

# การใช้น้ำของพืช

ทฤษฎีและการประยุกต์

## Crop Evapotranspiration

Theory and Applications

โดย

ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ โหมสิตสกุลชัย

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม

2552

เอกสิทธิ์ โหมลิตสกุลชัย  
การใช้น้ำของพืช: ทฤษฎีและการประยุกต์

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2552

ภาพปก

Source: <http://www.flickr.com/photos/jurvetson/1602360>

# คำนำ

ปริมาณการใช้น้ำของพืช เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับงานด้านวิศวกรรมชลประทาน การวางแผนและการจัดการชลประทาน “การใช้น้ำของพืช: ทฤษฎีและการประยุกต์” เป็นตำราที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประกอบการสอนในวิชา “วิศวกรรมชลประทานเบื้องต้น” สำหรับนิสิตในระดับปริญญาตรี และสามารถใช้เป็นเอกสารอ่านประกอบสำหรับวิชา “วิทยาศาสตร์การชลประทาน” และวิชา “การจัดการชลประทาน ในแปลงเพาะปลูก” สำหรับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษาในสาขาวิศวกรรมชลประทาน

เนื้อหาในตำราแบ่งเป็น 4 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นหลักการพื้นฐาน โดยในบทแรกเป็นแนวคิดพื้นฐานเรื่องการระเหยน้ำ และการใช้น้ำของพืช ส่วนบทที่ 2 กล่าวถึงข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่ใช้สำหรับหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ได้แก่ พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation) อุณหภูมิอากาศ (air temperature) ความชื้นในอากาศ (air humidity) และความเร็วลม (wind speed) ในส่วนที่ 2 เป็นการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยวิธีของ FAO-56 ประกอบด้วย บทที่ 3 การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ด้วยสมการ FAO Penman-Monteith และ โดยข้อมูลจากถาดวัดการระเหย ในบทที่ 4 เป็นการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน เนื้อหาในส่วนที่ 3 เป็นการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ CROPWAT และท้ายสุด ส่วนที่ 4 นำเสนอการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยเทคนิคการสำรวจระยะไกล



# สารบัญ

คำนำ.....	i
สารบัญ .....	iii
สารบัญภาพ.....	vii
สารบัญตาราง .....	xi
ส่วนที่ 1 หลักการพื้นฐาน .....	1
1. แนวคิดเรื่องการระเหยน้ำ และ การใช้น้ำของพืช .....	3
1.1 กระบวนการระเหยน้ำ (Evaporation Process) .....	3
ก. การคายน้ำ (transpiration).....	6
ข. การระเหยคายน้ำหรือการใช้น้ำของพืช (evapotranspiration) .....	7
1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้น้ำของพืช .....	8
ก. ปัจจัยทางด้านภูมิอากาศ .....	8
ข. ปัจจัยทางด้านพืช .....	9
ค. สภาพสิ่งแวดล้อมและการจัดการ .....	9
1.3 นิยามศัพท์เกี่ยวกับการใช้น้ำของพืช .....	10
1.4 การตรวจวัดปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET Measurements) .....	16

1.5	แบบฝึกหัด .....	23
<b>2.</b>	<b>ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา.....</b>	<b>25</b>
2.1	พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation) .....	26
ก.	พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก .....	27
ข.	พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นสุทธิ .....	31
ค.	พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวสุทธิ (Net Long Wave Radiation).....	34
ง.	พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ (Net Radiation).....	35
2.2	อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature) .....	42
2.3	ความชื้นในอากาศ (Air Humidity) .....	43
ก.	ความดันไอน้ำจริงในอากาศ (Actual Vapor Pressure).....	43
ข.	ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Vapor Pressure) .....	43
ค.	ความดันไอน้ำที่ขาด (Vapor Pressure Deficit).....	45
ง.	อุณหภูมิที่จุดน้ำค้าง (Dew-point Temperature).....	45
จ.	ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity).....	45
2.4	ความเร็วลม (wind speed) .....	54
2.5	แบบฝึกหัด .....	57
<b>ส่วนที่ 2 การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช โดยวิธีของ FAO-56.....</b>		<b>61</b>
<b>3.</b>	<b>การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง.....</b>	<b>63</b>
3.1	การหาปริมาณการใช้น้ำอ้างอิง ด้วยสมการ FAO Penman-Monteith .....	64
ก.	สมการของ FAO Penman-Monteith .....	65
ข.	ขั้นตอนการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ด้วยสมการ FAO Penman-Monteith.....	73
3.2	การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง โดยข้อมูลจากภาควัดการระเหย .....	85
3.3	แบบฝึกหัด .....	92
<b>4.</b>	<b>การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ในสภาพมาตรฐาน .....</b>	<b>95</b>

4.1	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช .....	97
ก.	ปัจจัยที่ใช้สำหรับกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช.....	97
ข.	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบเดี่ยวและแบบคู่.....	104
4.2	ขั้นตอนการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ในสภาพมาตรฐาน .....	107
ก.	ระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตและ สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช .....	107
ข.	การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช.....	116
ค.	การสร้างโค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช.....	127
ง.	การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืช (ETc) .....	128
4.3	แบบฝึกหัด.....	134
<b>ส่วนที่ 3 การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช โดยแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....</b>		<b>137</b>
5.	<b>การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ด้วยโปรแกรม CROPWAT.....</b>	<b>139</b>
5.1	การติดตั้งโปรแกรม.....	141
ก.	การติดตั้ง Cropwat .....	141
ข.	การติดตั้ง CLIMWAT .....	148
5.2	การเตรียมข้อมูลจาก CLIMWAT.....	151
5.3	การใช้งานโปรแกรม CROPWAT .....	158
ก.	ข้อมูล Climate/ETo .....	159
ข.	ข้อมูล Rain .....	166
ค.	ข้อมูล Crop.....	173
ง.	ข้อมูล Soil .....	178
5.4	การวิเคราะห์ผลการคำนวณ .....	182
5.5	แบบฝึกหัด.....	184
<b>ส่วนที่ 4 การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช โดยเทคนิคการสำรวจระยะไกล .....</b>		<b>185</b>
6.	<b>การหา ET จากข้อมูลดาวเทียม โดยหลักสมดุลพลังงาน .....</b>	<b>187</b>
6.1	การสำรวจระยะไกลและการประยุกต์.....	188

ก.	การจัดการน้ำกับการสำรวจระยะไกล .....	188
ข.	การใช้น้ำของพืชและการสำรวจระยะไกล .....	189
6.2	หลักการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช จากข้อมูลดาวเทียม .....	194
ก.	สมดุลพลังงานที่พื้นผิว .....	195
ข.	สัดส่วนการระเหย .....	199
ค.	ปริมาณการระเหยตลอดวัน .....	203
6.3	การคำนวณพารามิเตอร์พื้นผิว .....	204
ก.	สภาพการสะท้อนของพื้นผิว (Surface Albedo) .....	204
ข.	ดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index) .....	207
ค.	อุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) .....	207
6.4	การคำนวณพารามิเตอร์ของสมการ สมดุลพลังงาน .....	211
ก.	พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ .....	211
ข.	พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (Soil Heat Flux) .....	214
ค.	พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ .....	215
6.5	กรณีศึกษา .....	223
ก.	คำนำ .....	223
ข.	เครื่องมือและวิธีการ .....	224
ค.	ผลและวิจารณ์ .....	230
ง.	สรุปผล .....	245
บรรณานุกรม .....		247
ภาคผนวก .....		259
ภาคผนวก ก. ตารางข้อมูลอุตุนิยมวิทยา .....		261
ภาคผนวก ข. ตารางข้อมูลพืช .....		271
ดัชนี .....		283



## สารบัญภาพ

ภาพที่ 1-1	การระเหยน้ำจากผิวน้ำในภาชนะปิด.....	4
ภาพที่ 1-2	การแบ่งแยกระหว่างกระบวนการระเหยน้ำกับการคายน้ำ .....	5
ภาพที่ 1-3	การคายน้ำผ่านปากใบ .....	6
ภาพที่ 1-4	ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้น้ำของพืช.....	8
ภาพที่ 1-5	แนวคิดเรื่องการใช้น้ำของพืช .....	13
ภาพที่ 1-6	สัมประสิทธิ์การขาดน้ำของดิน .....	14
ภาพที่ 1-7	ถึงวัดการใช้น้ำของข้าว.....	17
ภาพที่ 1-8	สมดุลน้ำในเขตรากพืช .....	18
ภาพที่ 1-9	สมดุลพลังงานที่พื้นผิว (surface energy balance).....	21
ภาพที่ 1-10	องค์ประกอบของสมดุลพลังงานที่พื้นผิว .....	22
ภาพที่ 2-1	องค์ประกอบของสมดุลพลังงานการแผ่รังสี .....	26
ภาพที่ 2-2	พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก .....	27
ภาพที่ 2-3	ปริมาณพลังงานการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ที่โลกได้รับ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและละติจูด.....	28
ภาพที่ 2-4	จำนวนชั่วโมงแสงแดดในรอบวันเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและละติจูด .....	30
ภาพที่ 2-5	พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ (a) เดือนมกราคม และ (b) เดือนกรกฎาคม.....	35
ภาพที่ 2-6	หน้าตัดความเร็วลมเหนือพื้นผิวโล่ง.....	54
ภาพที่ 2-7	สัมประสิทธิ์ปรับแก้ความเร็วลมเป็นที่ระดับความสูง 2 เมตร .....	55

ภาพที่ 3-1	การใช้น้ำของพืชอ้างอิง .....	63
ภาพที่ 3-2	สภาพต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่ชั้นพื้นผิว (surface resistance) และ ที่ชั้นการไหลเวียนของมวลอากาศ (aerodynamic resistance) .....	70
ภาพที่ 3-3	คุณลักษณะของพืชอ้างอิงทางทฤษฎีที่ใช้ในสำหรับคำนวณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิงตามสมการ FAO Penman-Monteith .....	72
ภาพที่ 3-4	ถาดวัดการระเหยมาตรฐาน Class A และ hook gauge สำหรับวัดระดับน้ำ.....	86
ภาพที่ 3-5	สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ถาดตั้งอยู่แยกเป็น 2 กรณี .....	88
ภาพที่ 4-1	การใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน .....	95
ภาพที่ 4-2	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในระยะที่ปกคลุมเต็มผิวดิน มีค่าผันแปรไปตามสภาพภูมิอากาศ .....	98
ภาพที่ 4-3	ผลของการระเหยน้ำจากผิวดินต่อค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช .....	99
ภาพที่ 4-4	ช่วงของการเจริญเติบโตของพืชชนิดต่าง ๆ .....	100
ภาพที่ 4-5	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชตามช่วงของการเจริญเติบโต .....	103
ภาพที่ 4-6	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช.....	105
ภาพที่ 4-7	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช กรณีมีน้ำซึมผ่านผิวดินเล็กน้อย (น้อยกว่า 10 มม.) .....	117
ภาพที่ 4-8	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช กรณีมีน้ำซึมผ่านผิวดินมาก (มากกว่า 40 มม.) (a) กรณีดินเนื้อหยาบ (b) กรณีดินเนื้อละเอียด.....	119
ภาพที่ 4-9	ค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชสำหรับช่วงกลางของการเพาะปลูกแยกตามสภาพภูมิอากาศ (a) กรณีสภาพภูมิอากาศแล้ง (b) กรณีสภาพภูมิอากาศปกติ (c) กรณีสภาพภูมิอากาศชุ่มชื้นมาก .....	124
ภาพที่ 4-10	โค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช .....	127
ภาพที่ 4-11	โค้งสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพด.....	131
ภาพที่ 5-1	หน้าจอรแรกเมื่อเริ่มใช้งาน CLIMWAT .....	152

ภาพที่ 5-2	หน้าจอที่สองหลังจากเลือก THAILAND.....	153
ภาพที่ 5-3	หน้าจอแสดงผลให้ระบุที่จัดเก็บข้อมูลที่คัดแยกจากฐานข้อมูล	154
ภาพที่ 5-4	เพิ่มข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นจากการคัดแยกข้อมูล .....	154
ภาพที่ 5-5	ข้อมูลในไฟล์ KANCHANABURI.cli .....	155
ภาพที่ 5-6	ข้อมูลในไฟล์ KANCHANABURI.pen.....	156
ภาพที่ 5-7	หน้าจอแรกเมื่อเริ่มใช้งาน CROPWAT .....	158
ภาพที่ 5-8	หน้าจอข้อมูลอุณหภูมิตามรายเดือน .....	159
ภาพที่ 5-9	หน้าจอข้อมูลอุณหภูมิตามรายเดือนของสถานีกาญจนบุรี .....	160
ภาพที่ 5-10	เมนูสำหรับเลือกข้อมูลภูมิอากาศและ ET <sub>o</sub> เป็นรายเดือน.....	161
ภาพที่ 5-11	ปุ่มสำหรับเลือกข้อมูลภูมิอากาศและ ET <sub>o</sub> เป็นรายเดือน.....	162
ภาพที่ 5-12	เมนูสำหรับกำหนดทางเลือก .....	163
ภาพที่ 5-13	หน้าจอทางเลือกสำหรับข้อมูลอุณหภูมิตามรายเดือน .....	164
ภาพที่ 5-14	หน้าจอข้อมูลฝนเป็นรายเดือน.....	166
ภาพที่ 5-15	เมนูสำหรับเลือกข้อมูลฝนรายเดือน .....	167
ภาพที่ 5-16	ปุ่มสำหรับเลือกข้อมูลฝน .....	168
ภาพที่ 5-17	เมนูสำหรับกำหนดทางเลือกข้อมูล.....	169
ภาพที่ 5-18	หน้าจอทางเลือกสำหรับกำหนดฝนใช้การ .....	170
ภาพที่ 5-19	หน้าจอข้อมูลพืช.....	173
ภาพที่ 5-20	เมนูสำหรับเลือกข้อมูลพืช .....	174
ภาพที่ 5-21	หน้าจอเลือกข้อมูลข้าวโพด (Maize) .....	175
ภาพที่ 5-22	ข้อมูลข้าวโพด .....	175
ภาพที่ 5-23	ข้อมูลข้าว.....	177
ภาพที่ 5-24	เมนูสำหรับเลือกข้อมูลดิน .....	178
ภาพที่ 5-25	หน้าจอเลือกข้อมูลดินเนื้อปานกลาง (Medium) .....	179
ภาพที่ 5-26	ข้อมูลดินเนื้อปานกลาง (Medium) .....	179
ภาพที่ 5-27	หน้าจอข้อมูลดินสำหรับปลูกข้าว.....	181
ภาพที่ 5-28	หน้าจอแสดงผลการคำนวณ .....	182
ภาพที่ 6-1	องค์ประกอบหลักของกระบวนการวิธี SEBAL .....	193
ภาพที่ 6-2	สมดุลพลังงานที่พื้นผิว (surface energy balance).....	195

ภาพที่ 6-3	สมดุลพลังงานการแผ่รังสี .....	196
ภาพที่ 6-4	การถ่ายเทพลังงานความร้อนลงดิน .....	197
ภาพที่ 6-5	ความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน ( $r_{ah}$ ) .....	198
ภาพที่ 6-6	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับค่าการสะท้อนของพื้นผิว .....	201
ภาพที่ 6-7	พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และความคลาดเคลื่อนจาก บรรยากาศ .....	206
ภาพที่ 6-8	การหาค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิอากาศ.....	220
ภาพที่ 6-9	ที่ราบลุ่มเจ้าพระยา.....	225
ภาพที่ 6-10	สถานีตรวจอากาศในเขตพื้นที่ศึกษา .....	228
ภาพที่ 6-11	สัดส่วนการระเหยโดยวิธี SEBAL และ S-SEBI ในพื้นที่ ชลประทานและนอกเขตชลประทาน .....	231
ภาพที่ 6-12	ข้อมูลสภาพการสะท้อนที่พื้นผิวและอุณหภูมิพื้นผิวที่ระดับอ้างอิง สำหรับการหาสัดส่วนการระเหยโดยวิธี S-SEBI .....	232
ภาพที่ 6-13	สัดส่วนการระเหยจากวิธี SEBAL .....	233
ภาพที่ 6-14	สัดส่วนการระเหยจากวิธี S-SEBI .....	235
ภาพที่ 6-15	ปริมาณการใช้น้ำของพืช (a) วิธี SEBAL (b) วิธี S-SEBI .....	239
ภาพที่ 6-16	การเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำของพืช (ETc) กับปริมาณการใช้น้ำ ของพืชอ้างอิง (ETo) .....	240
ภาพที่ 6-17	ปริมาณการใช้น้ำของพืชจากวิธี SEBAL .....	241
ภาพที่ 6-18	ปริมาณการใช้น้ำของพืชจากวิธี S-SEBI .....	243

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1	ข้อมูลภูมิอากาศรายเดือน.....	59
ตารางที่ 3-1	คุณลักษณะของถาดวัดการระเหยมาตรฐาน Class A .....	86
ตารางที่ 3-2	ค่า Pan Coefficient ของถาดวัดการระเหย Class A .....	88
ตารางที่ 3-3	ข้อมูลอุตุนิยมหาวิทยาลัยรายเดือนที่สถานีตรวจอากาศกำแพงแสน ....	93
ตารางที่ 4-1	ระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตของพืช .....	112
ตารางที่ 4-2	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช.....	113
ตารางที่ 4-3	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช กรณีมีน้ำแทรกซึม ผ่านดินปานกลาง (10-40 มม.) และเนื้อดินเป็นดินร่วน .....	121
ตารางที่ 4-4	ข้อมูลอุตุนิยวิทยาและปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง .....	129
ตารางที่ 4-5	ระยะเวลาของแต่ละช่วงของการเจริญเติบโต (วัน) .....	129
ตารางที่ 4-6	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพด .....	129
ตารางที่ 4-7	การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดเป็นราย 10 วัน.....	133
ตารางที่ 4-8	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลอุตุนิยวิทยาที่ จ.กาญจนบุรี .....	134
ตารางที่ 4-9	ความยาวนานของระยะการเจริญเติบโต (วัน) .....	134
ตารางที่ 4-10	สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพดหวาน.....	135
ตารางที่ 6-1	ค่าสัมประสิทธิ์ของวิธี Split-window .....	209
ตารางที่ 6-2	ข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRRs ที่ใช้ศึกษา.....	226
ตารางที่ 6-3	สถานีตรวจอากาศในบริเวณพื้นที่ศึกษา.....	227
ตารางที่ 6-4	สัดส่วนการระเหยโดยวิธี SEBAL และ S-SEBI.....	231
ตารางที่ 6-5	ปริมาณการใช้น้ำของพืช .....	238



ส่วนที่ 1

หลักการพื้นฐาน





# 1. แนวคิดเรื่องการระเหยน้ำ และการใช้น้ำของพืช

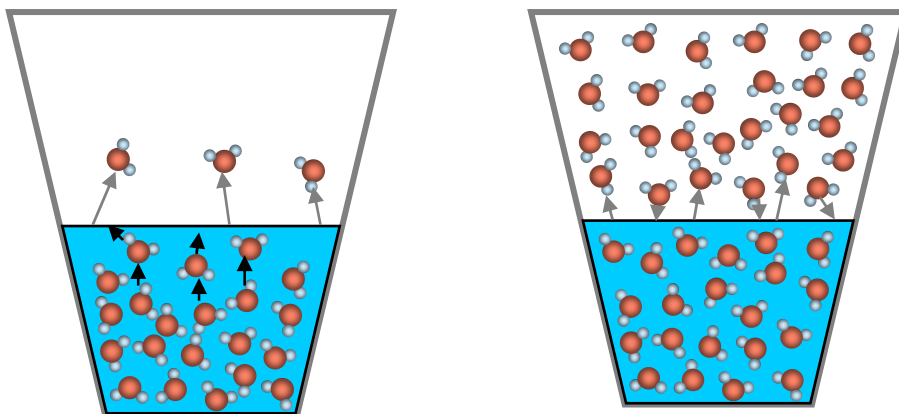
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง แนวคิดเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำของพืช หรือ evapotranspiration ซึ่งครอบคลุมถึง กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการระเหยน้ำ ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้น้ำของพืช และ นิยามศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำของพืช

## 1.1 กระบวนการระเหยน้ำ (Evaporation Process)

การระเหยน้ำ (evaporation) เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวหน้าของของเหลวเปลี่ยนสถานะไปเป็นไอ โดยอุณหภูมิของของเหลวในขณะนั้นไม่จำเป็นต้องถึงจุดเดือด (ราชบัณฑิตยสถาน, 2549) โดยผิวหน้าของน้ำที่เปลี่ยนสถานะอาจเป็นผิวน้ำ ผิวดิน หรือผิวของพืชพรรณก็ได้

กระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไวดำเนินไปโดยใช้พลังงานจำนวนหนึ่ง เรียกว่า “ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ” (latent heat of vaporization) ซึ่งมีค่าประมาณ 2.51 MJ/kg (หรือ 540 cal/g) ที่อุณหภูมิ 100°C โดยในสภาพธรรมชาติแหล่งพลังงานที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ ได้แก่ พลังงานการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์

ถ้าพิจารณาภาชนะปิดที่มีน้ำใส่อยู่ราวครึ่งหนึ่ง หากมีแหล่งพลังงานไม่จำกัด ในช่วงแรก น้ำจะระเหยได้ดี แต่เมื่อเวลาผ่านไปประยะหนึ่งการระเหยจะค่อย ๆ ลดลงและหยุดในที่สุด ปรากฏการณ์ลักษณะนี้อาจอธิบายได้ว่า ขณะที่ทำการปิดภาชนะใหม่ ๆ ปริมาณไอน้ำในอากาศที่อยู่ในภาชนะยังมีน้อยทำให้น้ำระเหยไปในอากาศได้ง่าย เมื่อเวลาผ่านไปประยะหนึ่ง ความหนาแน่นของโมเลกุลของน้ำในอากาศจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้อัตราการระเหยค่อย ๆ ลดลงจนหยุดในที่สุด



(ก) สภาพเริ่มต้น

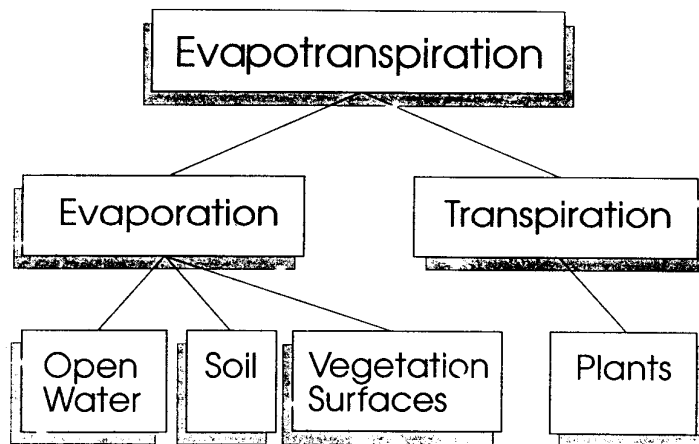
(ข) สภาพอิ่มตัว

ภาพที่ 1-1 การระเหยน้ำจากผิวน้ำในภาชนะปิด

การระเหยน้ำจะหยุดลงเมื่อ ปริมาณไอน้ำในอากาศถึงจุดอิ่มตัว หรือ ความดันไอน้ำในอากาศ เท่ากับ “ความดันไอน้ำอิ่มตัว” (saturated vapor pressure) หากต้องการให้กระบวนการระเหยดำเนินต่อไป จำเป็นต้องมีกลไกบางอย่างที่ทำให้ การเคลื่อนย้ายไอน้ำที่ระเหยและค้างอยู่ที่ผิวหน้าของน้ำออกไป ในสภาพธรรมชาติ การเคลื่อนที่ของอากาศหรือลม เป็นกลไกหลักที่เคลื่อนย้ายไอน้ำที่ระเหยจาก พื้นผิวออกไป ทำให้กระบวนการระเหยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยสรุป กระบวนการระเหยน้ำนั้นจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมีเงื่อนไข สองประการ กล่าวคือ

- (1) ต้องมีแหล่งพลังงานเพียงพอสำหรับทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะจาก ของเหลวกลายเป็นไอ
- (2) ต้องมีกลไกที่ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายไอน้ำที่ระเหยจากบริเวณผิว ออกไป

ในส่วนที่เกี่ยวกับการใช้น้ำของพืช มีคำศัพท์เกี่ยวข้องอีกสองคำ คือ การคายน้ำ (transpiration) และ การระเหยคายน้ำหรือการใช้น้ำของพืช (evapotranspiration)

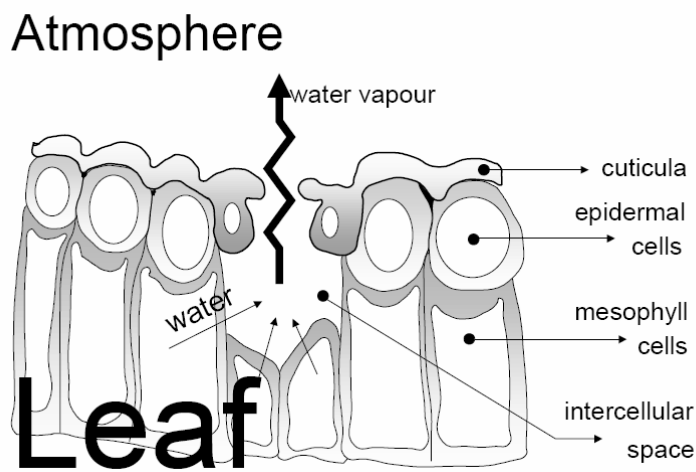


ภาพที่ 1-2 การแบ่งแยกระหว่างกระบวนการระเหยน้ำกับการคายน้ำ  
ที่มา: Ward and Elliot, 1995

## ก. การคายน้ำ (transpiration)

---

“การคายน้ำ” (transpiration) หมายถึง การที่พืชสูญเสียน้ำออกไปในรูปไอน้ำ น้ำที่ระเหยออกจากพืชส่วนนี้ส่วนใหญ่จะระเหยสู่บรรยากาศทางปากใบ (stoma) (สมบุญ, 2544) จากนิยามข้างต้น จะเห็นได้ว่าการคายน้ำนั้นเป็นส่วนหนึ่งของน้ำที่ระเหยสู่อากาศนั่นเอง



ภาพที่ 1-3 การคายน้ำผ่านปากใบ

ที่มา: Allen et al., 1998

## ข. การระเหยคายน้ำหรือการใช้ น้ำของพืช (evapotranspiration)

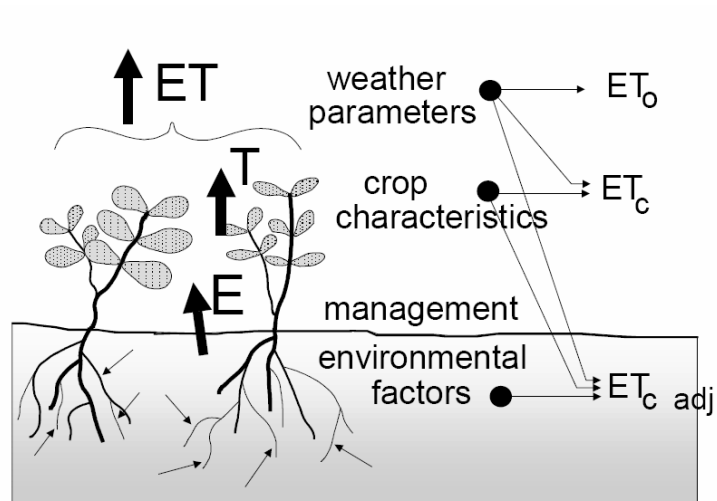
---

“การระเหยคายน้ำ” (evapotranspiration) เป็นคำศัพท์ที่บัญญัติในพจนานุกรมศัพท์ภูมิศาสตร์ฉบับราชบัณฑิตยสถาน (2549) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ระเหยจากพื้นดินและการคายน้ำของพืชไปสู่บรรยากาศ หรือในบางครั้งอาจเรียกเป็น “การคายระเหยน้ำ”

ในตำราทางด้านวิศวกรรมชลประทานแปลศัพท์ evapotranspiration เป็น “การใช้ น้ำของพืช” ซึ่งใช้ในความหมายเดียวกับศัพท์คำว่า consumptive use of water (วิบูลย์, 2526) หมายถึง ปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูญเสียดังกล่าวจากพื้นที่สู่บรรยากาศในรูปของไอน้ำ ปริมาณดังกล่าวนี้ประกอบขึ้นด้วยสองส่วนหลัก คือ (1) ปริมาณที่พืชดูดไปจากดิน นำไปใช้สร้างเซลล์และเนื้อเยื่อและคายออกทางใบสู่บรรยากาศ ซึ่งเรียกว่า “การคายน้ำ” (transpiration) (2) ปริมาณน้ำที่ระเหยจากผิวดินบริเวณรอบ ๆ ต้นพืช จากผิวน้ำในขณะให้น้ำหรือขณะที่มีน้ำขังอยู่ และจากน้ำที่เกาะอยู่ตามใบเนื่องจากฝนหรือการให้น้ำ ซึ่งเรียกว่า “การระเหย” (evaporation) (อภิชาติ และคณะ, 2524; วิบูลย์, 2526)

แนวคิดของการใช้น้ำของพืชนั้น ได้นำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางทางวิศวกรรมชลประทานทั้งในงานด้านออกแบบและด้านบริหารจัดการ โดยคำว่า “การใช้ น้ำของพืช” มีความหมายเชื่อมโยงกับ ปริมาณน้ำชลประทานที่พืชต้องการ ในขณะที่คำว่า “การระเหยคายน้ำ” นั้นเป็นคำซึ่งใช้ทั่วไปไม่เฉพาะเจาะจง ในเนื้อหาที่จะกล่าวต่อไปจะเลือกใช้คำว่า การใช้น้ำของพืช ในความหมายของ evapotranspiration

## 1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้น้ำของพืช



ภาพที่ 1-4 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้น้ำของพืช

ที่มา: Allen et al., 1998

ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้น้ำของพืช ได้แก่ ปัจจัยทางด้านภูมิอากาศ ปัจจัยทางด้านพืช และ สภาพสิ่งแวดล้อมและการจัดการ

### ก. ปัจจัยทางด้านภูมิอากาศ

ลักษณะภูมิอากาศเป็นปัจจัยอันหนึ่งที่กำหนดว่าพืชต้องการใช้น้ำมากน้อยเท่าไร ในที่นี้ กำหนดในเทอมของการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_0$ ) ซึ่งเป็นการใช้น้ำของพืชที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน ดังนั้น ความแตกต่างของการใช้น้ำของพืชอ้างอิงในแต่ละพื้นที่จึงเป็นผลมาจากความแตกต่างของลักษณะภูมิอากาศเท่านั้น

พารามิเตอร์หลักของภูมิอากาศที่มีผลต่อการใช้<sup>๖</sup>น้ำของพืช ได้แก่ พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศ ปริมาณความชื้น และความเร็วลม

## ข. ปัจจัยทางด้านพืช

---

สิ่งที่ต้องพิจารณาเมื่อทำการประเมินปริมาณการใช้น้ำในพื้นที่เพาะปลูก ประกอบด้วย ชนิดและพันธุ์พืช ระยะพัฒนาการของพืช โดยความแตกต่างของปริมาณการใช้น้ำของพืชแต่ละชนิดนั้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของสภาพต่าง ๆ ของพืช ได้แก่ สภาพความต้านทานต่อการคายน้ำ ความสูงต้นพืช สภาพความสูงต่ำของพืช สภาพการสะท้อนพลังงาน สภาพการปกคลุมผิวดิน คุณลักษณะของรากพืช

## ค. สภาพสิ่งแวดล้อมและการจัดการ

---

นอกจากสภาพภูมิอากาศและลักษณะของพืชแล้ว ความเค็มของดิน การขาดธาตุอาหาร ชื้นदानในดิน รวมถึง โรคและแมลง สิ่งเหล่านี้ล้วนแต่เป็นข้อจำกัดสำหรับการเจริญเติบโตของพืชและจำกัดปริมาณการใช้น้ำของพืช ปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาในการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ได้แก่ สภาพการปกคลุมผิวดิน ความหนาแน่นของพืช และปริมาณความชื้นในดิน โดยความรุนแรงของการขาดน้ำและชนิดของดินเป็นเงื่อนไขหลักที่บ่งชี้ว่าปริมาณความชื้นในดินมีผลต่อปริมาณการใช้น้ำของพืชมากน้อยเพียงใด ในอีกแง่หนึ่งปริมาณน้ำที่มากเกินไปจากสภาพน้ำท่วมขังก็อาจมีผลกระทบต่อรากพืชทำให้ดึงน้ำไปใช้น้อยลงเช่นเดียวกัน

### 1.3 นิยามศัพท์เกี่ยวกับการใช้น้ำของพืช

นอกจากศัพท์ การระเหยคายน้ำหรือการใช้น้ำของพืชแล้ว ยังมีศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำของพืช อีก 3 คำ คือ การใช้น้ำของพืชอ้างอิง (reference crop evapotranspiration) การใช้น้ำของพืช (crop evapotranspiration) และ การใช้น้ำของพืชที่แท้จริง (actual evapotranspiration)

#### 1. การใช้น้ำของพืชอ้างอิง

“การใช้น้ำของพืชอ้างอิง” (reference crop evapotranspiration) หรือในบางครั้งเรียกเป็น reference evapotranspiration) เขียนโดยย่อเป็น  $ET_0$  หมายถึง ปริมาณการคายน้ำรวมกับการระเหยน้ำจากพืชอ้างอิง ซึ่งในคู่มือ FAO-24<sup>1</sup> ได้กล่าวถึงลักษณะของพืชอ้างอิงว่าเป็นหญ้ามีความสูง 8 ถึง 15 ซม. ปกคลุมสม่ำเสมอ ซึ่งหญ้านี้จะต้องเป็นช่วงกำลังเจริญเติบโตและปกคลุมเต็มพื้นผิวดิน และอยู่ในสภาพไม่ขาดน้ำ (Dorenbos *et al.*, 1977) ส่วนในคู่มือ FAO-56 ซึ่งได้ปรับปรุงใหม่ภายหลัง กำหนดให้พื้นผิวอ้างอิง<sup>2</sup> เป็นพืชที่มีความสูง 0.12 ม. มีค่าความต้านทานพื้นผิวดินที่ (surface resistance) เท่ากับ  $70 \text{ s.m}^{-1}$  และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (albedo) เท่ากับ 0.23 (Allen *et al.*, 1998) ซึ่งพื้นผิวอ้างอิงในคู่มือ FAO-56 ยังคงมีความหมายเช่นเดียวกับพืชอ้างอิงในคู่มือ FAO-24 แต่ได้ระบุคุณสมบัติเฉพาะของพืชที่เป็นพารามิเตอร์ในสมการของ Penman-Monteith (อ่านว่า เพนแมน-มอนทีธ)

เมื่อกล่าวถึง evapotranspiration นอกจากคำว่า “การใช้น้ำของพืชอ้างอิง” แล้วยังอาจพบคำว่า “ศักย์การคายระเหย” ในตำราบางเล่ม ซึ่งคำนี้เป็น

---

<sup>1</sup> Reference crop evapotranspiration: The rate of evapotranspiration from an extensive surface of 8 to 15 cm tall green grass cover of uniform height, actively growing, completely shading ground, and not short of water (Dorenbos *et al.*, 1977).

<sup>2</sup> Reference crop: A hypothetical reference crop with an assumed crop height of 0.12 m, a fixed surface resistance of  $70 \text{ s.m}^{-1}$  and an albedo of 0.23 (Allen *et al.*, 1998).



คำศัพท์ดั้งเดิม โดยแปลมาจากภาษาอังกฤษ “potential evapotranspiration” จากนิยามของกรมอุตุวิทยา ได้ให้ความหมายของศัพท์การคายระเหย<sup>3</sup> ว่าเป็นอัตราสูงสุดของปริมาณน้ำที่พืชคายออกมา (transpiration) รวมกับปริมาณน้ำที่ระเหยจากพื้นดินหรือพื้นน้ำ (evaporation) ในบริเวณที่มีพืชเดี่ยว ๆ หรือหญ้าปกคลุมอย่างสมบูรณ์ และมีน้ำหล่อเลี้ยงไม่จำกัด

ในการใช้งานนั้น เทอมของ potential evapotranspiration และ reference crop evapotranspiration นั้นมีความแตกต่างกันไม่มากนัก กล่าวคือเป็นการคายระเหยของน้ำจากพื้นผิวที่มีพืชพรรณปกคลุม โดยที่มีปริมาณน้ำไม่จำกัด แต่เทอมของ reference crop evapotranspiration มีการระบุลักษณะของพืชพรรณที่ปกคลุมให้เป็นมาตรฐานอ้างอิง ในทางปฏิบัติ สมควรปรับคำศัพท์ให้ทันสมัยเป็นมาตรฐานเดียวกับคู่มือ FAO-56 ซึ่งเป็นคู่มืออ้างอิง

## 2. การใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน

“การใช้น้ำของพืช” (crop evapotranspiration) เขียนโดยย่อเป็น  $ET_c$  หรืออาจเรียกเป็นการใช้น้ำสูงสุดของพืช (maximum crop evapotranspiration) เป็นการนำปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพืชมาพิจารณาทั้งชนิดของพืช และช่วงการเจริญเติบโตในระยะต่าง ๆ แต่ยังคงถือว่าปริมาณน้ำไม่จำกัด

การใช้น้ำของพืชสามารถคำนวณได้โดยทำการปรับค่าการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) ด้วยสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (crop coefficient,  $K_c$ ) ที่ช่วงระยะการเจริญเติบโตต่าง ๆ ดังสมการ

$$ET_c = K_c ET_o \quad (1-1)$$

---

<sup>3</sup> ที่มา : อุตุวิทยามหาวิทยาลัยเกษตรกรรมอุตุวิทยา (<http://www.tmd.go.th/program/ngr.php>)

“สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช” เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของพืช หาได้จาก การทดลองหาปริมาณการใช้น้ำจากถังวัดการใช้น้ำที่มีการปลูกหญ้า (พืชอ้างอิง)<sup>4</sup> เปรียบเทียบกับปริมาณการใช้น้ำจากถังวัดการใช้น้ำของพืชที่ต้องการทราบค่า สัมประสิทธิ์  $K_c$  ซึ่งตั้งในบริเวณเดียวกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ในช่วงการเจริญเติบโตช่วงหนึ่ง หาได้จากสมการ

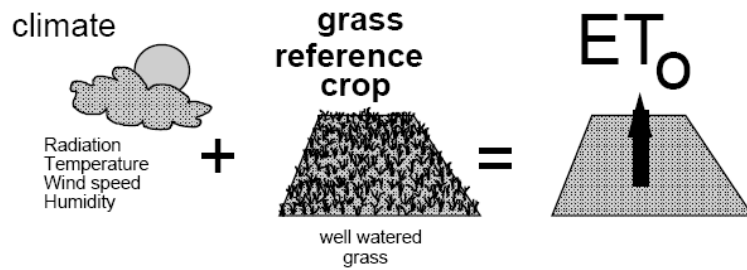
$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (1-2)$$

ในปัจจุบันคู่มือ FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) ให้นิยาม การใช้น้ำของพืช หรือ  $ET_c$  ว่าเป็น “การใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน” (crop evapotranspiration under standard conditions)

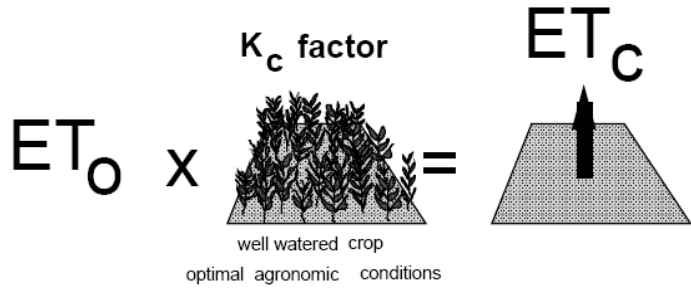
---

<sup>4</sup> ในปัจจุบันมักนิยามหาการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโดยการคำนวณจากข้อมูลภูมิอากาศตามวิธีของ FAO Penman-Monteith

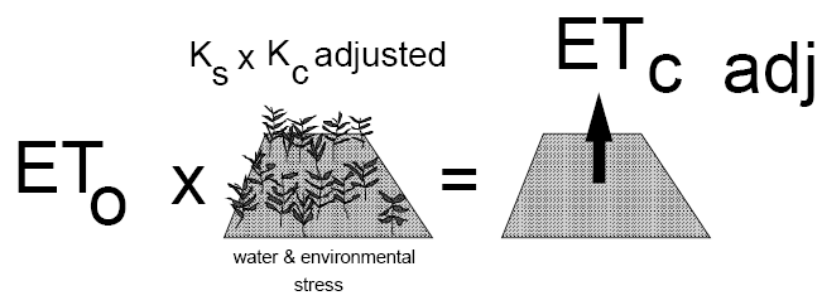
---



(ก) การใช้น้ำของพืชอ้างอิง



(ข) การใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน



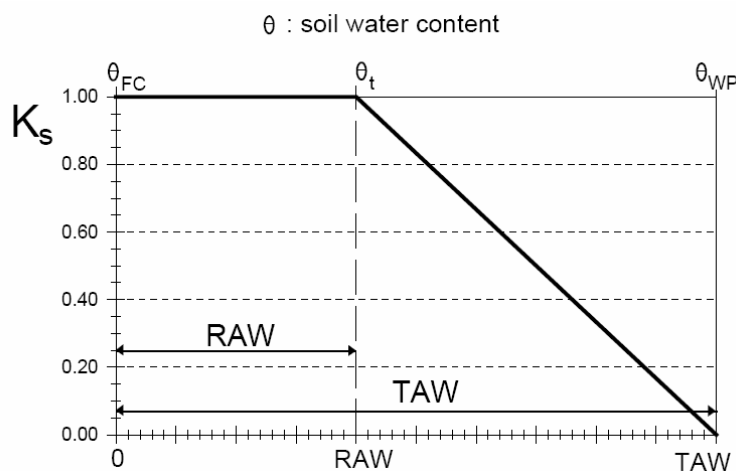
(ค) การใช้น้ำของพืชที่แท้จริง

ภาพที่ 1-5 แนวคิดเรื่องการใช้ น้ำของพืช  
ที่มา: Allen et al., 1998

### 3. การใช้น้ำของพืชที่แท้จริง

การใช้น้ำของพืชที่แท้จริง (actual evapotranspiration) เขียนโดยย่อเป็น  $ET_a$  สามารถวัดได้โดยตรงได้หลายวิธี อาทิ การวัดจากถังวัดการใช้น้ำของพืช (lysimeter) แต่เนื่องจากความยุ่งยากในการติดตั้งรวมทั้งมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แท้จริง ( $ET_a$ ) มักนิยมประมาณค่าโดยพิจารณาจากความชื้นที่มีอยู่ในดินและการปรับแก้ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน ( $ET_c$ ) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การขาดน้ำของดิน (water stress coefficient,  $K_s$ ) ดังแสดงในสมการ

$$ET_a = K_s ET_c \quad (1-3)$$



ภาพที่ 1-6 สัมประสิทธิ์การขาดน้ำของดิน

ที่มา: Allen et al., 1998

หรือเขียนในเทอมของการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) ได้ดังสมการ

$$ET_a = K_s K_c ET_o \quad (1-4)$$

ในปัจจุบันคู่มือ FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) ได้นิยาม การใช้น้ำของพืชที่แท้จริง หรือ  $ET_a$  ว่าเป็น “การใช้น้ำของพืชในสภาพจำกัด” (crop evapotranspiration under non-standard conditions) และอาจเรียกเป็น “การใช้น้ำของพืชปรับแก้” (adjusted crop evapotranspiration) ซึ่งเขียนโดยย่อเป็น  $ET_{c\ adj}$

## 1.4 การตรวจวัดปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET Measurements)

การตรวจวัดปริมาณการใช้น้ำของพืช อาจแบ่งได้เป็น 2 แนวทาง กล่าวคือ การตรวจวัดโดยตรง (direct measurement) และ การตรวจวัดโดยอ้อม (indirect measurement) ตัวอย่างวิธีการตรวจวัดโดยตรง ได้แก่ การใช้ถังวัดการใช้น้ำของพืช (lysimeters) ส่วนการตรวจวัดโดยอ้อมนั้นเป็นการวัดพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องแล้วจึงนำพารามิเตอร์เหล่านั้นมาคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืช โดยการคำนวณอาจใช้วิธีการตามหลักสมดุลน้ำ (water balance) หรือ วิธีตามหลักสมดุลพลังงาน (energy balance)

### ก.1 ถังวัดการใช้น้ำของพืช (Lysimeters)

1. ประเภทวัดโดยไม่เกี่ยวข้องกับน้ำหนัก (non-weighing lysimeters)
  - 1.1. ถังวัดการใช้น้ำแบบระบายน้ำ (percolation type)
  - 1.2. ถังวัดการใช้น้ำแบบน้ำใต้ดินคงที่ (constant water table type)
  - 1.3. ถังวัดการใช้น้ำของข้าว (rice lysimeter)
2. ประเภทวัดโดยเกี่ยวข้องกับน้ำหนัก (weighing lysimeters)
  - 2.1. ถังวัดการใช้น้ำแบบชั่งด้วยเครื่องชั่ง (mechanically weight type)
  - 2.2. ถังวัดการใช้น้ำแบบทุ่นลอย (float lysimeter)
  - 2.3. ถังวัดการใช้น้ำแบบไฮดรอลิก (hydraulic weighing lysimeter)

สำหรับรายละเอียดของถังวัดการใช้น้ำของพืชผู้อ่านอาจดูเพิ่มเติมได้จากหนังสือหลักการชลประทาน (วิบูลย์, 2526) หรือคู่มือ FAO-39 (Aboukhaled et al., 1982)



