รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

รหัสโครงการ PSP6405030950

เรื่อง

การเพิ่มผลสัมฤทธิ์และการลดความเสี่ยงในการบริหารจัดการน้ำลุ่มน้ำเพชรบุรี ด้วยฝนหลวง (ปี 2)

Performance improvement and Risk Reduction in Water Management of Phetchaburi River Basin using Royal Rainmaking (Year 2)

โดย

ผศ.ดร.วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ และคณะวิจัย
คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

ภายใต้แผนงานวิจัย การเพิ่มผลสัมฤทธิ์และการลดความเสี่ยงในการบริหารจัดการลุ่มน้ำเพชรบุรี (ปี 2)
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)
ปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 จนสามารถทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงเป็นผลสำเร็จในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะผู้ตรวจสอบทางวิชาการที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และขอขอบคุณหน่วยงานราชการ ได้แก่ กรมฝนหลวงและการบินเกษตร สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) กรมชลประทาน กรมทรัพยากรน้ำ กรมพัฒนาที่ดิน กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย กรมอุตุนิยมวิทยา และองค์การปกครองส่วนท้องถิ่น ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลประกอบการศึกษาวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยการจำลองระบบทรัพยากรน้ำด้วยคอมพิวเตอร์และระบบสารสนเทศ (WRCMIS Lab) ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่และซอฟแวร์แบบจำลองต่างๆ และคณาจารย์แห่งภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน และภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้ช่วยสนับสนุนและแนะนำตลอดจนให้กำลังใจจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานวิจัยฉบับนี้จะสามารถเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ และผู้ที่เกี่ยวข้องในการนำไปใช้เป็นประโยชน์ต่อไป

คณะผู้วิจัย

กันยายน 2565

บทคัดย่อ

แผนงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มผลสัมฤทธิ์และการลดความเสี่ยงในการบริหารจัดการลุ่มน้ำเพชรบุรี (ปี 2) ซึ่งประกอบด้วยโครงการวิจัยย่อยทั้งสิ้นสี่โครงการ สำหรับโครงการวิจัยย่อยที่ 1 เป็นการประเมินผลสัมฤทธิ์ของการทำฝนหลวงโดยการตรวจสอบจากปริมาณฝนที่ตรวจวัดได้จากสถานีวัดน้ำฝนภาคพื้นดินของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ซึ่งเป็นค่าปริมาณฝนรายชั่วโมง นำมาค่าหาสะสมรายครึ่งวันโดยใช้ระยะเวลาที่ครอบคลุมการขึ้นบินทำปฏิบัติการและช่วงเวลาที่จะเกิดฝนตกหลังจากปฏิบัติการในช่วง 09.00 – 21.00 น. เนื่องจากระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้จัดเก็บข้อมูลมีข้อจำกัด ไม่สามารถดึงข้อมูลฝนกริดเรดาร์เป็นรายชั่วโมงได้ สามารถดึงข้อมูลได้เพียงแค่ช่วงเวลาดังกล่าว และอยู่ระหว่างการปรับเปลี่ยนระบบคอมพิวเตอร์ในอนาคตน่าจะสามารถดึงข้อมูลย้อนหลังเป็นรายชั่วโมงได้ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณฝนเฉลี่ยรายครึ่งวันซึ่งได้จากเรดาร์ที่อยู่ในรูปของกริด มีการกระจายตัวตามพื้นที่หวังผลสัมฤทธิ์ของแต่ละปฏิบัติการ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ถือว่าข้อมูลฝนจากเรดาร์มีความถูกต้อง แม่นยำ ใช้เป็นข้อมูลปริมาณฝนอ้างอิงในการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์การทำฝนหลวงได้

จากผลการศึกษาในปีที่ 1 ข้อมูลปฏิบัติการฝนหลวงจำนวน 148 ข้อมูล ในช่วงปี พ.ศ.2561 - ปี พ.ศ. 2563 ที่ได้รับจากกรมฝนหลวงและการบินเกษตร เมื่อนำมาคัดเลือกเฉพาะแนวบินที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี คงเหลือ 108 ข้อมูล ผลการเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคพื้นดินให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ r เท่ากับ 0.21 อันเนื่องมาจากแนวบินส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ตอนบนของลุ่มน้ำ โดยมีเป้าหมายเพื่อการเติมน้ำให้กับเขื่อนแก่งกระจานเป็นสำคัญ แต่ในบริเวณดังกล่าว สถานีตรวจวัดน้ำฝนภาคพื้นดินมีการกระจายตัวที่ไม่ครอบคลุมและเพียงพอ คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งสถานีวัดน้ำฝนและข้อมูลภูมิอากาศเพิ่มเติมในบริเวณพื้นที่ตอนบน จำนวน 4 สถานี ได้แก่ สถานีบ้านกร่างแคมป์ ต.ห้วยแม่เพรียง สถานีโรงเรียนบ้านพุเข็ม ต.แก่งกระจาน สถานีโรงเรียนบ้านพุสวรรค์ ต.พุสวรรค์ อ.แก่งกระจาน และ สถานีโรงเรียนบ้านท่าเสลา ต.ยางน้ำกลัดเหนือ อ.หนองหญ้าปล่อง จ.เพชรบุรี

จากผลการศึกษาในปีที่ 2 ข้อมูลปฏิบัติการฝนหลวงในปี พ.ศ.2564 จำนวน 93 ปฏิบัติการ เมื่อนำมาคัดเลือกเฉพาะแนวบินที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี คงเหลือ 71 ปฏิบัติการ พบว่า ผลการเปรียบเทียบกันระหว่างข้อมูลฝนเรดาร์และข้อมูลฝนเฉลี่ยเชิงพื้นที่จากข้อมูลฝนภาคพื้นดินและเพิ่มเติม 4 สถานีที่ติดตั้งใหม่ จะให้ค่าสหสัมพันธ์ดีขึ้นกว่ากรณีที่ไม่นำข้อมูลฝนสถานีทั้ง 4 สถานีมาพิจารณาด้วย และเมื่อพิจารณาเป็นปริมาณฝนสะสมรายเดือน พบว่า ค่าฝนสะสมรายเดือนจากข้อมูลฝนภาคพื้นดินและเพิ่มเติม 4 สถานีที่ติดตั้งใหม่ จะใกล้เคียงกับฝนเรดาร์สะสมรายเดือนมากกว่าตลอดช่วงเวลา 7 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายนของข้อมูลในปี พ.ศ. 2564 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ดีขึ้นของการเพิ่มเติมจุดตรวจวัดน้ำฝนบริเวณตอนต้นและตอนกลางของลุ่มน้ำเพชรบุรีในปีที่ 1 นี้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ในปีที่ 1 ซึ่งเป็นการทวนสอบผลจากข้อมูลการตรวจจริงในปีที่ 2 นี้ ซึ่งนับว่ามีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นจากผลการศึกษาในปีที่ 1 และยังพบว่า ในบริเวณตอนบนของลุ่มน้ำซึ่งเป็นพื้นที่ที่เป้าหมายในการทำฝนหลวงเพื่อเติมน้ำลงเขื่อนแก่งกระจานเป็นหลักตลอดทั้งสี่ปีที่รวบรวมข้อมูลได้ (ปี พ.ศ.2561 ถึงปี พ.ศ.2564)

สำหรับการปรับปรุงการประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงกับฝนภาคพื้นดินในลุ่มน้ำเพชรบุรี คณะวิจัยเสนอแนะให้นำข้อมูลฝนเฉลี่ยเชิงพื้นที่จากข้อมูลภาคพื้นดินที่ดีขึ้นนี้ไปปรับปรุงการแปลผลของสมการความสัมพันธ์ Z-R relationship ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตรได้ต่อไป ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ในปี 2564 สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ได้จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการพัฒนาระบบประเมินปริมาณน้ำฝนและพยากรณ์ฝนล่วงหน้า โดยใช้ข้อมูลเรดาร์ตรวจอากาศ ระยะที่ 3 ซึ่งเสนอให้กรมฝนหลวงและการบินเกษตร ได้ปรับข้อมูลเรดาร์ตรวจอากาศจากสถานีเรดาร์ฝนหลวงสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี จากสมการความสัมพันธ์ Z-R ที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันคือ $Z = 300R^{1.4}$ มาใช้เป็นสมการปรับปรุงใหม่ $Z = 170\ R^{1.6}$ มีความแม่นยำมากกว่าการใช้สมการอื่นๆ ของทั้งเหตุการณ์ฝนที่ใช้ในการสอบเทียบและทวนสอบในปี พ.ศ.2559 ถึงปี พ.ศ.2563

สำหรับโครงการวิจัยย่อยที่ 2 ซึ่งเป็นนำข้อมูลฝนที่วิเคราะห์ได้จากโครงการวิจัยที่ 1 มาวิเคราะห์ต่อในด้านความชื้นในดินและการเกิดปริมาณน้ำท่าจากน้ำฝน ซึ่งสรุปผลการศึกษาเป็น 3 ด้าน ได้แก่ การประเมินสภาพความชื้นในดินในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีจากการประยุกต์ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมและแบบจำลองวิเคราะห์ความชื้นในดิน รวมถึงการประเมินถึงปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำแก่งกระจานจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าได้แก่แบบจำลอง SWAT และ DWCM-AgWU โดยนำข้อมูลการปฏิบัติการฝนหลวงร่วมพิจารณาในการศึกษา พร้อมทั้งการประยุกต์ข้อมูลปริมาณฝนคาดการณ์ล่วงหน้า 9 วันร่วมกับแบบจำลอง DWCM-AgWU เพื่อประเมินถึงปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำแก่งกระจานและปริมาตรน้ำในอ่างล่วงหน้า ผลการศึกษาพบว่าจากการประยุกต์ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมได้มีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนโดยใช้ข้อมูลตรวจวัดจากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตร (สกษ.) หนองพลับ พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.72 และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 1.8 องศาเซลเซียส และผลการประเมินพื้นที่เพาะปลูกจากข้อมูลอนุกรมเวลาภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงปี 2015-2021จะเห็นว่ารูปแบบการเพาะปลูกพืชในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีมีพื้นที่เพาะปลูกเฉลี่ยค่อนข้างมากในช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน โดยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 8 แสน ถึง 1 ล้าน 2 แสนไร่ หลังจากนั้นในเดือนพฤศจิกายนพื้นที่เพาะปลูกจะลดลงเหลือเฉลี่ยประมาณ 1 แสนไร่ โดยเป็นพื้นที่ไม้ผล/ไม้ยืนต้นและพื้นที่เพาะปลูกในเขตโครงการชลประทานเพชรบุรี นอกจากนั้นยังได้มีการตรวจวัดความชื้นในดินจากเซนเซอร์ความชื้นในดินแบบ IoT และได้ทำการสอบเทียบเซนเซอร์แบบคาปาซิทีฟและติดตั้งในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีจำนวน 10 จุด สามารถส่งข้อมูลความชื้นในดินแบบใกล้เวลาจริง (near real-time) ทุก 15 นาที จากนั้นได้มีการเก็บตัวอย่างเพื่อประเมินถึงค่าความชื้นในดินและนำผลการตรวจวัดมาประเมินกับค่าความชื้นที่ได้จากแบบจำลองสำหรับการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกันพบว่า ดัชนีการสอบเทียบโดยส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีโดยมีค่า R2 เท่ากับ 0.65-0.95, NSE มีค่าเท่ากับ 0.28-0.72 และ PBIAS เท่ากับ -12.71 ถึง 5.01 ยกเว้นเพียง 1 จุดที่ผลการประเมินมีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากค่าของปริมาณฝนที่ตรวจวัดมีค่าความคลาดเคลื่อนจากปริมาณฝนที่เกิดขึ้นในพื้นที่จริง และสุดท้ายแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า SWAT และ DWCM-AgWU ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินค่าปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างเก็บน้ำแก่งกระจาน โดยเมื่อพิจารณาความแตกต่างของปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นเมื่อมีไม่พิจารณาปริมาณฝนที่เกิดจากการปฏิบัติการฝนหลวงโดยพิจารณาเฉพาะพื้นที่ที่ระบุว่ามีการปฏิบัติการพบว่า ปริมาณ

น้ำท่าที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 22.5-35.5 ล้าน ลบ.ม. และสุดท้ายแบบจำลอง DWCM-AgWU ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับปริมาณฝนพยากรณ์เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าและปริมาตรน้ำในอ่างเก็บน้ำซึ่งพบว่ามีค่าที่สอดคล้องกับแนวโน้มของข้อมูลในอดีตที่เกิดขึ้น

สำหรับโครงการวิจัยย่อยที่ 3 ซึ่งเป็นการศึกษาผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงในการแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำ ซึ่งสรุปผลการศึกษาเป็น 2 ด้าน ได้แก่ ผลการวิเคราะห์ตัวแปรภูมิอากาศและปริมาณน้ำในบรรยากาศสำหรับการทำฝนหลวง จากข้อมูลสถานีตรวจวัดทั้ง 4 สถานี ได้แก่ สถานีตรวจวัดอากาศหัวหิน เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ และหนองพลับ จำนวน 211 วัน ในช่วงปี พ.ศ. 2560 ถึง 2563 สำหรับวิเคราะห์ปริมาณน้ำในบรรยากาศพร้อมทั้งการวิเคราะห์กระจายเชิงพื้นที่ของข้อมูลภูมิอากาศและปริมาณน้ำในบรรยากาศ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โอกาสการเกิดฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง พบว่า โอกาสการเกิดฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง ควรมีความชื้นสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ 71-90 ความเร็วลมอยู่ระหว่าง 11-20 นอต และปริมาณน้ำในบรรยากาศมีค่าระหว่าง 71-90 มม. ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการวิจัยในปีที่ผ่านมา

