย ความอ่อนไหว และความเสี่ยงลุ่มน้ำยม

Smits et al. (2024) ได้ทำการประเมินความเสี่ยงและความเปราะบางด้านการเกษตรจากการเกิดน้ำท่วมกรณีศึกษาในเขตพื้นที่ Volta Basin ซึ่งเป็นพื้นที่ทางด้านเหนือของประเทศกานา โดยได้ทำการศึกษาโดยการแบ่งการประเมินออกเป็น 3 ส่วนข้างต้นได้แก่ การประเมินภัยอันตราย (H) การประเมินการเผชิญต่อภัย (E) และการประเมินความเปราะบาง (V) โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) การประเมินภัยอันตราย (H): ในการประเมินภัยอันตรายของสถานการณ์น้ำท่วมสามารถประเมินได้โดยการใช้ดัชนี Standardized Precipitation Index (SPI) (สมการที่ 7.5.2-1) มาใช้ในการประเมินโดยหากค่า SPI มากกว่า 1.0 แสดงว่ามีโอกาสที่จะเกิดน้ำท่วมเล็กน้อย และหาก SPI มีค่ามากกว่า 1.5 แสดงว่ามีโอกาสในการเกิดน้ำท่วมรุนแรงซึ่งการคำนวณค่า SPI เป็นการเฉลี่ยข้อมูลปริมาณฝนทุก 3 เดือน นอกจากนั้นยังได้มีการแบ่งกรณีที่ประเมินออกเป็น 2 กรณี ได้แก่กรณีปัจจุบัน และกรณีภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (RCP 8.5) ของแบบจำลองภูมิอากาศโลก (รายละเอียดดังบทที่ 3 และ 5) และมีการแบ่งช่วงเวลาในการประเมินออกเป็น 5 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาในอดีต (2006-2020) และช่วงเวลาในอนาคตภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ RCP 8.5 ได้แก่ 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 และ 2081-2100 ท้ายสุดการประเมินเพื่อให้ได้แผนที่ภันอันตรายจากน้ำท่วมมีตัวชี้วัด 2 ตัวชี้วัดที่ถูกกำหนดให้มีการพิจารณา ได้แก่ ความเข้มของ

ปริมาณฝนซึ่งพิจารณาจากพื้นที่ที่มีค่า SPI มากกว่า 1.5 และปริมาณฝนรวมพิจารณาจากค่าของ SPI ที่มีค่ามากกว่า 1.0 ติดต่อกันมากกว่า 3 ช่วงเวลา (9 เดือน) จากนั้นจึงทำการถ่วงน้ำหนักโดยให้ค่าน้ำหนักของตัวชี้วัดแต่ละค่าเท่ากัน **รูปที่ 7.5.2-1** แสดงแผนที่ภัยอันตรายจากน้ำท่วมตามช่วงเวลาที่กำหนด

$$SPI_{ijk} = \frac{P_{ijk} - \bar{P}_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad [7.5.2\text{-}1]$$

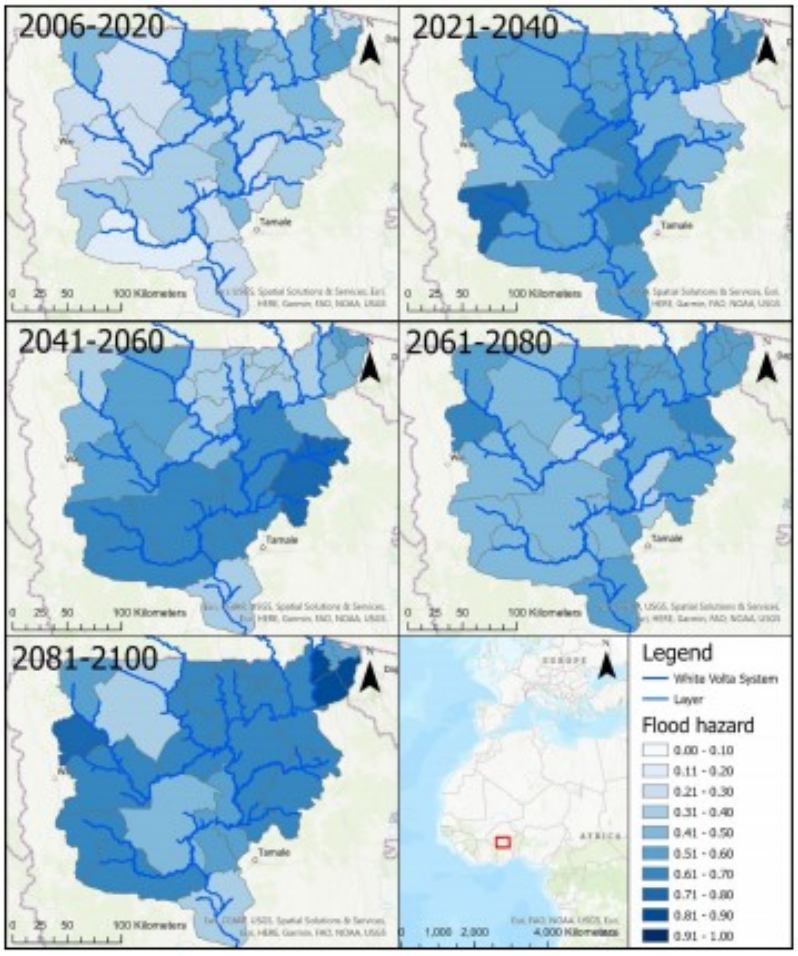
โดยที่ SPI_{ijk} และ P_{ijk} หมายถึงค่า SPI และค่าปริมาณฝน (P) ของกริดที่ i ช่วงเวลา j ในปีที่ k $\bar{P}_{ij}$ และ σ_{ij} หมายถึงค่าปริมาณฝนเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณฝน ของกริดที่ i ช่วงเวลา j

(2) การประเมินการเผชิญต่อภัย (E): ในการประเมินถึงการเผชิญต่อภัย จากกรณีศึกษานี้ได้มีการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องจากหน่วยงานในหลายระดับเพื่อสอบถามความคิดเห็นถึงลักษณะการเผชิญต่อภัยของพื้นที่ศึกษาต่อการเกิดสถานการณ์น้ำท่วม ตัวอย่างหน่วยงานที่ให้ความคิดเห็นได้แก่ หน่วยงานการบริการด้านอุทกวิทยา (Hydrological Services Department) และองค์กรการจัดการภัยพิบัติแห่งชาติ (National Disaster Management Organization) เป็นต้น

ผลจากการสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้องเพื่อประเมินการเผชิญต่อภัย ในพื้นที่ศึกษาพบว่าตัวชี้วัดที่มีผลต่อดัชนีการเผชิญต่อภัย สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ (1) การขยายตัวของกิจกรรมทางการเกษตร โดยเฉพาะการขยายตัวไปในพื้นที่ลุ่มต่ำหรือใกล้ทางน้ำจะได้รับผลกระทบเมื่อเกิดสถานการณ์น้ำท่วม (2) ตำแหน่งที่ตั้งอยู่ใกล้อ่างเก็บน้ำในพื้นที่ซึ่งอาจได้รับผลกระทบจากการปล่อยน้ำจากเขื่อนเมื่อเกิดปริมาณน้ำที่มากเกินไป (3) ลักษณะสภาพพื้นที่ที่ตั้งอยู่เหนือน้ำและท้ายน้ำส่งผลต่อการได้รับผลกระทบจากปริมาณและความรุนแรงของน้ำเมื่อเกิดสภาพน้ำหลาก และ (4) สาธารณูปโภคต่างๆที่มีอยู่ในพื้นที่ โดยเฉพาะสาธารณูปโภคที่เกี่ยวเนื่องกับการป้องกันน้ำท่วมหรือสัญญาณเตือนภัยต่างๆ

(3) การประเมินความเปราะบาง (V): การประเมินความเปราะบางประกอบด้วย 2 ดัชนี ได้แก่ ดัชนีความอ่อนไหว (S) และความสามารถในการปรับตัว (AC) ซึ่งกรณีนี้ได้เลือกใช้วิธีการสัมภาษณ์ความคิดเห็นจากหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้องเช่นเดียวกับการประเมินการเผชิญต่อภัยข้างต้น โดยผลจากการประเมินดัชนีความอ่อนไหวพบว่ามีตัวชี้วัด 8 ตัวที่มีความสำคัญได้แก่ (1) ตำแหน่งที่ตั้งอยู่ใกล้อ่างเก็บน้ำในพื้นที่ส่งผลให้ชุมชนที่อยู่อาศัยบริเวณนี้ได้รับผลกระทบได้บ่อยครั้งเนื่องจากลักษณะการเกิดน้ำท่วมจะเกิดบริเวณนี้อยู่เป็นประจำ (2) การชะล้างพังทลายของดิน (3) การตกตะกอนในลำน้ำ (4) ลักษณะสิ่งปกคลุมดิน และ (5) ชนิดดิน ส่งผลให้สูญเสียหน้าดินที่มีความสำคัญในการเพาะปลูก และยังก่อให้เกิดโอกาสของดินถล่มหากมีหน้าดินที่ไม่แข็งแรง (6)

ประเภทพืชที่เพาะปลูก (7) ระยะเวลาที่ใช้ในการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูก พืชแต่ละชนิดที่ปลูกจะมีความอ่อนไหวต่อลักษณะทางสิ่งแวดล้อมและสภาพอากาศที่แตกต่างกันไป (8) โครงสร้างพื้นฐานและสาธารณูปโภคที่ไม่เพียงพอและไม่มีคุณภาพ ส่งผลให้เกิดการพังทลายได้ง่ายเมื่อเกิดสถานการณ์น้ำท่วมซึ่งจะส่งผลต่อชุมชนในพื้นที่



ที่มา: Smits et al. (2024)

รูปที่ 7.5.2-1 ตัวอย่างแผนที่ภัยอันตรายจากน้ำท่วมจากกรณีศึกษา Volta Basin

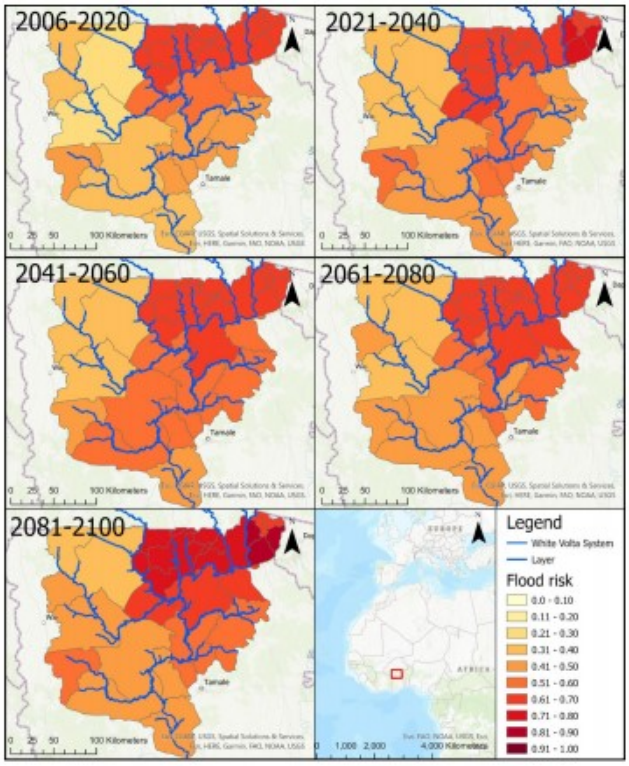
สำหรับความสามารถในการปรับตัวพบว่ามีตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องต่อความสามารถในการปรับตัวทั้งสิ้น 13 ตัวชี้วัด (รายละเอียดดัง**ตารางที่ 7.5.2-1**) โดยตัวชี้วัดที่ผู้ได้รับการสัมภาษณ์ให้ความสำคัญ ได้แก่ การสนับสนุนของหน่วยงานรัฐในการให้ความรู้ความเข้าใจต่อเกษตรกรในแนวทางการปรับตัวต่อภาวะน้ำท่วม ซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับโครงสร้างพื้นฐานในการรับข่าวสารเช่น อินเทอร์เน็ตให้เหมาะสมในพื้นที่ นอกจากนั้นแล้วควรมีการสนับสนุนให้เกษตรกรเพาะปลูกพืชที่มีความแข็งแรง ทนต่อสภาพอากาศ และมีช่วงระยะเวลาในการเพาะปลูกที่สั้นต่อหนึ่งรอบของการเพาะปลูก เป็นต้น

(4) การประเมินความเสี่ยง: ข้อมูลทั้งหมดข้างต้นจะถูกปรับให้อยู่ในรูปของคะแนน พร้อมกับตัวชี้วัดในแต่ละดัชนีจะถูกถ่วงน้ำหนัก เพื่อประเมินถึงความเสี่ยงในแต่ละพื้นที่ สำหรับการประเมินความเสี่ยงในอนาคตข้อมูลที่ถูกปรับให้มีความแตกต่างจากอดีตจะเป็นเรื่องของดัชนีภัยอันตรายเพียงอย่างเดียว สำหรับดัชนีการเผชิญต่อภัย และดัชนีความเปราะบางจะถูกประเมินให้คงเดิมเช่นที่ผ่านมาในอดีต โดยผลจากการประเมินแสดงดัง**รูปที่ 7.5.2-2** แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมแบ่งออกเป็น 10 ระดับ โดยในการคาดการณ์ข้อมูลภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตแสดงให้เห็นถึงระดับความรุนแรงของพื้นที่เสี่ยงน้ำท่วมที่มีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 7.5.2-1 สรุปตัวชี้วัดจากกรณีศึกษาความเสี่ยงจากการเกิดน้ำท่วมต่อกิจกรรมการเกษตร

ภัยอันตราย (H)	**การเผชิญต่อภัย (E)**	**ความเปราะบาง (V)**	
		ความอ่อนไหว (S)	**ความสามารถในการปรับตัว (AC)**
ความเข้มของปริมาณฝน	การขยายตัวของกิจกรรมทางการเกษตร	ตำแหน่งที่ตั้งใกล้อ่างเก็บน้ำในพื้นที่	การให้ความรู้จากหน่วยงานรัฐ
ปริมาณฝนรวมสะสม	ตำแหน่งที่ตั้งใกล้อ่างเก็บน้ำในพื้นที่	การชะล้างพังทลายของดิน	การสนับสนุนเพาะปลูกพืชปรับปรุงพันธุ์ที่มีความคงทน และระยะเวลาเจริญเติบโตต่ำ
	ลักษณะที่ตั้งบริเวณเหนือน้ำและท้ายน้ำ	การตกตะกอนในลำน้ำ	การก่อสร้างอ่างเก็บน้ำและเขื่อน
	สาธารณูปโภคและโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่	ลักษณะสิ่งปกคลุมดิน	การมีข้อมูลการตรวจวัดสภาพอากาศและการพยากรณ์ล่วงหน้า
		ชนิดดิน	สร้างอาชีพที่หลากหลายในการดำรงชีวิต
		ประเภทพืชที่เพาะปลูก ระยะเวลาที่ใช้ในการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูก	ฟื้นฟูพืชบริเวณริมแม่น้ำ การขุดลอกคูคลอง

ภัยอันตราย (H)	การเผชิญต่อภัย (E)	ความเปราะบาง (V)	
		ความอ่อนไหว (S)	ความสามารถในการปรับตัว (AC)
		โครงสร้างพื้นฐานและสาธารณูปโภคที่ไม่เพียงพอและไม่มีคุณภาพ	การมีระบบสัญญาณเตือนภัย การปลูกพืชหลายหลายชนิดพันธุ์ การมีระบบชลประทาน การสนับสนุนการตั้งถิ่นฐานใหม่ สนับสนุนแนวทางปฏิบัติของชนพื้นเมือง การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเพาะปลูก



ที่มา: Smits et al. (2024)

รูปที่ 7.5.2-2 ผลการประเมินความเสี่ยงจากกรณีศึกษา Volta Basin

---

สรุปบทที่ 7
ความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

- ระบบในความหมายของความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศหมายถึงชุมชน สิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานทางสังคม เศรษฐกิจและวัฒนธรรม ซึ่งเมื่อเกิดการกระทบจากจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบทั้งทางตรงและทางอ้อม

- ความเปราะบาง (Vulnerability) หมายถึงระบบทางธรรมชาติหรือระบบสังคมที่มีความอ่อนไหวและถูกทำลายจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ประกอบไปด้วยความอ่อนไหวของระบบ (Sensitivity) และความสามารถในการปรับตัว (Adaptive capacity) โดยมุ่งเน้นถึงการประเมินสถานะภายในของระบบได้แก่จุดอ่อนของระบบและแนวโน้มที่ระบบหนึ่งๆจะสามารถปรับตัวได้

- ความเสี่ยง (Risk) หมายถึงโอกาสที่จะเกิดผลกระทบกับระบบซึ่งผลลัพธ์ที่เกิดจะมีความไม่แน่นอนและลักษณะผลลัพธ์ที่เกิดจะมีความหลากหลาย โดยความเสี่ยงจะเกิดจากความน่าจะเป็นหรือโอกาสของเหตุการณ์อันตรายต่างๆที่อาจเกิดขึ้นพิจารณาร่วมกับผลกระทบหากเหตุการณ์นั้นๆเกิดขึ้น ความเสี่ยงถูกพิจารณาจาก 3 องค์ประกอบร่วมกัน ได้แก่ ความเปราะบาง (Vulnerability) การเผชิญต่อภัย (Exposure) และภัยอันตราย (Hazard)

- ความอ่อนไหว (Sensitivity) หมายถึงลักษณะของระบบใดๆ เช่น ชุมชน สิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานทางสังคม เศรษฐกิจและวัฒนธรรมซึ่งเมื่อได้รับผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในทางลบได้ ซึ่งความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะภายในของระบบนั้นๆ

- ความสามารถในการปรับตัว (Adaptive capacity) หมายถึงความสามารถของระบบใดๆ ในการปรับตัวต่อผลกระทบหรือสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่น ลักษณะสภาพอากาศที่แปรปรวน หรือการเกิดความรุนแรงของสภาพอากาศ เป็นต้น ให้สามารถดำรงอยู่ได้

- การเผชิญต่อภัย (Exposure) หมายถึงระบบใดๆ รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานทางสังคม เศรษฐกิจและวัฒนธรรมที่อาจได้รับผลกระทบทางลบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับถิ่นที่อยู่ ลักษณะภูมิอากาศ ภูมิประเทศ ของแต่ละพื้นที่

- ภัยอันตราย (Hazard) หมายถึงการเกิดขึ้นของเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติหรือจากการกระทำของมนุษย์ซึ่งส่งผลกระทบทางด้านลบในรูปแบบต่างๆ เช่น การเสียชีวิต บาดเจ็บ หรือเป็นเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต รวมถึงส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สิน สาธารณูปโภค การดำรงชีวิตของมนุษย์ ระบบนิเวศและทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

- การประเมินห่วงโซ่ของสาเหตุและผลกระทบเป็นกระบวนการที่ช่วยให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อระบบ โดยกระบวนการประเมินห่วงโซ่ของสาเหตุและผลกระทบประกอบด้วยการวิเคราะห์สาเหตุจากการสภาพภูมิอากาศที่มีผลต่อระบบ การวิเคราะห์สาเหตุจากสภาพธรรมชาติอื่นๆที่เกี่ยวข้อง การวิเคราะห์ถึงสาเหตุการจัดการของระบบ และท้ายสุดผลกระทบต่างๆที่มีโอกาสเกิดขึ้นต่อระบบ

- ในการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยงโดยส่วนใหญ่จะมีตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับแต่ละดัชนีหลายตัวชี้วัด ซึ่งแต่ละตัวชี้วัดจะมีระดับค่าความสำคัญที่ไม่เท่ากับดังนั้นในการประเมินจำเป็นต้องมีการถ่วงน้ำหนักของข้อมูล ก่อนที่จะนำผลของแต่ละดัชนีมาประเมินร่วมกัน

คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม

1. จงอธิบายนิยามและความแตกต่างของการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พร้อมทั้งอธิบายความหมายของดัชนีที่เกี่ยวข้อง

2. จงอธิบายถึงความสัมพันธ์ของดัชนีความอ่อนไหว การเผชิญต่อภัย ความสามารถในการปรับตัว และภัยอันตรายที่มีต่อระดับความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

3. จงอธิบายถึงประโยชน์ของการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พร้อมทั้งค้นคว้าเพื่อยกตัวอย่างจากการนำผลการประเมินความเปราะบางและความเสี่ยงไปใช้จริง

4. จงคัดเลือกพื้นที่ศึกษา ค้นคว้ารายละเอียดและวิเคราะห์และยกตัวอย่างตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับดัชนีของความเปราะบางและความเสี่ยงของสถานการณ์ภัยแล้งจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

5. จากการค้นคว้าตัวอย่างในหัวข้อที่ 3 จงวิเคราะห์ห่วงโซ่สาเหตุและผลกระทบของพื้นที่ที่เลือกศึกษาในสถานการณ์ภัยแล้ง

เอกสารอ้างอิง

องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศเยอรมัน (GIZ). 2565. คู่มือประเมินความเสี่ยงและความเปราะบางจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศพื้นที่ศึกษา: ลุ่มน้ำยมและลุ่มน้ำสะแกกรัง. https://ebook.onwr.go.th/book/197

IPCC. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

Ludena, C., Yoon, W.S., Sanchez-Aragon, L., Sebastian, M. and Yu, B.K. 2015. Vulnerability indicators of adaptation to climate change and policy implications for inverstment projects. https://www.uncclearn.org/wp-content/uploads/library/idb01062016_vulnerability-indicators-of-adaptation-to-climate-change-and-policy-implications-for-investment-projects.pdf

Ogato, G.S., Bantider, A., Abebe, K. and Geneletti, D. 2020. Geographic information system (GIS) – Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional state, Ethiopia. Journal of Hydrology: Regional Studies, 27, 100659.

Sharma, J., Murthy, I.K., Esteves, T., Negi, P., Sushma, S., Dasgupta, S., Barua, A., Bala, G. and Ravindranath, N.H. 2018. Climate Vulnerability and Risk Assessment: Framework, Methods and Guidelines, Indian Institute of Science.

Smits, W.K., Attoh, E.M.N.A.N. and Ludwig, F. 2024. Flood risk assessment and adaptation under changing climate for the agricultural system in the Ghanaian White Volta Basin. Climate Change, 177:39.

บทที่ 8 – มาตรการลดผลกระทบและการปรับตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

Chapter 8 – Climate Change Mitigation and Adaptation

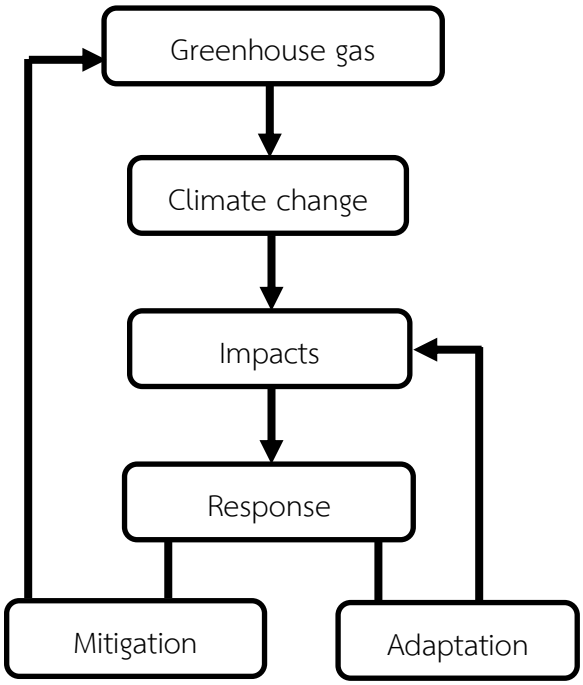
บทที่ 8

มาตรการลดผลกระทบและการปรับตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ | Climate Change Mitigation and Adaption

8.1 ความหมายและความแตกต่างของมาตรการลดผลกระทบและการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

มาตราการลดผลกระทบและการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นแนวทางการดำเนินงาน 2 แนวทางหลักที่ถูกประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มาตรการลดผลกระทบ (Mitigation) หมายถึง การลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยการประยุกต์ใช้วิธีการหรือกระบวนการต่างๆเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่มีอยู่และที่ถูกปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ เพื่อจำกัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก ในขณะที่การปรับตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Adaptation) หมายถึงการปรับตัวของมนุษย์ สังคม และสิ่งแวดล้อมเพื่อให้สามารถอยู่ได้จากผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามาตรการการลดผลกระทบจะเน้นไปในเรื่องของการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพื่อจำกัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เป็นอยู่ในปัจจุบันจนถึงในอนาคตจากต้นเหตุของก๊าซเรือนกระจก ในขณะที่การปรับตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมุ่งเน้นเรื่องของการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยการปรับรูปแบบการใช้ชีวิตให้สามารถอยู่ได้กับลักษณะสภาพอากาศที่เป็นอยู่ในปัจจุบันซึ่งมีความแตกต่างจากในอดีตก่อนการเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แนวทางทั้ง 2 แนวทางนี้จำเป็นต้องมีการดำเนินการควบคู่กันไป เนื่องด้วยหากดำเนินการเพียงเรื่องของมาตรการลดผลกระทบเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก แต่สภาพอากาศปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนแปลงไปแล้ว หากไม่มีการหาแนวทางที่เหมาะสมในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะส่งผลให้เกิดความสูญเสียในด้านต่างๆ ในทางกลับกันหากไม่มีมาตรการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและมุ่งเน้นในการปรับตัวเพียงอย่างเดียว ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆก็จะส่งผลให้อุณหภูมิโลกเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลต่อเนื่องถึงมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น **รูปที่ 8.1-1** แสดงความสัมพันธ์ในเรื่องของมาตรการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและแนวทางการปรับตัว และ**ตารางที่ 8.1-1** แสดงความแตกต่างของมาตรการการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและแนวทางการปรับตัวในด้านต่างๆ



ที่มา: Locatelli (2011)

รูปที่ 8.1 ความสัมพันธ์ของมาตรการลดผลกระทบ (Mitigation) และการปรับตัว (Adaptation) ต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ตารางที่ 8.1-1 ความแตกต่างระหว่างมาตรการลดผลกระทบและแนวทางการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

	มาตรการลดผลกระทบ (Mitigation)	**แนวทางการปรับตัว (Adaptation)**
พื้นที่ได้รับประโยชน์	การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกเกี่ยวข้องในระดับนานาชาติ โดยมีพื้นที่ได้รับประโยชน์ในระดับโลก	การปรับตัวเกี่ยวเนื่องกับพื้นที่ระดับท้องถิ่นที่จะใช้วิธีการปรับตัวที่แตกต่างกัน
ช่วงเวลา	การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกสามารถเห็นผลได้ในช่วงระยะเวลายาวนาน เนื่องจากเกี่ยวเนื่องกับระบบภูมิอากาศโลก	การปรับตัวสามารถเกิดผลได้ในช่วงระยะเวลาที่สั้น เพื่อลดผลกระทบของแต่ละพื้นที่
ภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง	การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกเกี่ยวเนื่องกับกิจกรรมที่ปล่อยก๊าซ เช่น ภาคพลังงาน ภาคอุตสาหกรรมและการขนส่ง และการจัดการของเสีย ภาคการเกษตรและป่าไม้ เป็นต้น	การปรับตัวเกี่ยวเนื่องกับส่วนงานด้านสาธารณสุข การจัดการน้ำ การป้องกันภัยพิบัติ การเกษตรและป่าไม้ เป็นต้น

ที่มา: ดัดแปลงจาก Locatelli (2011)

8.2 มาตรการและเทคโนโลยีเพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

เป้าหมายของมาตรการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศคือการ จำกัดปริมาณของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศเพื่อลดอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก ซึ่งกระบวนการหนึ่งที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ การใช้กลไกราคาคาร์บอน (Carbon Pricing) คือการทำให้ก๊าซเรือนกระจกมีมูลค่าหรือมีราคาขึ้น โดยมีกลไกที่เกี่ยวข้องกับการใช้ราคาคาร์บอนได้แก่ กลไกตลาด เช่น การซื้อขายก๊าซเรือนกระจก (Emission Trading Scheme) การให้การสนับสนุนทางการเงิน (Crediting Mechanism) และการใช้กลไกอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ภาษีคาร์บอน (Carbon Tax) รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆที่ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกรายละเอียดดังนี้

8.2.1 กลไกตลาดคาร์บอน (Carbon Market)

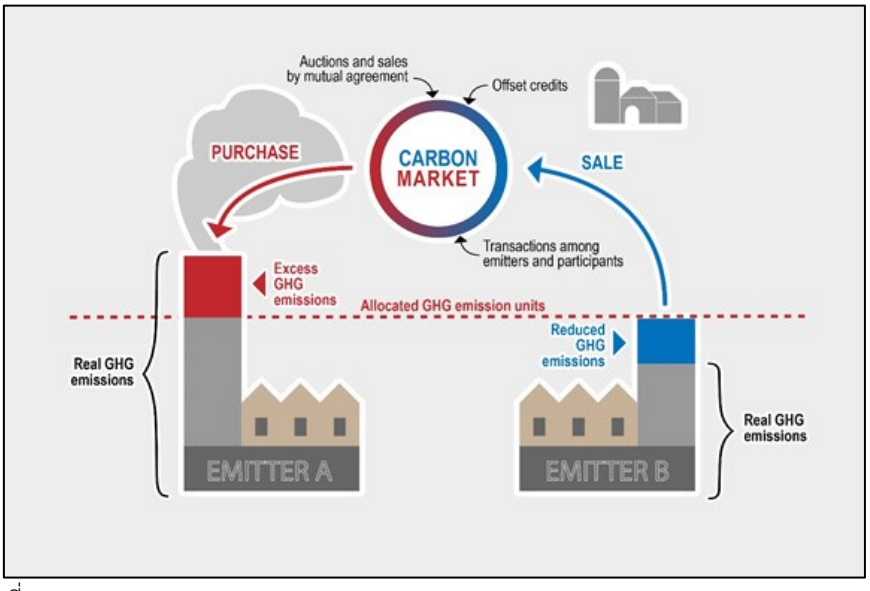
เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการของตลาดคาร์บอนจำเป็นต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับคาร์บอนเครดิต (Carbon Credit) ก่อน คำว่าคาร์บอนเครดิตแสดงถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่โครงการต่างๆ สามารถเก็บกักหรือลดปริมาณการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ เช่น โครงการที่มีการใช้พลังงานที่สะอาด หรือโครงการที่มีการปรับเปลี่ยนเทคโนโลยีการผลิต เป็นต้น โดยคาร์บอนเครดิตที่ได้รับการรับรองจากหน่วยงานที่ได้มาตรฐานสามารถที่จะนำมาซื้อขายได้ในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO_2eq)

กลไกตลาดคาร์บอนเกิดขึ้นเนื่องจากการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศมีต้นทุนที่ต้องจ่ายเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นกลไกตลาดคาร์บอนซึ่งเป็นเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมอย่าง “Polluter Pays the Principle” จึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นแรงจูงใจในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกของกิจกรรมต่างในสถานการประกอบการ (**รูปที่ 8.2.1-1**) ตลาดคาร์บอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ตลาดหลักได้แก่ ตลาดภาคบังคับ และตลาดภาคสมัครใจ โดย สถาบันการพัฒนาทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืน (2567) ได้ระบุรายละเอียดดังนี้

1) ตลาดแบบทางการหรือตลาดภาคบังคับ (Mandatory Carbon Market): เป็นลักษณะของตลาดที่จะมีข้อผูกพันทางกฎหมาย โดยมีภาครัฐเป็นผู้ออกกฎหมายและจัดสรรสิทธิในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Allowance) ให้กับโรงงานอุตสาหกรรม และมีการกำหนดบทลงโทษสำหรับผู้ที่ไม่สามารถปฏิบัติได้ตามที่กฎหมายกำหนด มีการกำหนดระบบการซื้อขายสิทธิในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Trading Scheme: ETS) ซึ่งเป็นกลไกประเภท “Site Based” หรือ “Facility Based” ในระดับองค์กร สิทธิในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 1 สิทธิเท่ากับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 1 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO_2eq) อายุของสิทธิจะมีอายุ 1 ปี หรือขึ้นอยู่กับภาครัฐเป็นผู้กำหนด ในกรณีที่โรงงานอุตสาหกรรมสามารถปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้น้อยกว่าสิทธิที่

ได้รับการจัดสรรจะสามารถขายสิทธิที่เหลือให้กับโรงงานอุตสาหกรรมอื่นได้ ในทางกลับกันหากอุตสาหกรรมใดมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สูงกว่าสิทธิที่ได้รับต้องมีการซื้อสิทธิจากโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยระบบในรูปแบบนี้เรียกว่าเป็นระบบการจำกัดปริมาณและมีการแลกเปลี่ยน (Cap-and-Trade) อย่างไรก็ตามในปี 2025 นี้ประเทศไทยยังไม่มีตลาดแบบทางการหรือตลาดภาคบังคับ และจะมุ่งเน้นการดำเนินการในตลาดภาคสมัครใจ

2) ตลาดภาคสมัครใจ (Voluntary Carbon Market): ตลาดภาคสมัครใจเป็นตลาดกลางในการซื้อขายแลกเปลี่ยนคาร์บอนเครดิต ซึ่งเป็นความสมัครใจจากการสร้างความร่วมมือระหว่างผู้ประกอบการหรือองค์กรต่างๆ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของตนเองแต่จะไม่มีผลบังคับใช้หรือมีการผูกพันตามกฎหมาย (Non-legally binding target) ลักษณะของตลาดภาคสมัครใจจะเป็นในรูปแบบของโครงการ (Project Base) มีหน่วยเช่นเดียวกับตลาดภาคบังคับคือ ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO_2eq) ไม่มีการกำหนดอายุของคาร์บอนเครดิต ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยมีตลาดภาคสมัครใจในการซื้อขายคาร์บอนเครดิตจากการดำเนินงานโครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย (Thailand Voluntary Emission Reduction Program: T-VER) พัฒนาโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) สามารถดำเนินการซื้อขายคาร์บอนเครดิตได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การซื้อขายผ่านแพลตฟอร์มตลาดซื้อขาย (Trading Platform) หรือศูนย์ซื้อขายคาร์บอนเครดิตที่ตั้งขึ้นอย่างเป็นทางการเช่น FTIX Exchange, และการซื้อขายโดยการตกลงกันระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายโดยตรง (Over the Counter: OTC)



ที่มา: TTGREEN (2023)

รูปที่ 8.2.1-1 ตลาดการซื้อขายคาร์บอนเครดิต

8.2.2 ภาษีคาร์บอน

มาตรการทางภาษีที่นำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแรงจูงใจเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ ภาษีคาร์บอนซึ่งเป็นภาษีทางด้านสิ่งแวดล้อมตามหลักการของผู้ก่อมลพิษเป็นผู้จ่าย (Polluter Pay Principal) เช่นเดียวกันกับกลไกตลาดคาร์บอน ภาษีคาร์บอนมีความหมายหลากหลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยแต่เดิมภาษีคาร์บอนหมายถึงภาษีของมลพิษที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตและการบริโภค เช่น ภาษีคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission Tax) จากนั้นภาษีคาร์บอนได้มีการขยายความหมายถึงภาษีคาร์บอนที่จัดเก็บจากสินค้าที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน เช่น ภาษีคาร์บอนที่จัดเก็บจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การจัดเก็บภาษีคาร์บอนของน้ำมันแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน และท้ายที่สุดในปัจจุบันภาษีคาร์บอนยังหมายรวมถึงภาษีที่จัดเก็บจากพลังงาน (Energy Tax) ซึ่งอาจเป็นการจัดเก็บบนฐานพลังงาน (Energy Use) ขึ้นอยู่กับพลังงานที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการผลิตประเภทใด ค่าภาษีที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกัน เช่น ภาษีพลังงานไฟฟ้าที่มาจากถ่านหิน และภาษีพลังงานไฟฟ้าที่มาจากก๊าซธรรมชาติ ซึ่งจะมีหลักการการคำนึงถึงองค์ประกอบคาร์บอนที่แตกต่างกัน (สถาบันระหว่างประเทศเพื่อการค้าและการพัฒนา, 2555)

ภาษีคาร์บอนมีข้อดีคือช่วยให้รัฐบาลสามารถมีรายได้ กระตุ้นให้เกิดการปรับปรุงเทคโนโลยี มีความยืดหยุ่นในการปรับอัตราภาษี แต่มีข้อจำกัดคือผู้กำหนดนโยบายจะต้องทราบข้อมูลที่ชัดเจนทั้งต้นทุนการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก ต้นทุนความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และต้องทราบความยืดหยุ่นของอุปสงค์และอุปทานในตลาด ซึ่งอัตราภาษีที่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์คืออัตราภาษีในระดับที่ทำให้ต้นทุนการบำบัดก๊าซเรือนกระจกส่วนเพิ่ม (Marginal Abatement Cost) เท่ากับต้นทุนความเสียหายของสังคมส่วนเพิ่ม (Marginal Damage Cost) (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2567)

รูปแบบในการเรียบเก็บภาษีคาร์บอนจะขึ้นอยู่กับแต่ละประเทศซึ่งจะมีฐานภาษีที่แตกต่างกัน โดยรัฐบาลจะเป็นผู้กำหนดอัตราภาษีต่อหน่วยการปล่อย (ต่อ 1 tCO_2eq) โดยส่วนใหญ่ฐานภาษีจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบได้แก่

- **ภาษีคาร์บอนทางตรง** คือการเก็บภาษีจากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดการผลิตสินค้าและบริการโดยตรง ซึ่งมีอันตราภาษีที่สูงกว่าเช่น การเผาขยะ การเผาไหม้ของยานพาหนะ และการเผาไหม้ของเครื่องจักรในโรงงาน เป็นต้น

- **ภาษีคาร์บอนทางอ้อม** คือการเก็บภาษีจากการบริโภค โดยผู้บริโภคไม่ได้เป็นผู้ผลิตสินค้าเอง เช่น การใช้พลังงานเชื้อเพลิง การใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่างๆ

สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการจัดเก็บภาษีคาร์บอน แต่ในอีกหลายประเทศรวมถึงประเทศทางยุโรปได้มีการจัดเก็บภาษีคาร์บอนแล้วมาเป็นระยะเวลานาน ตัวอย่างเช่น ฟินแลนด์ เนเธอร์แลนด์ สวีเดน เดนมาร์ก และอังกฤษ เป็นต้น

8.2.3 เทคโนโลยีการลดผลกระทบจากก๊าซเรือนกระจก

วิธีการในการลดก๊าซเรือนกระจกในปัจจุบันสามารถดำเนินการได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับกิจกรรมหรือกระบวนการผลิตที่ดำเนินการอยู่ ซึ่งไม่เพียงแต่การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกสู่ชั้นบรรยากาศเท่านั้น แนวทางหรือเทคโนโลยีที่ใช้ในการกักเก็บก๊าซเรือนกระจกก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยตัวอย่างเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการกักเก็บคาร์บอนมีดังนี้ (Fawzy et al. ,2020)

- **เทคโนโลยีการลดผลกระทบแบบดั้งเดิม (Conventional mitigation technology)**

เนื่องด้วยปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศมาจากการใช้พลังงานเป็นหลัก ดังนั้นกระบวนการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกจะเน้นไปที่ 4 ส่วนหลัก ได้แก่ การเลือกใช้พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) การใช้พลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear Power) การดักจับ กักเก็บคาร์บอนและการนำมาใช้ประโยชน์ (Carbon capture, storage and utilization) และการปรับเปลี่ยนประเภทแหล่งพลังงาน (Fuel switch) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- การเลือกใช้พลังงานหมุนเวียน: พลังงานหมุนเวียนได้ถูกนำมาใช้เป็นอย่างมากในปัจจุบันเพื่อลดปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในการผลิตพลังงาน โดยแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความโดดเด่นและมีการใช้งานมาก ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมทั้งลมจากบนบกและจากทะเล พลังงานน้ำสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า พลังงานชีวภาพและเชื้อเพลิงชีวมวล และพลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานข้างต้นโดยส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือเป็นแหล่งของพลังงานความร้อน เช่น พลังงานน้ำได้ถูกนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยหลักการเปลี่ยนรูปของพลังงานน้ำที่เก็บกักซึ่งเป็นพลังงานศักย์ ไหลผ่านท่อส่งน้ำที่เป็นพลังงานจลน์ มาปั่นเครื่องกังหันน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น

- การใช้พลังงานนิวเคลียร์: พลังงานนิวเคลียร์เป็นแหล่งพลังงานคาร์บอนต่ำ (Low-carbon power source) ที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการผลิตพลังงานที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่น้อย โดยพลังงานนิวเคลียร์จะถูกผลิตขึ้นที่โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์จากการควบคุมปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชั่นที่เกิดอย่างต่อเนื่อง (Chain reaction) ซึ่งจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นอย่างมาก พลังงานนี้จะถูกดูดซับไว้ด้วยน้ำ และน้ำที่ร้อนจัดจะถูกดูดออกไปถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในอีกส่วนหนึ่งเพื่อให้เกิดกลายเป็นไอน้ำแรงดันสูงปั่นกังหันผลิต

กระแสไฟฟ้า พลังงานนิวเคลียร์ถูกใช้ในบางประเทศเนื่องจากยังมีปัญหาเกี่ยวกับความเชื่อมั่นของประชนในความอันตรายที่อาจเกิดขึ้น โดยสหรัฐอเมริกามีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์ประมาณ 20% เช่นเดียวกับแคนาดามีการใช้พลังงานนิวเคลียร์ประมาณ 10-15% (สำนักงานที่ปรึกษาด้านการอุดมศึกษาฯ, 2567) สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการใช้พลังงานนิวเคลียร์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

- การดักจับ กักเก็บคาร์บอนและการนำมาใช้ประโยชน์: เทคโนโลยีนี้เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งกำเนิด เช่น จากโรงไฟฟ้าถ่านหินและน้ำมันเชื้อเพลิงธรรมชาติ ซึ่งการดักจับสามารถทำได้ในหลายประเภท เช่น การดักจับหลังการเผาไหม้ ก่อนการเผาไหม้ การเผาไหม้ด้วยออกซิเจน และการดักจับโดยตรง โดยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ เช่น การผลิตสารเคมี การผลิตเชื้อเพลิง โพลิเมอร์ และพลาสติกเป็นต้น

- การปรับเปลี่ยนประเภทแหล่งพลังงาน: การปรับเปลี่ยนแหล่งพลังงานเพื่อการผลิตเป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก หนึ่งในแหล่งพลังงานที่นิยมนำมาใช้แทนถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ซึ่งก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ที่สะอาดกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทอื่นๆ โดยในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจะต้องมีการสกัดก๊าซธรรมชาติและถูกส่งไปบำบัดน้ำและสิ่งสกปรก จากนั้นจะถูกเพิ่มแรงดันและขนส่งไปยังโรงไฟฟ้า ซึ่งก๊าซธรรมชาติจะถูกเผาไหม้เพื่อสร้างพลังงานความร้อนและเกิดไอน้ำในการขับเคลื่อนกังหันผลิตกระแสไฟฟ้า

- **เทคโนโลยีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นลบ (Negative mission technology)**

เทคโนโลยีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นลบหมายถึงกระบวนการหรือเทคโนโลยีสำหรับลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศโดยการดักจับและกักเก็บก๊าซเรือนกระจกไว้ในแหล่งต่างๆ ซึ่งมีแนวทางและเทคโนโลยีที่สามารถใช้ในการดำเนินงานได้หลายวิธี ตัวอย่างเช่น การผลิตพลังงานชีวภาพด้วยการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Bio-Energy Carbon Capture and Storage: BECCS), การเพิ่มพื้นที่ป่า (Reforestation) การกักเก็บคาร์บอนในดิน (Soil Carbon Sequestration)

- การผลิตพลังงานชีวภาพด้วยการดักจับและกักเก็บคาร์บอน: เป็นกระบวนการในการนำชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์นำมาเผาเพื่อให้เกิดพลังงาน เช่น ไฟฟ้า หรือ แก๊สในรูปแบบของพลังงานชีวภาพ โดยในช่วงระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลจะมีการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไว้ จึงเป็นกระบวนที่ก่อให้เกิดคาร์บอนเป็นลบ คาร์บอนที่กักเก็บไว้จะถูกกักเก็บในรูปแบบต่างๆและไม่ถูกปล่อยกลับสู่ชั้นบรรยากาศ

- การเพิ่มพื้นที่ป่า: เนื่องด้วยพืชจำเป็นต้องมีการสังเคราะห์แสงในการดำรงชีวิตเพื่อการเจริญเติบโต ซึ่งการสังเคราะห์แสงของต้นไม้เป็นวิธีการหนึ่งในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ โดยแหล่งคาร์บอนของป่าไม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 แหล่ง ได้แก่ มวลชีวภาพเหนือดิน (เช่น มวลชีวภาพของไม้ยืนต้นและไม้ล้มลุกที่อยู่บนผิวหน้าดิน), มวลชีวภาพใต้ดิน (เช่น มวลชีวภาพของรากพืช และพืชอื่นๆที่มีชีวิตอยู่ใต้ดิน), ไม้ตาย (เช่น มวลชีวภาพของไม้ที่ไม่มีชีวิต), เศษซากพืช (มวลชีวภาพที่ตายแล้วบนผิวหน้าดินใหญ่กว่าอินทรีย์วัตถุในดิน (> 2 มม.) และเล็กกว่าไม้ตาย (< 10 ซม.)) และอินทรีย์คาร์บอนในดิน (อินทรีย์คาร์บอนในแร่ธาตุ) (สำนักจัดการป่าชุมชน, 2557)

- การกักเก็บคาร์บอนในดิน: กระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในบรรยากาศมากักเก็บไว้ในดิน เนื่องด้วยดินเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนขนาดใหญ่ และคาร์บอนที่ถูกกักเก็บไว้ในดินช่วยให้เม็ดดินมีความเสถียร มีการระบายอากาศที่ดี มีความจุในการอุ้มน้ำส่งผลต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยวิธีการในการกักเก็บคาร์บอนในดินมีหลายวิธี เช่น การใส่วัสดุอินทรีย์ในดิน การใช้ปุ๋ย และการจัดการธาตุอาหารของพืชที่เหมาะสม

8.3 มาตรการการลดก๊าซเรือนกระจกในภาคส่วนต่างๆ

8.3.1 การลดก๊าซเรือนกระจกในกิจกรรมการเกษตร

เนื่องด้วยจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลโดยตรงต่อความต้องการอาหารที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นกิจกรรมทางการเกษตรทั้งการเพาะปลูกรวมถึงการเลี้ยงสัตว์เป็นกิจกรรมที่จำเป็นต้องมีการเพิ่มผลผลิตให้เพียงพอกับความต้องการ การทำการเกษตรส่งผลให้เกิดก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศทั้งจากการทำการเกษตรโดยตรง (Direct agricultural emissions) โดยก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยโดยตรงจากภาคการเกษตรสู่ชั้นบรรยากาศที่เกิดจากการเพาะปลูก ได้แก่ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และก๊าซมีเทน (CH_4)