### ภาพที่ 1-7      ถังวัดการใช้น้ำของข้าว

ที่มา: รัฐชูชัย, 2552

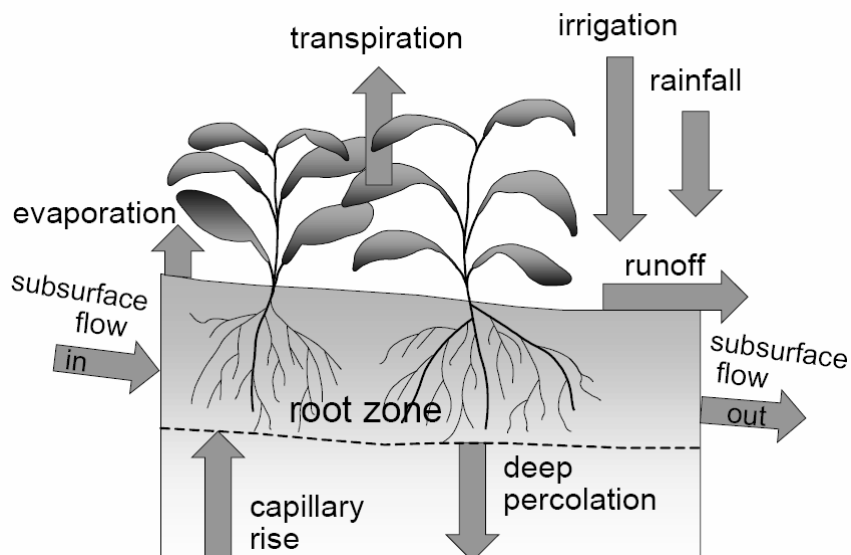
ในภาพเป็นถังวัดการใช้น้ำของข้าวเป็นถังเหลี่ยมรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1 ตารางเมตร (1x1) ลึก 1.20 เมตร ฟังถังลึก 1 ม. แต่ละถังมีระยะห่าง 3 ม. และปลูกข้าวบริเวณรอบ ๆ ถัง เพื่อให้มีสภาพแวดล้อมเหมือนกับแปลงทดลอง (เอกสิทธิ์ และ คณะ, 2550) ในจำนวน 4 ถัง ประกอบด้วย

- (1) ถัง A เป็นถังปิดกั้น และทำการปลูกข้าวในถัง สามารถตรวจวัดปริมาณการระเหยและการคายน้ำ (E+T)
- (2) ถัง B เป็นถังปิดกั้น และไม่ปลูกข้าวในถัง สามารถตรวจวัดปริมาณการระเหย (E)
- (3) ถัง C เป็นถังเปิดกั้น และทำการปลูกข้าวในถัง สามารถตรวจวัดปริมาณการระเหย การคายน้ำ และการซึมผ่านดิน (E+T+P)
- (4) ถัง D เป็นถังเปิดกั้น และไม่ปลูกข้าวในถัง สามารถตรวจวัดปริมาณการระเหย และการซึมผ่านดิน (E+ P)

## ก.2 สมดุลน้ำในดิน (Soil Water Balance)

วิธีสมดุลของน้ำในดินใช้หลักการของการอนุรักษ์มวลสาร (conservation of mass) ซึ่งถือว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำในระบบที่พิจารณา (changes in storage) เท่ากับ ผลต่างระหว่างน้ำที่ไหลเข้ากับน้ำที่ไหลออกจากระบบที่พิจารณา

$$\text{changes in storage} = \text{input-output} \quad (1-5)$$



ภาพที่ 1-8 สมดุลน้ำในเขตรากพืช

ที่มา: Hillel, 1998, 2003

การกำหนดขอบเขตของระบบที่พิจารณาเป็นขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ตามหลักสมดุลน้ำ สำหรับการวิเคราะห์สมดุลน้ำในเขตรากพืช พิจารณาระบบซึ่งขอบเขตด้านบนบนจากผิวดิน ครอบคลุมจนถึงขอบเขตด้านล่างที่ความลึกของรากพืช การเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำก็คือการเปลี่ยนแปลงความชื้นตลอดความลึกในเขตราก น้ำที่เข้ามาในระบบประกอบด้วย น้ำฝน (rainfall) น้ำ



ชลประทาน (irrigation) น้ำท่าผิวดินที่ไหลเข้า (surface runoff) น้ำไหลเข้าทางใต้ผิวดิน (subsurface inflow) น้ำไหลขึ้นจากชั้นน้ำใต้ดินด้วยแรงคาปิลารี (capillary rise) ส่วนน้ำที่ไหลออกจากดิน ประกอบด้วย การระเหยจากดิน (evaporation) การคายน้ำจากพืช (transpiration) น้ำท่าผิวดินไหลออก (surface runoff) น้ำไหลออกทางใต้ผิวดิน (subsurface outflow) และ น้ำซึมผ่านดินลึกลงใต้ดิน (deep percolation)

จากองค์ประกอบสมดุลน้ำข้างต้นสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P + Ir + CR - E - T - DP + \Delta RO + \Delta SF \quad (1-6)$$

โดยที่

- $\Delta S/\Delta t$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในดินเทียบกับเวลา โดย  $\Delta t$  เป็นช่วงระยะเวลาที่พิจารณา  $[T]$  ส่วน  $\Delta S$  เป็นผลต่างระหว่าง ปริมาณน้ำในดินที่ขึ้นเวลา  $t + \Delta t$  กับที่ขึ้นเวลา  $t$  หรือเท่ากับ  $S_{t+\Delta t} - S_t \quad [L^3]$
- $P$  = น้ำฝน (rainfall)  $[L^3 T^{-1}]$
- $Ir$  = น้ำชลประทาน (irrigation)  $[L^3 T^{-1}]$
- $CR$  = น้ำไหลขึ้นจากชั้นน้ำใต้ดินด้วยแรงคาปิลารี (capillary rise)  $[L^3 T^{-1}]$
- $E$  = การระเหยจากดิน (evaporation)  $[L^3 T^{-1}]$
- $T$  = การคายน้ำจากพืช (transpiration)  $[L^3 T^{-1}]$
- $DP$  = น้ำซึมลึกลงใต้ดิน (deep percolation)  $[L^3 T^{-1}]$
- $\Delta RO$  = น้ำท่าผิวดินสุทธิ (surface runoff) คิดจากน้ำท่าผิวดินที่ไหลเข้า ลบ น้ำท่าผิวดินที่ไหลออก  $[L^3 T^{-1}]$
- $\Delta SF$  = น้ำไหลใต้ผิวดินสุทธิ (subsurface outflow) คิดจากน้ำไหลเข้าทางใต้ผิวดิน ลบ น้ำที่ไหลออกทางใต้ผิวดิน  $[L^3 T^{-1}]$

### ก.3 สมดุลพลังงาน (Energy Balance)

วิธีสมดุลพลังงานใช้หลักการของการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) ซึ่งถือว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของพลังงานในระบบที่พิจารณาต่อเวลาเท่ากับ ผลต่างระหว่างพลังงานที่เข้า และพลังงานที่ออกจากระบบ ซึ่งเขียนเป็นสมการสมดุลพลังงานดังสมการ

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = K + L + A_w - \lambda_e E - H \pm G \quad (1-7)$$

โดยที่

$\Delta Q/\Delta t$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบที่พิจารณา (change in stored energy)

$K$  = พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้น (short wave radiation)

$L$  = พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาว (long wave radiation) ซึ่งสองเทอมนี้อาจพิจารณารวมกันเป็น พลังงานการแผ่รังสีสุทธิที่ได้รับ (net incoming radiation,  $R_n = K + L$ )

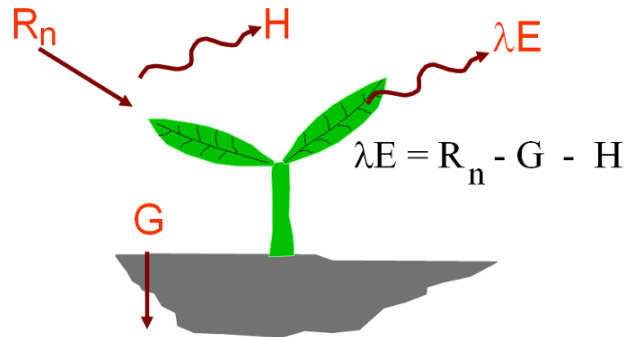
$\lambda_e E$  = พลังงานที่ใช้ในการระเหย โดย  $\lambda_e$  เป็นความร้อนแฝงของการระเหย (latent heat of evaporation) และ  $E$  เป็น อัตราการระเหย (rate of evaporation)

$A_w$  = พลังงานสุทธิจากปริมาณน้ำที่ไหลเข้าหรือออกจากระบบที่พิจารณา (water-advected energy)

$H$  = พลังงานความร้อนในอากาศ (sensible heat into the atmosphere)

$G$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (heat conducted into the earth)

ในการประมาณปริมาณการระเหย พิจารณาสมดุลพลังงานที่พื้นผิว โดยกำหนดสมมุติฐานว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบที่พิจารณา ( $\Delta Q/\Delta t = 0$ ) และ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเนื่องจากปริมาณน้ำที่ไหลเข้าหรือออกจากระบบ ( $A_w = 0$ ) ดังนั้น จึงสามารถจัดรูปสมการเพื่อหาพลังงานที่ใช้สำหรับการระเหย ( $\lambda_e E$ )



ภาพที่ 1-9 สมดุลพลังงานที่พื้นผิว (surface energy balance)

ที่มา: Allen and Bastiaanssen (2002)

$$\lambda_e E = R_n - G - H \quad (1-8)$$

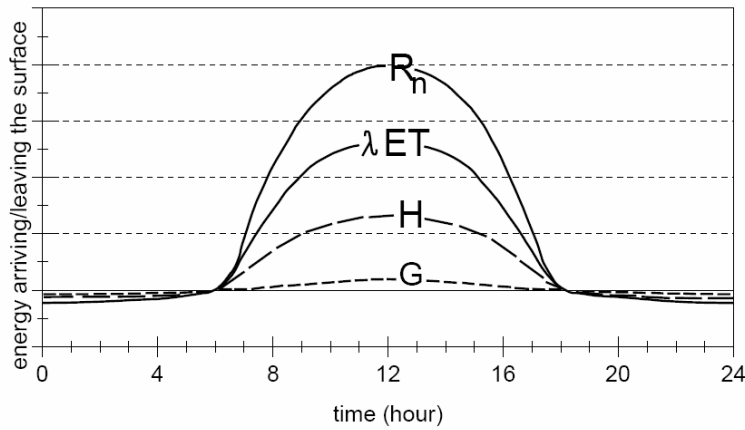
โดยที่

$\lambda_e E$  = พลังงานที่ใช้ในการระเหย โดย  $\lambda_e$  เป็นค่าความร้อนแฝงของการระเหย (latent heat of evaporation) และ  $E$  เป็น อัตราการระเหย (rate of evaporation)

$R_n$  = พลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (net radiation)

$G$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (heat conducted into the earth)

$H$  = พลังงานความร้อนในอากาศ (sensible heat into the atmosphere)



**ภาพที่ 1-10 องค์ประกอบของสมดุลพลังงานที่พื้นผิว**

ที่มา: Allen et al., 1998

ในภาพเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานขององค์ประกอบของสมดุลพลังงานที่พื้นผิวในรอบ 24 ชั่วโมงในวันที่ท้องฟ้าปลอดโปร่งไม่มีเมฆปกคลุม โดย  $R_n$  เป็นพลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์สุทธิ  $\lambda_e E$  เป็นพลังงานที่ใช้ในการระเหย  $H$  เป็นพลังงานความร้อนในอากาศ และ  $G$  เป็นพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน

## 1.5 แบบฝึกหัด

1. จงอธิบายความหมายของ evaporation
2. จงอธิบายความหมายของ transpiration
3. จงอธิบายความหมายของ evapotranspiration
4. ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (reference crop evapotranspiration) คือ อะไร
5. ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงมีประโยชน์ทางวิศวกรรมชลประทานอย่างไร
6. การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชทำได้โดยวิธีใดบ้าง
7. พืชอ้างอิง มีลักษณะเป็นอย่างไร
8. การปรับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_0$ ) เป็นปริมาณการใช้น้ำของพืช ( $ET_c$ ) ทำได้อย่างไร
9. จงอธิบายความหมายของ albedo
10. พืชอ้างอิง กำหนดให้มีค่า albedo เท่ากับเท่าไร

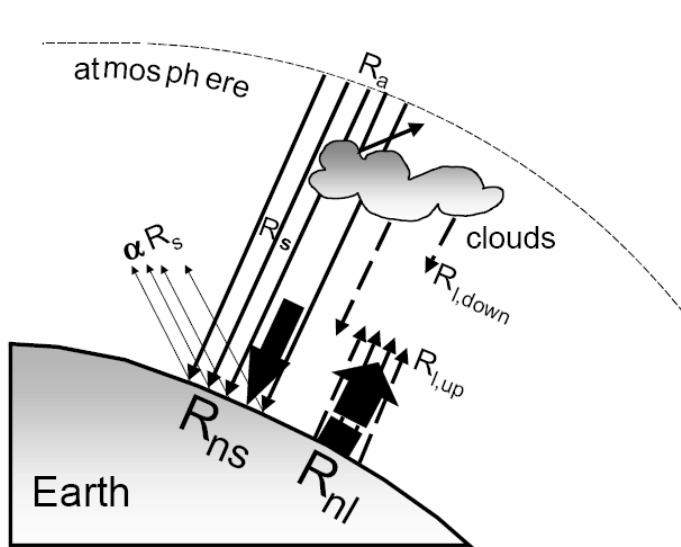


## 2. ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา

คำว่า อุตุนิยมวิทยา แปลจากศัพท์ “meteorology” เดิมเป็นภาษากรีก มาจากคำว่า “meteoros” (thing in the heaven above) รวมกับคำว่า “logos” (discourse) สำหรับคำที่ใช้ในภาษาไทยนั้น “อุตุนิยมวิทยา” เป็นภาษาสันสกฤต แปลว่า ฤดู รวมกับคำว่า “นิยาม” เป็นภาษาบาลีแปลว่า กำหนด และ “วิทยา” แปลว่า วิชาการ หรือความรู้ ดังนั้น คำว่า อุตุนิยมวิทยา แปลรวมความหมายว่า “วิชาการหรือความรู้ ของการกำหนดฤดูกาล” (รังสรรค์, 2546)

ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาเป็นตัวชี้ถึงสภาพปัจจัยทางด้านภูมิอากาศมี ผลต่อปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยเป็นแหล่งพลังงานที่ทำให้น้ำระเหยและพัดพา เอาไอน้ำที่ระเหยให้พ้นจากพื้นผิว ข้อมูลเหล่านี้ ประกอบด้วย พลังงานการแผ่รังสี ดวงอาทิตย์ (solar radiation) อุณหภูมิอากาศ (air temperature) ความชื้นในอากาศ (air humidity) และ ความเร็วลม (wind speed)

## 2.1 พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation)



ภาพที่ 2-1 องค์ประกอบของสมดุลพลังงานการแผ่รังสี

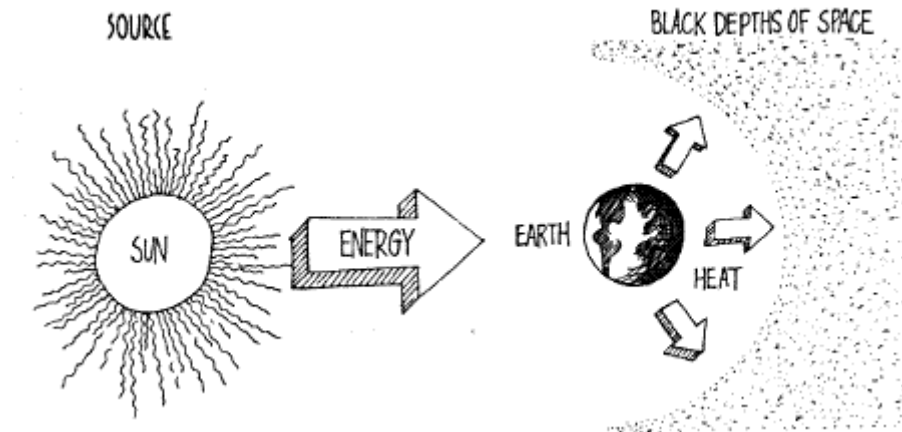
ที่มา: Allen et al., 1998

องค์ประกอบของสมดุลพลังงานการแผ่รังสี (radiation balance) ตามภาพที่ 2-1 ประกอบด้วย (1) พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก (extraterrestrial radiation,  $R_a$ ) (2) พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นสุทธิ (net short wave radiation,  $R_{ns}$ ) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างพลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก ( $R_s$ ) กับพลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่สะท้อนออกไป ( $\alpha R_s$ ) และ (3) พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวสุทธิ (net long wave radiation,  $R_{nl}$ ) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างพลังงานการแผ่รังสีออกจากผิวโลก ( $R_{l,up}$ ) กับ พลังงานการแผ่รังสีจากชั้นบรรยากาศ ( $R_{l,down}$ )



## ก. พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก

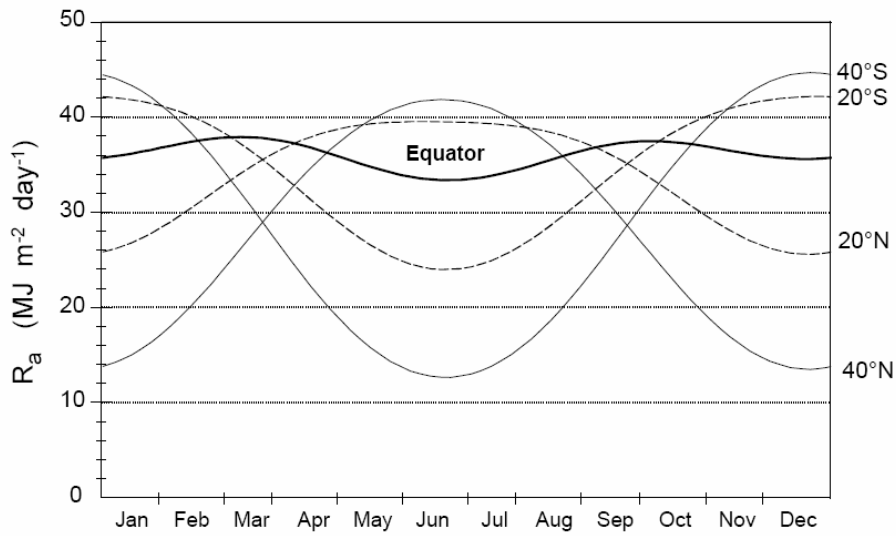
---



ภาพที่ 2-2 พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก

ที่มา: Rosnay, 1975

พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก (extraterrestrial radiation,  $R_a$ ) เป็นพลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่มาถึงบรรยากาศโลกชั้นบนสุด พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลกนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล (อันเนื่องมาจากมุมเอียงของโลกและการโคจรรอบดวงอาทิตย์) รวมถึง ตำแหน่งต่าง ๆ บนโลก (Latitude) (ภาพที่ 2-3) โดยมีค่าเฉลี่ย เรียกว่า “ค่าคงตัวพลังงานดวงอาทิตย์” (solar constant)



**ภาพที่ 2-3 ปริมาณพลังงานการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ที่โลกได้รับ**  
**ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและละติจูด**

ที่มา: Allen et al., 1998

ค่าคงตัวพลังงานดวงอาทิตย์ (solar constant) เป็นค่าเฉลี่ยของการส่งพลังงานของดวงอาทิตย์ โดยการแผ่รังสีลงสู่โลกในทางตั้งฉากต่อพื้นที่ต่อเวลา โดยไม่คิดการถูกรบกวนจากบรรยากาศ (พิจารณาพื้นที่บริเวณชั้นนอกของบรรยากาศโลก) ในขณะที่โลกอยู่ห่างจากดวงอาทิตย์เป็นระยะทางหนึ่งหน่วยดาราศาสตร์<sup>5</sup> ซึ่งกำหนดค่าเป็นหน่วยของพลังงาน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1,367 \text{ W m}^{-2}$  (หรือ  $118.11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  หรือ  $2,821 \text{ cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )

<sup>5</sup> ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ  $1.496 \times 10^8$  กิโลเมตร

**กรอบที่ 2-1 การคำนวณพลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกบรรยากาศโลก**

พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกบรรยากาศโลก ( $R_a$ ) คำนวณได้ตามสมการ

$$R_a = \frac{G_{sc} d_r}{\pi} [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (2-1)$$

โดย

$G_{sc}$  = ค่าคงตัวพลังงานจากดวงอาทิตย์ (solar constant) เท่ากับ  $118.11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$

$d_r$  = ส่วนกลับของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์สัมพัทธ์

$\omega_s$  = มุมของดวงอาทิตย์ตามเวลา (sunset hour angle) หน่วยเป็น radian

$\phi$  = ละติจูด หน่วยเป็น radian

$\delta$  = มุมเบนของดวงอาทิตย์ตามฤดูกาล (solar declination) หน่วยเป็น radian

ส่วนกลับของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์สัมพัทธ์ (inverse relative distance Earth-Sun,  $d_r$ ) คำนวณได้ตามสมการ

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (2-2)$$

โดย

$J$  = วันของปี มีค่าเท่ากับ 1 ในวันที่ 1 มกราคม และเท่ากับ 365 ในวันที่ 31 ธันวาคม (หรือ 366 ในปีอธิกสุรทิน (leap year))

มุมเบนของดวงอาทิตย์ตามฤดูกาล (solar declination,  $\delta$ ) คำนวณได้ตามสมการ

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (2-3)$$

มุมของดวงอาทิตย์ตามเวลา (sunset hour angle,  $\omega_s$ ) คำนวณได้ตามสมการ

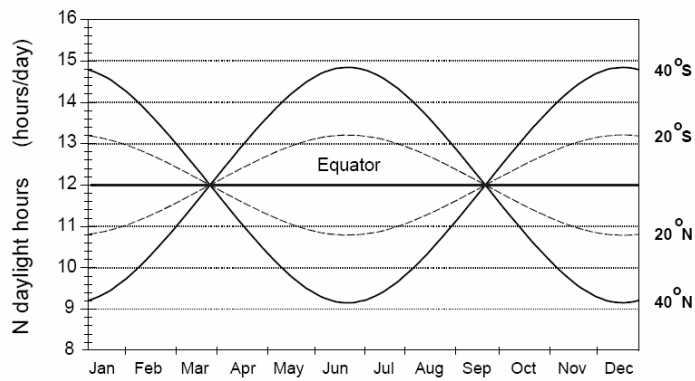
$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)] \quad (2-4)$$

**กรอบที่ 2-2 ความยาวนานของแสงแดด (sunshine duration)**

จำนวนชั่วโมงแสงแดดในรอบวัน (daylight hours,  $N$ ) คำนวณได้จากสมการ

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (2-5)$$

โดย  $\omega_s$  เป็นมุมของดวงอาทิตย์ตามเวลา (sunset hour angle) หน่วยเป็น radian



**ภาพที่ 2-4 จำนวนชั่วโมงแสงแดดในรอบวันเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและละติจูด**

ที่มา: Allen et al., 1998

## ข. พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นสุทธิ

---

พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้น (short wave radiation,  $R_s$ ) หรือรังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation) ที่มาถึงผิวโลก มีปริมาณน้อยกว่าพลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก เนื่องจาก พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์สูญเสียไปเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศโลกจากการกระจายตัว (scattering) การถูกดูดกลืน (absorption) และการสะท้อน (reflection) ในวันที่ท้องฟ้าปลอดโปร่ง (ไม่มีเมฆปกคลุม) พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกจะมีค่าประมาณร้อยละ 75 ของพลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก

พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นสุทธิ (net short wave radiation,  $R_{ns}$ ) เป็นผลต่างของพลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกกับพลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่สะท้อนออกไป ตามสมการ

$$R_{ns} = R_s - \alpha R_s \quad (2-6)$$

$$R_{ns} = R_s - \alpha R_s \quad (2-7)$$

โดยที่

$\alpha$  = อัลเบโด (albedo) เป็นโดยค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวโลก ใช้เท่ากับ 0.23 สำหรับพืชอ้างอิง

ค่า albedo เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของพื้นผิวและมุมที่รังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบ เช่น พื้นผิวที่เป็นหิมะมีค่าประมาณ 0.95 พื้นผิวดินชื้นมีค่าประมาณ 0.05 พื้นผิวที่ปกคลุมด้วยพืชพรรณมีค่าประมาณ 0.2 – 0.25 เป็นต้น

### กรอบที่ 2-3 การคำนวณพลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นสุทธิ

พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้น ( $R_s$ ) คำนวณได้ตามสมการ

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (2-8)$$

โดย

$n$  = จำนวนชั่วโมงแสงแดดที่แท้จริงที่ตรวจวัดได้ในรอบวัน

$N$  = จำนวนชั่วโมงแสงแดดที่เป็นไปได้สูงสุดในรอบวัน

$n/N$  = ชั่วโมงแสงแดดสัมพัทธ์

$R_a$  = พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก [ $MJ m^{-2} day^{-1}$ ]

ค่า  $a_s$  และ  $b_s$  เป็นค่าคงที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ในกรณีที่ไม่มีความรู้สำหรับปรับเทียบค่า  $a_s$  และ  $b_s$  คู่มือ FAO-56 แนะนำให้ใช้  $a_s = 0.25$  และ  $b_s = 0.50$

พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นสุทธิ ( $R_{ns}$ ) คำนวณได้ตามสมการ

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (2-9)$$

โดย

$\alpha$  = ค่าการสะท้อนแสงที่พื้นผิว [-]

$R_s$  = รังสีแสงอาทิตย์ช่วงคลื่นสั้น [ $MJ m^{-2} day^{-1}$ ]

**กรอบที่ 2-4      การคำนวณพลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้น  
ในกรณีท้องฟ้าปลอดโปร่ง**

พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นในกรณีท้องฟ้าปลอดโปร่ง (clear-sky solar radiation,  $R_{so}$ ) เป็นค่าพลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวในกรณีที่ท้องฟ้าไม่มีเมฆปกคลุม ( $n = N$ ) เป็นค่าที่ใช้ในสมการคำนวณพลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวสุทธิ ( $R_{nl}$ ) สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \quad (2-10)$$

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลสำหรับปรับเทียบค่า  $a_s$  และ  $b_s$  คู่มือ FAO-56 แนะนำให้ใช้  $a_s = 0.25$  และ  $b_s = 0.50$  หรือ  $(a_s + b_s) = 0.75$  และปรับค่าตามระดับความสูง ( $z$ ) ดังนั้น พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นในกรณีท้องฟ้าปลอดโปร่ง ( $R_{so}$ ) สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (2-11)$$

โดย

$$z = \text{ระดับความสูงจากน้ำทะเลปานกลาง [m]}$$

## ค. พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวสุทธิ (Net Long Wave Radiation)

การแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวเป็นการแผ่รังสีความร้อนจากเทหวัตถุตามกฎของ Stefan-Boltzmann (สเตฟาน-โบลท์แมน) โดยพลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวสุทธิ (net longwave radiation,  $R_{nl}$ ) เป็นผลต่างระหว่างพลังงานการแผ่รังสีออกจากผิวโลก ( $R_{l,up}$ ) กับ พลังงานการแผ่รังสีจากชั้นบรรยากาศ ( $R_{l,down}$ ) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพลังงานจากผิวโลกจะมีค่ามากกว่าพลังงานชั้นบรรยากาศ ดังนั้น พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวสุทธิจึงหมายถึงพลังงานการแผ่รังสีที่สูญเสียจากพื้นผิว

### กรอบที่ 2-5 การคำนวณพลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นสุทธิ

พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวสุทธิ ( $R_{nl}$ ) คำนวณได้ตามสมการ

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right) \left( 0.34 - 0.14 \cdot \sqrt{e_a} \right) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (2-12)$$

โดยที่

- $\sigma$  = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่า  $4.903 \times 10^{-9} [MJ K^{-4} m^{-2} day^{-1}]$
- $T_{\max,K}$  = อุณหภูมิสูงสุดประจำวัน หน่วยเป็นเคลวิน [K]
- $T_{\min,K}$  = อุณหภูมิต่ำสุดประจำวัน หน่วยเป็นเคลวิน [K]
- $e_a$  = ความดันไอน้ำจริงในอากาศ [kPa]
- $R_s$  = พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้น [MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>]
- $R_{so}$  = พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นกรณีฟ้าปลอดโปร่ง [MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>]
- $R_s / R_{so}$  = พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นสัมพัทธ์

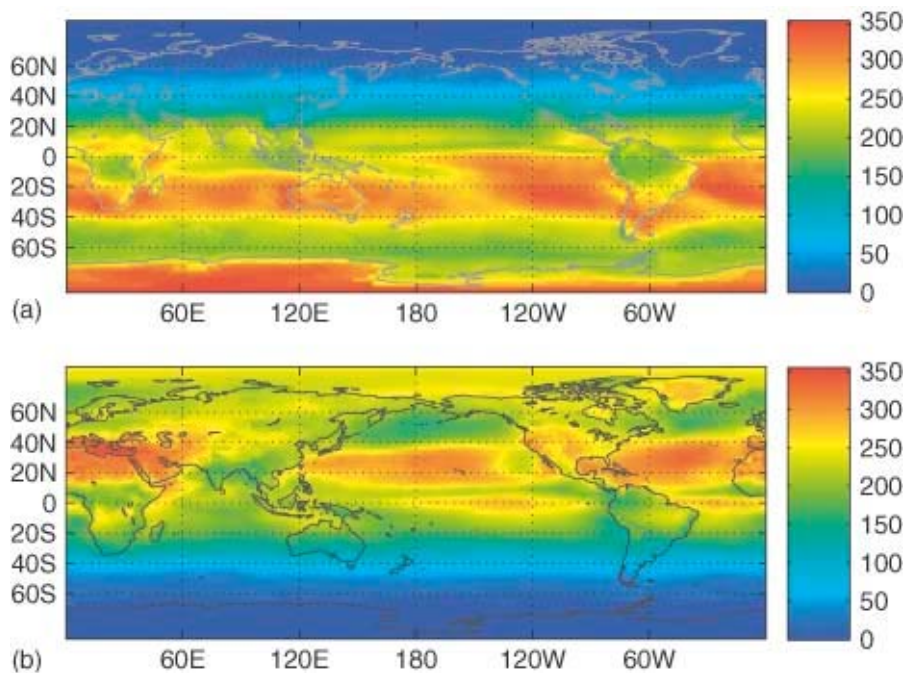


## ง. พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ (Net Radiation)

พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ (net radiation,  $R_n$ ) เป็นผลต่างระหว่างพลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นสุทธิ ( $R_{ns}$ ) กับพลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวสุทธิ ( $R_{nl}$ ) ตามสมการ

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2-13)$$

โดยทั่วไปพลังงานการแผ่รังสีสุทธิในตอนกลางวันมีค่าเป็นบวก ส่วนในตอนกลางคืนมีค่าเป็นลบ ผลรวมพลังงานการแผ่รังสีสุทธิในรอบ 24 ชั่วโมงส่วนใหญ่แล้วจะมีค่าเป็นบวกเสมอ



ภาพที่ 2-5 พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ (a) เดือนมกราคม และ (b) เดือนกรกฎาคม

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยระหว่างปี 1983 ถึง 2001 หน่วยเป็น  $W/m^2$

ที่มา: Pinker, 2005.

**ตัวอย่างที่ 2-1 การหาพลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก**

จงหาพลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลกในวันที่ 2 กุมภาพันธ์  
ที่อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ซึ่งตั้งอยู่ที่ละติจูด  $14^{\circ}01'22.30''\text{N}$

พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก ( $R_a$ ) หาจากสมการ

$$R_a = \frac{G_{sc} d_r}{\pi} [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

(หน่วยของมุมที่ใช้ในคำนวณเป็น เรเดียน)

จากข้อมูลที่กำหนดให้		
วันที่ 2 กุมภาพันธ์ $J =$	33	-
ละติจูด $\phi = 14^{\circ}01'22.30''\text{N} = 14 + (1 + 22.30/60)/60 =$	14.023	$^{\circ}\text{N}$
$\phi = (14.023) \times \pi/180 =$	0.2447	rad.

$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$ $= 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} \times 33\right) =$	1.0278	-
$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$ $= 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} \times 33 - 1.39\right) =$	-0.2996	rad.
$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \tan(\delta)]$ $= \arccos[-\tan(0.2447) \tan(-0.2996)] =$	1.4952	rad.

จะได้พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก		
$R_a = 118.11 \times 1.0278 / \pi$ $\times [1.4952 \sin(0.2447) \sin(-0.2996)$ $+ \cos(0.2447) \cos(-0.2996) \sin(1.4952)]$	31.578	$MJ m^{-2} day^{-1}$

### ตัวอย่างที่ 2-2 การแปลงหน่วยมุม

จงแปลงค่าละติจูดจากหน่วย องศาและลิปดา (degree-minute) เป็นหน่วย องศาและทศนิยม (decimal degree) และหน่วย เรเดียน (radian) ของกรุงเทพมหานคร ที่ 13°44'N และของกรุงรีโอเดอจาเนโร (Rio de Janeiro) ที่ 22°54'S

ละติจูดของกรุงเทพมหานคร			
หน่วย องศาและลิปดา =		13°44'N	
หน่วย องศาและทศนิยม = 13 + 44/60 =		13.73	
หน่วย เรเดียน = 13.73 × (π/180) =		+0.240	rad.
กรุงรีโอเดอจาเนโร			
หน่วย องศาและลิปดา =		22°54'S	
หน่วย องศาและทศนิยม = -(22 + 54/60) =		-22.90	
หน่วย เรเดียน = -22.90 × (π/180) =		-0.400	rad.

ข้อสังเกต:  
 กรุงเทพมหานครตั้งอยู่ทางซีกโลกเหนือ (northern hemisphere) การคำนวณค่าละติจูดจะใช้เป็นค่าบวก ส่วน  
 กรุงรีโอเดอจาเนโรตั้งอยู่ทางซีกโลกใต้ (southern hemisphere) ในการคำนวณจะใช้เป็นค่าลบ

**ตัวอย่างที่ 2-3 การหาจำนวนชั่วโมงแสงแดดในรอบวัน ( N )**

จงหาจำนวนชั่วโมงแสงแดดในรอบวัน โดยใช้ข้อมูลในตัวอย่างที่ 2-1

จำนวนชั่วโมงแสงแดดในรอบวัน ( N ) หาจากสมการ

$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$		
จากตัวอย่างที่ 2-1 ค่า $\omega_s =$	1.4952	rad.
จะได้ $N = \frac{24}{\pi} \times 1.4952 =$	11.422	hours

**ตัวอย่างที่ 2-4 การหาพลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้น (  $R_s$  )**

ในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ ที่อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ซึ่งตั้งอยู่ที่ละติจูด  $14^{\circ}01'22.30''N$  วัดความยาวนานแสงอาทิตย์ ( n ) ได้เท่ากับ 9.5 ชั่วโมง

จงหาพลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้น

พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้น หรือ พลังงานการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (  $R_s$  )

หาจากสมการ

$R_s = \left( 0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right) R_a$		
จากตัวอย่างที่ 2-1 ค่า $R_a =$	31.578	$MJ m^{-2} day^{-1}$
จากตัวอย่างที่ 2-3 ค่า $N =$	11.422	hours
และ $n =$	9.5	hours
จะได้ $R_s = \left( 0.25 + 0.50 \times \frac{9.5}{11.422} \right) \times 31.578 =$	21.027	$MJ m^{-2} day^{-1}$

**ตัวอย่างที่ 2-5 การหาพลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวสุทธิ ( $R_{nl}$ )**

ในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ ที่ อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ซึ่งตั้งอยู่ที่ละติจูด  $14^{\circ}01'22.30''N$   
 ตรวจวัดข้อมูลอุตุนิยมวิทยาได้ดังนี้

อุณหภูมิสูงสุด ( $T_{max}$ )	34.8	$^{\circ}C$
อุณหภูมิต่ำสุด ( $T_{min}$ )	25.6	$^{\circ}C$
ความดันไอน้ำ ( $e_a$ )	2.85	$kPa$
ความยาวนานแสงอาทิตย์ ( $n$ )	9.5	$hours$

จงหาพลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวสุทธิ

พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวสุทธิ ( $R_{nl}$ ) หาจากสมการ

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) \times (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \times \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

การคำนวณพลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวสุทธิ ต้องใช้ข้อมูล พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นใน  
 กรณีท้องฟ้าปลอดโปร่ง ( $R_{so}$ ) ซึ่งหาได้จากสมการ

$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a$ ในกรณีไม่ทราบ ค่าระดับความสูง $z$ อาจประมาณจาก $R_{so} = 0.75 R_a$ จากตัวอย่างที่ 2-1 ค่า $R_a =$ ดังนั้น $R_{so} = 0.75 \times 31.578$	31.578	$MJ m^{-2} day^{-1}$
	23.683	$MJ m^{-2} day^{-1}$

จากข้อมูล $T_{\max}$ =	34.8	$^{\circ}\text{C}$
จากข้อมูล $T_{\min}$ =	25.6	$^{\circ}\text{C}$
ดังนั้น $\sigma \left( \frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right) =$		
$4.903 \times 10^{-9} \times \left( \frac{(34.8 + 273.16)^4 + (25.6 + 273.16)^4}{2} \right) =$	41.58	
จากข้อมูล $e_a$ =	2.85	$\text{kPa}$
$(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) = (0.34 - 0.14 \times \sqrt{2.85}) =$	0.104	
จากตัวอย่างที่ 2-4 $R_s$ =	21.027	$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$
$\left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) = \left( 1.35 \times \frac{21.027}{23.638} - 0.35 \right) =$	0.851	
จะได้ $R_{nl} = 41.58 \times 0.104 \times 0.851 =$	3.68	$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$

**ตัวอย่างที่ 2-6 การหาพลังงานการแผ่รังสีสุทธิ ( $R_n$ )**

จากข้อมูลในตัวอย่างที่ 2-4 และตัวอย่างที่ 2-5 สามารถคำนวณพลังงานการแผ่รังสีสุทธิได้ดังนี้

พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ ( $R_n$ ) หาจากสมการ

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นสุทธิ ( $R_{ns}$ ) หาจากสมการ

$R_{ns} = (1-\alpha)R_s$ จากตัวอย่างที่ 2-4 $R_s =$ สำหรับการคำนวณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ค่าอัลเบโด ( $\alpha$ ) = จะได้ $R_{ns} = (1-0.23) \times 21.027$	21.027	$MJ m^{-2} day^{-1}$
	0.23	
	16.19	$MJ m^{-2} day^{-1}$
จากตัวอย่างที่ 2-5 $R_{nl} =$	3.68	$MJ m^{-2} day^{-1}$
ดังนั้น พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ $R_n = 16.19 - 3.68$	12.51	$MJ m^{-2} day^{-1}$
หรือ คิดเป็นความลึกน้ำ $= 12.51 \times 0.408 =$	5.1	$mm day^{-1}$

ข้อสังเกต:

การเปลี่ยนหน่วยพลังงาน [ $MJ m^{-2} day^{-1}$ ] เป็นหน่วยเทียบกับปริมาณน้ำที่ระเหย [ $mm day^{-1}$ ]  
 ทำโดยคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ 0.408

## 2.2 อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)

อุณหภูมิ (temperature) เป็นระดับความร้อนหนาวของอากาศและสิ่งต่าง ๆ บนพื้นผิวโลก อุณหภูมิอากาศจะค่อย ๆ ลดลงจากบริเวณเส้นศูนย์สูตรไปยังขั้วโลกทั้ง 2 ข้าง อุณหภูมิของอากาศนอกจากจะเปลี่ยนแปลงตามละติจูดแล้ว ยังเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบอื่น ๆ อีกด้วย เช่น ความสูง ลักษณะของพื้นผิว ทิศทางลม แสงแดด (ราชบัณฑิตยสถาน, 2549) อุณหภูมิของอากาศเป็นการปล่อยพลังงานความร้อนจากพื้นดินให้กับบรรยากาศ พลังงานความร้อนดังกล่าวนี้เป็นพลังงานที่เปลี่ยนรูปจากพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ เรียกว่า ความร้อนรู้สึก (sensible heat) การถ่ายเทความร้อนมีกลไกแบบต่าง ๆ ด้วยกัน 3 แบบ (สุนันท์, 2545) คือ การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือ การนำความร้อน (conduction) การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือ การพาความร้อน (convection) และการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี หรือ การแผ่รังสีความร้อน (radiation) เนื่องจากอากาศเป็นตัวนำความร้อนที่เลว แต่เป็นตัวพาความร้อนที่ดี การเปลี่ยนแปลงความร้อนในบรรยากาศส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นทั้งการถ่ายเทความร้อนในแนวตั้ง ที่เรียกว่า การพาความร้อน (convection) และ การถ่ายเทความร้อนในแนวราบ (advection) (รังสรรค์, 2546)

อุณหภูมิอากาศวัดด้วย เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) มีหน่วยวัดเป็น องศาเซลเซียส [ $^{\circ}\text{C}$ ] การคำนวณในบางกรณีใช้อุณหภูมิ หน่วยเป็น เคลวิน [ $\text{K}$ ] โดย  $T[\text{K}] = T[{}^{\circ}\text{C}] + 273.16$  ค่าของอุณหภูมิอากาศประจำวัน ( $T_{mean}$ ) สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศสูงสุดประจำวัน ( $T_{max}$ ) และอุณหภูมิอากาศต่ำสุดประจำวัน ( $T_{min}$ ) ตามสมการ

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (2-14)$$



## 2.3 ความชื้นในอากาศ (Air Humidity)

ความชื้น (humidity) เป็นปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ สามารถบอกปริมาณความชื้นได้ในรูปของค่าความดันไอน้ำ (vapor pressure) ซึ่งมีหน่วยวัดเป็น ปาสคาล [ Pa ] หรือ นิวตันต่อตารางเมตร [ N m<sup>-2</sup> ] เนื่องจาก หนึ่งหน่วยปาสคาล มีค่าน้อยมากโดยความดัน 1 บรรยากาศ (1 bar) มีค่าประมาณ 101,325 Pa หรือ 101.325 kPa ดังนั้น จึงนิยมใช้หน่วยเป็น กิโลปาสคาล [ kPa ] หรือบางครั้งอาจพบหน่วย เฮกโตปาสคาล (Hecto-Pascal, hPa) ซึ่งเท่ากับ 100 Pa หรือเทียบเท่ากับเสดของน้ำ ประมาณ 1 เซนติเมตร เทอมต่าง ๆ เกี่ยวกับความชื้น มีดังนี้

### ก. ความดันไอน้ำจริงในอากาศ (Actual Vapor Pressure)

---

ความดันไอน้ำจริงในอากาศคำนวณได้จากข้อมูลอุณหภูมิที่จุดน้ำค้าง (ดูรายละเอียดการคำนวณในกรอบที่ 2-7) ข้อมูลอุณหภูมิกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง (กรอบที่ 2-8) หรือ ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ (กรอบที่ 2-9)

### ข. ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Vapor Pressure)

---

อากาศที่มีความดันเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว เป็นสภาพอากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำหรือมีความจุไอน้ำสูงสุดที่ระดับอุณหภูมิใด ๆ ความดันไอน้ำอิ่มตัวจะเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิอากาศ คำนวณได้จากสมการ

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (2-15)$$

โดยที่

$$e_s = \text{ความดันไอน้ำอิ่มตัว [ kPa ]}$$

$$T = \text{อุณหภูมิอากาศ [ }^{\circ}\text{C ]}$$

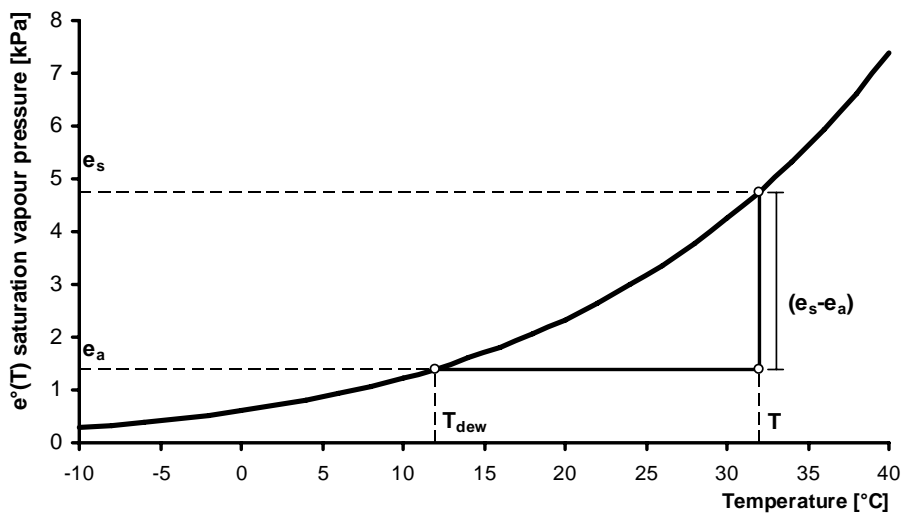
ความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ย ( $e_s$ ) กำหนดจากค่าเฉลี่ยของความดันไอน้ำอิ่มตัวที่หาจากอุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุด ตามสมการ

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2} \quad (2-16)$$

โดยที่

$e^\circ(T_{\max})$  เป็นความดันไอน้ำอิ่มตัวของอุณหภูมิอากาศสูงสุดประจำวัน [kPa]

$e^\circ(T_{\min})$  เป็นความดันไอน้ำอิ่มตัวของอุณหภูมิต่ำสุดประจำวัน [kPa]



รูปที่ 2.1 | **โค้งความสัมพันธ์ความดันไอน้ำอิ่มตัว**

## ค. ความดันไอน้ำที่ขาด (Vapor Pressure Deficit)

---

ความดันไอน้ำที่ขาด (vapor pressure deficit (VPD),  $e_s - e_a$ ) เป็นผลต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัว ( $e_s$ ) กับความดันไอน้ำจริงในอากาศ ( $e_a$ )