ส่วนการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการดำเนินการปฏิบัติการฝนหลวง ใช้ข้อมูลจากปฏิบัติการฝนหลวงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 - พ.ศ. 2564 ที่ได้จากโครงการวิจัยย่อยที่ 1 และ 2 สำหรับขอบเขตการศึกษาประกอบด้วย ระบบการขนส่งสารฝนหลวง การตรียมสารฝนหลวง และปฏิบัติการบินฝนหลวง โดยหน่วยวัดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงประเมินจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อปริมาณฝนที่ประเมินด้วยวิธีการที่ต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินปริมาณฝนด้วยวิธี Inverse Distance Weighted (IDW) จากฝนสถานี ตั้งแต่ปี พ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 1,599.54, 1,505.68, 567.04 และ 2,458.21 kgCO2 eq/ล้านลบ.ม. ตามลำดับ, ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนเรดาร์ ตั้งแต่ปีพ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 550.73, 530.11, 258.05 และ 680.60 kgCO2 eq/ล้านลบ.ม. ตามลำดับ และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนดาวเทียม (ดาวเทียม JAXA) ตั้งแต่ปีพ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 819.41, 1,185.75, 410.27 และ 660.51 kgCO2 eq/ล้านลบ.ม. ตามลำดับ การแปลผลจากข้อมูลในตารางบัญชีรายการพบว่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเกิดจากกระบวนการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเป็นมลพิษทางตรง (direct emissions) คิดเป็นร้อยละ 60 ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของปฏิบัติการฝนหลวง และเป็นการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (indirect emissions) ซึ่งติดตัวมากับทรัพยากรที่ใช้ในปฏิบัติการฝนหลวงร้อยละ 40 โดยสารฝนหลวงที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ สารฝนหลวงสูตรร้อน เช่น แคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์ ใช้ในขั้นตอนการเลี้ยงให้อ้วน และ สารฝนหลวงสูตรเย็น เช่น น้ำแข็งแห้งและยูเรีย ใช้ในขั้นตอนการโจมตี เป็นต้น ข้อมูลการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นนี้สามารถนำไปใช้สนับสนุนการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรในปฏิบัติการฝนหลวงต่อไปในอนาตคได้

สำหรับโครงการวิจัยย่อยที่ 4 ได้รวบรวมผลการศึกษาจากโครงการวิจัยย่อยที่ 1 ถึง 3 และได้พัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจอยู่ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันที่นำเสนอข้อมูลที่ทันต่อสถานการณ์ เพื่อสนับสนุนการทำงานต่างๆ ทั้งนี้เพื่อให้ภาระกิจการทำฝนมีประสิทธิผลที่สูงยิ่งขึ้น ระบบสนับสนุนการทำงานหลักต่อไปนี้ การสนับสนุนการตัดสินใจเลือกเป้าหมายปฏิบัติการฝนหลวงในการป้องกันภัยแล้งและเติมน้ำให้เขื่อน และ

สนับสนุนการตัดสินใจก่อนขึ้นบินปฏิบัติการจากสภาพอากาศภาคพื้นและบรรยากาศชั้นบน ตลอดจนรายงานผลการปฏิบัติการ รวมทั้งออกรายงานสรุปการขอรับบริการ และเพื่อให้ผลการวิจัยแพร่หลายและสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิผลแก่การปฏิบัติการฝนหลวงได้ ระบบควรมีการนำไปใช้จริงและมีการติดตามปัญหาเพื่อปรับปรุงและเพิ่มความฉลาดให้กับระบบผู้เชี่ยวชาญ โดยในท้ายที่สุดนี้ ผลที่ได้ทั้งหมดของแผนงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์แก่ประชาชนและเกษตรกรบริเวณลุ่มน้ำเพชรบุรี และควรขยายผลสู่ภูมิภาคอื่นๆ ต่อไป

คำสำคัญ:

(ภาษาไทย) ฝนหลวง, การบริหารจัดการน้ำ, แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า, แบบจำลองสมดุลน้ำ, ระบบช่วยตัดสินใจ, ความต้องการใช้น้ำ, การขาดแคลนน้ำ, ภัยแล้ง, ปริมาณน้ำในบรรยากาศ, การเพิ่มผลสัมฤทธิ์, การลดความเสี่ยง, วอเตอร์ฟรุตปริ้น, ลุ่มน้ำเพชรบุรี

(ภาษาอังกฤษ) Royal Rainmaking, Water Management, Rainfall-Runoff Model, Water Balance Model, Decision Supporting System, Water Demand, Water scarcity, Drought, Precipitable water, Performance improvement, Risk Reduction, Water Footprint, Phetchaburi River Basin

Abstract

This research plan is a study of performance improvement and risk reduction in water management of Phetchaburi river basin using Royal Rainmaking (Year 2) consist of 4 research projects. The first research project began by gathering crucial data, namely daily data of Royal Rainmaking Operations, which consists of days and times for making royal rains and flight pathways in each operation from the Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation to assess the achievement of royal rainmaking by checking from the amount of rain measured from the ground rain gauge station of the Hydro-Informatics Institute (Public Organization) or HII, which is an hourly rainfall amount. The period covered by takeoff and the time when it rained following the operation, between 9:00 AM and 9:00 PM, are used to calculate the cumulative half-day value. Due to limited computer systems used to store data, hourly radar grid rain data cannot be retrieved. Data can be retrieved only at that half-day time. And in the process of modifying computer systems in the future should be able to retrieve hourly historical data. In this research, it was then compared with the half-day average rainfall obtained from the radar in the form of a grid distributed according to the area of propose for the achievement of each operation. It is considered that the rain data from the radar is accurate and can be used as a reference data on the amount of rainfall to compare the results of the royal rainmaking.

Based on the results of the first year study, 148 data on the Royal Rainmaking Operations during the year 2018 to Year 2020 received from the Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation. When selecting only the flight pathways in the Phetchaburi area, there were 108 data left. The comparison results with the ground data gave a correlation coefficient is 0.21, since most of the flight pathway is in the upper basin, because of the goal is to add royal water to the Kaeng Krachan dam. However, in this area the ground rain gauge station has an inadequate and inadequate distribution. Therefore, the researchers conducted a feasibility study on installing additional ground rain gauge and climate data stations in the upper area of 4 stations, namely Ban Krang Camp Station at Huai Mae Phiang Subdistrict, Ban Phu Khem School Station at Kaeng Krachan Subdistrict, Ban Phu Sawan School Station at Phu Sawan Subdistrict, Kaeng Krachan District, and Ban Tha Sala School Station at Yang Nam Klat Nuea Subdistrict, Nong Ya Plong District, Phetchaburi Province.

From the results of the study in the second year, 93 data on the Royal Rainmaking Operations in the year 2021 was collected. When selected for specific flight pathways within the boundaries of Phetchaburi Province, remaining 71 operations was found and the results were compared between radar rain data and spatial average rainfall data from ground rainfall data and 4 additional ground rain gauge stations newly installed. It will give better correlation values than the case of not taking the ground rain data of all 4 stations into consideration. And when considering the monthly cumulative rainfall, it was found that the monthly cumulative rainfall from ground rainfall data and 4 additional stations newly installed is closer to the monthly cumulative radar rainfall throughout the period of 7 months from March to September of the data in 2021. The better correlation of the addition of ground rain measurement points in the upper and middle of the Phetchaburi Basin in the first year of research. This is consistent with the assumption set in first year, which is to verify the results of the actual examination in second year of research and considered to be more reliable from the results of the first year of research. It also found that upstream of the river basin is mainly the area where the target of royal rain to fill the Kaeng Krachan dam for the four years that data was collected (2018 to 2021).

For improving the assessment of the achievement of royal rain and ground rain in the Phetchaburi river basin, the researchers suggest that the spatial average rainfall data from this improved ground data could improve the interpretation of the ZR relationship of the Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation. From the literature review, it was found that in year 2021, HII prepared a final report on the project to develop a system for estimating and forecasting rainfall using the weather radar data phase 3, the researchers considered that If the Department of Royal Rainmaking and Agricultural Aviation has tried to adapt the ZR relationship equation from which it is currently in use is $Z = 300R^{1.4}$ into the newly equation $Z = 170R^{1.6}$ obtained from the aforementioned research. It will help the radar grid rain to be closer to the ground rain. This will make an assessment of the achievement of royal rain and ground rain in the Phetchaburi river basin has more accuracy values as well.

For the second research project, the analyzed rain data from first research project were used for further analysis in terms of soil moisture and rain runoff which summarizes the results of the study into 3 topics namely an estimation of soil moisture in the Phetchaburi river basin using satellite data and a soil moisture analysis model. Second, the inflow of Kaengkrachan Dam was calculated using rainfall-runoff models which were SWAT and DWCM-AgWU together with the operations of Royal Rainfall Making (RRM). Finally, forecasted rainfalls were used with

DWCM-AgWU to predict Kaengkrachan inflows 9-days in advance. Results revealed that bias correction method was applied for Nong Plub meteorological station with correlation coefficient of 0.72 and RMSE of 1.8 C. Cultivated area estimation using satellite during 2015-2021 presented that large cultivated area occurred during May-October with 800,000 – 1,200,000 rai. The area was then decrease in November around 100,000 rai. IOT Soil moisture sensors were then installed and calibrated for 10 stations for collecting soil moisture data every 15 mins. The observed soil moisture data were also used for the soil moisture model calibration showing moderate to high performance for most stations with R2 of 0.65-0.95, NSE of 0.28-0.72, and PBIAS of -12.71 to 5.01. Only one station showed less performance because of an error of rainfall data. Finally, the results of rainfall-runoff models showed that Kaengkrachan inflow was decreased around 22.5-25.5 mcm without RRM operation, and forecasts inflow 9-day in advance were generated with high agreement with historical inflows.

For the third research project, which is a study of the effect of Royal Rainmaking in solving the problem of water scarcity. The results of the study were summarized into two aspects, namely the results of the analysis of the climate statistics and atmospheric water content for the royal rainmaking. The climate data base obtained from Hua-Hin, Phetchaburi, Prachuap Khiri Khan and Nong Plub weather stations during the year of 2017-2020 was used to analyze the spatial distribution of climatic profiles and atmospheric water content. Then probability analysis of rainfall from the Royal Rainmaking operations was performed during the 211 days of operation during the year of 2017 to 2020. The result was found that the critical operation condition for Royal Rainmaking achievement was the humidity in the rage of 71-90 percent, wind speed 11-20 knots and atmospheric water content 71-90 mm, which is in according with previous study results in the first-year project.

The CF analysis was then performed by using the inventories of Royal Rainmaking Process recorded from the year 2018 – 2021 of the results of the research project 1 and 2. The scope of the system studied consisted of the Royal Rainmaking substances transport system, preparation of Royal Rainmaking substances, and the performing of Royal Rainmaking. The functional unit was set as unit of rainfall estimated from variation existing methods. The different rainfall estimation revealed different CF values. The CF of Royal Rainmaking determined by Inverse Distance Weighted (IDW) method from rain gauge stations from the year 2018 to 2021 were 1,599.54, 1,505.68, 567.04 and 2,458.21 kgCO_2. eq/million m^3, respectively. The CF of Royal Rainmaking estimated from radar rainfall from the year 2018 - 2021, the values were 550.73, 530.11, 258.05 and 680.60 kgCO_2 eq/million m^3, respectively. The CF of the Royal

Rainmaking estimated from the satellite (JAXA satellite) from the year 2018 - 2021 were 819.41, 1,185.75, 410.27 and 660.51 kg CO_2 eq/million m^3, respectively. To explore the contributing inventories of that system, it was found that the 60% of greenhouse gas emissions measured as CO_2 equivalent caused by the engine exhaust (burning of fuel), which is direct emissions. The 40 percent left was contributed from indirect emissions caused by resources used in the process. The major rainmaking substance that affects greenhouse gas emissions is the hot-formulate rainmaking matter, such as calcium oxide and calcium chloride, used in the process of raising the cloud mass (Fattening), and cold-formulate rainmaking substance such as dry ice and urea, used in the process of attacking, etc. These findings may support the further system operation of Royal Rainmaking to achieve more resources consumption efficiency.