นอกจากนั้นการขนส่งผลผลิตทางการเกษตร (Supply chain emissions) เป็นอีกกิจกรรมหนึ่งในการทำการเกษตรที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งและกระบวนการผลิตเกิดจากการใช้พลังงานจากการผลิตพลังงานโดยการใช้ถ่านหิน สำหรับภาคการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร เช่น การผลิตปุ๋ย การใช้พลังงานจากอุปกรณ์ต่างในการชลประทาน รวมถึงการขนส่งผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น และสุดท้ายการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use change emission) โดยการเพิ่มพื้นที่การเกษตรจากการบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ส่งผลให้พื้นที่กักเก็บก๊าซเรือนกระจกลดลง นอกจากนั้นการเผาพื้นที่หลังจากการทำการเกษตรในแต่ละรอบของการเพาะปลูกก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

แนวทางในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกี่ยวเนื่องกับภาคการเกษตรสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักคือมาตรการการลดปริมาณก๊าซในส่วนของด้านผู้ผลิตหรือด้านอุปทาน (Supply-side measures) และมาตรการด้านผู้บริโภคหรือด้านอุปสงค์ (Demand-side measures) (OECD, 2019) ได้แก่

- การพัฒนาและสนับสนุนวิธีการทำการเกษตรแก่เกษตรกรเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก
- การพัฒนาและสนับสนุนวิธีการการนำปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากชั้นบรรยากาศและนำมาสะสมในพืชหรือในพื้นดิน รวมถึงการลดการทำลายพื้นที่หรือแหล่งที่สามารถสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้
- การสนับสนุนให้ผู้บริโภคเลือกบริโภคสินค้าและการบริการที่คำนึงถึงการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
- การสนับสนุนให้ผู้บริโภคลดของเสียหรือของเหลือใช้จากการบริโภคสินค้าและบริการต่างๆ

สำหรับงานทางด้านการบริหารจัดการน้ำหรืองานทางด้านชลประทาน ส่วนที่เกี่ยวข้องกับแนวทางการลดก๊าซเรือนกระจกข้างต้น ได้แก่ การพัฒนาและสนับสนุนวิธีการทำการเกษตรเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก วิธีที่ได้รับความสนใจสำหรับการเพาะปลูกข้าว ได้แก่ การทำนาแบบเปียกสลับแห้ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

<u>การทำนาแบบเปียกสลับแห้ง (Alternative Wetting and Drying: AWD)</u>

เนื่องจากการเพาะปลูกข้าวโดยส่วนใหญ่ต้องให้มีการให้น้ำแบบท่วมขังในนา ซึ่งก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกโดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) การเกิดก๊าซเรือนกระจกดังกล่าวเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย เช่น เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน การจัดการดินในการเพาะปลูก รวมถึงการเติมอินทรียวัตถุในดิน ดังนั้นการทำนาแบบเปียกสลับแห้งจึงได้รับการพัฒนา ค้นคว้า เพื่อประเมินถึงการลดปริมาณก๊าซมีเทน และลดปริมาณการใช้น้ำของการทำนาแบบเปียกสลับแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับการทำนาโดยการปล่อยให้น้ำขังในรูปแบบเดิม

การทำนาแบบเปียกสลับแห้งได้มีการศึกษาค้นคว้าในหลายพื้นที่เพื่อประเมินถึงประโยชน์และข้อจำกัดที่เกิดขึ้น ญาณวุฒิ และคณะ (2567) ได้ทำการศึกษาการทำนาเปียกสลับแห้งในพื้นที่จังหวัดปทุมธานีและพบว่าการใช้วิธีการทำนาเปียกสลับแห้งสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ร้อยละ 19.39 มีปริมาณการใช้น้ำและการใช้ปุ๋ยลดลงร้อยละ 90 และ ร้อยละ 10 ตามลำดับ สามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกซึ่งเปรียบเทียบได้เฉลี่ยปีละ 6.7 tCO_2eq นอกจากนั้นการลดปริมาณก๊าซ

เรือนกระจกโดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซมีเทนสามารถลดได้ร้อยละ 81-82 สำหรับในข้าวนาปีและข้าวนาปรังในพื้นที่การศึกษาจังหวัดนครปฐมโดยการใช้วิธีทำนาข้าวแบบเปียกสลับแห้ง (ดวงนภา และบัญชา, 2557)

8.3.2 การลดก๊าซเรือนกระจกในภาคป่าไม้

ป่าไม้มีส่วนสำคัญในการลดก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากต้นไม้มีการดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและมีการกักเก็บคาร์บอนไว้ตามส่วนต่างๆ ได้แก่ ลำต้น รากต้นไม้ กิ่งก้านสาขาและใบ โดยมีปริมาณคาร์บอนในมวลชีวภาพของต้นไม้ และอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของต้นไม้แสดงดัง**ตารางที่ 8.3.2-1** และ **8.3.2-2** ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการลดก๊าซเรือนกระจกของภาคป่าไม้คือการเพิ่มพื้นที่ป่าไม้โดยการใช้กลไกทางการตลาดคาร์บอน (รายละเอียดดังหัวข้อที่ 8.2) เข้ามามีส่วนช่วยในการสร้างแรงจูงใจเพื่อเพิ่มพื้นที่ป่าไม้

ตารางที่ 8.3.2-1 ตัวอย่างปริมาณคาร์บอนในมวลชีวภาพของต้นไม้

พรรณไม้	ปริมาณคาร์บอนเฉลี่ย (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)
สัก	48.13
ยูคาลิปตัส	49.88
อะคาเซีย	47.66
กระถินยักษ์	48.75
โกงกาง	47.15
ยางพารา	49.90
ปาล์มน้ำมัน	41.30
พรรณไม้พื้นเมืองโตช้า / พรรณไม้อเนกประสงค์ / พรรณไม้ปลูกในเมือง	47.33

ที่มา: สาพิศ และ นรินธร (2563)

ตารางที่ 8.3.2-2 อัตราการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของต้นไม้

พรรณไม้	ระยะปลูก (ม.xม.)	จำนวนต้น/ไร่	การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ตัน/ไร่/ปี)	กก./ต้น/ปี
สัก	4x4	100	1.36-2.16	13.6-21.6
ยูคาลิปตัส	2x3	267	3.15-6.09	11.8-22.8
กระถินเทพา	3x3	178	4.06-6.09	22.5-34.2
กระถินณรงค์	3x3	178	2.27-4.40	12.8-24.7
กระถินยักษ์	2x3	267	0.77-6.49	4.3-36.5
โกงกาง	1.5x1.5	711	2.75	3.9
ยางพารา	3x6	89	4.22	47.4
ปาล์มน้ำมัน	3x6	89	2.49	28.0
พรรณไม้พื้นเมืองโตช้า	4x4	100	0.95	9.5
พรรณไม้อเนกประสงค์	4x4	100	1.47	14.7
พรรณไม้ปลูกในเมือง	4x8	50	1.21	24.2

ที่มา: สาพิศ และ นรินธร (2563)

8.3.3 การลดก๊าซเรือนกระจกในภาคส่วนอื่นๆ

นอกเหนือจากมาตรการในภาคส่วนทางด้านการเกษตรและภาคป่าไม้แล้ว ภาคส่วนอื่นๆยังมีมาตรการที่เกี่ยวข้องเพื่อลดการปลดปล่อยปริมาณก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ ภาคพลังงานและการขนส่งเป็นภาคที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด โดยเกิดจากการผลิตไฟฟ้าและความร้อนเป็นอันดับที่ 1 รองลงมาได้แก่การขนส่ง โดยมาตรการที่เกี่ยวเนื่องกับการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสามารถดำเนินการได้ ได้แก่ แนวทางการใช้พลังงานทดแทนเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อน รวมถึงการเปลี่ยนชนิดของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น

มาตรการในส่วนของภาคอุตสาหกรรมการผลิตโดยส่วนใหญ่จะเกี่ยวเนื่องกับการใช้เทคโนโลยีซึ่งจะขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนสำคัญที่สามารถดำเนินการได้ในทุกประเภทอุตสาหกรรมคือการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของกระบวนการผลิต นอกจากนั้นในแต่ละประเภทของอุตสาหกรรมสามารถดำเนินการได้ในหลายรูปแบบ เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์สามารถลดสัดส่วนของปูนต่อปูนซีเมนต์ให้มีความเหมาะสม หรือสามารถใช้วัตถุดินอื่นทดแทน การติดตั้งระบบรวบรวมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน สามารถดำเนินการได้เช่นการนำความร้อนจากไอน้ำที่ทิ้งหลังจากการต้มกลับมาใช้ประโยชน์ การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในโรงงาน เป็นต้น (อบก., 2562)

8.4 การลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย

8.4.1 แนวทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย

จากการที่ประเทศไทยได้เข้าเป็นภาคีกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) เมื่อปี พ.ศ. 2537 (รายละเอียดดังภาคผนวก ก) ซึ่งในการประชุมสมัชชารัฐภาคีอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (COP) ได้มีมติที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมของประเทศกำลังพัฒนาให้จัดส่งข้อมูลการดำเนินงานลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมของประเทศ (Nationally Appropriate Mitigation Actions: NAMAs) ซึ่งการตั้งเป้าหมายของการลดก๊าซเรือนกระจกสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก โดย สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2560) ได้มีการระบุไว้ดังนี้

- **การลดก๊าซเรือนกระจกเทียบกับปีฐาน (Base Year Emissions):** เป็นการกำหนดปริมาณก๊าซเรือนกระจกหรือค่าการลดก๊าซเรือนกระจกสัมบูรณ์ (Absolute Reduction) เทียบกับปีที่ทราบค่าการปล่อยในอดีต ซึ่งประเทศพัฒนาแล้วที่มีข้อมูลระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอดีตนิยมจะเลือกใช้วิธีนี้ โดยการเลือกปีฐานที่นำมาเปรียบเทียบเป็นปีที่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด

- **การลดค่าความเข้มข้นของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเทียบกับปีฐาน (Base Year Emissions Intensity):** เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วน (Ratio) การปล่อยก๊าซเรือนกระจกกับดัชนีชี้วัดอื่นๆเปรียบเทียบกับค่าในอดีตที่มีข้อมูล เช่นการเปรียบเทียบอัตราส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) เรียกว่า Carbon Intensity เช่น สาธารณรัฐประชาชนจีนได้ระบุว่าในปี 2030 จะดำเนินการให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วย GDP ลดลงที่ร้อยละ 60-65 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นในปี ค.ศ. 2050

- **การลดก๊าซเรือนกระจกจากเส้นฐานคาดการณ์ (Baseline Scenario Target):** เป็นการกำหนดค่าเป้าหมายของการลดก๊าซเรือนกระจกโดยใช้ระดับการคาดการณ์การปล่อยที่จะเกิดขึ้นในอนาคตเปรียบเทียบกับการคาดการณ์การปล่อยในกรณีปกติ (Business as Usual: BAU) ที่ยังไม่มีการดำเนินมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกใดๆ ซึ่งกระบวนการตั้งเป้าหมายในรูปแบบนี้โดยส่วนใหญ่จะถูกใช้ในประเทศที่กำลังพัฒนาที่ยังคงมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มสูงขึ้น สำหรับประเทศไทยการคาดการณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกรณี BAU กำหนดให้ปี 2005 (พ.ศ. 2548) เป็นปีเริ่มต้นของ BAU เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ประเทศไทยยังไม่มีการดำเนินมาตรการที่เกี่ยวข้องกับการลดก๊าซเรือนกระจก โดยได้มีการใช้ข้อมูลการปล่อยจริงจากในช่วงอดีตจนถึงปี 2011 (พ.ศ. 2554)

จากนั้นจึงจะดำเนินการคาดการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยไปจนถึงปี 2030 (พ.ศ. 2573)

- **การกำหนดเป้าหมายที่ไม่ได้ระบุปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจก:** ประเทศที่มีการกำหนดเป้าหมายในลักษณะนี้โดยส่วนใหญ่จะเป็นประเทศกำลังพัฒนาขนาดเล็ก หรือประเทศหมู่เกาะที่มีปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ไม่สูงมาก เช่น สาธารณรัฐประชาชนลาวมีการกำหนดกิจกรรมสำหรับการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ การเพิ่มพื้นที่ป่าให้ได้ร้อยละ 70 และการเพิ่มสัดส่วนพลังงานทดแทนให้ได้ร้อยละ 20 ในปี 2025 เป็นต้น

สำหรับประเทศไทยที่เลือกใช้วิธีการแบบ BAU การพยากรณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทุกสาขาจะใช้ข้อมูลสภาพเศรษฐกิจและสังคมตามการคาดการณ์ของสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.) เช่น การคาดการณ์การเติบโตผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) หรืออัตราการเพิ่มขึ้นของประชากร เป็นต้น โดยในการประเมินได้มีการแบ่งสาขาตาม IPCC ออกเป็น 5 สาขา ได้แก่ สาขาพลังงาน (การผลิตและการใช้พลังงานในทุกภาคส่วน), กระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์, การจัดการของเสีย, เกษตร และการใช้ประโยชน์ที่ดิน/ป่าไม้ ซึ่งสาขาในส่วนสุดท้ายจะมีทั้งกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการดูดกลับเพื่อเก็บกักก๊าซเรือนกระจก

1) การดำเนินงานลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมของประเทศ (Nationally Appropriate Mitigation Actions: NAMAs)

ประเทศไทยได้มีการแสดงเจตจำนง NAMAs ต่ออนุสัญญา UNFCCC ในการประชุม COP20 เมื่อ พ.ศ. 2557 โดยได้ระบุว่าประเทศไทยจะลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในประเทศร้อยละ 7-20 (24-74 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์ ($MtCO_2eq$)) ในปี 2020 (พ.ศ. 2563) ในภาคพลังงานและภาคการขนส่งให้ต่ำกว่าระดับการปล่อยในการดำเนินงานตามปกติ (BAU) ซึ่งการดำเนินการลดก๊าซเรือนกระจกตามที่กำหนดจะต้องมีการตรวจวัด รายงาน และทวนสอบ (Measuring, Report and Verification: MRV) ได้ เพื่อนำไปใช้ในการประเมินผลความคืบหน้าในระดับต่างๆ ซึ่ง NAMAs สามารถดำเนินการได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ (1) การดำเนินการโดยใช้การสนับสนุนภายในประเทศ (Domestic NAMAs) เป็นการดำเนินการที่มีความเหมาะสมของบริบทแต่ละประเทศ โดยใช้ทรัพยากร เงินลงทุน และบุคลากรจากภายในประเทศ และ (2) การขอรับการสนับสนุนระหว่างประเทศเพื่อสนับสนุนการลดก๊าซเรือนกระจก (Internationally Supported NAMAS) โดยประเทศกำลังพัฒนาสามารถขอรับการสนับสนุนจากประเทศพัฒนาแล้วได้ (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2558)

ประเทศไทยได้มีการแสดงผลการดำเนินงานตามเป้าหมายของ NAMAs ที่กำหนดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้ร้อยละ 7-20 ซึ่งประเทศไทยสามารถลดก๊าซเรือนกระจกจากภาคพลังงานได้ 55.54 $MtCO_2eq$ หรือคิดเป็นร้อยละ 15.40 ในปี 2020 (พ.ศ. 2563) ซึ่งสูงกว่าขั้นต่ำที่กำหนดไว้ใน NAMAs (ร้อยละ 7) เมื่อเปรียบเทียบกับ BAU (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2565)

2) เป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ (Intended Nationally Determined Contribution: INDC)

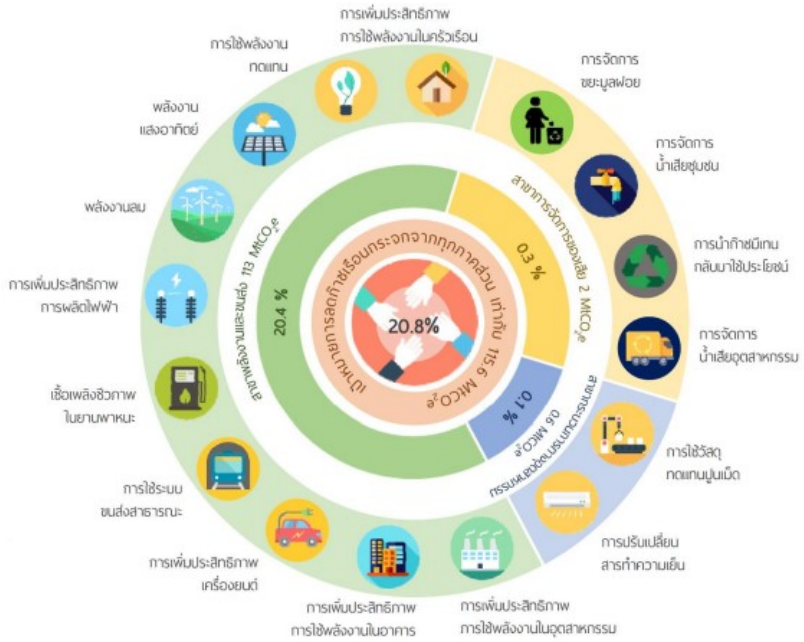
จากการดำเนินการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย NAMAs ประเทศไทยยังได้มีการจัดส่งข้อเสนอการมีส่วนร่วมของประเทศไทยในการลดก๊าซเรือนกระจกและการดำเนินการด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภายหลังปี พ.ศ. 2563 (Intended Nationally Determined Contribution: INDC) ไปยังสำนักเลขาธิการอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งได้มีการกำหนดเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยภายหลังปี พ.ศ. 2563 ที่ร้อยละ 20-25 จากกรณีปกติ จึงได้มีการจัดทำแผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศปี พ.ศ. 2564-2573 (Thailand's Nationally Determined Contribution Roadmap on Mitigation 2021-2030: NDC)

เป้าหมายของแผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกได้มีการกำหนดการบรรลุเป้าหมายจากการประเมินศักยภาพของกิจกรรมแต่ละสาขาที่มีความสำคัญพบว่า สาขาพลังงานและขนส่ง สาขากระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ และสาขาการจัดการของเสีย เป็นกิจกรรมที่มีศักยภาพและหน่วยงานมีความพร้อมในการลดก๊าซเรือนกระจก โดยจะสามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในปี พ.ศ. 2573 ได้รวมทั้งสิ้น 115.6 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์ ($MtCO_2eq$) (**ตารางที่ 8.4.1-1**) ซึ่งหากเมื่อพิจารณาถึงเป้าหมายที่ร้อยละ 20 (111 $MtCO_2eq$) พบว่ามีค่าเกินเป้าหมายที่กำหนดไว้ (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560) โดยมีมาตรการที่เกี่ยวข้องรวมทั้งสิ้น 15 มาตรการ (**รูปที่ 8.4.1-1**)

ตารางที่ 8.4.1-1 สรุปศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกรายสาขา

สาขา	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก ($MtCO_2eq$)
	พ.ศ. 2573 (ค.ศ. 2030)
สาขาพลังงานและขนส่ง	113.00
สาขาการจัดการของเสีย	2.00
ภาคกระบวนการทางอุตสาหกรรมการการใช้ผลิตภัณฑ์	0.60
ศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจก	**115.60**

ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2560)



ที่มา: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2567)

รูปที่ 8.4.1-1 มาตรการที่เกี่ยวข้องในการลดก๊าซเรือนกระจกของ 3 สาขาหลัก

3) เป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศฉบับปรับปรุง (Updated Nationally Determined Contribution)

จากการตั้งเป้าหมายในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกใน 3 สาขา ร้อยละ 20-25 จากกรณีปกติในเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ (NDC) ประเทศไทยได้มีการตั้งเป้าหมายในการเข้าสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนในปี 2050 (Carbon Neutrality) คือการลดปริมาณและการสร้างศักยภาพในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และตั้งเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ในปี 2065 (Net Zero Greenhouse Gas Emissions) ดังนั้นจึงต้องมีการยกระดับการลด

ก๊าซเรือนกระจกจากร้อยละ 20-25 เป็นร้อยละ 30-40% จากกรณีปกติ ภายในปี 2573 เพื่อให้สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ระยะยาวในการพัฒนาแบบปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำของประเทศ (Thailand's Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy) และมีกิจกรรมที่เกี่ยวข้องได้แก่ สาขาพลังงาน สาขาคมนาคมขนส่ง สาขากระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ (IPPU) สาขาการจัดการของเสีย และสาขาเกษตร โดย สผ. (2566) ได้มีรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยในแต่ละสาขาดังนี้

- **ภาคพลังงาน:** มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด 69.09% หรือคิดเป็นปริมาณ 257,340.89 $GgCO_2eq$ มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมพลังงาน 40.05% การขนส่ง 29.16% อุตสาหกรรมการผลิตและการก่อสร้าง 20.24% และอื่นๆ 6.56%

- **ภาคเกษตร:** ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 15.69% หรือคิดเป็นปริมาณ 58,486.02 $GgCO_2eq$ มาจากการเพาะปลูกพืชเกษตร 77.57% การทำปศุสัตว์ 22.43% การเผาไหม้ชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 2.92% และการใส่ปุ๋ยยูเรีย 2.86%

- **ภาคกระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์:** ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 10.77% หรือคิดเป็นปริมาณ 40,118.14 $GgCO_2eq$ มาจากอุตสาหกรรมอโลหะ 51.28% อุตสาหกรรมเคมี 33.17% และอุตสาหกรรมที่ใช้สารชั้นโอโซน 13.33%

- **ภาคของเสีย:** ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 4.48% หรือคิดเป็นปริมาณ 16,703.68 $GgCO_2eq$ โดยในจำนวนนี้มาจากการกำจัดขยะมูลฝอย 52.53% การบำบัดน้ำเสีย 45.71% การกำจัดขยะด้วยการเผาในเตาเผา 1.08% และการบำบัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีทางชีวภาพเพียง 0.68%

8.4.2 โครงการการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย

โครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ (Thailand Voluntary Emission Reduction Program: T-VER) เป็นกลไกการลดก๊าซเรือนกระจกภายในประเทศพัฒนาโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) ซึ่งมีเป้าหมายในการส่งเสริมให้มีการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหลายภาคส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีกลุ่มเป้าหมายหลักได้แก่ผู้ผลิตและผู้ที่มีการใช้พลังงานหมุนเวียนภาคอุตสาหกรรมในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตและการจัดการของเสีย ภาคขนส่ง รวมถึงการเพิ่มการดูดซับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการปลูกต้นไม้ และการอนุรักษ์พื้นที่ป่า สำหรับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดหรือกักเก็บได้ (คาร์บอนเครดิต) สามารถนำไปใช้ในการรายงานชดเชยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากองค์กร หน่วยงานต่างๆ และจากการผลิตผลิตภัณฑ์ได้ อย่างไรก็ตาม อบก. ได้มีการระบุถึงประเภทและขนาดของโครงการที่สามารถพัฒนากระบวนการลดปริมาณ

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพื่อเข้าสู่โครงการ T-VER ได้ รายละเอียดดัง**ตารางที่ 8.4.2-1** และมีตัวอย่างโครงการที่ได้รับการขึ้นทะเบียนแสดงดัง**ตารางที่ 8.4.2-2**

ตารางที่ 8.4.2-1 รายละเอียดโครงการที่สามารถพัฒนาเพื่อเข้าสู่ T-VER

กิจกรรม	**เกณฑ์การพิจารณา**	**ขนาดโครงการ T-VER**		
		ขนาดเล็กมาก (Micro scale)	**ขนาดเล็ก (Small scale)**	**ขนาดใหญ่ (Large scale)**
การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy)	กำลังการผลิตติดตั้งรวม (Installed Capacity	ไม่เกิน 5 MW	ไม่เกิน 15 MW	มากกว่า 15 MW
การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency)	เป้าหมายการลดใช้พลังงานรวม	ไม่เกิน 20 GWh/year	ไม่เกิน 60 GWh/year	มากกว่า 60 GWh/year
การปลูกป่า/ต้นไม้ และการอนุรักษ์ฟื้นฟูป่า (Afforestation and Reforestation)	เป้าหมายในการลด / กักเก็บก๊าซเรือนกระจก	ไม่เกิน 1,000 tCO_2eq/year	ไม่เกิน 16,000 tCO_2eq/year	มากกว่า 16,000 tCO_2eq/year
การเกษตร (Agriculture)	เป้าหมายในการลดก๊าซเรือนกระจก	ไม่เกิน 1,000 tCO_2eq/year	ไม่เกิน 16,000 tCO_2eq/year	มากกว่า 16,000 tCO_2eq/year
ประเภทโครงการอื่นๆ	เป้าหมายในการลดก๊าซเรือนกระจก	ไม่เกิน 20,000 tCO_2eq/year	ไม่เกิน 60,000 tCO_2eq/year	มากกว่า 60,000 tCO_2eq/year

ที่มา: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2558)

ตารางที่ 8.4.2-2 ตัวอย่างโครงการที่ได้รับการขึ้นทะเบียนโดย อบก.

กิจกรรม	**ชื่อโครงการ**	**ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ได้รับการรับรอง (tCO_2eq/year)**
การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy)	Naresuan Hydropower Project	135,485
	Mitr Phol Bio-Power (Danchang) – Block 2	1,932,821
	Solar Farm at Lampang, Thailand	927,564

กิจกรรม	ชื่อโครงการ	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ได้รับการรับรอง ($tCO_2eq/year$)
การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency)	Energy Efficiency Improvement at DELTA Bangpoo through Chiller Replacement	2,880
	PTT Waste Heat Recovery System for GSP NO.5&6 Project	186,444
	LED Lighting replacement Project by Chiangrai City Municipality, Mueang District, Chiangrai Province	2,291
การปลูกป่า/ต้นไม้ และการอนุรักษ์ฟื้นฟูป่า (Afforestation and Reforestation)	Doi Tung Development Project, Chiang Rai Province	419,513
	Large Scale Sustainable Forestation Project in Khun Mae Kum Mee, Wung Chin, and Mae Yom-Mae Pang Plantation, Phare Province	108,030
	GC Estate Eco Forest Rayong Wanarom	4,732
การเกษตร (Agriculture)	Carbon Sequestration and reducing Emission in Rubber Plantation, Sri Trang Rubber and Plantation Co., Ltd, Chiang Mai Province	14,450
การจัดการของเสีย (Waste Management)	RDF Production from Municipal Solid Waste	1,593,919
	Municipal Solid Waste Management Center of Saraburi Provincial Administrative Organization (PAO)	7,081
	BMA Organic Composting from Garden and Park Waste	3,265

ที่มา: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2567)

8.4.3 กรณีศึกษาการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย

เนื่องด้วยข้าวเป็นผลผลิตหนึ่งที่มีความสำคัญของประเทศ และในแต่ละปีที่ผ่านมาประเทศไทยสามารถผลิตข้าวได้ประมาณ 30 ล้านตันข้าวเปลือก อย่างไรก็ตามการผลิตข้าวส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากการทำนาของประเทศไทยคิดเป็น 26.64 $tCO_2eq/year$ หรือคิดเป็นมากกว่า 50% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคเกษตรกรรม การทำนาข้าวโดยการขังน้ำส่งผลให้เกิดก๊าซมีเทนซึ่งมีศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 เท่า ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงได้มีการศึกษาถึงแนวทางเพื่อการลดปริมาณกาศเรือนกระจกจากการผลิตข้าว และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนาในโครงการ **“โครงการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดภาวะโลกร้อนจากการทำนาเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน (Thia Rice NAMA)”** (องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน, 2566)

โครงการ Thai Rice NAMA เป็นโครงการที่กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ร่วมกับธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์ สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และได้รับความร่วมมือจากองค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (GIZ) ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจาก NAMA Facility ซึ่งเป็นกองทุนที่ก่อตั้งโดยอนุสัญญาแห่งชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มีระยะเวลาโครงการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561-2566 (5 ปี) โดยมีเป้าหมายเพิ่มเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตข้าวและปรับเปลี่ยนสู่การผลิตข้าวที่ปล่อยมลพิษต่ำ รวมถึงการผลิตข้าวที่ได้มาตรฐานการผลิตข้าวที่ยั่งยืน (GAP++) ซึ่งมีมาตรการจูงใจสนับสนุนให้ภาคการผลิตข้าวทั้งระบบลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก มีการดำเนินงานในพื้นที่ภาคกลาง 6 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี และสุพรรณบุรี ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 2.8 ล้านไร่ โดยมีกลยุทธ์การดำเนินงานและผลการดำเนินงานที่ผ่านมาแสดงดัง**ตารางที่ 8.4.3-1**

ตารางที่ 8.4.3-1 แนวทางการดำเนินงานและผลการดำเนินงานที่ผ่านมาของโครงการ Thai Rice NAMA

กลยุทธ์การดำเนินงาน	ผลการดำเนินงานที่ผ่านมา
<u>กลยุทธ์ที่ 1: เทคโนโลยีการผลิตข้าวที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ</u> - โครงการฯ ได้มีการจัดฝึกอบรมให้กับเกษตรกรในการใช้เทคโนโลยีลดก๊าซเรือนกระจกและแนวทางการทำนาแบบยั่งยืน	- การจัดตั้งคณะกรรมการที่ปรึกษาโครงการฯ คณะกรรมการขับเคลื่อนโครงการฯ คณะทำงานฯ และคณะอนุกรรมการขับเคลื่อนโครงการฯ ระดับจังหวัดจำนวน 6 จังหวัด - พัฒนาแผนการดำเนินงานสำหรับเทคโนโลยีลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการทำนา

กลยุทธ์การดำเนินงาน	ผลการดำเนินงานที่ผ่านมา
- สนับสนุนวิธีการทำนาและลดภาระค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนวิธีการทำนา โดยการจัดตั้งเงินทุนหมุนเวียน เพื่อให้สามารถสร้างรายได้ที่มากขึ้นจากการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม - การจัดการปัจจัยทางด้านการเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การประหยัดน้ำและพลังงานจากการสูบน้ำ การจัดการปุ๋ยและยาฆ่าแมลง เป็นต้น - การเชื่อมโยงตลาดในการขายข้าวที่ปล่อยมลพิษต่ำ **<u>กลยุทธ์ที่ 2: บริการเทคโนโลยีการผลิตข้าวที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ</u>** - โครงการฯ สนับสนุนการพัฒนาธุรกิจจากโครงการสินเชื่อสีเขียวสำหรับการลงทุน เพื่อให้บริการด้านเทคโนโลยีการผลิตข้าวที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ เช่น การปรับระดับพื้นที่ด้วยระบบเลเซอร์ การทำนาแบบเปียกสลับแห้ง การใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดิน และการจัดการฟางและตอซัง **<u>กลยุทธ์ที่ 3: การกำหนดนโยบายและมาตรการสนับสนุน</u>** - โครงการฯ สนับสนุนการดำเนินการพัฒนารูปแบบและกลยุทธ์ขยายผล การพัฒนามาตรฐานข้าวอย่างยั่งยืนบนพื้นฐานของมาตรฐานเวทีข้าวยั่งยืน (SRP) และการบูรณาการโครงการเข้ากับแผนปฏิบัติงานและงบประมาณของรัฐบาล	(การปรับระดับพื้นนาด้วยระบบเลเซอร์ การทำนาแบบเปียกสลับแห้ง การใส่ปุ๋ยตามผลการวิเคราะห์ค่าดิน และการจัดการฟางและตอซัง รวมถึงการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน เป็นต้น - จัดกิจกรรมพัฒนาและส่งเสริมการทำนาแบบยั่งยืนและลดโลกร้อน - จัดฝึกอบรมชาวนาต้นแบบ (Smart farmer) 4,600 คน ในพื้นที่มากกว่า 2,500 หมู่บ้าน - ชาวนามากกว่า 96,000 ครัวเรือน ได้รับการส่งเสริมและปรับใช้แนวทางปฏิบัติตามเทคโนโลยีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกบนพื้นที่ปลูกข้าวเขตชลประทานเป็นพื้นที่มากกว่า 1,997,000 ไร่ - ช่วยให้เกิดการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสะสมลง โดยที่ มีเทนลดลง 915,000 tCO_2eq/year ในปี พ.ศ. 2565 - จัดการฝึกอบรมการตรวจวัด รายงานผลและการทวนสอบ (Measuring, Report and Verification: MRV) แก่เจ้าหน้าที่ภาครัฐ - พัฒนายุทธศาสตร์ตลาดข้าวยั่งยืนและจับคู่กับคู่ค้า - พัฒนามาตรฐานข้าวยั่งยืนของประเทศไทย โดยคณะกรรมการมาตรฐานสินค้าเกษตรให้ความเห็นชอบให้มาตรฐานข้าวยั่งยืนเป็นมาตรฐานทั่วไป ของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์เมื่อวันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2565

ที่มา: องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน (2566)

8.5 แนวคิดการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศคือการเพิ่มศักยภาพหรือความสามารถของชุมชน ระบบ หรือสิ่งแวดล้อมให้สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้จากผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือในอีกมุมหนึ่งหมายถึงการลดความเปราะบาง (Vulnerability) หรือการพยายามหาประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมาปรับใช้เพื่อให้เกิดผลกระทบในแง่บวกต่อมนุษย์ สังคม และสิ่งแวดล้อม ซึ่งการดำเนินการปรับตัวดังกล่าวจำเป็นต้องมีแนวทางหรือกลยุทธ์ (Adaptation strategy) เพื่อให้สามารถทำได้จริง กลยุทธ์ดังกล่าวจำเป็นต้องพิจารณาในหลายส่วน เช่น ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในแต่ละสถานการณ์ แนวนโยบายในระดับประเทศ ระดับภูมิภาค หรืออาจพิจารณาเป็นรายกิจกรรมในแต่ละภาคส่วน UN (2024) ได้มีการวางกรอบกระบวนการในการดำเนินงานการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศดัง**รูปที่ 8.5-1** โดยแบ่งการดำเนินงานหลักออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

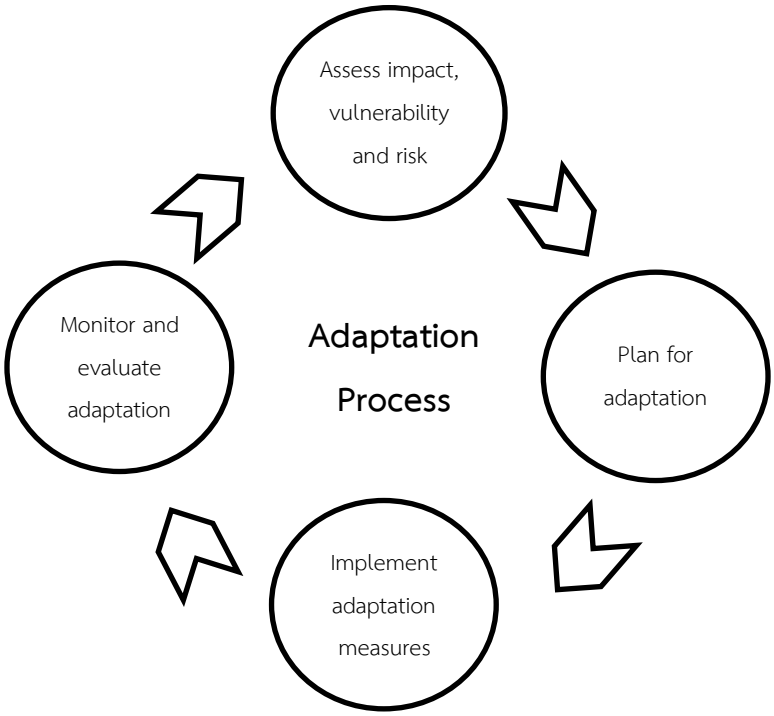
- การประเมินผลกระทบ ความเปราะบาง และความเสี่ยงของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ: ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการแรกที่จำเป็นต้องดำเนินการเพื่อประเมินถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติที่ส่งผลต่อมนุษย์ ชุมชน และสิ่งแวดล้อม เช่น ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในแต่ละพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเนื่องถึงกิจกรรมการเกษตรและความมั่นคงทางด้านอาหารของสิ่งมีชีวิต รวมถึงลักษณะความเป็นอยู่ของสังคม เช่นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายของโรคบางชนิดได้ง่ายมากยิ่งขึ้น เป็นต้น

- การวางแผนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ: เมื่อทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากนั้นจำเป็นต้องมีการระบุถึงแผนงานที่จะดำเนินการเพื่อการปรับตัวและจำเป็นต้องมีการประเมินถึงความเหมาะสมในการดำเนินการตามแผนงานนั้นๆ เช่น การประเมินถึงต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินงานและผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โดยในแผนงานที่จะดำเนินการควรมีการทบทวนถึงความเป็นไปได้ในหลายแผนงานเพื่อคัดเลือกแผนงานที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการดำเนินการ โดยในขั้นตอนการดำเนินงานจำเป็นต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบและเป็นระบบเพื่อป้องกันการดำเนินงานที่ซ้ำซ้อน และควรสนับสนุนแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน

- การดำเนินการตามแผนงานที่วางไว้: การดำเนินการตามแผนงานที่วางไว้สามารถเกิดขึ้นได้ในหลายระดับ เช่น ในระดับชาติ ระดับภูมิภาค หรือระดับท้องถิ่น ซึ่งการวางกลยุทธ์ในการดำเนินงานจำเป็นต้องมีความสอดคล้องกับนโยบายในระดับต่างๆ หรืออาจมีการบูรณาการในหลายภาคส่วนเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการพัฒนาอย่างยั่งยืน

- การตรวจสอบการประเมินผลลัพธ์ของแผนการปรับตัว: เมื่อมีการดำเนินงานตามแผนการปรับตัวแล้วจำเป็นต้องมีการตรวจสอบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งประเมินผลความสำเร็จที่ได้

โดยในการตรวจสอบและประเมินผลดังกล่าวสามารถดำเนินการได้ตลอดในช่วงระหว่างการดำเนินการตามแผน เพื่อให้สามารถประเมินถึงความก้าวหน้าของการดำเนินการ และประเมินผลลัพธ์ในแต่ละช่วงได้ โดยผลการประเมินสุดท้ายสามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนงานการปรับตัวต่อไปในอนาคตได้



ที่มา: ดัดแปลงจาก UN (2024)

รูปที่ 8.5-1 กระบวนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

8.6 การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสำหรับภาคส่วนต่างๆ

8.6.1 แนวทางการปรับตัวภาคการเกษตร

ภาคการเกษตรกรรมเกี่ยวข้องโดยตรงต่อความมั่นคงทางด้านอาหาร (Food security) ซึ่งผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านสภาพอากาศในหลายพื้นที่ที่แตกต่างกัน ความไม่แน่นอนทั้งทางด้านปริมาณและรูปแบบการเกิดฝน รวมถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้องการน้ำของพืชส่งผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณผลผลิต การเสื่อมสภาพของพื้นที่เลี้ยงสัตว์เนื่องจากความแห้งแล้งก่อให้เกิดปริมาณอาหารที่ลดลง เป็นต้น Grigorieva et al. (2024) ได้มีการรวบรวมและระบุถึงกลยุทธ์ในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสำหรับภาคการเกษตรโดยแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับ ดังนี้

(1) แนวทางการปรับตัวในระดับท้องถิ่น

การปรับตัวในระดับท้องถิ่นโดยส่วนใหญ่เป็นการปรับตัวของเกษตรกรโดยการประยุกต์ใช้แนวทางและวิธีการที่หลากหลาย เช่น การปลูกพืชในแต่ละรอบการเพาะปลูกให้มีความแตกต่างกัน หรือในรอบนึงของการเพาะปลูกมีการเพาะปลูกพืชที่มีความหลากหลายเพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเลือกพืชที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์โดยพิจารณาให้เหมาะสมของสภาพอากาศและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ เช่น การปลูกพืชที่ทนแล้งสำหรับพื้นที่ที่มีการลดลงของปริมาณฝน หรือการเปลี่ยนพืชที่เพาะปลูกสำหรับพื้นที่ที่มีน้ำท่วมบ่อยครั้งขึ้น นอกจากนั้นยังมีการปลูกพืชหมุนเวียนเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินและเพิ่มธาตุอาหารในดิน รวมถึงการปรับเปลี่ยนปฏิทินเพาะปลูกพืชเพื่อปรับวันที่ปลูกและวันที่เก็บเกี่ยวให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝน เป็นต้น

นอกจากการพิจารณาเรื่องพืชที่ปลูกและแนวทางการเพาะปลูกแล้ว การปรับตัวของเกษตรกรในเรื่องของเทคโนโลยีที่ใช้ในการเพาะปลูกก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่นการเลือกใช้เทคโนโลยีการให้น้ำที่เหมาะสมและใช้น้ำให้เกิดประโยชน์สูงสุด การนำแอปพลิเคชั่นต่างๆมาใช้เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการให้น้ำแก่พืช เป็นต้น

(2) แนวทางการปรับตัวในระดับภูมิภาค

การปรับตัวในระดับภูมิภาคจะเกี่ยวเนื่องกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมการเกษตร ทั้งหน่วยงานภาครัฐ เอกชน รวมถึงองค์กรต่างๆที่จะนำเทคโนโลยีและองค์ความรู้ต่างๆให้กับเกษตรกรในระดับท้องถิ่น เพื่อให้เกษตรกรสามารถทำการเกษตรได้อย่างต่อเนื่อง สามารถเพิ่มผลผลิตหรือส่งผลกระทบต่อผลผลิตน้อยที่สุด โดยสามารถดำเนินการได้ผ่านการจัดฝึกอบรม การถ่ายทอดองค์ความรู้ เช่น การใช้งานแอพลิเคชั่นที่เกี่ยวข้องกับทางด้านอุตุนิยมวิทยา และการเลือกพืชที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกในพื้นที่ การเลือกใช้เทคโนโลยีสำหรับการให้น้ำของพืชอย่างเหมาะสม รวมถึงเทคโนโลยีที่ช่วยในการเพาะปลูก เป็นต้น รวมถึงการสร้างความเข้าใจในการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและผลกระทบที่จะเกิดขึ้นหากไม่มีการปรับตัวให้กับเกษตรกรได้เข้าใจและตระหนักถึงความสำคัญของการปรับตัว

(3) แนวทางการปรับตัวในระดับชาติ

สำหรับแนวทางการปรับตัวในระดับชาติที่ต้องดำเนินการ ได้แก่ การออกนโยบายที่เกี่ยวข้องจากรัฐบาลในการสนับสนุนให้เกิดการปรับตัวในภาคส่วนต่างๆ ได้แก่ การจัดทำแผนปฏิบัติการสำหรับการปรับตัว (Action Plans for Adaptation) แผนกลยุทธ์สำหรับการปรับตัว (National Strategic Plan) รวมถึงนโยบายทางด้านการเกษตร โดยแต่ละประเทศจะมีรายละเอียดของนโยบาย

และแผนการปรับตัวที่แตกต่างกันตามความเปราะบางของแต่ละประเทศ รัฐบาลควรต้องให้การสนับสนุนการพัฒนา ค้นคว้าและวิจัย (Research and Development) เพื่อให้สามารถศึกษาถึงแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการปรับตัว เช่น การศึกษาการปรับปรุงพันธุ์พืชที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก การพัฒนาระบบการชลประทานที่มีประสิทธิภาพ การพัฒนาระบบการเกษตรอัจฉริยะโดยการเลือกใช้พลังงานหมุนเวียน รวมถึงการพัฒนาระบบการเตือนภัยสำหรับภัยพิบัติที่มีความถี่เพิ่มมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เป็นต้น

8.6.2 แนวทางการปรับตัวการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ

เนื่องด้วยผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของทรัพยากรน้ำในแต่ละพื้นที่ ในบางพื้นที่ปริมาณฝนตกที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้มีปริมาณน้ำต้นทุนในพื้นที่ที่มากขึ้น ในขณะที่บางพื้นที่ปริมาณฝนที่ลดลงส่งผลให้เกิดสภาวะแห้งแล้ง นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงอุทกภัยที่มีความถี่และความรุนแรงที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการปรับตัวในเรื่องของการบริหารจัดการน้ำจึงจำเป็นต้องมีหลายภาคส่วนเข้ามาเกี่ยวข้อง โดย FAO (2024) ได้มีการระบุรายละเอียดการปรับตัวโดยแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การปรับตัวในระดับท้องถิ่นหรือในระดับไร่นา การปรับตัวในเรื่องของการชลประทานและระดับลุ่มน้ำ และการปรับตัวในระดับชาติ (**ตารางที่ 8.6.2-1**) โดยในแต่ละด้านจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนที่ต้องมีการพิจารณาได้แก่ ด้านการลงทุน การบริหารจัดการร่วมกันระหว่างพื้นที่ แหล่งน้ำ และการเพาะปลูก และการสร้างความสามารถของหน่วยงานและนโยบายในด้านที่เกี่ยวข้องโดยมีรายละเอียด ดังนี้

(1) การปรับตัวในระดับท้องถิ่นหรือในระดับไร่นา

ส่วนสำคัญสำหรับการปรับตัวในระดับท้องถิ่นหรือในระดับไร่นาสำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ได้แก่ การกักเก็บน้ำในบริเวณพื้นที่เพาะปลูกหรือบริเวณข้างเคียง เพื่อให้เกษตรกรสามารถทำการเพาะปลูกได้ในช่วงระหว่างฝนทิ้งช่วงเนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยการกักเก็บน้ำสามารถพิจารณาได้จากการเพิ่มความสามารถในการเก็บกักความชื้นในดิน การกักเก็บน้ำในระดับผิวดินหรือใต้ดิน การหาแหล่งน้ำที่มีอยู่ในพื้นที่เพิ่มเติมโดยการพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่และสิ่งแวดล้อมในการนำน้ำใต้ดินมาใช้ เพื่อให้เกษตรกรสามารถเข้าถึงแหล่งน้ำหรือมีน้ำในการทำการเกษตรได้อย่างเพียงพอ

การปรับตัวการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในระดับไร่นาจำเป็นต้องดำเนินการควบคู่ไปกับการปรับตัวทางด้านการเกษตร เช่น การเลือกใช้เทคโนโลยีระบบชลประทานที่เหมาะสมกับพืชและกับพื้นที่เพาะปลูก เพื่อให้สามารถใช้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการเลือกชนิดพืชและการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกเนื่องด้วยความแปรปรวนของปริมาณฝนที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

(2) การปรับตัวของการบริหารจัดการด้านการชลประทาน

การชลประทานเป็นส่วนสำคัญในการบริหารจัดการด้านน้ำเนื่องด้วยการชลประทานเกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการน้ำทั้งในส่วนของภาคการเกษตรรวมถึงความต้องการใช้น้ำในภาคอื่นๆ นอกจากนั้นการชลประทานยังจำเป็นต้องบริหารจัดการน้ำภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติ เช่น การบรรเทาภัยแล้งและอุทกภัย ดังนั้นการชลประทานควรมีระบบการวางแผนและการจัดสรรน้ำอย่างเป็นระบบ มีการประสานงานกับภาคส่วนต่างๆในการแจ้งเตือนและระวังภัยพิบัติทั้งภัยแล้งและน้ำท่วม เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝนส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำในแหล่งน้ำในพื้นที่ต่างๆ การชลประทานจึงต้องมีการปรับตัวทั้งในส่วนของสิ่งก่อสร้างด้านการชลประทานและการบริหารจัดการ การจัดหาแหล่งน้ำขนาดต่างๆเพิ่มเติมรวมถึงการพิจารณาการใช้น้ำใต้ดินในพื้นที่ที่มีความเหมาะสมทางด้านสิ่งแวดล้อมเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญสำหรับการจัดหาแหล่งน้ำต้นทุน ซึ่งการดำเนินงานในส่วนนี้เกี่ยวเนื่องในระดับภาคส่วนภูมิภาค รวมถึง การวางนโยบายในระดับประเทศ