## ง. อุณหภูมิที่จุดน้ำค้าง (Dew-point Temperature)

---

จุดน้ำค้าง (dew point) หมายถึง จุดอุณหภูมิซึ่งอากาศถูกทำให้เย็นตัวลงด้วยความกดคงที่และด้วยปริมาณไอน้ำในอากาศคงที่ จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัวขึ้น หรือ จุดอุณหภูมิซึ่งความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศ (saturated vapor pressure) เท่ากับความดันไอที่แท้จริงของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศนั้น โดยอุณหภูมิที่ไอน้ำเริ่มกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ เรียกว่า “อุณหภูมิจุดน้ำค้าง” (dew-point temperature)

## จ. ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

---

ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity,  $RH$ ) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำจริง ( $e_a$ ) ต่อกับความดันไอน้ำอิ่มตัว ( $e_s$ ) ที่อุณหภูมิเดียวกัน นิยมบอกหน่วยเป็นร้อยละ

$$RH = \frac{e_a}{e_s} \quad (2-17)$$

โดยที่

$$e_a = \text{ความดันไอน้ำจริงในอากาศ [ kPa ]}$$

$$e_s = \text{ความดันไอน้ำอิ่มตัว [ kPa ]}$$

### กรอบที่ 2-6 ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Pressure)

ความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure,  $P$ ) เป็นความดันที่เกิดจากน้ำหนักบรรยากาศโลกที่กดทับเหนือพื้นผิว มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล [ $kPa$ ] ในการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงได้ เลือกใช้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}C$  เป็นมาตรฐาน โดยให้ปรับแก้ค่าตามระดับความสูง  $z$  ตามสมการ

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (2-18)$$

โดย  $z$  เป็นระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล [ $m$ ]

### กรอบที่ 2-7 การคำนวณความดันไอน้ำจริงในอากาศจากข้อมูลอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

การคำนวณความดันไอน้ำจริงในอากาศจากข้อมูลอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ( $T_{dew}$ ) ทำได้โดยแทนอุณหภูมิที่จุดน้ำค้าง [ $^{\circ}C$ ] ลงในสมการความดันไอน้ำอิ่มตัว

$$e^o(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (2-19)$$

$$e^o(T_{dew}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 \cdot T_{dew}}{T_{dew} + 237.3}\right) \quad (2-20)$$

ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำจริงในอากาศ

$$e_a = e^o(T_{dew}) \quad (2-21)$$

กรอบที่ 2-8 การคำนวณความดันไอน้ำจริงในอากาศจากข้อมูลอุณหภูมิกะเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง

ความดันไอน้ำจริงในอากาศคำนวณจากข้อมูลอุณหภูมิกะเปาะเปียก ( $T_{wet}$ ) และข้อมูลอุณหภูมิกะเปาะแห้ง ( $T_{dry}$ )

คำนวณจากข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดความชื้น (Psychrometer) ตามสมการ

$$e_a = e^o(T_{wet}) - \gamma_{psy}(T_{dry} - T_{wet}) \quad (2-22)$$

โดยที่

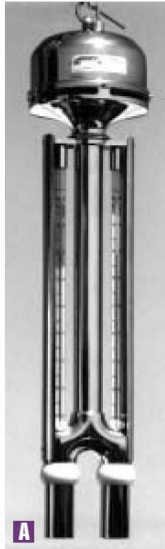
$T_{dry}$  = อุณหภูมิกะเปาะแห้ง (dry-bulb temperature) [ $^{\circ}C$ ]

$T_{wet}$  = อุณหภูมิกะเปาะเปียก (wet-bulb temperature) [ $^{\circ}C$ ]

$e^o(T_{wet})$  = ความดันไอน้ำอิ่มตัวของอุณหภูมิกะเปาะเปียก [ $kPa$ ]

$\gamma_{psy}$  = ค่าคงที่ของเครื่องวัดความชื้นแบบเทอร์มิเตอร์กระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง หรือไซโครมิเตอร์ (psychrometer)

=  $a_{psy}P$  โดยที่  $P$  เป็นความดันบรรยากาศ [ $kPa$ ] ส่วน  $a_{psy}$  เป็นค่าคงที่ของไซโครมิเตอร์ขึ้นกับความเร็วลมที่ผ่านเทอร์มิเตอร์



$$a_{psy} = 0.000662$$

สำหรับเครื่องวัดความชื้นไซโครมิเตอร์

แบบ Asmann (Asmann ventilated psychrometers) ซึ่งมีลมผ่าน

เทอร์โมมิเตอร์ด้วยความเร็วประมาณ  $5 \text{ m s}^{-1}$

A



$$a_{psy} = 0.00080$$

สำหรับเครื่องวัดความชื้นไซโครมิเตอร์

ชนิดมีลมตามธรรมชาติผ่าน

เทอร์โมมิเตอร์ โดยมีความเร็วลม

ประมาณ  $1 \text{ m s}^{-1}$  (natural ventilated psychrometers)

$$a_{psy} = 0.001200$$

สำหรับเครื่องวัดความชื้นไซโครมิเตอร์

ติดตั้งในร่ม ไม่มีลมผ่านเทอร์โมมิเตอร์

(non-ventilated psychrometers)

**กรอบที่ 2-9 การคำนวณความดันไอน้ำจริงในอากาศจากข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์**

การคำนวณความดันไอน้ำจริงในอากาศจากข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ อาจพิจารณาวิธีการคำนวณตามข้อมูลที่มีได้เป็น 3 กรณี

(1) กรณีที่มีข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด ( $RH_{\max}$ ) และต่ำสุด ( $RH_{\min}$ ) คำนวณความดันไอน้ำจริงในอากาศโดยใช้สมการ

$$e_a = \frac{e^o(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e^o(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2} \quad (2-23)$$

(2) กรณีที่มีเพียงข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดอย่างเดียว คำนวณตามสมการ

$$e_a = e^o(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} \quad (2-24)$$

(3) กรณีที่มีเพียงข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ( $RH_{mean}$ ) อย่างเดียว คำนวณโดยใช้สมการ

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2} \quad (2-25)$$

ผลการคำนวณในกรณีทั้งสามนี้จะให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องน้อยกว่าผลจากสองกรณีแรก

**ตัวอย่างที่ 2-7 การหาความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ย**

กำหนดให้

อุณหภูมิสูงสุดประจำวัน เท่ากับ 34.5 °C อุณหภูมิต่ำสุดประจำวัน เท่ากับ 25.0 °C

จงหา ความดันไอน้ำอิ่มตัวของวันนี้

ในกรณีมีข้อมูลอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดประจำวัน ความดันไอน้ำอิ่มตัวสามารถหาได้จากความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ย ตามสมการ

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2}$$

ความดันไอน้ำอิ่มตัว หาจากสมการ

$$e^\circ(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)$$

<p>จากอุณหภูมิสูงสุด (<math>T_{\max}</math>) =</p> $e^\circ(T_{\max}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max} + 237.3}\right)$ $= 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times 34.5}{34.5 + 237.3}\right) =$	34.5	°C
<p>จากอุณหภูมิต่ำสุด (<math>T_{\min}</math>) =</p> $e^\circ(T_{\min}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right)$ $= 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times 25.0}{25.0 + 237.3}\right) =$	25.0	°C
<p>จะได้ความดันไอน้ำอิ่มตัว</p> $e_s = \frac{5.47 + 3.17}{2} =$	4.32	kPa



**ตัวอย่างที่ 2-8    การหาความดันไอน้ำจริงในอากาศจากข้อมูลอุณหภูมิกะเปาะเปียก-กะเปาะแห้ง**

อุณหภูมิต่ออ่านได้จากเครื่องวัดความชื้นแบบ Asmann โดยวัดที่ระดับความสูง 1,200 ม.รทก.มีค่าดังนี้  
 อุณหภูมิกะเปาะเปียก เท่ากับ 19.5 °C    อุณหภูมิกะเปาะแห้ง เท่ากับ 25.6 °C  
 จงหา ความดันไอน้ำจริงในอากาศ

ความดันไอน้ำจริงในอากาศ หาจากสมการ

$$e_a = e^o(T_{wet}) - \gamma_{psy}(T_{dry} - T_{wet})P$$

เครื่องวัดความชื้นแบบ Asmann

$$\gamma_{psy} =$$

0.000662

จากข้อมูลระดับความสูง (z) =

1200

m MSL

ความดันบรรยากาศ (P)

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065 \times 1200}{293} \right)^{5.26}$$

87.9

kPa

จากอุณหภูมิกะเปาะเปียก ( $T_{wet}$ ) =

19.5

°C

$$e^o(T_{max}) = 0.6108 \exp \left( \frac{17.27 T_{wet}}{T_{wet} + 237.3} \right)$$

$$= 0.6108 \times \exp \left( \frac{17.27 \times 19.5}{19.5 + 237.3} \right) =$$

2.267

kPa

จะได้ความดันไอน้ำจริงในอากาศ

$$e_a = 2.267 - 0.000662 \times (25.6 - 19.5) \times 87.9 =$$

1.91

kPa

**ตัวอย่างที่ 2-9 การหาความดันไอน้ำจริงในอากาศจากข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์**

กำหนดให้

อุณหภูมิสูงสุดประจำวัน เท่ากับ  $25.0^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิต่ำสุดประจำวัน เท่ากับ  $18.0^{\circ}\text{C}$

ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด เท่ากับ 82% ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด เท่ากับ 54%

จงหา ความดันไอน้ำจริงในอากาศ

ความดันไอน้ำจริงในอากาศ หาจากสมการ

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e^{\circ}(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2}$$

จากอุณหภูมิสูงสุด ( $T_{\max}$ ) =	25.0	$^{\circ}\text{C}$
$e^{\circ}(T_{\max}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max} + 237.3}\right)$ $= 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times 25.0}{25.0 + 237.3}\right) =$	3.167	kPa
จากอุณหภูมิต่ำสุด ( $T_{\min}$ ) =	18.0	$^{\circ}\text{C}$
$e^{\circ}(T_{\min}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right)$ $= 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times 18.0}{18.0 + 237.3}\right) =$	2.064	kPa
จะได้ความดันไอน้ำจริงในอากาศ		
$e_a = \frac{2.064 \times \frac{82}{100} + 3.168 \times \frac{54}{100}}{2} =$	1.70	kPa

**ตัวอย่างที่ 2-10 การหาความดันไอน้ำที่ขาด**

ให้ใช้ข้อมูลในตัวอย่างที่ 2-9 หาความดันไอน้ำที่ขาด

ความดันไอน้ำที่ขาด ( $e_s - e_a$ ) เป็นผลต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัว ( $e_s$ ) กับความดันไอน้ำจริงในอากาศ ( $e_a$ )

จากตัวอย่างที่ 2-9

$$e_a =$$

1.70 kPa

$$e^\circ(T_{\max}) =$$

3.167 kPa

$$e^\circ(T_{\min}) =$$

2.064 kPa

ความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ยหาจากสมการ

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2}$$

$$e_s = \frac{3.167 + 2.064}{2} =$$

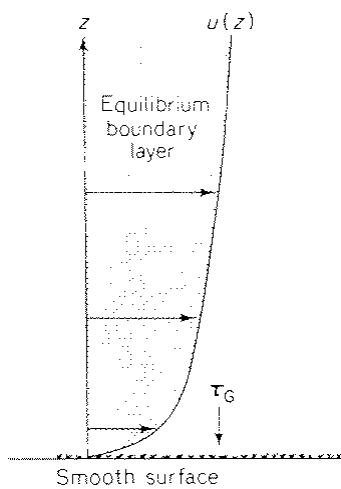
2.615 kPa

จะได้ความดันไอน้ำที่ขาด

$$e_s - e_a = 2.615 - 1.70 =$$

0.915 kPa

## 2.4 ความเร็วลม (wind speed)



ลม (wind) เป็นอากาศที่เคลื่อนที่ไปบนผิวโลกตามแนวอนในทิศทางต่างๆ และด้วยความเร็วต่าง ๆ กัน ทิศทางของลมทราบได้จากทิศซึ่งลมพัดเข้าหาตัว ตามที่กำหนดไว้บนเข็มทิศ เช่น ลมใต้ จะเป็นลมที่พัดมาจากทิศใต้เข้าหาตัวเรา (ราชบัณฑิตยสถาน, 2549) ความเร็วลมจะลดลงเมื่ออยู่ใกล้พื้นผิว ทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจากความเสียดทานกับพื้นผิว ซึ่งจะมีอิทธิพลในช่วงความสูงจากพื้นไม่เกิน 600 เมตร เรียกว่า friction layer หน้าตัดความเร็วลม (wind profile) จะเป็นเส้นโค้งแบบ logarithmic velocity profile (ภาพที่ 2-6)

ภาพที่ 2-6 หน้าตัดความเร็วลมเหนือพื้นผิวโล่ง

การประเมินค่าความเร็วลมที่ระดับต่าง ๆ (Linsley et al., 1988) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln \frac{z}{z_0}; \quad z \geq z_0 \quad (2-26)$$

โดยที่

- $z$  = heights above ground surface
- $z_0$  = roughness height of surface
- $k$  = von Karman's constant (0.41)
- $u_*$  = friction velocity

การตรวจวัดข้อมูลลม ประกอบด้วย ทิศทางที่ลมพัดมา กับ ความเร็วลม สำหรับข้อมูลความเร็วลมวัดจากเครื่อง anemometer มีหน่วยวัดเป็น เมตรต่อวินาที [ $m s^{-1}$ ]<sup>6</sup> ในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืช ใช้ข้อมูลความเร็วลมที่ระดับ 2 เมตรจากผิวดิน ในขณะที่เครื่องวัดความเร็วลมไม่ได้ติดตั้งที่ระดับ ดังกล่าวสามารถปรับแก้ได้ตามสมการ

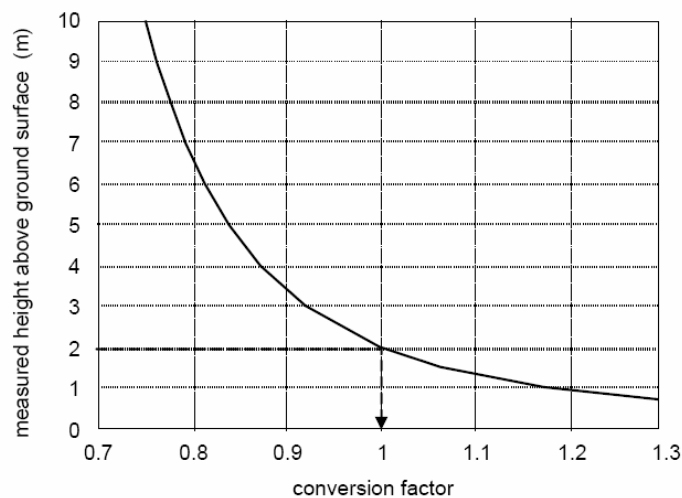
$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (2-27)$$

โดยที่

$u_2$  = ความเร็วลมที่ระดับ 2 เมตรจากผิวดิน [ $m s^{-1}$ ]

$u_z$  = ความเร็วลมที่ระดับ  $z$  เมตรจากผิวดิน [ $m s^{-1}$ ]

$z$  = ระดับความสูงของเครื่องวัดความเร็วลม [ $m$ ]



ภาพที่ 2-7 สัมประสิทธิ์ปรับแก้ความเร็วลมเป็นที่ระดับความสูง 2 เมตร

ที่มา: Allen et al., 1998

<sup>6</sup> ความเร็วลม อาจบอกหน่วยเป็น น็อต (nautical mile/hour, knot) โดย 1 knot = 0.5144  $m s^{-1}$

**ตัวอย่างที่ 2-11 การปรับข้อมูลความเร็วลมมาที่ระดับความสูง 2 เมตร**

กำหนดให้ ความเร็วลมที่วัดที่ระดับ 10 เมตรจากผิวดิน เท่ากับ  $3.2 \text{ m s}^{-1}$   
 จงหาความเร็วลมที่ระดับความสูงมาตรฐาน 2 เมตร

จากสมการ

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$

$u_z =$	3.2	$\text{m s}^{-1}$
$z =$	10	$\text{m}$
จะได้ความเร็วลมที่ระดับความสูงมาตรฐาน 2 เมตร		
$u_2 = 3.2 \times \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)} =$	2.4	$\text{m s}^{-1}$

## 2.5 แบบฝึกหัด

1. จงอธิบายองค์ประกอบของสมดุลพลังงานการแผ่รังสี (radiation balance)
2. ในวันที่ 8 สิงหาคม 2008 ที่ละติจูด  $39^{\circ}54'N$  จงหา
  - 2.1. ส่วนกลับของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์สัมพัทธ์ (inverse relative distance Earth-Sun,  $d_r$ )  
(ตอบ 0.9736)
  - 2.2. มุมเบนของดวงอาทิตย์ตามฤดูกาล (solar declination,  $\delta$ )  
(ตอบ 0.2771 เรเดียน)
  - 2.3. มุมของดวงอาทิตย์ตามเวลา (sunset hour angle,  $\omega_s$ )  
(ตอบ 1.81 เรเดียน)
  - 2.4. จำนวนชั่วโมงแสงแดดในรอบวัน (daylight hours,  $N$ )  
(ตอบ 13.83 ชม.)
  - 2.5. พลังงานการแผ่รังสีที่ขึ้นนอกของบรรยากาศโลก ( $R_a$ )  
(ตอบ  $37.86 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ )
  - 2.6. ถ้าวัดความยาวนานแสงอาทิตย์ ( $n$ ) ได้เท่ากับ 5.5 ชั่วโมง  
จงหาพลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้น ( $R_s$ )  
(ตอบ  $16.99 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ )
  - 2.7. พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นในกรณีท้องฟ้าปลอดโปร่ง ( $R_{so}$ )  
(ตอบ  $28.39 \text{ MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ )
3. ถ้าในวันที่ 23 ธันวาคม ตรวจวัดอุณหภูมิสูงสุดประจำวัน เท่ากับ  $33.7^{\circ}\text{C}$  และ  
อุณหภูมิต่ำสุดประจำวัน เท่ากับ  $17.8^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิประจำวันนี้ เท่ากับเท่าไร
4. ปริมาณความชื้นในบรรยากาศสามารถกล่าวถึงในเทอมใดได้บ้าง
5. จงบอกเครื่องวัดความชื้นที่ท่านรู้จักว่ามีอะไรบ้าง
6. จงอธิบายความหมายของความดันไอน้ำอิ่มตัว
7. จงอธิบายความหมายของความดันน้ำที่ขาด

8. จงอธิบายความหมายของอุณหภูมิที่จุดน้ำค้าง
9. ให้อ่าวกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัวและอุณหภูมิ เพื่อประกอบการอธิบายความหมายของค่าต่อไปนี้
 

- Air temperature	- Dew-point temperature
- Wet-bulb temperature	- Vapor pressure deficit
10. เมื่ออุณหภูมิอากาศ เท่ากับ  $36^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 64.44% และความดันของบรรยากาศ 1013 มิลลิบาร์ จงหา
  - 10.1. ความดันไอน้ำจริงในอากาศ
  - 10.2. อุณหภูมิที่จุดน้ำค้าง (dew-point temperature,  $T_{\text{dew}}$ )
  - 10.3. อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature,  $T_w$ )
11. เมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งเท่ากับ  $35.1^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิกระเปาะเปียก  $27.9^{\circ}\text{C}$  และความดันของบรรยากาศ 1000 มิลลิบาร์ จงหา
  - 11.1. ความดันไอน้ำจริงในอากาศ
  - 11.2. ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity)
  - 11.3. อุณหภูมิที่จุดน้ำค้าง (dew-point temperature)
12. จากตัวอย่างที่ 2-9 ให้คำนวณ ความดันไอน้ำจริงในอากาศอีก 2 กรณี คือ (1) จากอุณหภูมิต่ำสุดประจำวัน และ ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด (2) จากอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดประจำวัน และ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย และให้อธิบายเปรียบเทียบผลที่ได้ของทั้งสามกรณี
13. ข้อมูลที่กำหนดให้ในตารางที่ 2-1 เป็นข้อมูลภูมิอากาศรายเดือน ปี พ.ศ. 2544 (2001) ของสถานีตรวจอากาศเกษตรกำแพงแสน
  - 13.1. จงหาความดันไอน้ำอิ่มตัวจากข้อมูลอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย
  - 13.2. จงหาความดันไอน้ำจริงในอากาศจากข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์
  - 13.3. จงหาความดันไอน้ำจริงในอากาศจากข้อมูลอุณหภูมิที่จุดน้ำค้าง
  - 13.4. เครื่องมือวัดลมมีความสูงเหนือผิวดินเท่าไร
  - 13.5. จงหาความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 2 เมตร ในหน่วย เมตรต่อวินาที



ตารางที่ 2-1 ข้อมูลภูมิอากาศรายเดือน

AGROCLIMATOLOGICAL DATA 2001															
Station	KAMPHAENG SAEN												Elevation of station above MSL	7.46	m
Latitude	14.0 N												Height of thermometer above ground	1.20	m
Longitude	99.9 E												Height of wind vane above ground	11.00	m
													Height of rain gauge	0.80	m
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year		
Air temperature (celsius)															
Extreme maximum	35.2	36.2	36.1	39.0	36.8	36.6	36.6	35.1	36.2	33.9	33.1	33.0	39.0		
Date	10	25	6	11	7	6	24	25	17	15	4	6,3			
Mean maximum	32.5	33.7	32.6	37.0	34.3	33.8	33.7	33.0	34.1	31.6	29.3	29.9	33.0		
Mean	26.9	27.4	28.1	31.4	29.6	29.4	29.2	28.9	29.3	27.8	24.8	25.0	28.2		
Mean minimum	21.3	21.1	23.5	25.8	24.8	24.9	24.6	24.8	24.4	24.0	20.3	20.1	23.3		
Extreme minimum	16.1	17.1	21.0	24.4	23.7	23.4	22.9	23.8	23.0	22.7	15.0	14.2	14.2		
Date	3	25	13	3	21	17	19	15	23	27	23	24			
Grass minimum temperature (celsius)															
Mean minimum	18.1	17.1	21.0	22.8	22.9	23.3	22.9	23.4	23.0	23.0	18.2	17.2	21.1		
Extreme minimum	12.2	10.7	19.3	21.1	21.1	21.5	20.5	21.0	21.3	22.1	10.9	9.9	9.9		
Date	3	25	29	3	12	17	19	15	15	27	22	24			
Water temperature (celsius)															
Mean maximum	32.6	33.1	34.1	38.2	36.0	35.1	35.0	34.5	36.7	34.3	31.4	31.1	34.3		
Mean	27.4	27.4	29.1	32.1	30.7	30.1	30.0	29.7	31.0	29.8	26.3	26.1	29.1		
Mean minimum	22.2	21.7	24.1	26.0	25.3	25.0	24.9	24.9	25.2	25.2	21.1	21.1	23.9		
Relative humidity (%)															
Extreme maximum	97	98	99	98	96	96	96	95	97	96	97	98	99		
Mean maximum	94	97	97	96	94	93	93	92	93	95	94	95	94		
Mean	72	70	79	72	76	75	75	76	74	80	74	74	75		
Mean minimum	50	43	60	48	57	57	57	59	54	65	54	53	55		
Extreme minimum	32	22	42	34	44	48	44	50	45	54	34	43	22		
Date	11	25	28	19	6	6	24	13	17	22	26	31			
Soil temperature (celsius)															
Mean at surface	28.0	29.1	29.9	34.1	30.9	30.8	30.4	29.5	30.8	29.7	27.2	27.1	29.8		
Mean at 5 cm	28.0	29.2	30.2	34.1	31.1	31.1	30.8	29.8	31.0	30.0	27.4	27.4	30.0		
Mean at 10 cm	28.1	29.3	30.3	34.2	31.2	31.3	31.0	30.0	31.1	30.0	27.4	27.3	30.1		
Mean at 20 cm	28.3	29.3	30.3	33.9	31.4	31.5	31.2	30.4	31.3	30.2	27.9	27.7	30.3		
Mean at 50 cm	28.2	29.2	30.2	33.8	31.4	31.6	31.3	30.6	31.3	30.0	28.0	27.8	30.3		
Mean at 100 cm	28.3	29.0	29.6	32.0	31.5	31.5	31.1	30.9	31.0	30.4	29.1	28.4	30.2		
Rainfall (mm)															
Total amount	2.7	3.8	116.5	0.8	150.9	114.0	71.8	104.5	231.6	332.0	36.6	0.9	1166.1		
Number of rainy day	2	2	11	1	15	12	12	13	18	22	3	1	112		
Greatest in 24 hr	2.0	3.6	32.8	0.8	29.1	32.5	29.2	33.6	70.2	71.5	31.9	0.9	71.5		
Date	14	8	9	30	17	30	30	3	18	30	1	4			
Evaporation (mm)															
Mean	3.8	4.3	4.1	6.0	5.2	4.8	4.7	4.6	4.5	3.5	3.8	3.4	4.4		
Wind															
Prevailing direction	S	S	S	S	S	W	SW	W	W	N	N	NE			
Mean speed (m/s)	1.0	1.2	1.5	1.6	1.5	1.9	1.5	2.2	1.3	1.1	2.1	1.7			
Sunshine duration (hr)															
Extreme maximum	9.4	9.8	10.1	10.4	10.8	10.9	9.9	9.5	10.2	9.3	9.1	9.2	10.9		
Date	28	26	17	22,20	31	1	31	23	20	16	26,20	10,9			
Mean	6.8	7.9	6.2	8.7	6.0	4.8	4.8	3.6	6.4	5.0	7.3	7.1	6.2		
Remark: "-" indicate missing data															
AGROMETEOROLOGICAL ANALYSIS SUB-DIVISION, AGROMETEOROLOGY DIVISION DATA PROCESSING SUB-DIVISION, CLIMATOLOGY DIVISION METEOROLOGICAL DEPARTMENT															



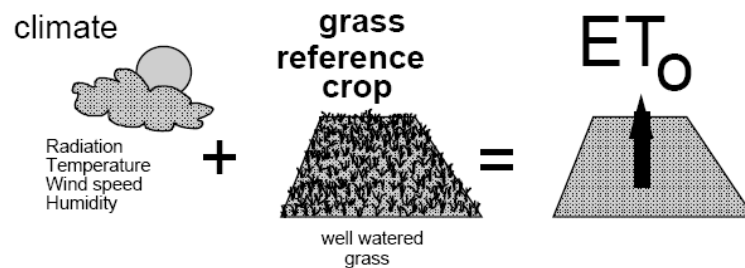
## ส่วนที่ 2

# การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช

โดยวิธีของ FAO-56



### 3. การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช อ้างอิง



ภาพที่ 3-1 การใช้น้ำของพืชอ้างอิง

ที่มา: Allen et al., 1998

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงวิธีการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงตามคู่มือ FAO-56 โดยในส่วนแรกกล่าวถึงการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาโดยใช้สมการของ Penman-Monteith ตามคู่มือ FAO-56 และส่วนที่สองกล่าวถึงการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงจากข้อมูลการระเหยน้ำจากถาดวัดการระเหย

“การใช้น้ำของพืชอ้างอิง” (reference crop evapotranspiration) หรือในบางครั้งเรียกเป็น reference evapotranspiration) เขียนโดยย่อเป็น  $ET_0$  หมายถึง ปริมาณการคายน้ำรวมกับการระเหยน้ำจากพืชอ้างอิง โดยในคู่มือ FAO-56 กำหนดให้พื้นที่ผิวอ้างอิงเป็นพืชที่มีความสูง 0.12 ม. มีค่าความต้านทานพื้นผิวกวที่ (surface resistance) เท่ากับ  $70 \text{ s.m}^{-1}$  และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (albedo) เท่ากับ 0.23 (Allen et al., 1998) ซึ่งพื้นที่ผิวอ้างอิงในคู่มือ FAO-56 ยังคงมีความหมายเช่นเดียวกับพืชอ้างอิงในคู่มือ FAO-24 (Doorenbos and Pruitt, 1977) ซึ่งได้จัดพิมพ์ก่อน แต่ในคู่มือ FAO-56 ได้ระบุคุณสมบัติเฉพาะของพืชที่เป็นพารามิเตอร์ในสมการของ Penman-Monteith (อ่านว่า เพนแมน-มอนทีธ)

### 3.1 การหาปริมาณการใช้น้ำอ้างอิง ด้วยสมการ FAO Penman-Monteith

การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยา (ET computed from meteorological data) เป็นวิธีการที่ไม่ได้วัดปริมาณน้ำที่ระเหยไปโดยตรง แต่จะใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระเหย นำมาวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์กับการระเหย ซึ่งอาจแบ่งตามชนิดของข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่นำมาใช้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- วิธีคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิ (temperature-based estimating methods) อาทิ วิธีของ Thornthwaite and Mather (1955) วิธีของ Blaney-Criddle (SCS, 1967, Doorenbos and Pruitt, 1977) วิธีของ Hargreaves (1985)
- วิธีคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยใช้ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ (radiation methods) อาทิ วิธีของ Priestley and Taylor (1972) วิธีของ Makkink (1957) วิธีของ Turc (1961)
- วิธีคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยใช้ข้อมูลหลายชนิดร่วมกัน (combination methods) เช่น วิธีของ Penman (1948)

วิธีของ Penman นั้นอาจนับอยู่ในกลุ่มการคำนวณจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาด้วย เนื่องจากในเบื้องต้น Penman ได้ใช้วิธีการทางสถิติคำนวณจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในหลาย ๆ ส่วนของสมการ แต่ภายหลัง ได้มีการพัฒนาสมการเพิ่มเติมโดยได้นำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการระเหยมาใช้

สำหรับในประเทศไทย วิธีการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาตามแนวทางของ Penman เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมใช้มากกว่าวิธีการคำนวณโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิ หรือ โดยใช้ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ ถึงแม้ว่าการหาโดยใช้อุณหภูมิและรังสีแสงอาทิตย์จะต้องการข้อมูลและมีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่า แต่เนื่องจากวิธีของ Penman ได้รวบรวมองค์ประกอบทุกอย่างที่มีผลต่อการใช้น้ำของพืชมาอยู่ในสมการ จึงให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ดีกว่าวิธีอื่น ๆ (วิบูลย์, 2526)

### ก. สมการของ FAO Penman-Monteith

---

สมการของ Penman (เพนแมน) ได้เสนอไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1948 โดย Penman ได้พัฒนาสมการโดยการผสมผสานวิธีการคำนวณการระเหยน้ำตามหลักสมดุลพลังงานที่พื้นผิว (surface energy balance) เข้ากับวิธีการคำนวณการระเหยน้ำตามหลักการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) สมการดั้งเดิมของ Penman นั้นพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณการระเหยน้ำจากผิวน้ำ

สมการของ Penman มีการปรับปรุงมาตลอดช่วงเวลาว่า 60 ปีที่ผ่านมา แต่เมื่อพิจารณาในภาพรวมแล้ว หลักการที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการระเหยของสมการ Penman ยังคงมิได้เปลี่ยนแปลงจากเดิมมากนัก โดยองค์ประกอบหลักในสมการ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ดังแสดงในสมการ (3-1) คือ

- (1) สมดุลพลังงานการแผ่รังสี (radiation balance)
- (2) องค์ประกอบด้านการไหลเวียนของมวลอากาศ (aerodynamic term)

องค์ประกอบทั้งสองส่วนนี้ขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนัก (weighted factor) ได้แก่  $\Delta/(\Delta+\gamma)$  และ  $\gamma/(\Delta+\gamma)$  ตามลำดับ โดยที่  $\Delta$  นั้นเป็นค่าความชันของกราฟความดันไอน้ำอิ่มตัว และ  $\gamma$  เป็นค่าคงที่ของเทอมความชื้น (psychrometric constant)

**กรอบที่ 3-1 Penman equation (Penman, 1948)**

$$ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \underbrace{(R_n - G)}_{\text{radiation balance}} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \underbrace{f(u)(e_s - e_a)}_{\text{aerodynamic term}} \quad (3-1)$$

โดย  $R_n$  เป็นพลังงานการแผ่รังสีสุทธิที่พื้นผิว,  $G$  เป็นพลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดิน,  $f(u)$  เป็นฟังก์ชันของลม (wind function),  $e_s - e_a$  เป็นความดันไอน้ำที่ขาด,  $\Delta$  เป็นความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัว,  $\gamma$  เป็นค่าคงที่ของเทอมความชื้น (psychrometric constant)



กรอบที่ 3-2 สัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการที่พัฒนาจากสมการ Penman

$ET_o$	=	ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง [ $\text{mm day}^{-1}$ ]
$R_n$	=	พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์สุทธิที่พื้นผิว [ $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ]
$G$	=	พลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดิน [ $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ]
$T$	=	อุณหภูมิอากาศ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$f(u)$	=	เป็นฟังก์ชันของลม (wind function)
$u_2$	=	ความเร็วลมที่ระดับความสูง 2 เมตรจากผิวดิน [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$e_s - e_a$	=	ความดันไอน้ำที่ขาด เป็นผลต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัว ( $e_s$ ) กับความดันไอน้ำจริงในอากาศ ( $e_a$ ) [ $\text{kPa}$ ]
$\Delta$	=	ความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัวหรือโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไอน้ำ [ $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$\gamma$	=	ค่าคงที่ของเทอมความชื้น (psychrometric constant) [ $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$\rho_a$	=	ความหนาแน่นของอากาศ
$c_p$	=	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ
$r_a$	=	ความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่ชั้นการไหลเวียนอากาศ
$r_s$	=	ความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่ชั้นพื้นผิว

กรอบที่ 3-3      **FAO modified Penman equation (Doorenbos and Pruitt, 1977)**

$$ET_o = c \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_s - e_a) \right] \quad (3-2)$$

วิธี FAO modified Penman หรือบางครั้งอาจเรียกเป็น Modified Penman เป็นวิธีการคำนวณการใช้น้ำอ้างอิงที่เสนอในคู่มือ FAO Irrigation and Drainage Paper เล่มที่ 24 หรือเรียกโดยย่อว่า FAO-24 (Doorenbos and Pruitt, 1977)

วิธี FAO modified Penman ไม่ได้พิจารณาทอมความร้อนในดิน (soil heat flux,  $G$ ) ในสมการสมดุลพลังงานและกำหนดวิธีการคำนวณฟังก์ชันของลม (wind function,  $f(u)$ ) และความดันไอน้ำที่ขาด (vapor pressure deficit,  $(e_s - e_a)$ ) ต่างไปจากวิธีดั้งเดิมของ Penman (1948) นอกจากนั้น เพื่อเป็นการปรับค่าที่คำนวณได้เป็นปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง จึงมีการปรับแก้ค่าที่คำนวณได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์  $c$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นี้ได้จากการทดลองและวิเคราะห์ทางสถิติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ปริมาณการใช้น้ำอ้างอิงที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมากยิ่งขึ้น ผู้สนใจอาจดูรายละเอียดการคำนวณเพิ่มเติมได้จากคู่มือ FAO-24 (Doorenbos and Pruitt, 1977)

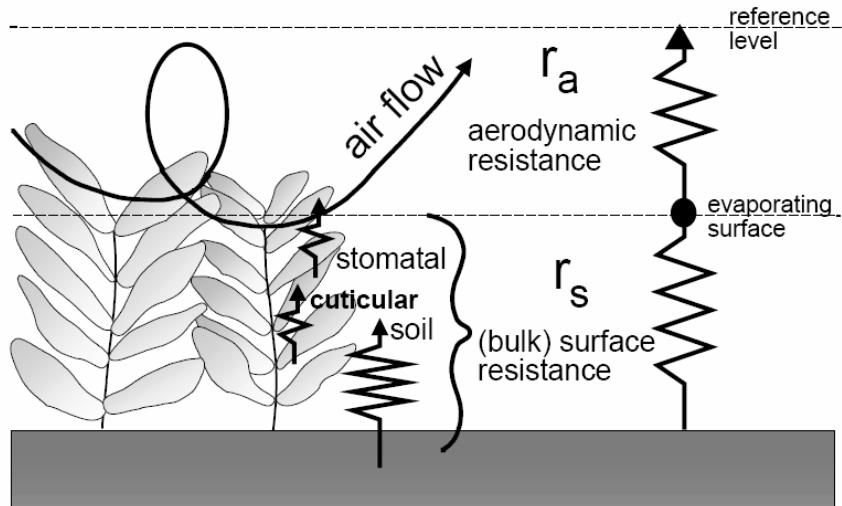
กรอบที่ 3-4

Penman-Monteith equation (Monteith, 1965)

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a)} \quad (3-3)$$

โดยที่  $R_n$  เป็นพลังงานการแผ่รังสีสุทธิ,  $G$  เป็นพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน,  $(e_s - e_a)$  ความดันไอน้ำที่ขาด,  $\rho_a$  เป็นความหนาแน่นของอากาศ,  $c_p$  เป็นความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ,  $\Delta$  เป็นความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัว,  $\gamma$  เป็นค่าคงที่ของเทอมความชื้น และ ท้ายสุด  $r_a$  และ  $r_s$  เป็นค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่ชั้นการไหลเวียนอากาศและที่ชั้นพื้นผิว

สมการของ Penman-Monteith (Monteith, 1965) ได้มีการพัฒนาสมการของ Penman (1948) เพิ่มเติมเพื่อสามารถใช้หาการระเหยจากพื้นผิวที่มีพืชปกคลุม โดยเพิ่มปัจจัยความต้านทาน (resistance factor) ซึ่งใช้แนวคิดคล้ายกับตัวต้านทานของกระแสไฟฟ้า สำหรับปัจจัยต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำ แบ่งเป็นสองตัว ได้แก่ ความต้านทานที่ชั้นการไหลเวียนของมวลอากาศ (aerodynamic resistance,  $r_a$ ) และ ความต้านทานที่ชั้นพื้นผิว (surface resistance,  $r_s$ ) ผู้สนใจอาจดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก (Monteith and Unsworth, 1990)



ภาพที่ 3-2      สภาพต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่ชั้นพื้นผิว (surface resistance)  
 และ ที่ชั้นการไหลเวียนของมวลอากาศ (aerodynamic resistance)

ที่มา: Allen et al., 1998

กรอบที่ 3-5

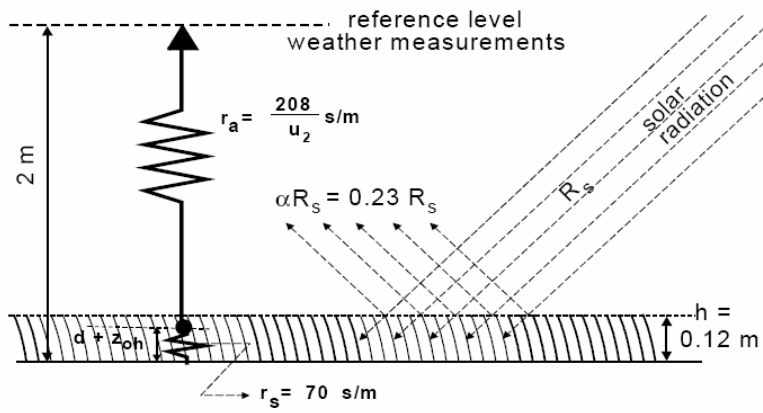
FAO Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3-4)$$

สมการ FAO Penman-Monteith ประกอบด้วย พารามิเตอร์ ดังนี้

- $ET_o$  = ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง [ $\text{mm day}^{-1}$ ]
- $R_n$  = พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์สุทธิที่พื้นผิว [ $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ]
- $G$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดิน [ $\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ]
- $T$  = อุณหภูมิอากาศ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- $u_2$  = ความเร็วลมที่ระดับความสูง 2 เมตรจากผิวดิน [ $\text{m s}^{-1}$ ]
- $e_s - e_a$  = ผลต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัว ( $e_s$ ) กับความดันไอน้ำจริงในอากาศ ( $e_a$ ) [ $\text{kPa}$ ]
- $\Delta$  = ความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัวหรือโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไอน้ำ [ $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
- $\gamma$  = ค่าคงที่ของเทอมความชื้น (psychrometric constant) [ $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

วิธี FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) เป็นวิธีการคำนวณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงตามคู่มือ FAO Irrigation and Drainage Paper no 56 หรือเรียกโดยย่อ FAO-56 เป็นวิธีการคำนวณที่พัฒนามาจากพื้นฐานของสมการของ Penman-Monteith โดยปัจจุบัน FAO ได้แนะนำให้ใช้สมการนี้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (Smith et al., 1992)



**ภาพที่ 3-3**      **คุณลักษณะของพีชอ้างอิงทางทฤษฎีที่ใช้ในสำหรับคำนวณการใช้น้ำ**  
**ของพีชอ้างอิงตามสมการ FAO Penman-Monteith**

ที่มา: Allen et al., 1998

## ข. ขั้นตอนการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ด้วยสมการ FAO Penman-Monteith

---

การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงด้วยสมการ FAO Penman-Monteith ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือ (1) การหาค่าพารามิเตอร์ของภูมิอากาศ (2) การคำนวณค่าความดันไอน้ำในอากาศที่ขาด ( $e_s - e_a$ ) (3) การหาพลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิที่พื้นผิว ( $R_n$ ) และ (4) การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

### 1. การหาค่าพารามิเตอร์ของภูมิอากาศ

ข้อมูลที่ใช้สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของภูมิอากาศ ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดประจำวัน ( $T_{max}$ ) อุณหภูมิต่ำสุดประจำวัน ( $T_{min}$ ) ระดับความสูง ( $z$ ) และ ความเร็วลม ( $u_2$ ) ค่าพารามิเตอร์ของภูมิอากาศคำนวณในขั้นตอนนี้ ประกอบด้วย ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat of vaporization,  $\lambda$ ) แสดงการคำนวณในกรอบที่ 3-6 ค่าคงที่ของความชื้นในอากาศ (psychrometric constant,  $\gamma$ ) แสดงการคำนวณในกรอบที่ 3-7 ความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัว (slope vapor pressure curve,  $\Delta$ ) แสดงการคำนวณในกรอบที่ 3-8

### กรอบที่ 3-6 ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอหรือความร้อนแฝงของการระเหย (latent heat of vaporization,  $\lambda$ ) เป็นปริมาณพลังงานสำหรับเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอภายใต้สภาพความดันและอุณหภูมิคงที่ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ หาได้จากสมการ

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3})T \quad (3-5)$$

โดยที่  $T$  เป็นอุณหภูมิอากาศ [ $^{\circ}\text{C}$ ] สำหรับการคำนวณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงตามวิธี FAO-56 ใช้ความร้อนแฝงของการระเหยที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  โดยมีค่าเท่ากับ  $2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$

### กรอบที่ 3-7 ค่าคงที่ของเทอมความชื้น

ค่าคงที่ของเทอมความชื้น (psychrometric constant,  $\gamma$ ) มีหน่วยเป็น  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$  คำนวณได้ตามสมการ

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \quad (3-6)$$

โดย  $\lambda$  เป็นความร้อนแฝงของการระเหย เท่ากับ  $2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$ ,  $c_p$  เป็นความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ เท่ากับ  $1.013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ , และ  $\varepsilon$  เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของไอน้ำกับของอากาศแห้ง มีค่าเท่ากับ 0.622

เมื่อแทนค่าคงที่ทั้งหมดลงในสมการข้างต้น จะได้ค่าคงที่ของเทอมความชื้นที่แปรผันตามความดันบรรยากาศ [ $\text{kPa}$ ] ตามสมการ

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (3-7)$$



**กรอบที่ 3-8 ความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัว**

ความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัว (slope of vapor pressure curve) หรือโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอน้ำอิ่มตัว เขียนด้วยสัญลักษณ์  $\Delta$  มีหน่วยเป็น  $kPa^{\circ}C^{-1}$  สามารถคำนวณได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการความดันไอน้ำอิ่มตัว

$$\Delta = \frac{de^{\circ}(T)}{dT} = \frac{4098e^{\circ}(T)}{(T + 237.3)^2} \quad (3-8)$$

เมื่อจัดรูปสมการจะได้

$$\Delta = \frac{2503 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)}{(T + 237.3)^2} \quad (3-9)$$

## 2. การคำนวณค่าความดันไอน้ำในอากาศที่ขาด ( $e_s - e_a$ )

ความดันไอน้ำในอากาศที่ขาด ( $e_s - e_a$ ) เป็นผลต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัวกับความดันไอน้ำจริงในอากาศ โดยที่ความดันไอน้ำอิ่มตัว ( $e_s$ ) หาจาก  $T_{\max}$  และ  $T_{\min}$  ส่วนความดันไอน้ำในอากาศ ( $e_a$ ) หาได้หลายวิธี เช่น จากข้อมูลอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ( $T_{dew}$ ) จากข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด ( $RH_{\max}$ ) และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด ( $RH_{\min}$ ) หรือ จากข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ( $RH_{mean}$ )

## 3. การหาพลังงานการแผ่รังสีสุทธิที่พื้นผิว ( $R_n$ )

พลังงานการแผ่รังสีสุทธิที่พื้นผิว (net radiation,  $R_n$ ) เป็นผลต่างระหว่างพลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นสุทธิ (net short wave radiation,  $R_{ns}$ ) และพลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวสุทธิ (net long wave radiation,  $R_{nl}$ ) พลังงานการแผ่รังสีมีหน่วยเป็น  $MJ m^{-2} day^{-1}$  สามารถแปลงเป็นหน่วยของปริมาณการระเหย ( $mm day^{-1}$ ) ด้วยการคูณค่าสัมประสิทธิ์ 0.408

พลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดิน (soil heat flux,  $G$ ) ถือว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในรอบ 1 วัน จึงกำหนดให้  $G \approx 0$  ในกรณีคำนวณการใช้น้ำเป็นรายวัน ส่วนกรณีคำนวณเป็นรายเดือน แสดงการคำนวณในรอบที่ 3-9

## 4. การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ )

ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงคำนวณจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่หาจากขั้นตอนก่อนหน้า

**กรอบที่ 3-9 พลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดินกรณีคำนวณเป็นรายเดือน**

การประมาณค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดิน คำนวณได้ตามสมการ

$$G_{month,i} = 0.07(T_{month,i+1} - T_{month,i-1}) \quad (3-10)$$

โดยที่

$T_{month,i-1}$  เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของเดือนก่อนหน้า [°C]

$T_{month,i+1}$  เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของเดือนต่อไป [°C]

กรณี มีทราบอุณหภูมิเฉลี่ยของเดือนต่อไป ( $T_{month,i+1}$ ) ใช้สมการ

$$G_{month,i} = 0.14(T_{month,i} - T_{month,i-1}) \quad (3-11)$$

โดยที่

$T_{month,i}$  เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของเดือนปัจจุบัน [°C]

**ตัวอย่างที่ 3-1 การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงจากข้อมูลรายเดือน**

ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาประจำวันเฉลี่ยเป็นรายเดือนของเดือนเมษายนของกรุงเทพมหานคร ซึ่งตั้งอยู่ที่ละติจูด  $13^{\circ}44'N$  ที่ระดับความสูง 2 ม.รทก.