For the fourth research project, the results of research projects 1 to 3 were collected and developed the decision support system for the rainmaking operation. The proposed decision support system is developed as a web application. It presents timely information to support several tasks in order to increase the efficiency of rainmaking operations. The main tasks supported by the system are (1) supporting decision-making on selecting the target area regarding two rainmaking missions which are to mitigate water shortages and to increase the water level in the reservoirs; (2) supporting decision-making on daily missions based on the weather and upper atmosphere; and (3) generating reports on the performance of the mission and summary reports of service requests. In addition, to make research findings widespread and able to help increase the effectiveness of the Royal Rainmaking Operations, the system should be implemented and problem tracked to improve and enhance the intelligence of the expert system. Finally, all these results of the research plan give the benefit to people and farmers in the Phetchaburi river basin and should be extended to other regions

สารบัญ

สรุปภาพรวมทั้งหมดของการดำเนินงาน **8**

1. บทนำ (Introduction) **12**

1.1 บทนำ 12

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 12

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 12

2. วิธีดำเนินการวิจัย **13**

3. ผลการวิจัย **15**

3.1 ผลของโครงการวิจัยย่อยที่ 1 “การประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวง กับฝนภาคพื้นดินในลุ่มน้ำเพชรบุรี” 15

3.2 ผลของโครงการวิจัยย่อยที่ 2 “การวิเคราะห์ภาวะการขาดแคลนน้ำในลุ่มน้ำเพชรบุรี” 16

3.3 ผลของโครงการวิจัยย่อยที่ 3 “การศึกษาผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวง ในการแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำ” 17

3.4 ผลของโครงการวิจัยย่อยที่ 4 “การพัฒนาระบบช่วยตัดสินใจในการทำฝนหลวง สำหรับการวางแผนการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเพชรบุรี” 18

4 สรุปและข้อเสนอแนะ (Conclusion and Recommendation) **19**

เอกสารอ้างอิง (References) **25**

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การชี้แจงข้อคิดเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ 26

สรุปภาพรวมทั้งหมดของการดำเนินงาน

แผนงานวิจัยทั้งโครงการที่วางไว้	ผลงานวิจัยที่ดำเนินการแล้วเสร็จ
1. การรวบรวมและทบทวนข้อมูลในสนามเพิ่มเติม	รวบรวมและปรับปรุงฐานข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลภูมิอากาศ ได้แก่ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและภูมิอากาศได้ทำการปรับปรุงเพิ่มเติมเป็นข้อมูลสถิติคาบ 30 ปี (พ.ศ. 2534 ถึง พ.ศ. 2563) ข้อมูลฝนภาคพื้นดินรายชั่วโมงในช่วงปี พ.ศ. 2563-2564 และการรวบรวมข้อมูลการปฏิบัติการฝนหลวงในปี พ.ศ. 2564 ตั้งแต่เดือน มีนาคม – เดือน กันยายน
2. การทบทวนและปรับปรุงฐานข้อมูลของสถานีตรวจวัดอุตุนิยมวิทยาที่ติดตั้งในพื้นที่ศึกษา	สถานีที่ติดตั้งเพิ่มเติมยังใช้งานได้เป็นปกติ และการทวนสอบผลจากข้อมูลการตรวจจริงในปีที่ 2 นี้ ซึ่งนับว่ามีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น
3. การทบทวนและปรับปรุงวิธีการสังเคราะห์และแปลผลข้อมูลจากการปฏิบัติการฝนหลวงที่ผ่านมาจากปีแรกให้มีความน่าเชื่อถือสูง	ผลการเปรียบเทียบกันระหว่างข้อมูลฝนเรดาร์และข้อมูลฝนเฉลี่ยเชิงพื้นที่จากข้อมูลฝนภาคพื้นดินและเพิ่มเติม 4 สถานีติดตั้งใหม่ จะให้ค่าสหสัมพัทธ์ดีขึ้นกว่ากรณีที่ไม่นำข้อมูลฝนสถานีทั้ง 4 สถานีมาพิจารณาด้วย และเมื่อพิจารณาเป็นปริมาณฝนสะสมรายเดือน พบว่า ค่าฝนสะสมรายเดือนจากข้อมูลฝนภาคพื้นดิน + เพิ่มเติม 4 สถานีจะใกล้เคียงกับฝนเรดาร์สะสมรายเดือนมากกว่าตลอดช่วงเวลา 7 เดือนของข้อมูลในปี พ.ศ. 2564 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ดีขึ้นของการเพิ่มเติมจุดตรวจวัดน้ำฝนบริเวณตอนต้นและตอนกลางของลุ่มน้ำเพชรบุรีในปีที่ 1 นี้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ในปีที่ 1 ซึ่งเป็นการทวนสอบผลจากข้อมูลการตรวจจริงในปีที่ 2 นี้ และเสนอแนะให้กรมฝนหลวงและการบินเกษตรได้ทดลองปรับมาใช้สมการความสัมพันธ์ Z-R จากที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันคือ $Z = 300 R^{1.4}$ มาเป็นสมการ $Z = 170R^{1.6}$ ของสถานีเรดาร์ฝนหลวงสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี
4. การวิเคราะห์การขาดแคลนน้ำโดยภาพถ่ายดาวเทียม (Near-real time)	ผลการวิเคราะห์การขาดแคลนน้ำจากการประเมินความชื้นในดินด้วยข้อมูลผลิตภัณฑ์ภาพถ่ายจากดาวเทียม Terra/MODIS คำนวนดัชนีความแห้งแล้งด้านการเกษตรด้วยวิธี Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) เป็นการศึกษาวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยในปีที่ 1 โดยเน้นไปที่การปรับปรุงและปรับแก้ความคลาดเคลื่อนข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม การกำหนดพื้นที่เพาะปลูก การแปลผลดัชนี TVDI และการตรวจวัดความชื้นในดินจากเซนเซอร์ความชื้นในดินแบบ IoT โดยผลการวิจัยพบว่าการปรับปรุงข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมด้วยการเติมเต็มข้อมูลในส่วนที่ขาดหาย (gap-filling) ซึ่งจากงานวิจัยในปีที่ 1 พบว่าข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) ไม่สมบูรณ์เพียงพอสำหรับใช้งาน ในงานวิจัยในปีที่ 2 นี้ได้ใช้เทคนิค Temporal Fourier Analysis (TFA) เพื่อสร้างข้อมูลใหม่ (reconstruct) จากนั้นตรวจสอบความน่าเชื่อถือและปรับแก้ความคลาดเคลื่อนโดยใช้ข้อมูลตรวจวัดจากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตร (สกษ.) หนองพลับ พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.72 และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE)

แผนงานวิจัยทั้งโครงการที่วางไว้	ผลงานวิจัยที่ดำเนินการแล้วเสร็จ
	เท่ากับ 1.8 องศาเซลเซียส และผลการประเมินพื้นที่เพาะปลูกจากข้อมูลอนุกรมเวลาภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงปี พ.ศ.2558-2564 จะเห็นว่ารูปแบบการเพาะปลูกพืชในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีมีพื้นที่เพาะปลูกเฉลี่ยค่อนข้างมากในช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน โดยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 8 แสน ถึง 1 ล้าน 2 แสนไร่ หลังจากนั้นในเดือนพฤศจิกายนพื้นที่เพาะปลูกจะลดลงเหลือเฉลี่ยประมาณ 1 แสนไร่ โดยเป็นพื้นที่ไม้ผล/ไม้ยืนต้นและพื้นที่เพาะปลูกในเขตโครงการชลประทานเพชรบุรี นอกจากนั้นยังได้มีการตรวจวัดความชื้นในดินจากเซนเซอร์ความชื้นในดินแบบ IoT ได้ทำการสอบเทียบเซนเซอร์แบบคาปาซิทีฟและติดตั้งในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีจำนวน 10 จุด สามารถส่งข้อมูลความชื้นในดินแบบใกล้เวลาจริง (near real-time) ทุก 15 นาที
5. การวิเคราะห์ความต้องการน้ำของพืชล่วงหน้าโดยแบบจำลองวิเคราะห์สภาพการขาดแคลนน้ำ	ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อประเมินความชื้นในพื้นที่ศึกษา โดยการนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าความชื้นภาคสนามในพื้นที่นอกเขตชลประทานจำนวน 5 พื้นที่ พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองของตำแหน่งที่ตรวจวัดโดยส่วนใหญ่มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าตรวจวัดในภาคสนาม โดยมีการประเมินด้วยการใช้ดัชนีสอบเทียบจำนวน 5 ดัชนี ได้แก่ R_2, RMSE, ARE, PBIAS และ NSE พบว่าตำแหน่งที่ตรวจวัดโดยส่วนใหญ่ 4 สถานีจาก 5 สถานี มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.65-0.95, 2.37-4.82%, 6.58-27.51, -12.71 ถึง 3.67 และ 0.28-0.72 ตามลำดับ โดยมีเพียงหนึ่งตำแหน่งตรวจวัดที่มีค่าไม่เป็นไปตามที่ตรวจวัดได้จากภาคสนามซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบแล้วพบว่าในช่วงเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างมีการเกิดฝนในพื้นที่แต่จากข้อมูลปริมาณฝนพบว่าไม่มีปริมาณฝนเกิดขึ้นในพื้นที่ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการตรวจวัด
6. การประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าที่ได้รับการปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลอง	ผลจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า SWAT และ DWCM เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างเก็บน้ำแก่งกระจานพบว่าแบบจำลองประเมินปริมาณน้ำท่ารายปีในช่วงปี 2018-2021 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 5% และ 17% จากแบบจำลอง SWAT และ DWCM ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นเมื่อไม่พิจารณาปริมาณฝนที่เกิดจากการปฏิบัติการฝนหลวงโดยพิจารณาเฉพาะพื้นที่ที่ระบุว่ามีการปฏิบัติการพบว่า ปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลง โดยแบบจำลอง SWAT จะมีค่าความแตกต่างของปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเท่ากับ 35.5 ล้าน ลบ.ม. ในขณะที่แบบจำลอง DWCM จะมีความแตกต่างเท่ากับ 22.5 ล้าน ลบ.ม.
7. การวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินภาวะการขาดแคลนน้ำโดยภาพรวมและการประเมินผล	ได้พัฒนาระบบการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในอนาคตล่วงหน้า 9 วันได้ โดยการประยุกต์ใช้ข้อมูลปริมาณฝนพยากรณ์จากกรมอุตุนิยมวิทยาร่วมกับแบบจำลอง DWCM ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีลักษณะเป็น Distributed model มาใช้ในการคาดการณ์ โดยผลจากการคาดการณ์พบว่าปริมาณน้ำท่าล่วงหน้า 9 วันมี

แผนงานวิจัยทั้งโครงการที่วางไว้	ผลงานวิจัยที่ดำเนินการแล้วเสร็จ
ปริมาณน้ำท่าจากการปฏิบัติการฝนหลวง	แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลตั้งแต่อดีต – ปัจจุบัน ซึ่งข้อมูลการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ายังสามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อประเมินถึงปริมาตรน้ำคงเหลือในอ่างเก็บน้ำ โดยการพิจารณาร่วมกับข้อมูลการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ระดับน้ำควบคุมตอนบน (Upper Rule Curve, URC) ระดับน้ำควบคุมตอนล่าง (Lower Rule Curve, LRC) และเส้นเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำอ้างอิง (Long-term Benchmark Curve, LBC) ซึ่งเป็นกณฑ์เฉลี่ยทางสถิติของเส้นการบริหารจัดการน้ำในอดีตเพื่อใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการน้ำ จะสามารถนำมาช่วยเป็นข้อมูลสนับสนุนในการบริหารจัดการน้ำในช่วงระยะเวลาใกล้ รวมถึงเป็นข้อมูลสนับสนุนการประเมินถึงสถานการณ์ในการปฏิบัติการฝนหลวงได้ต่อไปในอนาคต
8. การจัดทำฐานข้อมูลและวิเคราะห์สถิติภูมิอากาศเชิงพื้นที่	ได้ดำเนินงานรวบรวมข้อมูลภูมิอากาศให้ทันสมัยถึงปี พ.ศ. 2563 และได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่รายเดือนเฉลี่ย และรายปีเฉลี่ย จากข้อมูลเฉลี่ยช่วงเวลา 30 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2533 ถึง พ.ศ. 2563 ซึ่งผลการวิเคราะห์ตัวแปรภูมิอากาศและปริมาณน้ำในบรรยากาศสำหรับการทำฝนหลวง จากข้อมูลสถานีตรวจวัดทั้ง 4 สถานี ได้แก่ สถานีตรวจวัดภูมิอากาศหัวหิน เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ และหนองพลับ พบว่า จากข้อมูลรายวันช่วงปี พ.ศ.2560-2563 ในวันที่ปฏิบัติการฝนหลวง พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์สำหรับส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความชื้นสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละ 71-90 ความเร็วลม ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความเร็วลมระหว่าง 11-20 นอต สำหรับปริมาณน้ำในบรรยากาศเฉลี่ย ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง 71-90 มม. และปริมาณน้ำในบรรยากาศสูงสุด ส่วนใหญ่ อยู่ในช่วงระหว่าง 81-100 มม.
9. การวิเคราะห์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามแนวทางคาร์บอนฟุตพริ้นท์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตฝนหลวง	1) การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เกิดจากกระบวนการเผาไหมน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเป็นมลพิษทางตรง (direct emissions) คิดเป็นร้อยละ 60 ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของปฏิบัติการฝนหลวง และเป็นการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (indirect emissions) ซึ่งติดตัวมากับทรัพยากรที่ใช้ในปฏิบัติการฝนหลวงร้อยละ 40 ดังนั้นประสิทธิภาพของอากาศยาน การตัดสินใจขึ้นบินปฏิบัติการ รูปแบบการปฏิบัติการ เป็นประเด็นสำคัญซึ่งสามารถส่งผลต่อประสิทธิผลของปฏิบัติการฝนหลวงและผลกระทบต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรง 2) การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (indirect emissions) ซึ่งติดตัวมากับทรัพยากรที่ใช้ในปฏิบัติการฝนหลวงมากน้อยแตกต่างกันเนื่องจากสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกแตกต่างกัน และปริมาณสารที่ใช้ในปฏิบัติการฝนหลวงแตกต่างกัน โดยสารฝนหลวงที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ สารฝนหลวงสูตรร้อน เช่น แคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์ ใช้ในขั้นตอนการเลี้ยงให้อ้วน และ สารฝนหลวงสูตรเย็น เช่น น้ำแข็งแห้งและยูเรีย ใช้ในขั้นตอนการโจมตี เป็นต้น