(3) การปรับตัวในระดับลุ่มน้ำและในระดับประเทศ

สำหรับแนวทางการปรับตัวในระดับลุ่มน้ำและในระดับประเทศเกี่ยวข้องกับการวางนโยบาย การลงทุน และการบริหารจัดการในภาคส่วนต่างๆ เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของความถี่และความรุนแรงของเหตุการณ์สุดขั้ว (Extreme event) จึงควรมีการจัดทำแผนการจัดการป้องกันแก้ไขปัญหาน้ำท่วมภัยแล้งโดยการพิจารณาร่วมกันระหว่างการก่อสร้างสิ่งก่อสร้างต่างๆ ที่สามารถป้องกันหรือบรรเทาความรุนแรงที่เกิดขึ้นจากสถานการณ์เหตุการณ์สุดขั้วได้ ควบคู่กับการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดิน และการสร้างระบบเตือนภัยรวมถึงการสนับสนุนการวางแผนการประกันอุบัติภัยที่เหมาะสม เพื่อให้ประชาชนสามารถฟื้นตัวได้หลังจากสถานการณ์ผ่านพ้นไป

นอกจากนั้นการบริหารจัดการน้ำภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับลุ่มน้ำและในระดับประเทศจำเป็นต้องมีข้อมูลที่ถูกต้องและชัดเจนทั้งในส่วนของปริมาณความต้องการน้ำและปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่ในแต่ละลุ่มน้ำ ดังนั้นควรมีการจัดทำบัญชีน้ำและการปรับปรุงบัญชีน้ำที่จัดทำขึ้นให้เป็นปัจจุบันอยู่เสมอ รวมถึงการพัฒนาและติดตั้งเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการตรวจวัดข้อมูลด้านน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำ และการพัฒนาวิธีการหรือการคาดการณ์ข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยาล่วงหน้าให้แม่นยำ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการบริหารจัดการน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 8.6.2-1 แนวทางการดำเนินงานสำหรับการปรับตัวของการบริหารจัดการน้ำในระดับต่างๆ

แนวทางดำเนินการ	ระดับท้องถิ่น/ไร่นา	การชลประทาน	ระดับลุ่มน้ำ	ระดับชาติ
การลงทุน				
- แหล่งกักเก็บน้ำระดับไร่นา	X			
- พัฒนาแหล่งน้ำใต้ดิน	X			
- การปรับปรุงโครงสร้างชลประทานให้มีความทันสมัย	X	X		
- การใช้ระบบชลประทานสมัยใหม่		X	X	X
- การพัฒนาพันธุ์พืชที่เหมาะสมและสามารถอยู่รอดได้ในการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ				X
- การพัฒนาแหล่งกักเก็บน้ำ		X	X	
- การปรับปรุงทางระบายน้ำ	X	X	X	
- การแนะนำชนิดพันธุ์สัตว์น้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยง	X		X	
- การนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่			X	X
- การฟื้นฟูพื้นที่ชุ่มน้ำ			X	X
- การปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานระบบการชลประทานและการระบายน้ำ		X	X	
การจัดการดิน น้ำ และพืช				
- การเพิ่มความสามารถการกักเก็บความชื้นของดิน	X X			
- การเปลี่ยนชนิดพืชและรูปแบบการเพาะปลูก	X			
- การปรับเปลี่ยนปฏิทินเพาะปลูก	X	X		
- การเลือกใช้การชลประทานวิธีต่างๆที่เหมาะสม	X X	X X		
- การชลประทานที่ใช้น้ำน้อย		X	X	
- การปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง		X		
- การจัดการระบายน้ำและการจัดการน้ำท่วม			X	
- การพัฒนาระบบการบริหารจัดการชลประทาน			X	

แนวทางดำเนินการ	ระดับท้องถิ่น/ไร่นา	การชลประทาน	ระดับลุ่มน้ำ	ระดับชาติ
- การจัดการน้ำแบบบูรณาการ			X	
- การใช้น้ำร่วมกันระหว่างน้ำบนดินและน้ำใต้ดิน			X	
- การปรับเปลี่ยนระบบการบริหารจัดการเขื่อนที่เหมาะสม	X			
- การฟื้นฟูหรือการจัดการถิ่นที่อยู่บริเวณริมฝั่งแม่น้ำอย่างเหมาะสม	X			
- การปลูกพืชทนแล้ง				
- การป้องกันการชะล้างพังทลายหน้าดิน				
นโยบาย หน่วยงาน และการเพิ่มขีดความสามารถการจัดการ				
- การจัดสรรน้ำระหว่างกิจกรรมการใช้น้ำ		X	X	X
- สิทธิการเข้าถึงน้ำและการใช้ที่ดิน		X	X	X
- การประกันความเสียหายผลผลิตเนื่องจากน้ำท่วมและภัยแล้ง				X
- การเพิ่มความสามารถในการคาดการณ์สภาพอากาศ	X	X	X	X
			X	X
- การพัฒนาระบบตรวจวัดและระบบเตือนภัย				X
- การพัมนาแนวทางการจัดเก็บค่าการใช้น้ำ				X
- การดำเนินการตามแผนการปรับตัวระดับชาติ			X	X
- การพัฒนาแผนความร่วมมือและการบูรณาการในการปรับตัว				X
- การทบทวนกลยุทธ์ความมั่นคงด้านอาหาร				

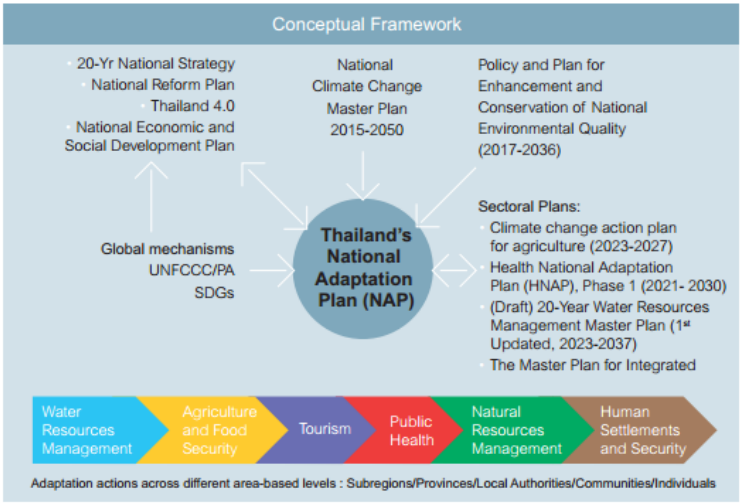
ที่มา: FAO (2024)

8.7 การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

8.7.1 แผนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแห่งชาติ

เนื่องด้วยประเทศไทยได้มีการจัดทำแผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2558-2593 ประกอบไปด้วย 3 แนวทางหลัก ได้แก่ การปรับตัวต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การลดก๊าซเรือนกระจกและส่งเสริมการเติบโตที่ปล่อยคาร์บอนต่ำ และการสร้างขีดความสามารถด้านการบริหารจัดการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ประเทศไทยจึงได้มีการจัดทำแผนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแห่งชาติ (The National Adaptation Plan: NAP) โดยมีกรอบแนวทางการจัดทำแผน (สผ., 2565) ได้แก่

- บูรณาการประเด็นด้านการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเข้ากับนโยบายและแผนการพัฒนาประเทศในทุกระดับ
- การนำเสนอแนวทางและมาตรการทางเลือกในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศรายสาขา (Adaptation options) และประเด็นที่เกี่ยวข้องกับกลายสาขา (Cross cutting issues) ที่สอดคล้องกับบริบทของประเทศ
- สนับสนุนให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องนำแผนการปรับตัวฯ ไปเป็นกรอบสำหรับบูรณาการเข้าสู่นโยบาย แผนงาน และโครงการได้อย่างเหมาะสม และสามารถดำเนินงานร่วมกับภาคส่วนที่เกี่ยวข้องในแต่ละสาขาได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการนำไปสู่การถ่ายทอดการดำเนินงานไปสู่ระดับพื้นที่ ตั้งแต่ระดับระบบนิเวศ ลุ่มน้ำ ภูมิภาค จังหวัด เมือง ชุมชน จนถึงระดับบุคคล



ที่มา: Ministry of Natural Resources and Environment (2023)

รูปที่ 8.7.1-1 แนวคิดการจัดทำแผนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

จาก**รูปที่ 8.7.1-1** เห็นได้ว่าได้มีการประเมินแนวทางการปรับตัวออกเป็นรายสาขาทั้งสิ้น 6 สาขา ได้แก่ การจัดการน้ำ การเกษตรและความมั่นคงทางอาหาร การท่องเที่ยว การสาธารณสุข ทรัพยากรธรรมชาติ และการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์ โดยมีการแบ่งช่วงระยะเวลาการดำเนินการออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ระยะสั้น (พ.ศ. 2566-2570) ระยะกลาง (พ.ศ. 2571-2575) และระยะยาว (พ.ศ. 2576-2580) โดยในแต่ละสาขามีเป้าหมายของการปรับตัวดังนี้

- **การจัดการน้ำ (Water resources management):** เพิ่มความมั่นคงด้านน้ำของประเทศและลดความสูญเสียและเสียหายจากภัยพิบัติด้านน้ำที่เกิดขึ้น

- **การเกษตรและความมั่นคงด้านอาหาร (Agriculture and food security):** รักษาผลิตภาพการผลิตและความมั่นคงทางอาหาร ภายใต้ความเสี่ยงและผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

- **การท่องเที่ยว (Tourism):** เพิ่มขีดความสามารถภาคการท่องเที่ยวให้มีการเติบโตอย่างยั่งยืนและรองรับความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

- **สาธารณสุข (Public health):** มีระบบสาธารณสุขที่สามารถจัดการความเสี่ยงและลดผลกระทบต่อสุขภาพจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- **การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ (Natural resource management**): บริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและความหลากหลายทางชีวภาพอย่างยั่งยืน เพื่อรองรับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

- **การตั้งถิ่นฐานและความมั่นคงของมนุษย์ (Human settlements and security):** ประชาชน ชุมชน และเมือง มีความพร้อมและขีดความสามารถในการปรับตัวต่อความเสี่ยงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมกับบริบทของพื้นที่

โดยรายละเอียดในส่วนนี้จะเน้นถึงหัวข้อหลัก 2 หัวข้อที่เกี่ยวเนื่องกับผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ ได้แก่ การจัดการน้ำ และการเกษตรและความมั่นคงด้านอาหารโดยมีรายละเอียดแนวทางการปรับตัวดังนี้

(1) การจัดการน้ำ (Water resources management):

แนวทางการปรับตัวสำหรับการจัดการน้ำใช้หลักการจัดการลุ่มน้ำซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการจัดการในระดับท้องถิ่น โดยแบ่งพื้นที่การจัดการออกเป็น 3 พื้นที่หลักได้แก่ การจัดการพื้นที่ต้นน้ำ (Upstream management) ซึ่งให้ความสำคัญกับการอนุรักษ์พื้นที่ต้นน้ำ การจัดการพื้นที่กลางน้ำ

และพื้นที่ท้ายน้ำร่วมกัน โดยการให้ความสำคัญต่อการจัดการน้ำสำหรับผู้ใช้น้ำในกิจกรรมต่างๆเช่น การอุปโภค-บริโภค การเกษตรและอุตสาหกรรม เป็นต้น และมุ่งเน้นต่อการจัดการสถานการณ์น้ำท่วมและภัยแล้งที่ส่งผลกระทบต่อกิจกรรมการใช้น้ำด้านต่างๆ และส่วนสุดท้าย ได้แก่ พื้นที่ท้ายน้ำที่ต่อเนื่องกับลุ่มน้ำอื่นหรือพื้นที่บริเวณปากแม่น้ำ มีมาตรการที่เน้นในส่วนของการจัดการคุณภาพน้ำและการฟื้นฟูและอนุรักษ์ระบบนิเวศ นอกเหนือ 3 พื้นที่หลักข้างต้นแล้วยังมีมาตราการในส่วนของการสนับสนุนกลไกที่ใช้ในการจัดการน้ำ รายละเอียดดัง**ตารางที่ 8.7.1-1**

ตารางที่ 8.7.1-1 แนวทางในการปรับตัวด้านการจัดการน้ำของประเทศไทย

แนวทางการปรับตัว (Guidelines)	ผลผลิต (Output)
การจัดการพื้นที่ต้นน้ำ	
- การฟื้นฟูความเสื่อมโทรม การอนุรักษ์ป่าต้นน้ำ และการป้องกันการพังทลายของหน้าดิน - ส่งเสริมแนวทางการมีส่วนร่วมระหว่างชุมชนในพื้นที่ต้นน้ำกับท้องถิ่นและองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเพื่อพัฒนานโยบายและแผนการใช้ที่ดิน - ส่งเสริมการใช้เครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์ในการสร้างแรงจูงใจเพื่อให้ชุมชนในพื้นที่ต้นน้ำปกป้องและอนุรักษ์ระบบนิเวศ	- พื้นที่ลุ่มน้ำ 22 ลุ่มน้ำได้รับการอนุรักษ์และฟื้นฟู - องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและชุมชนต้นน้ำได้มีส่วนในการพัฒนานโยบายและแผนการใช้ที่ดินในรูปแบบของคณะกรรมการลุ่มน้ำทั้ง 22 ลุ่มน้ำ ชุมชนต้นน้ำมีการปรับใช้เครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์เพื่อปกป้องและอนุรักษ์ระบบนิเวศต้นน้ำ
การจัดการพื้นที่กลางน้ำและท้ายน้ำ (การจัดการน้ำท่วม)	
- พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อรับมือสถานการณ์น้ำท่วม โดยการคำนึงถึงลักษณะของแต่ละชุมชน สังคม และระบบนิเวศ - เพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำ - พัฒนาระบบป้องกันน้ำท่วมในพื้นที่เมืองโดยการจัดทำแผนการระบายน้ำระดับลุ่มน้ำ จังหวัด และระดับเมือง - การจัดทำแผนควบคุมสำหรับการสถานการณ์น้ำท่วมในพื้นที่เสี่ยง	- โครงสร้างพื้นฐานสำหรับการรับมือน้ำท่วมที่มีประสิทธิภาพในทุกพื้นที่ที่มีความเสี่ยงน้ำท่วม - พื้นที่มีความเสี่ยงน้ำท่วมมีการจัดการสิ่งกีดขวางทางน้ำธรรมชาติ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพระบบระบายน้ำ - แผนน้ำและแผนการระบายน้ำสำหรับพื้นที่น้ำท่วมในระดับลุ่มน้ำ จังหวัด และเมือง

แนวทางการปรับตัว (Guidelines)	ผลผลิต (Output)
	- แผนควบคุมมลพิษในช่วงระหว่างสถานการณ์น้ำท่วมสำหรับพื้นที่ที่มีความเสี่ยงน้ำท่วมทุกพื้นที่
การจัดการพื้นที่กลางน้ำและท้ายน้ำ (การจัดการภัยแล้ง)	
- พัฒนาระบบฐานข้อมูลทางน้ำได้แก่ รอยเท้าน้ำ (Water Footprint) น้ำต้นทุน และความต้องการน้ำในแต่ละลุ่มน้ำของประเทศไทย (22 ลุ่มน้ำ)	- ระบบฐานข้อมูลทางน้ำได้แก่ รอยเท้าน้ำ (Water Footprint) น้ำต้นทุน และความต้องการน้ำในแต่ละภาคส่วนทั้ง 22 ลุ่มน้ำ เพื่อสนับสนุนการจัดการน้ำ และการวางแผนการจัดสรรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ
- เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการน้ำต้นทุนและการกักเก็บน้ำโดยการกำหนดอัตราส่วนการใช้น้ำสำหรับของแต่ละภาคส่วนการใช้น้ำโดยการพิจารณาปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำเก็บกักในลุ่มน้ำ 22 ลุ่มน้ำของประเทศไทย	- อัตราส่วนการใช้น้ำในแต่ละภาคส่วนที่สอดคล้องกับปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำเก็บกัก และมีการจัดสรรน้ำอย่างเหมาะสมกับความต้องการน้ำทุกกิจกรรม
- พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อระบบการเก็บกักและการจัดสรรน้ำในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงภัยแล้งซ้ำซาก พื้นที่นอกเขตชลประทานและพื้นที่ที่มีการใช้น้ำใต้ดิน	- การจัดการแหล่งน้ำในพื้นที่ที่มีภัยแล้งซ้ำซาก พื้นที่นอกเขตชลประทาน และพื้นที่ที่มีการใช้น้ำใต้ดิน รวมถึงการจัดให้มีระบบชลประทานที่ครอบคลุมทุกพื้นที่ที่มีศักยภาพทางด้านเกษตรกรรมของประเทศ
- เพิ่มประสิทธิภาพการจัดการการใช้น้ำร่วมกันระหว่างน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินในพื้นที่เสี่ยงภัยแล้ง	- การจัดการการใช้น้ำร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การฟื้นฟูทรัพยากรน้ำใต้ดินในพื้นที่ประสบภัยแล้ง
- พัฒนาระบบโครงข่ายน้ำ (Water Grid System)	- มีการพัฒนาระบบโครงข่ายน้ำเชื่อมต่อระหว่างลุ่มน้ำ
การจัดการพื้นที่ท้ายน้ำ	
- การอนุรักษ์และฟื้นฟูแม่น้ำและแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไประเทศโดยความร่วมมือของทุกภาคส่วน	- ลุ่มน้ำสายหลักมีการอนุรักษ์และแผนฟื้นฟูแม่น้ำและแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป รวมถึง

แนวทางการปรับตัว (Guidelines)	ผลผลิต (Output)
	แผนการจัดสรรน้ำเพื่อการป้องกันและคุ้มครองระบบนิเวศ
- ปรับปรุงระบบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและการควบคุมการปล่อยน้ำเสียสู่สิ่งแวดล้อม	- ชุมชนเมืองและเขตอุตสาหกรรมได้มีการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ
- ส่งเสริมการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรม	- มีการพัฒนาเทคโนยีระบบบำบัดน้ำเสียในพื้นที่เสี่ยงน้ำท่วมเพื่อให้ระบบการนำน้ำเสียกลับมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรม
- เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการรุกล้ำของน้ำเค็มที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล ความแห้งแล้ง และการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าจากกิจกรรมของมนุษย์	- โครงสร้างพื้นฐานเพื่อป้องกันการรุกล้ำของน้ำเค็มและมีน้ำต้นทุนเพิ่มขึ้นในทุกพื้นที่เสี่ยงสถานการณ์น้ำทั่วประเทศ
กลไกการจัดการน้ำ	
- พัฒนาดัชนีความมั่นคงทางน้ำแห่งชาติ	- มีการพัฒนาดัชนีความมั่นคงด้านน้ำ
- จัดทำ EbA/NbS สำหรับการจัดการทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำ	- คู่มือ EbA/NbS สำหรับการจัดการทรัพยากรน้ำและการเพิ่มขีดความสามารถในการจัดการ
- พัฒนาระบบพยากรณ์น้ำและการรายงานผล	- ความสามารถการพยากรณ์น้ำที่แม่นยำและมีระบบการรายงานและการเผยแพร่แก่ผู้ใช้งานทั่วไป
- การทำแผนที่ความเสี่ยงแบบบูรณาการในรูปแบบของโครงการ One Map ที่จัดทำขึ้นร่วมกันโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อคาดการณ์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำ	- แผนที่ความเสี่ยงระดับพื้นที่และการพยากรณ์สภาพอากาศภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศต่อการจัดการทรัพยากรน้ำ
- พัฒนาแผนการจัดการทรัพยากรน้ำ แผนแม่บทลุ่มน้ำ และแผนการดำเนินการ	- แผนฉุกเฉินสำหรับการจัดการลุ่มน้ำโดยการมีส่วนร่วมของทุกภาคส่วน

แนวทางการปรับตัว (Guidelines)	ผลผลิต (Output)
- สร้างเครือข่ายเฝ้าระวังภัยพิบัติในพื้นที่เสี่ยงด้วยการเสริมสร้างศักยภาพของส่วนรวมของประชาชนตั้งแต่ครัวเรือนไปจนถึงระดับประเทศ	- เครือข่ายเฝ้าระวังภัยพิบัติและการเตือนภัยล่วงหน้าที่จัดทำขึ้น โดยสามารถเชื่อมโยงข้อมูลร่วมกันทั้งเรื่องของน้ำท่วม ภัยแล้ง และดินถล่ม และเชื่อมโยงข้อมูลจากครัวเรือนสู่ระดับชาติ ซึ่งสามารถลดความสูญเสียของชีวิตและทรัพย์สิน
- สนับสนุนการบูรณาการภูมิปัญญาท้องถิ่นสู่รวัตกรรมการจัดการทรัพยากรน้ำให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละท้องถิ่น	- นวัตกรรมสำหรับการบูรณาการภูมิปัญญาท้องถิ่นอย่างมีประสิทธิภาพและมีการดำเนินการในระดับท้องถิ่น
- เสริมสร้างความร่วมมืออย่างต่อเนื่องภายใต้กลไกความร่วมมือด้านทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีความสำคัญในระดับนานาชาติ	- ยุทธศาสตร์การจัดการทรัพยากรน้ำภายใต้การบูรณาการความร่วมมือเชิงรุกเข้าสู่แผนการจัดการน้ำในท้องถิ่นของทุกจังหวัดที่ได้รับผลกระทบจากการจัดการแม่น้ำโขง

ที่มา: Ministry of Natural Resources and Environment (2023)

(2) การเกษตรและความมั่นคงด้านอาหาร

ภาคการเกษตรได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยตรงเนื่องด้วยจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ปริมาณและรูปแบบการเกิดฝน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงฤดูกาล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ส่งผลต่อผลผลิตทางด้านการเกษตรทั้งทางตรงและทางอ้อม ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของทรัพยากรดินและน้ำ การเกิดโรคของพืช การเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัว การขยายพันธุ์ของแมลงและที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิต แนวทางการปรับตัวในเรื่องของการเกษตรและความมั่นคงด้านอาหารของประเทศไทยมี 4 แนวทาง ได้แก่ การจัดการพื้นที่เพาะปลูก การจัดการพื้นที่ปศุสัตว์ การจัดการด้านการประมงและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำตามแนวทางที่เหมาะสมในการจัดการพื้นที่ และกลไกสนับสนุนการเกษตรกรรมและความมั่นคงด้านอาหาร รายละเอียดดัง**ตารางที่ 8.7.1-2**

ตารางที่ 8.7.1-2 แนวทางในการปรับตัวด้านการเกษตรและความมั่นคงด้านอาหาร

แนวทางการปรับตัว (Guidelines)	ผลผลิต (Output)
การจัดการพื้นที่เพาะปลูก	
- ส่งเสริมให้มีการปรับตัวการทำเกษตรกรรมเพื่อเตรียมรับการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	- มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำการเกษตรให้เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและเหมาะสมกับบริบทของพื้นที่
- ส่งเสริมการเกษตรแบบผสมผสานหรือการปลูกพืชหมุนเวียนเพื่อลดความเสี่ยงและความเสี่ยงหายจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	- เกษตรกรลดการเพาะปลูกพืชเชิงเดี่ยวและมีการทำเกษตรผสมผสาน
- พัฒนาและปรับปรุงการจัดการน้ำในพื้นที่ชลประทานที่ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมและน้ำแล้งให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น	- มีการบูรณาการจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการชลประทาน ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงน้ำท่วมและภัยแล้ง และมีกรอบการใช้น้ำร่วมกันระหว่างผู้ใช้น้ำ
- พัฒนาแหล่งน้ำในพื้นที่นอกเขตชลประทานให้มีประสิทธิภาพและเพียงพอต่อความต้องการน้ำสำหรับการเพาะปลูกและการปศุสัตว์	- มีการปรับปรุงระบบเก็บกักน้ำฝนและแหล่งน้ำขนาดเล็กรวมถึงการบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพในพื้นที่เกษตรในพื้นที่นอกเขตชลประทาน
- ส่งเสริมมาตรการอนุรักษ์ดิน การฟื้นฟูและการบำรุงรักษาความอุดมสมบูรณ์ของดินพื้นที่เกษตรกรรมเสื่อมโทรม เช่น การปลูกพืชคลุมดิน การไถพรวน การปลูกพืชให้เหมาะสมต่อดินและสภาพอากาศ เพื่อป้องกันการเสื่อมโทรมของพื้นที่ทำการเกษตร เพื่อเพิ่มผลผลิตอาหาร สร้างความมั่นคงทางด้านอาหาร	- มาตรการอนุรักษ์ดิน การฟื้นฟูและรักษาความสมบูรณ์ของดินเพื่อเพิ่มผลผลิตต่อหน่วย และลดความเสื่อมโทรมของที่ดินในประเทศ
การจัดการพื้นที่ปศุสัตว์	
- พัฒนาระบบการจัดการปศุสัตว์และผลผลิตที่ได้จากการปศุสัตว์ให้เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	- เกษตรกรในพื้นที่เสี่ยงสามารถพัฒนาและปรับปรุงการจัดการระบบการปศุสัตว์และผลผลิตที่ได้ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

แนวทางการปรับตัว (Guidelines)	ผลผลิต (Output)
- พัฒนาระบบการควบคุม ป้องกัน และรักษาโรคของปศุสัตว์อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดโรคระบาดจากภาวะน้ำแล้งและอุทกภัย	- มีระบบการควบคุม ป้องกัน และรักษาโรคอย่างเพียงพอในการจัดการที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดโรคระบาดจากภาวะน้ำแล้งและอุทกภัย
การจัดการด้านการประมงและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	
- พัฒนาระบบการจัดการประมงให้ตอบสนองต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	- เกษตรกรในพื้นที่เสี่ยงภัยมีการใช้แนวทางที่หลากหลายในการขยายพันธุ์สัตว์น้ำ และการป้องกันการสร้างเขตป้องกันการกัดเซาะชายฝั่งเพื่อป้องกันพื้นที่วางไข่ของสัตว์น้ำ
- ฟื้นฟูทรัพยากรประมงและแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตทางน้ำเพื่อสร้างความสมดุลต่อความหลากหลายทางชีวภาพทางน้ำ	- แหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำได้รับการฟื้นฟูและมีความหลากหลายของชนิดพันธุ์สัตว์น้ำ
- พัฒนาระบบการควบคุม ป้องกัน และรักษาโรคของสัตว์	- แนวทางและระบบป้องกันผลกระทบจากความเสียหายที่เกิดจากอุทกภัยและความแห้งแล้งในการประมงและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
กลไกการสนับสนุนการเกษตรกรรมและความมั่นคงด้านอาหาร	
- พัฒนาดัชนีเพื่อประเมินศักยภาพในการพึ่งตนเองของภาคเกษตรกรรมที่เกี่ยวเนื่องกับสถานการณ์รุนแรงทางด้านภูมิอากาศในพื้นที่ต่างๆ	- ดัชนีเพื่อประเมินศักยภาพของการพึ่งพาตนเองในภาคเกษตรกรรม ในกรณีที่เกิดภัยพิบัติที่เกี่ยวเนื่องกับสภาพภูมิอากาศ
- พัฒนาระบบเตือนภัยล่วงหน้าสำหรับภาคเกษตรกรรมที่มีความแม่นยำและสามารถเข้าถึงได้ง่ายอย่างทันท่วงที และมีการเชื่อมโยงอย่างมีประสิทธิภาพ	- ระบบเตือนภัยล่วงหน้าที่มีประสิทธิภาพสำหรับภาคเกษตรกรรม ที่สามารถเชื่อมโยงกับระบบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง และเกษตรกรสามารถเข้าถึง ระบบนั้นได้ง่าย โดยเฉพาะในพื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติ

แนวทางการปรับตัว (Guidelines)	ผลผลิต (Output)
- จัดทำแผนที่พื้นที่เกษตรกรรมที่มีความเสี่ยงและได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับท้องถิ่น และให้เกษตรกรสามารถเข้าถึงและใช้งานได้	- แผนที่แสดงพื้นที่เกษตรกรรมที่มีความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการฉายภาพผลกระทบที่เกิดขึ้นในระดับท้องถิ่น ซึ่งเชื่อมโยงกับประเด็นสำคัญอื่นๆ ได้แก่ทางด้านเศรษฐกิจสังคม และสิ่งแวดล้อม รวมถึงการสร้างช่องทางการจัดส่งข้อมูลไปยังพื้นที่เสี่ยงภัย
- พัฒนาเทคโนโลยีการทำฟาร์มที่แม่นยำเพื่อลดต้นทุนการดำเนินงานและให้เกษตรกรสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีดังกล่าวได้ และเพิ่มประสิทธิภาพในการวางแผนจัดการกิจกรรมทางการเกษตร	- เกษตรกรสามารถเข้าถึงและใช้งานเทคโนโลยีการเกษตรที่มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ
- ส่งเสริมการแบ่งเขตเศรษฐกิจโดยการใช้ระบบแผนที่เกษตรแปลงใหญ่สำหรับการประเมินผลผลิตทั้งหมด	- เขตเศรษฐกิจการเกษตรและกิจกรรมส่งเสริมการเกษตรเพื่อส่งเสริมให้เกษตรกรดำเนินการปฏิบัติวิธีการทำการเกษตรให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ทั่วประเทศ
- ส่งเสริมการผลิตของการเกษตรแนวใหม่ การเกษตรยั่งยืน และการเกษตรผสมผสานเพื่อการผลิตอาหารที่เพียงพอต่อการบริโภคในครัวเรือน เพื่อลดความสี่ยงต่อการขาดแคลนอาหาร	- เกษตรกรในชุมชนมีอาหารเพียงพอ โดยการใช้เทคโนโลยีของเกษตรทฤษฎีใหม่ เกษตรยั่งยืนและเกษตรผสมผสาน
- ส่งเสริมการฟื้นฟูอาหารในท้องถิ่น รวมถึงการถนอมและเก็บอาหาร	- เกษตรกรในชุมชนมีแหล่งอาหารสำรองสำหรับการบริโภค
- จัดตั้งธนาคารเพื่อเป็นสื่อกลางในการกู้ยืมเมล็ดพันธุ์ พืชผลปศุสัตว์ และพันธุ์สัตว์น้ำ และการเตรียมพร้อมสำหรับเหตุการณ์ภัยพิบัติทางธรรมชาติ	- มีการจัดตั้งธนาคาร ในการกู้ยืมเมล็ดพันธุ์พืชผล ปศุสัตว์ และพันธุ์สัตว์น้ำ
- ส่งเสริมการปรับปรุงพันธุ์พืชและสัตว์ ให้มีความหลากหลาย เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และสนับสนุน	- เกษตรกรในพื้นที่เสี่ยง สามารถใช้ พันธุ์พืชและพันธุ์สัตว์ที่ได้รับการปรับปรุง ในกระบวนการผลิต

แนวทางการปรับตัว (Guidelines)	ผลผลิต (Output)
ให้เกษตรกรเข้าถึงความหลากหลายของพันธุ์พืชและสัตว์ดังกล่าว	
- พัฒนาระบบสำรองอาหารแห่งชาติ ให้มีการกระจายอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ และมีการวางแผนป้องกันการขาดแคลนวัตถุดิบในอุตสาห กรรมอาหาร เมื่อผลผลิตทางการเกษตรได้รับผลกระทบจากภัยธรรมชาติ	- มีระบบสำรองอาหารแห่งชาติที่มีประสิทธิภาพและมีการสร้างกลไกในการกระจายผลผลิต
- สนับสนุนการวิจัยและพัฒนาเพื่อลดการสูญเสีย อาหาร และลดการเกิดขยะจากอาหารที่มีจากการเกษตร ทำไมอ่ะเพิ่งตื่นฉันเสร็จแล้ว	- มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดการสูญเสียหาร และลด การเกิดขยะจากอาหารที่มาจากการเกษตร
- สนับสนุนการสร้างเครือข่ายสำหรับการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในภาคเกษตรกรรม การสร้างความร่วมมือในการเตือนภัยล่วงหน้า และการประเมินความเสี่ยง รวมถึงการแลกเปลี่ยนความรู้ เทคโนโลยี และนวัตกรรมการเกษตรที่เชื่อมโยงกับบริบทท้องถิ่น	- มีเครือข่ายความร่วมมือด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สำหระบการปรับตัวอย่างทันท่วงที พร้อมทั้งมีระบบเตือนภัย และการแลกเปลี่ยนความรู้ เทคโนโลยีและนวัตกรรม
- สร้างความตระหนักรู้ให้กับเกษตรกรในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ส่งผลกระทบต่อภาคเกษตรกรรม และการสร้างความสามารถให้กับเกษตรกรในการปรับตัว และการจัดการด้านความเสี่ยงของสภาพอากาศ	- เกษตรกรและผู้มีส่วนได้เสีย ในภาคการเกษตรสามารถเข้าถึงข้อมูล ที่เกี่ยวข้องกับการปรับตัวต่อเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้
- พัฒนางานวิจัยเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ ที่ส่งผลกระทบต่อภาคเกษตรกรรม ในด้านต่างๆ ได้แก่การเพาะปลูกพืชการปศุสัตว์ การประมง และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	- งานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อภาคเกษตรกรรมที่สามารถนำไปใช้กำหนดเป็นมาตรการปรับตัว ได้

ที่มา: Ministry of Natural Resources and Environment (2023)

8.7.2 กรณีศึกษาการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย

ประเทศไทยได้มีการวางแนวนโยบายและแผนงานที่เกี่ยวข้องกับการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในหลายภาคส่วน ซึ่งหนึ่งในภาคส่วนที่สำคัญสำหรับประเทศไทยและได้รับผลกระทบโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้แก่ภาคเกษตรกรรม ซึ่งกรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2563) ได้มีการเสนอแนวทางการปรับตัวให้กับเกษตรกร โดยมีทางเลือกในการดำเนินงานทั้งสิ้น 6 ทางเลือก ได้แก่

- ทางเลือกที่ 1: การปรับเปลี่ยนเทคนิคหรือวิถีการผลิตได้แก่ การปรับเปลี่ยนปฏิทินการปลูกพืช การเหลื่อมเวลาปลูกพืช เปลี่ยนพันธุ์พืช เปลี่ยนชนิดพืช ลดพื้นที่ปลูกพืชเชิงเดี่ยว ปลูกพืชไร้ดิน การใช้พันธุ์ข้าวทนแล้ง ใช้ระบบน้ำหยด หรือระบบสปริงเกอร์ การใช้เทคนิคการแกล้งข้าว การใช้หลักเกษตรทฤษฎีใหม่ เน้นการปลูกพืชผสมผสาน ปลูกพืชอายุสั้นใช้น้ำน้อย การหยุดพักแปลงในช่วงที่เกิดอุทกภัยหรือฝนแล้ง เป็นต้น

- ทางเลือกที่ 2: การปรับปรุงพัฒนาระบบแหล่งน้ำและระบบส่งจ่ายน้ำ ได้แก่ การใช้ท่อส่งน้ำ (PE) ในการจ่ายน้ำทดแทนลำเหมืองหรือรางเปิด การสร้างระบบหอถังสูง กักเก็บน้ำสำรองในพื้นที่ของตนเอง การขุดลอกอ่างเก็บน้ำ ลำห้วยและแหล่งต้นน้ำ การใช้วัสดุลดอัตราการระเหยของแหล่งกักเก็บน้ำเพื่อลดการสูญเสียน้ำ เป็นต้น

- ทางเลือกที่ 3: การบริหารจัดการที่ดิน เช่น การยกคันนาให้สูงขึ้นเพื่อเป็นคันกั้นชะลอน้ำ การปลูกข้าวในพื้นที่ต่ำก่อนการปลูกในพื้นที่สูงเพื่อเก็บเกี่ยวก่อนน้ำท่วม หรือทำนาลอยน้ำ หรือการเช่าพื้นที่เพื่อปลูกพืชอายุสั้นในพื้นที่น้ำท่วมไม่ถึง เป็นต้น

- ทางเลือกที่ 4: ปรับปรุงและอนุรักษ์ดินโดยการลดใช้สารเคมี และให้มีการใช้ปุ๋ยหรือสารชีวภาพทดแทนเพื่อเพิ่มผลผลิตและป้องกันการกำจัดศัตรูพืช เช่น การผลิตพืชอินทรีย์ หรือการผลิตแบบปลอดภัย

- ทางเลือกที่ 5: อนุรักษ์ป่าไม้และสภาพแวดล้อมเพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นแก่ดินและบรรเทาความแห้งแล้งโดยการสร้างฝายชะลอน้ำ รวมถึงการกระตุ้นจิตสำนึกของเกษตรกรและผู้อยู่อาศัยในพื้นที่ในการอนุรักษ์สภาพแวดล้อม

- ทางเลือกที่ 6: การทำประกันภัยพืชผล โดยในปัจจุบันมีการประกันภัยพิบัติในสินค้าข้าว ได้แก่ ภัยพิบัติจากอุทกภัย ภัยแล้ง ภัยอากาศหนาวหรือน้ำค้างแข็ง วาตภัย ลูกเห็บ และอัคคีภัย เป็นต้น ซึ่งการประกับภัยรัฐบาลและธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์สนับสนุนให้เกษตรกรมีการประกันภัย

โดยตัวอย่างการปรับตัวในภาคการเกษตร ได้แก่ ในพื้นที่ปลูกข้าวภาคกลางจะมีการสนับสนุนให้มีการลดจำนวนรอบของการปลูกข้าวให้เหลือเพียง 2 รอบ ก่อนฤดูน้ำหลาก รอบที่ 1 จะมีการปลูกและเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนมกราคม - เมษายน และรอบที่ 2 จะปลูกและเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนพฤษภาคม - กันยายน นอกจากนั้นยังมีตัวอย่างของเกษตรกรผู้ปลูกผักในจังหวัดสุราษฎร์ธานีที่เลือกปลูกผักที่เจริญเติบโตได้ดีในภาวะน้ำท่วมหรือน้ำหลาก เช่น ผักบุ้งไทย และผักบุ้งจีน ทดแทนผักชนิดเดิม เป็นต้น (กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2563)

สรุปบทที่ 8
มาตรการลดผลกระทบและการปรับตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

- มาตราการลดผลกระทบ (Mitigation) หมายถึง แนวทางการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศเพื่อลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการปรับตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Adaptation) หมายถึงการปรับตัวของมนุษย์ สังคม และสิ่งแวดล้อม เพื่อให้สามารถดำรงอยู่ได้เมื่อได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งการดำเนินการเพื่อแก้ไขปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจำเป็นต้องมีการดำเนินการทั้ง 2 แนวทางควบคู่กัน

- มาตราการลดผลกระทบมีพื้นที่ที่ได้รับประโยชน์ในระดับนานาชาติและใช้ระยะเวลายาวนานในการเห็นผลลัพธ์ของมาตราการที่ใช้ ในขณะที่มาตรการการปรับตัวจะเกี่ยวเนื่องกับในระดับท้องถิ่นเนื่องด้วยในแต่ละพื้นที่จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปและระยะเวลาในการเห็นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในแต่ละพื้นที่จะสั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของการใช้มาตรการลดผลกระทบ

- การดำเนินงานของมาตรการลดผลกระทบที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันได้แก่การใช้กลไกตลาดคาร์บอน (Carbon market) การใช้ภาษีคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission tax) ซึ่งเป็นกลไกทางการเงินและการตลาด นอกจากนั้นยั้งมีกิจกรรมที่เกี่ยวเนื่องกับกระบวนการผลิตสินค้าและบริการ เช่น การเลือกใช้พลังงานหมุนเวียน การเลือกใช้พลังงานนิวเคลียร์ การใช้เทคโนโลยีเพื่อดักจับและกักเก็บคาร์บอนไม่ให้ถูกปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศและนำมาใช้ประโยชน์เพิ่มเติม เป็นต้น

- มาตรการลดก๊าซเรือนกระจกในภาคการเกษตรสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ มาตรการลดปริมาณก๊าซของด้านผู้ผลิตหรืออุปทาน (Supply-side measures) เช่นการพัฒนาและสนับสนุนวิธีการทำการเกษตรเพื่อลดก๊าซเรือนกระจก เช่น การทำนาแบบเปียกสลับแห้ง (Alternative wetting and drying: AWD) และมาตรการด้านผู้บริโภคหรืออุปสงค์ (Demand-side measures) เช่น การสนับสนับสนุนให้ผู้บริโภคเลือกบริโภคสินค้าและบริหารที่คำนึงถึงการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

- การตั้งเป้าหมายของการลดก๊าซเรือนกระจกสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ การลดก๊าซเรือนกระจกเทียบกับปีฐาน (Base year emission), การลดค่าความเข้มข้นของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

เทียบกับปีฐาน (Base year emission intensity), การลดก๊าซเรือนกระจกจากเส้นฐานคาดการณ์ (Baseline scenario target) และ การกำหนดเป้าหมายที่ไม่ได้ระบุปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจก (Non-quantified greenhouse gas reduction target)

- ประเทศไทยเลือกใช้การกำหนดเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกจากเส้นฐานคาดการณ์ (BAU) โดยได้มีการตั้งเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ (Intended Nationally Determined Contribution: INDC) และมีการแสดงเจตจำนงการดำเนินงานลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมของประเทศ (Nationally Appropriate Mitigation Actions: NAMAs) ที่จะลดก๊าซเรือนกระจกใน 3 สาขาหลัก ได้แก่ สาขาพลังงานและขนส่ง สาขาการจัดการของเสีย และภาคกระบวนการทางอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 115.6 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์ ($MtCO_2eq$) ในปี 2030 ประกอบไปด้วยมาตรการที่เกี่ยวข้อง 15 มาตรการ

- ประเทศไทยมีการตั้งเป้าหมายในการเข้าสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon neutrality) ในปี 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ (Net zero greenhouse gas emissions) ในปี 2065 โดยมีกิจกรรมที่เกี่ยวข้องได้แก่ สาขาพลังงาน สาขาคมนาคมขนส่ง สาขากระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ สาขาการจัดการของเสีย และสาขาการเกษตร

- แนวทางการปรับตัวของภาคการเกษตรสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่ (1) การปรับตัวในระดับท้องถิ่นโดยมุ่งเน้นวิธีการเพาะปลูกของเกษตรกร การเลือกใช้พืชที่ได้รับการปรับปรุงพันธ์ให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่ทำการเกษตร (2) การปรับตัวในระดับภูมิภาคซึ่งจะเกี่ยวเนื่องกับองค์กรต่างๆทั้งภาครัฐและเอกชนที่พัฒนา และสนับสนุนเทคโนโลยีรวมถึงองค์ความรู้ต่างๆให้กับเกษตรกร และ (3) การปรับตัวในระดับชาติโดยการสนับสนุนจากรัฐบาลในการออกนโยบายทางด้านการเกษตรและแผนการปรับตัวด้านต่างๆ

- แนวทางการปรับตัวด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนได้แก่ (1) การปรับตัวในระดับท้องถิ่นหรือในระดับไร่นา เช่น การกักเก็บน้ำในบริเวณพื้นที่เพาะปลูก การใช้เทคโนโลยีช่วยการเพิ่มประสิทธิภาพในการให้น้ำแก่พืช (2) การปรับตัวด้านการบริหารจัดการชลประทาน โดยการวางแผนการบริหารจัดการน้ำภายใต้สถานการณภัยพิบัติ การจัดหาแหล่งน้ำต่างๆเพิ่มเติม และการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมมาใช้เพื่อการวางแผนและการคาดการณ์การจัดสรรน้ำ และ (3) การปรับตัวในลุ่มน้ำและระดับประเทศ โดยการวางนโยบายของภาคส่วนต่างๆในการบริหารจัดการน้ำ การสร้างระบบเตือนภัยและคาดการณ์ปริมาณน้ำในระดับลุ่มน้ำ เป็นต้น

- ประเทศไทยมีแผนการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแห่งชาติ (The national adaptation plan: NAP) โดยมีกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง 6 สาขา ได้แก การจัดการน้ำ การเกษตรและความมั่นคงทางอาหาร การท่องเที่ยว การสาธารณสุข ทรัพยากรธรรมชาติและการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์

คำถามท้ายบทและการค้นคว้าเพิ่มเติม

1. จงอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างมาตรการลดผลกระทบ (Mitigation) และมาตรการการปรับตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Adaptation) พร้อมทั้งยกตัวอย่างที่เกี่ยวข้อง

2. จงอธิบายถึงวิธีการในการตั้งเป้าหมายของการลดก๊าซเรือนกระจกพร้อมทั้ง ระบุถึงการตั้งเป้าหมายของประเทศไทย

3. จงค้นคว้าและอธิบายถึงลักษณะกลไกตลาดคาร์บอนที่ประเทศไทยใช้ในการดำเนินงานเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก พร้อมทั้งยกตัวอย่างหน่วยงานที่มีการดำเนินการและสรุปวิธีการในการดำเนินการของหน่วยงานนั้นๆ

4. ศึกษาและยกตัวอย่างถึงเทคโนโลยีหรือนวัตกรรมที่ใช้ในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่มีการใช้จริงในประเทศไทยพร้อมทั้งอธิบายรายละเอียดข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีหรือนวัตกรรมดังกล่าว

5. ค้นคว้าและยกตัวอย่างการดำเนินการจริงของการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการน้ำหรือการเปลี่ยนแปลงทางด้านการเกษตร พร้อมทั้งวิเคราะห์ถึงความสำเร็จของโครงการ ข้อดีและข้อเสียของโครงการ

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2563. การปรับตัวของเกษตรกรในสภาวะที่อากาศเปลี่ยนแปลง. https://mediatank.doae.go.th/medias/file_upload/07-2022/2-1738840247713537.pdf

ดวงนภา วานิชสรรพ์ และ บัญชา ขวัญยืน. 2557. การพัฒนาการบริหารจัดการน้ำในนาข้าวเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 25 (1), 59-69.

ญาณวุฒิ อุทรักษ์, ธีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ, สาธิต แสงประดิษฐ์, เชฐพงษ์ บุตรเทพ, สมิทร เหลี่ยมมณี, โสภณ อินทรา และ พัชรพล ขุนทอง. 2567. การบรรเทาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยวิธีการทำนาแบบเปียกสลับแห้งเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก. วารสารวิชาการเพื่อการพัฒนานวัตกรรมเชิงพื้นที่ (JSID). 5 (2), 93-104.

สผ. (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม). 2560. แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจก.

สผ. (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม). 2565. รายงานแห่งชาติฉบับที่ 4 (Fourth National Communication: NC4). https://eservice.dcce.go.th/e-book/124/index.html

สผ. (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม). 2566. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่างๆของไทย. https://epo04.pcd.go.th/th/news/detail/144165/

สำนักงานที่ปรึกษาด้านการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. Nuclear Power Plant. วารสารอุดมวิทย์, 3, 1-16.