อุณหภูมิสูงสุด ( $T_{\max}$ )	34.8	$^{\circ}C$
อุณหภูมิต่ำสุด ( $T_{\min}$ )	25.6	$^{\circ}C$
ความชื้นสัมพัทธ์ ( $RH$ )	64.5	%
ความเร็วลมที่ระดับ 2 ม.จากผิวดิน ( $u_2$ )	2	$m/s$
ความยาวนานแสงอาทิตย์ ( $n$ )	8.5	$hours/day$
อุณหภูมิเฉลี่ยของเดือนเมษายน ( $T_{month,i}$ )	30.2	$^{\circ}C$
อุณหภูมิเฉลี่ยของเดือนมีนาคม ( $T_{month,i-1}$ )	29.2	$^{\circ}C$

■ การหาค่าพารามิเตอร์ของภูมิอากาศ  
ความชื้นของไค้ความดันไอน้ำอิ่มตัว หาจากสมการ

$$\Delta = \frac{2503 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)}{(T + 237.3)^2}$$

จาก $T_{mean} = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} = \frac{34.8 + 25.6}{2} =$	30.2	$^{\circ}C$
จะได้ $\Delta = \frac{2503 \times \exp\left(\frac{17.27 \times 30.2}{30.2 + 237.3}\right)}{(30.2 + 237.3)^2} =$	0.246	$kPa \ ^{\circ}C^{-1}$

ค่าคงที่ของความชื้นในอากาศ หาจกสมการ

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} P$$

จากข้อมูลระดับความสูง ( $z$ ) =

2 m MSL

ความดันบรรยากาศ ( $P$ )

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065 \times 2}{293} \right)^{5.26}$$

101.276 kPa

จะได้  $\gamma = 0.665 \times 10^{-3} \times 101.276 =$

0.0674 kPa °C<sup>-1</sup>

■ การคำนวณค่าความดันไอน้ำในอากาศที่ขาด ( $e_s - e_a$ )  
ความดันไอน้ำอิ่มตัว หาจกสมการ

$$e^\circ(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)$$

จากอุณหภูมิสูงสุด ( $T_{\max}$ ) =

34.8 °C

$$e^\circ(T_{\max}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max} + 237.3}\right)$$

$$= 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times 34.8}{34.8 + 237.3}\right) =$$

5.56 kPa

จากอุณหภูมิต่ำสุด ( $T_{\min}$ ) =

25.6 °C

$$e^\circ(T_{\min}) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right)$$

$$= 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times 25.6}{25.6 + 237.3}\right) =$$

3.28 kPa

ความดันไอน้ำอิ่มตัวเฉลี่ย หาจากสมการ $e_s = \frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2}$ $= \frac{5.56 + 3.28}{2} =$	4.42	kPa
ความดันไอน้ำจริงในอากาศ ( $e_a$ ) จากข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ = 64.5 % จากความสัมพันธ์ $RH = \frac{e_a}{e_s}$ ดังนั้น $e_a = RH \times e_s$ ความดันไอน้ำจริงในอากาศ $e_a = (64.5/100) \times 4.42$ 2.85 kPa จะได้ ( $e_s - e_a$ ) = 4.42 - 2.85 = 1.57 kPa		
■ การหาพลังงานการแผ่รังสีสุทธิที่พื้นผิว ( $R_n$ ) พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก ( $R_a$ ) หาจากสมการหรืออ่านค่าจากตาราง		
จากข้อมูล เดือนเมษายน (คิดวันที่ 15 เมษายน) $J =$ 105 - ละติจูด $\phi = 13^\circ 44' N = 13 + 14/60 =$ 13.73 °N $\phi = (13 + 44/60) \times \frac{\pi}{180} =$ 0.2397 rad. จากตารางจะได้ $R_a =$ 38.06 MJ m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>		

กรณี คำนวณ  $R_a$  จากสูตร (หน่วยของมุมที่ใช้ในคำนวณเป็น เรเดียน)

$$R_a = \frac{G_{sc} d_r}{\pi} [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$ $= 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} \times 105\right) =$	0.9923	-
$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$ $= 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} \times 105 - 1.39\right) =$	0.1658	rad.
$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)]$ $= \arccos[-\tan(0.2397) \cdot \tan(0.1658)] =$	1.6117	rad.
$R_a = 118.11 \times 0.9923 / \pi$ $\times [1.6117 \sin(0.2397) \sin(0.1658)$ $+ \cos(0.2397) \cos(0.1658) \sin(1.6117)]$	38.058	$MJ m^{-2} day^{-1}$

จำนวนชั่วโมงแสงแดดในรอบวัน ( $N$ ) หาจากสมการ		
$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$		
จากตาราง $N =$	12.32	hours
หรือคำนวณได้จากค่า $\omega_s =$	1.6117	rad.
จะได้ $N = \frac{24}{\pi} \times 1.6117 =$	12.313	hours
พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นสุดสุทธิ ( $R_{ns}$ ) หาจากสมการ		
$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$		
จาก $R_s = \left( 0.25 + 0.50 \frac{n}{N} \right) R_a$		
$R_s = \left( 0.25 + 0.50 \times \frac{8.5}{12.31} \right) \times 38.058 =$	22.65	$MJ m^{-2} day^{-1}$
สำหรับพืชอ้างอิง ค่าอัลเบโด ( $\alpha$ ) =	0.23	
จะได้ $R_{ns} = (1 - 0.23) \times 22.65$	17.44	$MJ m^{-2} day^{-1}$
พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นในกรณีท้องฟ้าปลอดโปร่ง ( $R_{so}$ ) หาจากสมการ		
$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a$		
$= (0.75 + 2 \times 10^{-5} \times 2) \times 38.058$	28.545	$MJ m^{-2} day^{-1}$



พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวสุทธิ ( $R_{nl}$ ) หาจากสมการ

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right) \times (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \times \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

$\sigma \left( \frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right) =$ $4.903 \times 10^{-9} \times \left( \frac{(34.8 + 273.16)^4 + (25.6 + 273.16)^4}{2} \right) =$	41.58	
$(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) = (0.34 - 0.14 \times \sqrt{2.85}) =$	0.104	
$\left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) = \left( 1.35 \times \frac{22.65}{28.54} - 0.35 \right) =$	0.721	
<p>จะได้ <math>R_{nl} = 41.58 \times 0.104 \times 0.721 =</math></p>	3.11	$MJ m^{-2} day^{-1}$

พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ ( $R_n$ ) หาจากสมการ

$R_n = R_{ns} - R_{nl}$ $= 17.44 - 3.11$	14.33	$MJ m^{-2} day^{-1}$
--	-------	----------------------

พลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดิน ( $G$ ) หาจากสมการ

$G_{month,i} = 0.14(T_{month,i} - T_{month,i-1})$ $= 0.14 \times (30.2 - 29.2)$	0.14	$MJ m^{-2} day^{-1}$
---	------	----------------------

▪ การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ )  
 ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) จากสมการ

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

$$0.408\Delta(R_n - G) = 0.408 \times 0.246 \times (14.33 - 0.14) =$$

1.424

$$\gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a) = 0.0674 \times \frac{900}{30.2 + 273} \times 2 \times 1.57 =$$

0.628

$$\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2) = 0.246 + 0.0674 \times (1 + 0.34 \times 2)$$

0.359

$$\text{จะได้ } ET_o = \frac{1.424 + 0.628}{0.359}$$

5.72

$mm \ day^{-1}$

### 3.2 การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง โดยข้อมูลจากดาวัดการระเหย

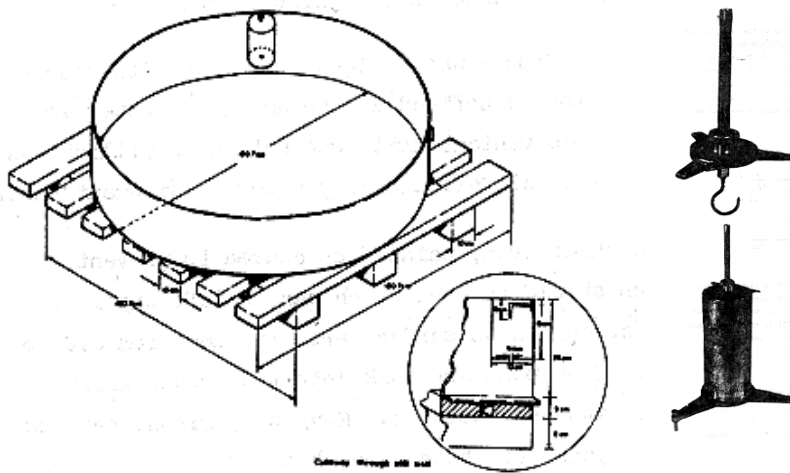
ดาวัดการระเหยน้ำมีอยู่หลายรูปแบบ อาทิ ดาวัดการระเหย Class A หรือ ดาวัดฝังดิน (Sunken pan หรือ Colorado pan) แต่ที่ใช้งานในสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาเป็นดาวัดการระเหยแบบ Class A ซึ่งเป็นมาตรฐานขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organization, WMO)

การหาปริมาณการระเหยน้ำจากดาวัดการระเหยนั้นสามารถทำได้ง่ายกว่าวิธีอื่น ๆ โดยการระเหยน้ำจากดาวัดการระเหยคำนวณตามหลักสมมูลน้ำ ซึ่งปริมาณน้ำที่หายไปหรือปริมาณน้ำที่ลดลงในดาวัดจะมีค่าเท่ากับปริมาณการระเหยน้ำ ยกเว้นในวันที่มีฝนตก การคำนวณหาปริมาณน้ำที่หายไปจะต้องพิจารณาปริมาณน้ำฝนที่ตกลงในถาดมาปรับแก้ด้วย

ปริมาณการระเหยน้ำที่วัดได้จากดาวัดการระเหยยังไม่เป็นค่าเดียวกับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_0$ ) เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของดาวัดการระเหยกับลักษณะของพื้นผิวอ้างอิงมีความแตกต่างกัน อาทิ ค่าการสะท้อนพื้นผิว (albedo) โดยค่าการสะท้อนพื้นผิวของน้ำในถาด ซึ่งมีค่าประมาณ 0.05 ถึง 0.08 ในขณะที่พืชพรรณทั่วไป มีค่าการสะท้อนพื้นผิว ประมาณ 0.20 ถึง 0.25 (พืชอ้างอิง เท่ากับ 0.23) ดังนั้น เมื่อพลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์สะท้อนออกน้อยกว่าจึงเป็นผลทำให้น้ำในดาวัดการระเหยจะได้รับพลังงานสุทธินามากกว่า นอกจากนี้ การกักเก็บความร้อนของน้ำในถาดวัดก็มีผลทำให้น้ำยังคงมีการระเหยต่อเนื่อง แม้ว่าในช่วงที่ไม่มีแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ อาทิ ในเวลากลางคืน ซึ่งต่างกับพืชส่วนใหญ่ที่มีการใช้น้ำในเวลากลางวันเท่านั้น

ตารางที่ 3-1      คุณสมบัติของภาควัดการรเหยมาตรฐาน Class A

เส้นผ่าศูนย์กลาง	1.21	เมตร	(47.5 นิ้ว)
สูง	25.4	มม.	(10 นิ้ว)
เติมน้ำสูงกว่า	180	มม.	(7 นิ้ว)



ภาพที่ 3-4      ภาควัดการรเหยมาตรฐาน Class A  
และ hook gauge สำหรับวัดระดับน้ำ

ที่มา: Doorenbos, 1976

ในการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง คู่มือ FAO-24 (Doorenbos and Pruitt, 1977) ได้แนะนำให้ปรับแก้ข้อมูลการระเหยน้ำจากถาดวัดการระเหยตามสมการ

$$ET_o = k_p E_{pan} \quad (3-12)$$

โดยที่

$ET_o$  = การใช้น้ำของพืชอ้างอิง (reference evapotranspiration)

$E_{pan}$  = การระเหยน้ำจากถาดวัด (pan evaporation)

$k_p$  = สัมประสิทธิ์ถาดวัด (pan coefficient)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ของถาดวัดการระเหย ( $k_p$ ) จะพิจารณาปัจจัย 3 ประการ ได้แก่ สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ถาดตั้งอยู่ ( $fetch$  [m]) ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ( $RH_{mean}$  [%]) และ ความเร็วลมที่ระดับ 2 ม. ( $U_2$  [ $m s^{-1}$ ]) ตามตารางที่ 3-2

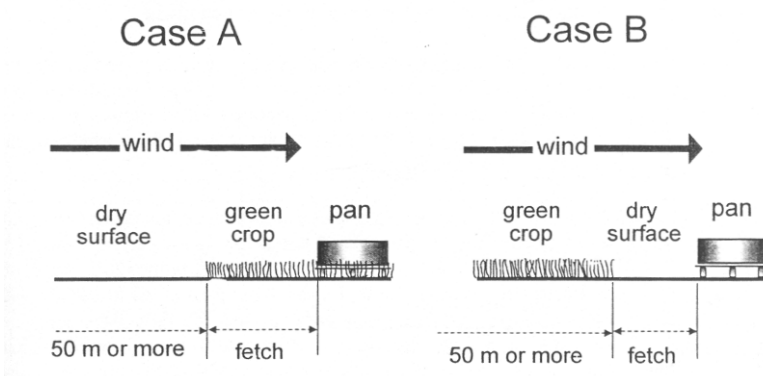
สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ถาดตั้งอยู่ ( $fetch$ ) เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งมีผลต่อปริมาณการระเหยของถาดเป็นอย่างมาก สามารถแยกได้เป็น 2 กรณี ดังภาพที่ 3-5 คือ

- (1) case A เป็นกรณีที่ถาดตั้งในสิ่งแวดล้อมที่ชุ่มชื้น (pan placed in short green cropped area) มีพืชพรรณในบริเวณใกล้เคียงเป็นระยะทางเท่ากับ  $fetch$
- (2) case B เป็นกรณีที่ถาดตั้งในสิ่งแวดล้อมที่แห้งแล้ง (pan placed in dry fallow area) ซึ่งมีผลทำให้การระเหยจากถาดมีค่าสูงมากขึ้น

**ตารางที่ 3-2 ค่า Pan Coefficient ของภาควัดการระเหย Class A**

Pan coefficients ( $K_p$ ) for Class A pan for different pan siting and environment and different levels of mean relative humidity and wind speed (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24)

Class A pan	Case A: Pan placed in short green cropped area				Case B: Pan placed in dry fallow area			
	RH mean (%) →	low < 40	medium 40 -70	high > 70	low < 40	medium 40 -70	high > 70	
Wind speed ( $m s^{-1}$ )	Windward side distance of green crop (m)				Windward side distance of dry fallow (m)			
Light	1	.55	.65	.75	1	.7	.8	.85
< 2	10	.65	.75	.85	10	.6	.7	.8
	100	.7	.8	.85	100	.55	.65	.75
	1 000	.75	.85	.85	1 000	.5	.6	.7
Moderate	1	.5	.6	.65	1	.65	.75	.8
2-5	10	.6	.7	.75	10	.55	.65	.7
	100	.65	.75	.8	100	.5	.6	.65
	1 000	.7	.8	.8	1 000	.45	.55	.6
Strong	1	.45	.5	.6	1	.6	.65	.7
5-8	10	.55	.6	.65	10	.5	.55	.65
	100	.6	.65	.7	100	.45	.5	.6
	1 000	.65	.7	.75	1 000	.4	.45	.55
Very strong	1	.4	.45	.5	1	.5	.6	.65
> 8	10	.45	.55	.6	10	.45	.5	.55
	100	.5	.6	.65	100	.4	.45	.5
	1 000	.55	.6	.65	1 000	.35	.4	.45



**ภาพที่ 3-5** สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ภาคตั้งอยู่แยกเป็น 2 กรณี

ที่มา: Allen et al., 1998

โดยปกติแล้วข้อมูลของสิ่งแวดล้อมรอบอาคารวัดการระเหย หรือ *fetch* มักจะไม่สามารถหาได้ ในทางปฏิบัติ การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ถาดวัดการระเหย เฉพาะกรณีของประเทศไทย การเลือก case A ก่อนข้างสมเหตุผลกว่า เนื่องจาก ประเทศไทยอยู่ในเขตชุ่มชื้น และบริเวณที่ตั้งถาดวัดการระเหยมักจะมีพื้นที่เพาะปลูกอยู่ใกล้เคียง ส่วนข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมนั้นเป็นข้อมูลที่หาได้ไม่ยากนัก เมื่อทราบปัจจัยทั้งสาม ก็สามารถประมาณค่า  $k_p$  ได้

นอกจากการหาสัมประสิทธิ์ถาดวัดการระเหย ( $k_p$ ) จากตารางที่ 3-2 แล้วยังสามารถใช้สมการ ( 3-13 ) และ สมการ ( 3-14 ) ในการหาสัมประสิทธิ์ถาดวัดการระเหยสำหรับ case A และ case B ได้ตามลำดับ ดังนี้

1. Case A: Class A pan placed in short green cropped area

$$k_p = 0.108 - 0.0286U_2 + 0.0422 \ln(\text{fetch}) + 0.1434 \ln(RH_{mean}) - 0.000631 [\ln(\text{fetch})]^2 \ln(RH_{mean}) \quad (3-13)$$

2. Case B: Class A pan placed in dry fallow area

$$k_p = 0.61 + 0.00341RH_{mean} - 0.000162U_2RH_{mean} - 0.00000959 \cdot U_2 \cdot \text{fetch} + 0.00327U_2 \ln(\text{fetch}) - 0.00289U_2 \ln(86.4U_2) - 0.0106 \ln(86.4U_2) \ln(\text{Fetch}) + 0.00063 [\ln(\text{Fetch})]^2 \ln(86.4U_2) \quad (3-14)$$

เนื่องจากสมการข้างต้นเป็นผลวิเคราะห์ทางสถิติจากค่าในตารางที่ 3-2 การนำไปใช้งานจึงมีช่วงจำกัดของข้อมูลที่ใช้ได้ ดังนี้

- $1 m \leq \text{fetch} \leq 1,000 m$
- $30\% \leq RH_{mean} \leq 84\%$
- $1 m \cdot s^{-1} \leq U_2 \leq 8 m \cdot s^{-1}$

### ตัวอย่างที่ 3-2 การหาปริมาณการคายระเหยอ้างอิงโดยข้อมูลจากถาดวัดการระเหย

จงหาการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงในเดือนมกราคม จากข้อมูลของสถานีตรวจอากาศ กรุงเทพฯ (ข้อมูลเป็นข้อมูลเฉลี่ยในรอบ 10 ปี) จากข้อมูลที่กำหนด

- $E_{pan} = 123.9 \text{ mm month}^{-1}$
- $RH_{mean} = 69\%$
- ความเร็วลมที่ระดับความสูง 33.1 เมตร หรือ  $u_{33.1} = 2.1 \text{ knot}$

#### วิธีทำ

การหาสัมประสิทธิ์ของถาดวัดการระเหยต้องใช้ข้อมูลต่อไปนี้

- ลีงแควดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ถาดตั้งอยู่ ( $fetch [m]$ )
- ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ( $RH_{mean} [\%]$ )
- ความเร็วลมที่ระดับ 2 ม. ( $u_2 [m s^{-1}]$ )

จากข้อมูลที่กำหนดให้ในเดือนมกราคม

- $E_{pan} = 123.9 \text{ mm month}^{-1} = 123.9/31 = 4 \text{ mm day}^{-1}$
- $RH_{mean} = 69\%$
- ความสูงของเครื่องวัดลม (height of wind vane above ground)  $z = 33.1 \text{ m}$   
ดังนั้นความเร็วลมจากข้อมูลจึงเป็นความเร็วที่ระดับความสูง 33.1 เมตร หรือ

$$u_{33.1} = 2.1 \text{ knot} = 0.5144 \times 2.1 = 1.08 \text{ m s}^{-1}$$

จึงต้องทำการปรับเป็นความเร็วลมที่ระดับ 2 เมตร ตามสมการ

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 \cdot z - 5.42)} = 1.08 \times \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 33.1 - 5.42)} = 0.68 \text{ m s}^{-1}$$

- เลือก  $fetch$  เป็น case A สมมติ  $fetch = 1,000 \text{ m}$



จากตารางที่ 3-2 เลือก case A ซึ่งเป็นสภาพพื้นที่โดยทั่วไปของประเทศไทย  
ซึ่งมีความชุ่มชื้นสูงที่  $fetch = 1,000 \text{ m}$

$$u_2 \Rightarrow light (< 2 \text{ m s}^{-1}) \text{ และ } RH_{mean} \Rightarrow medium (40-70)$$

$$\text{อ่านค่า } k_p = 0.85$$

ดังนั้น ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงในเดือนมกราคม จึงเป็น

$$ET_o = k_p \times E_{pan} = 0.85 \times 4 = 3.4 \text{ mm day}^{-1}$$

**ตอบ**

นอกจากอ่านค่า  $k_p$  จากตารางแล้ว ยังสามารถหาค่า  $k_p$  จากสมการ (3-13)

$$k_p = 0.108 - 0.0286 \cdot u_2 + 0.0422 \cdot \ln(fetch) + 0.1434 \cdot \ln(RH_{mean}) \\ - 0.000631 \cdot [\ln(fetch)]^2 \cdot \ln(RH_{mean})$$

$$k_p = 0.108 - 0.0286 \times 0.68 + 0.0422 \cdot \ln(1,000) + 0.1434 \cdot \ln(69) \\ - 0.000631 \cdot [\ln(1,000)]^2 \cdot \ln(69)$$

$$k_p = 0.84$$

### 3.3 แบบฝึกหัด

1. จงยกตัวอย่างพืชที่มีลักษณะคล้ายกับพืชอ้างอิงมา 3 ตัวอย่าง
2. จากข้อมูลที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3-3 จงหา
  - 2.1. สัมประสิทธิ์การระเหย (pan coefficient,  $K_p$ ) ของแต่ละเดือน
  - 2.2. ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) จากข้อมูลการระเหยการระเหย
3. จงหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ด้วยสมการ Penman-Monteith ตามวิธีการ FAO-56 ของจังหวัดสุพรรณบุรี ซึ่งตั้งอยู่ที่ละติจูด  $14^{\circ}23'50''N$  ลองจิจูด  $100^{\circ}7'48''E$  ที่ระดับความสูง 8 ม.รทก. โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของเดือนธันวาคมที่กำหนดให้ดังนี้

อุณหภูมิสูงสุด ( $T_{max}$ )	30.3	$^{\circ}C$
อุณหภูมิต่ำสุด ( $T_{min}$ )	19.4	$^{\circ}C$
ความดันไอน้ำ ( $e_a$ )	2.30	kPa
ความเร็วลมที่ระดับ 2 ม.จากผิวดิน ( $u_2$ )	2.09	m/s
พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ ( $R_n$ )	11.07	$MJ\ m^{-2}day^{-1}$
พลังงานความร้อนที่ถ่ายลงดิน ( $G$ )	0	$MJ\ m^{-2}day^{-1}$

(ตอบ  $4.18\ mm\ day^{-1}$ )

4. จากโจทย์ในข้อ 3 ในกรณีไม่มีข้อมูลปริมาณพลังงานการแผ่รังสีสุทธิ แต่ทราบข้อมูลความยาวนานแสงอาทิตย์ ( $n$ ) ของวันที่ 25 ธันวาคม เท่ากับ 5.5 ชั่วโมง จงหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง

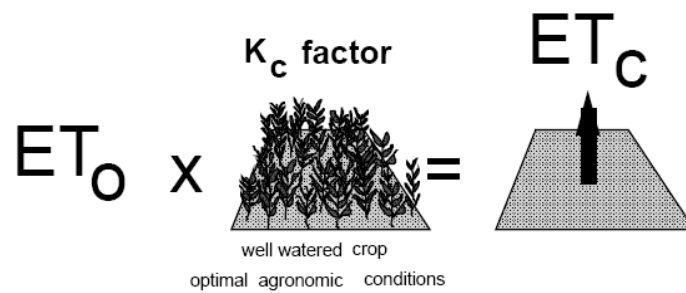
(ตอบ  $3.48\ mm\ day^{-1}$ )

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายเดือนที่สถานีตรวจอากาศกำแพงแสน

AGROCLIMATOLOGICAL DATA 2001													
Station	KAMPHAENG SAEN											Elevation of station above MSL	7.46 m
Latitude	14.0 N											Height of thermometer above ground	1.20 m
Longitude	99.9 E											Height of wind vane above ground	11.00 m
												Height of rain gauge	0.80 m
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
<b>Air temperature (celsius)</b>													
Extreme maximum	35.2	36.2	36.1	39.0	36.8	36.6	36.6	35.1	36.2	33.9	33.1	33.0	39.0
Date	10	25	6	11	7	6	24	25	17	15	4	6,3	
Mean maximum	32.5	33.7	32.6	37.0	34.3	33.8	33.7	33.0	34.1	31.6	29.3	29.9	33.0
Mean	26.9	27.4	28.1	31.4	29.6	29.4	29.2	28.9	29.3	27.8	24.8	25.0	28.2
Mean minimum	21.3	21.1	23.5	25.8	24.8	24.9	24.6	24.8	24.4	24.0	20.3	20.1	23.3
Extreme minimum	16.1	17.1	21.0	24.4	23.7	23.4	22.9	23.8	23.0	22.7	15.0	14.2	14.2
Date	3	25	13	3	21	17	19	15	23	27	23	24	
<b>Grass minimum temperature (celsius)</b>													
Mean minimum	18.1	17.1	21.0	22.8	22.9	23.3	22.9	23.4	23.0	23.0	18.2	17.2	21.1
Extreme minimum	12.2	10.7	19.3	21.1	21.1	21.5	20.5	21.0	21.3	22.1	10.9	9.9	9.9
Date	3	25	29	3	12	17	19	15	15	27	22	24	
<b>Water temperature (celsius)</b>													
Mean maximum	32.6	33.1	34.1	38.2	36.0	35.1	35.0	34.5	36.7	34.3	31.4	31.1	34.3
Mean	27.4	27.4	29.1	32.1	30.7	30.1	30.0	29.7	31.0	29.8	26.3	26.1	29.1
Mean minimum	22.2	21.7	24.1	26.0	25.3	25.0	24.9	24.9	25.2	25.2	21.1	21.1	23.9
<b>Relative humidity (%)</b>													
Extreme maximum	97	98	99	98	96	96	96	95	97	96	97	98	99
Mean maximum	94	97	97	96	94	93	93	92	93	95	94	95	94
Mean	72	70	79	72	76	75	75	76	74	80	74	74	75
Mean minimum	50	43	60	48	57	57	57	59	54	65	54	53	55
Extreme minimum	32	22	42	34	44	48	44	50	45	54	34	43	22
Date	11	25	28	19	6	6	24	13	17	22	26	31	
<b>Soil temperature (celsius)</b>													
Mean at surface	28.0	29.1	29.9	34.1	30.9	30.8	30.4	29.5	30.8	29.7	27.2	27.1	29.8
Mean at 5 cm	28.0	29.2	30.2	34.1	31.1	31.1	30.8	29.8	31.0	30.0	27.4	27.4	30.0
Mean at 10 cm	28.1	29.3	30.3	34.2	31.2	31.3	31.0	30.0	31.1	30.0	27.4	27.3	30.1
Mean at 20 cm	28.3	29.3	30.3	33.9	31.4	31.5	31.2	30.4	31.3	30.2	27.9	27.7	30.3
Mean at 50 cm	28.2	29.2	30.2	33.8	31.4	31.6	31.3	30.6	31.3	30.0	28.0	27.8	30.3
Mean at 100 cm	28.3	29.0	29.6	32.0	31.5	31.5	31.1	30.9	31.0	30.4	29.1	28.4	30.2
<b>Rainfall (mm)</b>													
Total amount	2.7	3.8	116.5	0.8	150.9	114.0	71.8	104.5	231.6	332.0	36.6	0.9	1166.1
Number of rainy day	2	2	11	1	15	12	12	13	18	22	3	1	112
Greatest in 24 hr	2.0	3.6	32.8	0.8	29.1	32.5	29.2	33.6	70.2	71.5	31.9	0.9	71.5
Date	14	8	9	30	17	30	30	3	18	30	1	4	
<b>Evaporation (mm)</b>													
Mean	3.8	4.3	4.1	6.0	5.2	4.8	4.7	4.6	4.5	3.5	3.8	3.4	4.4
<b>Wind</b>													
Prevailing direction	S	S	S	S	S	W	SW	W	W	N	N	NE	
Mean speed (m/s)	1.0	1.2	1.5	1.6	1.5	1.9	1.5	2.2	1.3	1.1	2.1	1.7	
<b>Sunshine duration (hr)</b>													
Extreme maximum	9.4	9.8	10.1	10.4	10.8	10.9	9.9	9.5	10.2	9.3	9.1	9.2	10.9
Date	28	26	17	22,20	31	1	31	23	20	16	26,20	10,9	
Mean	6.8	7.9	6.2	8.7	6.0	4.8	4.8	3.6	6.4	5.0	7.3	7.1	6.2
Remark: "-" indicate missing data													
AGROMETEOROLOGICAL ANALYSIS SUB-DIVISION, AGROMETEOROLOGY DIVISION DATA PROCESSING SUB-DIVISION, CLIMATOLOGY DIVISION METEOROLOGICAL DEPARTMENT													



## 4. การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ในสภาพมาตรฐาน



ภาพที่ 4-1 การใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน

ที่มา: Allen et al., 1998

การใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน (crop evapotranspiration under standard conditions) หรือที่เขียนเป็น  $ET_c$  หมายถึง ปริมาณน้ำที่พืชใช้ในกรณีที่พืชมีความสมบูรณ์ไม่มีโรคหรือแมลงรบกวน ได้รับธาตุอาหารพอเพียงเจริญเติบโตในแปลงเพาะปลูกขนาดใหญ่ไม่ถูกจำกัดพื้นที่ และมีความชื้นในดินที่เหมาะสม ซึ่งเป็นสภาพเช่นนี้เป็นสภาพที่พืชสามารถให้ผลผลิตได้อย่างเต็มที่ในพื้นที่เพาะปลูกที่อยู่ภายใต้สภาพภูมิอากาศแห่งใดแห่งหนึ่ง

การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชสามารถหาได้จากการตรวจวัดซึ่งอาจทำตามหลักการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) หรือ หลักสมดุลพลังงาน (energy balance) และยังสามารถใช้หลักสมดุลน้ำ (water balance) คำนวณข้อมูลที่ตรวจวัดจากแปลงทดลองหรือจากถังวัดการใช้น้ำของพืช นอกจากนี้ ปริมาณการใช้น้ำของพืชยังสามารถคำนวณจากสมการ Penman-Monteith โดยตรงซึ่งต้องใช้ข้อมูลสภาพการสะท้อน (albedo) และสภาพความต้านทานของพื้นผิวตามชนิดของพืชที่ปกคลุม อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเหล่านี้ตรวจวัดค่อนข้างยากและมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของพืช สภาพภูมิอากาศ ปริมาณความชื้นในดิน

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ( $ET_c$ ) โดยใช้สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (crop coefficient) ปรับแก้ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) โดยค่าของปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงซึ่งได้จากการคำนวณตามวิธี FAO- Penman-Monteith ได้ผนวกปัจจัยทางด้านภูมิอากาศที่มีผลต่อปริมาณการระเหยคายน้ำ ส่วนสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชจะเป็นการผนวกอิทธิพลของพืชพรรณซึ่งมีสภาพต่างจากสภาพพื้นผิวของพืชอ้างอิง

$$ET_c = K_c ET_o \quad (4-1)$$

โดยที่

$ET_c$  = การใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน [ mm day<sup>-1</sup> ]

$K_c$  = สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช [-]

$ET_o$  = การใช้น้ำของพืชอ้างอิง [ mm day<sup>-1</sup> ]

## 4.1 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณการใช้น้ำของพืชต่อปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ดังสมการ (4-2) สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชนี้เป็นการผนวกรวมปัจจัยของพืชชนิดหนึ่ง ๆ ที่มีสภาพแตกต่างจากพืชอ้างอิง 4 ประการ ประกอบด้วย (1) ความสูงของต้นพืช (2) สภาพการสะท้อนพลังงานของพื้นผิว (albedo) (3) สภาพความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำของพืช และ (4) สภาพการระเหยน้ำจากดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการระเหยจากผิวดินเปล่า

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (4-2)$$

### ก. ปัจจัยที่ใช้สำหรับกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

---

สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชได้ผนวกรวมปัจจัยของพืชชนิดหนึ่ง ๆ ที่มีสภาพแตกต่างจากพืชอ้างอิง

#### ก.1 ชนิดของพืช (crop types)

พืชแต่ละชนิดมีสภาพการสะท้อนพลังงาน ความสูง คุณสมบัติทางอากาศพลวัต คุณสมบัติของใบและปากใบ (stoma) พืชที่ปลูกค่อนข้างชิดกันและมีต้นค่อนข้างสูง จะมีผลให้ค่า  $K_c$  มีค่ามากกว่าหนึ่ง ประมาณ ร้อยละ 5 ถึง 10 ( $K_c = 1.05-1.10$ ) หรือบางครั้งอาจพบ  $K_c = 1.15-1.20$  ในพืชประเภท ข้าวโพด ข้าวฟ่าง หรืออ้อย หรือในพืชบางชนิดเช่น สับปะรด มีการปิดปากใบในช่วงกลางวันซึ่งจะมีค่า  $K_c$  ต่ำมาก

## ก.2 ภูมิอากาศ (climate)

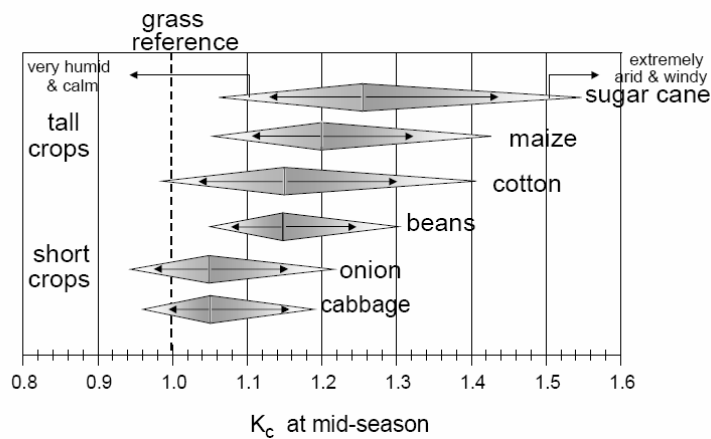
ค่า  $K_c$  ที่แนะนำในคู่มือ FAO-56 เป็นค่าสำหรับสภาพภูมิอากาศมาตรฐาน (sub-humid climate) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงกลางวันประมาณ ร้อยละ 45 และลมสงบถึงปานกลาง (2 m/s)

ความแปรปรวนของลมมีผลให้สภาพความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำสู่อากาศ (aerodynamic resistance) มีค่าเพิ่มมากขึ้น

สภาพความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำของพืชที่ปลูกโดยทั่วไปจะมากกว่าพืชอ้างอิงเนื่องจากมีความสูงมากกว่า

ค่า  $K_c$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อลมแรงขึ้น และความชื้นสัมพัทธ์ลดลง

ค่า  $K_c$  จะลดลงเมื่อลมสงบลง และความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มลง



ภาพที่ 4-2 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในระยะที่ปกคลุมเต็มผิวดิน มีค่าผันแปรไปตามสภาพภูมิอากาศ

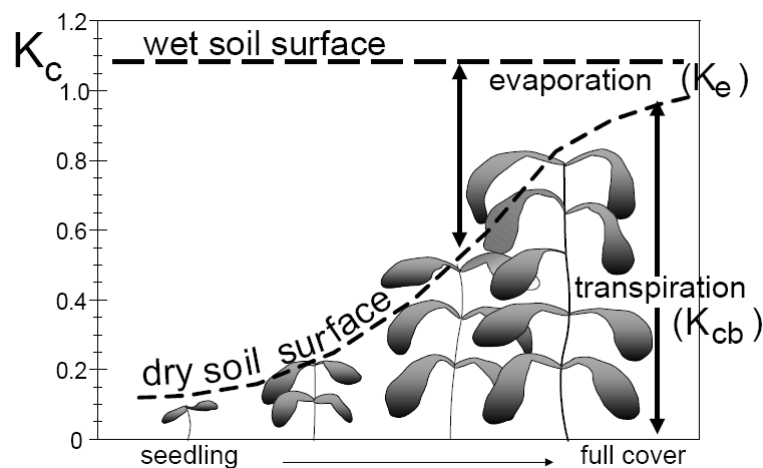
ที่มา: Allen et al., 1998

ในภาพที่ 4-2 สภาพอากาศที่ชื้นและลมสงบ ค่าของสัมประสิทธิ์พืชจะมีค่าต่ำกว่าสภาพอากาศแห้งและลมแรง โดยพืชที่มีต้นสูง (เมื่อเทียบกับความสูงของพืชอ้างอิง) จะมีความผันแปรของค่าสัมประสิทธิ์พืชมากกว่าพืชที่มีความสูงใกล้เคียงกับพืชอ้างอิง



### ก.3 การระเหยน้ำจากผิวดิน

การระเหยน้ำจากผิวดิน (soil evaporation) มีผลต่อปริมาณการใช้น้ำของพืชค่อนข้างมากในช่วงที่พืชต้นเล็กร่มเงาปกคลุมผิวดินไม่หมด ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชจะขึ้นกับปริมาณน้ำที่ระเหยจากดิน ถ้าหากดินมีความชุ่มชื้นสูงตลอดเวลา การระเหยจากดินจะมีปริมาณมาก มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชมีค่าสูง ซึ่งอาจสูงกว่า 1 ก็ได้ ในทางตรงกันข้ามหากผิวดินแห้งจะเป็นการจำกัดการระเหยน้ำ จะมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชมีค่าต่ำ สภาพความชุ่มชื้นของดินเป็นผลจากความถี่ในการให้น้ำแก่ดิน ซึ่งอาจเป็นน้ำจากการชลประทาน หรือน้ำจากฝนที่ตกก็ได้



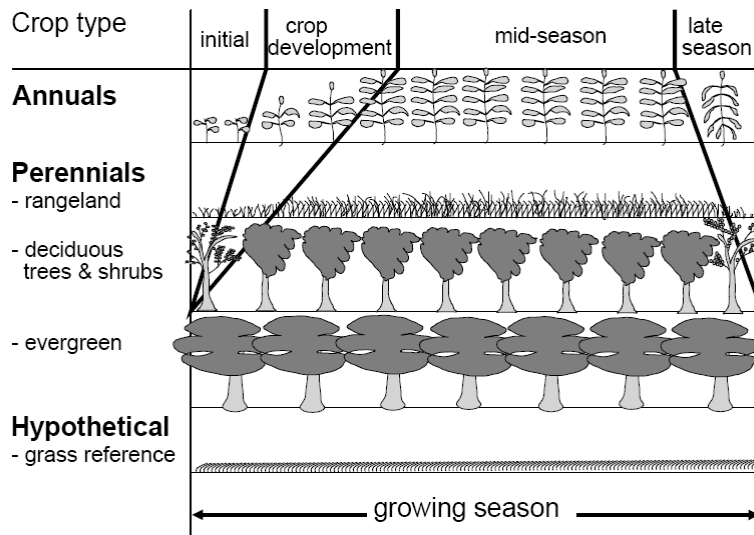
ภาพที่ 4-3 ผลของการระเหยน้ำจากผิวดินต่อค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

ที่มา: Allen et al., 1998

จากภาพที่ 4-3 เส้นประตรงในแนวราบเป็นค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในกรณีที่ผิวดินมีความชื้นสูงตลอดเวลา เส้นประโค้งเป็นกรณีที่ผิวดินแห้งแต่พืชยังได้รับน้ำพอเพียงกับความต้องการสำหรับการคายน้ำ

### ก.4 ช่วงของการเจริญเติบโตของพืช

ช่วงของการเจริญเติบโตของพืช (crop growth stages) สำหรับการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช แบ่งเป็น 4 ช่วง ประกอบด้วย (1) ช่วงตั้งตัว (initial stage) (2) ช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น (crop development stage) (3) ช่วงกลางของการเพาะปลูก (mid-season stage) และ (4) ช่วงปลายของการเพาะปลูก (late season stage)



ภาพที่ 4-4 ช่วงของการเจริญเติบโตของพืชชนิดต่าง ๆ

ที่มา: Allen et al., 1998

จากภาพที่ 4-4 ในกรณีพืชที่มีการปลูกใหม่ทุกปี (annual crop type) จะสามารถแบ่งช่วงของการเจริญเติบโตเป็น 4 ช่วงได้อย่างชัดเจน ส่วนพืชจำพวกไม้ยืนต้นหรือพืชที่ปลูกต่อเนื่อง (perennial crop type) จะแบ่งช่วงการเจริญเติบโตได้ยากขึ้น ในกรณีของทุ่งหญ้า (rangeland) หรือไม้ผลัดใบ (deciduous trees and shrubs) อาจสังเกตช่วงตั้งตัว (initial stage) ได้จากการเริ่มแตกยอด หรือผลิใบใหม่

ส่วนไม้ที่ไม่ผลัดใบ (evergreen) อาจไม่สามารถสังเกตได้ เช่นเดียวกับ พืชอ้างอิง (grass reference) ซึ่งเป็นพืชในทางทฤษฎี (hypothetical crop type) จะเติบโตสม่ำเสมอเหมือนกันตลอดช่วงการเพาะปลูก

## 1. ช่วงตั้งตัวของพืช

ช่วงตั้งตัวของพืช (initial stage) นับจากวันเริ่มปลูกจนถึงระยะที่พืชปกคลุมดินร้อยละ 10 ความยาวนานของช่วงตั้งตัวนี้ขึ้นอยู่กับ ชนิดของพืช ช่วงเวลาที่ปลูก และสภาพภูมิอากาศ เนื่องจากในช่วงแรกของการปลูก พื้นที่ใบยังมีไม่มาก ปริมาณการใช้น้ำของพืชส่วนใหญ่จึงเป็นน้ำที่ระเหยจากผิวดิน ดังนั้น ในกรณีที่ดินมีความชุ่มชื้นสูงจากน้ำชลประทานหรือน้ำฝน ปริมาณการใช้น้ำของพืชจะมีค่าสูง และในทางกลับกันจะมีค่าต่ำเมื่อดินแห้ง

## 2. ช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น

ช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้น (crop development stage) นับต่อจากช่วงตั้งตัวซึ่งพืชปกคลุมดินร้อยละ 10 จนถึงระยะพืชปกคลุมดินเต็มที่ (effective full cover) ซึ่งส่วนใหญ่จะตรงกับระยะเริ่มออกดอก ในกรณีที่ปลูกพืชแบบร่อง ระยะปกคลุมดินเต็มที่อาจพิจารณาจากช่วงที่ใบพืชในแต่ละร่องเริ่มซ้อนทับกันจนเกิดร่มเงาบังผิวดินทั้งหมด นอกจากนี้ สำหรับพืชบางชนิด โดยเฉพาะที่มีความสูงมากกว่า 0.5 เมตร ระยะปกคลุมดินเต็มที่อาจมีสัดส่วนที่ปกคลุมดินเพียงร้อยละ 70 ถึง 80 (vegetation fraction,  $f_c = 0.7-0.8$ ) ซึ่งในกรณีนี้ อาจสังเกตระยะพืชปกคลุมดินเต็มที่จากระยะแทงช่อดอกของพืชซึ่งทำได้ง่ายกว่า อีกแนวทางหนึ่งสามารถพิจารณากำหนดระยะปกคลุมดินเต็มที่จากค่าของดัชนีพื้นที่ใบ หรือ LAI (leaf area index) ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใบทั้งหมดต่อหน่วยพื้นที่พื้นผิว โดยกำหนดให้ LAI เท่ากับ 3 เมื่อพืชเติบโตถึงระยะปกคลุมดินเต็มที่

ในช่วงของการเจริญเติบโตทางลำต้นนี้ พืชจะแผ่ขยายร่มเงาบังผิวดินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีผลให้การระเหยน้ำจากผิวดินจะลดลง ส่วนการคายน้ำจะค่อย ๆ มีสัดส่วนเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นนี้ จะสัมพันธ์กับสัดส่วนที่พืชปกคลุมดิน และระยะพัฒนาการของพืช โดยทั่ว ๆ

ไป เมื่อพืชปกคลุมดินราว 25-40% จะมีค่า  $K_c = 0.5$  และเมื่อพืชปกคลุมดินราว 40-60% จะมีค่า  $K_c = 0.7$  อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำจะผันแปรไปตามลักษณะของพืช และสภาพการให้น้ำ