แผนงานวิจัยทั้งโครงการที่วางไว้	ผลงานวิจัยที่ดำเนินการแล้วเสร็จ
	3) การเลือกใช้สารฝนหลวง การควบคุมปริมาณการใช้สารฝนหลวง ส่งผลต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวง หากปรับปรุงการใช้สารฝนหลวงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นหรือการเลือกใช้สารฝนหลวงซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ สามารถช่วยลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงลงได้ และวิธีการประเมินปริมาณฝนที่ได้จากปฏิบัติการฝนหลวงส่งผลโดยตรงต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงเช่นกัน โดยค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนด้วยวิธี Inverse Distance Weighted (IDW) จากฝนสถานี ตั้งแต่ปีพ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 1,599.54, 1,505.68, 567.04 และ 2,458.21 $kgCO_2$ eq/ล้านลบ.ม. ตามลำดับ, ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนเรดาร์ ตั้งแต่ปีพ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 550.73, 530.11, 258.05 และ 680.60 $kgCO_2$ eq/ล้านลบ.ม. ตามลำดับ และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนดาวเทียม (ดาวเทียม JAXA) ตั้งแต่ปีพ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 819.41, 1,185.75, 410.27 และ 660.51 $kgCO_2$ eq/ล้านลบ.ม.ตามลำดับ
10. การจัดทำฐานข้อมูลเพื่อระบบช่วยตัดสินใจ	ได้ออกแบบโดยผสมผสานการจัดเก็บข้อมูลแบบฐานข้อมูลดังเดิม Relational Database เข้ากับคลังข้อมูลรูปแบบสมัยใหม่ NoSQL รูปแบบ Document-based Storage ทั้งนี้เพื่อให้รองรับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างข้อมูลในอนาคตและสืบค้นที่รวดเร็ว
11. พัฒนาระบบช่วยตัดสินใจในการจัดทำฝนหลวง	ได้พัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดทำฝนหลวงที่อยู่ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันที่นำเสนอข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจปฏิบัติการฝนหลวงในการป้องกันภัยแล้งและเติมน้ำให้เขื่อน โดยแบ่งเป็นการสนับสนุนการปฏิบัติการก่อนขึ้นบินปฏิบัติการ การจัดทำรายงานผลการปฏิบัติการ และการจัดทำรายงานสรุปการขอรับบริการ

1. บทนำ (Introduction)

1.1 บทนำ

ท่ามกลางสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมส่งผลให้กรมฝนหลวงและการบินเกษตรจำเป็นต้องทำการวิจัย พัฒนา นวัตกรรม และองค์ความรู้เพื่อปรับเปลี่ยนกระบวนการในการทำงานให้สอดคล้องกับแนวโน้มของสภาวการณ์ที่เปลี่ยนแปรไปโดยให้ความสำคัญกับการแก้ไขปัญหาภัยแล้งเชิงพื้นที่ และมีการบูรณาการทำงานร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง อาทิ กรมชลประทาน กรมทรัพยากรน้ำ และกรมทรัพยากรน้ำบาดาล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดความเสี่ยงในวางแผนการบริหารจัดการน้ำเชิงพื้นที่ด้วยการปฏิบัติการฝนหลวง ตลอดจนเพื่อลดปัจจัยเสี่ยงและข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการปฏิบัติงาน

ดังนั้น แผนงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินแผนงานวิจัยนี้เสร็จสิ้นไปแล้ว 1 ปีและได้ดำเนินงานวิจัยต่อเนื่องในปีที่ 2 นี้ ซึ่งมีเป้าหมายในการวิจัยในด้านการพัฒนาระบบช่วยตัดสินใจในการจัดทำฝนหลวงและระบบประเมินผลสัมฤทธิ์ของการทำฝนหลวงเพื่อลดความเสี่ยงในการขาดแคลนน้ำที่มีความน่าเชื่อสูง ซึ่งจะช่วยให้การวางแผนการปฏิบัติการฝนหลวงมีความแม่นยำ และครอบคลุมกลุ่มเป้าหมาย ได้แก่ พื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่อื่นๆ ที่ต้องการให้มีการจัดทำฝนหลวงได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อวิเคราะห์สถานภาพปัจจุบันของการขาดแคลนน้ำในลุ่มน้ำเพชรบุรี สำหรับการวางแผนการบริหารจัดการน้ำเชิงพื้นที่ด้วยการปฏิบัติการฝนหลวง

2) เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า สำหรับการคาดการณ์น้ำท่าจากฝนตามธรรมชาติและจากการปฏิบัติการฝนหลวง

3) เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองสมดุลน้ำ สำหรับการประเมินช่วงเวลาและปริมาณการขาดแคลนน้ำในลุ่มน้ำเพชรบุรีเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนปฏิบัติการฝนหลวง

4) เพื่อพัฒนาระบบช่วยตัดสินใจในการทำฝนหลวงสำหรับการวางแผนการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเพชรบุรี

5) ประเมินผลสัมฤทธิ์ของการทำฝนหลวงเพื่อลดความเสี่ยงในการขาดแคลนน้ำ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) การประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงกับฝนภาคพื้นดินในลุ่มน้ำเพชรบุรีที่มีความน่าเชื่อถือสูง

2) เทคนิคและวิธีการในการประเมินถึงพื้นที่และช่วงเวลาการขาดแคลนน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำ

3) การประเมินปริมาณน้ำท่าในสภาวะปกติและจากการปฏิบัติการฝนหลวง

4) กรมฝนหลวงนำผลการวิจัยไปเพิ่มประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการทำฝนหลวง

5) ระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดทำฝนหลวง

6) บทความวิชาการระดับประเทศ/นานาชาติ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับแผนงานวิจัยได้แบ่งออกเป็น 4 โครงการวิจัยย่อย ได้แก่

โครงการวิจัยย่อยที่ 1 การประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงกับฝนภาคพื้นดินในลุ่มน้ำเพชรบุรี

โครงการวิจัยย่อยที่ 1 เป็นการศึกษาประเมินผลสัมฤทธิ์ของปฏิบัติการฝนหลวงโดยพิจารณาใช้การตรวจสอบกับข้อมูลฝนภาคพื้นดิน เพื่อวิเคราะห์สภาพฝนและการสังเคราะห์/แปลผลข้อมูลฝนหลวง และการทบทวนและปรับปรุงการติดตั้งสถานีวัดฝนและภูมิอากาศที่ติดตั้งแล้วในงานวิจัยปีที่ 1 เพื่อทวนสอบประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวง เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือสูง และส่งต่อข้อมูลฝนที่วิเคราะห์ได้จากปฏิบัติการฝนหลวงเพื่อให้กับโครงการวิจัยย่อยอื่น ๆ ต่อไป

โครงการวิจัยย่อยที่ 2 การวิเคราะห์ภาวะการขาดแคลนน้ำในเขตลุ่มน้ำเพชรบุรี

โครงการวิจัยย่อยที่ 2 เป็นการศึกษาและประยุกต์ใช้เทคนิควิธีการสำรวจจากระยะไกลด้วยภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อที่ประเมินพื้นที่ที่มีสภาวะการขาดแคลนน้ำแบบใกล้ช่วงเวลาจริง (Near-real time) รวมถึงการประยุกต์ใช้ข้อมูลสภาพภูมิอากาศในช่วงอนาคตอันใกล้ร่วมกับแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาวะการขาดแคลนน้ำ ซึ่งการประยุกต์ใช้องค์ความรู้ทั้ง 2 ด้านดังกล่าวจะส่งผลให้การประเมินพื้นที่ที่มีความต้องการน้ำและช่วงเวลาที่ต้องการน้ำเป็นไปอย่างถูกต้อง นอกจากนั้นจะมีการนำข้อมูลจากการตรวจวัดสภาพความชื้นของดินมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้จาก ทั้งการใช้เทคนิคภาพถ่ายดาวเทียมและการใช้แบบจำลองที่วิเคราะห์สภาวะการขาดแคลนน้ำ รวมทั้งทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าเพื่อประเมินถึงปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งของการปฏิบัติการฝนหลวงซึ่งจะมีส่วนร่วมในการประเมินถึงผลที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติการฝนหลวง

โครงการวิจัยย่อยที่ 3 การศึกษาผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงในการแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำ

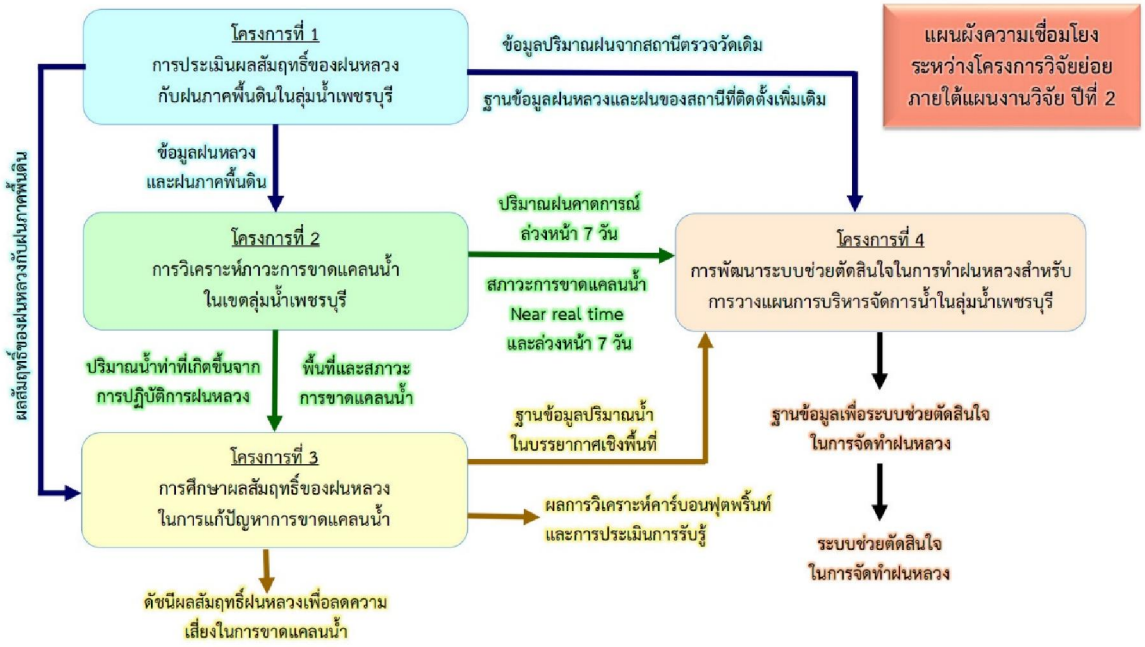
โครงการวิจัยย่อยที่ 3 เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพข้อมูลปริมาณน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลเฉพาะจุดที่สถานีตรวจวัดจากงานวิจัยปีที่ 1 เป็นข้อมูลแพร่กระจายเชิงพื้นที่ของลุ่มน้ำเพชรบุรี (Areal Precipitation) และทำการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์เพื่อสะท้อนประเด็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขั้นตอนของปฏิบัติการฝนหลวง นำมาซึ่งการปรับปรุงประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากปฏิบัติการฝนหลวง เมื่อ พิจารณาร่วมกับดัชนีผลสัมฤทธิ์ฝนหลวงเพื่อลดความเสี่ยงในการขาดแคลนน้ำที่ได้จากงานวิจัยปีที่ 1 จะนำไปสู่ ผลสัมฤทธิ์ในการจัดทำฝนหลวงทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

โครงการวิจัยย่อยที่ 4 การพัฒนาระบบช่วยตัดสินใจในการทำฝนหลวงสำหรับการวางแผนการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเพชรบุรี

โครงการวิจัยย่อยที่ 4 เป็นการศึกษา ออกแบบ พัฒนา และปรับปรุงระบบฐานข้อมูลเพื่อระบบช่วยตัดสินใจในการจัดทำฝนหลวง และระบบช่วยตัดสินใจในการจัดทำฝนหลวงเพื่อลดความเสี่ยงในการ

ขาดแคลนน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี ผ่านระบบ web application และระบบ Geomap ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร

ทั้ง 4 โครงการวิจัยย่อยจะเชื่อมโยงกันดังแสดงแผนผังความเชื่อมโยงระหว่างโครงการวิจัยย่อยภายใต้แผนงานวิจัยนี้ใน**รูปที่ 2-1**



รูปที่ 2-1 แผนผังความเชื่อมโยงระหว่างโครงการวิจัยย่อยภายใต้แผนงานวิจัย (ปี2)

3. ผลการวิจัย

สำหรับผลการวิจัยในรายละเอียดจะอยู่ในส่วนของรายงานฉบับสมบูรณ์ของแต่ละโครงการวิจัยย่อยที่ประกอบกันเป็นแผนวิจัย โดยในส่วนของแผนวิจัยนี้ได้สรุปผลการวิจัยที่สำคัญแยกเป็นโครงการย่อยได้ดังนี้

3.1 ผลการวิจัยของโครงการวิจัยย่อยที่ 1 “การประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงกับฝนภาคพื้นดินในลุ่มน้ำเพชรบุรี”