สำนักจัดการป่าชุมชน. 2557. คู่มือการสำรวจการกักเก็บคาร์บอนและความหลากหลายทางชีวภาพในป่าชุมชน. https://www.forest.go.th/community-development/wp-content/uploads/sites/105/2020/03/%E0%B8%84%E0%B8%B9%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%9A%E0%B8%AD%E0%B8%99.pdf

สถาบันการพัฒนาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน. 2567. คาร์บอนเครดิตไม่ใช่สิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจก. https://hub.mnre.go.th/th/knowledge/detail/65785

สถาบันระหว่างประเทศเพื่อการค้าและการพัฒนา. 2555. ภาษีคาร์บอนเครื่องมือลดโลกร้อน. https://www.itd.or.th/itd-data-center/research-report_carbon-tax/

สาพิศ ดิลกสัมพันธ์ และ นรินธร จำวงษ์. 2563. การประเมินการกักเก็บคาร์บอนในภาคป่าไม้และโครงการ T-VER. https://www.ourkhungbangkachao.com/Uploads/articles/การประเมินการกักเก็บคาร์บอนในภาคป่าไม้.pdf

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. 2558. การดำเนินงานลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมของประเทศ (Nationally Appropriate Mitigation Actions: NAMAs).

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. 2567. หลักการและแนวคิดภาษีคาร์บอน. https://carbonmarket.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=dGF4X2NvbmNlcHQ=

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. 2562. มาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม. https://ghgreduction.tgo.or.th/th/download-tver/68-tver-publications/1228-2019-09-30-04-25-05.html

องค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศของเยอรมัน. 2566. โครงการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดภาวะโลกร้อนจากการทำนา เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน. https://www.thai-german-cooperation.info/th/thai-rice-nama-nationally-appropriate-mitigation-action/

FAO. 2024. Water Management Options for Climate Change Adaptation. https://www.fao.org/climate-smart-agriculture-sourcebook/production-resources/module-b6-water/chapter-b6-4/en/

Grigorieva, E., Livenets, A. and Stelmakh, E. 2023. Adaptation of agriculture to climate change: a scoping review. Climate, 11, 202. https://doi.org/10.3390/cli11100202

Locatelli, B. 2011. Synergies Between Adaptation and Mitigation in A Nutshell. Climate. Center for International Forestry Research (CIFOR).

Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand. (2023). Thailand's National Adaptation Plan (NAP). Published November 2023; submitted to UNFCCC 18 April 2024.

OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). 2019. Enhancing Climate Change Mitigation through Agriculture. DOI https://doi.org/10.1787/e9a79226-en

TTGREEN. 2023. Understanding the Carbon Market: What is Carbon Market and How does It Work? https://www.tt-green.com/understanding-the-carbon-market/

UN. 2024. Adaptation and Resilience. https://unfccc.int/topics/adaptation-and-resilience/the-big-picture/introduction

ภาคผนวก

APPENDIX

ภาคผนวก ก - การกำกับดูแลด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

Climate change Governance: Key Institute and Global Agreements

1. หน่วยงานที่กำกับดูแลด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

1.1 หน่วยงานระดับนานาชาติ

เนื่องด้วยการแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจำเป็นต้องได้รับความร่วมมือจากหลายประเทศทั่วโลก จึงได้มีหน่วยงานระดับนานาชาติที่เป็นหน่วยงานหลักในการสร้างความร่วมมือค้นคว้าและศึกษาวิจัยเพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยมีตัวอย่างหน่วยงานระดับนานาชาติที่เกี่ยวข้องดังนี้

- **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** : หน่วยงาน IPCC เป็นหน่วยงานหลักที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี 1988 โดยเป็นการทำงานร่วมกันระหว่าง World Meteorological Organization (WMO) และ United Nations Environment Programme (UNEP) IPCC มีหน้าที่ในการนำเสนอข้อมูลทางวิชาการเพื่อกำหนดนโยบายที่เกี่ยวเนื่องกับด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับนานาชาติ ในปัจจุบัน IPCC มีประเทศที่เข้าร่วมทั้งหมด 195 ประเทศ หน่วยงานภายใน IPCC ประกอบไปด้วย 3 กลุ่มงานหลัก ได้แก่ กลุ่มงานที่1: ศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์พื้นฐาน (Working Group I: The physical science basis) กลุ่มที่ 2: ศึกษาทางด้านผลกระทบ ความเปราะบางและการปรับตัวทางด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Working Group II: Impacts, Adaptation, and Vulnerability) และกลุ่มที่ 3: ศึกษาทางด้านมาตรการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Working Group III: Mitigation of Climate Change) นอกจากนั้นยังมีกลุ่มงานเฉพาะกิจ ได้แก่ กลุ่มงานการศึกษาเรื่องการจัดบัญชีก๊าซเรือนกระจกระดับชาติ (Task Force on National Greenhouse Gas Inventories)

- **United Nations Environment Programme (UNEP) :** UNEP เป็นหน่วยงานทางด้านสิ่งแวดล้อมในระดับนานาชาติ มีเป้าหมายในการสนับสนุนประเทศต่างๆเพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การใช้ทรัพยากรเพื่อสร้างความมั่นคงทางเศรษฐกิจ สร้างความมั่นคงทางด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้แก่ การสนับสนุนการวิจัยเพื่อการตัดสินใจในการดำเนินงานเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การทำงานร่วมกับหน่วยงานต่างเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สนับสนุนเทคโนโลยีและกระบวนการทำงานอย่างยั่งยืนเพื่อการกำหนดมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกและการปรับตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

- **World Meteorological Organization (WMO) :** หน่วยงานอุตุนิยมวิทยาโลก เป็นหน่วยงานที่ดำเนินกิจกรรมด้านต่างๆ เช่น การวิจัย การตรวจวัดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสภาพอากาศ การประยุกต์ใช้แบบจำลองที่เกี่ยวข้อง และการให้บริการข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับทางด้านสภาพอากาศ

ทั่วไป (Weather) สภาพอากาศระยะยาว (Climate) และสภาวะอากาศสุดขั้ว (Extreme weather) โดยกิจกรรมหลักของ WMO ที่เกี่ยวเนื่องกับทางด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ได้แก่ การจัดทำรายงานสถานะสภาพภูมิอากาศของโลก และการจัดทำ Greenhouse Gas Bulletin สำหรับการประชุมเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ Conference of the Parties (COP)

- **United Nations Development Programme (UNDP):** หน่วยงาน UNDP เป็นหน่วยงานที่คอยช่วยสนับสนุนหลายประเทศทั่วโลกโดยมุ่งเน้นในเรื่องของการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable development) การปกครองในรูปแบบประชาธิไตยและการสร้างสันติภาพ (Democratic government and peacebuilding) และ การรับมือ ปรับตัว และการฟื้นฟูต่อภัยพิบัติจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate and disaster resilience) โดยหน่วยงานภายใน UNDP ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ได้แก่ UNDP Climate Promise ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ช่วยสนับสนุนการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและการเตรียมพร้อมรับมือผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในหลายประเทศ

1.2 หน่วยงานระดับชาติ

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และเข้าร่วมในอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยหน่วยงานระดับชาติที่มีภารกิจและความรับผิดชอบในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีดังนี้

- **กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม (Department of Climate Change and Environment) :** กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมอยู่ภายใต้กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2566 เป็นหน่วยงานประสานงานกลางของประเทศไทยภายใต้กรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)) มีหน้าที่ในการขับเคลื่อนการดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ทั้งในส่วนของการเสนอแนะนโยบาย แผนการดำเนินงานที่เกี่ยวข้อง การติดตาม และประเมินผลการดำเนินงานด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทั้งในส่วนของการลดก๊าซเรือนกระจก (Mitigation) และการปรับตัว (Adaptation) รวมถึงการให้บริการองค์ความรู้และข้อมูลสารสนเทศด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การสร้างเครือข่ายความร่วมมือ และการศึกษาวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

- **องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (Thailand Greenhouse Gas Management Organization: TGO) :** องค์การบริการจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) เป็นองค์การมหาชน อยู่ภายใต้การกำกับดูแลของรัฐมนตรีว่าการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มีหน้าที่ในการกำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัด การรายงาน การทวนสอบและการรับรองปริมาณการปล่อยและการลดก๊าซเรือนกระจก การส่งเสริมและพัฒนาโครงการ และตลาดการซื้อขายปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ได้รับการรับรอง รวมถึงเป็นศูนย์กลางข้อมูลที่เกี่ยวกับสถานการณ์การดำเนินงานด้านก๊าซเรือนกระจก และให้คำแนะนำหน่วยงานต่างๆทั้งภาครัฐและเอกชนในการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก

1. อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC))

2.1 รายละเอียดอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

จากการก่อตั้งหน่วยงาน IPCC เมื่อปี 1988 และในปี 1990 IPCC ได้มีข้อสรุปยืนยันว่ากิจกรรมต่างๆของมนุษย์ส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ ดังนั้นจึงเกิดการประชุมในระดับนานาชาติเพื่อยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่กำลังเกิดขึ้น และลดหรือป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อไปในอนาคต จึงได้มีการจัดตั้งกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (UNFCCC) และได้รับการยอมรับในการประชุมที่สำนักงานใหญ่องค์การสหประชาชาตินครนิวยอร์ค เมื่อวันที่ 9 พฤษภาคม 1992 และมีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 21 มีนาคม 1994 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาระดับปริมาณก๊าซเรือนกระจกไม่ให้กระทบต่อการผลิตอาหารและการพัฒนาที่ยั่งยืน กรอบอนุสัญญา UNFCCC มีหลักการที่สำคัญ (**รูปที่ 1.2.1-1)** (สำนักคณะกรรมการกฤษฎีกา, 2563) ได้แก่

1) หลักการไม่ก่อให้เกิดอันตราย (No-harm principle): เป็นหลักการที่กำหนดให้รัฐมีหน้าที่ในการป้องกัน บรรเทา และควบคุมความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดอันตรายหรือความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมของรัฐอื่นๆ และการสำรวจทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมที่ในแต่ละรัฐมีสิทธิที่สามารถดำเนินการได้ แต่การกระทำดังกล่าวต้องไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อพื้นที่นอกเขตรัฐนั้นๆ

2) หลักการป้องกันไว้ก่อน (Precautionary principle): เพื่อการป้องกันหรือลดสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รวมถึงบรรเทาผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นต่อไปในอนาคต จึงกำหนดให้ประเทศภาคีไม่ควรดำเนินการหรือออกนโยบายใดๆที่อาจก่อให้เกิดความเสี่ยง หรือเป็นเหตุให้เกิดอันตรายหรือความเสียหาย ถึงแม้ว่าจะยังไม่สามารถพิสูจน์ได้อย่างชัดเจนในทางวิทยาศาสตร์ว่าการดำเนินการดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดอันตรายหรือความเสียหายต่อสภาพภูมิอากาศ

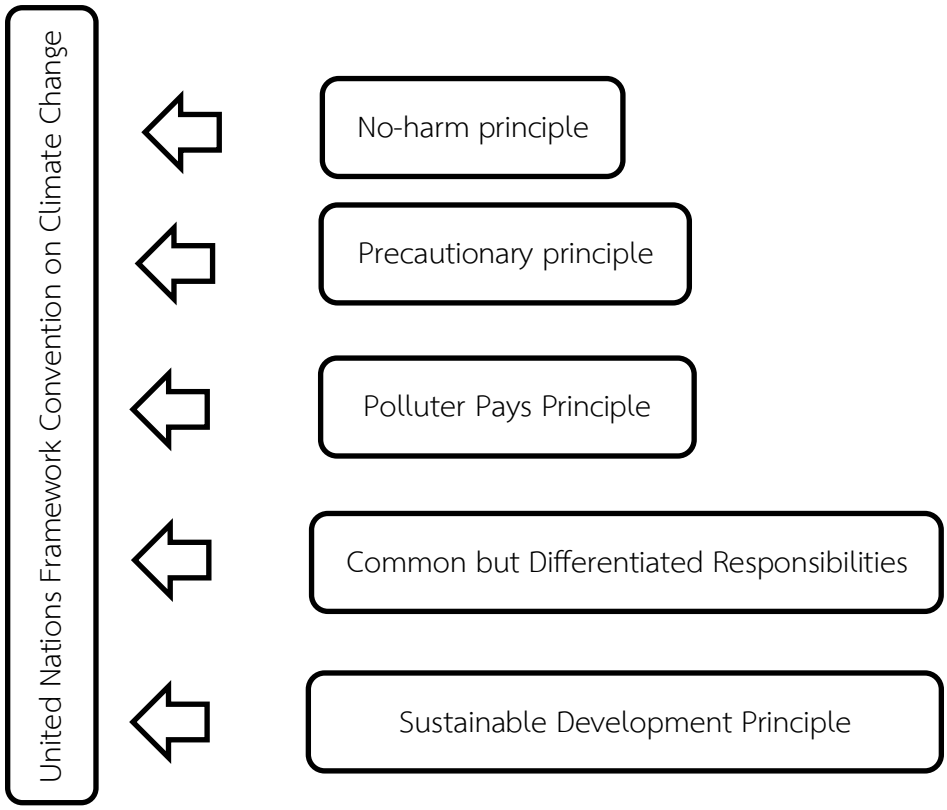
3) หลักการผู้ก่อมลพิษเป็นผู้จ่าย (Polluter pays principle): หลักการนี้ให้ความสำคัญกับความรับผิดชอบในความเสียหายต่างๆที่เกิดขึ้นจากมลพิษ โดยผู้ก่อให้เกิดมลพิษต้องจ่ายค่าเสียหายดังกล่าว ในกรอบอนุสัญญา UNFCCC ได้มีการกำหนดให้ประเทศที่พัฒนาแล้ว ซึ่งส่วนใหญ่เป็นประเทศที่เป็นสาเหตุการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศต้องทำหน้าที่เป็นผู้รับผิดชอบในการจำกัดและลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยวิธีการต่างๆ เช่น การจัดหาแหล่งรองรับและการเก็บกักก๊าซเรือนกระจก พร้อมทั้งการให้ความช่วยเหลือสนับสนุนแก่กลุ่มประเทศกำลังพัฒนาในการหามาตรการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและวิธีการที่เหมาะสมในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

4) หลักการรับผิดชอบร่วมกันในระดับที่แตกต่าง (Common but differentiated responsibilities): เนื่องด้วยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศที่กำลังพัฒนามีความแตกต่างกัน ดังนั้นการมีส่วนร่วมของทุกประเทศในการแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ร่วมกันจึงมีระดับความรับผิดชอบที่แตกต่างกัน เป็นไปตามความสามารถและสภาพเศรษฐกิจของประเทศนั้นๆ ซึ่งจากหลักการนี้จึงได้มีการแบ่งกลุ่มประเทศ การกำหนดความรับผิดชอบ และแนวทางการดำเนินงานเพื่อการแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน

5) หลักการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable development principle): หลักการนี้กำหนดให้ประเทศภาคีมีสิทธิและหน้าที่ในการสนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยการมีนโยบายและมาตรการที่ป้องกันการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างเหมาะสมและบูรณาการกับโครงสร้างการพัฒนาทางเศรษฐกิจภายในประเทศ พร้อมทั้งส่งเสริมให้มีการพัฒนาทางเศรษฐกิจอย่างยั่งยืนระหว่างประเทศ เพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศควบคู่ไปกับการเติบโตและพัฒนาทางเศรษฐกิจของแต่ละประเทศได้

2.2 การดำเนินงานภายใต้อนุสัญญา UNFCCC

จากหลักการที่สำคัญของอนุสัญญา UNFCCC คือความต้องการความร่วมมือระหว่างประเทศเนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นสถานการณ์ระดับโลก ต้องอาศัยการมีส่วนร่วมและการแก้ไขปัญหาร่วมกันอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพตามหลักการความรับผิดชอบในระดับที่แตกต่าง (Common but differentiated responsibilities) และมีวัตถุประสงค์หลักคือการรักษาระดับความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสภาพอากาศ โดยประเทศไทยได้ลงนามในอนุสัญญา UNFCCC เมื่อเดือนมิถุนายน 1992 ให้สัตยาบันต่ออนุสัญญาเมื่อวันที่ 28 ธันวาคม 1994 และมีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 28 มีนาคม 1995



รูปที่ 1.2.1-1 หลักการของกรอบอนุสัญญา UNFCCC

การดำเนินงานภายใต้อนุสัญญา UNFCCC จะมีการแบ่งประเทศภาคีที่เข้าร่วมออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ได้แก่ ประเทศในกลุ่มภาคผนวกที่ 1 (Annex I Countries) ได้แก่ ประเทศที่พัฒนาแล้ว (Industrialized countries) กลุ่มภาคผนวกที่ 2 (Annex II Countries) ได้แก่ ประเทศที่อยู่ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงสภาพเศรษฐกิจ (Countries with economics in transition) และอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นประเทศนอกกลุ่มภาคผนวกที่ 1 (Non-Annex I Countries) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นประเทศกำลังพัฒนา โดยประเทศไทยอยู่ในกลุ่มนอกภาคผนวกที่ 1 ประเทศภาคีอนุสัญญา UNFCCC มีพันธกรณีภายใต้อนุสัญญาดังนี้ (อบก, 2553)

1) การจัดทำรายงานแห่งชาติ (National Communication) ประเทศภาคีทุกประเทศต้องจัดทำบัญชีรายการปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของอนุสัญญาฯ โดยสามารถประเมินจากการเปรียบเทียบกับประเทศอื่นได้ รายงานของประเทศในกลุ่มภาคผนวกที่ 1 จะต้องมีเนื้อหารายละเอียดมากกว่านอกกลุ่มภาคผนวกที่ 1 และจะต้องจัดทำรายงานอย่างต่อเนื่องพร้อมทั้งมีการประเมินความถูกต้องของรายงาน

2) มีการกำหนดมาตรการเพื่อบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกระทำของมนุษย์ และการกำจัดก๊าซเรือนกระจกโดยการกักเก็บพร้อมทั้งมาตรการต่างๆเพื่อให้สามารถปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อย่างเหมาะสม

โดยต้องมีการกำหนดรูปแบบการปฏิบัติ การเผยแพร่ และการปรับปรุงการดำเนินงานตามแผนระดับประเทศและระดับภูมิภาค

3) ส่งเสริมและร่วมมือในการพัฒนา การใช้ การเผยแพร่ และการถ่ายทอดเทคโนโลยี วิธีการปฏิบัติและกระบวนการที่ช่วยในการควบคุม ลด หรือป้องกันการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ไม่อยู่ภายใต้พิธีสารมอนทรีออล จากกิจกรรมของมนุษย์ในสาขาต่างๆ เช่น ภาคพลังงาน ขนส่ง อุตสาหกรรม เกษตรกรรม ป่าไม้ และการจัดการของเสีย

4) ส่งเสริมและร่วมมือในการอนุรักษ์และการขยายแหล่งรองรับและเก็บกักก๊าซเรือนกระจกที่ไม่ได้อยู่ภายใต้พิธีสารมอนทรีออลตามความเหมาะสม และส่งเสริมการจัดการแบบยั่งยืน

5) ร่วมมือในการเตรียมการเพื่อปรับตัวต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิประเทศ พัฒนาแนวทางที่เหมาะสมในการจัดการชายฝั่งทะเล ทรัพยากรน้ำ และการเกษตร เพื่อการคุ้มครองและฟื้นฟูพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความแห้งแล้งและการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นทะเลทราย ตลอดจนอุทกภัย โดยเฉพาะในพื้นที่ภูมิภาคแอฟริกา

6) คำนึงถึงประเด็นการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเท่าที่จะเป็นไปได้ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับนโยบายและการดำเนินการด้านสังคม เศรษฐกิจ และสภาพแวดล้อมและใช้วิธีการที่เหมาะสม

7) ส่งเสริมและร่วมมือในการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี สังคม เศรษฐกิจ และอื่นๆ เพื่อตรวจสอบสถานการณ์อย่างเป็นระบบ รวมถึงการพัฒนาระบบฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิอากาศ เพื่อสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับสาเหตุ ผลกระทบ ความรุนแรง และระยะเวลาของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

8) ส่งเสริมและร่วมมือในการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี สังคม เศรษฐกิจ และกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิอากาศและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

9) ส่งเสริมและร่วมมือในการให้การศึกษา การฝึกอบรม และสร้างจิตสำนึกกับประชาชนเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และสนับสนุนการมีส่วนร่วมของประชาชนอย่างกว้างขวาง

นอกจากนั้นกลุ่มประเทศที่อยู่ในกลุ่มภาคผนวกที่ 1 ยังมีพันธกรณีที่ต้องดำเนินการเพิ่มเติม เช่น ต้องมีการกำหนดนโยบายแห่งชาติและดำเนินมาตรการที่สอดคล้องในการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รวมถึงต้องมีการจัดส่งรายละเอียดข้อมูลนโยบาย มาตรการ และผลการคาดประมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การให้ความช่วยเหลือประเทศกำลังพัฒนาในการจัดหาแหล่งเงินทุนเพิ่มเติมเพื่อให้ครอบคลุมค่าใช้จ่ายในการจัดทำรายงานแห่งชาติ และการดำเนินงานตามมาตรการต่างๆ เป็นต้น

2.3 พันธกิจของประเทศไทยในการดำเนินการตามอนุสัญญา UNFCCC

ประเทศไทยได้ลงนามในอนุสัญญา UNFCCC เมื่อปี ค.ศ. 1992 และได้มีการให้สัตยาบันในการดำเนินการตามอนุสัญญาในปี ค.ศ. 1994 โดยอนุสัญญามีผลบังคับใช้ในปี ค.ศ. 1995 นอกจากนั้นประเทศไทยยังได้ลงนามในพิธีสารที่สำคัญที่เกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้แก่ พิธีสารเกียวโตในปี ค.ศ. 2002 และความตกลงปารีสในปี ค.ศ. 2016 โดยพันธกิจที่ประเทศไทยต้องดำเนินการตามอนุสัญญาฯ (กองการต่างประเทศ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2566) ได้แก่

- จัดทำ จัดส่ง และเผยแพร่บัญชีก๊าซเรือนกระจกต่อรัฐภาคีอนุสัญญาฯโดยวิธีการที่รัฐภาคีตกลงกัน
- จัดทำ ดำเนินการ และเผยแพร่มาตรการการลดก๊าซเรือนกระจกและส่งเสริมการปรับตัวที่เหมาะสมระดับชาติและระดับภูมิภาค
- จัดส่งข้อมูลการจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกตามแนวทางการดำเนินงานของอนุสัญญาฯ และข้อมูลอื่นที่เกี่ยวข้องกับการบรรลุวัตถุประสงค์ของอนุสัญญาฯ
- จัดทำแผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แผนการปรับตัวแห่งชาติ และบูรณาการด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกับแผนระดับชาติอื่นๆ เช่นแผนพัฒนาเศรษฐกิจแห่งชาติ แผนจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อม
- จัดทำโครงการเตรียมความพร้อมต่อกลไกเรดด์พลัส (Readiness Preparation Proposal: RPP) เพื่อเตรียมความพร้อมในระดับประเทศ และติดตามการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคป่าไม้

2. พิธีสารและความตกลงระดับนานาชาติที่เกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ในการลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศระดับนานาชาติที่จำเป็นต้องได้รับความร่วมมือจากหลายประเทศทั่วโลก จึงได้มีการเริ่มขึ้นของพิธีสารและข้อตกลงที่สำคัญที่เกิดขึ้นภายใต้อนุสัญญาว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ได้แก่ พิธีสารเกียวโต และข้อตกลงปารีส โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 พิธีสารเกียวโต

พิธีสารเกียวโตเกิดขึ้นภายใต้อนุสัญญา UNFCCC เมื่อปี 1997 ที่เมืองเกียวโต ประเทศญี่ปุ่น มีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศของโลกให้อยู่ในระดับที่ไม่

ก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบภูมิอากาศของโลก ซึ่งประเทศไทยได้ให้สัตยาบันเข้าร่วมเป็นภาคีเมื่อวันที่ 28 สิงหาคม 2002 โดยข้อตกลงในพิธีสารเกียวโตมีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2005 และมีข้อตกลงสำหรับประเทศที่อยู่ในกลุ่ม Annex I (UNFCCC, 2008) ดังนี้

- แต่ละภาคีในกลุ่ม Annex I ต้องมีการดำเนินนโยบายและมาตรการภายในประเทศเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการเพิ่มแหล่งกักเก็บก๊าซเรือนกระจกเพื่อกำจัดก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ
- ในการดำเนินนโยบายและมาตรการดังกล่าวภาคีต้องดำเนินการโดยการคำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อภาคอื่นและลดผลกระทบที่เกิดจากนโยบายและมาตรการนั้นๆ โดยเฉพาะภาคีในประเทศที่กำลังพัฒนา

นอกจากนั้นภาคีในกลุ่ม Annex I และ Non-Annex I จะต้องดำเนินการในเรื่องที่เกี่ยวข้องดังนี้

- การพัฒนา การประยุกต์ใช้ และการสนับสนุนให้มีการใช้เทคโนโลยีที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ (Climate-friendly technology)
- การวิจัยและการตรวจวัดสภาพภูมิอากาศอย่างเป็นระบบ
- การศึกษา การอบรม และการสร้างความตระหนักรู้ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ
- การปรับปรุงขั้นตอนและวิธีการในการรวบรวมข้อมูลปริมาณก๊าซเรือนกระจก (GHG inventories)

พิธีสารเกียวโตได้มีการกำหนดพันธกรณีที่มีข้อผูกพันทางกฎหมาย (Legal binding) สำหรับประเทศภาคีที่อยู่ใน Annex I แต่สำหรับประเทศภาคีที่อยู่นอกกลุ่มดังกล่าว (Non-Annex I) จะไม่มีการกำหนดพันธกรณีใดๆ โดยกำหนดพันธกรณีสำหรับการดำเนินงานของพิธีสารเกียวโต (Rules for the Implementation) แบ่งออกเป็น 2 ระยะได้แก่

- **พันธกรณีระยะที่ 1 (Marrakesh Accord**) เป็นพันธกรณีที่กำหนดให้ประเทศที่พัฒนาแล้วจะต้องลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 5 ภายในปี ค.ศ. 2012 เมื่อเปรียบเทียบกับปี ค.ศ. 1990
- **พันธกรณีระยะที่ 2 (Doha Amendment)** กำหนดให้ประเทศที่พัฒนาแล้วต้องลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 18 ภายในปี ค.ศ. 2020 เมื่อเปรียบเทียบกับปี ค.ศ. 1990 โดยกำหนดการนี้บังคับสำหรับประเทศพัฒนาแล้ว สำหรับประเทศกำลังพัฒนาไม่มีพันธกรณีในการลดก๊าซเรือนกระจกโดยตรง แต่สามารถดำเนินการได้โดยความสมัครใจโดยการจัดส่งเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมของประเทศ (Nationally Appropriate Mitigation Action: NAMAs)

<u>กลไกการดำเนินการตามพันธกรณี</u>

พิธีสารเกียวโตได้มีการกำหนดมาตราทั้งสิ้น 28 มาตรา โดยมีมาตราที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นกลไกในการดำเนินการเพื่อให้ประสบผลสำเร็จตามพันธกรณีทั้งสิ้น 3 มาตราดังนี้ (สผ., 2553)

(1) มาตราที่ 17- การซื้อขายก๊าซเรือนกระจก (Emission Trading: ET): การซื้อขายก๊าซเรือนกระจกเกิดขึ้นจากพิธีสารเกียวโตมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถลดก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการใช้กลไกทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งให้ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้เหมือนเป็นสินค้าที่สามารถซื้อขายได้ ดังนั้นประเทศที่สามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้มาก (สินค้า) สามารถนำมาขายในตลาดของการซื้อขายปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกได้

ในพิธีสารเกียวโตได้กำหนดให้เฉพาะประเทศใน Annex II ของอนุสัญญา UNFCCC สามารถดำเนินการในมาตราที่ 17 นี้ได้ โดยประเทศภาคีใน Annex II สามารถซื้อขายแลกเปลี่ยนปริมาณก๊าซเรือนกระจกระหว่างกันได้ ซึ่งทำให้ประเทศที่มีพันธกรณีในกลุ่มดังกล่าวสามารถตัดสินใจในการดำเนินแนวทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศตนเองได้ โดยสามารถที่จะหาแนวทางและลงทุนเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกเองหรือว่าจะซื้อปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากประเทศในกลุ่มเดียวกัน

(2) มาตราที่ 6 - การดำเนินการร่วม (Joint Implementation: JI): มาตรานี้ได้มีการระบุให้ประเทศภาคีในกลุ่ม Annex I สามารถดำเนินโครงการร่วมกันเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก และให้มีการจัดสรรการแบ่งสัดส่วนปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ให้กับประเทศที่ร่วมโครงการ ซึ่งปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากโครงการนี้สามารถนำไปประเมินร่วมกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ประเทศนั้นต้องดำเนินการลดให้เป็นไปตามพันธสัญญาได้ นอกจากนั้นอนุสัญญาฯได้มีการยอมให้มีการศึกษาร่วมกันในการทดลองวิธีการและขั้นตอนเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกเรียกว่ากิจกรรมที่ดำเนินการร่วมกัน (Activity Implemented Jointly, AIJ) แต่ผลปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากโครงการนี้ไม่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณร่วมกันกับปริมาณที่จะต้องลดตามที่พันธกรณีกำหนด

(3) มาตราที่ 12 – กลไกการพัฒนาที่สะอาด (Clean Development Mechanism: CDM): กลไกการพัฒนาที่สะอาดถูกกำหนดขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ประเทศกำลังพัฒนาสามารถมีส่วนร่วมในการช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก และกลุ่มประเทศภาคีที่อยู่ใน Annex I สามารถบรรลุพันธกรณีในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ โดยกลุ่มประเทศใน Annex I สามารถที่จะซื้อปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากประเทศนอกกลุ่ม Annex I ที่มีการทำโครงการ CDM เรียกว่า Certified Emission Reduction (CERs)

CERs คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่โครงการ CDM สามารถลดได้ โดยโครงการจะต้องได้รับการรองจากคณะกรรมการบริหารโครงการกลไกการพัฒนาที่สะอาด (CDM Executive Board: CDM EB) โครงการ CDM ต้องเป็นการดำเนินงานโดยความสมัครใจเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มเติม ซึ่งโครงการ CDM สนับสนุนให้เกิดการพัฒนาที่ยั่งยืนในประเทศทั้งในแง่ของทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สังคม เศรษฐกิจ และเทคโนโลยี

3.2 ความตกลงปารีส (Paris Agreement)

ความตกลงปารีสเกิดขึ้นจากการประชุม Conference of Parties (COP) ซึ่งคือการประชุมรัฐภาคีสมาชิกความตกลงพหุภาคีระหว่างประเทศภายใต้อนุสัญญา UNFCCC โดยความตกลงปารีสเกิดขึ้นในการประชุม COP ครั้งที่ 21 ที่นครปารีส ประเทศฝรั่งเศส เมื่อวันที่ 12 ธันวาคม ค.ศ. 2015 และในการประชุม COP ครั้งที่ 22 ได้มีการเปิดให้ลงนามความตกลงปารีสอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 22 เมษายน ค.ศ. 2016 ณ สำนักงานใหญ่สหประชาชาติ และเมื่อมีประเทศเข้าร่วมให้สัตยาบันเกิน 55 ประเทศ และมีระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมกันมากกว่า 55% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก จึงได้มีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน ค.ศ. 2016 โดยความตกลงปารีสมีเป้าหมายหลัก ได้แก่ (กองการต่างประเทศ, 2566)

- การควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกให้ต่ำกว่า 2 °C และพยายามควบคุมไม่ให้เกิน 1.5 °C
- เพิ่มขีดความสามารถในการปรับตัวต่อผลกระทบทางลบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สร้างความสามารถในการฟื้นตัวต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และส่งเสริมการพัฒนาที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการผลิตอาหาร
- ดำเนินการให้การไหลเวียนของเงินทุนสอดคล้องกับการพัฒนาที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ และส่งเสริมการฟื้นตัวจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

<u>ตัวอย่างกลไกการดำเนินการที่สำคัญเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของความตกลงปารีส</u>

(1) มาตราที่ 3 และ 4 - การลดก๊าซเรือนกระจก (Mitigation): ในมาตราที่ 3 และ 4 ของความตกลงปารีสเป็นการระบุถึงการดำเนินการเพื่อลดระดับปริมาณก๊าซเรือนกระจก โดยมาตราที่ 3 ได้ระบุให้ทุกประเทศภาคีดำเนินการตามมาตรการที่เกี่ยวเนื่องเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของความตกลงปารีส และในมาตราที่ 4 มีการระบุถึงแนวทางการดำเนินงานเพื่อแสดงถึงความพยายามสูงสุดในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพื่อให้เกิดการรับผิดชอบร่วมกัน แต่แนวทางการดำเนินงานหรือมาตรการต่างๆจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสถานการณ์ของแต่ละประเทศรวมถึงศักยภาพในการดำเนินงานที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนสำคัญได้แก่ การระบุให้ภาคีทุกประเทศจัดทำข้อเสนอของแต่ละ

ประเทศ (Nationally Determined Contribution: NDC) สำหรับมาตรการต่างๆเพื่อลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก แนวทางด้านการเงิน-งบประมาณ รวมถึงการพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยี โดยต้องนำส่งรายงาน NDC ทุก 5 ปี เริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 2020

(2) มาตราที่ 7 การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Adaptation): ความตกลงปารีสได้มีวัตถุประสงค์หลักที่ระบุในเรื่องของการเพิ่มขีดความสามารถในการปรับตัวต่อผลกระทบทางลบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ดังนั้นในมาตราที่ 7 จึงเป็นการระบุถึงแนวทางในการดำเนินการเพื่อยกระดับขีดความสามารถในการปรับตัว การฟื้นตัวและการลดความเปราะบางจากผลกระทบที่ได้รับจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยมีสาระสำคัญในส่วนของการปรับตัวในข้อตกลงปารีส เช่น ประเทศภาคีต้องตระหนักถึงความเร่งด่วนและความจำเป็นในการดำเนินการแนวทางการปรับตัวของประเทศกำลังพัฒนาที่มีความเปราะบางเป็นพิเศษ และประเทศภาคีต้องมีการจัดทำแผนการปรับตัวและการนำไปสู่การปฏิบัติ เป็นต้น

นอกจากนั้นความตกลงปารีสในมาตรานี้ยังได้มีการระบุถึงการจัดการกับการสูญเสียและความเสียหายที่เกิดขึ้นจากผลกระทบที่ได้รับจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยมีกลไกระหว่างประเทศวอร์ซอร์สำหรับการสูญเสียและความเสียหาย (The Warsaw International Mechanism for Loss and Damage: WIM) พร้อมทั้งได้มีการสนับสนุนให้ดำเนินงานด้านต่างๆเพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น เช่นการมีระบบเตือนภัยล่วงหน้า การเตรียมความพร้อมในภาวะฉุกเฉิน และการเสริมสร้างภูมิต้านทานและความสามารถในการฟื้นตัวต่อชุมชน และระบบนิเวศ (บัณฑูร, 2566)

(3) มาตราที่ 9 กลไกทางการเงิน (Finance): ความตกลงปารีสได้มีการกำหนดให้หน่วยงานที่อยู่ภายใต้อนุสัญญาได้แก่ Green Climate Fund, Global Environment Facility (GEF), Least Developed Countries Fund และ Special Climate Change สนับสนุนทางด้านการเงินต่อการดำเนินงานตามที่ได้ระบุในข้อตกลง นอกจากนั้นประเทศพัฒนาแล้วยังมีพันธกรณีที่ระบุในความตกลงปารีสในการสนับสนุนการเงินสำหรับการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและการดำเนินการเพื่อการปรับตัวให้แก่ประเทศภาคีที่กำลังพัฒนา

มาตราที่ 13 กรอบความโปร่งใส (Transparency framework): การดำเนินงานภายใต้กรอบความตกลงปารีสในด้านความโปร่งใส่แบ่งออกได้เป็น 2 ประเด็นหลัก ได้แก่ ความโปร่งใสด้านการดำเนินการ และความโปร่งใสด้านการสนับสนุน โดยในด้านการดำเนินการประเทศภาคีต้องส่งรายงานบัญชีก๊าซเรือนกระจกและข้อมูลที่มีความจำเป็นในการติดตามการดำเนินงาน โดยข้อมูลดังกล่าวจะต้องมีการทบทวนโดยผู้เชี่ยวชาญทางเทคนิค สำหรับความโปร่งในด้านการสนับสนุนประเทศพัฒนาแล้วต้องมีการให้ข้อมูลเกี่ยวกับการสนับสนุนการดำเนินงานและประเทศที่กำลังพัฒนาจำเป็นต้องให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการได้รับการสนับสนุน

เอกสารอ้างอิง

กองการต่างประเทศ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2566. อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. https://fad.mnre.go.th/th/mph/content/206

กองการต่างประเทศ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2566. ความตกลงปารีส (Paris Agreement). https://fad.mnre.go.th/th/mph/content/208

บัณฑูร เศรษฐศิโรฒน์. 2566. ความตกลงปารีส: ทางรอดและจุดเปลี่ยนสู่ทิศทางการพัฒนาแบบคาร์บอนต่ำ. ศูนย์ศึกษาการต่างประเทศ. https://isc.mfa.go.th/

สผ. (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม). 2553. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพิธีสารเกียวโต. ISBN-978-974-286-774-4.

UNFCCC. 2008. Kyoto Protocol (Reference Manual).

ภาคผนวก ข – สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SREs และ RCPs

Special Report on Emission Scenarios and Representative Concentration Pathways

1. Special Report on Emissions Scenarios (SRES)

1.1 รูปแบบของสถานการณ์ SRES

สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบของ SRES ได้ถูกพัฒนาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1996 และมีการเผยแพร่ในปี ค.ศ. 2000 การกำหนดสถานการณ์ของ SRES เป็นการกำหนดสถานการณ์โดยเริ่มจากการกำหนดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission scenarios) ซึ่งให้ความสำคัญกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดก๊าซเรือนกระจกตัวอย่างเช่น ปัจจัยทางด้านกายภาพ ได้แก่ ความเข้มข้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้พลังงาน ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และปัจจัยทางด้านสังคม ได้แก่ การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ การใช้เทคโนโลยี และความแตกต่างระหว่างรายได้ของประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศกำลังพัฒนา เป็นต้น โดยสถานการณ์ SRES ถูกพัฒนาขึ้นจากการวิเคราะห์และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องที่มีการเผยแพร่ก่อนหน้าเพื่อช่วยในการสร้างสมมติฐานสำหรับการคาดการณ์ความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

สมมติฐานที่ถูกกำหนดขึ้นจะถูกนำเข้าสู่แบบจำลอง Integrated Assessment Models (IAMs) เพื่อประเมินถึงการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยผลลัพธ์ที่ได้จากคำนวณโดยแบบจำลอง IAMs หลายแบบจำลองจะให้รูปแบบการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามในแต่ละสถานการณ์จะมีการกำหนดผลลัพธ์ที่เป็นตัวแทน (“Marker”) สำหรับสถานการณ์นั้นๆเพื่อนำข้อมูลก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยเข้าสู่แบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCM) เพื่อประเมินถึงความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ ค่าพลังงานรังสี (Radiative forcing) และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอื่นๆ

สำหรับ SRES จะมีรูปแบบสถานการณ์หลัก 4 รูปแบบหรือเรียกว่า Storyline ได้ถูกกำหนดขึ้นประกอบไปด้วย A1, A2, B1 และ B2 และในแต่ละ Storyline จะมีการกำหนดกลุ่มเรียกว่า Family ออกเป็นทั้งหมด 4 กลุ่มเช่นเดียวกับ Storyline ได้แก่ A1 Family, A2 Family, B1 Family และ B2 Family **(รูปที่ 1.1-1)** โดยมีรายละเอียดดังนี้

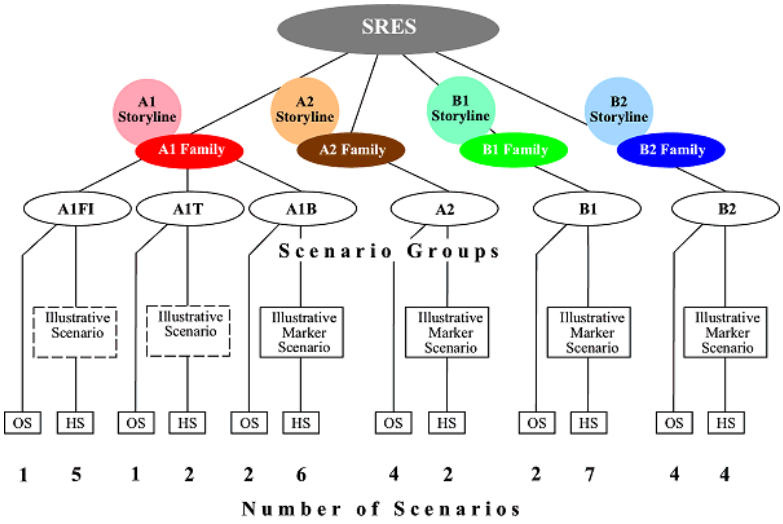
- **A1 storyline and Family**: เป็นสถานการณ์ที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงทางด้านเศรษฐกิจในอนาคตที่เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างรวดเร็วและสูงสุดในช่วงปี ค.ศ. 2050 (หรือกึ่งกลางของศตวรรษที่ 21) หลังจากนั้นจำนวนประชากรจึงค่อยๆลดลง มีการใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีประสิทธิภาพ มีการติดต่อแลกเปลี่ยนกันระหว่างภูมิภาคส่งผลให้รายได้ระหว่างภูมิภาคมีความแตกต่างกันลดลง ในกลุ่มของ A1 สามารถแบ่งย่อยได้ออกเป็น 3 กลุ่มโดยพิจารณาถึงการเลือกใช้เทคโนโลยีสำหรับกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันเป็นสำคัญ ได้แก่ A1F1 คือมีการเลือกใช้

ถ่านหินในกระบวนการผลิตพลังงานเป็นอย่างมาก A1T คือการเลือกใช้เทคโนโลยีอื่นที่ไม่มีถ่านหินเข้ามาเกี่ยวข้อง และ A1B คือการใช้ถ่านหินและแหล่งพลังงานอื่นไม่แตกต่างกันมากนัก

- **A2 storyline and Family:** เป็นสถานการณ์ที่ในแต่ละภูมิภาคจะมีการพึ่งพาตัวเองเป็นอย่างมาก ไม่มีการติดต่อหรือสัมพันธ์กันระหว่างภูมิภาค การพัฒนาของเศรษฐกิจขึ้นอยู่กับแต่ละพื้นที่ในแต่ละภูมิภาค การเพิ่มขึ้นของประชากรเป็นไปอย่างต่อเนื่อง การเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและเปลี่ยนแปลงทางด้านเทคโนโลยีเป็นไปอย่างช้าเมื่อเปรียบเทียบกับสถานการณ์อื่นๆ ซึ่งในกลุ่มของ A2 มีเพียงสถานการณ์เดียว

- **B1 storyline and Family:** เป็นสถานการณ์ที่มีการติดต่อสัมพันธ์กันระหว่างภูมิภาค และมีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งในช่วงกึ่งกลางศตวรรษจำนวนประชากรจึงลดลง ใกล้เคียงกับสถานการณ์ A1 แต่มีความแตกต่างในเรื่องของการใช้เทคโนโลยีซึ่งสถานการณ์ B1 เน้นการใช้เทคโนโลยีสะอาดอย่างมีประสิทธิภาพ มีการพัฒนาทางด้านศรษฐกิจ สังคม ความยั่งยืนและสิ่งแวดล้อมในระดับโลกร่วมกัน แต่ยังคงไม่มีความสนใจทางด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมากนัก

- **B2 storyline and Family:** เป็นสถานการณ์ที่เน้นการแก้ไขปัญหาทางด้านเศรษฐกิจ สังคม ความยั่งยืนและสิ่งแวดล้อมในระดับภูมิภาค การเพิ่มขึ้นของประชากรเป็นไปอย่างต่อเนื่องแต่เป็นระดับที่ต่ำกว่าสถานการณ์ A2 มีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจในระดับปานกลาง มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านเทคโนโลยีที่ช้ากว่า แต่ความหลากหลายของเทคโนโลยีที่ใช้มีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ B1 และ A1 สถานการณ์ B2 จะมุ่งเน้นในเรื่องการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นสิ่งแวดล้อมและความเท่าเทียมกันทางด้านสังคมสำหรับในระดับท้องถิ่นและระดับภูมิภาค



รูปที่ 1.1-1 SRES emission scenarios

จากสถานการณ์ทั้งหมดข้างต้นตัวแปรที่ถูกใช้สำหรับการกำหนดสถานการณ์ต่างๆ (Driving forces) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักได้แก่ จำนวนประชากร การพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ และการเปลี่ยนแปลงทางด้านเทคโนโลยี รวมถึงการใช้พลังงานซึ่งเป็นกิจกรรมหลักที่ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก รายละเอียดดังนี้ (IPCC, 2000)

- **จำนวนประชากร (Population projections):** การคาดการณ์จำนวนประชากรของโลกภายในปี ค.ศ. 2100 ของทุกสถานการณ์อยู่ในช่วงระหว่าง 7-15 พันล้านคน โดยถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 กลุ่ม A1,B1 เป็นกลุ่มที่มีการคาดการณ์จำนวนประชากรต่ำที่สุดจากการตั้งสมมติฐานที่มีอัตราการตายและการเกิดของประชากรที่ต่ำ โดยในช่วงกลางศตวรรษที่ 21 จะมีประชากรของโลกสูงที่สุดประมาณ 8.7 พันล้านคน หลังจากนั้นจำนวนประชากรจะลดลงเหลือประมาณ 7.1 พันล้านคนในปี ค.ศ. 2100

กลุ่มที่ 2 ได้แก่กลุ่ม B2 เป็นการคาดการณ์จากจำนวนประชากรของ United Nations (UN) จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลพื้นฐานในปี ค.ศ. 1998 จำนวนประชากรจะเพิ่มสูงขึ้นในปี ค.ศ. 2050 ประมาณ 9.4 พันล้านคน จากนั้นในปี ค.ศ. 2100 จำนวนประชากรจะเท่ากับ 10.4 พันล้านคน และในกลุ่มสุดท้าย A2 จำนวนประชากรที่คาดการณ์ภายในปี ค.ศ. 2100 มีค่าสูงที่สุดประมาณ 15 พันล้านคน จากสมติฐานที่มีอัตราการตายลดลงในพื้นที่ส่วนใหญ่ทั่วโลก

- **การพัฒนาทางเศรษฐกิจ (Economic development):** การพัฒนาทางเศรษฐกิจพิจารณาจากปัจจัยหลายอย่างร่วมกัน ได้แก่ การเจริญเติบโตของการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ และการเติบโตของจำนวนประชากรโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่กำลังพัฒนา จากผลิตภัณฑ์มวลรวมของโลก (Gross World Product) โดยกลุ่ม A1 มีค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมโลกอยู่ระหว่าง 525-550 ล้านล้าน US$ ในขณะที่กลุ่ม B2 มีค่าที่ต่ำที่สุดโดยมีค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมโลกเท่ากับ 235 ล้านล้าน US$