### 3. ช่วงกลางของการเพาะปลูก (mid-season stage)

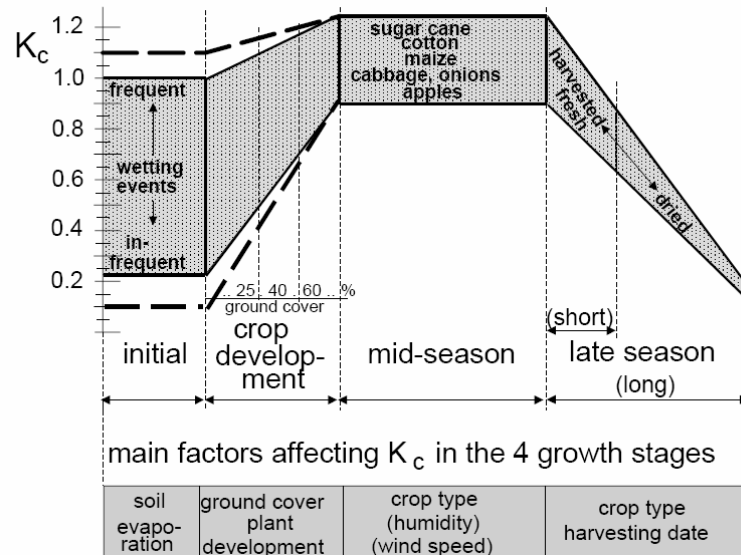
ช่วงกลางของการเพาะปลูก (mid-season stage) นับต่อจากช่วงของการเจริญเติบโตทางลำต้นจากระยะที่พืชปกคลุมดินเต็มที่ จนถึงระยะเริ่มสุกแก่ซึ่งสังเกตได้จากสภาพใบแก่ที่เริ่มเหลืองหรือหลุดร่วง หรือผลเริ่มเปลี่ยนสี ช่วงกลางของการเพาะปลูกนี้เป็นช่วงเวลาที่ยาวนานที่สุดสำหรับพืชในกลุ่มไม้ยืนต้น แต่สำหรับพืชที่เก็บผลสดหรือใบสด อาจเป็นช่วงเวลาเพียงสั้น ๆ

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชจะเพิ่มถึงค่าสูงสุดในช่วงกลางของการเพาะปลูก และมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยค่าของ  $K_c$  ที่เบี่ยงเบนจากค่า “1” ของพืชอ้างอิง โดยหลัก ๆ แล้วเป็นผลจากความสูงของต้นพืช สภาพความต้านทานของพื้นผิว และสภาพภูมิอากาศ

### 4. ช่วงปลายของการเพาะปลูก (late season stage)

ช่วงปลายของการเพาะปลูก (late season stage) นับต่อจากช่วงกลางของการเพาะปลูกจากระยะที่ผลผลิตเริ่มสุกแก่ จนถึงระยะเก็บเกี่ยวหรือพืชแก่เต็มที่ (full senescence) ในกรณีของพืชในกลุ่มไม้ยืนต้น ระยะสิ้นสุดของการเพาะปลูกจะครบรอบปีซึ่งเป็นวันเดียวกับวันเริ่มปลูก

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ระยะสิ้นสุดของการเพาะปลูก ( $K_{c\text{end}}$ ) จะขึ้นกับการจัดการเพาะปลูกและการให้น้ำ ในกรณีที่เก็บเกี่ยวผลผลิตสดซึ่งจะต้องมีการให้น้ำต่อเนื่องจนกระทั่งเก็บเกี่ยว ค่าของ  $K_{c\text{end}}$  จะมีค่าสูง ในขณะที่พืชบางชนิดจะปล่อยผลผลิตให้แห้งในแปลงก่อนเก็บเกี่ยว ซึ่งในกรณีนี้  $K_{c\text{end}}$  จะมีค่าลดต่ำลงมาก



ภาพที่ 4-5 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชตามช่วงของการเจริญเติบโต

ที่มา: Allen et al., 1998

ในภาพที่ 4-5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชตามช่วงของการเจริญเติบโต (1) ช่วงตั้งตัว (initial stage) ส่วนใหญ่เป็นการระเหยน้ำจากผิวดิน ซึ่งแปรผันค่อนข้างมากตามความถี่ของการให้น้ำ (2) ช่วงของการเจริญเติบโตทางลำต้น (crop development stage) มีค่า  $K_c$  เพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืช (3) ช่วงกลางของการเพาะปลูก (mid-season stage) มีค่า  $K_c$  เพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดโดยมีค่าต่างกันตามชนิดของพืช และ (4) ช่วงปลายของการเพาะปลูก (late season stage)  $K_c$  มีค่าลดลงจะมีค่าลดต่ำมากในกรณีผลผลิตให้แห้งในแปลงก่อนเก็บเกี่ยว

## ข. สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบเดี่ยวและแบบคู่

---

วิธีการของ FAO แต่เดิมมีสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบเดี่ยวเพียงอย่างเดียว ต่อมาในคู่มือของ FAO-56 ได้แนะนำสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบคู่ ซึ่งแต่ละแบบมีความหมายและความเหมาะสมกับการใช้งานดังนี้

### 1. สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบเดี่ยว

สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบเดี่ยว (single crop coefficient,  $K_c$ ) ได้ผนวกปัจจัยด้านการคายน้ำของพืชและการระเหยจากดินรวมอยู่ในสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชตัวเดียว (ภาพที่ 4-6 (ก)) การใช้งานสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบเดี่ยวเหมาะกับการวิเคราะห์ที่มีขั้นเวลาค่อนข้างยาว อาทิ รายสัปดาห์ รายสิบวัน หรือ รายเดือน สามารถนำไปใช้ในงานด้านการศึกษาเพื่อวางแผนโครงการหรือการออกแบบระบบชลประทาน และเหมาะกับการชลประทานแบบผิวดิน หรือ แบบฉีดฝอย ซึ่งมีช่วงระหว่างการให้น้ำแต่ละครั้งมากกว่า 1 สัปดาห์

### 2. สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบคู่

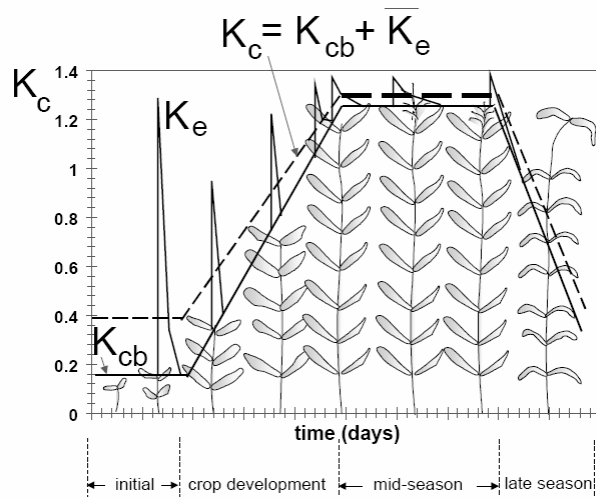
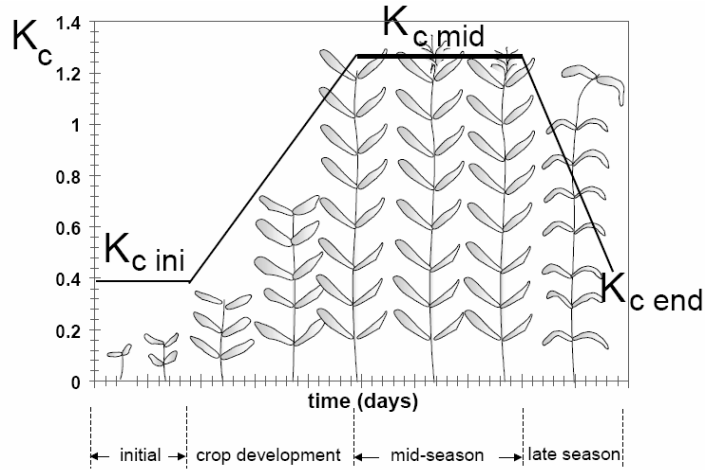
สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบคู่ (dual crop coefficient,  $K_{cb} + K_e$ ) พิจารณาแยกปัจจัยด้านการคายน้ำของพืชและการระเหยจากดินออกจากกัน (ภาพที่ 4-6 (ข)) สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ประกอบด้วย สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชส่วนฐาน ( $K_{cb}$ ) และ สัมประสิทธิ์การระเหยน้ำจากดิน ( $K_e$ ) ดังสมการ

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (4-3)$$

โดย

$K_{cb}$  = สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชส่วนฐาน (basal crop coefficient)

$K_e$  = สัมประสิทธิ์การระเหยน้ำจากดิน (soil water evaporation coefficient)



ภาพที่ 4-6 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

ที่มา: Allen et al., 1998

สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชส่วนฐาน ( $K_{cb}$ ) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณการใช้น้ำของพืช ( $ET_c$ ) กับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) ในกรณีที่ดินรอบข้างแห้ง แต่ความชื้นของดินในเขตรากพืชยังพอเพียงต่อความต้องการของพืช ส่วนสัมประสิทธิ์การระเหยน้ำจากดิน ( $K_e$ ) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายสภาพการระเหยจากผิวดิน โดยในกรณีที่ดินมีความชุ่มชื้นสูง ค่า  $K_e$  จะมากในทางกลับกัน ถ้าดินแห้ง ค่า  $K_e$  จะน้อย อย่างไรก็ตาม ผลรวมของ  $K_{cb} + K_e$  จะต้องไม่มากกว่าค่า  $K_{c\ max}$  ซึ่งหามาจากปริมาณพลังงานทั้งหมดที่สามารถทำให้น้ำระเหย การประมาณค่าของ  $K_e$  ทำโดยการคำนวณสมดุลของน้ำในดินเป็นรายวันเพื่อหาปริมาณความชื้นของผิวดินด้านบน

เนื่องจากการคำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบคู่มีความซับซ้อนมากกว่าแบบเดี่ยว จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความถูกต้องสูง เช่น การกำหนดการให้น้ำตามเวลาจริง การวิเคราะห์สมดุลของน้ำในดิน หรือ การศึกษาวิจัยโดยเฉพาะในกรณีที่สนใจปัจจัยของความชื้นในดิน และเหมาะกับการชลประทานแบบจุลภาค (micro-irrigation) ซึ่งมีความถี่การให้น้ำสูง



## 4.2 ขั้นตอนการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ในสภาพมาตรฐาน

การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน ( $ET_c$ ) กรณีใช้สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบบเดี่ยว ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- กำหนดช่วงการเจริญเติบโตของพืช กำหนดระยะเวลา และ เลือกค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่สอดคล้องกับช่วงเวลานั้น ๆ
- ปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่เลือกให้สอดคล้องกับสภาพการให้น้ำ และ/หรือ สภาพภูมิอากาศสำหรับแต่ละช่วงของการเจริญเติบโต
- สร้างโค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ซึ่งใช้สำหรับอ่านค่าสัมประสิทธิ์ที่เวลาใด ๆ ตลอดช่วงการเพาะปลูก
- คำนวณหา  $ET_c$  จากผลคูณของ  $ET_o$  และ  $K_c$

### ก. ระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตและ สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

---

การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชตามวิธี FAO-56 แบ่งช่วงของการเจริญเติบโตของพืช (crop growth stages) เป็น 4 ช่วง ประกอบด้วย

- ช่วงตั้งตัว (initial stage)
- ช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น (crop development stage)
- ช่วงกลางของการเพาะปลูก (mid-season stage)
- ช่วงปลายของการเพาะปลูก (late season stage)

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ใช้สำหรับสร้างโค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ตามวิธีการของ FAO-56 ต้องการทราบค่า 3 ค่า ประกอบด้วย

- สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงตั้งตัว ( $K_{cini}$ )
  - สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงกลางของการเพาะปลูก ( $K_{cmid}$ )
  - สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ระยะสิ้นสุดการเพาะปลูก ( $K_{cend}$ )
-

## ก.1 การกำหนดระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโต และค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

ระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตและสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่แนะนำตามคู่มือ FAO-56 ได้รวบรวมอยู่ในภาคผนวก ข. โดยในคู่มือ FAO-56 ได้จัดกลุ่มพืชที่มีลักษณะคล้ายกันทั้งในด้านความสูง พื้นที่ใบ การปกคลุมผิวดิน และสภาพการจัดการน้ำ ซึ่งจัดเป็น 16 กลุ่ม ประกอบด้วย (1) พืชผักขนาดเล็กกินใบ/หัว (small vegetables) ได้แก่ กะหล่ำ คะน้า หอม กระเทียม แครอท (2) พืชผักกลุ่มมะเขือ (vegetables – Solanum Family (*Solanaceae*)) ได้แก่ มะเขือเทศ มะเขือยาว มะเขือม่วง พริก ยาสูบ (3) พืชผักกลุ่มฟัก-แตง (vegetables – Cucumber Family (*Cucurbitaceae*)) ได้แก่ แตงกวา ฟัก ฟักทอง แตงโม (4) พืชหัวที่ใช้ประโยชน์จากรากและลำต้น (root and tubers) ได้แก่ มันเทศ มันสำปะหลัง (5) พืชตระกูลถั่ว (legumes (*Leguminosae*)) ได้แก่ ถั่วเขียว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง (6) พืช/ผักปลูกข้ามปี (perennial vegetables) ได้แก่ หน่อไม้ฝรั่ง (7) พืชเส้นใย (fibre crops) ได้แก่ ฝ้าย ป่าน ปอ (8) พืชน้ำมัน (oil crops) ได้แก่ งา ทานตะวัน (9) ธัญญาพืช (cereals) ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี (10) พืชอาหารสัตว์ (forages) ได้แก่ อลฟาฟา หญ้าอาหารสัตว์ (11) อ้อย (sugarcane) (12) ไม้ผลเขตร้อน (tropical fruit and trees) ได้แก่ กล้วย สับปะรด (13) องุ่นและเบอร์รี่ (grapes and berries) (14) ไม้ผล (fruit trees) ได้แก่ แอปเปิล มะนาว (15) พื้นที่ชุ่มน้ำ (wetlands) ได้แก่ สภาพพื้นที่น้ำขังมีพืชปกคลุม (16) กลุ่มพิเศษ (special) ได้แก่ สภาพพื้นที่ผิวน้ำ

ในที่นี้จะสรุปค่าแนะนำของระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตและสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช จากคู่มือ FAO-56 โดยจำแนกตามพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณความต้องการน้ำชลประทานในโครงการชลประทาน จำนวน 5 ชนิดพื้นที่ ประกอบด้วย ข้าว อ้อย พืชไร่/พืชผัก สวนผลไม้ และ บ่อกึ่ง/บ่อปลา ดังต่อไปนี้

## 1. ข้าว

ข้าวแบ่งสภาพพื้นที่ปลูก เป็น 3 ชนิด (อรรถวุฒิ และ นพพร, 2547) คือ (1) ข้าวไร่ (upland rice) เป็นข้าวที่ปลูกได้ทั้งบนพื้นที่ราบและลาดชัน ไม่ต้องทำคันนาถักเก็บน้ำ (2) ข้าวนาสวน (lowland rice) เป็นข้าวที่ปลูกในที่ราบลุ่ม แปลงนาสามารถรักษาระดับน้ำหล่อเลี้ยงตั้งแต่ 5-10 ซม. จนถึง 80 ซม. (3) ข้าวนาเมืองหรือข้าวขึ้นน้ำ (deep water or floating rice) เป็นข้าวที่ปลูกในพื้นที่ระดับน้ำตั้งแต่ 80 ซม. ขึ้นไปจนถึงน้ำสูง 3-4 เมตร นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกข้าวตามอายุการเก็บเกี่ยวได้เป็น 3 พวก คือ (1) ข้าวเบา (early variety) เป็นข้าวที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 90 – 100 วัน (2) ข้าวกลาง (medium variety) เป็นข้าวที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 100 – 120 วัน และ (3) ข้าวหนัก (late variety) เป็นข้าวที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 120 วันขึ้นไป

พื้นที่เพาะปลูกข้าวในเขตชลประทานเกือบทั้งหมดเป็นข้าวนาสวน มีการรักษาระดับน้ำในแปลงนาไม่สูงนัก เกษตรกรมักเลือกใช้พันธุ์ข้าวกลางซึ่งมีอายุการเก็บเกี่ยวไม่เกิน 120 วัน ในบางกรณีอาจเลือกใช้พันธุ์ข้าวเบาเพื่อเร่งการเก็บเกี่ยวให้เร็วขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม อาทิ สภาพอากาศหนาวเย็น หรือสภาพน้ำท่วม

คู่มือ FAO-56 แนะนำระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตของข้าวหนักที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 150 และ 180 วัน ส่วนข้าวกลาง (อายุ 120 วัน) ได้จากการปลูกทดสอบโดยเอกสิทธิ์และคณะ (2550) (ตารางที่ 4-1) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแนะนำค่า  $K_c$  ชุดเดียว (ตารางที่ 4-2) ซึ่งเป็นค่าสำหรับภูมิอากาศปานกลาง โดยค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงตั้งตัว  $K_{c\text{ini}} = 1.05$  ในช่วงกลางของการเพาะปลูก  $K_{c\text{mid}} = 1.20$  และ ที่ระยะสิ้นสุดการเพาะปลูก  $K_{c\text{end}} = 0.6-0.9$  ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงตั้งตัวมีค่าสูง เนื่องจากพิจารณาว่ามีน้ำขังในแปลงในช่วงตั้งตัวของข้าว (ซึ่งกรณีนี้เป็นข้าวนาสวน) ส่วน  $K_c$  ที่ระยะสิ้นสุดการเพาะปลูกให้ค่าระหว่าง 0.6 ถึง 0.9 ซึ่งในกรณีนี้ต้องพิจารณาสภาพแปลงนาและข้าวที่ระยะเก็บเกี่ยว ว่ามีการหุคให้น้ำเป็นระยะเวลานานเท่าไรและปล่อยให้ข้าวมีสภาพแห้งมากน้อยเพียงใด

นอกจากนี้ สิ่งที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมในการประเมินปริมาณการใช้น้ำของข้าว คือ ปริมาณน้ำที่ใช้ในการเตรียมแปลงและปริมาณการรั่วซึมจากแปลงนา รายละเอียดอื่น ๆ อาจค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง (บุญหงษ์, 2547, อรรควุฒิ และ นพพร, 2547, De Datta, 1981, Doorenbos and Kassam, 1979, Yoshida, 1981, Sharma and Singh, 1999)

## 2. อ้อย

อ้อยเป็นพืชที่ปลูกครั้งหนึ่งแล้วสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตจากการไว้ต่อได้หลายครั้ง มีฤดูปลูก 2 แบบ (ประเสริฐ, 2547) คือ (1) ฤดูปลูกอ้อยต้นฝน อยู่ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกรกฎาคม อ้อยที่ปลูกต้นฝนมีช่วงเวลาในการเจริญเติบโตน้อยกว่า 12 เดือน มักจะสุกแก่ไม่เต็มที่เมื่อถึงเวลาเก็บเกี่ยว และ (2) ฤดูปลูกอ้อยปลายฝนหรืออ้อยข้ามแล้ง อยู่ระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ ในพื้นที่ปลูกที่ขาดน้ำชลประทานการปลูกข้ามแล้งให้ผลดีกว่าปลูกต้นฝน

คู่มือ FAO-56 แนะนำระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตของอ้อยสำหรับอ้อยปลูกในฤดูปลูกอ้อยปลายฝน และอ้อยต่อ (ตารางที่ 4-1) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยแนะนำค่า  $K_c$  ชุดเดียว (ตารางที่ 4-2) ซึ่งเป็นค่าสำหรับสภาพภูมิอากาศปานกลาง โดยค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงตั้งตัว  $K_{cini} = 0.40$  ในช่วงกลางของการเพาะปลูก  $K_{cmid} = 1.25$  และ ที่ระยะสิ้นสุดการเพาะปลูก  $K_{cend} = 0.35$  รายละเอียดอื่น ๆ อาจค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง (ประเสริฐ, 2547, Doorenbos and Kassam, 1979, Lingle, 1999)

## 3. พืชไร่/พืชผัก

พื้นที่ปลูกพืชไร่/พืชผัก มีกลุ่มพืชหลายกลุ่ม เช่น กลุ่มธัญพืช พืชตระกูลถั่ว พืชผักขนาดเล็กกินใบ/หัว พืชผักพวกมะเขือ พืชผักพวกฟัก-แตง ในตารางที่ 4-1 ได้สรุปค่าแนะนำของระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตของข้าวโพด (ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ข้าวโพดหวาน) และพืชตระกูลถั่ว (ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วลิสง)

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (ตารางที่ 4-2) ได้สรุปค่าแนะนำของ  $K_c$  เป็นแต่ละกลุ่มพืช

เมื่อพิจารณาค่าแนะนำจากคู่มือ FAO-56 พบว่า ค่าของ  $K_c$  ในแต่ละกลุ่มพืช มีความแตกต่างกันไม่มากนัก กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงตั้งตัว  $K_{cini}$  อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.7 ซึ่งค่า  $K_{cini}$  จะต้องมีการปรับแก้โดยพิจารณาจากสภาพการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินจากการให้น้ำ ส่วน ค่า  $K_{cmid}$  ในช่วงกลางของการเพาะปลูกอยู่ในช่วง 1.0 ถึง 1.15 ซึ่งแปรผันตามความสูงของต้นพืช และ ค่า  $K_{cend}$  ที่ระยะสิ้นสุดการเพาะปลูกจะขึ้นอยู่กับลักษณะการเก็บเกี่ยวผลผลิต โดยจะมีค่าสูงในกรณีเก็บเกี่ยวสด แต่จะมีค่าต่ำในกรณีเก็บเกี่ยวผลผลิตแห้ง

ในทางตรงข้ามกับข้อมูลระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งพบว่ามีข้อจำกัดในการนำมาใช้ค่อนข้างมาก เนื่องจาก ค่าแนะนำมีชนิดของพืชไม่ตรงกับชนิดของพืชที่ปลูกในประเทศไทย หรือพืชชนิดเดียวกันแต่มีการปลูกในพื้นที่ต่างภูมิภาคกันก็มีระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตต่างกัน นอกจากนี้ ข้อมูลของพืชที่ปลูกในประเทศไทยมีจำกัดมาก

รายละเอียดอื่น ๆ อาจค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงของพืชแต่ละชนิด อาทิ ข้าวโพด (ชูศักดิ์ และ ทิวา, 2547, Tollenaar and Dwyer, 1999) ถั่วเหลือง (พีระศักดิ์, 2547ก, Zhang and Smith, 1999) ถั่วเขียว (พีระศักดิ์, 2547ข) ถั่วลิสง (รังสฤษฎ์, 2547)

#### 4. ส่วนผลไม้

ค่าแนะนำของ  $K_c$  ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไม้ผลแต่ละชนิดนั้นหาได้ยาก ในกรณีนี้ แนะนำให้ใช้ค่า  $K_c = 1.00$  (ตารางที่ 4-2) สำหรับสภาพภูมิอากาศปานกลาง และให้ปรับแก้ค่าให้เหมาะสมตามความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความสูงของต้นพืช

## 5. บ่อกึ่ง/บ่อปลา

การระเหยน้ำจากพื้นที่บ่อกึ่ง/บ่อปลา เป็นการระเหยของน้ำจากผิวน้ำเปิดที่มีความลึกไม่มาก จากคู่มือ FAO-56 แนะนำค่า  $K_c = 1.05$  (ตารางที่ 4-2) สำหรับสภาพภูมิอากาศปานกลาง

สิ่งที่ควรพิจารณาในการประเมินปริมาณการใช้น้ำของบ่อกึ่ง/บ่อปลาเพิ่มเติม คือ การเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อและการรั่วซึมจากบ่อ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บ่อเลี้ยงกุ้งซึ่งมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อค่อนข้างบ่อย

**ตารางที่ 4-1**      **ระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตของพืช**

กลุ่ม	ชนิดพืช					
		Lini	Ldev	Lmid	Llate	Total
1.	ข้าว (rice)					
	- ข้าวกลาง (อายุการเก็บเกี่ยว 120 วัน)	30	30	40	20	120
	- ข้าวหนัก (อายุการเก็บเกี่ยว 150 วัน)	30	30	60	30	150
	- ข้าวหนัก (อายุการเก็บเกี่ยว 180 วัน)	30	30	80	40	180
2.	อ้อย (sugarcane)					
	- อ้อยปลูก (อ้อยข้ามแล้ง)	35	60	190	120	405
	- อ้อยดอ	25	70	135	50	280
3.	พืชไร่/พืชผัก					
	- ธัญญาพืช (cereals)					
	ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	20	35	40	30	125
	ข้าวโพดหวาน	20	20	30	10	80
	- พืชตระกูลถั่ว (legumes ( <i>Leguminosae</i> ))					
	ถั่วเหลือง	15	25	40	15	95
	ถั่วเขียว	15	25	25	10	75
	ถั่วลิสง	25	35	45	25	130
4.	ไม้ผลยืนต้น (fruit trees)					365
5.	บ่อกึ่ง/บ่อปลา					365

ตารางที่ 4-2 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

กลุ่ม	ชนิดพืช	Kc		
		ini	mid	end
1.	ข้าว (rice)	1.05	1.20	0.9-0.6
2.	อ้อย (sugar cane)	0.40	1.25	0.75
3.	พืชไร่/พืชผัก			
	- ธัญญาพืช (cereals)	0.30	1.15	0.35
	ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์		1.2	0.35
	ข้าวโพดหวาน		1.15	1.05
	- พืชตระกูลถั่ว (legumes ( <i>Leguminosae</i> ))	0.40	1.15	0.55
	- พืชผักขนาดเล็กกินใบ/หัว (small vegetables)	0.70	1.05	0.95
	- พืชผักพวกมะเขือ (Solanum Family ( <i>Solanaceae</i> ))	0.60	1.15	0.80
	- พืชผักพวกฟัก-แตง (Cucumber Family ( <i>Cucurbitaceae</i> ))	0.50	1.00	0.80
4.	ไม้ผลยืนต้น (fruit trees)	0.95	1.00	1.00
5.	บ่อกึ่ง/บ่อปลา		1.05	1.05

## ก.2 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในประเทศไทย

เนื่องจาก ระยะเวลาในแต่ละช่วงการเจริญเติบโตนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของพืชแล้ว ยังแปรผันตามสภาพแวดล้อมที่พืชนั้นเจริญเติบโตด้วย ดังนั้นค่าที่แนะนำในคู่มือ FAO-56 จึงเป็นแนวทางการกำหนดในเบื้องต้น การหาค่าที่แท้จริงจำเป็นต้องมีการปลูกทดลองในพื้นที่ และ พิจารณาระยะเวลาที่ปลูกทดลองด้วย

ข้อมูลเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในประเทศไทยมีเอกสารวิชาการจัดทำเผยแพร่โดยกรมชลประทาน (ศจีและคณะ, 2533, โอสถและ ชีระพล, 2543) โดยศจีและคณะ (2533) ได้หาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชเทียบปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงที่คำนวณจากสมการ Modified Penman และถาดวัดการระเหย ของพืช 12 ชนิด จัดกลุ่มได้เป็น 7 กลุ่ม ได้แก่ ธัญญาพืชม (ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ข้าวฟ่าง) อ้อย พืชตระกูลถั่ว (ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ถั่วเขียว) พืชผักกินใบ (กะหล่ำดอก คื่นช่าย) พืชน้ำมัน (งา) พืชเส้นใย (ฝ้าย) พืช/ผักปลูกข้ามปี (ยาสูบ) และ นำเสนอกราฟแสดงระยะเวลาของช่วงการเจริญเติบโตของพืชแต่ละชนิด

เอกสารทางวิชาการของกลุ่มงานวิจัยการใช้น้ำชลประทาน สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ ได้เผยแพร่ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช จำนวน 30 ชนิด เทียบปริมาณการใช้น้ำอ้างอิงที่คำนวณจาก 7 วิธี ประกอบด้วย Modified Penman, Blaney-Criddle, E-pan, Thornthwaite, Hargreaves, Radiation และ Penman Monteith ซึ่งจัดกลุ่มพืชได้ 12 กลุ่ม ได้แก่ ธัญญาพืชม (ข้าว กข. ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ข้าวบาสมชาติ ข้าวสาลี ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ข้าวโพดหวาน ข้าวฟ่าง) อ้อย พืชตระกูลถั่ว (ถั่วเหลือง ถั่วเขียว) พืชผักกินใบ/หัว (กะหล่ำดอก คื่นช่าย หอมหัวใหญ่ หอมแดง) พืชผักกินผล (มะเขือเทศ) พืชผักพวกแตง (แตงโม มะระ) พืชหัวที่ใช้ประโยชน์จากรากและลำต้น (เผือก) พืชน้ำมัน (งา ทานตะวัน ละหุ่ง) พืชเส้นใย (ฝ้าย) พืช/ผักปลูกข้ามปี (หน่อไม้ฝรั่ง กุหลาบ ดอกบานชื่น) พืชอาหารสัตว์/หญ้า (หญ้าแฝก หญ้าลูซี่) ไม้ผล (มะนาว 1-3 ปี และ 3-5 ปี ส้มโอ มะม่วง)

นอกจากนี้ ยังมีวิทยานิพนธ์ปริญญาโทที่ได้ศึกษาการใช้น้ำของพืชอีกหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น ธัญญาพืชม ได้แก่ ข้าวโพดฝักอ่อน (จรูญ, 2543) ข้าวโพด



เลี้ยงสัตว์ (นเรศ, 2547) พืชตระกูลถั่ว ได้แก่ ถั่วเหลือง (อนันต์, 2546, ประศาสน์, 2547) ถั่วลิสง (วิระชัย, 2545) ถั่วแระญี่ปุ่น (ถนอม, 2543) พืชผักกินใบ/หัว ได้แก่ กระชายดำ (สิทธิพงษ์, 2548) พืชผักกินผล ได้แก่ มะเขือเทศ (ธีรพงษ์, 2545) กระเจียบเขียว (ปกรณ, 2545) พืชผักพวกแตง ได้แก่ แตงโม (ไพรัตน์, 2546) พืช น้ำมัน ได้แก่ ทานตะวัน (นิพนธ์, 2546) สบู่ดำ (ขวัญชัย, 2552) พืช/ผักปลูกข้ามปี ได้แก่ หน่อไม้ฝรั่ง (สุนทร, 2536) หม่อน (ทวิศักดิ์, 2544) องุ่น (พีระชาติ, 2545) พืชอาหารสัตว์/หญ้า ได้แก่ หญ้ากินนีสีม่วง (บุญฤทธิ์, 2548)

ถึงแม้ว่าในประเทศไทยจะมีการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชหลายชนิด แต่การนำมาใช้งานร่วมกับวิธีการคำนวณของกลุ่ม FAO-56 สมควรพิจารณาข้อจำกัดหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น เอกสารที่เผยแพร่ส่วนใหญ่ไม่ได้พิจารณาระยะเวลาในแต่ละช่วงของการเจริญเติบโตของพืชแบบกลุ่ม FAO-56 แต่จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชเป็นรายสัปดาห์หรือรายเดือนซึ่งจะไม่สอดคล้องกับวิธีการคำนวณในกลุ่ม FAO-56 อีกประการหนึ่ง เอกสารเผยแพร่เหล่านี้ส่วนหนึ่งเป็นงานทดลองที่ได้ดำเนินการก่อนที่กลุ่ม FAO-56 ตีพิมพ์เผยแพร่ในปี พ.ศ. 2541 ทำให้การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชไม่ได้อ้างอิงกับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงที่คำนวณจากวิธี FAO Penman-Monteith หรือไม่ได้มีการตรวจวัดร่วมกับถังวัดการใช้น้ำของพืชซึ่งทำให้ไม่สามารถตรวจสอบความสอดคล้องเหมาะสมของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชได้

## ข. การปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

---

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่แนะนำของกลุ่ม FAO-56 เป็นค่าสำหรับสภาพภูมิอากาศแบบกึ่งชุ่มชื้น (sub-humid climate) ซึ่งเป็นสภาพภูมิอากาศที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด ( $RH_{min}$ ) เท่ากับ 45% และสภาพลมปานกลาง (2 ม/วินาที) ในกรณีที่สภาพภูมิอากาศต่างจากสภาพข้างต้น กลุ่ม FAO-56 ได้แนะนำให้ปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ดังต่อไปนี้

### ข.1 ค่า $K_c$ สำหรับช่วงตั้งตัวของพืช

ค่า  $K_c$  สำหรับช่วงตั้งตัวของพืชในกลุ่ม FAO-56 และที่สรุปไว้ในภาคผนวกเป็นค่ากลางที่แนะนำให้ใช้สำหรับการประมาณปริมาณการใช้น้ำของพืช สำหรับการศึกษาระยะต้นหรือการวางโครงการเท่านั้น สำหรับการศึกษาค่าที่ต้องการประมาณค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แม่นยำมากขึ้นจำเป็นต้องพิจารณาสภาพความชื้นในดิน เนื่องจาก ในช่วงตั้งตัวของพืช ปริมาณการใช้น้ำของพืชส่วนใหญ่เป็นปริมาณการระเหยน้ำจากผิวดินซึ่งแปรผันตามปริมาณความชื้นที่ผิวดิน หากผิวดินมีปริมาณความชื้นสูงจะมีผลให้มีการระเหยสูงและค่า  $K_c$  ก็จะสูงด้วย

การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงตั้งตัวของพืชจะต้องพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน 3 ประการ ประกอบด้วย ความถี่ของการให้น้ำซึ่งอาจมีที่มาจากน้ำชลประทานหรือน้ำฝน ปริมาณน้ำที่ให้น้ำในแต่ละครั้งซึ่งช่วยให้ทราบปริมาณน้ำที่แทรกซึมผ่านผิวดิน (infiltration) และ สภาพภูมิอากาศซึ่งเป็นตัวกำหนดปริมาณการระเหยน้ำสูงสุดโดยปัจจัยนี้ถูกผนวกรวมอยู่ในเทอมของปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง

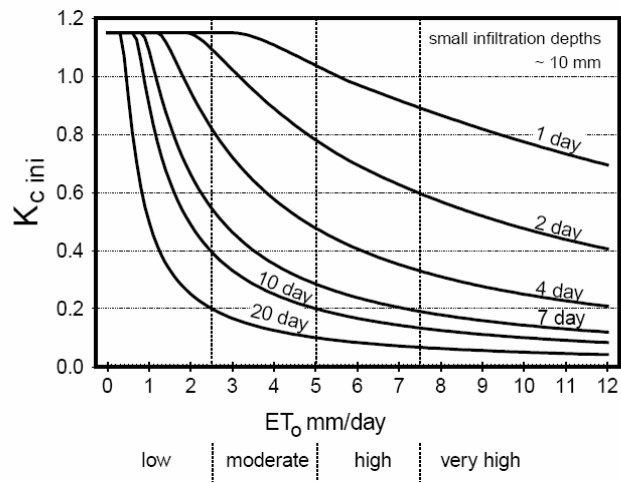
การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่พิจารณาจากปัจจัยข้างต้นแบ่งเป็น 3 กรณี ดังนี้

- กรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านดินเล็กน้อย (น้อยกว่า 10 มม.)
- กรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านดินมาก (มากกว่า 40 มม.)
- กรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านดินปานกลาง (10-40 มม.)

1. กรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านผิวดินเล็กน้อย (น้อยกว่า 10 มม.)

ในกรณีน้ำแทรกซึมผ่านผิวดินเล็กน้อย (น้อยกว่า 10 มม.) เป็นสภาพพื้นที่ซึ่งมีการให้น้ำชลประทานหรือฝนตกปริมาณน้อย แต่มีความถี่การให้น้ำสูง ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช ( $K_{cini}$ ) หาได้จากกราฟในภาพที่ 4-7

การอ่านค่า  $K_{cini}$  จากกราฟต้องทราบข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) (มม./วัน) และช่วงห่างของการให้น้ำ (วัน/ครั้ง) ยกตัวอย่างเช่น ถ้ามีการให้น้ำชลประทานทุก 2 วัน ปริมาณน้ำที่ให้ ประมาณ 12 มม.ต่อครั้ง ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง 4 มม./วัน จากกราฟในภาพที่ 4-7 ที่ค่า  $ET_o$  ในแกนนอนเท่ากับ 4 mm/day อ่านค่าจากกราฟเส้น 2 day จะได้ค่า  $K_{cini}$  เท่ากับ 0.85



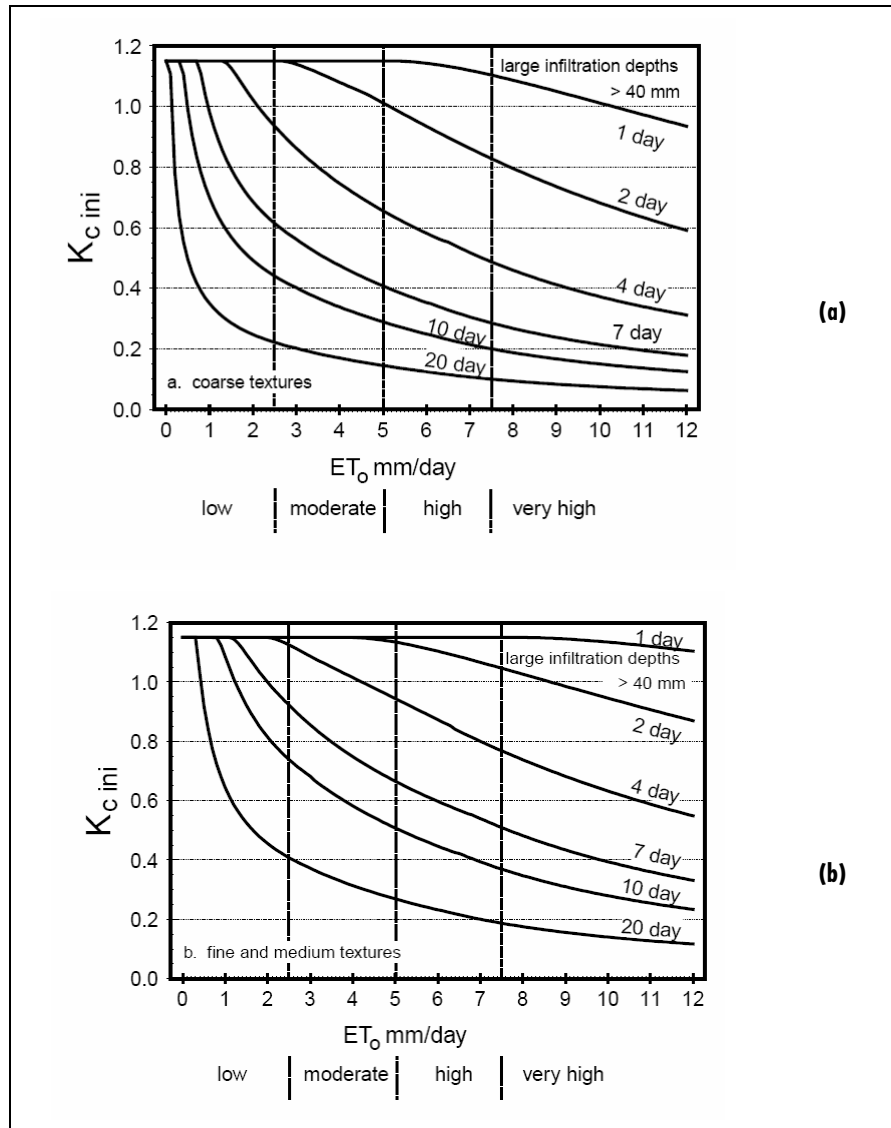
ภาพที่ 4-7 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช กรณีมีน้ำซึมผ่านผิวดินเล็กน้อย (น้อยกว่า 10 มม.)

ที่มา: Allen et al., 1998

2. กรณีมีน้ำซึมผ่านผิวดินมาก (มากกว่า 40 มม.)

ในกรณีน้ำแทรกซึมผ่านผิวดินมาก (มากกว่า 40 มม.) เป็นสภาพพื้นที่ซึ่งมีการให้น้ำชลประทานเป็นครั้งคราว ได้แก่ การให้น้ำแบบฉีดฝอย การให้น้ำแบบผิวดิน ซึ่งมีการให้น้ำต่อครั้งค่อนข้างมากแต่มีการเว้นช่วงการให้น้ำนานกว่ากรณีแรก ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช ( $K_{cini}$ ) หาได้จากกราฟในภาพที่ 4-8 โดยในภาพที่ 4-8 (a) เป็นกราฟสำหรับดินเนื้อหยาบ เช่น ดินทราย ดินทรายปนดินร่วน เป็นต้น ส่วนกราฟในภาพที่ 4-8 (b) สำหรับดินเนื้อปานกลางและดินเนื้อละเอียด เช่น ดินร่วน ดินร่วนเหนียว ดินเหนียว เป็นต้น

การอ่านค่า  $K_{cini}$  จากกราฟต้องทราบข้อมูลปริมาณการให้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) (มม./วัน) ช่วงห่างของการให้น้ำ (วัน/ครั้ง) และลักษณะเนื้อดินซึ่งมีผลต่อการแทรกซึมน้ำผ่านผิวดิน ยกตัวอย่างเช่น ถ้ามีการให้น้ำชลประทานทุก 7 วัน ปริมาณน้ำที่ให้ ประมาณ 50 มม.ต่อครั้ง ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง 4 มม./วัน ถ้าเนื้อดินเป็นดินทรายอ่านค่าจากกราฟในภาพที่ 4-8 (a) ที่  $ET_o$  ในแกนนอนเท่ากับ 4 mm/day อ่านค่าจากกราฟเส้น 7 day จะได้ค่า  $K_{cini}$  เท่ากับ 0.45 แต่ถ้าเนื้อดินเป็นดินร่วนให้อ่านค่า  $K_{cini}$  จากกราฟในภาพที่ 4-8 (b) จะได้ค่า  $K_{cini}$  เท่ากับ 0.7



ภาพที่ 4-8 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช  
 กรณีมีน้ำซึมผ่านผิวดินมาก (มากกว่า 40 มม.)  
 (a) กรณีดินเนื้อหยาบ (b) กรณีดินเนื้อละเอียด

ที่มา: Allen et al., 1998

3. กรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านดินปานกลาง (10-40 มม.)

ในกรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านผิวดินปานกลาง (10-40 มม.) ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช ( $K_{cini}$ ) ต้องใช้ข้อมูลค่า  $K_{cini}$  ที่หาได้จากกรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านผิวดินเล็กน้อย ( $K_{cini(case I)}$ ) และกรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านผิวดินมาก ( $K_{cini(case II)}$ ) นำมาคำนวณตามสมการ

$$K_{cini} = K_{cini(case I)} + \frac{(I-10)}{(40-10)} [K_{cini(case II)} - K_{cini(case I)}] \quad (4-4)$$

โดยที่

$K_{cini(case I)} = K_{cini}$  กรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านผิวดินเล็กน้อย

$K_{cini(case II)} = K_{cini}$  กรณีมีน้ำซึมผ่านผิวดินมาก

$I =$  ปริมาณน้ำแทรกซึมผ่านดิน [mm] ในช่วง  $10\text{ mm} < I < 40\text{ mm}$

ยกตัวอย่างเช่น ถ้าดินในแปลงเพาะปลูกมีเนื้อดินเป็นดินร่วน มีการให้น้ำชลประทานทุก 2 วัน ปริมาณน้ำที่ให้ ประมาณ 20 มม.ต่อครั้ง ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) 4 มม./วัน สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช ( $K_{cini}$ ) ได้ดังนี้

- ค่า  $K_{cini}$  กรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านผิวดินเล็กน้อย ( $K_{cini(case I)}$ )

หาได้จากกราฟในภาพที่ 4-7 ที่  $ET_o$  เท่ากับ 4 mm/day อ่านค่าจากเส้น 2 day ได้  $K_{cini(case I)} = 0.85$

- ค่า  $K_{cini}$  กรณีมีน้ำแทรกซึมผ่านผิวดินมาก ( $K_{cini(case II)}$ )

หาได้จากกราฟในภาพที่ 4-8 (b) ที่  $ET_o$  เท่ากับ 4 mm/day อ่านค่าจากเส้น 2 day ได้  $K_{cini(case II)} = 1.15$

- จากสมการ

$$K_{cini} = K_{cini(case I)} + \frac{(I-10)}{(40-10)} [K_{cini(case II)} - K_{cini(case I)}]$$

$$K_{cini} = 0.85 + \frac{(20-10)}{(40-10)} [1.15 - 0.85]$$

- ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช  $K_{cini} = 0.95$

**ตารางที่ 4-3 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำสำหรับช่วงตั้งตัวของพืช กรณีมีน้ำแทรกซึม  
ผ่านดินปานกลาง (10-40 มม.) และเนื้อดินเป็นดินร่วน**

ช่วงห่างของการให้น้ำ	การใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ )			
	ต่ำ 1-3 มม./วัน	ปานกลาง 3-5 มม./วัน	สูง 5-7 มม./วัน	สูงมาก > 7 มม./วัน
น้อยกว่า 1 สัปดาห์	1.2-0.8	1.1-0.6	1.0-0.4	0.9-0.3
ทุกสัปดาห์	0.8	0.6	0.4	0.3
นานกว่า 1 ครั้งต่อสัปดาห์	0.7-0.4	0.4-0.2*	0.3-0.2*	0.2*-0.1*

หมายเหตุ:

\* กรณีที่ปริมาณการใช้น้ำอ้างอิงมีค่าสูง แต่การให้น้ำมีช่วงห่างมากกว่า 1 สัปดาห์ต่อครั้ง อาจมีผลให้ดินแห้งเกินไปจนพืชขาดน้ำได้

ในตารางที่ 4-3 สรุปค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงตั้งตัว ( $K_{cini}$ ) จากภาพที่ 4-7 และภาพที่ 4-8 ซึ่งประมาณค่ามาจากช่วงห่างของการให้น้ำ (หรือความถี่ของดินที่ถูกทำให้เปียก) กับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง จากตารางดังกล่าวเห็นได้ว่าเมื่อมีการให้น้ำถี่ทำให้ผิวดินมีความชื้นสูงจะทำให้ค่า  $K_{cini}$  สูง ในทางตรงกันข้าม หากเว้นช่วงห่างของการให้น้ำมากขึ้นทำให้ผิวดินแห้ง จะทำให้ค่า  $K_{cini}$  มีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม ในสภาพอากาศแห้งหรือลมแรง ซึ่งสังเกตได้จากค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงที่มีค่าสูง หากเว้นช่วงห่างของการให้น้ำมากเกินไปจะทำให้พืชขาดน้ำได้

## ข.2 การปรับแก้ $K_c$ สำหรับช่วงกลางของการเพาะปลูก

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชสำหรับช่วงกลางของการเพาะปลูกที่แนะนำของคู่มือ FAO-56 เป็นค่าสำหรับสภาพภูมิอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด ( $RH_{\min}$ ) เท่ากับ 45% และสภาพลมปานกลาง (2 ม./วินาที)

ในกรณีที่สภาพภูมิอากาศต่างจากสภาพข้างต้น ให้ปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ตามค่าปรับแก้จากกราฟในภาพที่ 4-9 โดยแยกตามสภาพภูมิอากาศ คือ

- ภาพที่ 4-9 (a) กรณีสภาพภูมิอากาศแล้งหรือกึ่งแห้งแล้ง (arid/semi-arid climate) มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด ( $RH_{\min}$ )  $\sim 25\%$  หรือความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ( $RH_{\text{mean}}$ )  $\sim 50\%$
- ภาพที่ 4-9 (b) กรณีสภาพภูมิอากาศกึ่งชุ่มชื้น (sub-humid climate) มี  $RH_{\min} \sim 45\%$  หรือ  $RH_{\text{mean}} \sim 70\%$
- ภาพที่ 4-9 (c) กรณีสภาพภูมิอากาศชุ่มชื้นมาก (very humid climate) มี  $RH_{\min} \sim 80\%$  หรือ  $RH_{\text{mean}} \sim 90\%$

อีกแนวทางหนึ่งสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ปรับแก้ได้ตามสมการ

$$K_{c\text{mid}} = K_{c\text{mid}(\text{Tab})} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (4-5)$$

โดยที่

$K_{c\text{mid}(\text{Tab})}$  = สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชสำหรับช่วงกลางของการเพาะปลูกที่แนะนำในตาราง

$u_2$  = ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตร ตลอดช่วงกลางของการเพาะปลูก [ $\text{ms}^{-1}$ ] โดยใช้ได้ในช่วง  $1\text{ms}^{-1} \leq u_2 \leq 6\text{ms}^{-1}$

$RH_{\min}$  = ค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด ตลอดช่วงกลางของการเพาะปลูก [%] โดยใช้ได้ในช่วง  $20\% \leq RH_{\min} \leq 80\%$

$h$  = ความสูงเฉลี่ยของต้นพืชตลอดช่วงกลางของการเพาะปลูก [m] โดยใช้ได้ในช่วง  $0.1\text{m} < h < 10\text{m}$



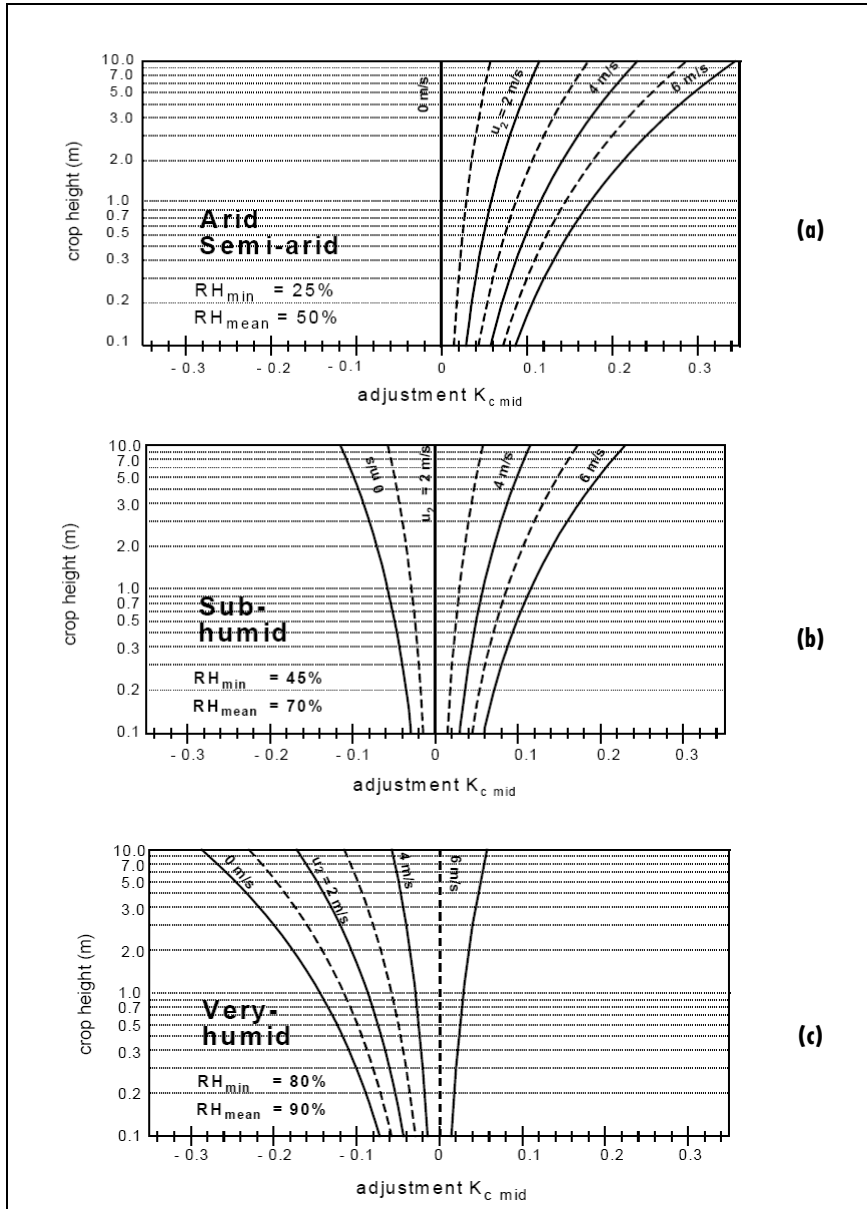
กรณีไม่มีข้อมูล  $RH_{\min}$  ใช้ประมาณค่าจากสมการ

$$RH_{\min} = \frac{e^o(T_{\min})}{e^o(T_{\max})} 100 \quad (4-6)$$

โดยที่

$e^o(T_{\min})$  = ความดันไอน้ำอิ่มตัวจากอุณหภูมิต่ำสุด

$e^o(T_{\max})$  = ความดันไอน้ำอิ่มตัวจากอุณหภูมิสูงสุด



ภาพที่ 4-9 ค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชสำหรับช่วงกลางของการเพาะปลูกแยกตามสภาพภูมิอากาศ (a) กรณีสภาพภูมิอากาศแล้ง (b) กรณีสภาพภูมิอากาศปกติ (c) กรณีสภาพภูมิอากาศชุ่มชื้นมาก

ที่มา: Allen et al., 1998

#### ตัวอย่างที่ 4-1 การคำนวณปรับแก้ $K_c$ สำหรับช่วงกลางของการเพาะปลูก

ข้าวสาลีมีค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชสำหรับช่วงกลางของการเพาะปลูก ( $K_{c\text{mid}(Tab)}$ ) เท่ากับ 1.15 และมีความสูง เท่ากับ 1 เมตร

■ กรณีสภาพภูมิอากาศแล้งหรือกึ่งแห้งแล้ง (arid/semi-arid climate)

อ่านค่าปรับแก้จากกราฟในภาพที่ 4-9 (a)

- ลมแรง (4 m/s)  $K_{c\text{mid}} = 1.15 + 0.10 = 1.25$
- ลมปานกลาง (2 m/s)  $K_{c\text{mid}} = 1.15 + 0.05 = 1.20$
- ลมสงบ (1 m/s)  $K_{c\text{mid}} = 1.15 + 0.02 = 1.17$

■ กรณีสภาพภูมิอากาศกึ่งชุ่มชื้น (sub-humid climate)

อ่านค่าปรับแก้จากกราฟในภาพที่ 4-9 (b)

- ลมแรง (4 m/s)  $K_{c\text{mid}} = 1.15 + 0.05 = 1.20$
- ลมปานกลาง (2 m/s)  $K_{c\text{mid}} = 1.15 + 0.00 = 1.15$
- ลมสงบ (1 m/s)  $K_{c\text{mid}} = 1.15 - 0.03 = 1.12$

■ กรณีสภาพภูมิอากาศชุ่มชื้นมาก (very humid climate)

อ่านค่าปรับแก้จากกราฟในภาพที่ 4-9 (c)

- ลมแรง (4 m/s)  $K_{c\text{mid}} = 1.15 - 0.05 = 1.10$
- ลมปานกลาง (2 m/s)  $K_{c\text{mid}} = 1.15 - 0.10 = 1.05$
- ลมสงบ (1 m/s)  $K_{c\text{mid}} = 1.15 - 0.13 = 1.02$

จากตัวอย่างการคำนวณค่าปรับแก้โดยอ่านจากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชสำหรับช่วงกลางของการเพาะปลูกแปรผันได้โดยมีค่าน้อยที่สุด (1.02) ในสภาพอากาศชุ่มชื้นและลมสงบ และมีค่ามากที่สุด (1.25) ในสภาพอากาศแห้งและมีลมแรง

### ข.3 การปรับแก้ $K_c$ ที่ระยะสิ้นสุดของการเพาะปลูก

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ระยะสิ้นสุดของการเพาะปลูกที่แนะนำของคู่มือ FAO-56 เป็นค่าสำหรับสภาพภูมิอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด ( $RH_{\min}$ ) เท่ากับ 45% และสภาพลมปานกลาง (2 ม./วินาที) เช่นเดียวกันช่วงกลางของการเพาะปลูก

ในกรณีที่สภาพภูมิอากาศต่างจากสภาพข้างต้น และ สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ระยะสิ้นสุดของการเพาะปลูกที่แนะนำในตาราง มีค่าเกิน 0.45  $K_{c\text{end}(\text{Tab})} > 0.45$  ให้ปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ตามสมการ

$$K_{c\text{end}} = K_{c\text{end}(\text{Tab})} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (4-7)$$

โดยที่

$K_{c\text{end}(\text{Tab})}$  = สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ระยะสิ้นสุดของการเพาะปลูกที่แนะนำในตาราง

$u_2$  = ค่าเฉลี่ยของความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตร ตลอดช่วงปลายของการเพาะปลูก [ $\text{ms}^{-1}$ ] โดยใช้ได้ในช่วง  $1\text{ms}^{-1} \leq u_2 \leq 6\text{ms}^{-1}$

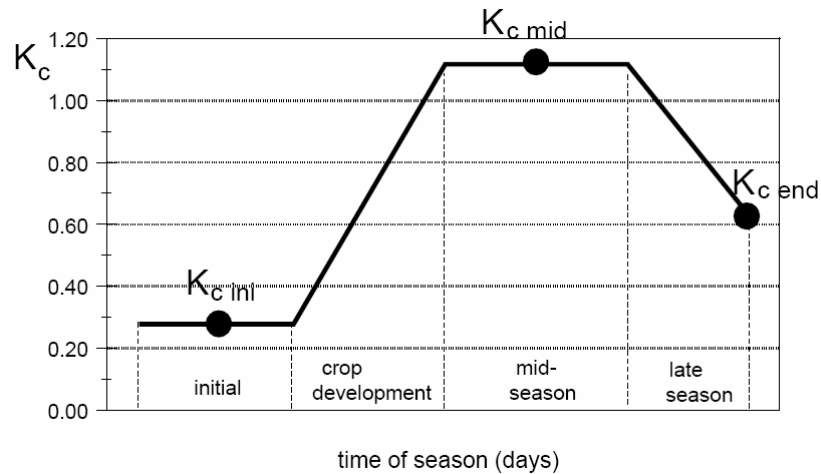
$RH_{\min}$  = ค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด ตลอดช่วงปลายของการเพาะปลูก [%] โดยใช้ได้ในช่วง  $20\% \leq RH_{\min} \leq 80\%$

$h$  = ความสูงเฉลี่ยของต้นพืชตลอดช่วงปลายของการเพาะปลูก [m] โดยใช้ได้ในช่วง  $0.1\text{m} < h < 10\text{m}$

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ระยะสิ้นสุดของการเพาะปลูก คือ สภาพการเก็บเกี่ยวผลผลิต ถ้าเก็บเกี่ยวผลผลิตสดค่า  $K_{c\text{end}}$  จะมีค่าสูง แต่ถ้าเก็บเกี่ยวผลผลิตแห้งโดยปล่อยให้ผลผลิตแห้งในแปลงเพาะปลูกค่า  $K_{c\text{end}}$  จะมีค่าต่ำ ( $K_{c\text{end}} < 0.45$ ) การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นหรือความเร็วลมจะมีผลต่อปริมาณการใช้น้ำของพืชในกรณีที่ปล่อยให้ผลผลิตแห้งในแปลงไม่มากนัก ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องปรับแก้ค่า  $K_{c\text{end}}$  ในกรณีที่  $K_{c\text{end}} < 0.45$

## ค. การสร้างโค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

การสร้างโค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชต้องการทราบข้อมูล ช่วงระยะเวลาของการเจริญเติบโตของพืช 4 ช่วง และ ค่าสัมประสิทธิ์พืช ( $K_c$ ) 3 ค่าซึ่งได้ปรับแก้แล้ว ตามรายละเอียดที่ได้กล่าวในหัวข้อก่อนหน้านี้



ภาพที่ 4-10 โค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

ที่มา: Allen et al., 1998

ในภาพที่ 4-10 แสดงตัวอย่างโค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช โดยแกนนอนเป็นระยยะเวลานับแต่วันเริ่มปลูกพืชมีหน่วยเป็นวัน ส่วนแกนตั้งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) โค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชแบ่งเป็น 4 ส่วนตามช่วงของการเจริญเติบโตของพืช ดังนี้

- ช่วงตั้งตัว (initial stage) มีค่า  $K_c$  คงที่เท่ากับ  $K_{c\ ini}$
- ช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น (crop development stage) มีค่า  $K_c$  ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก  $K_{c\ ini}$  จนถึงค่าสูงสุดเท่ากับ  $K_{c\ mid}$  เมื่อสิ้นสุดช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น

- ช่วงกลางของการเพาะปลูก (mid-season stage) มีค่า  $K_c$  คงที่ เท่ากับ  $K_{c\text{mid}}$
- ช่วงปลายของการเพาะปลูก (late season stage) มีค่า  $K_c$  ค่อย ๆ ลดลง จาก  $K_{c\text{mid}}$  ลงมาจน เท่ากับ  $K_{c\text{end}}$  เมื่อสิ้นสุดสิ้นสุดการเพาะปลูก

การหาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่เวลาใด ๆ สามารถอ่านได้จากกราฟ หรือ อาจคำนวณได้ตามสมการ

$$K_{ci} = K_{c\text{prev}} + \left[ \frac{i - \sum(L_{\text{prev}})}{L_{\text{stage}}} \right] (K_{c\text{next}} - K_{c\text{prev}}) \quad (4-8)$$

โดยที่

$i$  = จำนวนวันนับจากวันเริ่มปลูก [ days ]

$K_{ci}$  = สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชของวันที่  $i$

$L_{\text{stage}}$  = ความยาวนานของระยะ [ days ]

$\sum(L_{\text{prev}})$  = ผลรวมของความยาวนานของระยะ [ days ]

#### ง. การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืช ( $ET_c$ )

ปริมาณการใช้น้ำของพืช ( $ET_c$ ) หาจากผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชกับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงตามสมการ

$$ET_c = K_c ET_o \quad (4-9)$$

โดยที่

$ET_c$  = การใช้น้ำของพืชในสภาพมาตรฐาน [ mm day<sup>-1</sup> ]

$K_c$  = สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช [-]

$ET_o$  = การใช้น้ำของพืชอ้างอิง [ mm day<sup>-1</sup> ]

#### ตัวอย่างที่ 4-2 การหาปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพด

จงหาปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพด ที่เริ่มปลูกในวันที่ 15 ตุลาคม ในแปลงเพาะปลูกที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วน โดยกำหนดข้อมูลให้ดังต่อไปนี้

- ค่าเฉลี่ยรายเดือนข้อมูลอุณหภูมิตามวิทยาและปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงดังตารางที่ 4-4
- ระยะเวลาของแต่ละช่วงของการเจริญเติบโตดังตารางที่ 4-5
- สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพดดังตารางที่ 4-6

**ตารางที่ 4-4 ข้อมูลอุณหภูมิตามวิทยาและปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง**

เดือน	หน่วย	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
RHmean	%	76	77	72	67	62	60	55	50	45	48	63	73
Wind (U <sub>2</sub> )	m/s	2.2	2.2	2.3	2.3	2.2	2.3	2.5	2.8	3.2	3.3	2.7	2.4
ET <sub>o</sub>	mm/day	4.3	4.1	4.2	3.9	3.3	2.9	3.2	4.2	5.5	6.2	4.9	4.3

**ตารางที่ 4-5 ระยะเวลาของแต่ละช่วงของการเจริญเติบโต (วัน)**

	Lini	Ldev	Lmid	Llate	Total
ข้าวโพด	20	45	50	40	155

**ตารางที่ 4-6 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพด**

	Kc ini	Kc mid	Kc end
ข้าวโพด	0.30	1.20	0.35

ขั้นแรกเป็นการกำหนดช่วงการเจริญเติบโตของพืชและกำหนดระยะเวลาของแต่ละช่วง จากข้อมูลที่กำหนดให้ ช่วงของการเจริญเติบโตของพืชมี 4 ช่วง ประกอบด้วย

- ช่วงตั้งตัว ( $L_{ini}$ ) = 20 วัน
- ช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น ( $L_{dev}$ ) = 45 วัน
- ช่วงกลางของการเพาะปลูก ( $L_{mid}$ ) = 50 วัน
- ช่วงปลายของการเพาะปลูก ( $L_{late}$ ) = 40 วัน

ขั้นที่สองเป็นการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชและปรับแก้ จากข้อมูลที่กำหนดให้

- สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงตั้งตัว ( $K_{cini}$ ) = 0.30
- สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงกลางของการเพาะปลูก ( $K_{cmid}$ ) = 1.20
- สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ระยะสิ้นสุดการเพาะปลูก ( $K_{cend}$ ) = 0.35

จากนั้น พิจารณาการปรับแก้ เนื่องจากค่าที่แนะนำเป็นค่าสำหรับสภาพภูมิอากาศปานกลาง

- ในช่วงตั้งตัวของพืชจำเป็นต้องให้น้ำชลประทาน ในกรณีนี้ สมมติให้น้ำสัปดาห์ละครั้ง เนื่องจาก ปริมาณการใช้น้ำอ้างอิงในช่วงตั้งตัวของพืช (เดือนตุลาคม) สูงถึง 6.2 มม./วัน การให้น้ำต่อครั้งต้องมากกว่า 40 มม. เมื่อดินเป็นดินร่วนจึงอ่านค่าจากกราฟในภาพที่ 4-8 (b) ที่  $ET_o$  6.2 mm/day อ่านค่าจากกราฟเส้น 7 day จะได้ค่า  $K_{cini}$  เท่ากับ 0.59
- ในช่วงกลางของการเพาะปลูก (ประมาณเดือนมกราคม) จากข้อมูลอุตุนิยมหาวิทยาลัยในเดือนมกราคม ความชื้นสัมพัทธ์ = 76% ความเร็วลม = 2.2 m/s ซึ่งเป็นสภาพอากาศใกล้เคียงกับสภาพปานกลาง จึงไม่ต้องปรับแก้ ใช้ค่า  $K_{cmid} = 1.20$
- ระยะสิ้นสุดการเพาะปลูก เนื่องจากข้าวโพดในกรณีเป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ซึ่งเก็บเกี่ยวฝักแห้ง  $K_{cend}$  มีค่าน้อยกว่า 0.45 ดังนั้นจึงไม่ต้องปรับแก้ ใช้  $K_{cend} = 0.35$

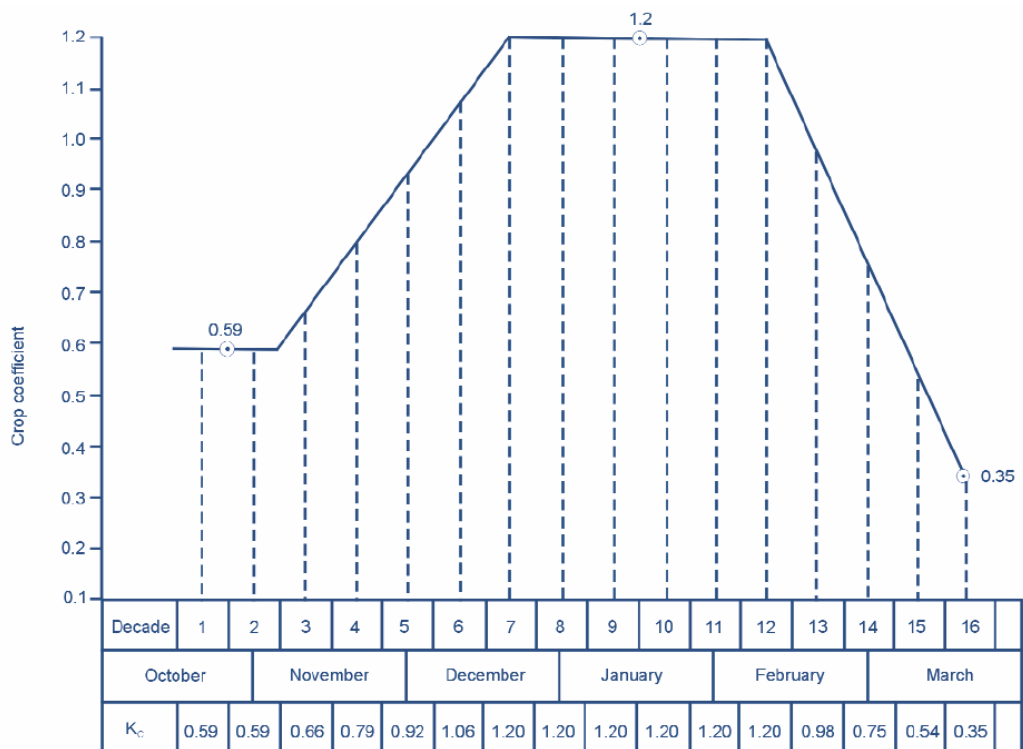
ขั้นตอนต่อไป จึงนำค่าที่ปรับแก้แล้วไปสร้างเป็นโค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช



ขั้นที่สามเป็นการสร้างโค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

ในภาพที่ 4-11 เป็นโค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพดที่เริ่มปลูก วันที่ 15 ตุลาคม

- ช่วงตั้งตัว (initial stage) มีค่า  $K_{cini} = 0.59$  คงที่ตลอดระยะ 20 วัน
- ช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น (crop development stage) ค่า  $K_c$  ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 0.59 จนถึงค่าสูงสุด เท่ากับ 1.2 เมื่อสิ้นสุดช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น ระยะ 45 วัน
- ช่วงกลางของการเพาะปลูก (mid-season stage) มีค่า  $K_{cmid} = 1.2$  คงที่ตลอดระยะ 50 วัน
- ช่วงปลายของการเพาะปลูก (late season stage) มีค่า  $K_c$  ลดลงจาก 1.2 จนมีค่าเท่ากับ  $K_{cend} = 0.35$  เมื่อสิ้นสุดสิ้นสุดการเพาะปลูก ในช่วงกลางเดือนมีนาคม



ภาพที่ 4-11 โค้งสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพด

ที่มา: Savva and Frenken, 2002

ขั้นที่สี่คำนวณหา  $ET_c$  จากผลคูณของ  $ET_o$  และ  $K_c$

ในตารางที่ 4-7 แสดงการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดเป็นราย 10 วัน

- คอลัมน์ที่ 1 เป็นคาบ 10 วันนับจากวันที่ 15 ตุลาคม
- คอลัมน์ที่ 2 เป็นเดือน
- คอลัมน์ที่ 3 เป็นค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ในกรณีที่คาบ 10 วันคร่อมระหว่างเดือน ให้ใช้ค่าเฉลี่ย
- คอลัมน์ที่ 4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช อ่านค่าตรงกลางของแต่ละคาบสิบวันจากกราฟในภาพที่ 4-11
- คอลัมน์ที่ 5 เป็นปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวันหาจากผลคูณของ  $ET_o$  ในคอลัมน์ที่ 3 และ  $K_c$  ในคอลัมน์ที่ 4
- คอลัมน์ที่ 6 เป็นปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อสิบวัน ซึ่งปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดตลอดฤดูกาลเพาะปลูกเท่ากับ 638.5 มิลลิเมตร

**ตารางที่ 4-7 การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดเป็นราย 10 วัน**

ลำดับวัน	เดือน	ET <sub>o</sub> (mm/day)	K <sub>c</sub>	ET <sub>c</sub> (mm/day)	ET <sub>c</sub> (mm/dec)
1	Oct	6.2	0.59	3.66	36.6
2	Oct/Nov	5.6	0.59	3.30	33.0
3	Nov	4.9	0.66	3.23	32.3
4	Nov	4.6	0.79	3.63	36.3
5	Nov/Dec	4.3	0.92	3.96	39.6
6	Dec	4.3	1.06	4.56	45.6
7	Dec	4.3	1.20	5.16	51.6
8	Dec/Jan	4.3	1.20	5.16	51.6
9	Jan	4.3	1.20	5.16	51.6
10	Jan	4.3	1.20	5.16	51.6
11	Jan/Feb	4.2	1.20	5.04	50.4
12	Feb	4.1	1.20	4.92	49.2
13	Feb	4.1	0.98	4.02	40.2
14	Feb/Mar	4.2	0.75	3.15	31.5
15	Mar	4.2	0.54	2.27	22.7
16	Mar	4.2	0.35	1.47	14.7
				รวม	638.5

### 4.3 แบบฝึกหัด

1. การเจริญเติบโตของพืชอาจแบ่งได้เป็นกี่ช่วง อะไรบ้าง

**ตารางที่ 4-8 ค่าเฉลี่ยของข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่ จ.กาญจนบุรี**

เดือน	Tmax (°C)	Tmin (°C)	RHmean (%)	Wind (m/s)	Sunshine (hours)	Radiation (MJ/m <sup>2</sup> /day)	ETo (mm/day)
ม.ค.	32.3	18.2	62.6	1.1	8.44	18.82	3.71
ก.พ.	35.1	20.9	60.1	1.3	8.19	20.07	4.42
มี.ค.	37.3	23.2	56.8	1.5	8.47	21.95	5.30
เม.ย.	38.1	25.2	59.0	1.6	8.05	21.94	5.62
พ.ค.	35.5	25.2	69.8	1.6	6.87	20.00	4.90
มิ.ย.	33.7	24.8	72.2	1.6	5.76	18.10	4.39
ก.ค.	33.3	24.4	71.6	1.7	5.52	17.77	4.34
ส.ค.	33.1	24.4	72.7	1.7	5.21	17.40	4.23
ก.ย.	32.8	24.0	76.8	1.3	5.37	17.34	3.92
ต.ค.	31.7	23.2	79.0	1.0	6.50	17.99	3.79
พ.ย.	30.7	21.3	73.8	1.3	7.40	17.79	3.70
ธ.ค.	30.6	18.3	66.3	1.4	7.99	17.66	3.60

2. จงประมาณค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด (RHmin) ของแต่ละเดือน จากข้อมูล อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดที่ จ. กาญจนบุรี
3. จากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่ จ. กาญจนบุรี  
จงหาปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดหวาน (ให้คำนวณเป็นรายสิบวัน)  
โดยกำหนดให้เริ่มปลูกข้าวโพดหวานในวันที่ 1 สิงหาคม ดินเป็นดินร่วน

**ตารางที่ 4-9 ความยาวนานของระยะการเจริญเติบโต (วัน)**

	Lini	Ldev	Lmid	Llate	Total
ข้าวโพดหวาน	20	20	30	10	80

**ตารางที่ 4-10 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพดหวาน**

	Kc ini	Kc mid	Kc end
ข้าวโพดหวาน	0.30	1.15	1.05

4. ถ้าการปลูกข้าวโพดฝักอ่อนใช้ข้าวโพดพันธุ์เดียวกับข้าวโพดหวาน แต่มีการเก็บฝักอ่อนที่อายุ 60 วัน จงคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดฝักอ่อนที่เริ่มปลูกในวันที่ 1 ธันวาคม



## ส่วนที่ 3

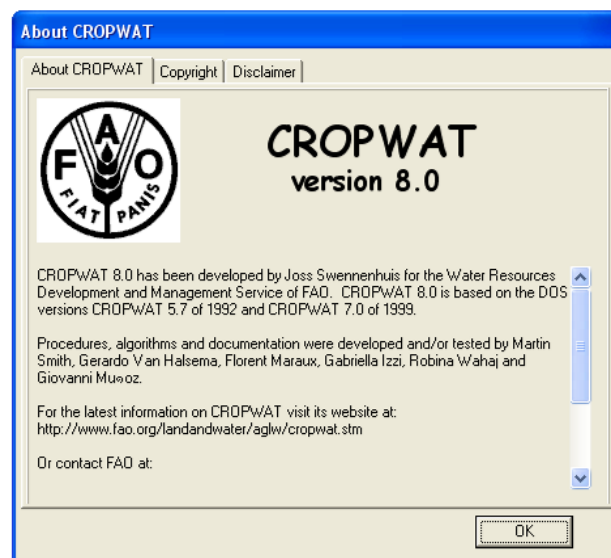
### การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช

โดยแบบจำลองคอมพิวเตอร์





## 5. การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ด้วยโปรแกรม CROPWAT



CROPWAT 8.0 for Windows เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชและความต้องการน้ำชลประทานโดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศและพืช ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่มาพร้อมกับโปรแกรมโดยปริยายหรือเป็นข้อมูลที่ป้อนเข้าไปใหม่ นอกจากนี้ โปรแกรมยังสามารถจัดทำกำหนดการให้น้ำชลประทานสำหรับพืชที่มีแบบแผนการเพาะปลูกต่าง ๆ กัน

CROPWAT 8.0 เป็นเวอร์ชันที่พัฒนาจาก CROPWAT 5.7 (1992) และ CROPWAT 7.0 (1999) โดยได้ทำการออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (user interface) ขึ้นใหม่ รวมทั้ง ได้ปรับปรุงและเพิ่มเติมลักษณะการทำงานอีกหลายส่วน ประกอบด้วย

- การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงจากข้อมูลทั้งรายเดือน รายสัปดาห์ และรายวัน
- มีความเข้ากันได้กับเวอร์ชันก่อนหน้า ซึ่งทำให้สามารถใช้ฐานข้อมูล CLIMWAT ได้
- สามารถประมาณค่าข้อมูลภูมิอากาศที่ขาดหายได้
- การคำนวณค่าปริมาณความต้องการน้ำของพืชรายวันและรายสัปดาห์ มีกระบวนการคำนวณปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช
- สามารถคำนวณความต้องการน้ำของพืชและกำหนดการให้น้ำสำหรับพืชไร่ และสำหรับข้าวนาสวนและข้าวไร่
- สามารถทำงานแบบโต้ตอบกับผู้ใช้ในการปรับแก้กำหนดการให้น้ำ
- ให้ตารางผลลัพธ์ของสมดุลของน้ำในดินเป็นรายวัน
- จัดเก็บและเรียกใช้ในแต่ละช่วงการทำงานหรือกำหนดการให้น้ำที่ผู้ใช้กำหนดขึ้น ได้อย่างง่ายดาย
- นำเสนอข้อมูลเป็นกราฟ ทั้งข้อมูลนำเข้า ผลการคำนวณความต้องการน้ำของพืชและกำหนดการให้น้ำ
- การนำเข้าข้อมูลหรือส่งออกทำได้อย่างง่ายดายผ่าน clipboard หรือ ASCII text files
- เพิ่มความสามารถส่วนของการพิมพ์ผลลัพธ์ ซึ่งทำงานกับเครื่องพิมพ์ในระบบวินโดวส์ได้เป็นอย่างดี
- ระบบให้ข้อมูลช่วยการทำงาน

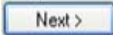
กระบวนการคำนวณค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชใน CROPWAT 8.0 ใช้ตามคู่มือของ FAO-56 "Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements" (Allen et al., 1998)

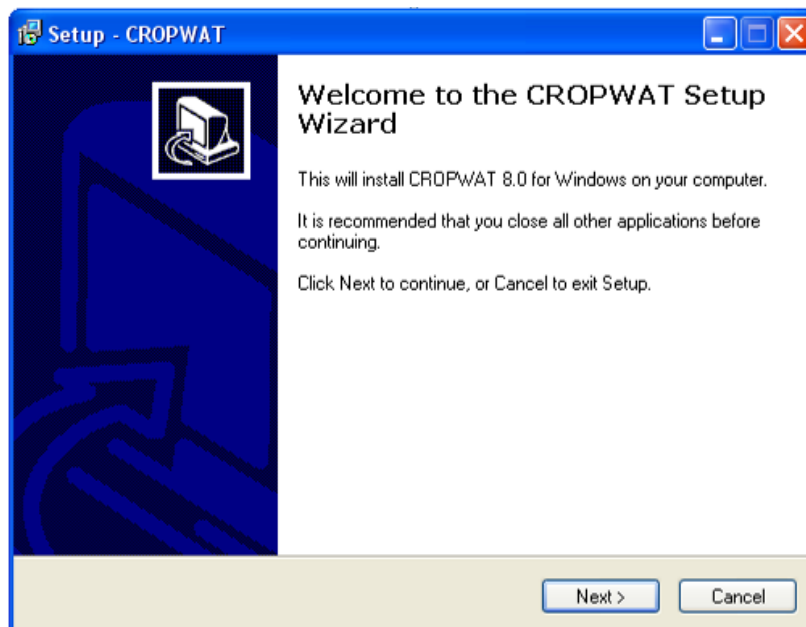
## 5.1 การติดตั้งโปรแกรม

เนื้อหาส่วนนี้เป็น การอธิบายขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรม CROPWAT 8.0 for Windows และโปรแกรม CLIMWAT ซึ่งจัดเก็บข้อมูลที่ต้องใช้สำหรับคำนวณความต้องการน้ำของพืช

### ก. การติดตั้ง Cropwat

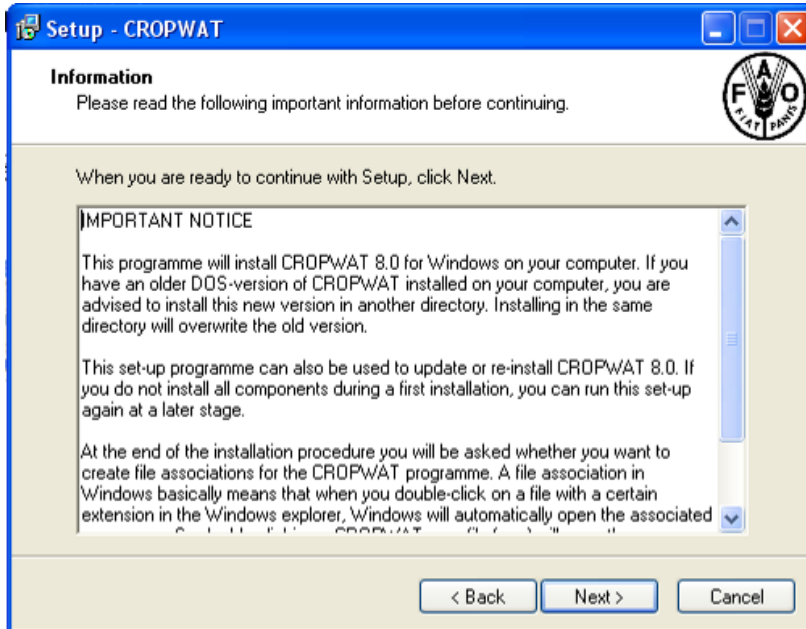
---

การติดตั้ง Cropwat ทำโดย run โปรแกรม cropwat80setup.exe จากนั้นจะมี dialog ปรากฏตามลำดับ จำนวน 8 dialogs ซึ่งสามารถกดปุ่ม  เพื่อทำงานในหน้าจอต่อไปได้ โดยการติดตั้งสามารถใช้ค่า default ที่โปรแกรมติดตั้งกำหนดให้ได้ ยกเว้น หน้าจอที่ห้าซึ่งเป็นการระบุตำแหน่งที่ติดตั้งของข้อมูล ซึ่งโปรแกรมติดตั้งจะเว้นว่างไว้ผู้ใช้ต้องระบุเอง เช่น C:\CROPWAT Data หากไม่ได้ระบุโปรแกรมจะไปสร้าง folder ข้อมูลจำนวน 6 folders ที่ C:\



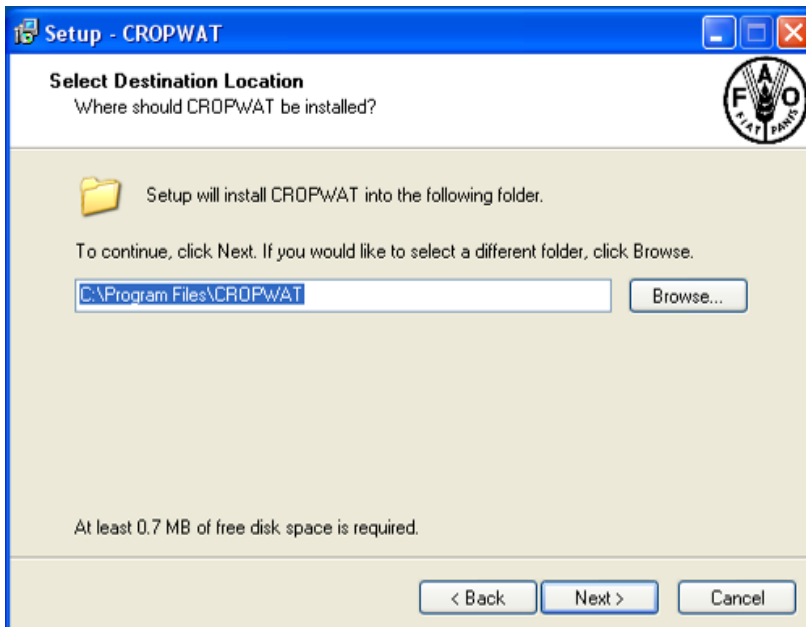
1. หน้าจอแรกในการติดตั้ง Cropwat

กดปุ่ม 



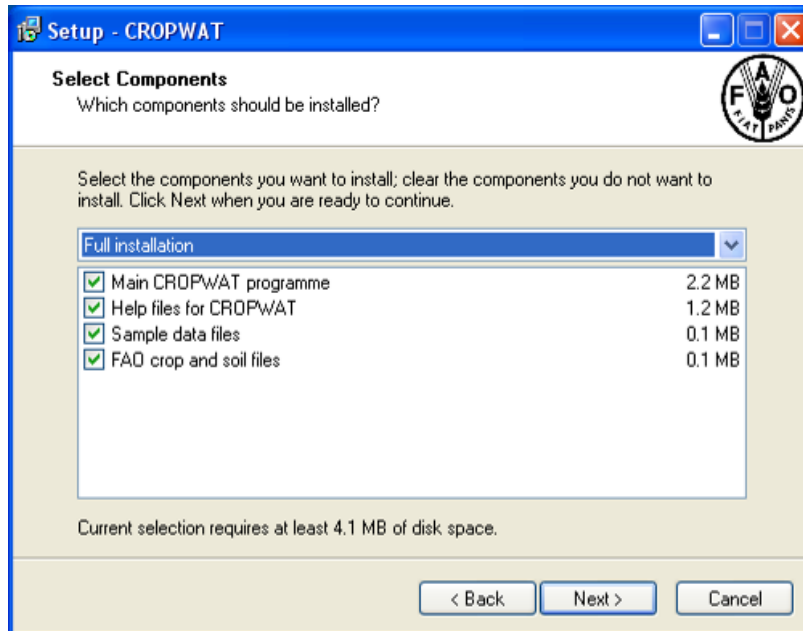
2. หน้าจอที่สอง เป็นคำอธิบาย

กดปุ่ม



3. หน้าจอที่สาม เป็นการระบุตำแหน่งที่ติดตั้งโปรแกรม

กดปุ่ม

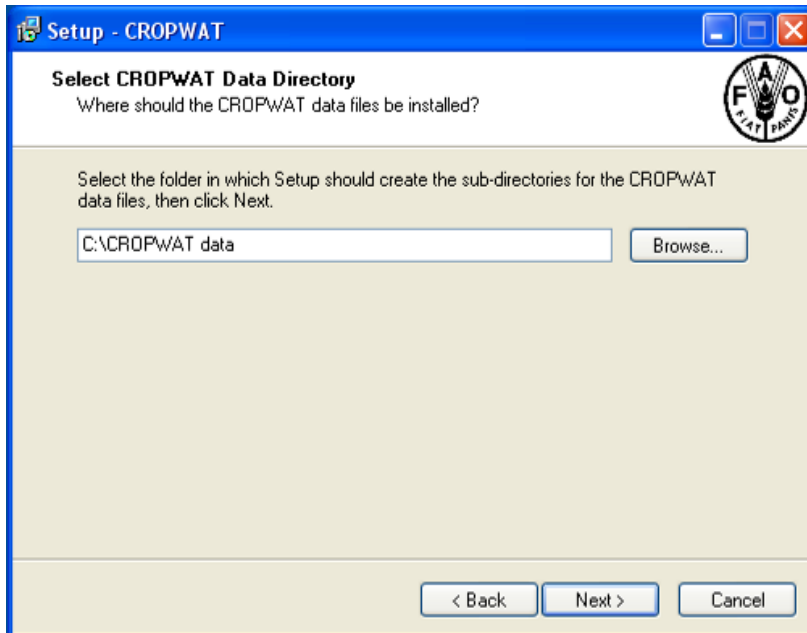


4. หน้าจอที่สี่ เป็นการระบุองค์ประกอบของโปรแกรมที่ต้องการติดตั้ง

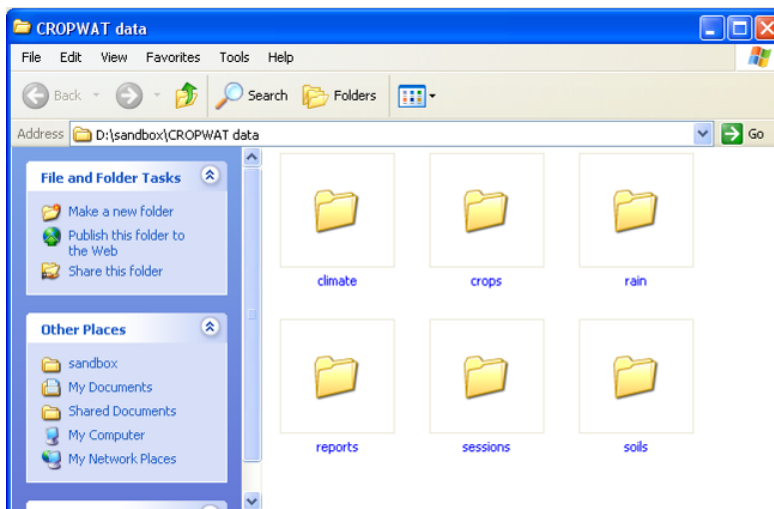
ให้เลือก  หน้าข้อที่ต้องการติดตั้ง


เนื่องจาก โปรแกรมมีขนาดเล็กใช้เนื้อที่ไม่มากจึงสามารถเลือกติดตั้งทั้งหมดได้

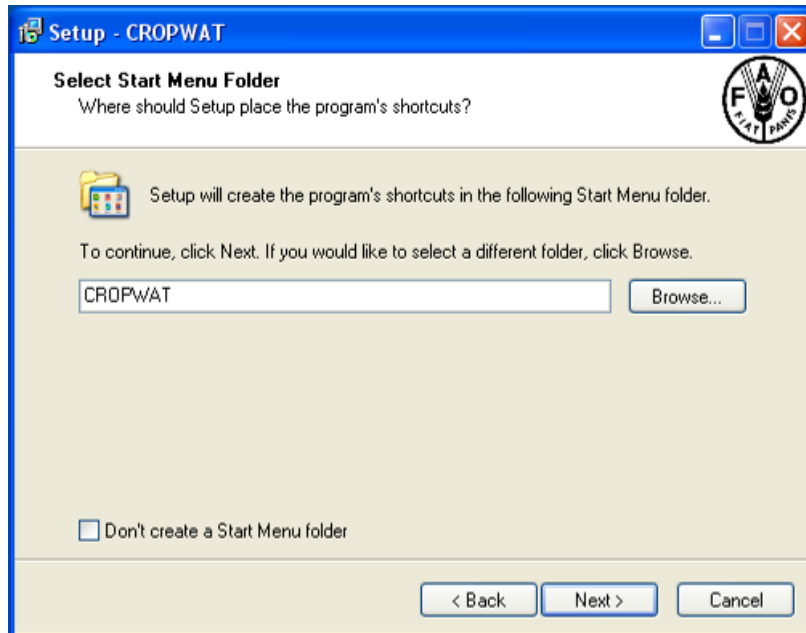
กดปุ่ม



5. หน้าจอที่ห้า เป็นการระบุตำแหน่งที่ตั้งของข้อมูลจำนวน 6 folders



หากเว้นว่างไว้ไม่ได้ระบุ โปรแกรมจะทำการสร้าง folder ที่ C:\  
เมื่อ ระบุตำแหน่งที่ตั้งของข้อมูล จึงกดปุ่ม 