โครงการวิจัยย่อยที่ 1 นี้ เริ่มจากการรวบรวมข้อมูลที่สำคัญคือ ข้อมูลปฏิบัติการฝนหลวงรายวัน ซึ่งประกอบไปด้วย วัน-เวลาในการทำฝนหลวง ขอบเขตแนวบินในแต่ละปฏิบัติการ จากกรมฝนหลวงและการบินเกษตร เพื่อประเมินผลสัมฤทธิ์ของการทำฝนหลวง โดยการตรวจสอบจากปริมาณฝนที่ตรวจวัดได้จากสถานีวัดน้ำฝนภาคพื้นดินของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) หรือ สสน. ซึ่งเป็นค่าปริมาณฝนรายชั่วโมง นำมาค่าหาสะสมรายครึ่งวันโดยใช้ระยะเวลาที่ครอบคลุมการขึ้นบินทำปฏิบัติการและช่วงเวลาที่จะเกิดฝนตกหลังจากปฏิบัติการในช่วง 09.00 – 21.00 น. เนื่องจากระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้จัดเก็บข้อมูลมีข้อจำกัดไม่สามารถดึงข้อมูลฝนกริดเรดาร์เป็นรายชั่วโมงได้ สามารถดึงข้อมูลได้เพียงแค่ช่วงเวลาดังกล่าว และอยู่ระหว่างการปรับเปลี่ยนระบบคอมพิวเตอร์ในอนาคตน่าจะสามารถดึงข้อมูลย้อนหลังเป็นรายชั่วโมงได้ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณฝนเฉลี่ยรายครึ่งวันซึ่งได้จากเรดาร์ที่อยู่ในรูปของกริด มีการกระจายตัวตามพื้นที่หวังผลสัมฤทธิ์ของแต่ละปฏิบัติการ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ถือว่าข้อมูลฝนจากเรดาร์มีความถูกต้อง แม่นยำ ใช้เป็นข้อมูลปริมาณฝนอ้างอิงในการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์การทำฝนหลวงได้

จากผลการศึกษาในปีที่ 1 ข้อมูลปฏิบัติการฝนหลวงจำนวน 148 ข้อมูล ในช่วงปี พ.ศ.2561 ถึงปี พ.ศ. 2563 ที่ได้รับจากกรมฝนหลวงและการบินเกษตร เมื่อนำมาคัดเลือกเฉพาะแนวบินที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี คงเหลือ 108 ข้อมูล ผลการเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคพื้นดินให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ r เท่ากับ 0.21 อันเนื่องมาจากแนวบินส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ตอนบนของลุ่มน้ำ โดยมีเป้าหมายเพื่อการเติมน้ำให้กับเขื่อนแก่งกระจานเป็นสำคัญ แต่ในบริเวณดังกล่าว สถานีตรวจวัดน้ำฝนภาคพื้นดินมีการกระจายตัวที่ไม่ครอบคลุมและเพียงพอ คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งสถานีวัดน้ำฝนและข้อมูลภูมิอากาศเพิ่มเติมในบริเวณพื้นที่ตอนบน จำนวน 4 สถานี ได้แก่ สถานีบ้านกร่างแคมป์ ต.ห้วยแม่เพรียง สถานีโรงเรียนบ้านพุเข็ม ต.แก่งกระจาน สถานีโรงเรียนบ้านพุสวรรค์ ต.พุสวรรค์ อ.แก่งกระจาน และ สถานีโรงเรียนบ้านท่าเสลา ต.ยางน้ำกลัดเหนือ อ.หนองหญ้าปล่อง จ.เพชรบุรี

จากผลการศึกษาในปีที่ 2 ข้อมูลปฏิบัติการฝนหลวงในปี พ.ศ.2564 จำนวน 93 ปฏิบัติการ เมื่อนำมาคัดเลือกเฉพาะแนวบินที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี คงเหลือ 71 ปฏิบัติการ พบว่า ผลการเปรียบเทียบกันระหว่างข้อมูลฝนเรดาร์และข้อมูลฝนเฉลี่ยเชิงพื้นที่จากข้อมูลฝนภาคพื้นดินและเพิ่มเติม 4 สถานีที่ติดตั้งใหม่ จะให้ค่าสหสัมพันธ์ดีขึ้นกว่ากรณีที่ไม่นำข้อมูลฝนสถานีทั้ง 4 สถานีมาพิจารณาด้วย และเมื่อพิจารณาเป็นปริมาณฝนสะสมรายเดือน พบว่า ค่าฝนสะสมรายเดือนจากข้อมูลฝนภาคพื้นดินและเพิ่มเติม 4 สถานีที่ติดตั้งใหม่ จะใกล้เคียงกับฝนเรดาร์สะสมรายเดือนมากกว่าตลอดช่วงเวลา 7 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือน

กันยายนของข้อมูลในปี พ.ศ. 2564 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ดีขึ้นของการเพิ่มเติมจุดตรวจวัดน้ำฝนบริเวณตอนต้นและตอนกลางของลุ่มน้ำเพชรบุรีในปีที่ 1 นี้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ในปีที่ 1 ซึ่งเป็นการทวนสอบผลจากข้อมูลการตรวจจริงในปีที่ 2 นี้ ซึ่งนับว่ามีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นจากผลการศึกษาในปีที่ 1 และยังพบว่า ในบริเวณตอนบนของลุ่มน้ำซึ่งเป็นพื้นที่ที่เป้าหมายในการทำฝนหลวงเพื่อเติมน้ำลงเขื่อนแก่งกระจานเป็นหลักตลอดทั้งสี่ปีที่รวบรวมข้อมูลได้ (ปี พ.ศ.2561 ถึงปี พ.ศ.2564)

สำหรับการปรับปรุงการประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงกับฝนภาคพื้นดินในลุ่มน้ำเพชรบุรี คณะวิจัยเสนอแนะให้นำข้อมูลฝนเฉลี่ยเชิงพื้นที่จากข้อมูลภาคพื้นดินที่ดีขึ้นนี้ไปปรับปรุงการแปลผลของสมการความสัมพันธ์ Z-R relationship ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตรได้ต่อไป ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ในปี 2564 สสน. ได้จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการพัฒนาระบบประเมินปริมาณน้ำฝนและพยากรณ์ฝนล่วงหน้า โดยใช้ข้อมูลเรดาร์ตรวจอากาศ ระยะที่ 3 ซึ่งได้มีการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ Z-R ที่เหมาะสมในการปรับแก้ค่าความเอนเอียงของข้อมูลฝนจากเรดาร์ให้มีความถูกต้อง และใกล้เคียงกับปริมาณฝนที่ตกบนพื้นดิน การประเมินฝนที่เหมาะสมในพื้นที่ภายใต้รัศมีการตรวจวัดจากเรดาร์ โดยระบบประเมินปริมาณน้ำฝน และพยากรณ์ฝนล่วงหน้าโดยใช้ข้อมูลเรดาร์ที่โครงการนี้พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ทั้งแบบ Offline และ Real time เพื่อประเมินปริมาณน้ำฝนและติดตามสถานการณ์และพยากรณ์ฝนล่วงหน้า 1-3 ชั่วโมง ทำการพัฒนาระบบประเมินและพยากรณ์ฝนล่วงหน้าโดยวิธีเรดาร์ Composite ร่วมกับข้อมูลฝนจากสถานีโทรมาตรอัตโนมัติรายชั่วโมงของ สสน. ซึ่งเดิมเรดาร์ตรวจอากาศจากสถานีเรดาร์ฝนหลวงสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี สมการความสัมพันธ์ Z-R ที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบัน คือ $Z = 300\ R^{1.4}$ โดยจากผลการวิเคราะห์ใหม่สามารถหาสมการ Z-R เฉลี่ยที่เหมาะสมของเรดาร์สัตหีบที่มุมตรวจวัดที่ 2 (15^{o}) คือ สมการ $Z = 170\ R^{1.6}$ ซึ่งจะทำให้ปริมาณฝนรายชั่วโมงที่ประเมินได้จากเรดาร์มีค่าใกล้เคียงกับฝนที่ตรวจวัดได้จากสถานีโทรมาตรมากกว่าสมการเดิมของทั้งเหตุการณ์ฝนที่ใช้ในการสอบเทียบและทวนสอบ

ดังนั้น คณะวิจัยจึงเห็นว่า หากกรมฝนหลวงและการบินเกษตรได้ทดลองปรับมาใช้สมการความสัมพันธ์ Z-R จากที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันคือ $Z = 300\ R^{1.4}$ มาเป็นสมการ $Z = 170\ R^{1.6}$ ที่ได้จากงานวิจัยดังกล่าว จะช่วยให้ฝนกริดเรดาร์มีค่าใกล้เคียงกับฝนภาคพื้นดินมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้การประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงกับฝนภาคพื้นดินในลุ่มน้ำเพชรบุรี มีค่าความแม่นยำมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย

3.2 ผลการวิจัยของโครงการวิจัยย่อยที่ 2 “การวิเคราะห์ภาวะการขาดแคลนน้ำในลุ่มน้ำเพชรบุรี”

โครงการวิจัยย่อยที่ 2 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสภาพความชื้นในดินในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีจากการประยุกต์ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมและแบบจำลองวิเคราะห์ความชื้นในดิน รวมถึงการประเมินถึงปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำแก่งกระจานจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าได้แก่แบบจำลอง SWAT และ DWCM-AgWU โดยนำข้อมูลการปฏิบัติการฝนหลวงร่วมพิจารณาในการศึกษา พร้อมทั้งการประยุกต์ข้อมูลปริมาณฝนคาดการณ์ล่วงหน้า 9 วันร่วมกับแบบจำลอง DWCM-AgWU เพื่อประเมินถึงปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงอ่างเก็บน้ำแก่งกระจานและปริมาตรน้ำในอ่างล่วงหน้า ผลการศึกษาพบว่าจากการประยุกต์ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมได้มีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนโดยใช้ข้อมูลตรวจวัดจากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตร (สกษ.) หนองพลับ พบว่ามีค่า

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.72 และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 1.8 องศาเซลเซียส และผลการประเมินพื้นที่เพาะปลูกจากข้อมูลอนุกรมเวลาภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงปี 2558-2564 จะเห็นว่ารูปแบบการเพาะปลูกพืชในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีมีพื้นที่เพาะปลูกเฉลี่ยค่อนข้างมากในช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน โดยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 8 แสน ถึง 1 ล้าน 2 แสนไร่ หลังจากนั้นในเดือนพฤศจิกายนพื้นที่เพาะปลูกจะลดลงเหลือเฉลี่ยประมาณ 1 แสนไร่ โดยเป็นพื้นที่ไม้ผล/ไม้ยืนต้นและพื้นที่เพาะปลูกในเขตโครงการชลประทานเพชรบุรี นอกจากนั้นยังได้มีการตรวจวัดความชื้นในดินจากเซนเซอร์ความชื้นในดินแบบ IoT และได้ทำการสอบเทียบเซนเซอร์แบบคาปาซิทีฟและติดตั้งในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีจำนวน 10 จุด สามารถส่งข้อมูลความชื้นในดินแบบใกล้เวลาจริง (near real-time) ทุก 15 นาที จากนั้นได้มีการเก็บตัวอย่างเพื่อประเมินถึงค่าความชื้นในดินและนำผลการตรวจวัดมาประเมินกับค่าความชื้นที่ได้จากแบบจำลองสำหรับการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน พบว่า ดัชนีการสอบเทียบโดยส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.65-0.95, NSE มีค่าเท่ากับ 0.28-0.72 และ PBIAS เท่ากับ -12.71 ถึง 5.01 ยกเว้นเพียง 1 จุดที่ผลการประเมินมีค่าค่อนข้างต่ำเนื่องจากค่าของปริมาณฝนที่ตรวจวัดมีค่าความคลาดเคลื่อนจากปริมาณฝนที่เกิดขึ้นในพื้นที่จริง และสุดท้ายแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า SWAT และ DWCM-AgWU ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินค่าปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างเก็บน้ำแก่งกระจาน โดยเมื่อพิจารณาความแตกต่างของปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นเมื่อมีไม่พิจารณาปริมาณฝนที่เกิดจากการปฏิบัติการฝนหลวงโดยพิจารณาเฉพาะพื้นที่ที่ระบุว่ามีการปฏิบัติการพบว่า ปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 22.5-35.5 ล้าน ลบ.ม. และสุดท้ายแบบจำลอง DWCM-AgWU ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับปริมาณฝนพยากรณ์เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าและปริมาตรน้ำในอ่างเก็บน้ำซึ่งพบว่ามีค่าที่สอดคล้องกับแนวโน้มของข้อมูลในอดีตที่เกิดขึ้น

3.3 ผลการวิจัยของโครงการวิจัยย่อยที่ 3 “การศึกษาผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงในการแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำ”