- **การเปลี่ยนแปลงทางด้านเทคโนโลยี (Structural and technological change):** การเปลี่ยนแปลงทางด้านเทคโนโลยีประเมินจาก 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ การใช้ประโยชน์ที่ดินและการใช้พลังงานซึ่งปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยนี้เกี่ยวเนื่องกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ แหล่งพลังงานหลักได้แก่ น้ำมันและก๊าซ ถ่านหิน และแหล่งพลังงานอื่นๆที่ไม่ใช่ถ่านหิน เช่น พลังงานสะอาดและพลังงานนิวเคลียร์ โดยในกลุ่ม A1 ลักษณะการใช้พลังงานในกลุ่มย่อยจะมีการแตกต่างกันทั้งการใช้พลังงานจากถ่านหินและไม่ใช่ถ่านหินที่ใกล้เคียงกัน (A1B) ในขณะที่มีการใช้พลังงานที่มีแนวโน้มไปในทางไม่ใช่ถ่านหินและใช้ถ่านหินมากได้แก่กลุ่ม A1T และ A1F1 ตามลำดับ สำหรับกลุ่ม B1 มีการใช้พลังงงานจากแหล่งอื่นที่ไม่ใช่ถ่านหิน ในขณะที่ B2 มีการใช้พลังจากแหล่งอื่นบางส่วน และอีกส่วนหนึ่งใช้จากถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซ

สำหรับการใช้ประโยชน์ที่ดินส่วนสำคัญที่เกี่ยวข้องได้แก่ความต้องการอาหารของประชากร หากมีประชากรเพิ่มมากขึ้น รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆในการทำการเกษตร โดยเมื่อพิจารณาจากพื้นที่ป่าไม้ พื้นที่การเกษตร และพื้นที่อื่นๆ โดยในกลุ่มB1 จะมีการลดลงของการใช้พื้นที่เพื่อการปศุสัตว์และมีพื้นที่ป่าไม้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กลุ่ม A1 จะมีการเพิ่มขึ้นของป่าไม้เนื่องด้วยการเติบโตของประชากรต่ำ **ตารางที่ 1.1-1** แสดงรายละเอียดตัวแปรของแต่ละสถานการณ์ดังนี้ และสามารถสรุปรายละเอียดความเหมือนและความแตกต่างในแต่ละสถานการณ์ได้ดัง**ตารางที่ 1.1-2**

จากการกำหนดสถานการณ์ SRES ดังข้างต้น IPCC ได้มีการประเมินถึงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะเกิดขึ้นในแต่ละสถานการณ์ (**รูปที่ 1.1-2**) จากปี ค.ศ. 2000 – 2100 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากปี ค.ศ. 2000 โดยสถานการณ์ B1 ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่ส่งผลกระทบน้อยที่สุดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปี ค.ศ. 2100 มีค่าประมาณ 550 ppm ซึ่งในก่อนยุคอุตสาหกรรมมีค่าประมาณ 280 ppm และเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากข้อมูลตรวจวัดในอดีตพบว่าสถานการณ์ A1F1 มีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสถานการณ์อื่นๆ (**รูปที่ 1.1-2**)

ตารางที่ 1.1-1 ตัวอย่างปัจจัยและข้อมูลที่ถูกใช้ในสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก

Family			A1		A2	B1	B2
Scenario group	1990	A1F1	A1B	A1T	A2	B1	B2
Population (billion)	5.3						
2020		7.6	7.5	7.6	8.2	7.6	7.6
2050		8.7	8.7	8.7	11.3	8.7	9.3
2100		7.1	7.1	7.0	15.1	7.0	10.4
World (GDP) (10^{12} 1990US$/yr)	21						
2020		53	56	57	41	53	51
2050		164	181	187	82	136	110
2100		525	529	550	243	328	235
Per capita income ratio: developed countries and economics in transition to developing countries	16.1						

Family		A1			A2	B1	B2
Scenario group	1990	A1F1	A1B	A1T	A2	B1	B2
2020		7.5	6.4	6.2	9.4	8.4	7.7
2050		2.8	2.8	2.8	6.6	3.6	4.0
2100		1.5	1.6	1.6	4.2	1.8	3.0
Final energy intensity (10^6 J/US$)	16.7						
2020		9.4	9.4	8.7	12.1	8.8	8.5
2050		6.3	5.5	4.8	9.5	4.5	6.0
2100		3.0	3.3	2.3	5.9	1.4	4.0
Carbon dioxide, fossil fuels (GtC/yr)	6.0						
2020		11.2	12.1	10.0	11.0	10.0	9.0
2050		23.1	16.0	12.3	16.5	11.7	11.2
2100		30.3	13.1	4.3	28.9	5.2	13.8
Carbon dioxide, land use (GtC/yr)	1.1						
2020		1.5	0.5	0.3	1.2	0.6	0.0
2050		0.8	0.4	0.0	0.9	-0.4	-0.2
2100		-2.1	0.4	0.0	0.2	-1.0	-0.5

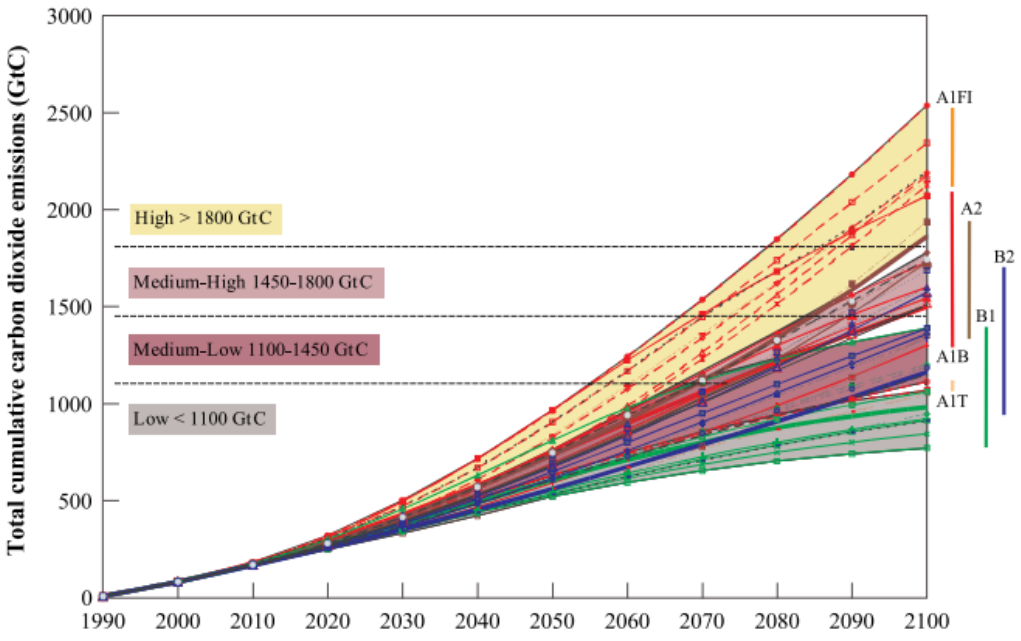
ที่มา: ดัดแปลงจาก IPCC (2000)

แต่ละสถานการณ์จะมีปริมาณการเปลี่ยนแปลงของก๊าซเรือนกระจกในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกัน แต่ท้ายสุดแล้วระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ระดับได้แก่ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกระดับสูง (Higher emission) มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับมากกว่า 1,800 GtC การปล่อยก๊าซเรือนกระจกระดับปานกลาง - สูง (Medium – high emission) และระดับต่ำ-ปานกลาง (Medium-Low emission) มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับ 1,450-1,800 GtC และ 1,100-1,450 GtC ตามลำดับ และสุดท้ายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระดับต่ำ (Lower emission) การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับต่ำกว่า 1,100 GtC **รูปที่ 1.1-2** แสดงระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสถานการณ์ต่างๆของ SRES

ตารางที่ 1.1-2 สรุปรายละเอียดแต่ละสถานการณ์

Family	A1			A2	B1	B2
Subgroup	A1F1	A1B	A1T	A2	B1	B2
Population growth	Low	Low	Low	High	Low	Medium
GDP growth	Very high	Very high	Very high	Medium	High	Medium
Energy use	Very high	Very high	High	High	Low	Medium
Land use changes	Low-medium	Low	Low	Medium-High	High	Medium
Resources availability	High	Medium	Medium	Low	Low	Medium
Technological development	Rapid	Rapid	Rapid	Slow	Medium	Medium
Change favoring	Coal	Balanced	Non-Fossil	Regional	Efficiency	"Dynamics as usual"

ที่มา: ดัดแปลงจาก Hook (2011)



ที่มา: Wayne (2013)

รูปที่ 1.1-2 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสถานการณ์ SRES

1.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้สถานการณ์ SRES

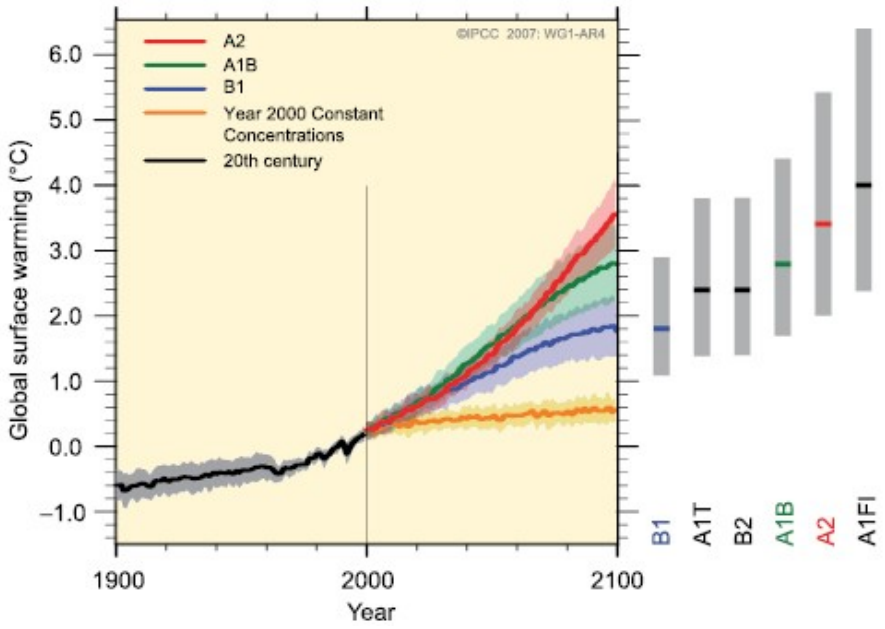
จากการกำหนดสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศข้างต้น จึงได้มีการคาดการณ์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต โดย IPCC (2007) ได้ประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแต่ละสถานการณ์ในช่วงปี ค.ศ. 2090-2099 เปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 1980-1999 (**ตารางที่ 1.2-1**) และช่วงของการเปลี่ยนแปลง (Likely range) ซึ่งจะเห็นได้ว่าหากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คงที่เหมือนในปี ค.ศ. 2000 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น 0.6°C ในขณะที่สถานการณ์ A1F1 มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงสุดถึง 4.0°C และสถานการณ์ B1 มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้อยที่สุด (1.8°C) เมื่อเปรียบเทียบจากทุกสถานการณ์ โดย**รูปที่ 1.2-1** แสดงแนวโน้มของสถานการณ์ B1, A1B และ A2 ที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 ซึ่งหากควบคุมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เท่ากับช่วงปี ค.ศ. 2000 แนวโน้มของอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลในช่วงปี ค.ศ. 2090-2099 เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 1980-1999 (**ตารางที่ 1.2-1**) พบว่าสถานการณ์ A1F1 ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.26-0.59 เมตร ในขณะที่สถานการณ์ B1 มีผลการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลต่ำสุด คือมีค่าเพิ่มขึ้น 0.18-0.38 เมตร

ตารางที่ 1.2-1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระดับน้ำทะเลในแต่ละสถานการณ์ SRES

Case	Temperature Change (°C at 2090-2099 relative to 1980-1999)[a] Best estimate	*Likely* range	Sea Level Rise) (m at 2090-2099 relative to 1980-1999) Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
Constant Year 2000 concentrations[b]	0.6	0.3 – 0.9	NA
B1 scenario	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
A1T scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
B2 scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
A1B scenario	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2 scenario	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI scenario	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

ที่มา: IPCC (2007)



ที่มา: IPCC (2007)

รูปที่ 1.2-1 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสถานการณ์ A1B, A2 และ B1 ในแต่ละปี

2 Representative Concentration Pathways (RCPs)

2.1 รูปแบบของสถานการณ์ RCPs

จากสถานการณ์ของ SRES ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากการกำหนดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission scenarios) และการกำหนดลักษณะทางเศรษฐกิจ-สังคมเพื่อให้ได้มาซึ่งปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยที่สอดคล้องกันจากการใช้แบบจำลอง IAMs จากนั้นจึงได้มาซึ่งปริมาณรังสี (Radiative forcing) และการกำหนดสถานการณ์ในอนาคต รวมถึงผลกระทบและแนวทางการปรับตัว (**รูปที่ 2.1-1** (ซ้าย)) การพัฒนาของสถานการณ์ใหม่ชื่อว่า Representative Concentration Pathways (RCPs) จะมีความแตกต่างทั้งในรูปแบบของการพัฒนารวมถึงข้อกำหนดต่างๆ นอกจากนั้นในการพัฒนายังมีการดำเนินงานในรูปแบบคู่ขนานโดยการพิจารณาถึงลักษณะของการคาดการณ์ในอนาคตควบคู่ไปกับการพัฒนาสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมถึงการพิจารณาผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นควบคู่ไปกับการพัฒนาสถานการณ์ต่างๆ (**รูปที่ 2.1-1** (ขวา)) แสดงความแตกต่างของการพัฒนาสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SRES และ RCPs โดยเงื่อนไขในการพัฒนาสถานการณ์ RCPs มีดังนี้

- การกำหนดสถานการณ์ตั้งต้นของ RCPs โดยการทำงานร่วมกันระหว่างกลุ่มงาน CM และกลุ่มงาน IAM โดยมีเงื่อนไขในการกำหนดตัวอย่าง เช่น สถานการณ์ตั้งต้นควรมาจากการ

ทบทวนวรรณกรรรมอย่างกว้างขวางจากการทำงานของกลุ่มงานด้านแบบจำลองหลายกลุ่มงาน นอกจากนั้นยังต้องมีความเป็นไปได้และสอดคล้องกับสถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

- การกำหนดค่าพลังงานรังสีของสถานการณ์ RCPs แต่ละสถานการณ์ต้องมีข้อมูลที่จำเป็นต่อการคำนวณค่าพลังงานรังสีนั้นๆ เช่น ปริมาณก๊าซเรือนกระจก มลพิษทางอากาศ และการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำลองลักษณะสภาพภูมิอากาศและลักษณะทางเคมีของชั้นบรรยากาศ

- สถานการณ์ RCPs ที่กำหนดจากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้ประโยชน์ที่ดินควรมีความสอดคล้องกับปีฐานที่กำหนด และควรมีความต่อเนื่องกันระหว่างช่วงข้อมูลในอดีตกับผลทีได้ในอนาคต

- สถานการณ์ RCPs ที่กำหนดขึ้นต้องครอบคลุมช่วงเวลาจนถึงปี ค.ศ. 2100 และจำเป็นต้องมีข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการคาดการณ์สถานการณ์หลังจากในช่วงปี ค.ศ. 2100

จากการกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นการพัฒนาสถานการณ์ RCPs ประกอบไปด้วยขั้นตอนทั้งสิ้น 7 ขั้นตอน รายละเอียดดังนี้

1) **การกำหนดสถานการณ์ RCPs:** การกำหนดสถานการณ์ RCPs แต่ละสถานการณ์เริ่มต้นจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในเรื่องของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น โดยต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นและต้องครอบคลุมถึงโอกาสการเกิดสถานการณ์ต่างๆ เช่น สถานการณ์ที่มีการกำหนดนโยบายการลดก๊าซเรือนกระจก หรือสถานการณ์ที่มีโอกาสเกิดก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด เพื่อพิจารณาถึงระดับพลังงานรังสีของโลกที่เป็นไปได้ตั้งแต่ระดับที่ต่ำจนถึงระดับที่สูงสุด โดยจากการทบทวนวรรณกรรมของสถานการณ์ต่างๆทั้งสิ้น 324 สถานการณ์ มี 37 สถานการณ์จากกลุ่มแบบจำลองทั้งสิ้น 7 แบบจำลองเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว จากนั้นผู้เชี่ยชาญในกลุ่มแบบจำลองของ IPCC จึงได้มีการประชุมและกำหนดสถานการณ์ทั้งสิ้น 4 สถานการณ์ **ดังตารางที่ 2.1-1** จากนั้นกลุ่มงานที่รับผิดชอบแต่ละสถานการณ์ที่กำหนดจะจัดทำข้อมูลที่เกี่ยวข้องและสอดคล้องกับแต่ละสถานการณ์ใน เช่น ข้อมูลของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ค่าความเข้มข้นของมลสาร การใช้ประโยชน์ที่ดิน และลักษณะการปกคลุมผิวดิน เป็นต้น

2) **การทบทวนสถานการณ์ RCPs และปรับปรุงให้เป็นปัจจุบัน:** เนื่องด้วยขั้นตอนการกำหนดสถานการณ์ RCPs ใช้ระยะเวลาค่อนข้างมากในการทบทวนวรรณกรรม การจัดทำข้อมูลและการประชุมผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้อง ซึ่งช่วงระยะเวลาดังกล่าวข้อมูลมีการปรับเปลี่ยน และ

แบบจำลองมีการพัฒนาเพิ่มเติมดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทบทวนสถานการณ์ให้เป็นปัจจุบันแต่ยังคงสมมติฐานเดิมตามที่กำหนดไว้

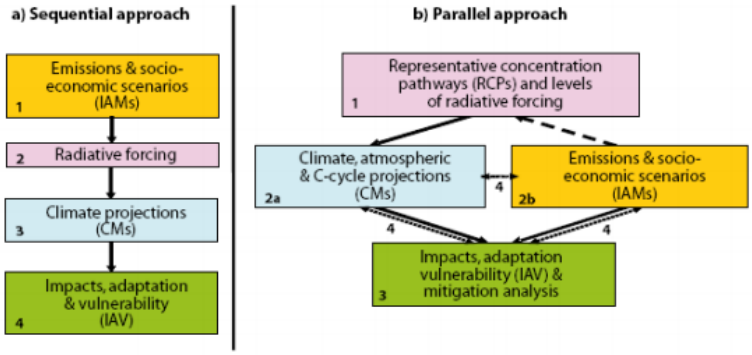
3) การปรับปรุงข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและลักษณะการปกคลุมผิวดิน: สำหรับกลุ่มงานแบบจำลอง IAM และ CM ข้อมูลลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและการปกคลุมผิวดินเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ระบบชีวภาพบนบก (Terrestrial biosphere) เป็นส่วนสำคัญในการสะสมคาร์บอน และเป็นแหล่งอาหาร แหล่งพลังงาน รวมถึงกิจกรรมต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก แบบจำลอง CM ในหลายแบบจำลองได้มีการพิจารณาทางด้านการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินเพื่อประเมินทางด้านชีวฟิสิกส์และชีวเคมีธรณี (Biophysical / Biogeochemical) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของที่ดินและระบบสภาพภูมิอากาศ ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและลักษณะการปกคลุมผิวดินจึงต้องมีการปรับรูปแบบ เช่น ความละเอียดของข้อมูล การกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละพื้นที่ และช่วงเวลาให้สามารถนำไปใช้ได้กับแบบจำลอง IAM และ CM เพื่อการประเมินผลลัพธ์ตามสถานการณ์ที่กำหนด

4) การปรับปรุงข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลสารทางอากาศ: แบบจำลอง CM มีการกำหนดรายละเอียดข้อมูลของก๊าซเรือนกระจกในหลากหลายมิติ เช่น แหล่งกำเนิด แหล่งเก็กกัก ลักษณะทางเคมีของก๊าซเรือนกระจกและมลสารในชั้นบรรยากาศ รวมถึงความเข้มข้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิด และแบบจำลอง IAM ก็มีรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งการแบ่งกลุ่มของแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกจะส่งผลต่อการคำนวณผลลัพธ์ที่ได้ เช่น ก๊าซเรือนกระจกหรือมลสารที่ถูกปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมจะถูกกำหนดให้มีปริมาณที่สูงกว่าการปลดปล่อยจากกลุ่มอาคารทั่วไป เป็นต้น ดังนั้น จึงได้มีการกำหนดแหล่งกำเนิดของของก๊าซเรือนกระจกและมลสารออกเป็น 12 แหล่ง ได้แก่ (1) การขนส่งทางอากาศ (2) การขนส่งระหว่างประเทศ (3) การขนส่งด้านอื่นๆ (4) โรงไฟฟ้าและแหล่งพลังงานอื่น (5) การระเหยของตัวทำละลายจากสารละลายต่างๆ (6) ของเสียและการจัดการของเสีย (7) อุตสาหกรรม (8) ที่อยู่อาศัย (9) การเผาจากกาทำการเกษตร (10) การเกษตรกรรม (11) การเผาของทุ่งหญ้าสะวันนา (12) การเผาป่า และต้องมีการปรับปรุงความละเอียดของข้อมูลที่จะใช้ในแบบจำลอง CM และ IAM ให้มีความสอดคล้องกัน

5) ความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกและมลสาร: กลุ่มการศึกษาของแบบจำลอง CM จำเป็นต้องใช้ข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในการคำนวณ ซึ่งแบบจำลองโดยส่วนใหญ่จะมีการคำนวณทางด้านเคมีของชั้นบรรยากาศที่ไม่ครอบคลุมกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมด และจำเป็นต้องมีการใช้ข้อมูลการคำนวณความเข้มข้นเพิ่มเติม จึงต้องมีการคำนวณความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกเพิ่มเพื่อใช้ในแบบจำลอง CM เพิ่มเติม

จากสถานการณ์ของ SRES ที่ถูกพัฒนาขึ้นจากการกำหนดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission scenarios) และการกำหนดลักษณะทางเศรษฐกิจ-สังคมเพื่อให้ได้มาซึ่งปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยที่สอดคล้องกันจากการใช้แบบจำลอง IAMs จากนั้นจึงได้มาซึ่งปริมาณรังสี (Radiative forcing) และการกำหนดสถานการณ์ในอนาคต รวมถึงผลกระทบและแนวทางการปรับตัว (**รูปที่ 2.1-1** (ซ้าย))

อย่างไรก็ตามเนื่องจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทางด้านเทคโนโลยี รวมถึงการเปลี่ยนแปลงทางด้านการใช้พลังงาน การใช้ประโยชน์ที่ดิน เศรษฐกิจและสังคม และการเจริญเติบโตของประชากรที่มีอย่างต่อเนื่อง จึงได้มีการพัฒนาสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงทางด้านภูมิอากาศจากลักษณะข้อมูลพื้นฐานในอดีต - ปัจจุบัน โดยจากรายงาน Assessment Report ฉบับที่ 5 (AR5) IPCC (2014) ได้มีการประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยการกำหนดสถานการณ์ในอนาคตขึ้นใหม่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Representative Concentration Pathways (RCPs) ซึ่งมีความแตกต่างกับการพัฒนาสถานการณ์ SRES โดยการเริ่มต้นจากการกำหนดระดับพลังงานรังสี (Radiative forcing) หรือระดับของปริมาณความเข้มข้นของ CO_2 ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเป็นตัวแทนของระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ครอบคลุมสถานการณ์ต่างๆที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต RCPs ที่กำหนดแต่ละกลุ่มจะไม่ได้มาจากการกำหนดสมมติฐานจากลักษณะทางเศรษฐกิจ-สังคมและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพียงที่เป็นลักษณะเดียวกันเพียงอย่างเดียว แต่ในแต่ละกลุ่มจะมีความหลากหลายและครอบคลุมลักษณะทางเศรษฐกิจ สังคม การใช้เทคโนโลยี รวมถึงจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นในการพัฒนายังมีการดำเนินงานในรูปแบบคู่ขนานโดยการพิจารณาถึงลักษณะของการคาดการณ์ในอนาคตควบคู่ไปกับการพัฒนาสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมถึงการพิจารณาผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นควบคู่ไปกับการพัฒนาสถานการณ์ต่างๆ **รูปที่ 2.1-1** แสดงความแตกต่างของการพัฒนาสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SRES



ที่มา: Wayne (2013)

รูปที่ 2.1-1 ขั้นตอนการพัฒนาสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SRES (ซ้าย) และ RCPs (ขวา)

รูปแบบของสถานการณ์ RCPs ประกอบไปด้วย 4 สถานการณ์หลัก ได้แก่ RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 และ RCP8.5 โดยมีรายละเอียดของแต่ละสถานการณ์แสดงดัง**ตารางที่ 2.1-1**

- RCP2.6: เป็นสถานการณ์ที่มีระดับการปลอดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ โดยในช่วงกึ่งกลางของศตวรรษที่ 21 พลังงานมีระดับพลังงานของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 3.1 W/m^2 จากนั้นจะลดต่ำลงถึงระดับ 2.6 W/m^2 ในปี ค.ศ. 2100 ซึ่งการลดลงของพลังงานรังสีที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากระดับการลดลงของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างมีนัยสำคัญ

- RCP4.5: เป็นสถานการณ์ที่มีการรักษาระดับการปล่อยรังสีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก โดยจะมีค่าพลังงานการแผ่รังสีเท่ากับ 4.5 W/m^2 และไม่มีการเพิ่มขึ้นต่อเนื่องไปในระยะยาว

- RCP6.0: สถานการณ์นี้จะมีความใกล้เคียงกับสถานการณ์ 4.5 คือมีค่าพลังงานการแผ่รังสีเท่ากับ 6.0 W/m^2 และจะไม่มีการเพิ่มขึ้นต่อเนื่องไปในระยะยาวเนื่องจากมีการพัฒนาและการใช้เทคโนโลยี รวมถึงการประยุกต์ใช้แนวทางต่างๆเพื่อการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก

- RCP8.5: เป็นสถานการณ์ที่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจกอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าพลังงานการแผ่รังสีเท่ากับ 8.5 W/m^2

เช่นเดียวกับการพัฒนาสถานการณ์ SRES สถานการณ์ RCPs มีการนำเข้าข้อมูลลักษณะทางเศรษฐกิจ-สังคม ค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ (Gross Domestic Product: GDP) การเพิ่มขึ้นของประชากร รวมถึงลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและการใช้เทคโนโลยีต่างๆ (Driving forces) รายละเอียดโดยสรุปดังนี้

- **จำนวนประชากร (Population):** ข้อมูลการคาดการณ์จำนวนประชากรจากองค์การสหประชาชาติ (United Nation: UN) และค่าของ GDP จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากรายงานการประเมินของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ IPCC (AR4) ได้ถูกนำมาพิจารณาในการสร้างสถานการณ์ (**รูปที่ 2.1-2**) โดยจะเห็นได้ว่าสถานการณ์ RCP8.5 เป็นสถานการณ์ที่กำหนดให้มีประชากรโลกสูงมากที่สุด และมีความแตกต่างเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับสถานการณ์อื่นๆ

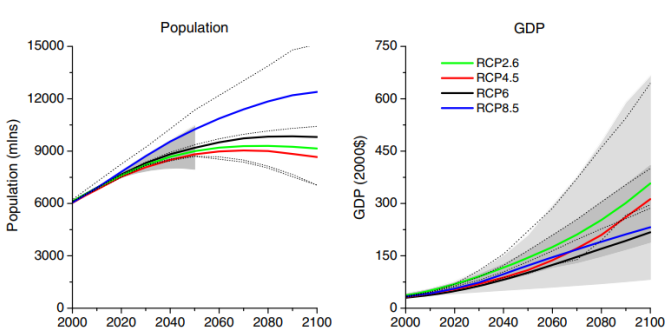
- **การใช้พลังงาน (Energy use):** การใช้พลังงานของแต่ละสถานการณ์มาจากการทบทวนวรรณกรรมโดยพบว่า RCP2.6, RCP4.5 และ RCP6 มีการใช้พลังงานอยู่ในช่วงประมาณกลางระหว่าง 750-900 EJ ในปี ค.ศ. 2100 หรือคิดเป็นประมาณ 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานในปัจจุบัน ในขณะที่ RCP8.5 เป็นสถานการณ์ที่มีการใช้พลังงานสูง

ที่สุดอันเนื่องมาจากการเติบโตของประชากรที่เพิ่มสูงขึ้นและขาดการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บก๊าซเรือนกระจกจากชั้นบรรยากาศ (Carbon capture and storage: CSS)

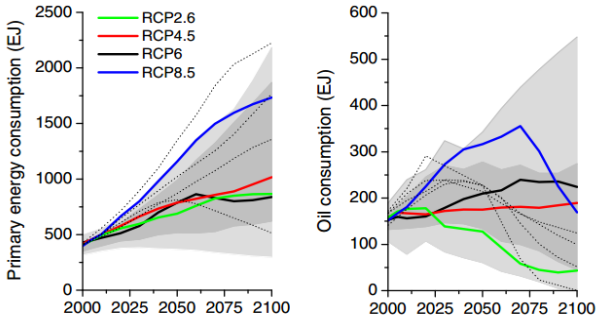
- **การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use):** การใช้ประโยชน์ที่ดินส่งผลโดยตรงต่อระบบภูมิอากาศโลก เนื่องด้วยการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกันจะมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ต่างกัน นอกจากนั้นยังส่งผลต่อค่าความสามารถในการสะท้องและการดูดซับรังสีและพลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน (Albedo and surface roughness) รวมถึงการใช้ประโยชน์ที่ดินยังเกี่ยวเนื่องกับการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากชั้นบรรยากาศ โดยการประเมินการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคตถูกตั้งต้นจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในปี 2005

- **การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas emissions):** การปลดปล่อย CO_2 สำหรับสถานการณ์ RCPs ถูกประเมินความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาโดยพบว่า RCP8.5 เป็นสถานการณ์ที่มีการปลดปล่อย CO_2 สูงที่สุดเนื่องจากเป็นสถานการณ์ที่ไม่มีนโยบายทางด้านสภาพภูมิอากาศ ในขณะที่ RCP2.6 เป็นสถานการณ์ที่มีการปล่อย CO_2 ต่ำที่สุดเนื่องจากมีการบังคับใช้ข้อกำหนด และแนวทางการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างเข้มงวด สำหรับการปลดปล่อย CH_4 และ N_2O จะมีแนวโน้มและทิศทางของแต่ละสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับ CO_2

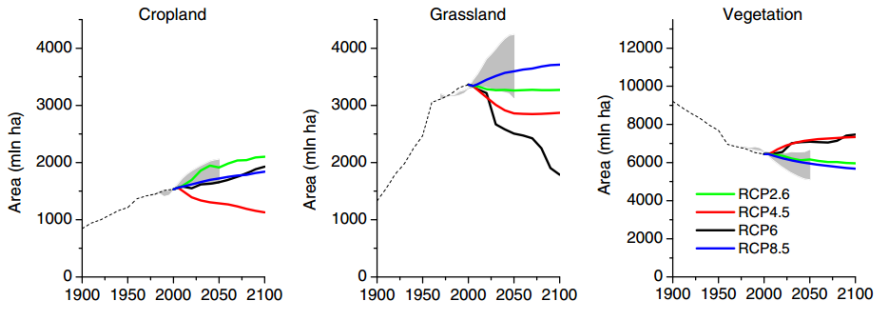
- **การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ (Emission of air pollutants):** การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศจะเกี่ยวเนื่องกับปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของแหล่งกำเนินมลพิษ เช่น การใช้ถ่านหินและน้ำมัน การใช้ปุ๋ยสำหรับกิจกรรมการเกษตร เป็นต้น นโยบายการควบคุมมลพิษทางอากาศ และนโยบายการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยปัจจัยที่ใช้พิจารณาสำหรับแต่ละสถานการณ์ ได้แก่ SO_2 และ NO_x สำหรับการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศจะมีแนวโน้มที่แตกต่างจากการปลดกล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากตั้งอยู่บนสมมติฐานที่มีการปลดปล่อยลดลงในอนาคตเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของรายได้ประชากร



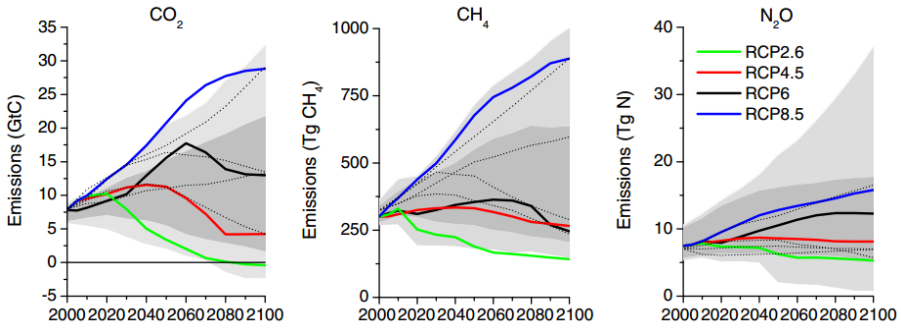
จำนวนประชากรและGDP



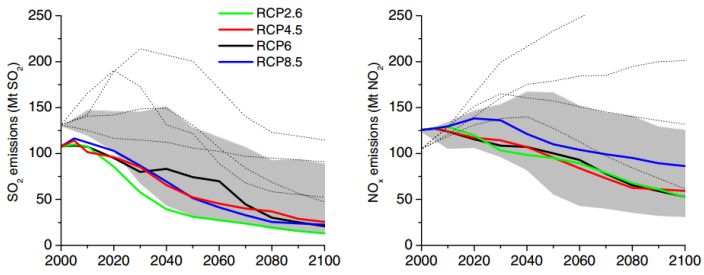
การใช้พลังงาน



การใช้ประโยชน์ที่ดิน



การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก



การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ

ที่มา: *van Vuuren et al. (2011)*

รูปที่ 2.1-2 ตัวอย่างการกำหนดค่าของแต่ละสถานการณ์

สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบของ RCPs ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับสถานการณ์ของ SRES โดยพบว่าลักษณะของสถานการณ์ RCP4.5 RCP6.0 และ RCP8.5 จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับสถานการณ์ B1 B2 และ A1F1 ตามลำดับ **ตารางที่ 2.1-1** แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสถานการณ์ RCPs และ SRES รวมถึงปริมาณของก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละสถานการณ์

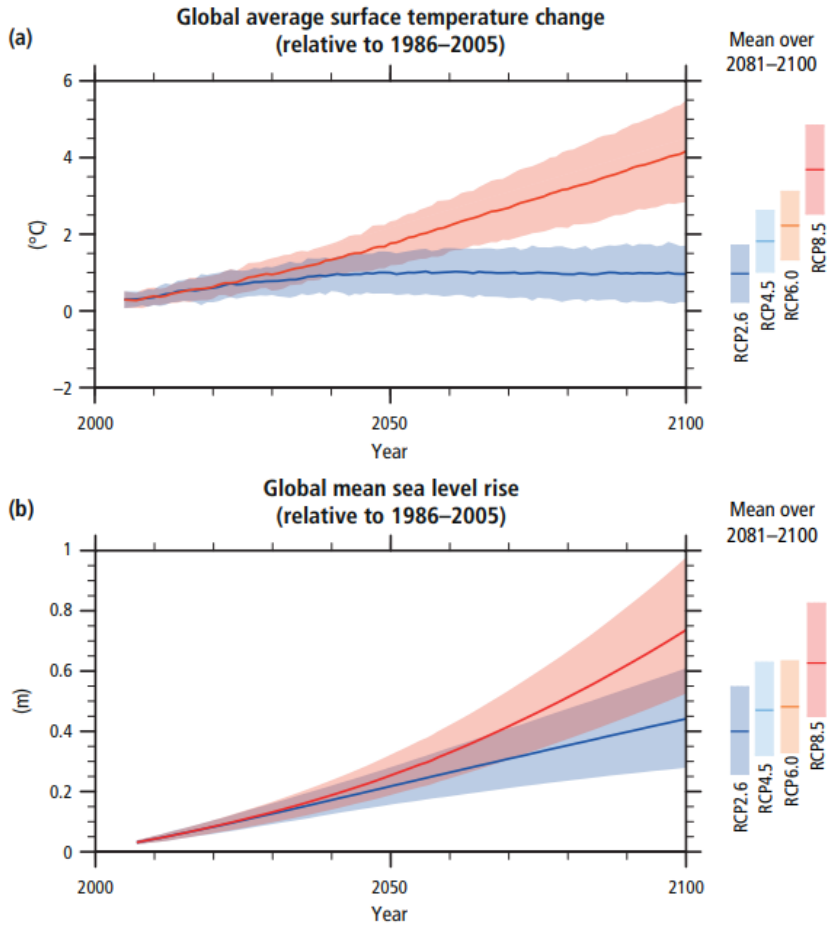
ตารางที่ 2.1-1 การเปรียบเทียบสถานการณ์ RCPs และ SRES

Name	Radiative forcing	CO_2 equiv (p.p.m.)	Temp anomaly (°C)	Pathway	SRES temp anomaly equiv
RCP8.5	8.5 Wm^2 in 2100	1370	4.9	Rising	SRES A1F1
RCP6.0	6 Wm^2 post 2100	850	3.0	Stabilization without overshoot	SRES B2
RCP4.5	4.5 Wm^2 post 2100	650	2.4	Stabilization without overshoot	SRES B1
RCP2.6 (RCP3PD)	3Wm^2 before 2100, declining to 2.6 Wm^2 by 2100	490	1.5	Peak and decline	None

ที่มา: Wayne (2013)

2.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้สถานการณ์ RCPs

ผลการประเมินการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้สถานการณ์ RCPs โดยแบบจำลองภูมิอากาศโลกหลายแบบจำลอง (Multi-model) แสดงดัง**รูปที่ 2.2-1(a)** โดยเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 1968-2005 พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยทั่วโลกในช่วงปลายศตวรรษที่ 21 มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 0.3-1.7 ºC ภายใต้สถานการณ์ RCP2.6 และเพิ่มสูงมากขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.1-2.6 ºC และ 1.4-3.1 ºC ภายใต้สถานการณ์ RCP4.5 และ RCP6.0 และจะพบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงมากที่สุดในสถานการณ์ RCP8.5 โดยอุณหภูมิจะสูงขึ้นประมาณ 2.6-4.8 ºC โดยพื้นที่ในบริเวณขั้วโลกเหนือ (Arctic region) จะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าพื้นที่อื่นของโลก ในขณะที่ระดับน้ำทะเลของสถานการณ์ RCP8.5 มีค่าสูงที่สุด โดยมีเพิ่มขึ้นประมาณ 0.6 เมตร และระดับน้ำทะเลจะมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นต่ำที่สุดในสถานการณ์ RCP2.6 ประมาณ 0.4 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับระดับน้ำทะเลเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 1968-2005 (**รูปที่ 2.2-1(b)**) (IPCC, 2014)



ที่มา: IPCC (2014)

รูปที่ 2.2-1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและระดับน้ำทะเลภายใต้สถานการณ์ RCPs

เอกสารอ้างอิง

Hook, M. 2011. Fuelling Future Emissions – Examining Fossil Fuel Production Outlooks Used in Climate Models. In J. Blanco, & H. Kheradmand (Eds.), Climate Change - Research and Technology for Adaptation and Mitigation. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/24848

IPCC. 2000. IPCC special report emission scenarios: summary for policymakers. ISBN: 92-9169-113-5.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Wayne, G. 2013. The Beginner's guide to representative concentration pathways. Skeptical science. https://skepticalscience.com/docs/RCP_Guide.pdf

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp

Van Vuuren, D.P, Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., and Rose, S.K. 2011. The representative concentration pathways: and overview. Climatic Change, 109, 5-31.

ภาคผนวก ค – โครงการความร่วมมือการประยุกต์ใช้แบบจำลอง GCMs

Collaborative Project on the Application of GCMs

โครงการความร่วมมือการประยุกต์ใช้แบบจำลอง GCMs

1. DECK และ CMIP historical simulation

การศึกษาวิเคราะห์สภาพภูมิอากาศในกลุ่มนี้จะแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มย่อย ได้แก่ AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project), Pre-industrial control simulation (piControl), Abrupt 4xCO2, 1% CO_2 และ Historical runs โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) AMIP ในโครงการความร่วมมือการศึกษาทางด้านสภาพอากาศเป็นการศึกษาที่เน้นเฉพาะเรื่องของสภาพบรรยากาศ (Atmosphere) เป็นหลัก ถึงแม้ว่าแบบจำลองภูมิอากาศโลกจะสามารถคำนวณโดยการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นบรรยากาศ พื้นดิน และมหาสมุทร แต่การศึกษาในกลุ่มน้ำจะไม่พิจารณาในส่วนของพื้นดินและมหาสมุทร โดยให้ค่าที่เกี่ยวข้องกับพื้นดินและมหาสมุทรมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

2) piControl การควบคุมรูปแบบการคำนวณเป็นการตรวจสอบความแปรปรวนของธรรมชาติที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง การคำนวณโดยการกำหนดรูปแบบนี้จะเริ่มต้นช่วงเวลาในการคำนวณในช่วงยุคก่อนการปฏิบัติอุตสาหกรรมซึ่งเป็นช่วงก่อนที่จะมีปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นแบบจำลองจะถูกใช้ในการคำนวณต่อเนื่องไปยังช่วงเวลาอนาคต โดยกำหนดให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยภายนอกที่เป็นปัจจัยจากกิจกรรมของมนุษย์ เพื่อประเมินถึงลักษณะสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป

3) Abrupt 4x CO_2 runs การตรวจสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์แบบสุดโต่ง เป็นการตรวจสอบการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซที่มีอยู่ก่อนช่วงปฏิบัติอุตสาหกรรม โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 280 ppm เป็น 1,120 ppm และควบคุมปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศให้มีค่าคงที่ ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่อาจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

4) 1% CO_2 runs สำหรับการศึกษาในกลุ่มของ 1% CO_2 runs เป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรม 1% ต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงก่อนการปฏิบัติอุตสาหกรรม จนกระทั่งปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นไปถึง 1,120 ppm ซึ่งการศึกษานี้สามารถพิจารณาปัจจัยหลายอย่างที่

ส่งผลให้ปริมารก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นได้ เช่น ปริมาณมีเทนที่เพิ่มสูงขึ้น หรือมีปริมาณละอองลอยในอากาศที่เพิ่มมากขึ้น

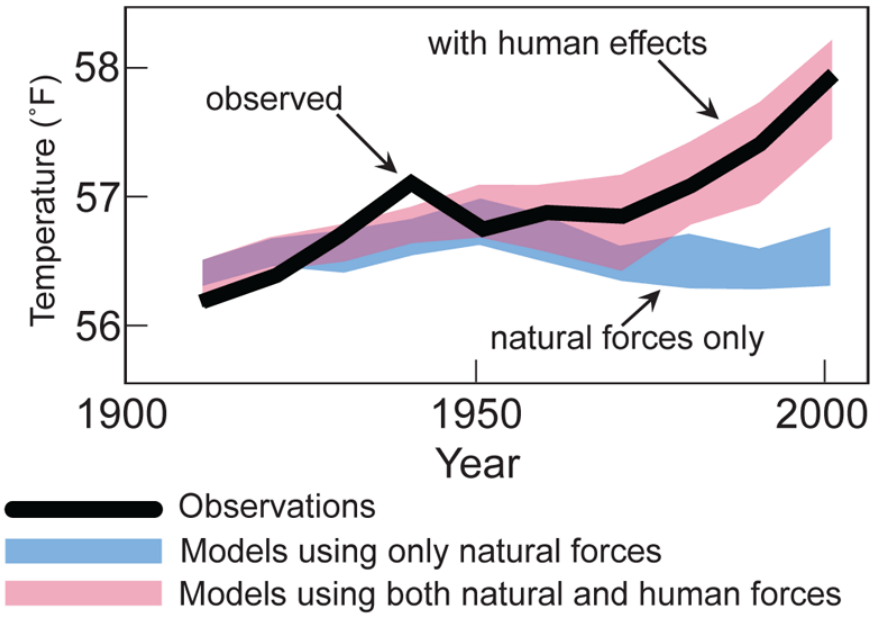
5) Historical run แบบจำลองภูมิอากาศโลกสามารถคำนวณผลลัพธ์ได้ตั้งแต่ในช่วงอดีตประมาณปี ค.ศ. 1850 จนใกล้เคียงปัจจุบัน โดยการใช้ปัจจัยที่มีต่อลักษณะสภาพภูมิอากาศในช่วงอดีต ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงปริมาณรังสี การเกิดการระเบิกของภูเขาไฟที่เคยเกิดขึ้น ละอองลอย (Aerosol) ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่ผ่านมา และการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองในช่วงอดีตสามารถถูกนำมาใช้เพื่อการประเมินถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองได้อีกทางหนึ่ง โดยการนำผลลัพธ์จากแบบจำลองในช่วงอดีต (Hindcast) มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งหากมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการตรวจวัดแสดงให้เห็นถึงความเชื่อมั่นในการประเมินผลที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

นอกจากนั้นการศึกษาข้อมูลในอดีตโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองยังสามารถประเมินถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงหรือแนวโน้มของปัจจัยที่สนใจโดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของแบบจำลอง เช่นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับกิจกรรมของมนุษย์ โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นของแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

- การคำนวณโดยพิจารณาปัจจัยทางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว (Natural forces only) เป็นการนำข้อมูลที่เกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงโดยธรรมชาติ เช่น การเปลี่ยนแปลงงปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลก การเกิดภูเขาไฟระเบิด เป็นต้น โดยมีการกำหนดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและปัจจัยอื่นๆจากกิจกรรมของมนุษย์ให้เท่ากับยุคก่อนปฏิบัติอุตสาหกรรม (Pre-industrial era) และไม่มีการเปลี่ยนแปลง

- การคำนวณโดยการพิจารณาปัจจัยที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้อง (Human forces) จะเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซเรือนกระจกและปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมของมนุษย์ และมีการกำหนดปัจจัยทางธรรมชาติให้มีค่าคงที่

ซึ่งผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นสามารถบอกได้ถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจากข้อมูลตรวจวัดซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเมื่อมีการกำหนดปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมมนุษย์ร่วมด้วย (**รูปที่ 1-1**)



ที่มา: Hegerl et al 2007

รูปที่ 1-1 ตัวอย่างการประเมินแนวโน้มของอุณหภูมิในอดีต

2 MIPs

MIPs เป็นการจัดกลุ่มการศึกษาในแต่ละหัวเรื่องที่จะเน้นในแต่ละประเด็นที่แตกต่าง โดยล่าสุดใน CMIP6 ได้มีการจัดกลุ่มเรื่องที่ศึกษาทั้งหมด 21 กลุ่ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) AerChemMIP (Aerosal and Chemistry Model Intercomparison Project) AerChemMIP เป็นการศึกษาถึงปริมาณละอองลอยในชั้น Troposphere และปฏิกิริยาละอองลอยกับโอโซน รวมถึงปฏิกริยาทางเคมีกับก๊าซเรือนกระจก นอกจากนั้นยังมีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีของชั้นบรรยากาศ และประเมินผลของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวที่มีต่อลักษณะบรรยากาศของภูมิภาคและของโลก