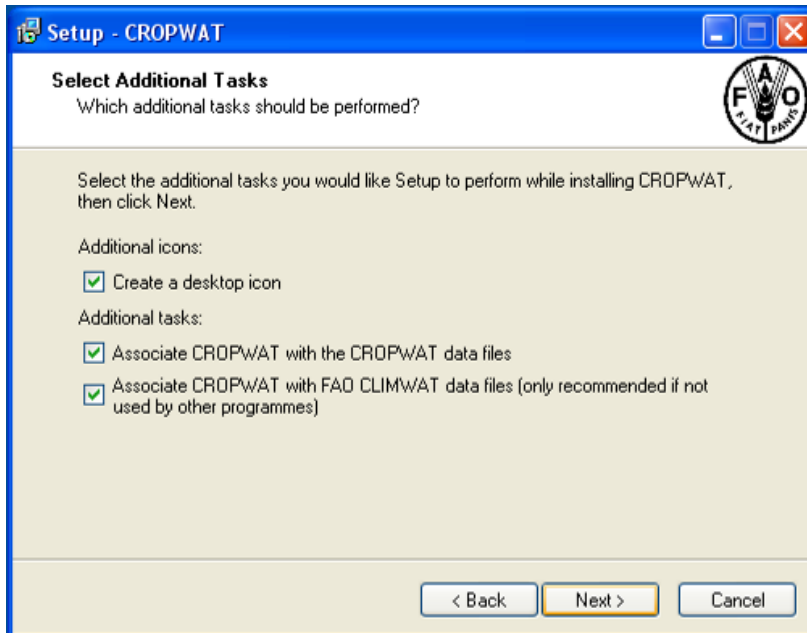


6. หน้าจอที่หก เป็นการระบุชื่อที่จะสร้างใน Start Menu

หากไม่ต้องการให้ โปรแกรมสร้างสร้างที่ Start Menu ให้เลือก

ที่  Don't create a Start Menu folder

กดปุ่ม

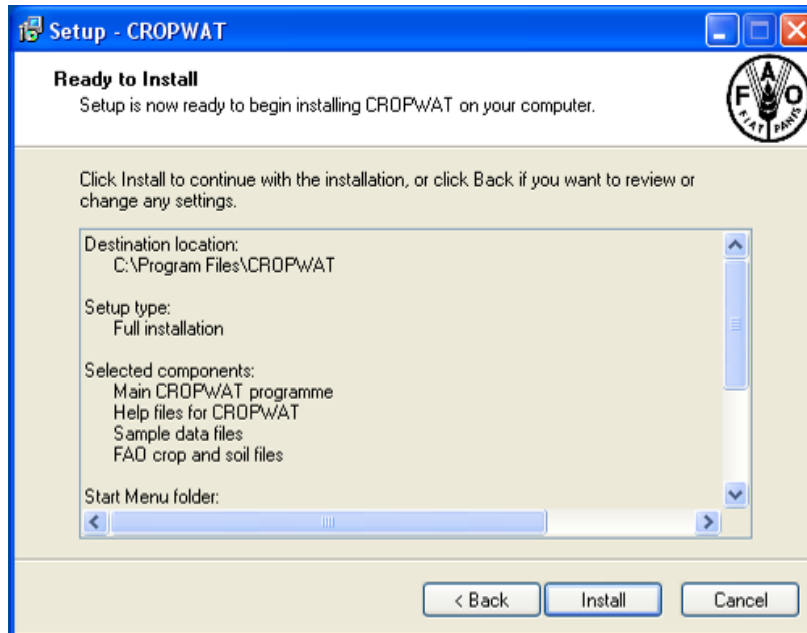


7. หน้าจอที่เจ็ด เป็นการระบุว่า จะสร้าง icon ที่ desktop และเชื่อมโยง โปรแกรมเข้ากับชนิดของแฟ้มข้อมูล

ให้เลือก  หน้าข้อที่ต้องการ  
สามารถเลือกทำทั้งหมดได้

กดปุ่ม

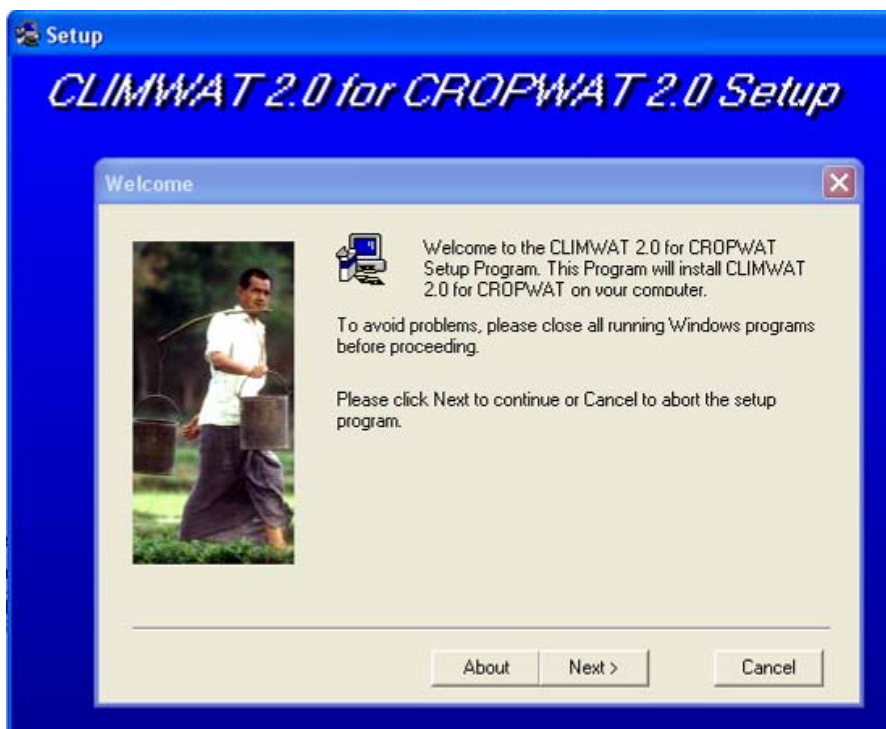




8. หน้าจอที่แปด เป็นการเสร็จสิ้นการกำหนดเงื่อนไขของการติดตั้ง  
 เพื่อทำการติดตั้งโปรแกรม

## ข. การติดตั้ง CLIMWAT

---



1. หน้าจอแรกในการติดตั้ง CLIMWAT

กดปุ่ม



2. หน้าจอที่สอง เป็นการระบุตำแหน่งที่ติดตั้ง โปรแกรม

กดปุ่ม

โปรแกรมให้ยืนยันการสร้าง directory





3. หน้าจอที่สาม เป็นการระบุชื่อที่จะสร้างใน Start Menu กดปุ่ม



4. หน้าจอที่สี่ เป็นการเสร็จสิ้นการกำหนดเงื่อนไขของการติดตั้ง จากนั้นกดปุ่ม  เพื่อทำการติดตั้งโปรแกรม

## 5.2 การเตรียมข้อมูลจาก CLIMWAT

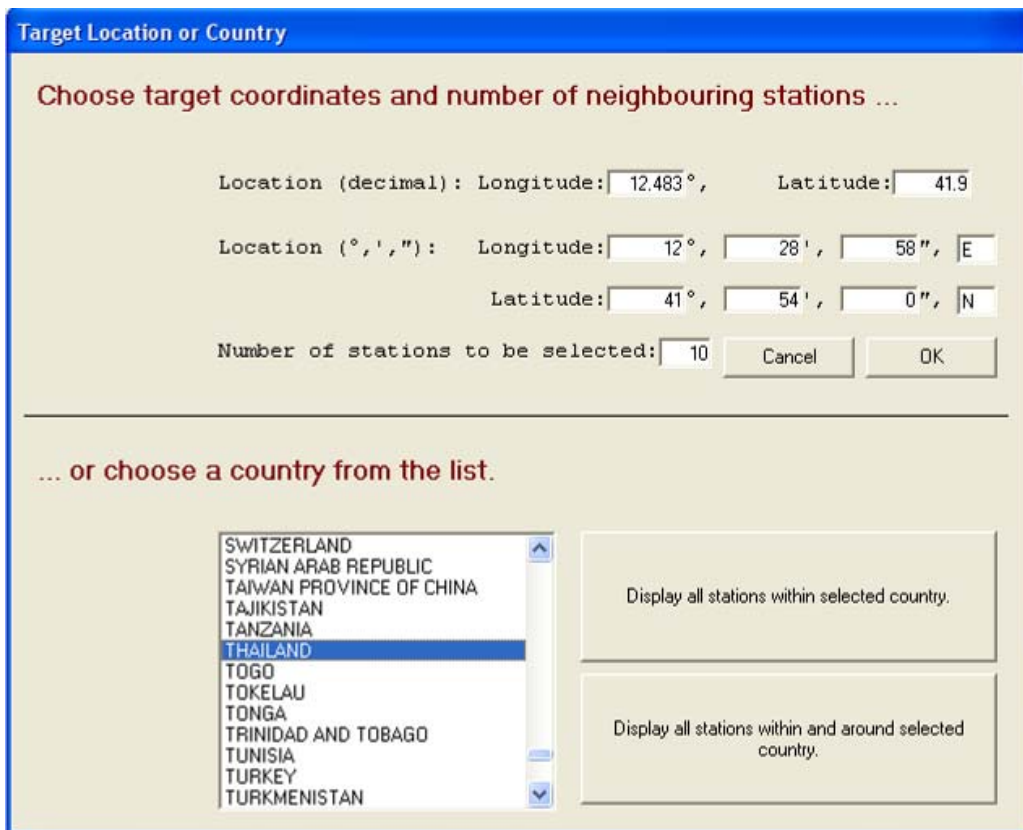
CLIMWAT 2.0 for CROPWAT 8.0 เป็นโปรแกรมจัดการข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาของสถานีตรวจวัดมากกว่า 5000 แห่งทั่วโลก โปรแกรม CLIMWAT 2.0 นี้มีสองรุ่น โดยรุ่นแรกเป็นฐานข้อมูลของสถานีทั่วโลก ส่วนรุ่นที่สองแบ่งข้อมูลตามทวีป ทั้งสองรุ่นสามารถดาวน์โหลดได้จาก

[http://www.fao.org/nr/water/infores\\_databases\\_climwat.html](http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html)

ข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูล CLIMWAT ประกอบด้วยข้อมูลเฉลี่ยรายเดือนของพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยา จำนวน 7 ตัว ดังนี้

- อุณหภูมิสูงสุดประจำวันเฉลี่ย (mean daily maximum temperature) หน่วยเป็น °C
- อุณหภูมิต่ำสุดประจำวันเฉลี่ย (mean daily minimum temperature) หน่วยเป็น °C
- ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (mean relative humidity) หน่วยเป็น %
- ความเร็วลมเฉลี่ย (mean wind speed) หน่วยเป็น km/day
- จำนวนชั่วโมงแสงอาทิตย์เฉลี่ย (mean sunshine) หน่วยเป็น hours per day
- พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย (mean solar radiation) หน่วยเป็น MJ/m<sup>2</sup>/day
- ปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ย (monthly rainfall) หน่วยเป็น mm/month
- ปริมาณฝนใช้การได้รายเดือนเฉลี่ย (monthly effective rainfall) หน่วยเป็น mm/month
- ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (reference evapotranspiration) กำหนดตามสมการ Penman-Monteith หน่วยเป็น mm/day

ในการคัดแยกข้อมูลจากฐานข้อมูล CLIMWAT สามารถเลือกทีละสถานีหรือหลายสถานีพร้อมกันก็ได้ ซึ่งข้อมูลที่คัดแยกออกมาจะมีรูปแบบสอดคล้องกับการใช้งานร่วมกับ CROPWAT 8.0

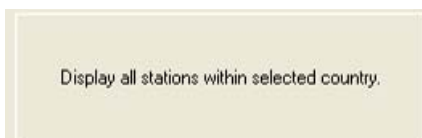


ภาพที่ 5-1 หน้าจอแรกเมื่อเริ่มใช้งาน CLIMWAT

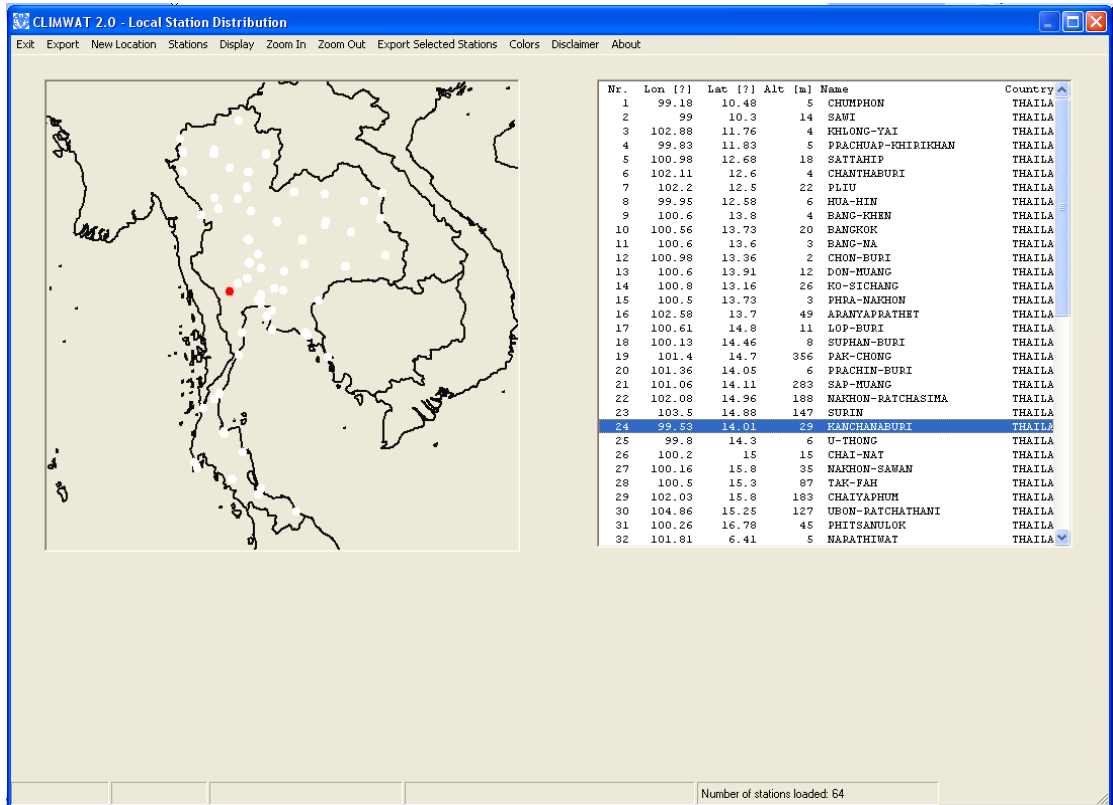
หน้าจอแรกเมื่อเริ่มต้นใช้งานจะเป็นการให้เลือกพื้นที่

- ซึ่งสามารถเลือกเป็นตำแหน่ง ซึ่งต้องกรอกค่าพิกัดละติจูด-ลองจิจูด โดยอาจเลือกกรอกเป็น ระบบ decimal คือ เป็นองศาแล้วตามด้วยทศนิยม หรือ เป็น องศา, ลิปดา, ฟลิปดา
- หรือ เลือกเป็นประเทศก็ได้ ในกรณีนี้เลือก THAILAND

จากนั้น เลือก



เป็นการเลือกสถานีเฉพาะที่อยู่ในประเทศไทย



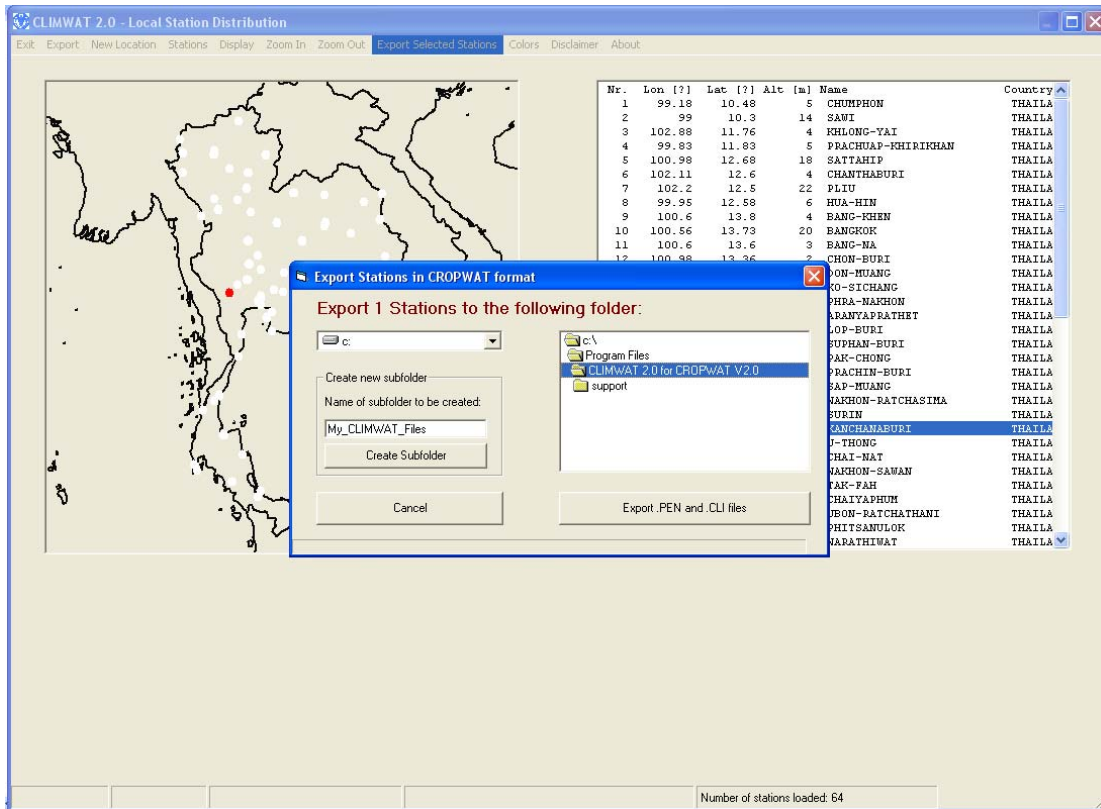
ภาพที่ 5-2 หน้าจอที่สองหลังจากเลือก THAILAND

หน้าจอที่สองแสดงหลังจากเลือกประเทศไทยจากหน้าจอแรก จากนั้น ทำการเลือกสถานีที่ต้องการ โดยจะเลือกเพียงสถานีเดียวหรือหลายสถานีพร้อมกันก็ได้ กรณีนี้ให้เลือก KANCHANABURI จะสังเกตเห็นได้ว่าสถานีที่ถูกเลือกจะแสดงผลเป็นสีแดง ส่วนสถานีที่ไม่ถูกเลือกจะเป็นสีขาว

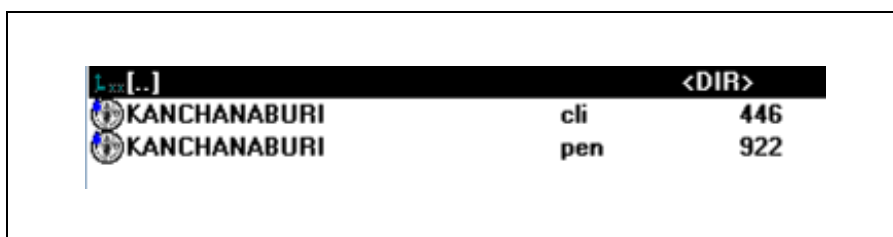
จากนั้นทำการคัดแยกข้อมูลออกมาโดยเลือกจาก MENU

Export Selected Stations

จะปรากฏหน้าจอแสดงผลให้ระบุที่จัดเก็บข้อมูลที่คัดแยกจากฐานข้อมูล



ภาพที่ 5-3 หน้าจอแสดงผลลัพธ์ระบุที่จัดเก็บข้อมูลที่คัดแยกจากฐานข้อมูล



ภาพที่ 5-4 แฟ้มข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นจากการคัดแยกข้อมูล

ในขั้นตอนคัดแยกข้อมูลจะมีการสร้างแฟ้มข้อมูลจำนวน 2 แฟ้ม เป็นแฟ้มชนิด “.cli” และ “.pen”



"KANCHANABURI", "", " 4", 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0		
3.71	5.00	4.96
4.42	14.00	13.69
5.30	28.00	26.75
5.62	75.00	66.00
4.90	153.00	115.55
4.39	82.00	71.24
4.34	95.00	80.56
4.23	102.00	85.35
3.92	219.00	142.26
3.79	198.00	135.27
3.70	70.00	62.16
3.60	9.00	8.87

ภาพที่ 5-5 ข้อมูลในไฟล์ KANCHANABURI.cli

เพิ่มข้อมูลชนิด “.cli” จัดเก็บข้อมูลฝน ในบรรทัดแรกเป็นข้อมูลของสถานีตรวจวัด บรรทัดถัดมาอีก 12 บรรทัดเป็นข้อมูลรายเดือน เริ่มจากมกราคม จนถึงธันวาคม ในแต่ละบรรทัดจะมี 3 คอลัมน์ ดังนี้

- คอลัมน์ที่ 1 เป็นข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง หน่วยเป็น mm/day
- คอลัมน์ที่ 2 เป็นข้อมูลปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ย (monthly rainfall) หน่วยเป็น mm/month
- คอลัมน์ที่ 3 เป็นข้อมูลปริมาณฝนใช้การรายเดือนเฉลี่ย (monthly effective rainfall) คำนวณจากสมการของ USDA Soil Conservation Service มีหน่วยเป็น mm/month

"Location 24","KANCHANABURI",29,14.01,"N.L.",99.53," 01"

32.3	18.2	62.6	95.0	8.44	18.82	3.71
35.1	20.9	60.1	112.3	8.19	20.07	4.42
37.3	23.2	56.8	129.6	8.47	21.95	5.30
38.1	25.2	59.0	138.2	8.05	21.94	5.62
35.5	25.2	69.8	138.2	6.87	20.00	4.90
33.7	24.8	72.2	138.2	5.76	18.10	4.39
33.3	24.4	71.6	146.9	5.52	17.77	4.34
33.1	24.4	72.7	146.9	5.21	17.40	4.23
32.8	24.0	76.8	112.3	5.37	17.34	3.92
31.7	23.2	79.0	86.4	6.50	17.99	3.79
30.7	21.3	73.8	112.3	7.40	17.79	3.70
30.6	18.3	66.3	121.0	7.99	17.66	3.60

#### ภาพที่ 5-6 ข้อมูลในไฟล์ KANCHANABURI.pen

แฟ้มข้อมูลชนิด “.pen” จัดเก็บข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ในบรรทัดแรกเป็นข้อมูลของ สถานีตรวจวัด บรรทัดถัดมา 12 บรรทัดเป็นข้อมูลรายเดือน เริ่มจากมกราคม จนถึง ธันวาคม ในแต่ละบรรทัดจะมี 7 คอลัมน์ ดังนี้

- คอลัมน์ที่ 1 เป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุดประจำวัน (mean daily maximum temperature) หน่วยเป็น °C
- คอลัมน์ที่ 2 เป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิต่ำสุดประจำวัน (mean daily minimum temperature) หน่วยเป็น °C
- คอลัมน์ที่ 3 เป็นค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์ (mean relative humidity) หน่วยเป็น %
- คอลัมน์ที่ 4 เป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วลม (mean wind speed) หน่วยเป็น km/day
- คอลัมน์ที่ 5 เป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนชั่วโมงแสงอาทิตย์ (mean sunshine) หน่วยเป็น hours per day
- คอลัมน์ที่ 6 เป็นค่าเฉลี่ยของพลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย (mean solar radiation) หน่วยเป็น MJ/m<sup>2</sup>/day

- คอลัมน์ที่ 7 เป็นค่าเฉลี่ยของปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงคำนวณตามสมการ Penman-Monteith หน่วยเป็น mm/day

### 5.3 การใช้งานโปรแกรม CROPWAT



ภาพที่ 5-7 หน้าจอแรกเมื่อเริ่มใช้งาน CROPWAT

## ก. ข้อมูล Climate/ETo

### ก.1 การใส่ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา



การทำงานกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเริ่มต้น โดยเลือก ทางด้านซ้ายของจอภาพ โปรแกรมจะแสดงหน้าจอข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเป็นรายเดือน ซึ่งผู้ใช้สามารถกรอกข้อมูลได้

Month	Min Temp ?C	Max Temp ?C	Humidity %	Wind km/day	Sunshine hours	Radiation MJ/m <sup>2</sup> /day	ETo mm/day
January							
February							
March							
April							
May							
June							
July							
August							
September							
October							
November							
December							
Average							

ภาพที่ 5-8 หน้าจอข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเป็นรายเดือน

CROPWAT - Session: untitled

File Edit Calculations Charts Settings Window Help

New Open Save Close Print Chart Options


Monthly ETo Penman-Monteith - D:\sandbox\CLIMWAT data\KANCHANABURI.pen

Country Location 24 Station KANCHANABURI

Altitude 29 m. Latitude 14.01 °N Longitude 99.53 °E

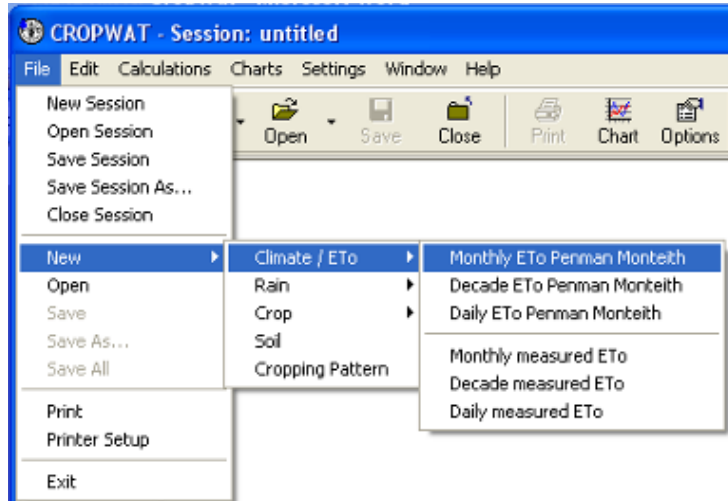
Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind km/day	Sunshine hours	Radiation MJ/m <sup>2</sup> /day	ETo mm/day
January	18.2	32.3	63	95	8.4	18.8	3.70
February	20.9	35.1	60	112	8.2	19.9	4.41
March	23.2	37.3	57	130	8.5	21.9	5.31
April	25.2	38.1	59	138	8.1	21.9	5.67
May	25.2	35.5	70	138	6.9	20.0	4.99
June	24.8	33.7	72	138	5.8	18.1	4.46
July	24.4	33.3	72	147	5.5	17.8	4.40
August	24.4	33.1	73	147	5.2	17.4	4.29
September	24.0	32.8	77	112	5.4	17.3	3.98
October	23.2	31.7	79	86	6.5	17.8	3.81
November	21.3	30.7	74	112	7.4	17.6	3.69
December	18.3	30.6	66	121	8.0	17.6	3.59
Average	22.8	33.7	68	123	7.0	18.8	4.36

ภาพที่ 5-9 หน้าจอข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของสถานีกาญจนบุรี

ในกรณีที่ข้อมูลอยู่แล้วให้กดปุ่ม  เพื่อเปิดข้อมูลมาใช้งาน กรณีนี้ให้เปิดข้อมูลไฟล์ KANCHANABURI.pen ที่คัดแยกจาก CLIMWAT จากขั้นตอนก่อนหน้านี ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ดังหน้าจอ

การเริ่มใช้ข้อมูลนอกจากการเลือก  แล้ว

ยังสามารถ เลือกใช้ปุ่ม  หรือ MENU ได้



ภาพที่ 5-10 เมนูสำหรับเลือกข้อมูลภูมิอากาศและ ETo เป็นรายเดือน

การทำงานกับข้อมูลภูมิอากาศเป็นรายเดือนเลือก MENU

New ► Climate / ETo ► Monthly ETo Penman-Monteith

หน้าจอจะเปลี่ยนเป็นข้อมูลอุณหภูมิตามรายเดือน

การทำงานกับข้อมูลภูมิอากาศเป็นรายสิบวันเลือก MENU

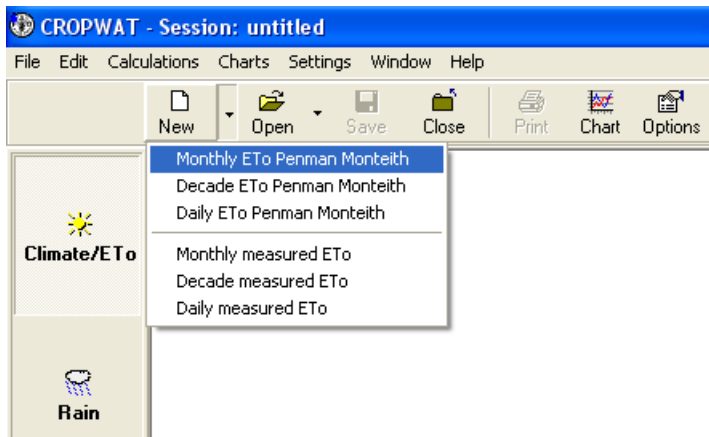
New ► Climate / ETo ► Decade ETo Penman-Monteith

หน้าจอจะเปลี่ยนเป็นข้อมูลอุณหภูมิตามรายสิบวัน

การทำงานกับข้อมูลภูมิอากาศเป็นรายวันเลือก MENU

New ► Climate / ETo ► Daily ETo Penman-Monteith

หน้าจอจะเปลี่ยนเป็นข้อมูลอุณหภูมิตามรายวัน

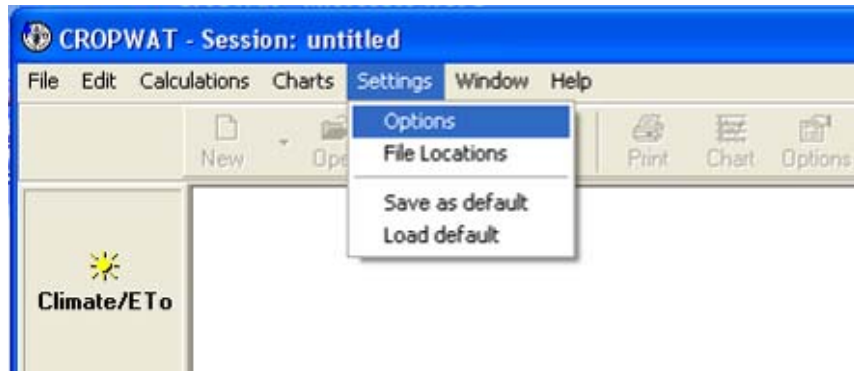


ภาพที่ 5-11 ปุ่มสำหรับเลือกข้อมูลภูมิอากาศและ ETo เป็นรายเดือน


หรือ กดที่รูปสามเหลี่ยมด้านข้างของปุ่ม  จะปรากฏทางเลือกเช่นกัน



## ก.2 การกำหนดทางเลือกข้อมูลอุตุนิมวิทยา



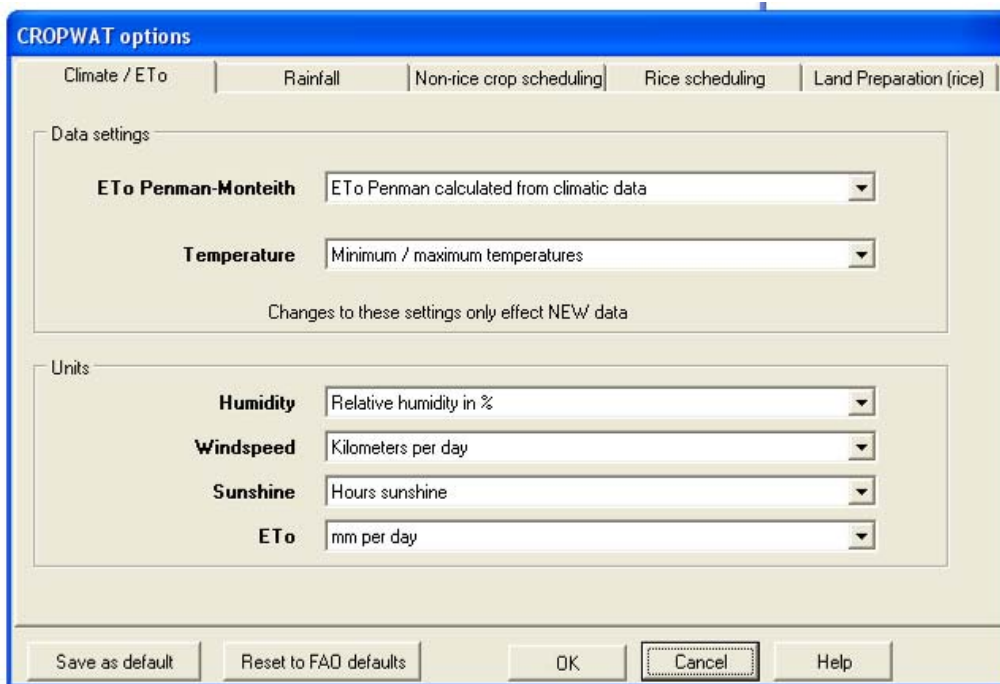
ภาพที่ 5-12 เมนูสำหรับกำหนดทางเลือก

การกำหนดทางเลือกสำหรับข้อมูลอุตุนิมวิทยาเลือกปุ่ม  หรือจาก MENU

Setting ► Options

โปรแกรมจะแสดงทางเลือกสำหรับข้อมูลในกรณีที่ป้อนข้อมูลใหม่ แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงทางเลือกหลังจากใส่ข้อมูลแล้วจะไม่มีผลต่อข้อมูลเดิม

หน้าจอทางเลือกของข้อมูลอุตุนิมวิทยา (แท็บ Climate/ETo) มีส่วนสำหรับกำหนดทางเลือกสองส่วน คือ DATA SETTINGS OPTIONS และ UNITS OPTIONS



ภาพที่ 5-13 หน้าจอทางเลือกสำหรับข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

## 1. DATA SETTINGS OPTIONS

มีส่วนกำหนดทางเลือก ดังนี้

- ETo Penman-Monteith:
  - ETo Penman-Monteith calculated from temperature data: เป็นการคำนวณปริมาณการใช้น้ำอ้างอิง ตามวิธี Penman-Monteith โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่ครบถ้วน ซึ่งเป็นทางเลือกโดย default ของโปรแกรม
  - ETo Penman-Monteith calculated from temperature data (other data estimated): กรณีนี้ ใช้เฉพาะข้อมูลอุณหภูมิคำนวณปริมาณการใช้น้ำอ้างอิง ตามวิธี Penman-Monteith ส่วนข้อมูลอื่น ๆ ใช้การประมาณค่าจากอุณหภูมิ ทางเลือกกรณีนี้เลือกใช้เฉพาะกรณีที่ไม่มีข้อมูลอื่น ๆ หากมีบางส่วน ให้เลือกกรณีแรก และใช้การประมาณค่าข้อมูลที่หายไปแทน

- Temperature: CROPWAT 8.0 สามารถทำงานได้กับข้อมูล minimum และ maximum temperatures (ซึ่งเป็นค่าโดย default) อีกทางเลือกหนึ่งเป็นข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ย

## 2. UNITS OPTIONS

มีส่วนกำหนดทางเลือก ดังนี้

- Humidity: ใช้เป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) หน่วยเป็นร้อยละ (%) หรือ ความดันไอน้ำในอากาศ (actual vapour pressure) หน่วยเป็นกิโลปาสกาล (kPa)
- Wind speed: ใช้หน่วยเป็น กิโลเมตรต่อวัน (km/day) หรือ เมตรต่อวินาที (m/s)
- Sunshine: ใช้เป็นจำนวนชั่วโมงแสงอาทิตย์ในรอบวัน (hours), ร้อยละของแสงอาทิตย์ในรอบวัน (%) หรือสัดส่วนของแสงอาทิตย์ในรอบวัน (fraction)
- Reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>): ใช้เป็นมิลลิเมตรต่อวัน (mm/day) หรือ ต่อช่วงเวลา (mm per period) เช่น ต่อเดือน หรือ ต่อสัปดาห์

## ข. ข้อมูล Rain

---

### ข.1 การใส่ข้อมูลฝน



การทำงานกับข้อมูลฝน เริ่มต้น โดยเลือก ทางด้านซ้ายของจอภาพ โปรแกรมจะแสดงหน้าจอข้อมูลฝนเป็นรายเดือน ซึ่งผู้ใช้สามารถกรอกข้อมูลได้

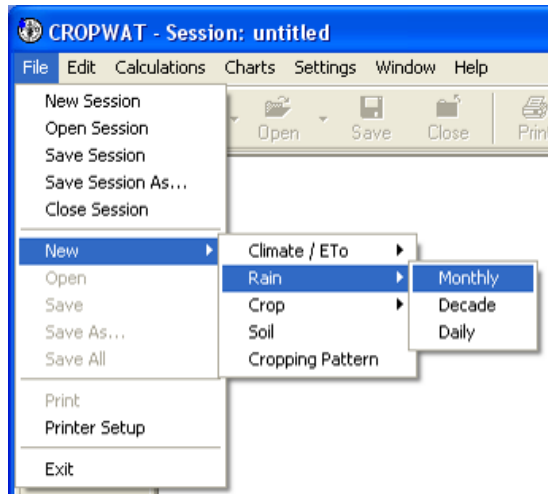
The screenshot shows a software window titled "Monthly rain - untitled". It has a "Station" input field and a "Eff. rain method" dropdown menu set to "USDA S.C. Method". Below this is a table for entering monthly rainfall data.

	Rain	Eff. rain
	mm	mm
January		
February		
March		
April		
May		
June		
July		
August		
September		
October		
November		
December		
Total		

ภาพที่ 5-14 หน้าจอข้อมูลฝนเป็นรายเดือน



ในกรณีที่มีข้อมูลอยู่แล้วให้กดปุ่ม เพื่อเปิดข้อมูลมาใช้งาน กรณีนี้ให้เปิดข้อมูลไฟล์ KANCHANABURI.cli ที่คัดแยกจาก CLIMWAT



ภาพที่ 5-15 เมนูสำหรับเลือกข้อมูลฝนรายเดือน

การทำงานกับข้อมูลฝนเป็นรายเดือนเลือก MENU

New ► Rain ► Monthly

หน้าจจะเปลี่ยนเป็นข้อมูลฝนรายเดือน

การทำงานกับข้อมูลฝนเป็นรายสิบวันเลือก MENU

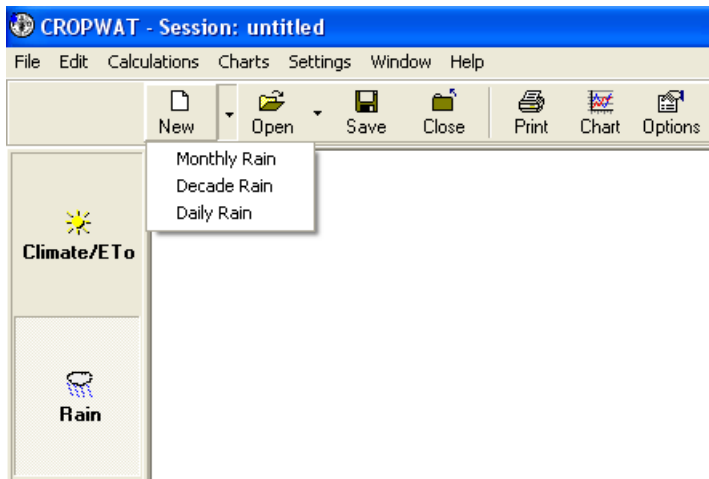
New ► Rain ► Decade

หน้าจจะเปลี่ยนเป็นข้อมูลฝนรายสิบวัน


การทำงานกับข้อมูลฝนเป็นรายวันเลือก MENU

New ► Rain ► Daily

หน้าจจะเปลี่ยนเป็นข้อมูลฝนรายวัน

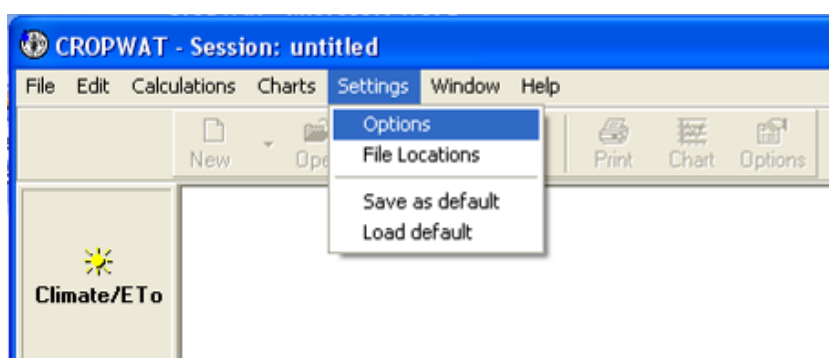


ภาพที่ 5-16 ปุ่มสำหรับเลือกข้อมูลฝน

อีกแนวทางหนึ่งผู้ใช้สามารถกดที่รูปสามเหลี่ยมด้านข้างของปุ่ม  จะปรากฏทางเลือกชนิดของข้อมูลฝนเช่นเดียวกัน

## ข.2 การกำหนดฝนใช้การ

ฝนใช้การ<sup>7</sup> หรือ effective rainfall ในงานทางด้านชลประทาน หมายถึง ส่วนของฝนที่ตกลงพื้นที่เพาะปลูก ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ หรือส่วนของน้ำฝนที่ทดแทนปริมาณน้ำชลประทานที่ต้องส่งให้แก่พืช (กรมชลประทาน, 2534)

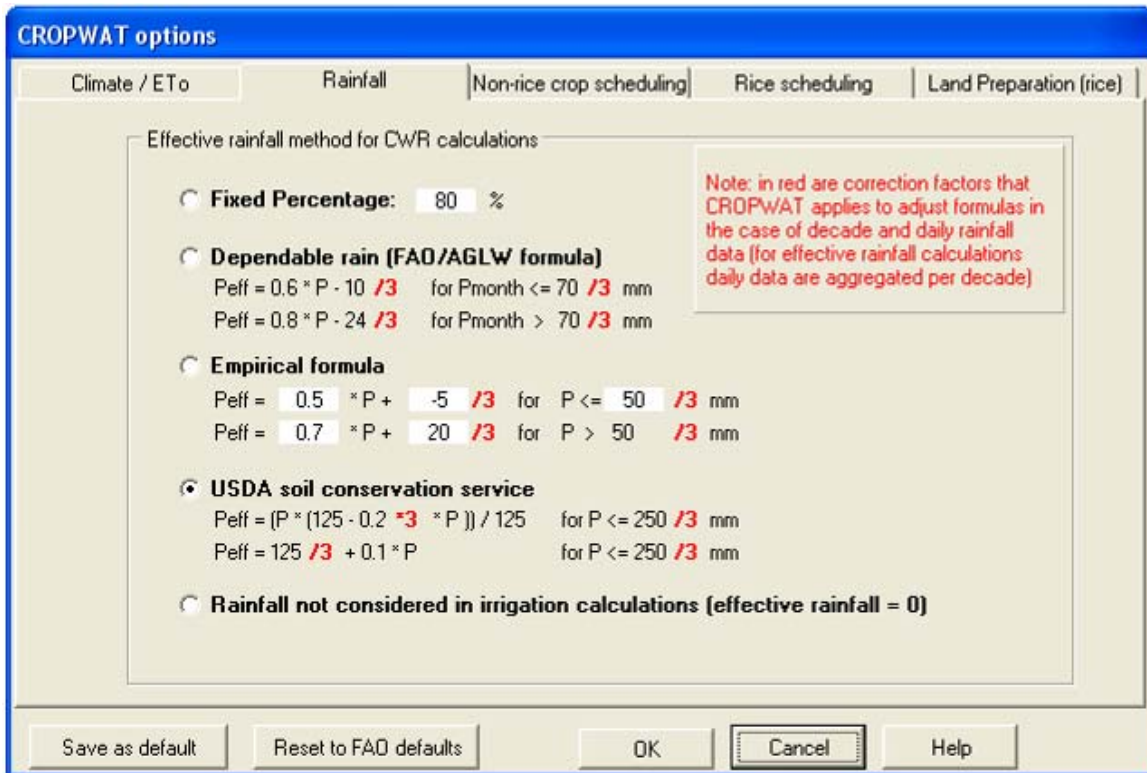


ภาพที่ 5-17 เมนูสำหรับกำหนดทางเลือกข้อมูล

การกำหนดทางเลือกฝนใช้การเลือกจากปุ่ม  หรือจาก MENU

New ► Setting ► Options

<sup>7</sup> ในทางอุทกวิทยา คำว่า effective rainfall มีความหมายไม่เหมือนกับที่ใช้ในทางชลประทาน โดยทางอุทกวิทยานั้น หมายถึง ส่วนเกินของน้ำฝนจากการซึมผ่านผิวดิน กลายเป็นน้ำท่าไหลบนผิวดิน หรืออาจเรียกเป็น rainfall excess



ภาพที่ 5-18 หน้าจอทางเลือกสำหรับกำหนดฝนใช้การ

#### Rain options

มีส่วนกำหนดทางเลือกวิธีการคำนวณฝนใช้การ (effective rainfall) ดังนี้

1. Fixed percentage: ปริมาณฝนใช้การเป็นสัดส่วนคงที่ (fixed percentage) กับ ปริมาณฝนที่ตกจริง ดังสมการ

$$P_{eff} = \text{Fixed percentage} \times P \quad (5-1)$$

โดยที่  $P$  = ปริมาณน้ำฝน [มม.] และ  $P_{eff}$  = ปริมาณฝนใช้การ [มม.]



2. Dependable rainfall (FAO/AGLW formula): เป็นวิธีการคำนวณจากสมการเอมพิริคัลที่พัฒนาโดย FAO

สมการคำนวณฝนใช้การเป็นรายเดือน (monthly rainfall) มี 2 กรณี ดังนี้

$$P_{eff} = 0.6 \times P_{month} - 10 \text{ เมื่อ } P_{month} \leq 70 \text{ mm.} \quad (5-2)$$

$$P_{eff} = 0.8 \times P_{month} - 24 \text{ เมื่อ } P_{month} > 70 \text{ mm.} \quad (5-3)$$

โดยที่

$$P_{month} = \text{ปริมาณน้ำฝนรายเดือน [มม.]}$$

$$P_{eff} = \text{ปริมาณฝนใช้การ [มม.]}$$

ส่วนการคำนวณเป็นรายสัปดาห์ ให้หารสมการข้างต้นด้วย 3 ดังนี้

$$P_{eff} = 0.6 \times P_{dec} - 10/3 \text{ เมื่อ } P_{dec} \leq 70/3 \text{ mm.} \quad (5-4)$$

$$P_{eff} = 0.8 \times P_{dec} - 24/3 \text{ เมื่อ } P_{dec} > 70/3 \text{ mm.} \quad (5-5)$$

โดยที่  $P_{dec} = \text{ปริมาณน้ำฝนรายสัปดาห์ [มม.]}$

3. Empirical formula: เป็นวิธีการคำนวณจากสมการเอมพิริคัลเช่นกันแต่อนุญาตให้ผู้ใช้กำหนดพารามิเตอร์ในสมการเอง

4. USDA Soil Conservation Service: เป็นการคำนวณปริมาณฝนใช้การจากสมการที่พัฒนาโดย US SCS

สมการคำนวณฝนใช้การเป็นรายเดือน (monthly rainfall) มี 2 กรณี ดังนี้

$$P_{eff} = P_{month} \times (125 - 0.2 \times P_{month}) / 125 \quad \text{เมื่อ } P_{month} \leq 250 \text{ mm.} \quad (5-6)$$

$$P_{eff} = 125 + 0.1 \times P_{month} \quad \text{เมื่อ } P_{month} > 250 \text{ mm.} \quad (5-7)$$

โดยที่

$$P_{month} = \text{ปริมาณน้ำฝนรายเดือน [มม.]}$$

$$P_{eff} = \text{ปริมาณฝนใช้การ [มม.]}$$

ส่วนการคำนวณเป็นรายสัปดาห์ ให้หารสมการข้างต้นด้วย 3 ดังนี้

$$P_{eff} = P_{dec} \times (125 - (0.2 \times 3) \times P_{dec}) / 125 \quad \text{เมื่อ } P_{dec} \leq 250 / 3 \text{ mm.} \quad (5-8)$$

$$P_{eff} = (125/3) + 0.1 \times P_{dec} \quad \text{เมื่อ } P_{dec} > 250 / 3 \text{ mm.} \quad (5-9)$$

โดยที่  $P_{dec}$  = ปริมาณน้ำฝนรายสัปดาห์ [มม.]