โครงการวิจัยย่อยที่ 3 นี้ เป็นการศึกษาผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงในการแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำในปีที่ 2 ต่อเนื่อง ซึ่งทำการศึกษาวิจัยใน 2 ประเด็น ประกอบด้วย 1) การเพิ่มเติมสถานีตรวจวัดอากาศหนองพลับและ เพิ่มข้อมูลปี พ.ศ. 2563 ในการจัดทำฐานข้อมูลและวิเคราะห์สถิติภูมิอากาศ และการศึกษาการแพร่กระจายเชิงพื้นที่ 2) การวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการปฏิบัติการฝนหลวง ผลการวิจัยการจัดทำฐานข้อมูลภูมิอากาศเพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำในบรรยากาศจากสถานีตรวจวัดภูมิอากาศ จำนวน 4 สถานี ในช่วงปี พ.ศ. 2533 ถึง 2563 ได้แก่ สถานีตรวจวัดอากาศหัวหิน เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ และหนองพลับ พร้อมทั้งการวิเคราะห์กระจายเชิงพื้นที่ของข้อมูลภูมิอากาศและปริมาณน้ำในบรรยากาศ สำหรับการวิเคราะห์โอกาสการเกิดฝนมากที่สุดจากการปฏิบัติการฝนหลวง จำนวน 211 วัน ในช่วงปี พ.ศ. 2560 ถึง 2563 พบว่าโอกาสการเกิดฝนจากการปฏิบัติการฝนหลวง ควรมีความชื้นสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ 71-90 ความเร็วลมอยู่ระหว่าง 11-20 นอต และปริมาณน้ำในบรรยากาศมีค่าระหว่าง 71-90 มม. ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการวิจัยในปีที่ผ่านมา สำหรับการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการจัดทำฝนหลวง ใช้ข้อมูลการศึกษาจากปฏิบัติการฝนหลวงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 - พ.ศ. 2564 ขอบเขตการศึกษา ประกอบด้วย ระบบการขนส่งสารฝน

หลวง การตรียมสารฝนหลวง และปฏิบัติการบินฝนหลวง ผลการศึกษาพบว่า การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเกิดจากกระบวนการเผาไหมน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเป็นมลพิษทางตรง (direct emissions) คิดเป็นร้อยละ 60 ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของปฏิบัติการฝนหลวง และเป็นการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (indirect emissions) ซึ่งติดตัวมากับทรัพยากรที่ใช้ในปฏิบัติการฝนหลวงร้อยละ 40 โดยสารฝนหลวงที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ สารฝนหลวงสูตรร้อน เช่น แคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์ ใช้ในขั้นตอนการเลี้ยงให้อ้วน และ สารฝนหลวงสูตรเย็น เช่น น้ำแข็งแห้งและยูเรีย ใช้ในขั้นตอนการโจมตี เป็นต้น โดยค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนด้วยวิธี Inverse Distance Weighted (IDW) จากฝนสถานี ตั้งแต่ปี พ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 1,599.54, 1,505.68, 567.04 และ 2,458.21 $kgCO_2$ eq/ล้านลบ.ม. ตามลำดับ, ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนเรดาร์ ตั้งแต่ปีพ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 550.73, 530.11, 258.05 และ 680.60 $kgCO_2$ eq/ล้านลบ.ม. ตามลำดับ และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนดาวเทียม (ดาวเทียม JAXA) ตั้งแต่ปีพ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 819.41, 1,185.75, 410.27 และ 660.51 $kgCO_2$ eq/ล้านลบ.ม.ตามลำดับ

3.4 ผลการวิจัยของโครงการวิจัยย่อยที่ 4 “การพัฒนาระบบช่วยตัดสินใจในการทำฝนหลวงสำหรับการวางแผนการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำเพชรบุรี”

โครงการวิจัยย่อยที่ 4 นี้ ได้พัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดทำฝนหลวง ทั้งนี้เพื่อให้ภาระกิจการทำฝนมีประสิทธิผลที่สูงยิ่งขึ้น โดยระบบสนับสนุนนี้อยู่ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน ที่นำเสนอข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจปฏิบัติการฝนหลวงในการป้องกันภัยแล้งและเติมน้ำให้เขื่อน เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติการก่อนขึ้นบินปฏิบัติการ เพื่อรายงานผลการปฏิบัติการ ตลอดจนเพื่อรายงานสรุปการขอรับบริการ

4. สรุปและข้อเสนอแนะ (Conclusion and Recommendation)

สรุปผล

แผนงานวิจัยในครั้งนี้ เป็นการศึกษาการเพิ่มผลสัมฤทธิ์และการลดความเสี่ยงในการบริหารจัดการลุ่มน้ำเพชรบุรี (ปี 2) สำหรับโครงการวิจัยย่อยที่ 1 เป็นการประเมินผลสัมฤทธิ์ของการทำฝนหลวงโดยการตรวจสอบจากปริมาณฝนที่ตรวจวัดได้จากสถานีวัดน้ำฝนภาคพื้นดินของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ซึ่งเป็นค่าปริมาณฝนรายชั่วโมง นำมาค่าหาสะสมรายครึ่งวันโดยใช้ระยะเวลาที่ครอบคลุมการขึ้นบินทำปฏิบัติการและช่วงเวลาที่จะเกิดฝนตกหลังจากปฏิบัติการในช่วง 09.00 – 21.00 น. เนื่องจากระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้จัดเก็บข้อมูลมีข้อจำกัด ไม่สามารถดึงข้อมูลฝนกริดเรดาร์เป็นรายชั่วโมงได้ สามารถดึงข้อมูลได้เพียงแค่ช่วงเวลาดังกล่าว และอยู่ระหว่างการปรับเปลี่ยนระบบคอมพิวเตอร์ในอนาคตน่าจะสามารถดึงข้อมูลย้อนหลังเป็นรายชั่วโมงได้ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณฝนเฉลี่ยรายครึ่งวันซึ่งได้จากเรดาร์ที่อยู่ในรูปของกริด มีการกระจายตัวตามพื้นที่หวังผลสัมฤทธิ์ของแต่ละปฏิบัติการ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ถือว่าข้อมูลฝนจากเรดาร์มีความถูกต้อง แม่นยำ ใช้เป็นข้อมูลปริมาณฝนอ้างอิงในการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์การทำฝนหลวงได้

จากผลการศึกษาในปีที่ 1 ข้อมูลปฏิบัติการฝนหลวงจำนวน 148 ข้อมูล ในช่วงปี พ.ศ.2561 - ปี พ.ศ. 2563 ที่ได้รับจากกรมฝนหลวงและการบินเกษตร เมื่อนำมาคัดเลือกเฉพาะแนวบินที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี คงเหลือ 108 ข้อมูล จำนวนวันฝนตก 175 วัน ไม่มีฝนตก 3 วัน ผลการเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคพื้นดินให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ r เท่ากับ 0.21 อันเนื่องมาจากแนวบินส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ตอนบนของลุ่มน้ำ โดยมีเป้าหมายเพื่อการเติมน้ำให้กับเขื่อนแก่งกระจานเป็นสำคัญ แต่ในบริเวณดังกล่าว สถานีตรวจวัดน้ำฝนภาคพื้นดินมีการกระจายตัวที่ไม่ครอบคลุมและเพียงพอ คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งสถานีวัดน้ำฝนและข้อมูลภูมิอากาศเพิ่มเติมในบริเวณพื้นที่ตอนบน จำนวน 4 สถานี ได้แก่ สถานีบ้านกร่างแคมป์ ต.ห้วยแม่เพรียง สถานีโรงเรียนบ้านพุเข็ม ต.แก่งกระจาน สถานีโรงเรียนบ้านพุสวรรค์ ต.พุสวรรค์ อ.แก่งกระจาน และ สถานีโรงเรียนบ้านท่าเสลา ต.ยางน้ำกลัดเหนือ อ.หนองหญ้าปล่อง จ.เพชรบุรี

จากผลการศึกษาในปีที่ 2 ข้อมูลปฏิบัติการฝนหลวงในปี พ.ศ.2564 จำนวน 93 ปฏิบัติการ เมื่อนำมาคัดเลือกเฉพาะแนวบินที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี คงเหลือ 71 ปฏิบัติการ พบว่า ผลการเปรียบเทียบกันระหว่างข้อมูลฝนเรดาร์และข้อมูลฝนเฉลี่ยเชิงพื้นที่จากข้อมูลฝนภาคพื้นดินและเพิ่มเติม 4 สถานีที่ติดตั้งใหม่ จะให้ค่าสหสัมพันธ์ดีขึ้นกว่ากรณีที่ไม่นำข้อมูลฝนสถานีทั้ง 4 สถานีมาพิจารณาด้วย และเมื่อพิจารณาเป็นปริมาณฝนสะสมรายเดือน พบว่า ค่าฝนสะสมรายเดือนจากข้อมูลฝนภาคพื้นดินและเพิ่มเติม 4 สถานีที่ติดตั้งใหม่ จะใกล้เคียงกับฝนเรดาร์สะสมรายเดือนมากกว่าตลอดช่วงเวลา 7 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายนของข้อมูลในปี พ.ศ. 2564 ซึ่งความสัมพันธ์ที่ดีขึ้นของการเพิ่มเติมจุดตรวจวัดน้ำฝนบริเวณตอนต้นและตอนกลางของลุ่มน้ำเพชรบุรีในปีที่ 1 นี้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ในปีที่ 1 ซึ่งเป็นการทวนสอบผลจากข้อมูลการตรวจจริงในปีที่ 2 นี้ ซึ่งนับว่ามีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นจากผลการศึกษาในปีที่ 1 และยังพบว่า ใน

บริเวณตอนบนของลุ่มน้ำซึ่งเป็นพื้นที่ที่เป้าหมายในการทำฝนหลวงเพื่อเติมน้ำลงเขื่อนแก่งกระจานเป็นหลัก ตลอดทั้งสี่ปีที่รวบรวมข้อมูลได้ (ปี พ.ศ.2561 ถึงปี พ.ศ.2564)

สำหรับการปรับปรุงการประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงกับฝนภาคพื้นดินในลุ่มน้ำเพชรบุรี คณะวิจัยเสนอแนะให้นำข้อมูลฝนเฉลี่ยเชิงพื้นที่จากข้อมูลภาคพื้นดินที่ดีขึ้นนี้ไปปรับปรุงการแปลผลของสมการความสัมพันธ์ Z-R relationship ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตรได้ต่อไป ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ในปี 2564 สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) ได้จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการพัฒนาระบบประเมินปริมาณน้ำฝนและพยากรณ์ฝนล่วงหน้า โดยใช้ข้อมูลเรดาร์ตรวจอากาศ ระยะที่ 3 ซึ่งเสนอให้กรมฝนหลวงและการบินเกษตร ได้ปรับข้อมูลเรดาร์ตรวจอากาศจากสถานีเรดาร์ฝนหลวงสัตหีบ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี จากสมการความสัมพันธ์ Z-R ที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันคือ $Z = 300R^{1.4}$ มาใช้เป็นสมการปรับปรุงใหม่ $Z = 170\ R^{1.6}$ มีความแม่นยำมากกว่าการใช้สมการอื่นๆ ของทั้งเหตุการณ์ฝนที่ใช้ในการสอบเทียบและทวนสอบในปี พ.ศ.2559 ถึงปี พ.ศ.2563

สำหรับโครงการวิจัยย่อยที่ 2 ซึ่งเป็นนำข้อมูลฝนที่วิเคราะห์ได้จากโครงการวิจัยที่ 1 มาวิเคราะห์ต่อในด้านความชื้นในดินและการเกิดปริมาณน้ำท่าจากน้ำฝน ซึ่งสรุปผลการศึกษาเป็น 3 ด้าน ได้แก่

1) ผลการประเมินความชื้นในดินจากข้อมูลผลิตภัณฑ์ภาพถ่ายจากดาวเทียม Terra/MODIS คำนวนดัชนีความแห้งแล้งด้านการเกษตรด้วยวิธี Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) เป็นการศึกษาวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยในปีที่ 1 โดยเน้นไปที่การปรับปรุงและปรับแก้ความคลาดเคลื่อนข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม การกำหนดพื้นที่เพาะปลูก การแปลผลดัชนี TVDI และการตรวจวัดความชื้นในดินจากเซนเซอร์ความชื้นในดินแบบ IoT โดยผลการวิจัยพบว่าการปรับปรุงข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมด้วยการเติมเต็มข้อมูลในส่วนที่ขาดหาย (gap-filling) ซึ่งจากงานวิจัยในปีที่ 1 พบว่าข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) ไม่สมบูรณ์เพียงพอสำหรับใช้งาน ในงานวิจัยในปีที่ 2 นี้ได้ใช้เทคนิค Temporal Fourier Analysis (TFA) เพื่อสร้างข้อมูลใหม่ (reconstruct) จากนั้นตรวจสอบความน่าเชื่อถือและปรับแก้ความคลาดเคลื่อนโดยใช้ข้อมูลตรวจวัดจากสถานีอุตุนิยมวิทยาเกษตร (สกษ.) หนองพลับ พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.72 และรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 1.8 องศาเซลเซียส และผลการประเมินพื้นที่เพาะปลูกจากข้อมูลอนุกรมเวลาภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงปี พ.ศ.2558-2564 จะเห็นว่ารูปแบบการเพาะปลูกพืชในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีมีพื้นที่เพาะปลูกเฉลี่ยค่อนข้างมากในช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน โดยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 8 แสน ถึง 1 ล้าน 2 แสนไร่ หลังจากนั้นในเดือนพฤศจิกายนพื้นที่เพาะปลูกจะลดลงเหลือเฉลี่ยประมาณ 1 แสนไร่ โดยเป็นพื้นที่ไม้ผล/ไม้ยืนต้นและพื้นที่เพาะปลูกในเขตโครงการชลประทานเพชรบุรี นอกจากนั้นยังได้มีการตรวจวัดความชื้นในดินจากเซนเซอร์ความชื้นในดินแบบ IoT ได้ทำการสอบเทียบเซนเซอร์แบบคาปาซิทีฟและติดตั้งในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีจำนวน 10 จุด สามารถส่งข้อมูลความชื้นในดินแบบใกล้เวลาจริง (near real-time) ทุก 15 นาที