2) C^4MIP (Coupled Climate Carbon Cycle Model Intercomparison Project) การศึกษาในกลุ่มนี้เน้นในเรื่องของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเป็นการประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของอนาคตในช่วง 100 ปี รวมถึงการประเมินความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกันระหว่างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก

3) CFMIP (Cloud Feedback Model Intercomparison Project) เป็นการพัฒนาองค์ความรู้และความเข้าใจของกลไกที่เกิดขึ้นระหว่างเมฆและสภาพภูมิอากาศ และการศึกษา

เรื่องดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศโลก รวมถึงเรื่องของการไหลเวียนของอากาศ การเกิดฝนในระดับภูมิภาค และความสัมพันธ์ปัจจัยข้างต้นที่ซับซ้อน (Non-linear changes)

4) DAMIP (Detection and Attribution Model Intercomparison Project) DAMIP เน้นการศึกษาในเรื่องของปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับภูมิภาคและระดับโลก ประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตที่มีผลมาจากระดับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่แตกต่างกัน และกิจกรรมอื่นของมนุษย์โดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากการใช้สมการถดถอยซึ่งประเมินจากข้อมูลในช่วงอดีต

5) DCPP (Decadal Climate Prediction Project) การพัฒนาองค์ความรู้ของกระบวนการทางฟิสิกส์และการคาดการณ์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปัจจัยต่างๆในช่วงระยะเวลา 10 ปี โดยการศึกษาและประเมินผลจากข้อมูลในอดีต

6) FAFMIP (Flux-Anomaly Forced Model Intercomparison Project) การคาดการณ์ลักษณะสภาพภูมิอากาศที่มีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศบริเวณพื้นที่มหาสมุทรจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางภูมิศาสตร์ การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล รวมถึงการสะสมและการกระจายความร้อนของมหาสมุทร

7) GeoMIP (Geoengineering Model Intercomparison Project) การประเมินถึงระบบภูมิอากาศรวมถึงการเกิดเหตุการณ์สุดโต่ง (Extreme events) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณรังสีซึ่งเกี่ยวเนื่องกับงานทางด้านวิศวกรรมภูมิศาสตร์

8) GMMIP (Global Monsoons Model Intercomparison Project) กลุ่มการศึกษา GMMIP มุ่งเน้นเรื่องของการพัฒนาองค์ความรู้กระบวนการทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวเนื่องกับการเกิดมรสุม รวมถึงการจำลองการเกิดมรสุมเพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของมรสุดในแต่ละปี และการเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเวลายาวนาน

9) HighResMIP (High-Resolution Model Intercomparison Project) การศึกษานี้เป็นการประเมินถึงผลลัพธ์ของการพัฒนาแนวทางการศึกษาระบบภูมิอากาศร่วมกับสภาพอากาศในพื้นที่ขนาดเล็ก โดยกำหนดให้มีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่สูงประมาณ 25 กิโลเมตร หรือมีความละเอียดที่สูงกว่า ซึ่งการศึกษานี้จะมีการควบคุมค่าของละอองลอยไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงและกำหนดกรอบการศึกษาเฉพาะเรื่องทางด้านฟิสิกส์ของระบบภูมิอากาศเพียงอย่างเดียว

10) ISMIP6 (Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6) ISMIP6 เป็นการศึกษาเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลในการคาดการณ์ระดับน้ำทะเลที่เพิ่มสูงขึ้น อันเนื่องมาจากการละลายของแผ่นน้ำแข็งบริเวณกรีนแลนด์และแอนตาร์กติกา

11) LS3MIP (Land Surface, Snow and Soil Moisture) การศึกษาในกลุ่มนี้เป็นการประเมินถึงผลที่เกิดขึ้นจากความเกี่ยวเนื่องกันระหว่างแผ่นดิน หิมะ และความชื้นดินที่มีต่อลักษณะสภาพภูมิอากาศ โดยการใช้แบบจำลอง ESMs (Earth System Models) ที่พัฒนาล่าสุด โดยมีการควบคุมลักษณะปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวเนื่องกับแผ่นดินไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลง

12) LUMIP (Land-Use Model Intercomparison Project) การประเมินถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีต่อสภาพอากาศและวัฏจักรทางชีวเคมีทั้งในอดีตจนถึงอนาคต รวมถึงการหาแนวทางการบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากการวางกลยุทธ์ในการจัดการการใช้ที่ดิน

13) OMIP (Ocean Model Intercomparison Project) OMIP นำเสนอกรอบแนวคิดความเข้าใจและการพัฒนาของแบบจำลอง ESMs ของ CMIP6 สำหรับมหาสมุทร ธารน้ำแข็ง ชีวเคมี ก๊าซเฉื่อย รวมถึงระบบภูมิอากาศ และได้มีการนำเสนอแนวทางในการจำลองผลลัพธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยข้างต้น

14) PMIP (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project) กลุ่มนี้เป็นการวิเคราะห์ถึงลักษณะสภาพภูมิอากาศในอดีตที่มีความแปรปรวนแตกต่างจากข้อมูลที่มีอยู่ในปัจจุบัน รวมถึงประเมินผลความน่าเชื่อถือของแบบจำลองภูมิอากาศโลกในการคาดการณ์ลักษณะสภาพภูมิอากาศในอนาคต

15) RFMIP (Radiative Forcing Model Intercomparison Project) RFMIP เป็นกลุ่มการศึกษาที่เน้นเรื่องของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผลทั้งในระดับโลกและระดับภูมิภาค โดยมีการประเมินผลลัพธ์จากแบบจำลองแต่ละแบบจำลองในช่วงอดีต และการจำลองในกลุ่มของ 4xCO2 รวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ในช่วงท้องฟ้าปลอดโปร่ง

16) ScenarioMIP (Scenario Model Intercomparison Project) การศึกษาในกลุ่มนี้เป็นการศึกษาร่วมกันระหว่างผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตจากสถานการณ์ต่างๆ โดยมีความแตกต่างของสถานการณ์ตามระบบภูมิอากาศ ลักษณะทางสังคม มาตรการลดผลกระทบและแนวทางในการปรับตัว พร้อมกับมีการศึกษาผลกระทบร่วมกับโครงการ MIP อื่นๆ รวมทั้งประเมินถึงค่าความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ในการคาดการณ์อนาคตจากการประเมินจากหลายแบบจำลองร่วมกัน (Multi-model ensemble)

17) VolMIP (Volcanic Forcings Model Intercomparison Project) กลุ่มการศึกษานี้เน้นเรื่องผลกระทบของการเกิดภูเขาไฟระเบิดที่มีต่อของระบบมหาสมุทรและชั้นบรรยากาศของโลก โดยการจำลองผลจากแบบจำลองภูมิอากาศโลกที่มีความทันสมัย รวมถึงค้นหา

สาเหตุข้อจำกัดของการประมวลผลของแบบจำลองที่มีความแตกต่างในการตั้งค่ากระบวนการทางกายภาพของโลกที่แตกต่างกัน

18) CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) กลุ่มการศึกษา CORDEX เป็นความร่วมมือกันในการลดมาตราส่วนข้อมูล (Downscaling) ในระดับภูมิภาค (Regional climate downscaling: RCD) ผ่านกระบวนการลดขนาดแบบไดนามิกส์ (Dynamical downscaling) และกระบวนการทางสถิติ (Statistical downscaling) ของผลลัพธ์ที่ได้ CMIP DECK, CMIP6 historical และ Scenario MIP

19) DynVarMIP (Dynamics and Variability Model Intercomparison Project) เป็นการศึกษาค้นคว้าเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่มีค่าความเอนเอียง (Bias) เกิดขึ้น และสร้างความเข้าใจถึงสาเหตุพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงของการไหลเวียนของอากาศระหว่างชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และสตาร์โทสเฟียร์

20) SIMIP (Sea Ice Model Intercomparison) SIMIP เป็นกลุ่มการทดลองเพื่อสร้างความเข้าใจถึงลักษณะของน้ำแข็งในทะเล และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รวมทั้งระบุถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อลักษณะกระบวนการเกิดและการละลายของน้ำแข็งในทะเล โดยพิจารณาส่วนของชั้นบรรยากาศและมหาสมุทรเป็นสำคัญ

21) VIACS AB (Vulnerability, Impacts, Adaptation and Cliamte Services Advisory Board) การดำเนินงานในกลุ่มนี้เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างนักวิจัยในส่วนของแบบจำลองในกลุ่ม CMIP6 และผู้เชี่ยชาญของ VIACS โดยผู้เชี่ยวชาญในกลุ่ม VIACS จะนำผลลัพธ์จากกลุ่มการศึกษา CMIP6 ไปให้บริการข้อมูลในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการวิเคราะห์เพื่อสร้างสถานการณ์ต่างๆสำหรับการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

เอกสารอ้างอิง

Hegerl, G.C., et al. 2007. Understanding and Attributing Climate Change. In: Solomon, S. and Coauthors, Eds., Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Cambridge University Press, Cambridge, 663-745.

ภาคผนวก ง – ขั้นตอนการใช้งาน แบบจำลอง SWAT และ SWAT-CUP

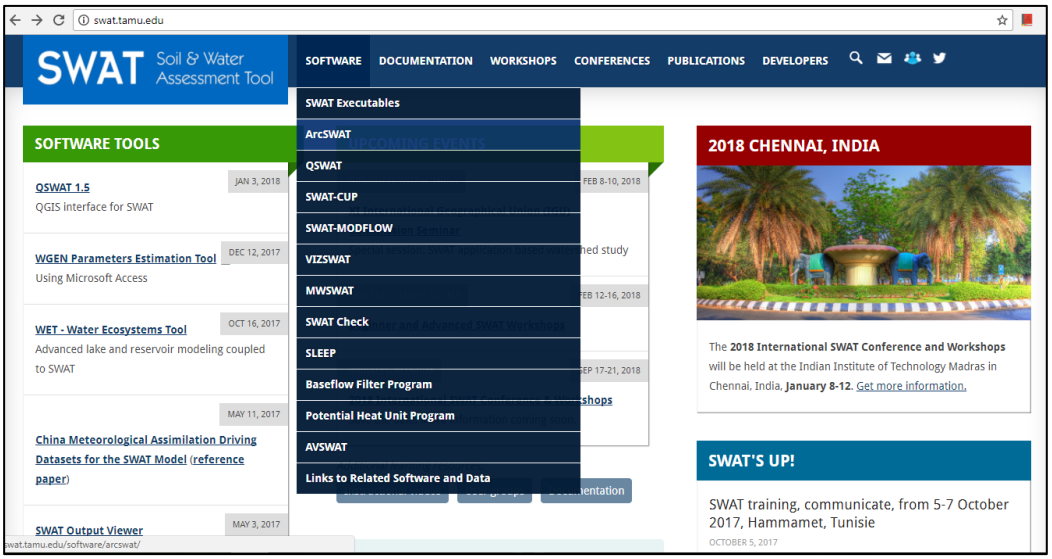
SWAT and SWAT-CUP Modeling Procedure

ขั้นตอนการใช้งานแบบจำลอง SWAT

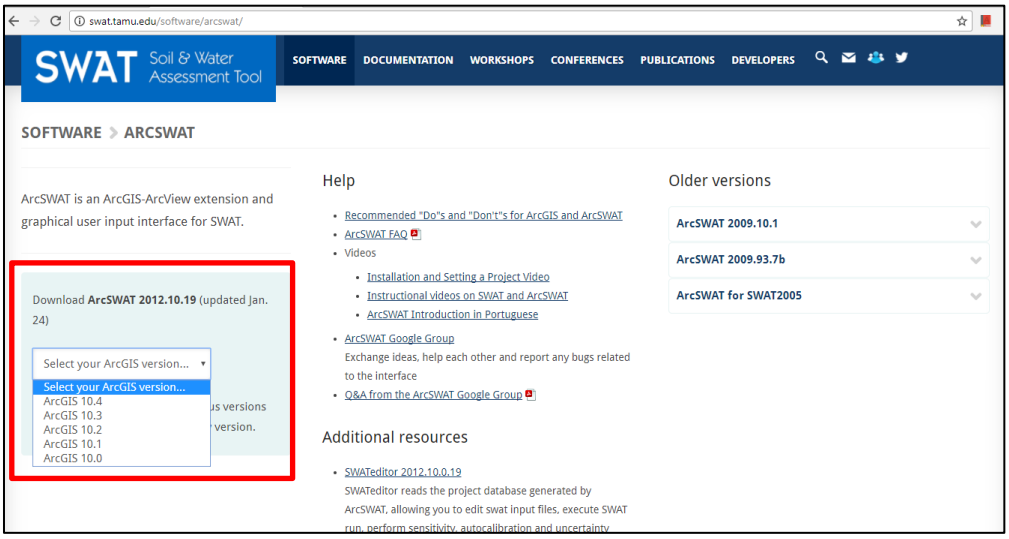
1. การติดตั้งโปรแกรม ArcSWAT

การเลือกติดตั้งโปรแกรม ArcSWAT ในแต่ละเวอร์ชั่นจะขึ้นอยู่กับการใช้งานโปรแกรม ARCGIS ณ ปัจจุบัน ซึ่งจำเป็นต้องมีการตรวจสอบเวอร์ชั่นการใช้งานโปรแกรม ARCGIS เพื่อให้สามารถเลือกใช้โปรแกรม ArcSWAT ได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถตรวจสอบและดาวน์โหลดโปรแกรมได้ที่เว็บไซต์ http://swat.tamu.edu/software/arcswat/ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อมีการงานใช้โปรแกรม ArcGIS 10.3 ควรเลือกดาวน์โหลดและติดตั้งโปรแกรม ArcSWAT 2012.10.19 เป็นต้น

รูปที่ 1.1 แสดงหน้าต่างของเว็บไซต์ SWAT จากนั้นให้เลือกโปรแกรมที่ต้องการใช้งาน โดยรายละเอียดที่แสดงในส่วนนี้จะเลือกโปรแกรม ArcSWAT ซึ่งจะสามารถเลือกโปรแกรม ArcSWAT ในเวอร์ชั่นต่างๆให้เข้ากับ โปรแกรม ArcGIS ที่กำลังใช้งานอยู่ดัง**รูปที่ 1.2** การเลือกโปแกรม ArcSWAT ไม่ตรงกับการใช้งานที่แนะนำในเวบไซต์อาจมีผลต่อการใช้งานของแบบจำลอง

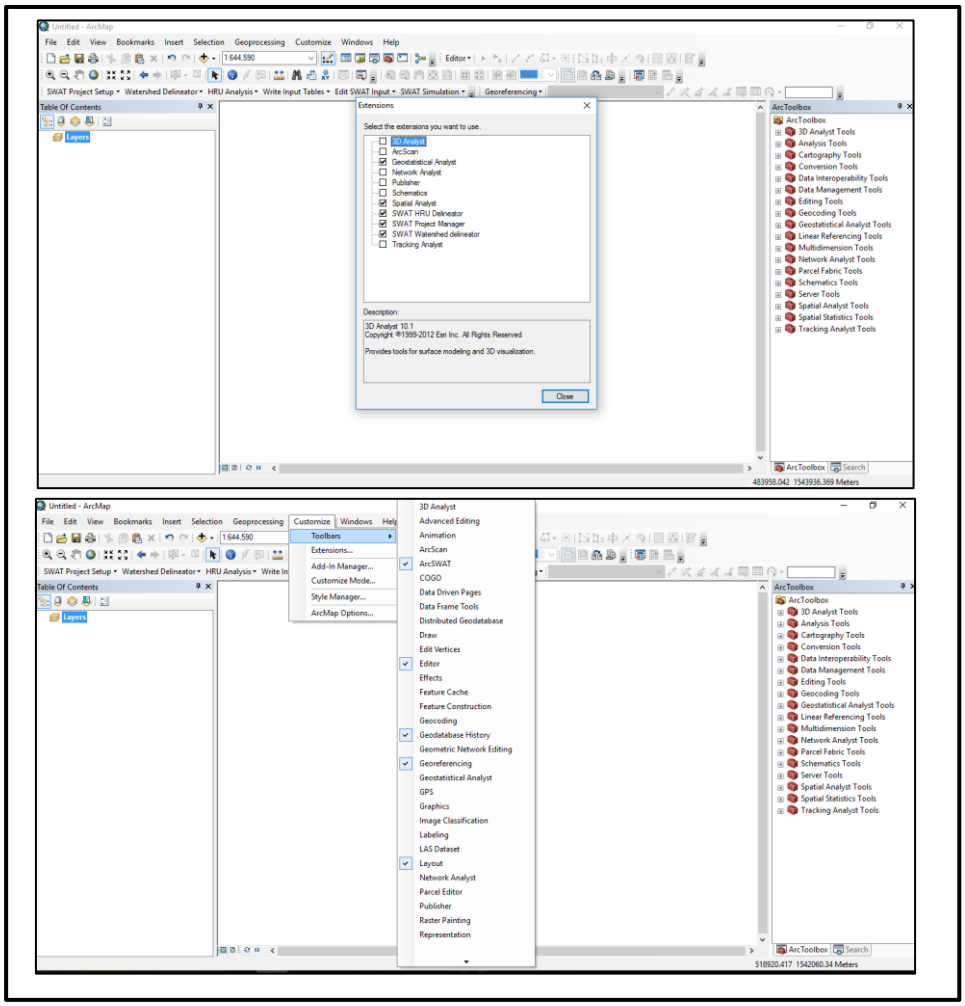


รูปที่ 1.1



รูปที่ 1.2

เมื่อทำการติดตั้งโปรแกรมเสร็จสิ้น ให้เลือกเปิดการใช้งาน ArcSWAT จากแถบเครื่องมือ Customize>Extension และแถบเครื่องมือ Customize>Toolbars ดังแสดงใน**รูปที่ 1.3**



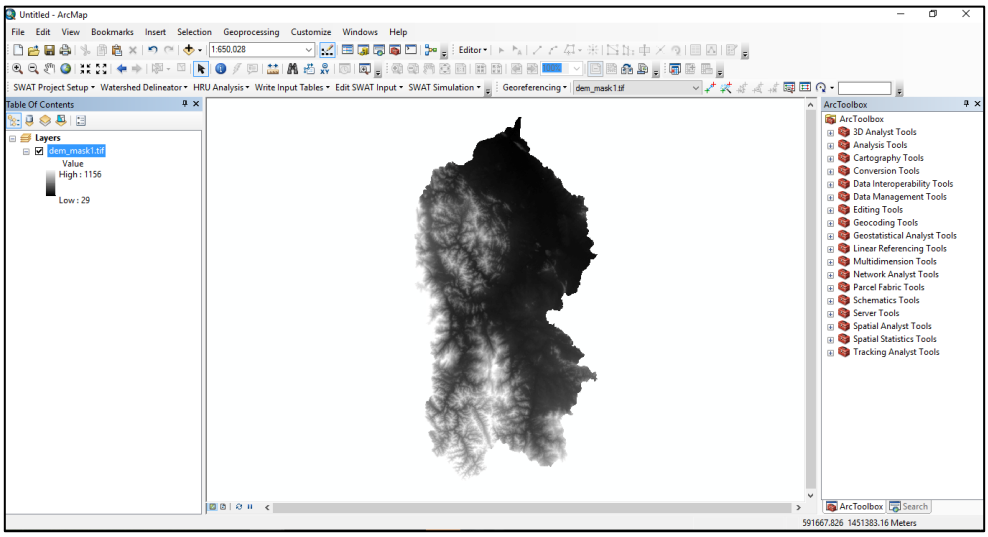
รูปที่ 1.3

2. การจัดเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ก่อนเริ่มการใช้งานโปรแกรม ArcSWAT จำเป็นต้องมีการจัดเตรียมข้อมูลที่เกี่ยวข้องให้มีรูปแบบตามที่กำหนด ซึ่งสามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ประเภทหลักได้แก่ ข้อมูลเชิงพื้นที่ และข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในรูปแบบตารางหรือไฟล์ข้อความ การแสดงตัวอย่างข้อมูลในครั้งนี้จะนำเสนอโดยใช้ตัวอย่างจากพื้นที่ลุ่มน้ำลำภาชี โดยมีรายละเอียดดังนี้

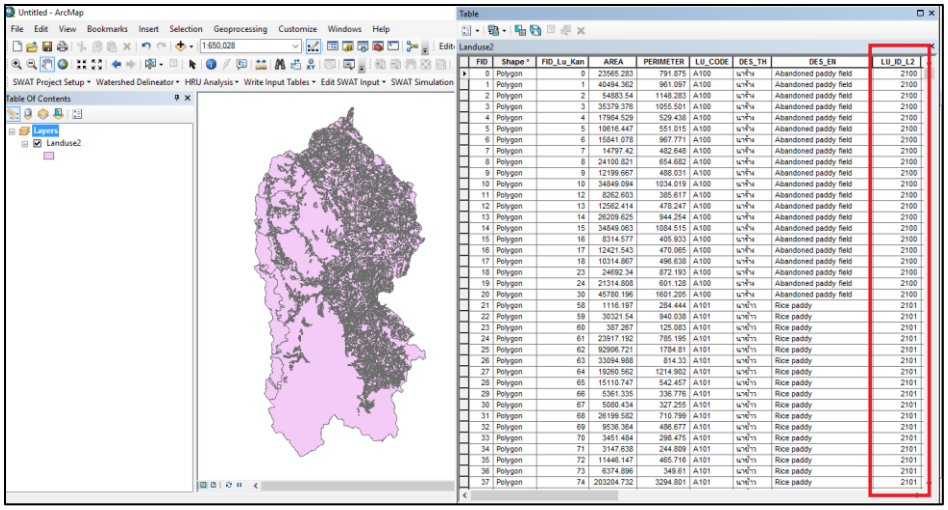
2.1. ข้อมูลเชิงพื้นที่

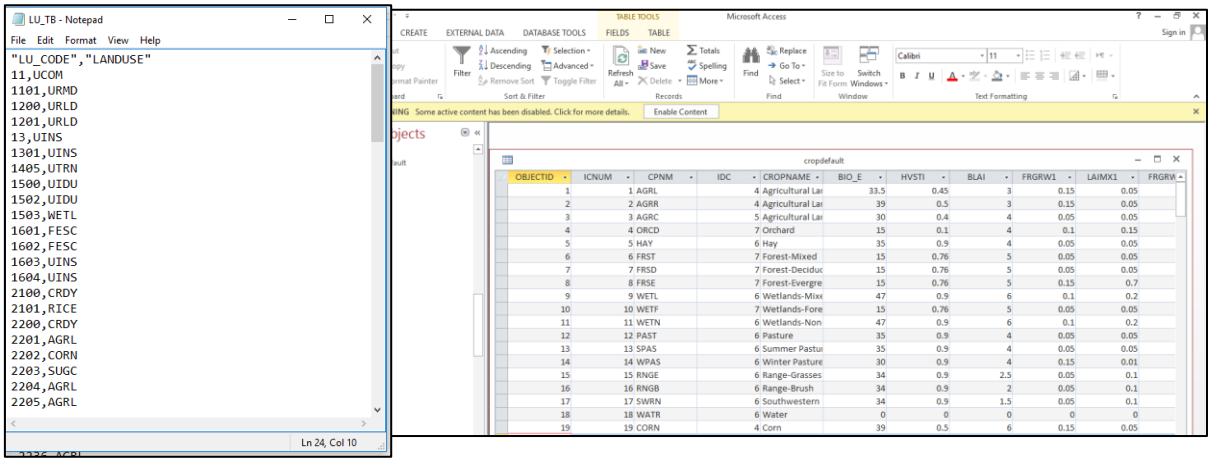
1) **แผนที่ชั้นความสูง (Digital Elevation Map: DEM)** เป็นข้อมูลในรูปแบบของไฟล์กริดเซลล์ โดยจะแสดงถึงค่าความสูงในพื้นที่ศึกษา ตัวอย่างข้อมูล DEM ของพื้นที่ลุ่มน้ำลำภาชี แสดงดัง**รูปที่ 2.1-1**



รูปที่ 2.1-1

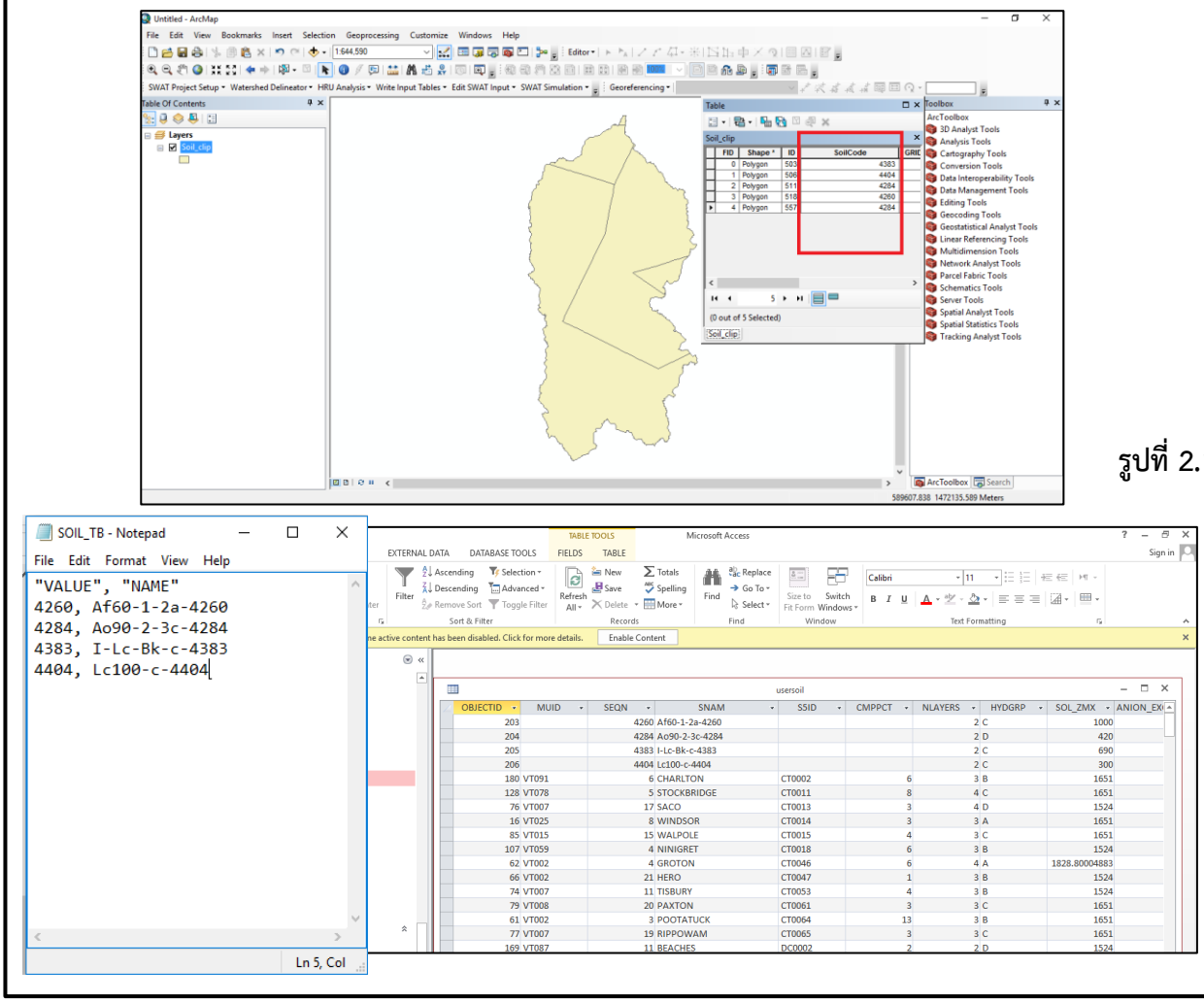
2) **แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use)** เป็นข้อมูลในรูปแบบของไฟล์กริดเซลล์หรือรูปแบบของเวคเตอร์ไฟล์ (Polygon) แสดงถึงการใช้ประโยชน์ที่ดินในแต่ละประเภทในพื้นที่ศึกษา โดยจะต้องมีข้อมูลในตารางที่สามารถเชื่อมโยงเข้ากับฐานข้อมูลของ SWAT ได้ จาก**รูปที่ 2.1-2** ข้อมูลในคอลัมน์ LU_ID_L2 ของแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับตารางเชื่อมโยงข้อมูล LU_TB ที่เป็นรูปแบบ Text File ซึ่งจะต้องจัดเตรียมโดยผู้ใช้ ซึ่งจะเชื่อมโยงเข้ากับฐานข้อมูล SWAT ในรูปแบบของ Microsoft Access ต่อไป





รูปที่ 2.1-2

3) **แผนที่กลุ่มชุดดิน (Soil group)** เป็นข้อมูลในรูปแบบของไฟล์กริดเซลล์หรือรูปแบบของเวคเตอร์ไฟล์ (Polygon) แสดงถึงการกระจายตัวของกลุ่มชุดดินในบริเวณพื้นที่ศึกษา โดยจะต้องมีข้อมูลในตารางที่สามารถเชื่อมโยงเข้ากับฐานข้อมูลของ SWAT ได้ จาก**รูปที่ 2.1-3** ข้อมูลในคอลัมน์ SoilCode ของแผนที่กลุ่มชุดดิน จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับตารางเชื่อมโยงข้อมูล SOIL _TB ที่เป็นรูปแบบ Text File ซึ่งจะต้องจัดเตรียมโดยผู้ใช้ ซึ่งจะเชื่อมโยงเข้ากับฐานข้อมูล SWAT ใน Microsoft Access ต่อไป



รูปที่ 2.1-3

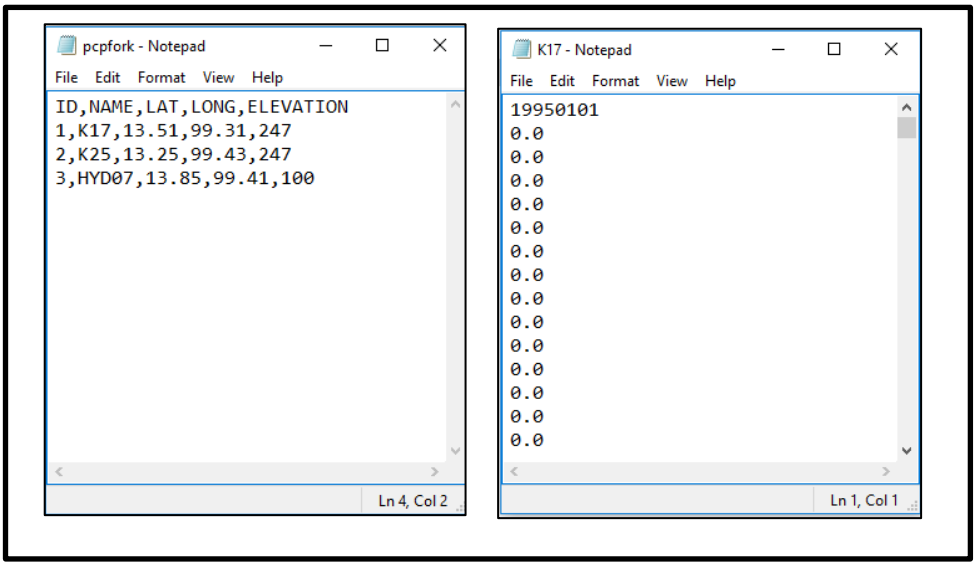
2.2. ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในรูปแบบตารางหรือไฟล์ข้อความ

ข้อมูลหลักที่จำเป็นต้องใช้ในแบบจำลองในรูปแบบของตารางหรือไฟล์ข้อความ ได้แก่ ข้อมูลสภาพภูมิอากาศจากสถานีตรวจวัดอากาศ และข้อมูลการตรวจวัดจากสถานีอุทกวิทยา เช่น ข้อมูลน้ำท่า เป็นต้น โดยรูปแบบตัวอย่างการจัดเตรียมข้อมูลแสดงดังนี้

- **ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ** ข้อมูลสภาพภูมิอากาศถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลสภาพอากาศทั่วไป และข้อมูลสภาพอากาศพื้นฐาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

  a) ***ข้อมูลสภาพอากาศทั่วไป*** ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสงแดด และความเร็วลม โดยข้อมูลสามารถมีความละเอียดได้ตั้งแต่รายนาทีจนถึงรายวัน ซึ่งการเตรียมข้อมูลแต่ละปัจจัยต้องมีจำนวน 2 ไฟล์ ได้แก่ ไฟล์รายชื่อสถานีตรวจวัด และไฟล์ข้อมูล ลักษณะรูปแบบข้อมูลแสดงดัง**รูปที่ 2.2-1** ไฟล์รายชื่อสถานี

ตรวจวัดต้องประกอบไปด้วย ลำดับ,ชื่อสถานี,ละติจูด,ลองจิจูด,ความสูงของพื้นที่ติดตั้งสถานี และไฟล์ข้อมูลเริ่มจากปี-เดือน-วัน ของข้อมูลและชุดข้อมูลทั้งหมด

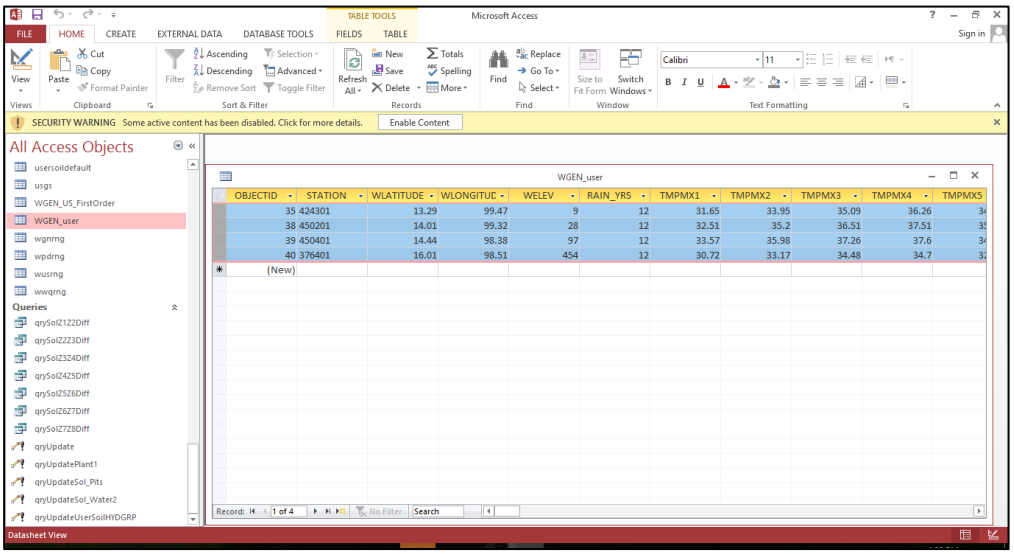


รูปที่ 2.2-1

b) ***ข้อมูลสภาพอากาศพื้นฐาน*** เป็นข้อมูลที่มีความละเอียดมากกว่าข้อมูลสภาพอากาศทั่วไป โดยเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและผ่านการคำนวณทางสถิติ ข้อมูลสภาพอากาศพื้นฐานจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณในส่วนของ The weather generator ที่อยู่ภายในแบบจำลอง SWAT โดยจะถูกใช้เมื่อข้อมูลสภาพอากาศทั่วไปในแบบจำลองมีค่าที่ขาดหาย (missing data) หรือมีการเลือกใช้งานให้แบบจำลองคำนวณข้อมูลสภาพอากาศทั่วไปแบบอัตโนมัติ **รูปที่ 2.2-2** แสดงตัวอย่างข้อมูลสภาพอากาศพื้นฐาน รายละเอียดข้อมูลสภาพอากาศพื้นฐานมีดังนี้

- พิกัดของสถานีตรวจวัดอุตุนิยมวิทยา
- ความสูงของสถานีตรวจวัดอุตุนิยมวิทยา
- จำนวนปีที่มีข้อมูล
- ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดรายวันของแต่ละเดือน
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดรายวันของแต่ละเดือน
- ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของปริมาณฝนรายวันของแต่ละเดือน
- ค่าความน่าจะเป็นจำนวนวันของการเกิดฝนตามด้วยจำนวนวันที่ไม่มีฝน
- ค่าความน่าจะเป็นจำนวนวันของการเกิดฝนตามด้วยจำนวนวันที่มีฝน
- ค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่เกิดฝนในแต่ละเดือน
- ค่าเฉลี่ยปริมาณฝนรายครึ่งชั่วโมงในแต่ละเดือน
- ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงรายวันในแต่ละเดือน

- อุณหภูมิจุดน้ำค้างเฉลี่ยในแต่ละเดือน
- ค่าเฉลี่ยความเร็วลมในแต่ละเดือน

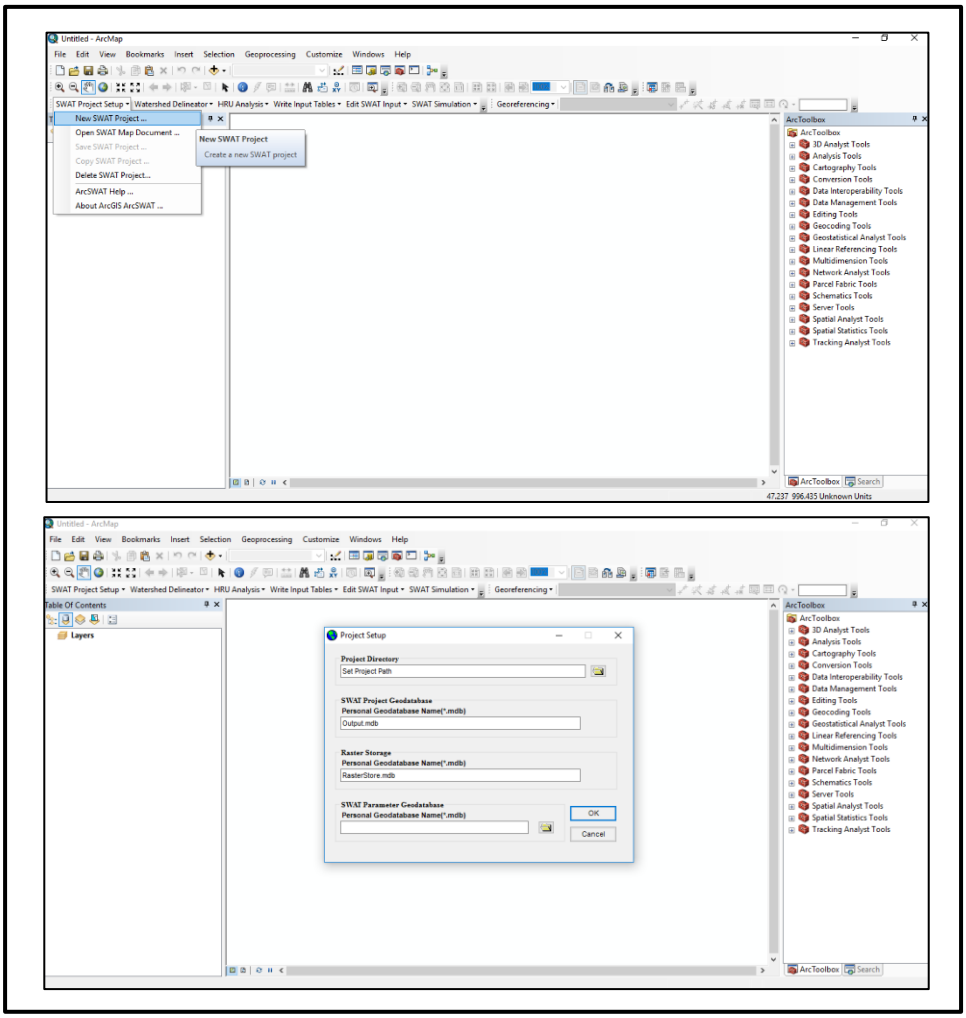


รูปที่ 2.2-2

3. การจัดสร้างแบบจำลอง (Model setup)

ขั้นตอนการจัดสร้างแบบจำลองประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การกำหนดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (Watershed delineation) การกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrological Response Unit: HRU) การสร้างไฟล์ที่จะนำเข้าสู่แบบจำลอง (Writing input table) และสุดท้ายการสั่งคำนวณแบบจำลอง SWAT (Run SWAT)

การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม ArcSWAT โดยการเปิดแถบเครื่องมือ ArcSWAT ตามรายละเอียดหัวข้อ 2.1 จากนั้นหากผู้ใช้ต้องการสร้างโครงการใหม่ ให้กำหนดชื่อโครงการ และระบุตำแหน่งที่จะใช้ในการจัดเก็บข้อมูลดัง**รูปที่ 3-1** หรือหากต้องการเปิดโครงการที่มีอยู่แล้วให้ผู้ใช้งานเลือกที่ Open SWAT Map Document แทน

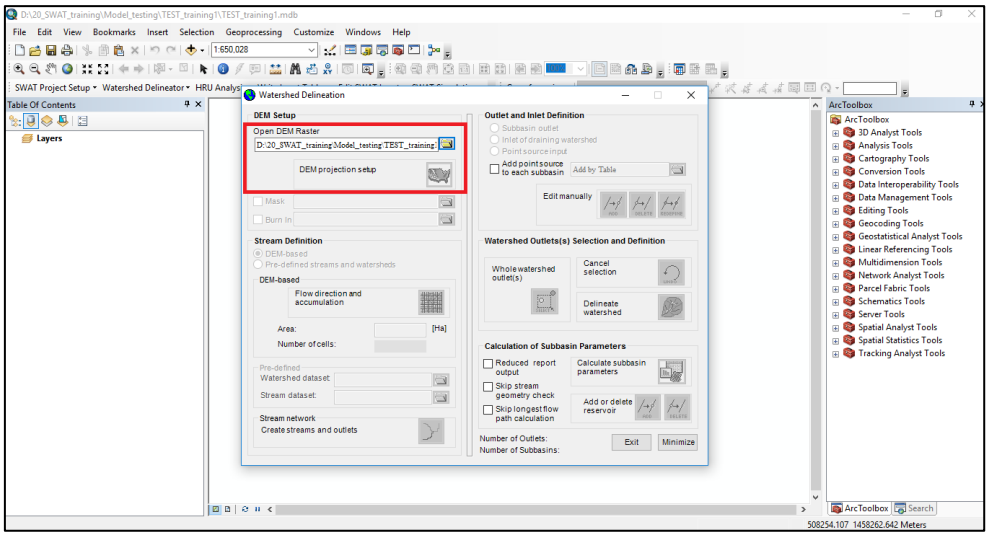


รูปที่ 3-1

1) การกำหนดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (Watershed delineation)

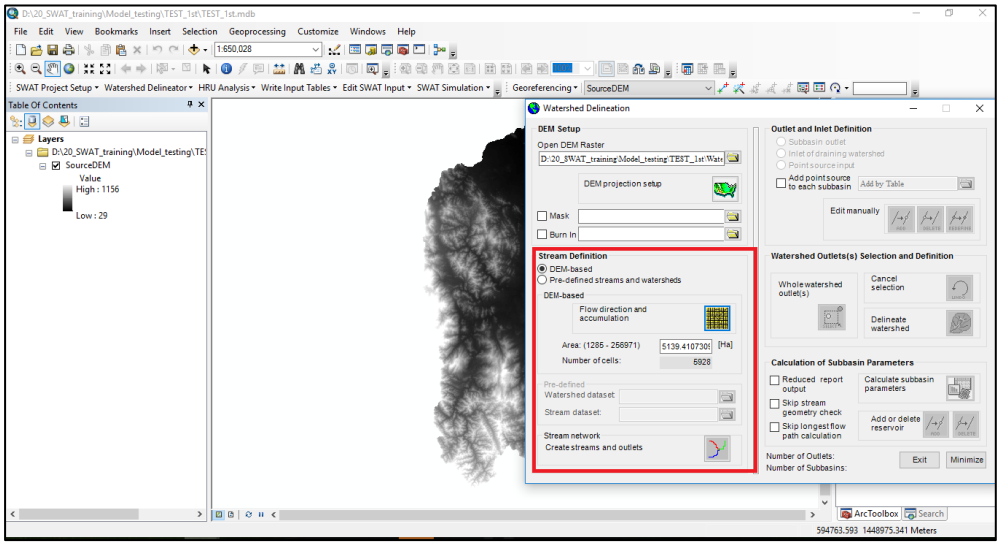
เมื่อผู้ใช้จัดตั้งโครงการใหม่เรียบร้อยแล้ว แถบเครื่องมือ Watershed Delineator จะสามารถใช้งานได้ เมื่อผู้ใช้เลือก Watershed delineator > Watershed Delineation หน้าต่าง Watershed Delineation จะปรากฏ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

a) **ขั้นตอนการกำหนดค่าความสูงพื้นที่ (Dem Setup)** ขั้นตอนนี้เป็นการนำเข้าข้อมูล DEM โดยในแถบ Open DEM Raster ให้เลือกไปยังตำแหน่งที่จัดเก็บข้อมูล DEM เพื่อนำเข้าข้อมูล DEM มาใช้ในการกำหนดหน่วยความสูงของพื้นที่ ดัง**รูปที่ 3-2**



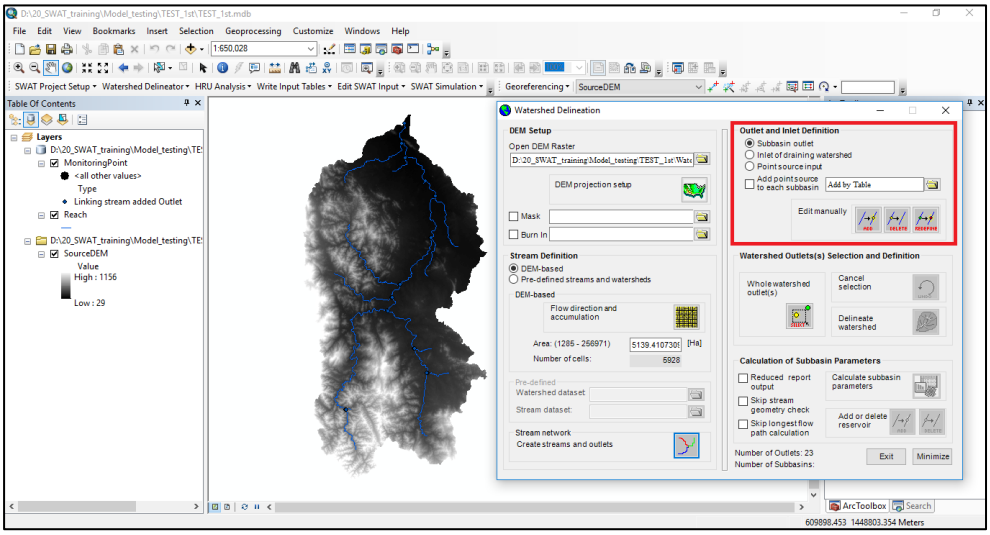
รูปที่ 3-2

b) **ขั้นตอนการกำหนดเส้นลำน้ำ (Stream definition)** ขั้นตอนการกำหนดเส้นลำน้ำสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ (1) การใช้ข้อมูล DEM เป็นพื้นฐานในการคำนวณเส้นทางการไหลของลำน้ำ และ (2) การใช้เส้นขอบเขตลุ่มน้ำและเส้นลำน้ำที่กำหนดโดยผู้ใช้เอง โดยการเลือกข้อมูลในช่อง Watershed Dataset และ Stream Dataset จากนั้นจึงทำการสร้างเครือข่ายลำน้ำและสร้าง Outlet ของลุ่มน้ำย่อยโดยเลือกที่ Create Streams and Outlets ดัง**รูปที่ 3-3**