2) ผลจากการประเมินค่าความชื้นโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองวิเคราะห์ค่าความชื้นโดยการนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดค่าความชื้นภาคสนามในพื้นที่นอกเขตชลประทานจำนวน 5 พื้นที่ พบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองของตำแหน่งที่ตรวจวัดโดยส่วนใหญ่มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าตรวจวัดในภาคสนาม โดยมีการประเมินด้วยการใช้ดัชนีสอบเทียบจำนวน 5 ดัชนี ได้แก่ R_2, RMSE, ARE, PBIAS และ NSE พบว่า ตำแหน่งที่ตรวจวัดโดยส่วนใหญ่ 4 สถานีจาก 5 สถานี มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.65-0.95, 2.37-4.82%, 6.58-27.51, -12.71 ถึง 3.67 และ 0.28-0.72 ตามลำดับ โดยมีเพียงหนึ่งตำแหน่งตรวจวัดที่มีค่าไม่เป็นไปตามที่ตรวจวัดได้จากภาคสนามซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบแล้วพบว่าในช่วงเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างมีการเกิดฝนในพื้นที่แต่จากข้อมูลปริมาณฝนพบว่าไม่มีปริมาณฝนเกิดขึ้นในพื้นที่ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการตรวจวัด

3) ผลจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า SWAT และ DWCM เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าไหลลงอ่างเก็บน้ำแก่งกระจานพบว่าแบบจำลองประเมินปริมาณน้ำท่ารายปีในช่วงปี 2018-2021 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 5% และ 17% จากแบบจำลอง SWAT และ DWCM ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นเมื่อไม่พิจารณาปริมาณฝนที่เกิดจากการปฏิบัติการฝนหลวงโดยพิจารณาเฉพาะพื้นที่ที่ระบุว่ามีการปฏิบัติการพบว่า ปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลง โดยแบบจำลอง SWAT จะมีค่าความแตกต่างของปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเท่ากับ 35.5 ล้าน ลบ.ม. ในขณะที่แบบจำลอง DWCM จะมีความแตกต่างเท่ากับ 22.5 ล้าน ลบ.ม.

นอกจากการประเมินถึงปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้นตั้งแต่อดีต-ปัจจุบันแล้ว การศึกษาครั้งนี้ยังได้มีการพัฒนาระบบเพื่อให้สามารถคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในอนาคตล่วงหน้า 9 วันได้ โดยการประยุกต์ใช้ข้อมูลปริมาณฝนพยากรณ์จากกรมอุตุนิยมวิทยาร่วมกับแบบจำลอง DWCM ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีลักษณะเป็น Distributed model มาใช้ในการคาดการณ์ โดยผลจากการคาดการณ์พบว่าปริมาณน้ำท่าล่วงหน้า 9 วันมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลตั้งแต่อดีต – ปัจจุบัน ซึ่งข้อมูลการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ายังสามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อประเมินถึงปริมาตรน้ำคงเหลือในอ่างเก็บน้ำ โดยการพิจารณาร่วมกับข้อมูลการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ระดับน้ำควบคุมตอนบน (Upper Rule Curve, URC) ระดับน้ำควบคุมตอนล่าง (Lower Rule Curve, LRC) และเส้นเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำอ้างอิง (Long-term Benchmark Curve, LBC) ซึ่งเป็นกณฑ์เฉลี่ยทางสถิติของเส้นการบริหารจัดการน้ำในอดีตเพื่อใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการน้ำ จะสามารถนำมาช่วยเป็นข้อมูลสนับสนุนในการบริหารจัดการน้ำในช่วงระยะเวลาใกล้ รวมถึงเป็นข้อมูลสนับสนุนการประเมินถึงสถานการณ์ในการปฏิบัติการฝนหลวงได้ต่อไปในอนาคต

สำหรับโครงการวิจัยย่อยที่ 3 ซึ่งเป็นการศึกษาผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงในการแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำ ซึ่งสรุปผลการศึกษาเป็น 2 ด้าน ได้แก่

1) ผลการวิเคราะห์ตัวแปรภูมิอากาศและปริมาณน้ำในบรรยากาศสำหรับการทำฝนหลวง จากข้อมูลสถานีตรวจวัดทั้ง 4 สถานี พบว่า จากข้อมูลรายวันช่วงปี พ.ศ.2560-2563 ในวันที่ปฏิบัติการฝนหลวง พบว่าความชื้นสัมพัทธ์สำหรับส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความชื้นสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละ 71-90 ความเร็วลม ส่วนใหญ่อยู่

ในช่วงความเร็วลมระหว่าง 11-20 นอต สำหรับปริมาณน้ำในบรรยากาศเฉลี่ย ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง 71-90 มม. และปริมาณน้ำในบรรยากาศสูงสุด ส่วนใหญ่ อยู่ในช่วงระหว่าง 81-100 มม.

2) การประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามแนวทางของการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของปฏิบัติการฝนหลวง ครอบคลุมขอบเขตการประเมินตั้งแต่การขนส่งวัตถุดิบจนกระทั่งสิ้นสุดปฏิบัติการฝนหลวง สามารถสรุปได้ดังนี้

2.1) การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เกิดจากกระบวนการเผาไหมน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเป็นมลพิษทางตรง (direct emissions) คิดเป็นร้อยละ 60 ของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของปฏิบัติการฝนหลวง และเป็นการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม (indirect emissions) ซึ่งติดตัวมากับทรัพยากรที่ใช้ในปฏิบัติการฝนหลวงร้อยละ 40 ดังนั้น ประสิทธิภาพของอากาศยาน การตัดสินใจขึ้นบินปฏิบัติการ รูปแบบการปฏิบัติการ เป็นประเด็นสำคัญ ซึ่งสามารถส่งผลต่อประสิทธิผลของปฏิบัติการฝนหลวงและผลกระทบต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรง

2.2) การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทางอ้อม (indirect emissions) ซึ่งติดตัวมากับทรัพยากรที่ใช้ในปฏิบัติการฝนหลวงมากน้อยแตกต่างกันเนื่องจากสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกแตกต่างกัน และปริมาณสารที่ใช้ในปฏิบัติการฝนหลวงแตกต่างกัน โดยสารฝนหลวงที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ สารฝนหลวงสูตรร้อน เช่น แคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมคลอไรด์ ใช้ในขั้นตอนการเลี้ยงให้อ้วน และ สารฝนหลวงสูตรเย็น เช่น น้ำแข็งแห้งและยูเรีย ใช้ในขั้นตอนการโจมตี เป็นต้น

2.3) การเลือกใช้สารฝนหลวง การควบคุมปริมาณการใช้สารฝนหลวง ส่งผลต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวง หากปรับปรุงการใช้สารฝนหลวงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นหรือการเลือกใช้สารฝนหลวงซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ สามารถช่วยลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงลงได้ และวิธีการประเมินปริมาณฝนที่ได้จากปฏิบัติการฝนหลวงส่งผลโดยตรงต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงเช่นกัน โดยค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนด้วยวิธี Inverse Distance Weighted (IDW) จากฝนสถานี ตั้งแต่ปี พ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 1,599.54, 1,505.68, 567.04 และ 2,458.21 $kgCO_2$ eq/ล้านลบ.ม. ตามลำดับ, ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนเรดาร์ตั้งแต่ปีพ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 550.73, 530.11, 258.05 และ 680.60 $kgCO_2$ eq/ล้านลบ.ม. ตามลำดับ และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของฝนหลวงที่ประเมินจากปริมาณฝนดาวเทียม (ดาวเทียม JAXA) ตั้งแต่ปีพ.ศ.2561 - พ.ศ.2564 มีค่าเท่ากับ 819.41, 1,185.75, 410.27 และ 660.51 $kgCO_2$ eq/ล้านลบ.ม.ตามลำดับ

สำหรับโครงการวิจัยย่อยที่ 4 ซึ่งได้พัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดทำฝนหลวงที่อยู่ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันที่นำเสนอข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจปฏิบัติการฝนหลวงในการป้องกันภัยแล้งและเติมน้ำให้เขื่อน โดยแบ่งเป็นการสนับสนุนการปฏิบัติการก่อนขึ้นบินปฏิบัติการ การจัดทำรายงานผลการปฏิบัติการ และการจัดทำรายงานสรุปการขอรับบริการ และเพื่อให้ผลการวิจัยแพร่หลายและสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิผลแก่การปฏิบัติการฝนหลวงได้ ระบบควรมีการนำไปใช้จริงและมีการติดตามปัญหาเพื่อปรับปรุงและเพิ่มความฉลาดให้กับระบบผู้เชี่ยวชาญ โดยทั้งหมดนี้ เพื่อประโยชน์แก่ประชาชนและเกษตรกรบริเวณลุ่มน้ำเพชรบุรี และควรขยายผลสู่ภูมิภาคอื่นๆ ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

การดำเนินแผนงานวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์โดยรวม อย่างไรก็ตาม มีข้อเสนอแนะดังนี้

1) คณะวิจัยเสนอแนะให้กรมฝนหลวงและการบินเกษตรปรับมาใช้สมการความสัมพันธ์ Z-R จากที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันคือ $Z = 300\ R^{1.4}$ มาเป็นสมการ $Z = 170\ R^{1.6}$ ที่ได้จากงานวิจัยของ สสน. (2564) จะช่วยให้ฝนกริดเรดาร์มีค่าใกล้เคียงกับฝนภาคพื้นดินมากยิ่งขึ้น และทำให้การประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงกับฝนภาคพื้นดินในลุ่มน้ำเพชรบุรี มีค่าความแม่นยำมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย

2) ควรมีการศึกษาวิจัยในพื้นที่วิจัยอื่นที่มีสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศที่แตกต่างกันเพิ่มเติมเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพปฏิบัติการบินฝนหลวงต่อไป

3) ควรมีการศึกษาทบทวนประเด็นทรัพยากรหรือสารฝนหลวงที่ใช้ในปฏิบัติการฝนหลวงต่อประสิทธิภาพของปฏิบัติการฝนหลวงอย่างเป็นระบบโดยอาจรวมประเด็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มเติมเข้าไปพิจารณาด้วย

4) ควรมีการศึกษาเพื่อหาข้อสรุปของวิธีการประเมินฝนที่ได้จากปฏิบัติการฝนหลวง เพื่อให้เกิดแนวทางการประเมินประสิทธิภาพของปฏิบัติการฝนหลวง และการนำผลที่ได้ไปใช้ในการศึกษาวิจัยต่อยอดอย่างเป็นระบบเดียวกันได้

5) โครงการวิจัยย่อยที่ 4 ซึ่งอยู่ภายใต้แผนการวิจัย การเพิ่มผลสัมฤทธิ์และการลดความเสี่ยงในการบริหารจัดการน้ำลุ่มน้ำเพชรบุรีด้วยฝนหลวง (ปี 2) และต้องใช้ข้อมูลนำเข้าจากโครงการวิจัยย่อยอื่นๆ ภายใต้แผนงานวิจัยเดียวกัน ดังนั้น การดำเนินงานค่อนข้างยาก เนื่องจากโครงการวิจัยย่อยอื่นๆ ไม่สามารถให้ข้อมูลได้หรือให้ข้อมูลล่าช้าอันเกิดจากอยู่ระหว่างดำเนินโครงการเช่นกัน ดังนั้น หากโครงการนี้จัดทำหลังจากโครงการอื่นเสร็จสิ้น หรือ เหลื่อมระยะเวลาอาจจะได้ประสิทธิพลที่ดีขึ้น

6) การจัดเก็บข้อมูลจากผู้ใช้บริการต่างๆ เช่น ข้อมูลสภาพอากาศจาก JAXA และกรมอุตุนิยมวิทยา เป็นต้น มีปัญหาในเชิงเทคนิคค่อนข้างมาก เนื่องจากการเชื่อมต่อที่ไม่เสถียร การบริการข้อมูลมีปัญหาในส่วนผู้ให้บริการในบางครั้ง รวมทั้งพิกัดภูมิศาสตร์ของ 2 แหล่งข้อมูลไม่ตรงกัน โครงการวิจัยได้จัดการปัญหาเหล่านั้น

โดยใช้ระบบจัดเก็บอัตโนมัติ เพื่อตรวจสอบผลการจัดเก็บข้อมูลและทำซ้ำหากไม่สามารถจัดเก็บข้อมูลได้ แต่อย่างไรก็ตามบางข้อมูลก็ไม่สามารถจัดเก็บได้เป็นระยะยาวนานเป็นสัปดาห์

7) การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันต้องทำหลายรอบ เนื่องจากทีมวิจัยมีความรู้และความเข้าใจเรื่องปฏิบัติการฝนหลวงและการจัดการน้ำค่อนข้างน้อยในช่วงแรกส่งผลให้การออกแบบต้นแบบเว็บแอปพลิเคชันไม่ตอบสนองผู้ใช้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการประชุมและนำเสนอแก่ผู้ใช้ และปรับแก้ไขตามผู้ทรงคุณวุฒิเสนอในการนำเสนอความก้าวหน้างานวิจัย ก็ส่งให้ให้การดำเนินการต่างๆ เร็วขึ้น

8) การออกแบบระบบผู้เชี่ยวชาญ ยังคงใช้การออกแบบ state machine เพื่อให้ระดับคะแนนความต้องการน้ำและคะแนนสภาพอากาศชั้นบน ตามเอกสารของกรมฝนหลวงและยังไม่มีการคอมพิวเตอร์สร้างโมเดลในการทำนายหรือให้ระดับคะแนนโดยใช้เทคนิค supervised learning และ unsupervised learning เนื่องจากยังมีจำนวนข้อมูลในการปฏิบัติการค่อยข้างน้อยและยังไม่สมบูรณ์ หากมีการใช้ระบบนี้ไปเรื่อยๆ มีข้อมูลนำเข้าเรื่อยๆ จะสามารถสร้างโมเดลในการทำนายหรือให้ระดับคะแนนโดยใช้เทคนิค supervised learning และ unsupervised learning ได้

5. เอกสารอ้างอิง (References)

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) (2555). การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลโครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง: ลุ่มน้ำเพชรบุรี. สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) , กรุงเทพฯ.

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์กรมหาชน). 2555. การดำเนินการด้านการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลโครงการพัฒนาระบบคลังข้อมูล 25 ลุ่มน้ำ และแบบจำลองน้ำท่วมน้ำแล้ง: ลุ่มน้ำเพชรบุรี. กุมภาพันธ์ 2555.

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) (2563). รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการพัฒนาระบบประเมินปริมาณน้ำฝนและพยากรณ์ฝนล่วงหน้า โดยใช้ข้อมูลเรดาร์ตรวจอากาศ ระยะที่ 3. สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) , กรุงเทพฯ.

สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (2563). การประเมินผลสัมฤทธิ์ของฝนหลวงกับฝนภาคพื้นดินในลุ่มน้ำเพชรบุรี. สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) , กรุงเทพฯ.

ภาคผนวก ก

การชี้แจงข้อคิดเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ

<u>สรุปการประชุมติดตามและประเมินผลโครงการการเพิ่มผลสัมฤทธิ์และการลดความเสี่ยงในการบริหารจัดการน้ำลุ่มน้ำเพชรบุรีด้วยฝนหลวง (ปี 2)</u>

วันที่ 26 ม.ค. 65 การประชุมออนไลน์ผ่านโปรแกรม Zoom : ประชุมติดตามและประเมินผลรายงานความก้าวหน้ารอบ 9 เดือน

หัวหน้าโครงการวิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ **หน่วยงาน** : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระยะเวลาดำเนินการ : 1 ปี 0 เดือน

ผู้ทรงคุณวุฒิ : นายสมชาย ใบม่วง, นายเลอศักดิ์ ริ้วตระกูลไพบูลย์, นายวัฒนา สุกาญจนาเศรษฐ์, นายชลิต ดำรงศักดิ์, นายสมภพ สุจริต

<u>สรุปดังนี้</u>

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะจากที่ประชุม	การปรับแก้ไข/ชี้แจงรายละเอียด
1. ผลลัพธ์สุดท้ายของโครงการย่อยที่ 4 ที่ได้รวบรวมข้อมูลจากโครงการย่อยที่ 1-3 ในเรื่องของโปรแกรมช่วยตัดสินใจ อยากให้นำไปลองทดสอบ ว่าขบวนการนี้จะไปช่วยตัดสินใจการปฏิบัติงานทำฝนในช่วงนั้นอย่างไร ดูว่าสอดคล้องกันหรือไม่	ได้สรุปผลการศึกษาจะอยู่ในส่วนของงานวิจัยย่อยที่ 4
2. โครงการย่อยที่ 1 ถ้าหากมีโครงการต่อเนื่อง อยากให้ใช้เรดาร์จุดที่ใกล้ที่สุด เพื่อความแม่นยำของข้อมูล	คณะวิจัยได้ประสานขอข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาแล้ว แต่ข้อมูลที่ได้รับมีค่อนข้างน้อย และจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า มีการปรับปรุงค่า Z-R โดย สสน. ในปี 2564 โดยเสนอแนะให้เปลี่ยนสมการจาก $Z = 300\ R^{1.4}$ เป็นสมการ $Z = 170\ R^{1.6}$
3. โครงการย่อยที่ 2 การเปรียบเทียบข้อมูล LSD ให้ใช้อุณหภูมิที่พื้นผิวดิน เหมือนกันทุกปัจจัย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกัน	ได้ปรับแก้ข้อมูลตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว
4. เรื่องของฝน ให้ใช้เป็นฝนในพื้นที่ปฏิบัติการ และฝนนอกพื้นที่ปฏิบัติการ	ได้ปรับแก้ข้อมูลตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว
5. ฝนดาวเทียม กับฝนราย 9 วัน จากที่คำนวนมามีค่าสูงตลอด หากนำไปใช้ในโครงการย่อยที่ 4 จะมีวิธีการปรับอย่างไร แนะนำให้ใช้ราย 5 วัน 7 วัน จะดีกว่าหรือไม่	ได้สรุปผลการศึกษาจะอยู่ในส่วนของงานวิจัยย่อยที่ 2
6. โครงการย่อยที่ 3 มีข้อเสนอแนะในการลดปริมาณ carbon footprint ในแต่ละการปฏิบัติการต้องมีวิธีการอย่างไร เพื่อให้เป็นแนวทางให้กับกรมฝนหลวงและการบินเกษตร	ได้สรุปผลการศึกษาจะอยู่ในส่วนของงานวิจัยย่อยที่ 3

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะจากที่ประชุม	การปรับแก้ไข/ชี้แจงรายละเอียด
7. โครงการย่อยที่ 4 เป็นระบบช่วยตัดสินใจ ใน(ร่าง)รายงานตอนนำเสนอ อยากให้เปิด website ให้ดู และทดสอบให้ดูจริง	รับไปดำเนินการต่อไป
8. การทดสอบข้อมูลก่อนบิน ระหว่างบิน และหลังบิน ในปี พ.ศ.2564 ว่าฐานข้อมูลที่ได้ช่วยได้กี่เปอร์เซนต์	ได้สรุปผลการศึกษาจะอยู่ในส่วนของงานวิจัยย่อยที่ 4
9. ทำโปรแกรม training ให้กับกรมฝนหลวงและการบินเกษตร	รับไปดำเนินการต่อไป
10. ยังขาดข้อมูลเรื่องของโลจิสติกส์ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวนและแผนการจัดซื้อจัดจ้างสารฝนหลวง และขนส่งไปยังแต่ละศูนย์	ข้อมูลในส่วนนี้ไม่สามารถรวบรวมได้

<u>สรุปการประชุมติดตามและประเมินผลโครงการการเพิ่มผลสัมฤทธิ์และการลดความเสี่ยงในการบริหารจัดการน้ำลุ่มน้ำเพชรบุรีด้วยฝนหลวง (ปี 2)</u>

วันที่ 25 กรกฎาคม 2565

การประชุมออนไลน์ผ่านโปรแกรม Zoom : ประชุมติดตามและประเมินผลรายงานฉบับสมบูรณ์

หัวหน้าโครงการวิจัย : ผศ.ดร.วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ

หน่วยงาน : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระยะเวลาดำเนินการ : 1 ปี 0 เดือน

ผู้ทรงคุณวุฒิ : นายสมชาย ใบม่วง, นายเลอศักดิ์ ริ้วตระกูลไพบูลย์, นายชลิต ดำรงศักดิ์, นายวัฒนา สุกาญจนาเศรษฐ์, นายสมภพ สุจริต

<u>สรุปดังนี้</u>

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะจากที่ประชุม	การปรับแก้ไข/ชี้แจงรายละเอียด (ระบุหน้าที่ปรับแก้ไข)
1. ผลลัพธ์ของโครงการวิจัยย่อยที่ 4 จะสมบูรณ์มากขึ้น ต้องมีข้อมูลจากโครงการย่อยที่ 1-3 ที่สมบูรณ์มาสนับสนุน	ได้ดำเนินการปรับระบบเวบแสดงผลแล้ว
2. แนะนำกรมฝนหลวงตั้งคณะกรรมการประเมินการใช้งานเว็บแอปพลิเคชัน ทดลองการใช้ข้อมูล และทำการประเมินกลับเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไข	ได้มีการนัดประชุมครั้งแรกกับคณะวิจัยไปแล้วเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม 2565
3. เมื่อผู้ใช้งานได้ทดลองใช้แล้ว มีข้อควรปรับปรุง ใครจะเป็นผู้ดูแลปรับปรุง	คณะวิจัยจะร่วมปรับปรุงกับคณะกรรมการที่ทางกรมฝนหลวงและการบินเกษตรตั้งขึ้นมา
4. การแสดงข้อมูลบนเว็บแอปพลิเคชันค่อนข้างซับซ้อน ต้องมีการนำเสนอข้อมูลที่หลากหลายตามกลุ่มเป้าหมายผู้ใช้งาน (กรมฝนหลวง, ประชาชน) ที่จะดึงข้อมูลไปใช้ประโยชน์ และต้องใช้งานง่าย	ได้ปรับแก้ให้เป็นไปตามความต้องการของกรมฝนหลวงและการบินเกษตรแล้ว
5. โครงการวิจัยย่อยที่ 3 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการปฏิบัติการฝนหลวงอยู่ในเกณฑ์ใดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน (ถ้ามี)	ไม่สามารถระบุได้ในขณะนี้เนื่องจากยังไม่มีการประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และยังไม่มีการกำหนดเกณฑ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปฏิบัติการฝนหลวง อย่างไรก็ตาม ในอนาคตอาจสามารถดำเนินการได้โดยข้อมูลจากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ (benchmark) สำหรับปฏิบัติการฝนหลวงในอนาคตเพื่อกำหนด

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะจากที่ประชุม	การปรับแก้ไข/ชี้แจงรายละเอียด (ระบุหน้าที่ปรับแก้ไข)
	แนวทางในการควบคุมหรือลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อไปได้ทั้งในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีและพื้นที่อื่นๆ (รายละเอียดได้เพิ่มเติมไว้ในรายงานดังปรากฏในหน้าที่ 3-78 ถึง 3-79 และ 3-81 ของโครงการวิจัยย่อยที่ 3)
6. การใช้ข้อมูลจาก 3 แหล่ง (ดาวเทียม, สถานี, เรดาร์) จะเชื่อมโยงกันอย่างไร ซึ่งข้อมูลจากเรดาร์จะมีความแม่นยำเรื่องฝนมาก	ในโครงการย่อยที่ 2 จากการเริ่มต้นดำเนินงานในปีที่หนึ่งของงานวิจัยเป็นการนำข้อมูลฝนจากทั้ง 3 แหล่งที่แตกต่างกันเนื่องด้วยข้อจำกัดของลักษณะข้อมูล ระยะเวลาที่มีข้อมูลและการเข้าถึงข้อมูลที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าโดยแบบจำลอง SWAT และ DWCM-AgWU โดยได้มีการปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลองจากข้อมูลฝนทั้ง 3 แหล่ง และสรุปประเมินปริมาณน้ำท่าที่เกิดขึ้น ซึ่งในการดำเนินงานในปีที่ 2 ยังคงมีการเปรียบเทียบจากการใช้ข้อมูลจากทั้ง 3 แหล่งต่อเนื่องควบคู่ไปกับการดำเนินงานทั้งในส่วนของการประเมินปริมาณน้ำท่าจากฝนพยากรณ์ และการประเมินความชื้นในดิน (ระบุรายละเอียดเพิ่มเติมในหน้า 3-3 ของโครงการวิจัยย่อยที่ 2)
7. การเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์ ให้เพิ่มผลการทดลองของปีที่ 1 ด้วย ร้อยเรียงข้อมูลให้ครบถ้วน เพื่อให้ผู้อ่านหรือผู้ที่จะนำงานวิจัยไปใช้ได้เข้าใจงานมากขึ้น	ได้ดำเนินการทุกโครงการแล้ว
8. ปรับแก้บทคัดย่อ (ภาษาไทย/ภาษาอังกฤษ) มีไม่ครบในทุกโครงการ/โครงการย่อย	ได้จัดทำบทคัดย่อ และ Abstract ทุกโครงการแล้ว

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะจากที่ประชุม	การปรับแก้ไข/ชี้แจงรายละเอียด (ระบุหน้าที่ปรับแก้ไข)
9. โครงการวิจัยย่อยที่ 4 ข้อมูลสถานีเรดาร์ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตรในตารางที่ 1 หน้า 3 ไม่ถูกต้อง (ชื่อหน่วยงาน และ สถานที่ตั้ง)	แก้ไขแล้ว ในตารางที่ 1 หน้า 3 ของโครงการวิจัยย่อยที่ 4
10. การประเมินประสิทธิภาพ และประสิทธิผลเป็นอย่างไร มีจุดอ่อน จุดแข็ง มีข้อเสนอแนะอย่างไร	เขียนอธิบายไว้แล้วในส่วนของรายงานแผนงานวิจัย ในส่วนของหัวข้อสรุปและข้อเสนอแนะ ในหน้าที่ 23 ถึงหน้าที่ 28
11. การดึงข้อมูลมาใช้ในเว็บแอปพลิเคชัน ให้ใช้ข้อมูลจากหลายส่วนหลายหน่วยงาน ที่นอกจากแจ็คซ่า	ได้สรุป API ต่างๆ ที่ใช้ในโครงการวิจัย ในตารางที่ 3 หน้า 12 ของโครงการวิจัยย่อยที่ 4
12. แนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์	ได้สรุปผลแนวทางการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์แล้วตามแบบฟอร์มประเมินผลการวิจัยในการนำไปใช้ประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรมที่ได้รับการจัดสรรงบประมาณรายโครงการ