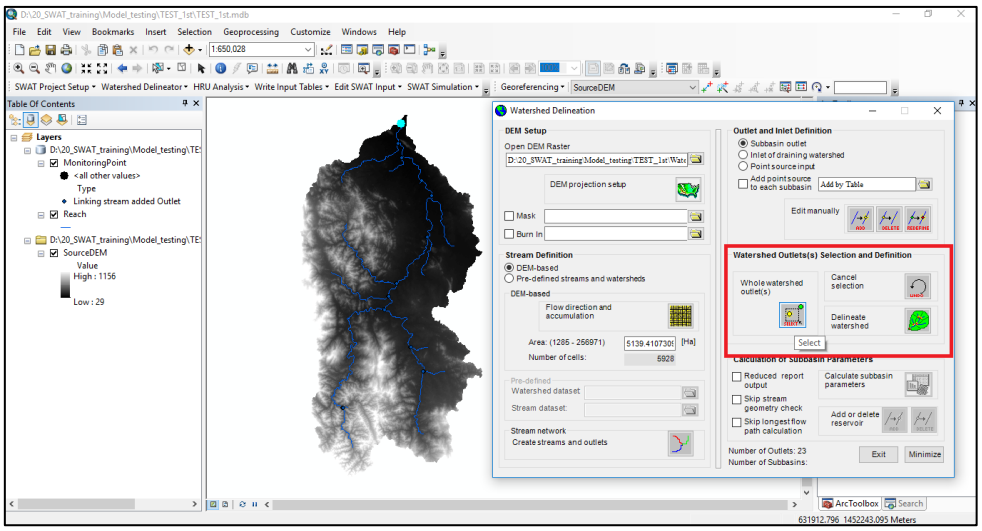
รูปที่ 3-3

c) **การกำหนดจุดออกลุ่มน้ำย่อย และตำแหน่งอื่นๆที่เกี่ยวข้องภายในลุ่มน้ำ** ผู้ใช้สามารถกำหนดจุดออกของล้ำน้ำย่อย เพิ่มและลดจุดออกได้ตามความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่และเรื่องที่สนใจศึกษา จำนวนจุดออกของลุ่มน้ำย่อยจะเป็นตัวกำหนดจำนวนลุ่มน้ำย่อยภายในพื้นที่ลุ่มน้ำหลัก นอกจากนั้นยังสามารถกำหนดจุดน้ำเข้า (Inlet of drainage watershed) และแหล่งกำเนิดมลพิษ (Point source input) สำหรับการศึกษาเรื่องคุณภาพน้ำ ดังแสดงใน**รูปที่ 3-4**



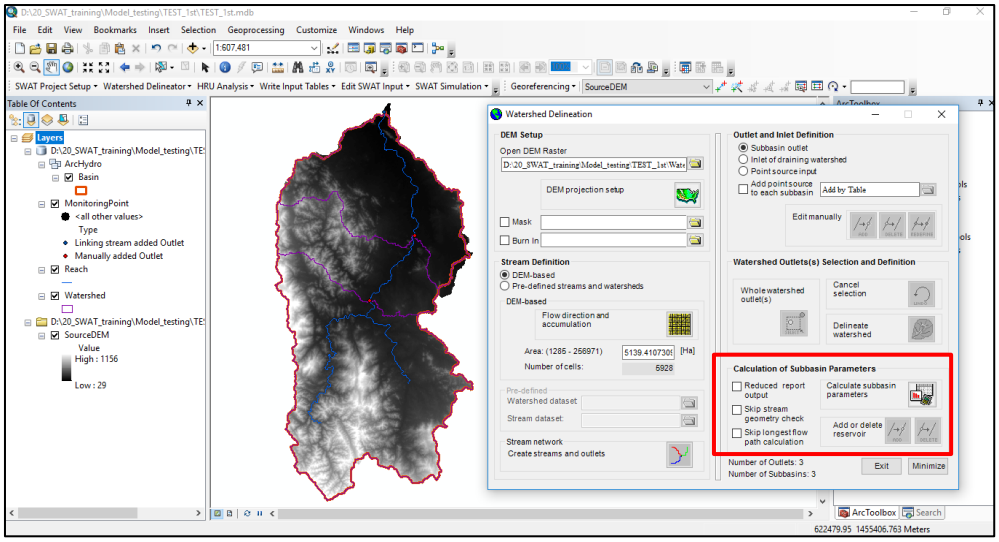
รูปที่ 3-4

d) **การกำหนดจุดออกพื้นทีลุ่มน้ำหลัก** เมื่อกำหนดจุดต่างๆภายในลุ่มน้ำเสร็จสิ้น ผู้ใช้สามารถกำหนดจุดออกของลุ่มน้ำหลักได้โดยเลือกที่ Whole watershed outlet จากนั้นเมื่อเลือกที่ Delineate watershed โปรแกรมจะทำการสร้างขอบเขตลุ่มน้ำย่อยภายในพื้นที่ลุ่มน้ำหลัก และหากผู้ใช้ต้องการเปลี่ยนแปลงจุดลุ่มน้ำหลักสามารถทำได้โดยเลือก Cancel selection และหากต้องการเปลี่ยนแปลงลุ่มน้ำย่อยสามารถกลับไปดำเนินการได้อีกครั้งตามวิธีการดำเนินงานในหัวข้อที่ 3) **รูปที่ 3-5** แสดงวิธีการกำหนดจุดออกของพื้นที่ลุ่มน้ำหลัก



รูปที่ 3-5

e) **การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง** ในขั้นตอนสุดท้ายเมื่อกำหนดจุดต่างๆเสร็จสิ้น โปรแกรมจะทำการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยเลือกที่ Calculates subbasin parameters หลังจากนั้นผู้ใช้ยังสามารถเพิ่มตำแหน่งที่ตั้งของอ่างเก็บน้ำ โดยการเลือกที่ Add or delete reservoir หากมีอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ ดัง**รูปที่ 3-6**



รูปที่ 3-6

2) การกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrological Response Unit- HRU)

เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอน Watershed Delineation โปรแกรมจะเปิดให้ใช้งานในส่วนของ HRU analysis ซึ่งเป็นกระบวนการในการนำลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำ 3 ปัจจัย ได้แก่ การใช้ประโยชน์ที่ดิน คุณสมบัติของดิน และความสูงของพื้นที่ มาจัดเป็นหน่วยย่อย โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

a) การนำเข้าข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน / ชุดดิน / ความลาดชัน

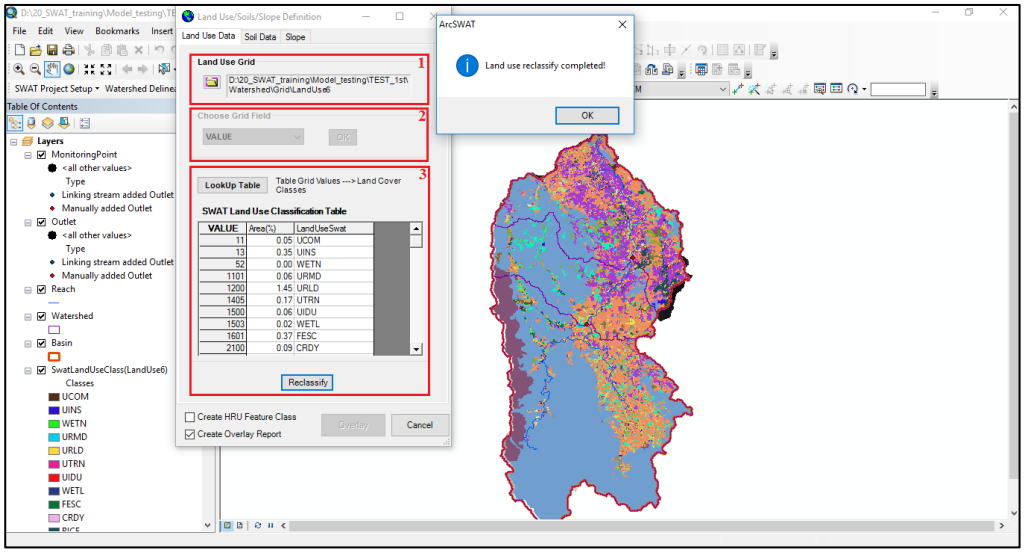
i. การนำเข้าข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use data)

เลือกแถบเครื่องมือ HRU analysis และเลือกแถบเครื่องมือ Landuse/Soils/Slope definition จากนั้นหน้าต่างของ Land use/Soils/Slope definition จะเปิดขึ้นมา และทำการนำเข้าข้อมูลแสดงดัง**รูปที่ 3-7** โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ส่วนที่ 1: ให้ทำการเลือกข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินที่อยู่ในรูปของ Raster หรือ Polygon โดยแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินที่เลือกควรมีการ Projection ให้เป็นเช่นเดียวกับแผนที่อื่นที่ใช้งานเรียบร้อยแล้ว จากนั้นให้ทำการเลือกคอลัมน์ที่กำหนดไว้เพื่อทำการเชื่อมโยงข้อมูล

จากแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินกับฐานข้อมูลของ SWAT (โดยจากตัวอย่างครั้งนี้ให้เลือกที่ LU_ID_L2)

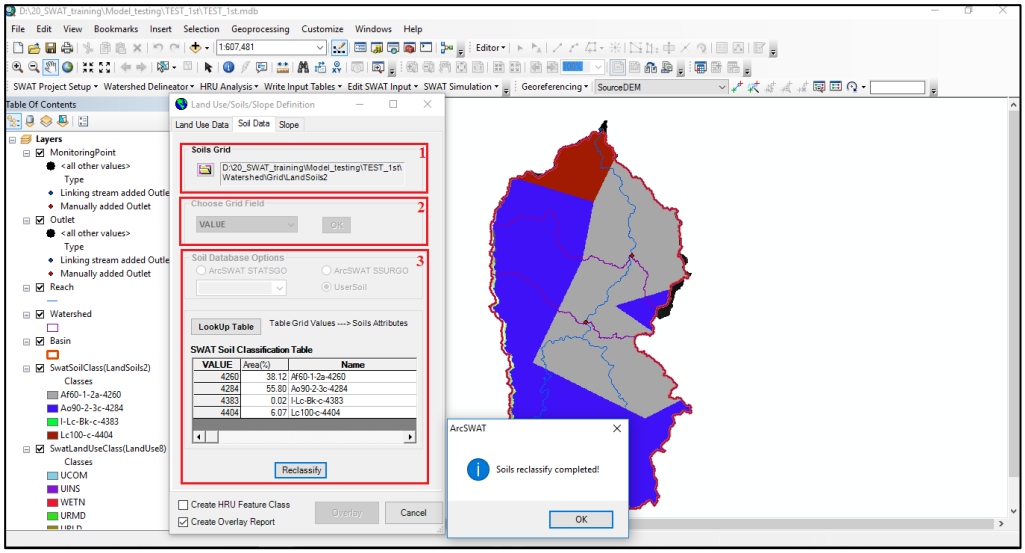
- ส่วนที่ 2: ให้ทำการเลือกประเภทของข้อมูล โดยเลือกที่ 'Value' และคลิกที่ OK
- ส่วนที่ 3: จะเป็นการเชื่อมโยงข้อมูล ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการเตรียมในรูป Text file ข้างต้น โดยให้เลือกที่ Look Up Table จากนั้น ให้เลือกที่ User Table ซึ่งให้ไปยังตำแหน่งที่จัดเก็บฐานข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภท Text file ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินตามรหัสที่กำหนดจะถูกจัดเรียงให้เข้ากับประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินในฐานข้อมูล SWAT จากนั้นจึงเลือกที่ 'Reclassify' เพื่อทำการเชื่อมโยงข้อมูลเข้ากับฐานข้อมูล SWAT



รูปที่ 3-7

ii. การนำเข้าข้อมูลดิน (Soil data)

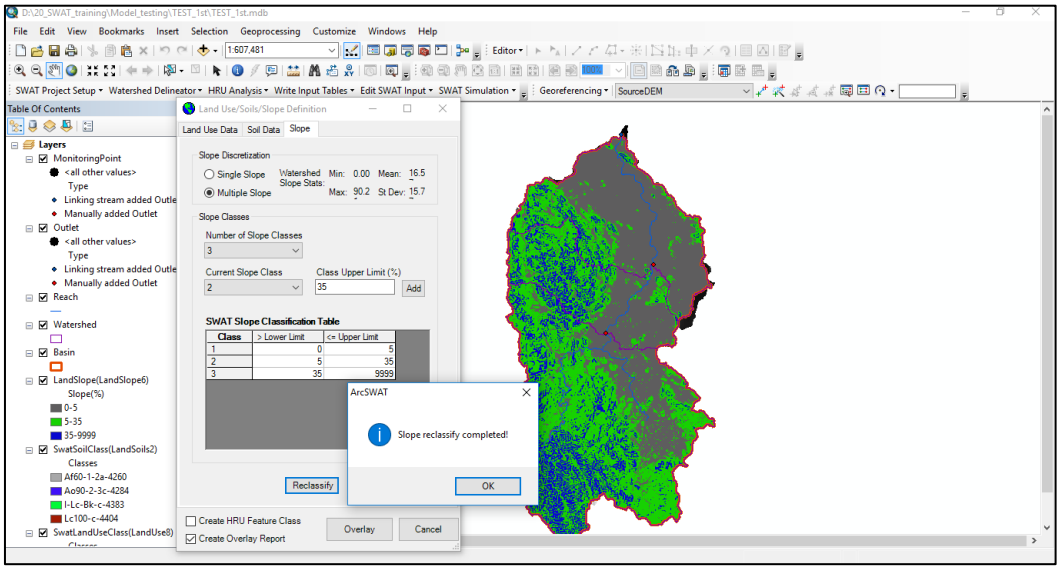
การนำเข้าข้อมูลดินแสดงดัง**รูปที่ 3-8** จะมีขั้นตอนของส่วนที่ 1 และ 2 เช่นเดียวกับการนำเข้าข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินตามรายละเอียดข้างต้น (โดยจากตัวอย่างครั้งนี้ให้เลือกคอลัมน์ SoilCode เพื่อทำการเชื่อมโยงข้อมูล) สำหรับส่วนที่ 3 ให้ทำการเลือก 'Usersoil' จากนั้นเลือกที่ LookUp Table ซึ่งจะให้ไปยังตำแหน่งที่จัดเก็บฐานดินประเภท Textfile ข้อมูลชุดดินตามรหัสที่กำหนดจะถูกจัดเรียงให้เข้ากับกลุ่มชุดดินในฐานข้อมูล SWAT จากนั้นจึงเลือกที่ 'Reclassify' เพื่อทำการเชื่อมโยงข้อมูลเข้ากับฐานข้อมูล SWAT



รูปที่ 3-8

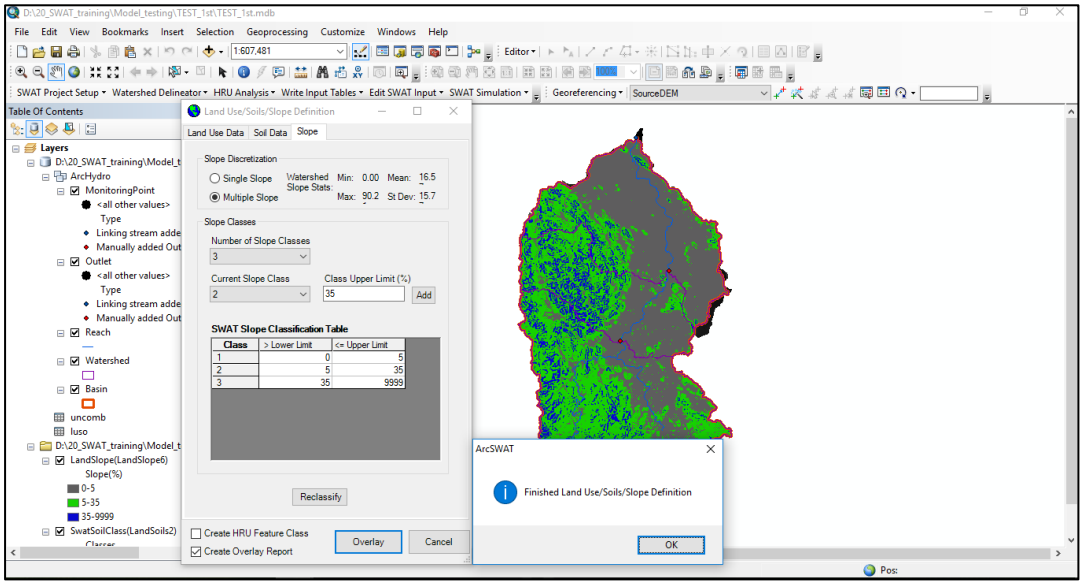
iii. การกำหนดค่าความชัน

การกำหนดค่าความชัน (**รูปที่ 3-9**) สามารถเลือกได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ Single slope สำหรับพื้นที่ที่มีความลาดชันไม่แตกต่างกันมากนัก และ Multiple slope เมื่อพื้นที่มีค่าความชันที่แตกต่างกัน โดยสัดส่วนของค่าความชันขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพพื้นที่และการกำหนดของผู้ใช้งาน โดยจากตัวอย่างครั้งนี้ได้มีการแบ่งค่าความชันออกเป็น 3 ช่วง



รูปที่ 3-9

เมื่อกำหนดค่าความลาดชันเสร็จสิ้น ให้ทำการเลือก ‘Overlay’ เพื่อทำการเชื่อมโยงข้อมูลทั้ง 3 ประเภทเข้าด้วยกัน เมื่อทำการ Overlay เสร็จสิ้น SWAT จะแสดงผลดัง**รูปที่ 3-10**

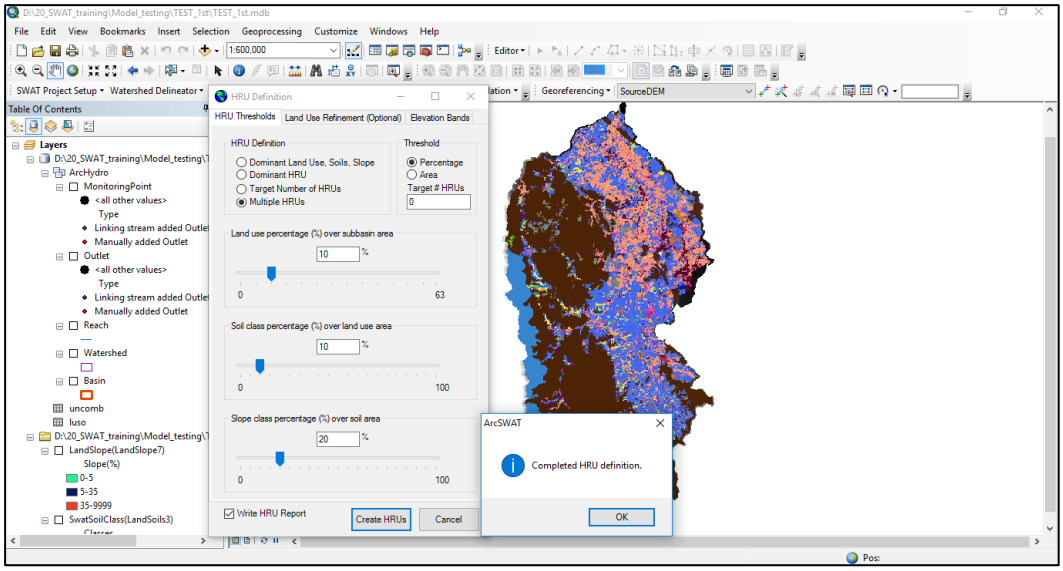


รูปที่ 3-10

b) การกำหนดเงื่อนไขหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา

ในขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดเงื่อนไขเพื่อสร้างหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา หรือ HRUs (Hydrological Response Units) โดยการใช้องค์ประกอบของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชุดดิน และค่าความชันเป็นตัวกำหนด โดยสามารถเลือกวิธีการได้ 4 วิธี แสดงดัง**รูปที่ 3-11**

- Dominant Land Use, Soil, Slope: เป็นการกำหนดโดยเลือกลักษณะเด่นของแต่ละลุ่มน้ำย่อย ดังนั้นในหนึ่งลุ่มน้ำย่อยจะมี HRU 1 HRU
- Dominant HRU: เป็นการกำหนดจาก HRU ที่มีมากที่สุดในแต่ละลุ่มน้ำย่อย
- Target Number of HRUs : เป็นการกำหนดจำนวน HRU โดยผู้ใช้สามารถระบุจำนวน HRU ที่ต้องการ
- Multiple HRUs : เป็นการกำหนดให้แต่ละลุ่มน้ำย่อยมีจำนวน HRUs ตามสัดส่วนพื้นที่ของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชุดดิน และค่าความชัน



รูปที่ 3-11

เมื่อทำการกำหนดค่า HRUs เสร็จสิ้น ผู้ใช้สามารถเรียกดูจำนวน HRUs และการจัดแบ่ง HRUs โดยแบบจำลอง SWAT ได้จากแถบเครื่องมือ 'HRU Analysis Report' ในส่วนของ 'Final HRU Distribution'

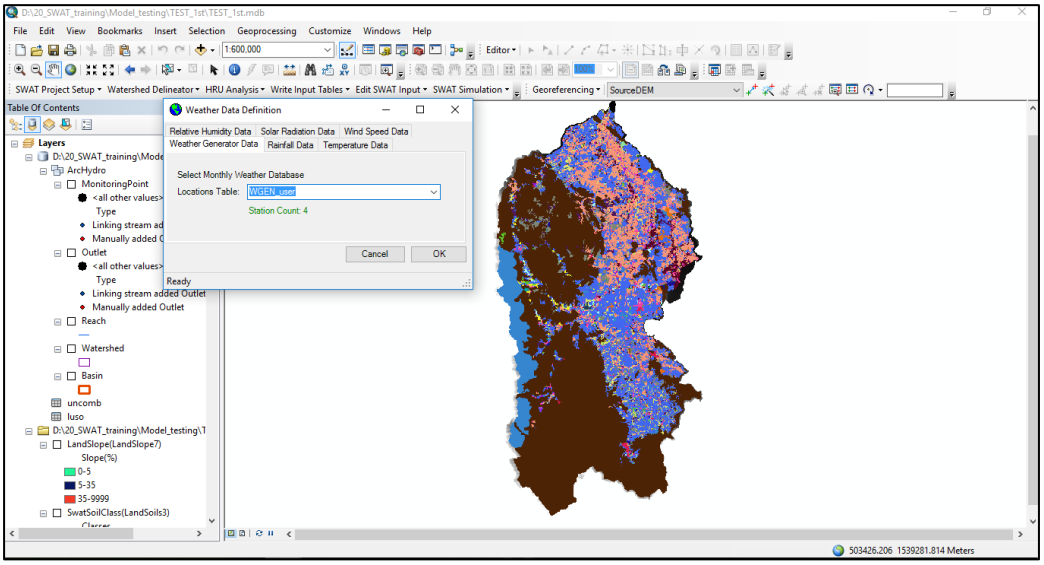
3) การสร้างไฟล์นำเข้าข้อมูล SWAT

ขั้นตอนต่อไปผู้ใช้ต้องสร้างไฟล์นำเข้าข้อมูล SWAT จากแถบเครื่องมือ 'Write Input Tables' โดยจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การนำเข้าข้อมูลอุตุนิยมวิทยา การสร้างไฟล์นำเข้าข้อมูล และการแก้ไขไฟล์นำเข้าข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

a) การนำเข้าข้อมูลลักษณะภูมิอากาศ

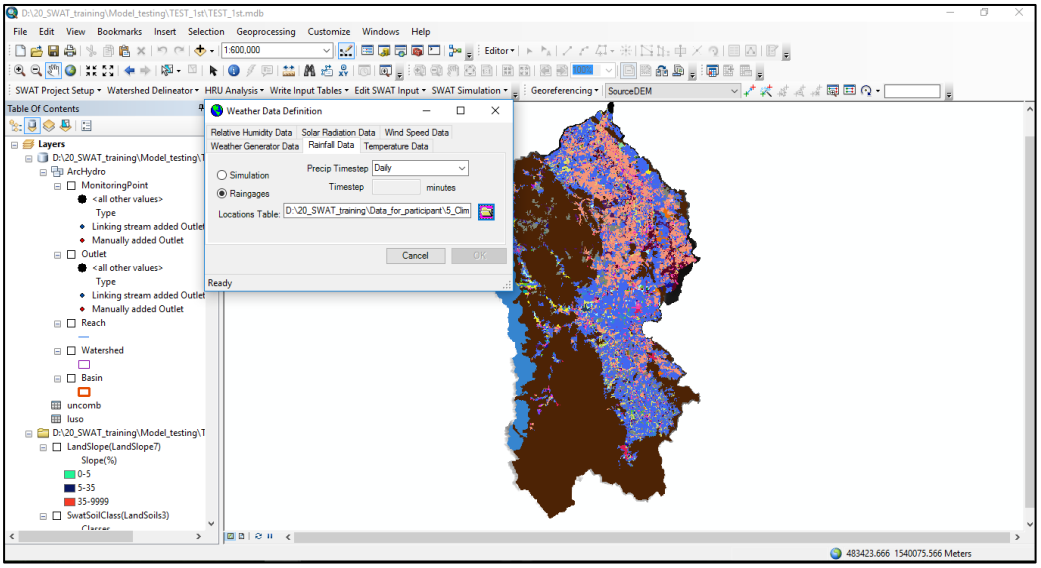
เมื่อผู้ใช้เลือกแถบเครื่องมือ 'Write Input Tables' ให้ทำการเลือกแถบเครื่องมือ 'Weather Stations' จากนั้นหน้าต่าง Weather Data Definition จะปรากฏขึ้น ซึ่งในหน้าต่างนี้จะมีแถบเครื่องมือให้เลือกทั้งสิ้น 6 ประเภท แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักได้แก่

I. **Weather Generator Data:** เป็นการกำหนดให้มีการใช้ข้อมูลทางสถิติระยะยาวในกรณีที่มีการขาดหายของข้อมูล หรือผู้ใช้เลือกใช้เครื่องมือ Simulation สำหรับปัจจัยทางด้านภูมิอากาศที่กำหนดให้มีการนำเข้า ซึ่งหากพื้นที่ศึกษาอยู่นอกเขต USA ผู้ใช้จำเป็นต้องมีการจัดเตรียมข้อมูลพื้นฐานใน Database ของ SWAT และเลือก 'WGEN_User' (จากตัวอย่างครั้งนี้ได้มีการเตรียมข้อมูลพื้นฐานทั้งสิ้น 4 สถานี) แสดงดัง**รูปที่ 3-12** (ข้อมูลสภาพอากาศพื้นฐานแสดงในหัวข้อ 2.2.2)



รูปที่ 3-12

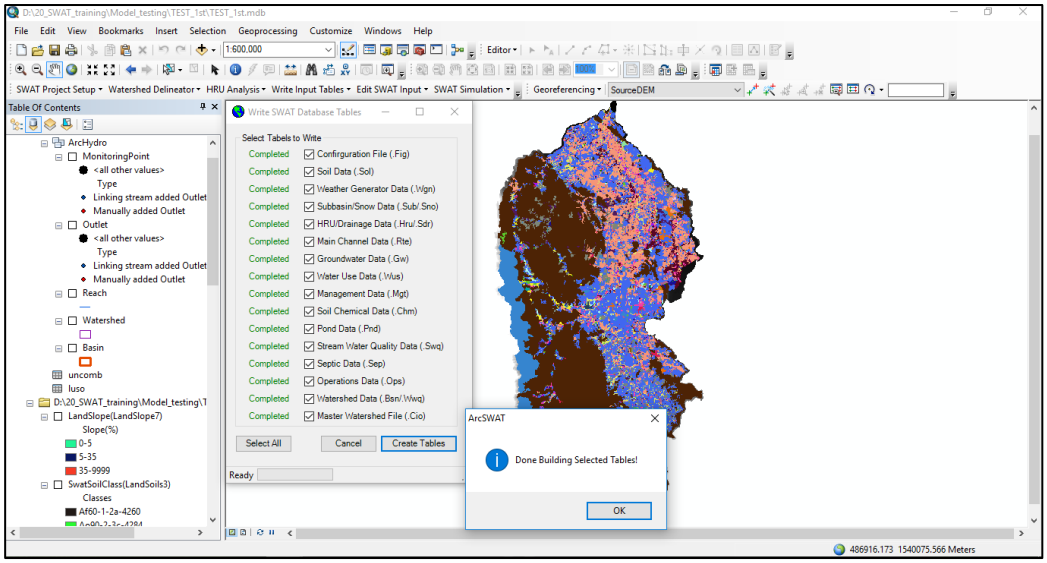
II. **การกำหนดค่าปัจจัยทางด้านภูมิอากาศอื่นๆ:** ผู้ใช้จำเป็นต้องมีการกำหนดค่าทางด้านภูมิอากาศทั้งหมด ได้แก่ ปริมาณฝน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง และความเร็วลม ตัวอย่างเช่น เลือกที่แถบเครื่องมือ ‘Raingages’ สำหรับฝน และ ‘Climate stations’ สำหรับปัจจัยอื่น และเลือกไปยังตำแหน่งที่เก็บข้อมูลทางด้านภูมิอากาศที่เตรียมไว้ข้างต้น หากบางปัจจัยไม่มีการนำเข้าข้อมูลจะต้องเลือกที่ ‘Simulation’ และ SWAT จะใช้ค่าจากข้อมูลภูมิอากาศพื้นฐานมาใช้ในการคำนวณ (**รูปที่ 3-13**)



รูปที่ 3-13

b) การสร้างไฟล์ข้อมูลนำเข้าทั้งหมด

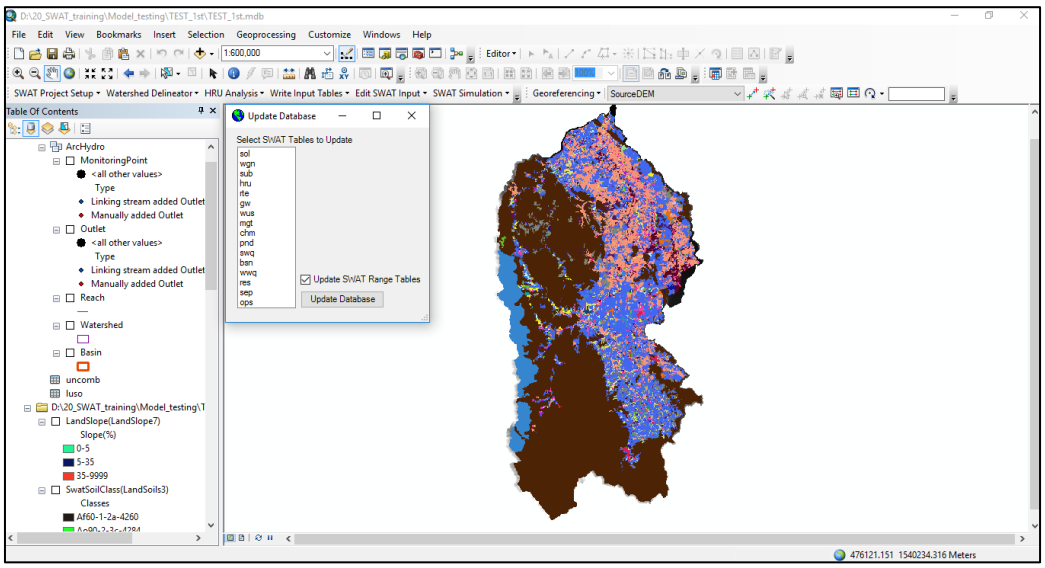
เมื่อนำเข้าข้อมูลทางด้านภูมิอากาศเสร็จสิ้น ให้เลือกแถบเครื่องมือ ‘Write Input’ จากนั้นให้เลือก ‘Select All’ และเลือก ‘Create Table’ เพื่อจะทำการจัดสร้างฐานข้อมูลทุกประเภท โดยมีจำนวนไฟล์ทั้งสิ้น 16 ไฟล์ (แสดงดัง**รูปที่ 3-14**)



รูปที่ 3-14

c) การปรับปรุงไฟล์ฐานข้อมูล

เมื่อผู้ใช้มีการปรับแก้ฐานข้อมูล ผู้ใช้สามารถเลือกที่จะปรับปรุงฐานข้อมูลให้เป็นปัจจุบันได้โดยเลือกที่ ‘Database Update’ โดยสามารถเลือกได้ในแต่ละไฟล์หากมีการปรับปรุงแค่เพียงบางส่วนหรือสามารถเลือกได้ทั้งหมด แสดงดัง**รูปที่ 3-15**



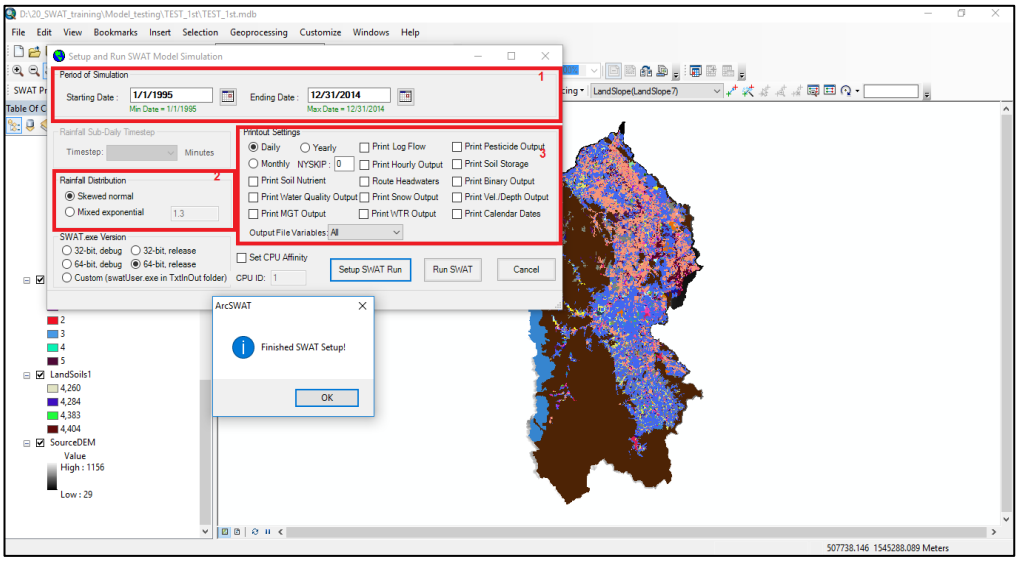
รูปที่ 3-15

4. การสั่งคำนวณแบบจำลอง SWAT

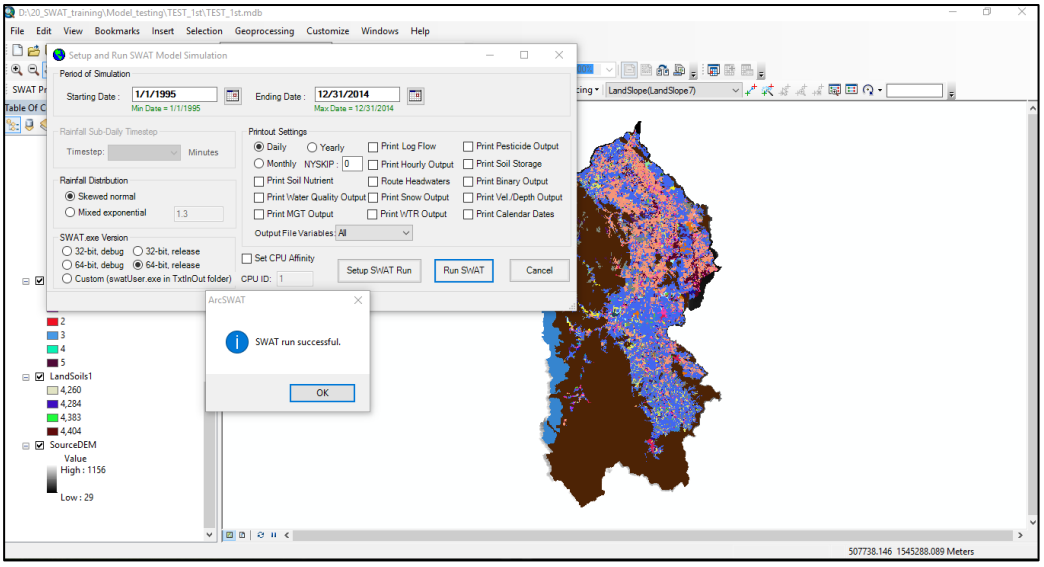
เมื่อทำการจัดเตรียมและปรับแก้ข้อมูลที่ต้องนำเข้าแบบจำลองเสร็จสิ้น ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการสั่งคำนวณแบบจำลอง โดยเลือกที่แถบเครื่องมือ ‘SWAT Simulation’ และเลือกที่ ‘Run SWAT’ หน้าต่าง Set up and Run SWAT Simulation จะปรากฏ (ดัง**รูปที่ 4-1**) จากนั้นให้ทำการเลือกช่วงปีที่ต้องการคำนวณ (ส่วนที่ 1) วิธีการที่ผู้ใช้ต้องการกำหนดสำหรับการคำนวณค่าการกระจายตัวของฝน (ส่วนที่ 2) และลักษณะผลลัพธ์ที่ผู้ใช้ต้องการว่าเป็น รายวัน รายเดือน หรือรายปี รวมถึงการกำหนดช่วงปีที่ผู้ใช้ต้องการสำหรับการ Warm up แบบจำลอง (ส่วนที่ 3) จากนั้นจึงทำการเลือก ‘Set up SWAT Run’

เมื่อหน้าต่าง Finished SWAT Setup ปรากฏ (ดัง**รูปที่ 4-1**) หมายถึงโปรแกรมพร้อมที่จะใช้งานต่อไป จากนั้นจึงทำการเลือกที่ ‘Run SWAT’ เพื่อสั่งคำนวณแบบจำลอง โดยเมื่อ SWAT คำนวณเสร็จสิ้นหน้าต่าง SWAT Run Successful จะปรากฏขึ้น (ดัง**รูปที่ 4-2**)

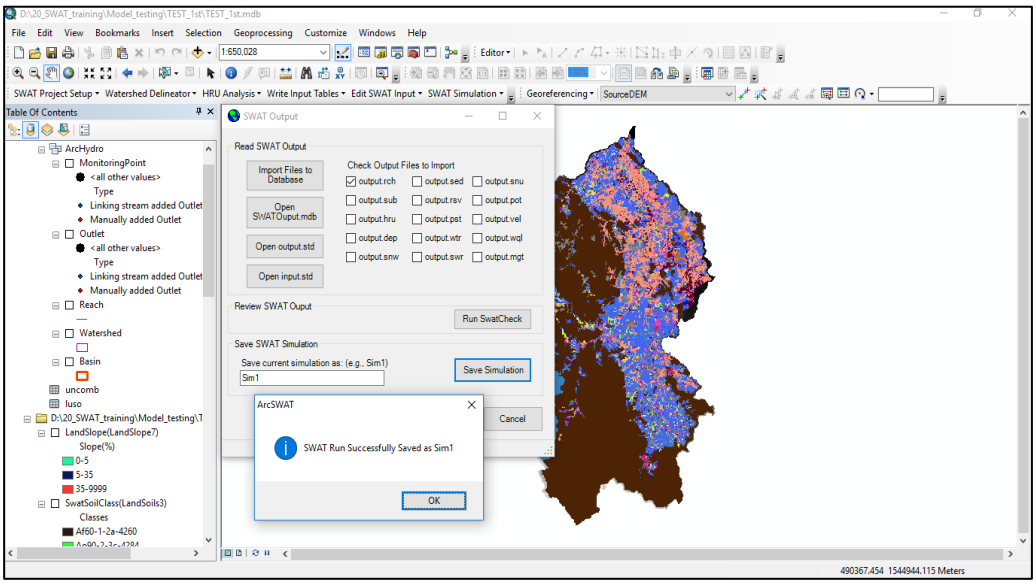
เมื่อ SWAT ทำการคำนวณเสร็จสิ้น ผู้ใช้สามารถบันทึกผลการตั้งค่าทั้งหมดรวมถึงคำนวณได้ โดยเลือกไปยังแถบเครื่องมือ ‘SWAT Simulation’ และเลือก ‘Read SWAT Output’ จากนั้นจึงทำการบันทึกข้อมูลทั้งหมดโดยกำหนดชื่อในแถบเครื่องมือ ‘Save SWAT Simulation’ จากนั้นจึงทำการเลือก ‘Save Simulation’ ดัง**รูปที่ 4-3**



รูปที่ 4-1



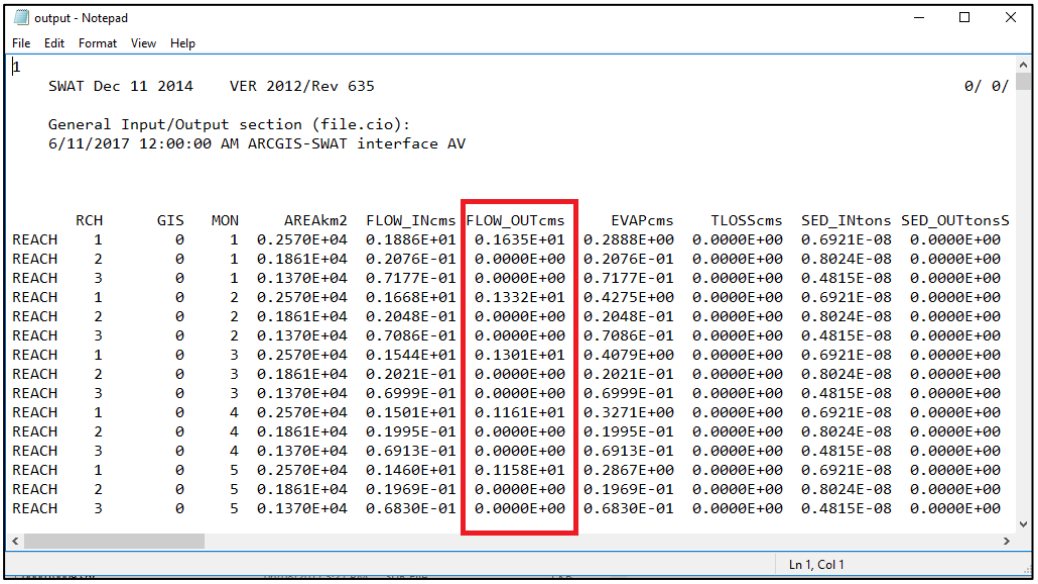
รูปที่ 4-2



รูปที่ 4-3

5. การอ่านผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง

ตัวอย่างการใช้งานครั้งนี้สนใจในเรื่องของปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้น โดยผลปริมาณน้ำท่าของทุกลุ่มน้ำอยู่ในโฟลเดอร์ของโปรเจคที่ผู้ใช้ตั้ง ตัวอย่างการใช้งานครั้งนี้ผลของ SWAT ได้ถูกบันทึกในชื่อ Sim1 ดังนั้นผลลัพธ์จะอยู่ใน Scenarios/Sim1/TxtInOut และอยู่ในไฟล์ที่ชื่อ Output.RCH ตัวอย่างแสดงดัง**รูปที่ 5-1** คอลัมน์ที่ 7 อย่างไรก็ตามผลที่ได้ในการคำนวณครั้งแรก จะเป็นการใช้พารามิเตอร์ซึ่งเป็นค่าตั้งต้นของแบบจำลองในการคำนวณ จึงต้องมีการปรับเทียบเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับลุ่มน้ำนั้นๆ ต่อไป



output - Notepad

File Edit Format View Help

1

SWAT Dec 11 2014 VER 2012/Rev 635 0/ 0/

General Input/Output section (file.cio):
6/11/2017 12:00:00 AM ARCGIS-SWAT interface AV

	RCH	GIS	MON	AREAkm2	FLOW_INcms	FLOW_OUTcms	EVAPcms	TLOSScms	SED_INtons	SED_OUTtonsS
REACH	1	0	1	0.2570E+04	0.1886E+01	0.1635E+01	0.2888E+00	0.0000E+00	0.6921E-08	0.0000E+00
REACH	2	0	1	0.1861E+04	0.2076E-01	0.0000E+00	0.2076E-01	0.0000E+00	0.8024E-08	0.0000E+00
REACH	3	0	1	0.1370E+04	0.7177E-01	0.0000E+00	0.7177E-01	0.0000E+00	0.4815E-08	0.0000E+00
REACH	1	0	2	0.2570E+04	0.1668E+01	0.1332E+01	0.4275E+00	0.0000E+00	0.6921E-08	0.0000E+00
REACH	2	0	2	0.1861E+04	0.2048E-01	0.0000E+00	0.2048E-01	0.0000E+00	0.8024E-08	0.0000E+00
REACH	3	0	2	0.1370E+04	0.7086E-01	0.0000E+00	0.7086E-01	0.0000E+00	0.4815E-08	0.0000E+00
REACH	1	0	3	0.2570E+04	0.1544E+01	0.1301E+01	0.4079E+00	0.0000E+00	0.6921E-08	0.0000E+00
REACH	2	0	3	0.1861E+04	0.2021E-01	0.0000E+00	0.2021E-01	0.0000E+00	0.8024E-08	0.0000E+00
REACH	3	0	3	0.1370E+04	0.6999E-01	0.0000E+00	0.6999E-01	0.0000E+00	0.4815E-08	0.0000E+00
REACH	1	0	4	0.2570E+04	0.1501E+01	0.1161E+01	0.3271E+00	0.0000E+00	0.6921E-08	0.0000E+00
REACH	2	0	4	0.1861E+04	0.1995E-01	0.0000E+00	0.1995E-01	0.0000E+00	0.8024E-08	0.0000E+00
REACH	3	0	4	0.1370E+04	0.6913E-01	0.0000E+00	0.6913E-01	0.0000E+00	0.4815E-08	0.0000E+00
REACH	1	0	5	0.2570E+04	0.1460E+01	0.1158E+01	0.2867E+00	0.0000E+00	0.6921E-08	0.0000E+00
REACH	2	0	5	0.1861E+04	0.1969E-01	0.0000E+00	0.1969E-01	0.0000E+00	0.8024E-08	0.0000E+00
REACH	3	0	5	0.1370E+04	0.6830E-01	0.0000E+00	0.6830E-01	0.0000E+00	0.4815E-08	0.0000E+00

Ln 1, Col 1

รูปที่ 5-1

ขั้นตอนการใช้งาน SWAT - CUP

SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs) เป็นโปรแกรมสำหรับใช้ในการตรวจสอบความอ่อนไหวและปรับเทียบแบบจำลองที่ถูกสร้างจากโปรแกรม ArcSWAT โดยในตัวอย่างครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีการ SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting) มาใช้ในการปรับเทียบแบบจำลอง นอกจากนั้นในการปรับเทียบแบบจำลองเช่นการปรับเทียบปริมาณน้ำให้ผลที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการตรวจวัด ณ สถานีที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับ Outlet ของลุ่มน้ำที่ต้องการจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอยู่เป็นจำนวนมาก จากการศึกษาของ Abbaspour (2015) พบว่า พารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่ามีจำนวน 9 พารามิเตอร์ (**ตารางที่ 1**) อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินปริมาณน้ำท่าโดยการใช้แบบจำลอง SWAT ที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน พบว่าระดับความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำท่าจะขึ้นอยู่กับลักษณะของสภาพพื้นที่ เช่น จากการศึกษาของ Me et al. (2015) มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับเทียบปริมาณน้ำท่าทั้งสิ้น 21 พารามิเตอร์ ดังนั้น ผู้ใช้ควรทำการตรวจสอบความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ก่อนทำการปรับเทียบแบบจำลอง เพื่อให้สามารถปรับเทียบแบบจำลองได้ดีมากยิ่งขึ้น รายละเอียดขั้นตอนการสร้างแบบจำลองแสดงดังนี้

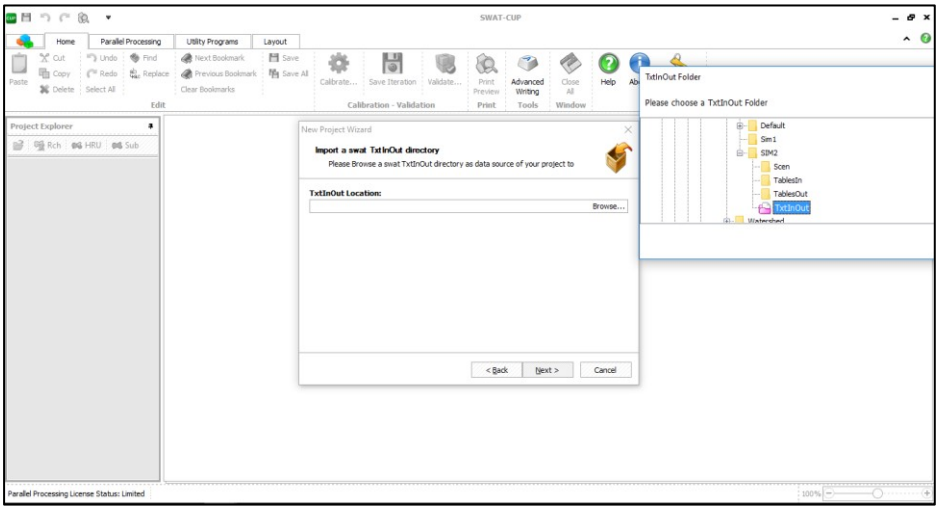
ตารางที่ 1 ตัวอย่างพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับเทียบปริมาณน้ำท่า

Variable	Sensitive parameter	Abbreviation
Parameters sensitive to all four variables	- Baseflow alpha factor	ALPHA_BF.gw
	- Groundwater delay time	GW_DELAY.gw
	- Curve number	CN2.mgt
	- Manning'n value for the main channel	CH_N2.rte
	- Effective hydro conductivity in the main channel	CH_K2.rte
	- Soil available water storage capacity	SOL_AWC.sol
	- Soil hydraulic conductivity	SOL_K.sol
	- Soil bulk density	SOL_BD.sol
	- Maximum canopy storage	CANMX.hru

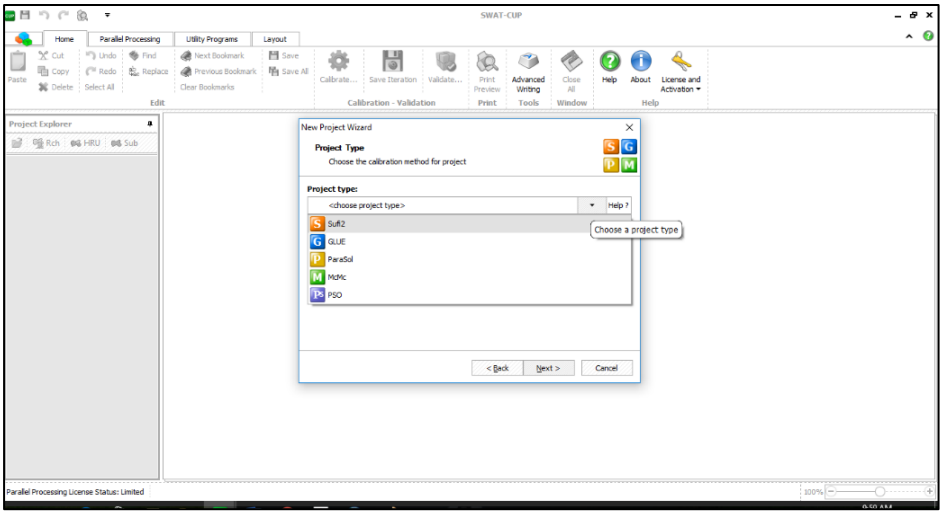
ที่มา: ดัดแปลงจาก Abbaspour, 2015

1. การเริ่มต้นสร้างโปรเจคใหม่

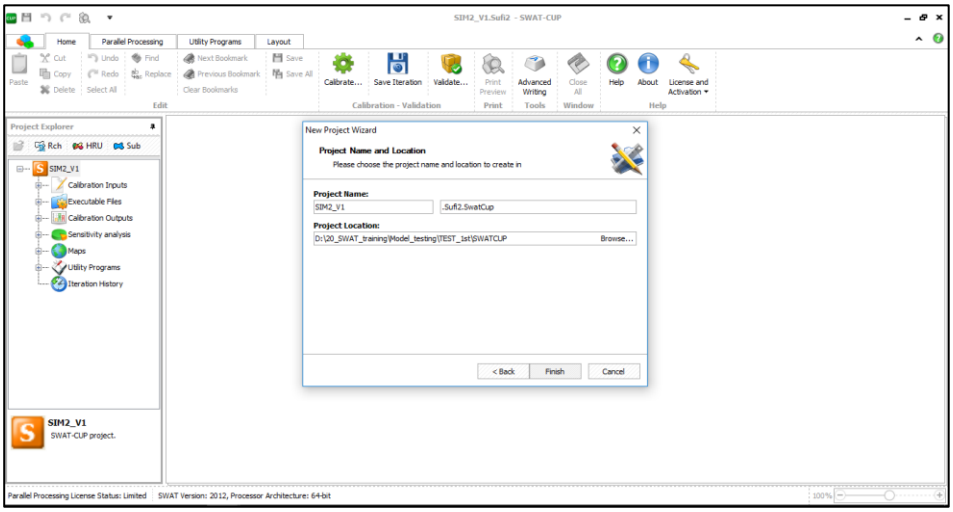
เมื่อติดตั้งโปรแกรม SWAT-CUP เสร็จสิ้น ให้ทำการเปิดหน้าต่าง SWAT-CUP จากนั้นเลือกไปที่ New เพื่อสร้างโปรเจคใหม่ จากนั้นหน้าต่าง New Project Wizard จะปรากฏ ให้เลือกไปยัง TxtInOut ของ SWAT โปรเจคที่ต้องการจะปรับเทียบ จากนั้นเลือก SWAT version และ Processor ที่ใช้งาน และเลือกประเภทของโปรเจค โดยในตัวอย่าง จากนั้นจึงตั้งชื่อโปรเจคและทำการบันทึกในตำแหน่งที่ต้องการ (ดัง**รูปที่ 1-1 ถึง 1-3**)



รูปที่ 1-1



รูปที่ 1-2

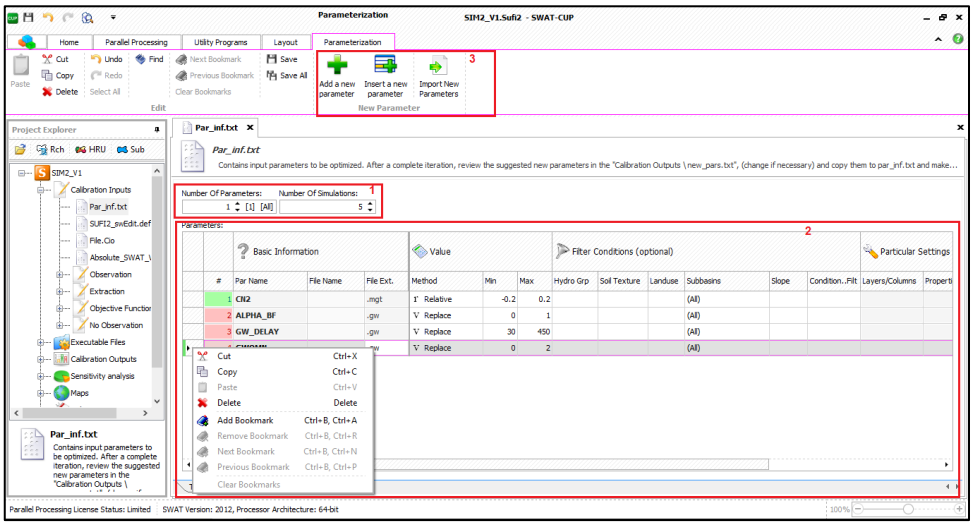


รูปที่ 1-3

2. การตั้งค่าในโปรแกรมและการปรับเทียบแบบจำลอง

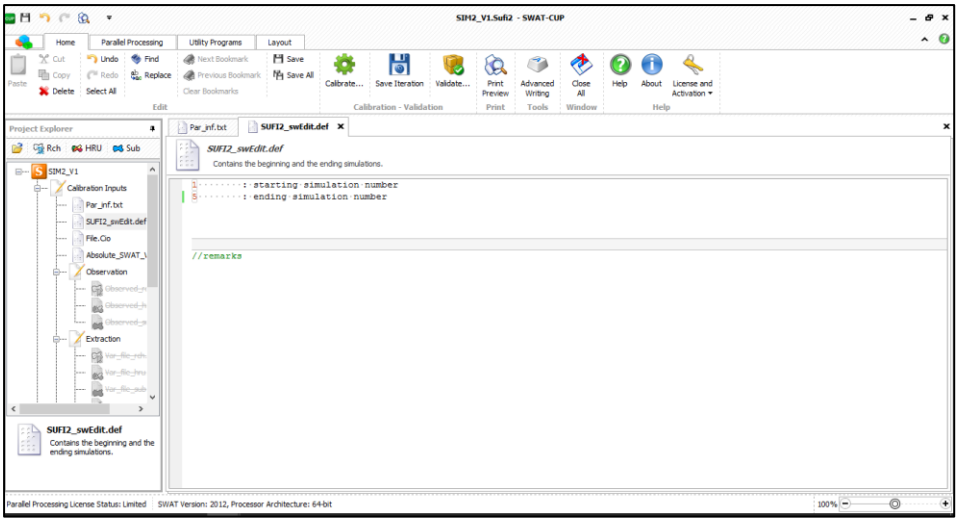
1) การนำเข้าข้อมูล

เมื่อจัดตั้งโปรเจคใหม่ใน SWAT-CUP เรียบร้อย ให้เลือกที่ Calibration input จากนั้นเลือกที่ Par_inf.txt หน้าต่างของ Par_inf.txt จะปรากฏ ผู้ใช้สามารถเลือกจำนวนพารามิเตอร์ ที่ต้องการปรับเทียบได้และจำนวนรอบที่ต้องการให้โปรแกรมทำการคำนวณ (ดัง**รูปที่ 2-4** ส่วนที่ 1) ชื่อของพารามิเตอร์ รวมถึงรายละเอียดต่างๆ เช่นวิธีการที่ต้องการใช้ ค่าต่ำสุด-สูงสุดของพารามิเตอร์ แสดงในส่วนที่ 2 และหากต้องการเพิ่มพารามิเตอร์สามารถเลือกได้จากแถบเครื่องมือในส่วน**ที่** 3



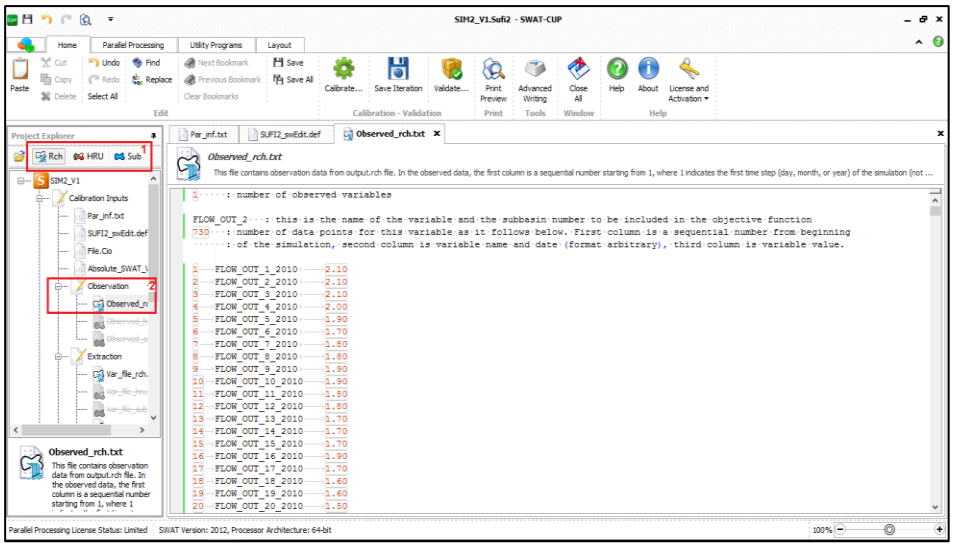
รูปที่ 2-4

จากนั้นเลือกที่ SUFI2_swEdit.def เพื่อทำการกำหนดค่าการเริ่มต้นและค่าสิ้นสุดรอบการคำนวณในโปรแกรมอีกครั้งหนึ่ง ดัง**รูปที่ 2-5**



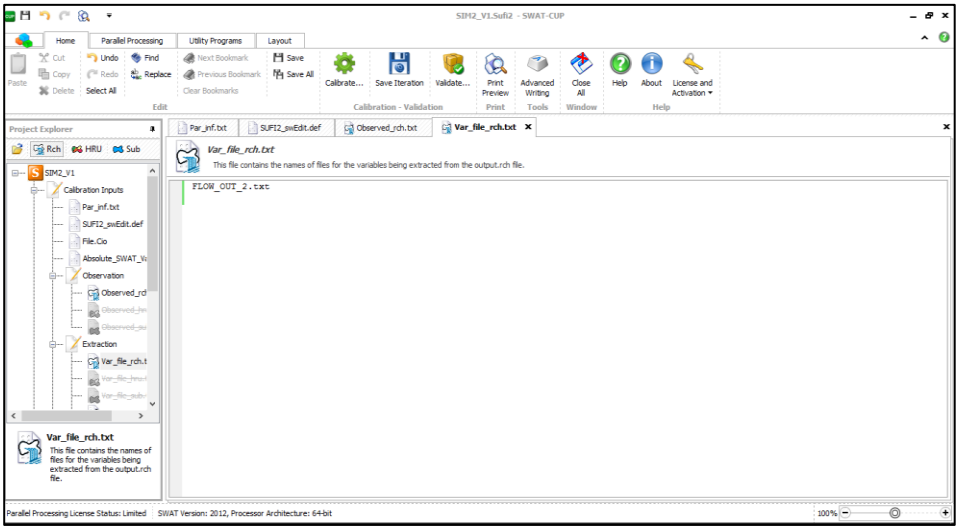
รูปที่ 2-5

จากนั้นให้เลือก Active ในส่วนของ Rch (ดัง**รูปที่ 2-6** ส่วนที่ 1) และเลือกที่ Observation/Observed_rch.txt (ดัง**รูปที่ 2-6 ส่วน**ที่ 2) หน้าต่างของ Observed_rch.txt จะปรากฏขึ้นเพื่อให้ใส่ข้อมูลการตรวจวัด โดยช่วงความถี่ของข้อมูลจำเป็นต้องเป็นช่วงเดียวกับผลการคำนวณที่ได้จาก SWAT



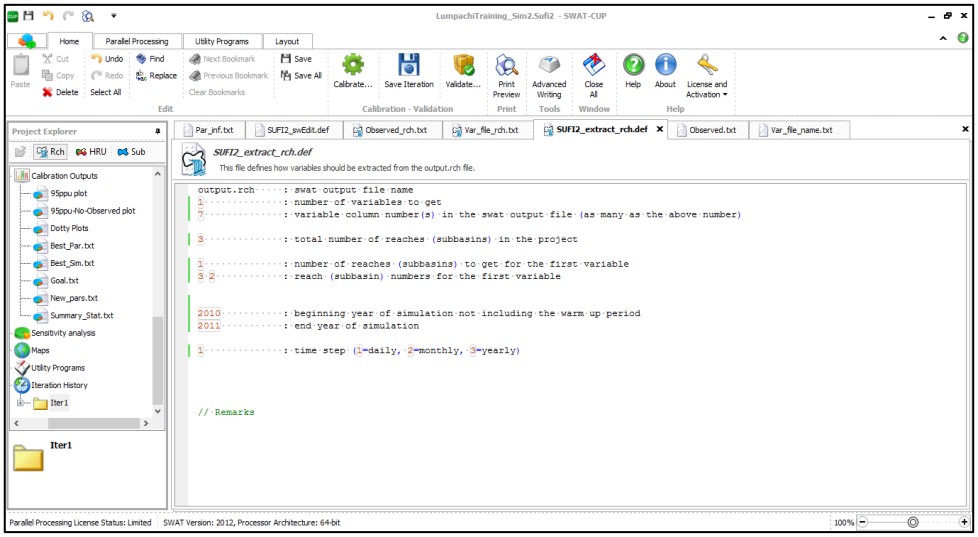
รูปที่ 2-6

ส่วนต่อไปให้ผู้ใช้ทำการเลือก Extraction/Var_file_rch.txt หน้าต่างของ Var_file_rch.txt จะปรากฏให้ทำการใส่ปัจจัยและลุ่มน้ำที่ต้องการประเมิน โดยจากตัวอย่างต้องการประเมินปริมาณน้ำท่าจากลุ่มน้ำที่ 2 จึงกำหนดค่าเป็น 'FLOW_OUT_2.txt' ดัง**รูปที่ 2-7**



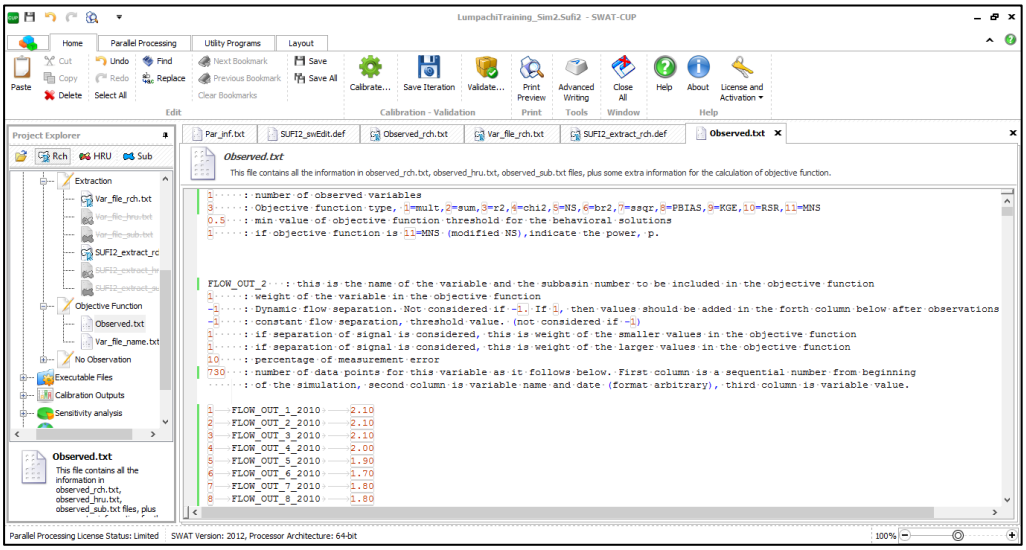
รูปที่ 2-7

จากนั้นจึงให้เลือกไฟล์ที่จะทำการดึงข้อมูลจากการคำนวณ SWAT ออกมา โดยเลือกที่ Extraction/SUFI2_extract_rch.def หน้าต่างของ SUFI2_extract_rch.def จะปรากฏขึ้น โดยให้ผู้ใช้กำหนดรายละเอียด เช่น จำนวนปัจจัยที่ต้องการประเมิน จำนวนลุ่มน้ำย่อยทั้งหมดภายในลุ่มน้ำหลัก และลุ่มน้ำย่อยที่ต้องการประเมิน รวมถึงช่วงปี และลักษณะความถี่ของข้อมูล เป็นต้น ดัง**รูปที่ 2-8**



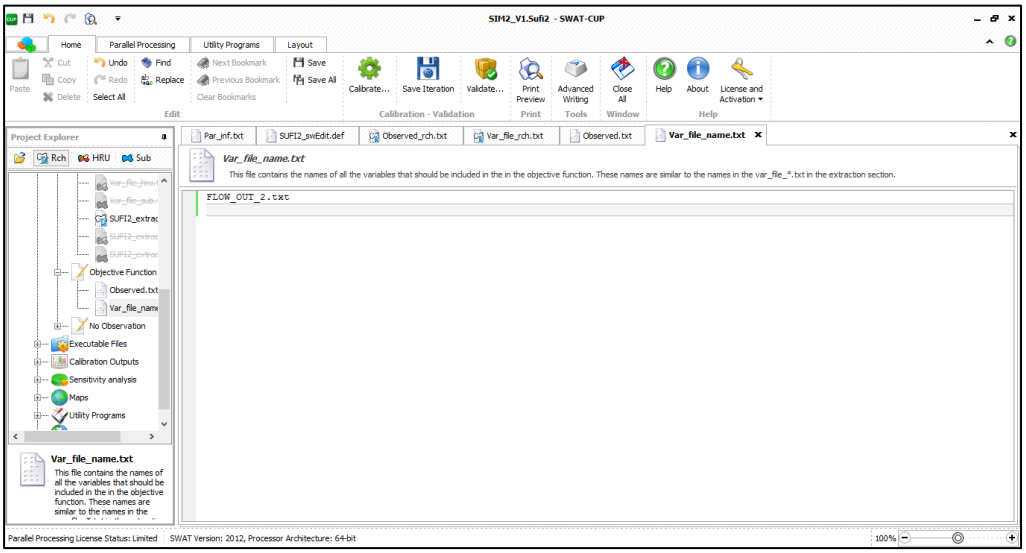
รูปที่ 2-8

ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดค่า Objective function ที่จะใช้ในการประเมิน โดยให้ผู้ใช้เลือกไปที่ Objective function/Observed.txt หลักจากนั้นให้ระบุรายละเอียดที่เกี่ยวข้อง เช่น จำนวนปัจจัยที่ใช้ในการประเมิน ประเภทของ Objective function ที่เลือกใช้ ซึ่งจากตัวอย่าง**รูปที่ 2-9** เลือกเลข 3 ซึ่งคือค่า R^2 จากนั้นให้กำหนดค่าต่ำสุดของ Objective function นั้น และให้ระบุค่าผลการตรวจวัดน้ำท่าอีกครั้งหนึ่ง รวมถึงประเภทปัจจัยและลุ่มน้ำที่สนใจ (จากตัวอย่างเป็น FLOW_OUT_2)



รูปที่ 2-9

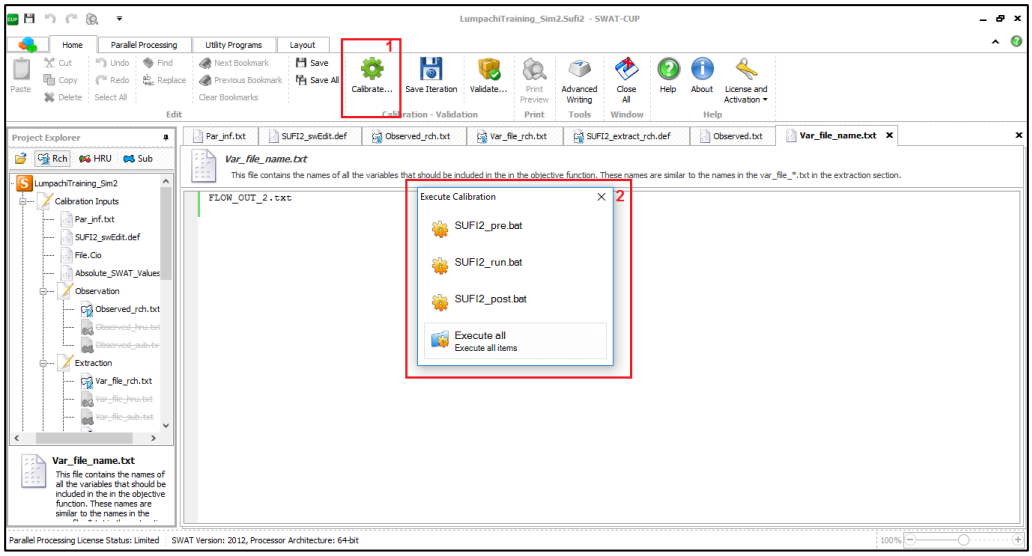
ในขั้นตอนสุดท้ายให้ผู้ใช้เลือกที่ Objective function/Var_file_name.txt หน้าต่างของ Var_file_name.txt จะปรากฏขึ้น จากนั้นให้ระบุค่าปัจจัยและลุ่มน้ำที่ต้องการประเมินอีกครั้งหนึ่ง ดัง**รูปที่ 2-10**



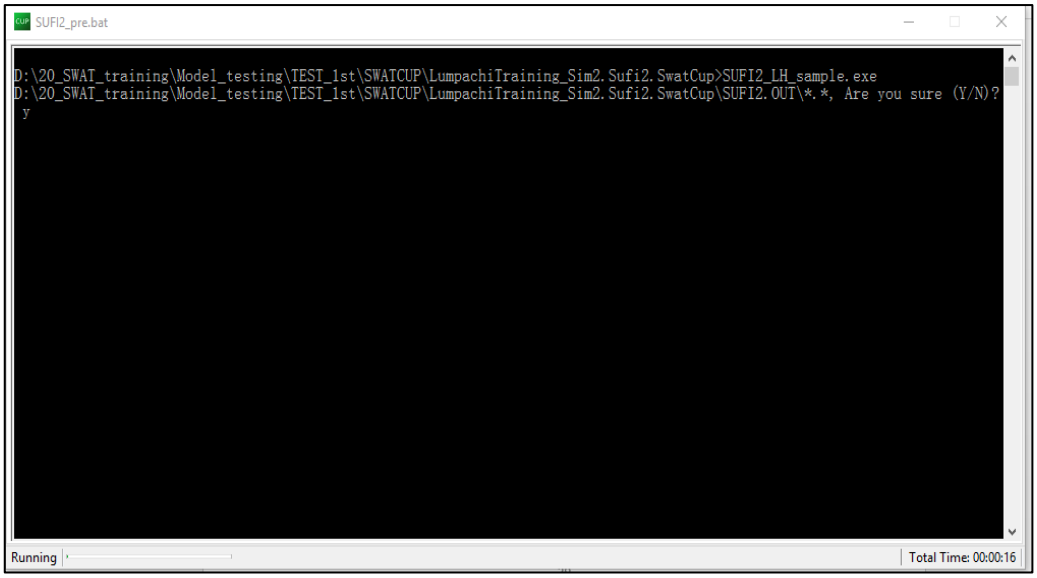
รูปที่ 2-10

2) การปรับเทียบแบบจำลอง

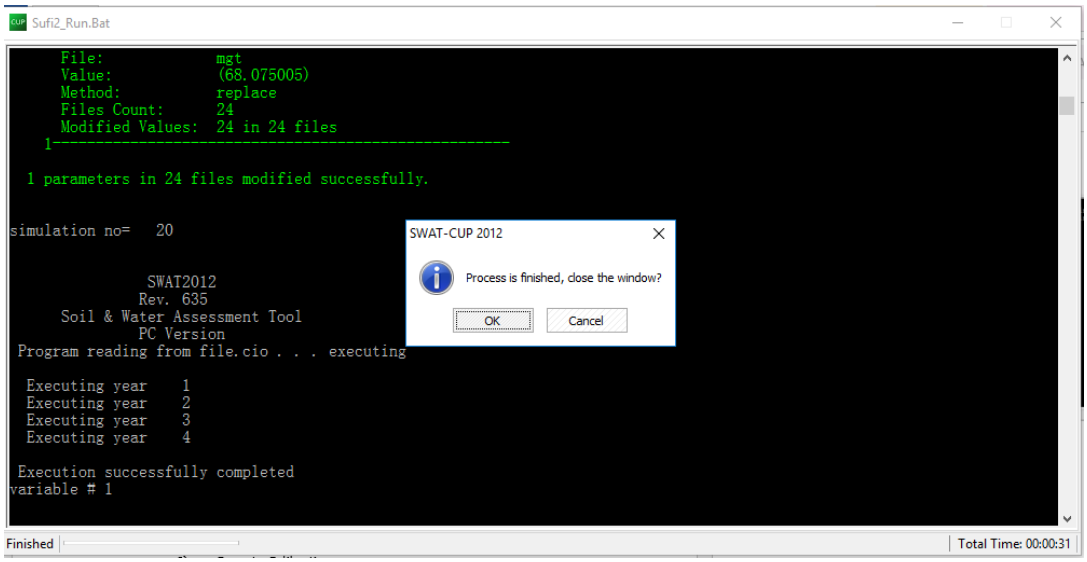
เมื่อผู้ใช้จัดเตรียมข้อมูลที่นำเข้าสู่โปรแกรม SWAT-CUP เสร็จสิ้น ให้เลือกแถบเครื่องมือ Calibrate (ดัง**รูปที่ 2-11** ส่วนที่ 1) จากนั้นหน้าต่างของ Execute calibration จะปรากฏขึ้น โดยให้เลือกที่ SUFI2_pre.bat จากนั้นหน้าต่างของ dos จะปรากฏขึ้นดัง**รูปที่ 2-12** ให้ผู้ใช้ตอบ 'Y' และ Enter จากนั้นให้เลือกที่ SUFI2_run.bat หน้าต่าง dos จะปรากฏอีกครั้งและโปรแกรมจะทำการคำนวณเมื่อเสร็จสิ้นจะแสดงดัง**รูปที่ 2-13** และสุดท้ายเลือกที่ SUFI2_post.bat โปรแกรมจะทำการประเมินหลังการคำนวณ และจะแสดงผลดัง**รูปที่ 2-14**



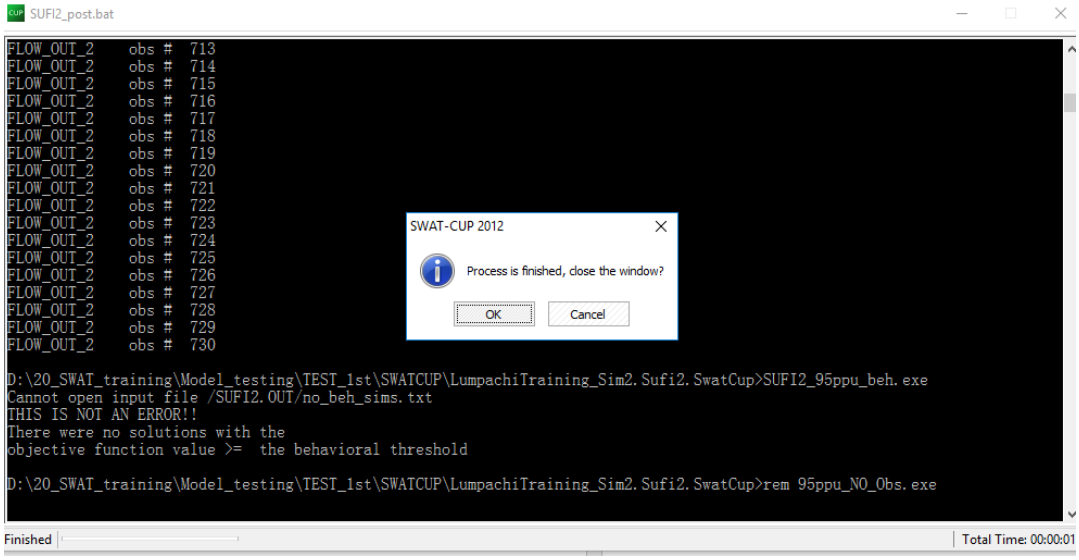
รูปที่ 2-11



รูปที่ 2-12



รูปที่ 2-13

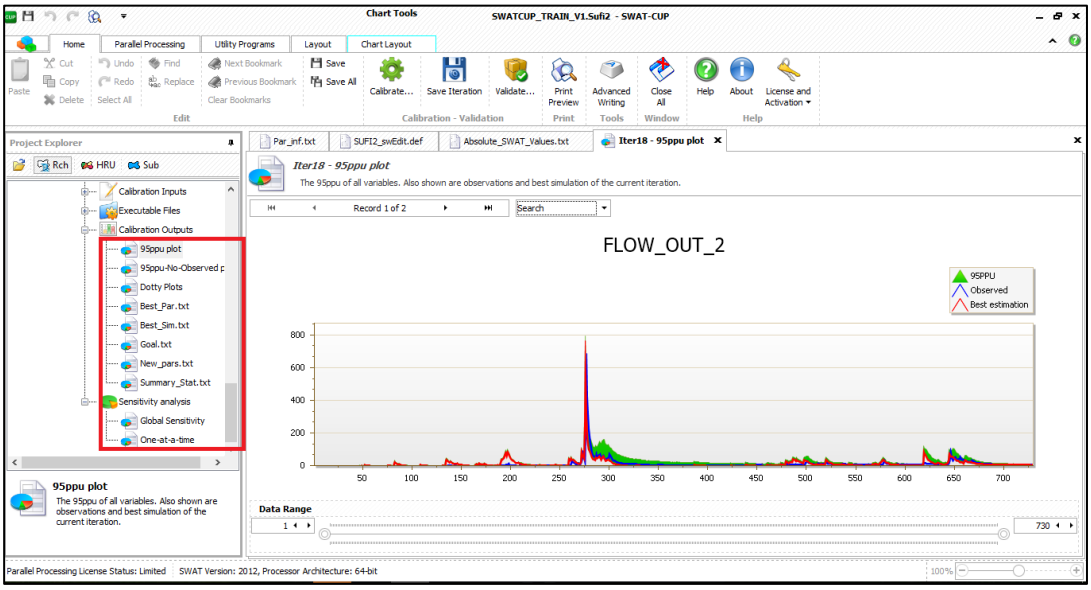


รูปที่ 2-14

3. การแสดงผลการปรับเทียบแบบจำลอง

ผลการปรับเทียบแบบจำลองจะแสดงอยู่ในส่วนของ Iteration History/ Iter1/ Calibration Output ดัง**รูปที่ 3-1** โดยแถบเครื่องมือ 95ppu plot แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ดีที่สุดที่ได้จากแบบจำลอง กับค่าการตรวจวัด โดยที่ 95 PPU แสดงถึง ช่วงความไม่แน่นอนของผลที่ได้จากแบบจำลอง (Prediction Uncertainty) โดยจะคำนวณจากผลการแจกแจงสะสมของปัจจัยที่สนใจ (Cumulative distribution) ที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดที่ 2.5% และ 7.5% แถบเครื่องมือ Dotty Plots แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อ Objective function ที่ถูกกำหนดไว้ Best_Par.txt และ Best_Sim.txt แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดและผลที่ได้จากการคำนวณโดยค่าพารามิเตอร์นั้นตามลำดับ Goal.txt แสดงถึงผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในแต่ละครั้ง New_pars.txt แสดงถึงช่วงค่าพารามิเตอร์ช่วงใหม่ที่ควรนำเข้าสู่แบบจำลอง และสุดท้าย

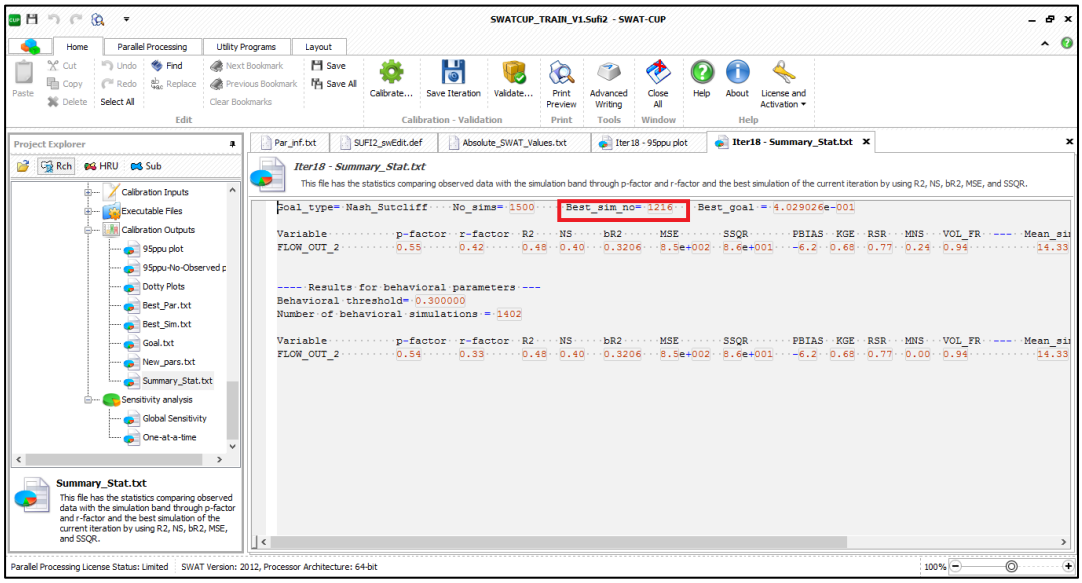
Summary_Stat.txt แสดงถึงผลทางสถิติที่ดีที่สุด (Objective function) ที่ได้จากการคำนวณในรอบที่ผ่านมา



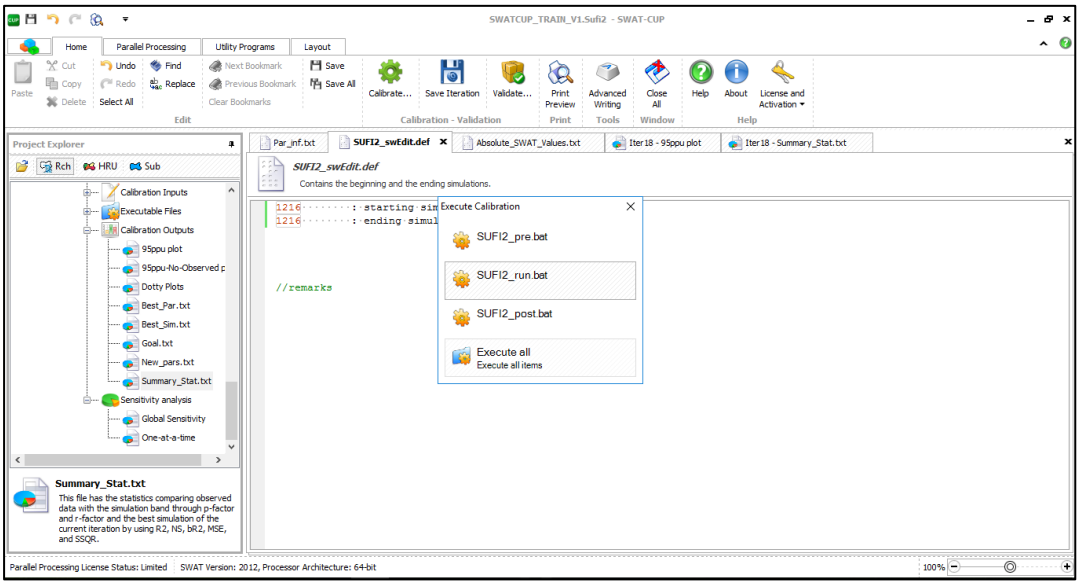
รูปที่ 3-1

4. การนำค่าพารามิเตอร์กลับเข้าสู่แบบจำลอง

เมื่อทำการปรับเทียบแบบจำลองจนได้ค่า Objective function อยู่ในระดับที่ต้องการ จากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวกลับเข้าสู่แบบจำลอง เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่ดีที่สุดที่ได้จากแบบจำลอง โดยในขั้นตอนนี้ให้เปิดไปยังหน้าของ Summary_Stat.txt จากนั้นให้ตรวจสอบครั้งที่แสดงผลที่ดีที่สุด ตัวอย่างดัง**รูปที่ 4-1** ครั้งที่แสดงผลที่ดีที่สุดได้แก่ครั้งที่ 1216 จากนั้นให้เปิดไปยังหน้าของ SUFI2_swEdit.def และใส่ข้อมูลครั้งที่ดีที่สุดดัง**รูปที่ 4-2** จากนั้นให้เลือกที่เครื่องมือ Calibrate อีกครั้งหนึ่ง หน้าต่างของ Execute calibration จะปรากฏ และเลือกที่ SUFI2_run.bat (โดยไม่ต้องเลือกที่ SUFI2-Pre.bat) ผลของพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจะแสดงใน Text file จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวกลับเข้าสู่โปรแกรม ArcSWAT ต่อไป


SWATCUP_TRAIN_V1.Sufi2 - SWAT-CUP
Home
Parallel Processing
Utility Programs
Layout
Calibrate...
Save Iteration
Validate...
Print Preview
Advanced Writing
Close All
Help
About
License and Activation
Calibration - Validation
Project Explorer
Par_inf.txt
SUFI2_swEdit.def
Absolute_SWAT_Values.txt
Iter 18 - 95ppu plot
Iter18 - Summary_Stat.txt
Iter18 - Summary_Stat.txt
This file has the statistics comparing observed data with the simulation band through p-factor and r-factor and the best simulation of the current iteration by using R2, NS, bR2, MSE, and SSQR.
Goal_type= Nash_Sutcliff No_sims= 1500 Best_sim_no= 1216 Best_goal = 4.029026e-001
Variable p-factor r-factor R2 NS bR2 MSE SSQR PBIAS KGE RSR MNS VOL_FR --- Mean_si
FLOW_OUT_2 0.55 0.42 0.48 0.40 0.3206 8.5e+002 8.6e+001 -6.2 0.68 0.77 0.24 0.94 14.33
---- Results for behavioral parameters ---
Behavioral threshold= 0.300000
Number of behavioral simulations = 1402
Variable p-factor r-factor R2 NS bR2 MSE SSQR PBIAS KGE RSR MNS VOL_FR --- Mean_si
FLOW_OUT_2 0.54 0.33 0.48 0.40 0.3206 8.5e+002 8.6e+001 -6.2 0.68 0.77 0.00 0.94 14.33
Summary_Stat.txt
This file has the statistics comparing observed data with the simulation band through p-factor and r-factor and the best simulation of the current iteration by using R2, NS, bR2, MSE, and SSQR.
Parallel Processing License Status: Limited
SWAT Version: 2012, Processor Architecture: 64-bit
100%

รูปที่ 4-1


SWATCUP_TRAIN_V1.Sufi2 - SWAT-CUP
Home
Parallel Processing
Utility Programs
Layout
Calibrate...
Save Iteration
Validate...
Print Preview
Advanced Writing
Close All
Help
About
License and Activation
Calibration - Validation
Project Explorer
Par_inf.txt
SUFI2_swEdit.def
Absolute_SWAT_Values.txt
Iter 18 - 95ppu plot
Iter 18 - Summary_Stat.txt
SUFI2_swEdit.def
Contains the beginning and the ending simulations.
1216 : starting sim
1216 : ending simul
//remarks
Execute Calibration
SUFI2_pre.bat
SUFI2_run.bat
SUFI2_post.bat
Execute all
Execute all items
Summary_Stat.txt
This file has the statistics comparing observed data with the simulation band through p-factor and r-factor and the best simulation of the current iteration by using R2, NS, bR2, MSE, and SSQR.
Parallel Processing License Status: Limited
SWAT Version: 2012, Processor Architecture: 64-bit
100%

รูปที่ 4-2

เอกสารอ้างอิง

บัณฑิตา ขันติสิทธิ์ และ อรอนงค์ วรรณราช. 2557. เอกสารประกอบการอบรมการใช้โปรแกรม ArcSWAT 2012.

Abbaspour, K.C. 2015. SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Program. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.

Me, W., Abell, J.M. and Hamilton, D.P. (2015). Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. Hydrology and Earth System Sciences, 19, 4127-4147.

Neitsch, S.L., Arnold, J.R., Kiniry J.R., Williams, J.R. 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406. Texas A&M University System College Station, Texas.

USEPA. (2017). BASINS 3 documentation. Available at http://www.aquaterra.com/basins3/ Access on June, 2017.

ดรรชนี

C

Climate model data for hydrological modeling (CMhyd) 4-22

Coefficient of determination 4-17

Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) 3-43

D

Delta method 4-13

G

Green & Ampt Infiltration Method 6-10

I

Indian Ocean Dipoles Indices (IOD) 2-12

L

Linear scaling 4-13

M

Multiple linear regression 4-10

N

Nash-Sutcliffe Efficiency 4-18

P

Pearson's correlation 4-17

Percent bias (PBIAS) 4-19

Principle component analysis 4-11

Q

Quantile mapping 4-14

R

Root means square error (RMSE) 4-19

S

SCS Curve Number Method (SCS) 6-3

Simple linear regression 4-9

Soil and Water Assessment Tool 5-15, 5-25, 6-1

Statistical downscaling model (SDSM) 4-20, 4-27

ดรรชนี (ต่อ)

ก

กลไกตลาดคาร์บอน 8-3

ก๊าซเรือนกระจก 1-4

การคายระเหยแท้จริง 6-16

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) 1-1

การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Weather) 1-2

การเผชิญต่อภัย (Exposure) 7-5, 7-19, 7-24

การทวนสอบแบบจำลอง 5-18

การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 8-21

การปรับเทียบแบบจำลอง 5-17

การลดก๊าซเรือนกระจก 8-8, 8-12

การลดค่าอคติ 4-8

การลดมาตราส่วนทางสถิติ 4-7

การลดมาตรส่วนผลลัพธ์แบบจำลองภูมิอากาศโลก 4-1, 5-9

การลดมาตราส่วนแบบพลวัตร 4-3

การลดมาตราส่วนวิธีการพลวัตร-สถิติ 4-14

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว 5-17

ค

ความเปราะบาง 7-1, 7-19, 7-24

ความไม่แน่นอนของแบบจำลองภูมิอากาศโลก 3-45

ความไม่แน่นอนของแบบจำลองอุทกวิทยา 5-22

ความผันแปรของระบบอากาศซีกโลกใต้ 2-4

ความผันแปรของระบบมหาสมุทรอินเดีย 2-12

ความสามารถในการปรับตัว (Adaptive Capacity) 7-5

ความเสี่ยง 7-1, 7-3

ความอ่อนไหว (Sensitivity) 7-5

ด

ดัชนี PDO 2-11

น

แนวทางการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 8-2, 8-22

ดรรชนี (ต่อ)

บ

แบบจำลองภูมิอากาศโลก 3-36, 5-3

แบบจำลองอุทกวิทยา 5-11

แบบจำลองการคำนวณสภาพภูมิอากาศระดับภูมิภาค 4-3

ป

ปรากฏการณ์เรือนกระจก 1-2

ปรากฏการณ์เอลนีโญ 2-4

ปรากฏการณ์ลานีญา 2-5

ปริมาณน้ำท่าสูงสุด 6-12

ผ

แผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 1-24

ผลกระทบ (Impact) 7-6

ภ

ภัยอันตราย (Hazard) 7-6, 7-18, 7-23

ภาวะโลกร้อน 1-2

ภาษีคาร์บอน 8-5

ม

มาตราการลดผลกระทบ 8-1, 8-8

ร

ระบบการหมุนเวียนของบรรยากาศ 2-1

ระบบการหมุนเวียนของมหาสมุทร 2-3

ระบบมรสุมและพายุ 2-14

ศ

ศักย์การคายระเหย 6-14

ส

สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3-2, 5-2

สถานการณ์ปล่อยก๊าซเรือนกระจก SSPs 3-3

ห

ห่วงโซ่ของสาเหตุและผลกระทบ 7-14

เหตุการณ์สุดขั้ว 1-22