5. Rainfall not considered in irrigation calculations (Effective rainfall = 0): เป็นการกำหนดให้ไม่พิจารณาข้อมูลฝน หรือปริมาณฝนใช้การเท่ากับศูนย์

## ค. ข้อมูล Crop

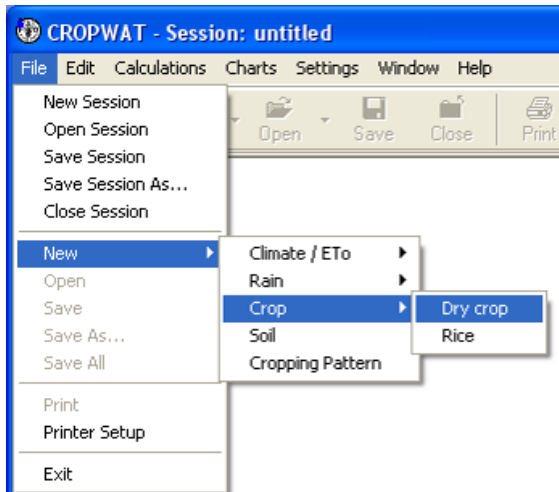
### ค.1 การใส่ข้อมูลพืช



การทำงานกับข้อมูลพืช เริ่มต้นโดยเลือก ทางด้านซ้ายของจอภาพ โปรแกรมจะแสดงหน้าจอข้อมูลพืชเป็นรายเดือน ซึ่งผู้ใช้สามารถกรอกข้อมูลได้

The screenshot shows a software window titled "Dry crop - untitled" with a blue border. It contains several input fields and a graph. At the top, there are fields for "Crop Name", "Planting date" (with a date picker icon), and "Harvest". Below these is a graph with a green line representing "Kc Values" and a red line representing "Rooting depth (m)". The graph is divided into five stages: "initial", "development", "mid-season", "late season", and "total". Below the graph, there are input fields for "Critical depletion (fraction)", "Yield response f.", and "Cropheight (m)" (with an "optional" label). The "Cropheight" field is only present in the "mid-season" and "late season" stages.

ภาพที่ 5-19 หน้าจอข้อมูลพืช




**ภาพที่ 5-20**      **เมนูสำหรับเลือกข้อมูลพืช**

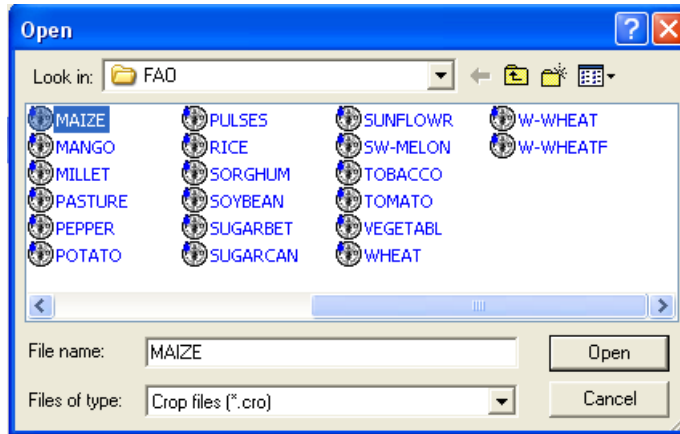
การทำงานกับข้อมูลพืชไร่เลือก MENU

New ► Crop ► Dry crop

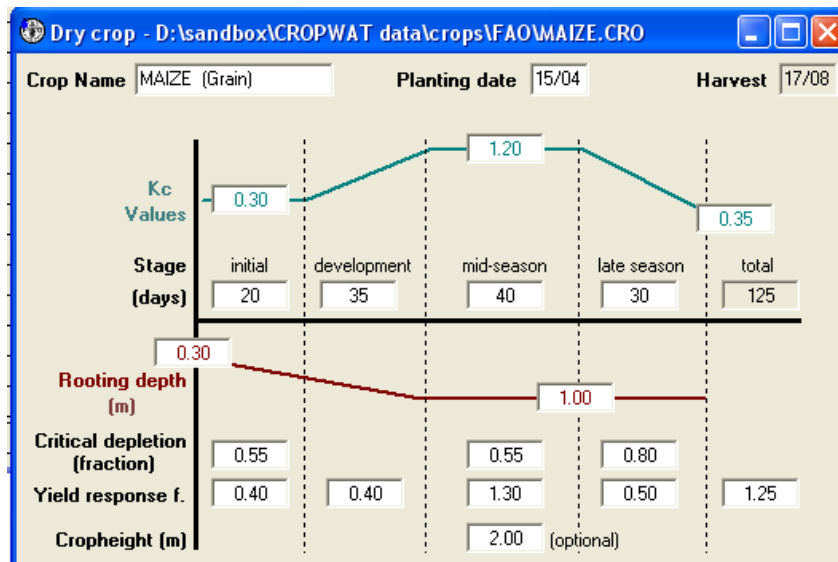
การทำงานกับข้อมูลข้าวเลือก MENU

New ► Crop ► Rice

ในกรณีที่ข้อมูลอยู่แล้วให้กดปุ่ม  เพื่อเปิดข้อมูลมาใช้งาน กรณีนี้ให้เปิดข้อมูลไฟล์ MAIZE



ภาพที่ 5-21 หน้าจอเลือกข้อมูลข้าวโพด (Maize)



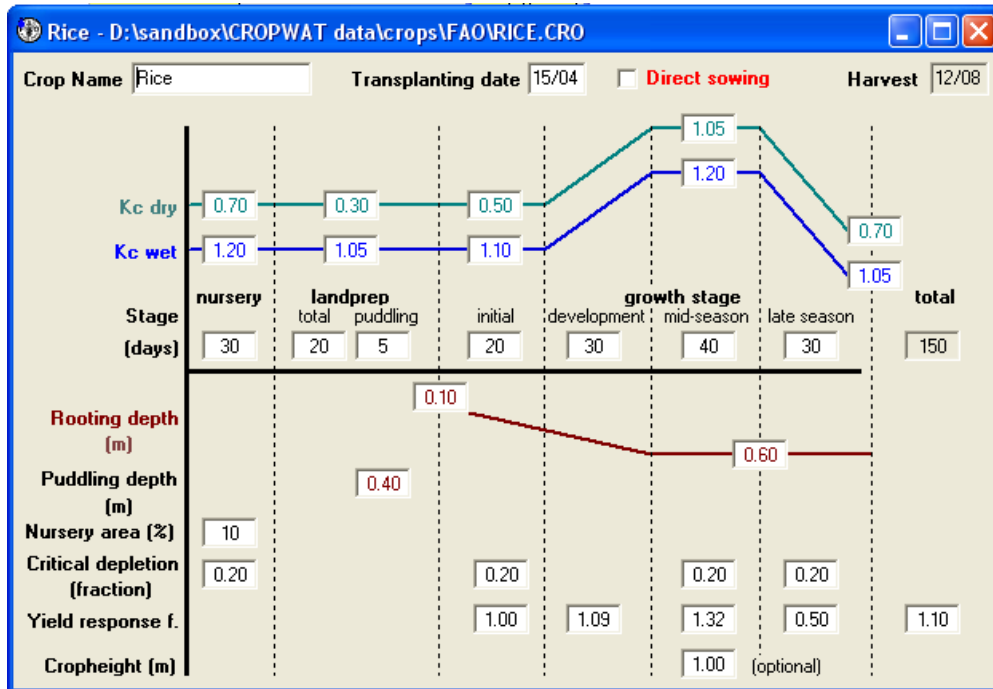
ภาพที่ 5-22 ข้อมูลข้าวโพด

## ข้อมูลที่ต้องการสำหรับพืช มีดังนี้

- Planting date: วันและเดือนที่ปลูกพืช ส่วนวันที่เก็บเกี่ยว หรือ Harvest date โปรแกรมจะทำการคำนวณโดยอัตโนมัติเมื่อใส่ข้อมูลครบถ้วน
- Crop coefficient (Kc): ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชใช้สำหรับสร้างโค้งของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช มี 3 ค่า ประกอบด้วย สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงตั้งตัว ( $K_{cini}$ ) สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงกลางของการเพาะปลูก ( $K_{cmid}$ ) สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ระยะสิ้นสุดการเพาะปลูก ( $K_{cend}$ )
- Stages: ช่วงของการเจริญเติบโตของพืช มี 4 ช่วง ประกอบด้วย ช่วงตั้งตัว (initial stage) ช่วงเจริญเติบโตทางลำต้น (crop development stage) ช่วงกลางของการเพาะปลูก (mid-season stage) ช่วงปลายของการเพาะปลูก (late season stage)
- Rooting depth: ความลึกของราก มีหน่วยเป็นเมตร
- Critical depletion fraction (p): ค่าวิกฤตของสัดส่วนของน้ำที่พร่องไป คิดเป็นร้อยละของความชื้นที่พืชนำไปใช้ได้ทั้งหมด (TAW)
- Yield response factor (Ky): ค่าแฟกเตอร์การตอบสนองของพืชต่อการขาดน้ำ
- Maximum crop height: ความสูงต้นพืช มีหน่วยเป็นเมตร

ข้อมูลของพืชต่าง ๆ อาจดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก หรือในคู่มือ FAO-56 “Crop evapotranspiration” (Allen et al., 1998) และคู่มือ FAO-33 “Yield response to water” (Doorenbos and Kassam, 1979)

สำหรับการปลูกข้าว ข้อมูล Crop coefficient (Kc), Stages, Rooting depth, Critical depletion fraction (p), Yield response factor (Ky) ต้องจัดเตรียมเหมือนกรณีพืชไร่ โดยค่า Kc มี 2 ชนิด คือ Kc dry ใช้คำนวณกรณีแปลงนาไม่มีน้ำขัง และ Kc wet ใช้คำนวณกรณีแปลงนามีน้ำขัง



ภาพที่ 5-23 ข้อมูลข้าว

ข้อมูลข้าวที่มีความต่างจากพืชไร่มีดังนี้

- Planting date: วันที่หว่านข้าว กรณีเป็นข้าวนาหว่าน (direct sowing) หรือวันที่ปักดำ (Transplanting date) กรณีเป็นข้าวนาคำ
- Puddling depth: เป็นความลึกของชั้นเทือก<sup>8</sup> มีหน่วยเป็นเมตร

นอกจากนี้ การปลูกข้าวมีขั้นตอนการเตรียมแปลง (land preparation) ซึ่งต้องกำหนดระยะเวลาทั้งหมดที่ต้องใช้ (total) และระยะเวลาของการทำเทือก (puddling)

<sup>8</sup> การทำเทือก (puddling) เป็นการเตรียมดินชั้นที่ 2 เพื่อย่อยดินให้มีขนาดเล็กหรือละเอียดเป็นเทือก ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การขลุบย่อยดินให้มีขนาดเล็ก การปรับระดับดินหรือลูบเทือก การชักร่องเพื่อการให้น้ำและระบายน้ำ (รัฐรัชย์, 2552)

## ง. ข้อมูล Soil

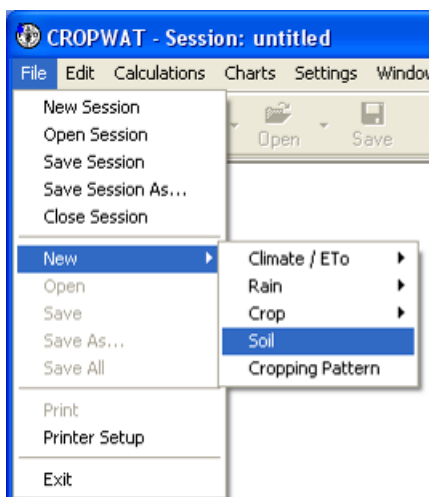
---



การทำงานกับข้อมูลดิน เริ่มต้นโดยเลือก ทางด้านซ้ายของจอภาพ โปรแกรมจะแสดงหน้าจอข้อมูลดิน ซึ่งผู้ใช้สามารถกรอกข้อมูลได้

หรือเลือก MENU

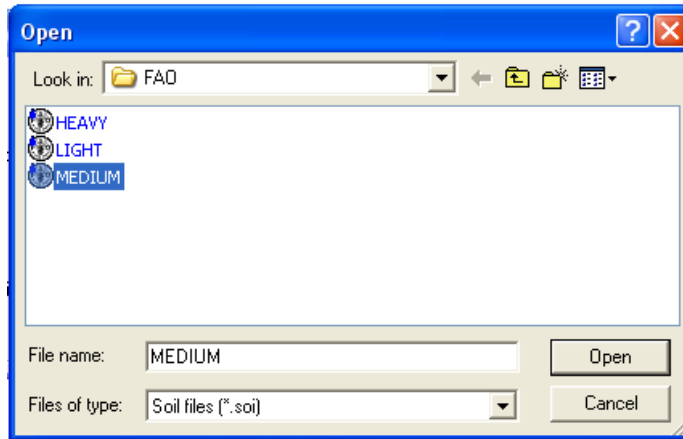
New ► Soil



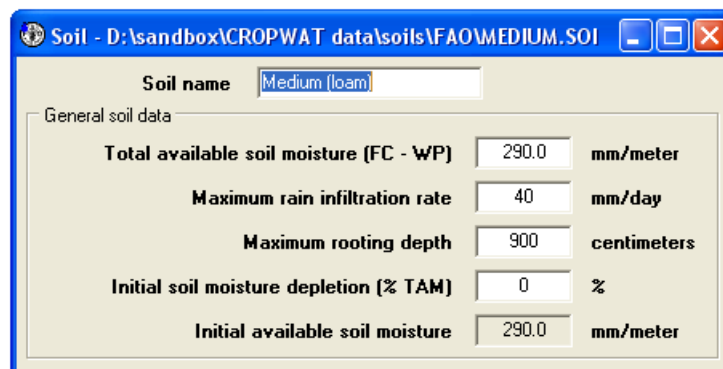
ภาพที่ 5-24 เมนูสำหรับเลือกข้อมูลดิน



กรณีนี้ให้เปิดข้อมูลดินร่วนหรือดินเนื้อปานกลาง (MEDIUM)



ภาพที่ 5-25 หน้าจอเลือกข้อมูลดินเนื้อปานกลาง (Medium)



ภาพที่ 5-26 ข้อมูลดินเนื้อปานกลาง (Medium)

ข้อมูลที่ต้องการสำหรับดิน มีดังนี้

- Total Available Water (TAW): ความชื้นที่พืชนำไปใช้ได้ทั้งหมด เป็นผลต่างระหว่างความชื้นชลประทาน (Field Capacity, FC) กับความชื้นที่จุดเหี่ยวเฉา (Wilting Point, WP)
- Maximum infiltration rate: อัตราการซึมผ่านดินสูงสุด อาจกำหนดให้เท่ากับ สภาพการนำน้ำของดินอิ่มตัว (saturated hydraulic conductivity) หน่วย เป็นมิลลิเมตรต่อวัน
- Maximum rooting depth: ความลึกของรากพืช
- Initial soil moisture depletion: ความชื้นในดินที่พร่องไปขณะเริ่มต้น คัดเป็นร้อยละของความชื้นที่พืชนำไปใช้ได้ทั้งหมด (TAW)

**Soil - untitled**

Soil name

General soil data

Total available soil moisture (FC - WP)  mm/meter

Maximum rain infiltration rate  mm/day

Maximum rooting depth  centimeters

Initial soil moisture depletion (% TAM)  %

Initial available soil moisture  mm/meter

Additional soil data for rice calculations

Drainable porosity (SAT - FC)  %

Critical depletion for puddle cracking  fraction

Maximum Percolation rate after puddling  mm/day

Water availability at planting  mm WD

Maximum waterdepth  mm

ภาพที่ 5-27 หน้าจอข้อมูลดินสำหรับปลูกข้าว

สำหรับการปลูกข้าว ต้องการข้อมูลดินเพิ่มเติม ดังนี้

- Drainable porosity: ความพรุนหรือช่องว่างในดินหลังจากระบายน้ำออกไป เป็นผลต่างระหว่างความชื้นของดินอิ่มตัว (Saturation, SAT) กับความชื้นชลประทาน (Field Capacity, FC) หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อเมตร
- Critical depletion for puddle cracking: ค่าวิกฤติของความชื้นในดินที่พร่องไปจนเกิดการแตกตัวที่ผิวชั้นเทือก คิดเป็นสัดส่วนเทียบกับความชื้นที่พืชนำไปใช้ได้ทั้งหมด (TAW)
- Maximum Percolation rate after puddling: อัตราการซึมผ่านดินสูงสุดหลังจากทำเทือก ซึ่งประมาณ โดยโปรแกรม
- Water availability at planting: ปริมาณน้ำขณะที่ปลูกข้าว
- Maximum water depth: ปริมาณน้ำสูงสุดที่ขังในแปลง หน่วยเป็น มิลลิเมตร

## 5.4 การวิเคราะห์ผลการคำนวณ

การทำงานกับข้อมูลพืช เริ่มต้น โดยเลือก  ทางด้านซ้ายของจอภาพ

Crop Water Requirements							
ETo station				Crop			
KANCHANABURI				MAIZE (Grain)			
Rain station				Planting date			
KANCHANABURI				15/04			
Month	Decade	Stage	Kc	ETc	ETc	Eff rain	Irr. Req.
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Apr	2	Init	0.30	1.73	10.4	12.9	0.0
Apr	3	Init	0.30	1.65	16.5	27.2	0.0
May	1	Deve	0.35	1.83	18.3	36.0	0.0
May	2	Deve	0.57	2.87	28.7	43.0	0.0
May	3	Deve	0.82	3.97	43.7	36.6	7.1
Jun	1	Mid	1.07	4.95	49.5	27.0	22.5
Jun	2	Mid	1.14	5.06	50.6	21.2	29.4
Jun	3	Mid	1.14	5.04	50.4	23.1	27.3
Jul	1	Mid	1.14	5.02	50.2	26.0	24.2
Jul	2	Late	1.13	4.96	49.6	27.1	22.5
Jul	3	Late	0.93	4.04	44.4	27.5	16.9
Aug	1	Late	0.65	2.82	28.2	26.3	1.9
Aug	2	Late	0.43	1.84	12.9	18.2	0.0
					<b>453.2</b>	<b>352.0</b>	<b>151.7</b>

ภาพที่ 5-28 หน้าจอแสดงผลการคำนวณ

หน้าจอแสดงผลการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชและความต้องการน้ำชลประทานประกอบด้วย 8 คอลัมน์ ดังนี้

- คอลัมน์ที่ 1 เป็นเดือนนับจากวันเริ่มปลูกแบ่งเป็นรายสิบวัน จากหน้าจอแสดงผลที่มุมขวาด้านบน จะเห็นว่าโปรแกรมรายงานวันที่เริ่มปลูก (planting date) เป็นวันที่ 15 เมษายน

- คอลัมน์ที่ 2 เป็นช่วงของสัปดาห์ในหนึ่งเดือนจะมี 3 ช่วง คือ ช่วงสัปดาห์แรกระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 10 ช่วงสัปดาห์ที่สองระหว่างวันที่ 11 ถึงวันที่ 20 และช่วงสัปดาห์ที่สามระหว่างวันที่ 21 ถึงวันที่ 30 ในบางเดือนที่มี 31 วัน (เช่น พฤษภาคม กรกฎาคม) ช่วงสัปดาห์ช่วงที่ 3 จะนับถึงวันที่ 31 เป็น 11 วัน เพื่อพิจารณาผลลัพธ์จากหน้าจอแสดงผล จะสังเกตได้ว่า ช่วงสัปดาห์ช่วงที่ 2 ในเดือนเมษายน จะนับเพียง 6 วัน (วันที่ 15 ถึงวันที่ 20) เนื่องจากเริ่มปลูกพืชในวันที่ 15 เมษายน และในทำนองเดียวกัน ช่วงสัปดาห์ช่วงที่ 2 ในเดือนสิงหาคม จะนับเพียง 7 วัน เนื่องจาก ทำเก็บเกี่ยวในวันที่ 17 สิงหาคม
- คอลัมน์ที่ 3 เป็นช่วงการเจริญเติบโตของพืช
- คอลัมน์ที่ 4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ )
- คอลัมน์ที่ 5 เป็นปริมาณการใช้น้ำของพืช หากจากผลคูณของสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (ค่า  $K_c$  ในคอลัมน์ที่ 4) กับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_o$ ) หน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อวัน
- คอลัมน์ที่ 6 เป็นปริมาณการใช้น้ำของพืช ( $ET_c$ ) หน่วยเป็น มิลลิเมตร
- คอลัมน์ที่ 7 เป็นปริมาณฝนใช้การ หน่วยเป็น มิลลิเมตร
- คอลัมน์ที่ 8 เป็นความต้องการน้ำชลประทานสุทธิ ซึ่งหาจากผลต่างระหว่างปริมาณการใช้น้ำของพืช (คอลัมน์ที่ 6) กับปริมาณฝนใช้การ (คอลัมน์ที่ 7)

## 5.5 แบบฝึกหัด

1. จากหน้าจอแสดงผลการคำนวณในภาพที่ 5-28 จงหาว่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_0$ ) ในแต่ละช่วง 10 วันมีค่าเท่ากับเท่าไร และมีวิธีการคำนวณอย่างไร
2. จากตัวอย่างการคำนวณ ให้เปลี่ยนข้อมูลภูมิอากาศและฝนจากจังหวัดกาญจนบุรี เป็นจังหวัดเชียงใหม่ และ จังหวัดอุบลราชธานี โดยกำหนดให้พืชและดินตามเดิม จงวิจารณ์เปรียบเทียบผลลัพธ์
3. จงใช้โปรแกรม CROPWAT และข้อมูลจาก CLIMWAT คำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของข้าวโพดหวาน ที่ปลูกในจังหวัดกาญจนบุรี โดยกำหนดให้เริ่มปลูกข้าวโพดหวานในวันที่ 1 สิงหาคม ดินเป็นดินร่วน
4. จงใช้โปรแกรม CROPWAT และข้อมูลจาก CLIMWAT คำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของข้าว ที่ปลูกในจังหวัดกาญจนบุรี โดยกำหนดให้เริ่มปลูกในวันที่ 12 สิงหาคม ดินเป็นดินเหนียว กำหนดให้ ปริมาณน้ำขณะปลูกข้าว (water availability at planting) เท่ากับ 2 เซนติเมตรและ ปริมาณน้ำสูงสุดที่ขังในแปลง (maximum water depth) เท่ากับ 15 เซนติเมตร

## ส่วนที่ 4

การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช

โดยเทคนิคการสำรวจระยะไกล





## 6. การหา ET จากข้อมูลดาวเทียม โดยหลักสมดุลพลังงาน

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการใช้เทคนิคการสำรวจระยะไกลโดยประยุกต์หลักสมดุลพลังงานที่พื้นผิวสำหรับการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ประกอบด้วยเนื้อหา 5 ส่วน

ส่วนแรกเป็นการทบทวนการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประยุกต์การสำรวจระยะไกลสำหรับการจัดการน้ำและการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ส่วนที่สองเป็นหลักการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชจากข้อมูลดาวเทียมตามหลักสมดุลพลังงาน

ส่วนที่สามและสี่เป็นการนำเสนอหลักการคำนวณพารามิเตอร์จากข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR โดยในส่วนที่สามเป็นพารามิเตอร์พื้นผิว ประกอบด้วย สภาพการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) ดัชนีพืชพรรณ (vegetation index) อุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) และส่วนที่สี่เป็นพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงาน ประกอบด้วย พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ (net radiation) พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux) และ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux)

ท้ายสุด ส่วนที่ห้าเป็นกรณีศึกษาซึ่งนำเสนอการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชจากข้อมูลดาวเทียมโดยหลักสมดุลพลังงานในพื้นที่ราบลุ่มน้ำเจ้าพระยา

## 6.1 การสำรวจระยะไกลและการประยุกต์

การสำรวจระยะไกล (remote sensing) เป็นเทคนิคในการบันทึก (recording) การสังเกต (observing) และการรับรู้ (sensing) เกี่ยวกับวัตถุ พื้นที่หรือปรากฏการณ์ที่ห่างไกล โดยมีได้เข้าไปสัมผัสโดยตรงกับวัตถุเป้าหมาย แต่อาศัยพลังงานจากดวงอาทิตย์หรือพลังงานที่ประดิษฐ์ขึ้นเป็นสื่อในการได้มาของข้อมูลที่สามารถนำไปประมวลผล วิเคราะห์ และประยุกต์ใช้ (สมพร, 2552)

การสำรวจระยะไกลเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบสามส่วน กล่าวคือ

- (1) ระบบบันทึกข้อมูลชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ห่างไกลจากวัตถุหรือพื้นที่เป้าหมาย
- (2) พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า
- (3) การวิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูลภาพที่บันทึกด้วยสายตาและด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อเอาข้อมูลที่ได้ออกมาใช้ประโยชน์

### ก. การจัดการน้ำกับการสำรวจระยะไกล

---

การสำรวจระยะไกลเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ทางด้านอุทกวิทยาและการจัดการน้ำ เนื่องจากแนวทางนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ดีกับพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยให้ผลที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงและไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดในภาคสนามมากนัก อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์และแปลผลภาพถ่ายดาวเทียมร่วมกับการสำรวจภาคสนาม (ground-truth) สามารถช่วยให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องยิ่งขึ้น (Kite and Droogers, 2000a, 2000b)

Bastiaanssen (1998) ได้รวบรวมแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้การสำรวจระยะไกลในงานด้านการจัดการน้ำโดยจำแนกการประยุกต์ออกเป็น 5

---

กลุ่ม ได้แก่ (1) ดัชนีทางคลื่นแสงของพืชพรรณ (spectral vegetation indices) (2) การจำแนกตามเรื่องที่น่าสนใจ (thematic classifications) (3) พารามิเตอร์หลักของพืช (key crop parameters) (4) สภาพดิน (soil conditions) (5) กระบวนการทางอุทกวิทยา (hydrological processes)

นอกจากนี้ Bastiaanssen และคณะ (2000) ยังได้เสนอแนวทางในการนำเทคนิคการสำรวจระยะไกลไปประยุกต์ในงานที่เกี่ยวข้องกับการชลประทานอย่างหลากหลาย อาทิ

- การประเมินผลผลิตจากน้ำและการใช้น้ำ (water use and productivity)
- การวินิจฉัยสมรรถนะของระบบชลประทาน (performance diagnosis)
- การวางแผนเชิงนโยบายและกำหนดสิทธิการใช้น้ำ (strategic planning and water right)
- การดำเนินงานของระบบชลประทาน (irrigation system operation)
- การประเมินผลกระทบจากพัฒนาการชลประทาน (impact assessment)

อนึ่ง ปริมาณการใช้น้ำของพืชนี้เป็นการนำผลจากแนวทางการวิจัยในหลาย ๆ ส่วนดังที่กล่าวข้างต้นมาใช้งาน และเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการชลประทานและการจัดการน้ำอีกชั้นหนึ่ง

## ข. การใช้น้ำของพืชและการสำรวจระยะไกล

---

การประมาณค่าปริมาณการระเหยคายน้ำหรือปริมาณการใช้น้ำของพืชจากข้อมูลดาวเทียมอาจถือได้ว่าเป็นงานหลักอันหนึ่งในการประยุกต์เทคนิคการสำรวจระยะไกลมาใช้ทางด้านอุทกวิทยาและการจัดการน้ำ (D'Souza et al., 1993; Diekkruger et al., 1999; Schultz and Engman, 2000; Schmugge et al., 2002) ถึงกระนั้น การนำเทคนิคนี้มาประยุกต์นั้นยังคงจำกัดอยู่ในระดับงานวิจัยเท่านั้น ข้อจำกัดนี้เป็นผลมาจากราคาต้นทุนในการจัดหาภาพถ่ายดาวเทียมที่สูงและต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญทั้งในด้านการสำรวจระยะไกลและด้านการจัดการน้ำในการทำงาน (Bastiaanssen et al., 2000)

Kite และ Droogers (2000a; 2000b) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคต่าง ๆ ในการหาค่าปริมาณการใช้น้ำของพืช ได้แก่

- การใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดจากแปลงเพาะปลูกและสถานีตรวจอากาศ คำนวณตามขั้นตอนของ FAO-24 (Doorenbos and Pruitt, 1977) และ FAO-56 (Allen et al., 1998)
- การใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยา
- การใช้วิธีการสำรวจระยะไกล (Granger, 1997; Bastiaanssen et al., 1998a, 1998b; Choudhury and DiGirolamo, 1998a, 1998b)

ผลการศึกษาของ Kite และ Droogers (2000a; 2000b) มิได้สรุปว่าวิธีการใดให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำกว่ากัน แต่ได้ทำการสรุปเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแต่ละวิธีกับค่าเฉลี่ยที่หาได้จากทุกวิธี ซึ่งทุกวิธีให้ผลลัพธ์ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกัน (ต่างจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่า 20%) ยกเว้นวิธีที่คำนวณตามขั้นตอน FAO-24 (Doorenbos and Pruitt, 1977) และวิธีของ Choudhury และ DiGirolamo (1998) ซึ่งให้ค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยค่อนข้างมาก

นอกจากนี้ Kite และ Droogers (2000a; 2000b) ยังได้สรุปประเด็นเกี่ยวกับความต้องการใช้ข้อมูลเพื่อการหาปริมาณค่าการใช้น้ำ และการนำไปใช้งาน โดยเกือบทุกเทคนิคการหาค่าการใช้น้ำของพืชต้องการข้อมูลภูมิอากาศ โดยวิธีในกลุ่มของการคำนวณตามขั้นตอนของ FAO และการใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยาต้องการข้อมูลเพิ่มเติมในการคำนวณ ในขณะที่ การใช้วิธีสำรวจระยะไกล ต้องการข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม

ในส่วนของการนำไปใช้งาน วิธีการใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยาและวิธีสำรวจระยะไกล จะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณมากกว่าวิธีการคำนวณตามขั้นตอนของ FAO ในขณะที่ วิธีสำรวจระยะไกลมีจุดเด่นในเรื่องการครอบคลุมพื้นที่กว้างได้ดีโดยมีรายละเอียดระดับปานกลางถึงดี ส่วนแบบจำลองทางอุทกวิทยามีจุดเด่นในเรื่องของการคำนวณที่เวลาต่อเนื่องและการนำไปใช้เพื่อการทำนายการใช้น้ำของพืชล่วงหน้า

กระบวนการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยเทคนิคการสำรวจระยะไกล พอสรุปโดยสังเขป ดังนี้

## 1. วิธี Satellite-Derived Feedback Mechanism

วิธี Satellite-Derived Feedback Mechanism (Granger, 1997) เป็นวิธีที่พิจารณาปริมาณพลังงานการแผ่รังสีสุทธิเป็นปัจจัยที่ทำให้ระเหยและใช้ความดันไอน้ำอิ่มในอากาศที่ขาด (vapor pressure deficit) สำหรับประเมินการหมุนเวียนถ่ายเทของไอน้ำ

ปริมาณพลังงานการแผ่รังสีสุทธิประมาณโดยใช้ข้อมูลการสะท้อนแสงจากพื้นผิว (surface albedo) จากภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงคลื่นตามมองเห็น (visible channels) และใช้ลักษณะความสัมพันธ์ย้อนกลับ (feedback relationship) ในการหาค่าผลต่างแรงดันไอน้ำอิ่มตัวกับแรงดันไอน้ำในบรรยากาศ จากค่าอุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) ของภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงคลื่นอินฟราเรด (infrared channels) โดยลักษณะความสัมพันธ์ย้อนกลับเป็นการอนุมานว่าทั้งอุณหภูมิและความชื้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงพลังงานที่มาจากพื้นผิวดิน

## 2. วิธีจำลองกระบวนการทางชีวฟิสิกส์

วิธีจำลองกระบวนการทางชีวฟิสิกส์ (biophysical processes) (Choudhury and DiGirolamo, 1998a, 1998b) วิธีจำลองกระบวนการทางชีวฟิสิกส์โดยข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมใช้ทั้งหลักการสมดุลของน้ำและสมดุลของพลังงานในการหาค่าการใช้น้ำของพืช โดยถือว่าค่าการคายน้ำของพืชมีความสัมพันธ์กับอัตราการใช้คาร์บอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง

Choudhury และ DiGirolamo (1998) ใช้แบบจำลองกระบวนการทางชีวฟิสิกส์ในการเชื่อมโยงกระบวนการต่าง ๆ ของน้ำ พลังงาน และคาร์บอน เข้าด้วยกัน โดยใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลประกอบต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาค่าการระเหย การคายน้ำ และปริมาณมวลชีวภาพ (biomass) ดังนี้

- ปริมาณการคายน้ำของพืช หาโดยใช้สมการการระเหยของ Penman-Monteith ซึ่งเชื่อมโยงกระบวนการควบคุมการคายน้ำของปากใบเข้ากับอัตราการใช้คาร์บอน
- ปริมาณการระเหยจากผิวดิน หาโดยใช้สมการการระเหยของ Priestley-Taylor และสมการการไหลของน้ำในดินของ Philip
- ปริมาณมวลชีวภาพ ประเมินได้จากอัตราการใช้คาร์บอนร่วมกับข้อมูลอัตราการหายใจของพืชและสภาพการขาดน้ำของดิน

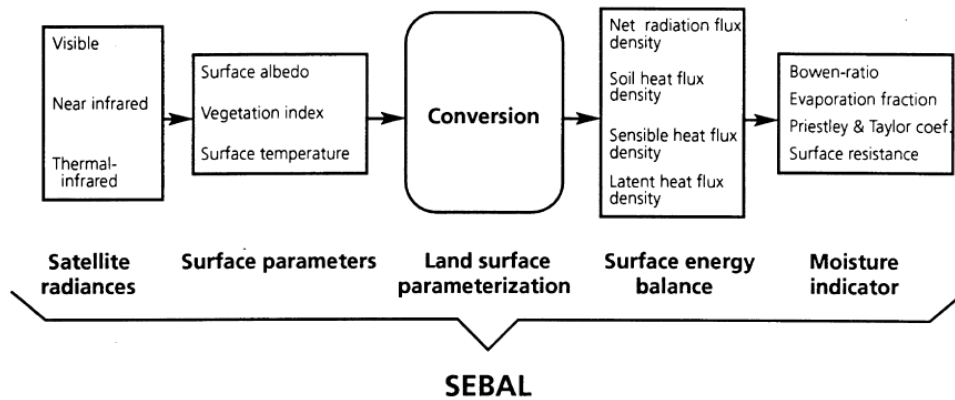
ข้อมูลดาวเทียมจะใช้ในการหาสัดส่วนที่พืชปกคลุมดิน ค่าการสะท้อนแสงจากพื้นผิว ปริมาณพลังงานการแผ่รังสีที่พื้นผิวและที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ชีตความชื้นของเมฆ อุณหภูมิอากาศ และแรงดันไอน้ำ ส่วนข้อมูลอื่น ๆ ที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนหาได้จากการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมร่วมกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้ ค่าพารามิเตอร์ทางด้านชีวฟิสิกส์อื่น ๆ (biophysical parameters) หาได้จากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ

แบบจำลองกระบวนการทางชีวฟิสิกส์จะใช้ข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ในการหาค่าการใช้น้ำของพืชโดยใช้การวิเคราะห์สมการสมดุลของพลังงานและสมการสมดุลของน้ำ

### 3. กระบวนการวิธี Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)

กระบวนการวิธี Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) (Bastiaanssen et al., 1998a, 1998b) เป็นขั้นตอนสำหรับประมวลผลข้อมูลดาวเทียมที่ใช้หลักสมดุลทางอุณหพลวัต (thermo-dynamics equilibrium) เพื่อหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการสมดุลพลังงาน

การประเมินค่าพารามิเตอร์อาศัยหลักการที่ว่าค่าพลังงานที่สะท้อนจากพื้นผิวโลกจะมีความสัมพันธ์กับสภาพในช่วงคลื่นต่าง ๆ ของข้อมูลดาวเทียม



**ภาพที่ 6-1 องค์ประกอบหลักของกระบวนการวิธี SEBAL**

ที่มา: Bastiaanssen et al., 1998a

ข้อมูลดาวเทียมที่ต้องใช้ในการประมวลผล ประกอบด้วย ข้อมูลดาวเทียมในช่วงคลื่นตามองเห็น (visible) ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (near-infrared) และช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน (thermal infrared)

จากนั้นจึงทำการประมวลผลเพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ของพื้นผิว (surface parameters) ประกอบด้วย สภาพการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) ดัชนีพืชพรรณ (vegetation index) และ อุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature)

ค่าพารามิเตอร์ของพื้นผิวที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณและแปลผลทีละจุดภาพ (pixel-by-pixel) ซึ่งจะให้ผลลัพธ์เป็นพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงานที่พื้นผิว (surface energy balance) ซึ่งประกอบด้วย พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ (net solar radiation) พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux) และ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux) และนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณการระเหยหรือการใช้น้ำของพืชในลำดับต่อไป

## 6.2 หลักการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช จากข้อมูลดาวเทียม

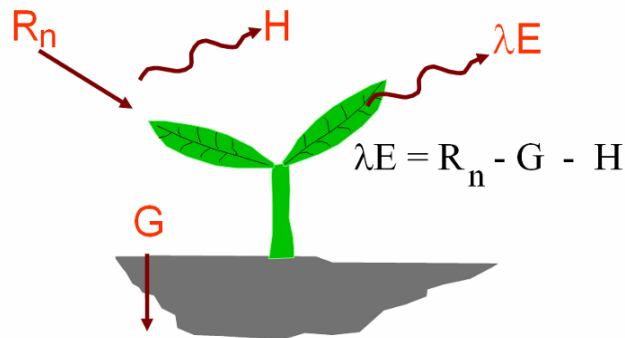
การประมาณค่าปริมาณการระเหยจากพื้นผิวโดยเทคนิคการสำรวจระยะไกลใช้หลักการของสมดุลพลังงานที่พื้นผิว (surface energy balance) เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจาก ข้อมูลดาวเทียมเป็นข้อมูลที่ตรวจวัดปริมาณพลังงานจากผิวโลกในช่วงคลื่นต่าง ๆ ดังนั้น การประเมินค่าหาพารามิเตอร์ในสมการสมดุลพลังงานสามารถทำได้โดยตรง และต้องการข้อมูลประกอบเพิ่มเติมไม่มากนัก

ในหัวข้อนี้ กล่าวถึงองค์ประกอบของสมการสมดุลพลังงานที่พื้นผิว ประกอบด้วย พลังงานการแผ่รังสีสุทธิที่พื้นผิวได้รับ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ และ พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ นอกจากนี้ ยังกล่าวถึง ค่าสัดส่วนการระเหย ซึ่งเป็นแนวคิดที่สำคัญในการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช



### ก. สมดุลพลังงานที่พื้นผิว

---



ภาพที่ 6-2 สมดุลพลังงานที่พื้นผิว (surface energy balance)

ที่มา: Allen and Bastiaanssen (2002)

หลักสมดุลพลังงานที่พื้นผิวเขียนได้ตามสมการ

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (6-1)$$

โดยที่

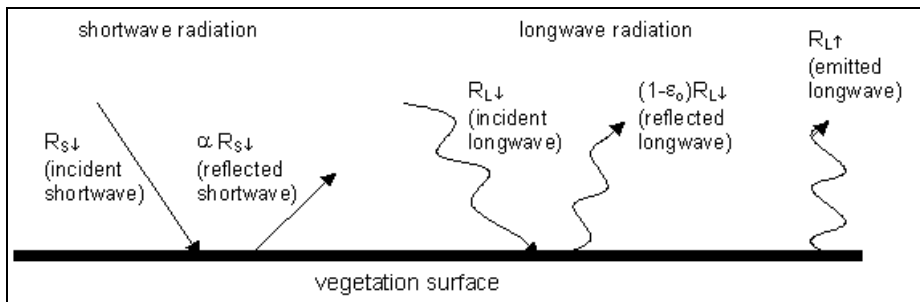
$R_n$  = พลังงานการแผ่รังสีสุทธิที่พื้นผิวได้รับ (net incoming radiation)

$G$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (heat conducted into the earth)

$H$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat into the atmosphere)

$\lambda E$  = พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ โดยที่  $\lambda$  เป็นพลังงานความร้อนแฝงของการระเหย (latent heat of evaporation) ส่วน  $E$  เป็นอัตราการระเหย (rate of evaporation)

1. พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ



ภาพที่ 6-3 สมดุลพลังงานการแผ่รังสี

ที่มา: Morse et al., 2000

พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ (net radiation) เป็นผลต่างระหว่างพลังงานที่พื้นผิวได้รับกับพลังงานที่สูญเสียจากพื้นผิว คำนวณได้ตามหลักสมดุลพลังงานการแผ่รังสี (radiation balance) ดังสมการ

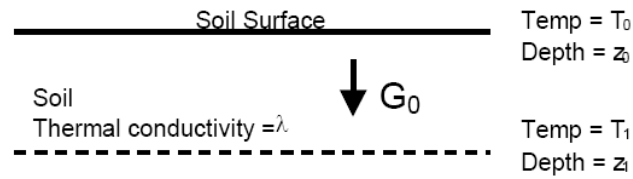
$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (6-2)$$

โดยที่

- $R_n$  = พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ [ $\text{W/m}^2$ ]
- $\alpha$  = สภาพการสะท้อนของพื้นผิว หรือ อัลเบโด (surface albedo)
- $R_{s\downarrow}$  = พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นที่พื้นผิวได้รับ [ $\text{W/m}^2$ ]
- $\epsilon_0$  = สภาพการเปล่งของพื้นผิว (surface emissivity)
- $R_{L\downarrow}$  = พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวที่พื้นผิวได้รับ [ $\text{W/m}^2$ ]
- $R_{L\uparrow}$  = พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวที่สูญเสียจากพื้นผิว [ $\text{W/m}^2$ ]

พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นที่สูญเสียจากพื้นผิว เท่ากับ ผลคูณของพลังงานที่พื้นผิวได้รับกับสภาพการสะท้อน ( $\alpha$ ) หรือ  $\alpha R_{s\downarrow}$  ดังนั้น พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นพื้นผิวได้รับสุทธิ จึงเท่ากับ  $R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow}$  หรือ  $(1-\alpha)R_{s\downarrow}$

2. พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน



ภาพที่ 6-4 การถ่ายเทพลังงานความร้อนลงดิน

ที่มา: Morse et al., 2000

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux) หาจากสมการ

$$G_0 = \lambda_s \frac{dT}{dz} \quad (6-3)$$

โดยที่

$G_0$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux)

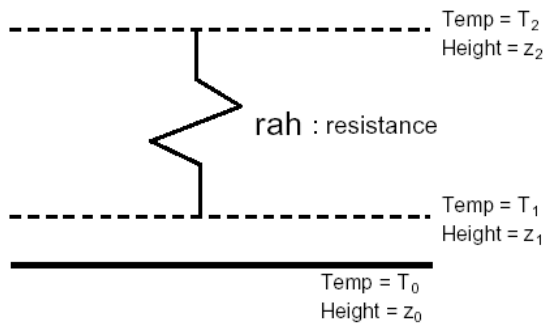
$\lambda_s$  = สภาพการนำความร้อนของดิน (soil thermal conductivity)

$dT/dz$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความลึก

สมการพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดินสามารถเขียนในรูปผลต่าง (finite difference) ได้ดังนี้

$$G_0 = \lambda_s \frac{T_0 - T_1}{Z_0 - Z_1} \quad (6-4)$$

### 3. พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ



ภาพที่ 6-5 ความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน ( $r_{ah}$ )

ที่มา: Morse et al., 2000

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศหรือความร้อนที่รู้สึกได้ (sensible heat flux) หาจากสมการ

$$H = \frac{\rho_{air} \times C_{p_{air}} \times dT}{r_{ah}} \quad (6-5)$$

โดยที่

$H$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux)

$\rho_{air}$  = ความหนาแน่นของอากาศ (air density)

$C_{p_{air}}$  = ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (มีค่า 1,004 J/Kg/K)

$r_{ah}$  = สภาพความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน (aerodynamic resistance to heat transport)

$dT$  = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิอากาศ ( $T_s - T_a$ )

## ข. สัดส่วนการระเหย

---

สัดส่วนการระเหย หรือ evaporative fraction เขียนสัญลักษณ์เป็น  $\Lambda$  หรือ EF เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการระเหยกับพลังงานสุทธิที่พื้นผิวได้รับ ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{(R_n - G)} \quad (6-6)$$

โดยพลังงานสุทธิที่พื้นผิวได้รับเป็นผลต่างระหว่างพลังงานการแผ่รังสีสุทธิ (net radiation) กับ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux)

สัดส่วนการระเหย ( $\Lambda$ ) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งแปลความหมายได้ว่าเมื่อ  $\Lambda = 0$  หมายถึง พลังงานสุทธิที่พื้นผิวได้รับทั้งหมดจะไม่ได้ถูกใช้ในการระเหยน้ำ แต่จะถูกถ่ายเทไปสู่อากาศเป็นพลังงานความร้อนที่รู้สึกได้ (sensible heat flux) ในทางตรงกันข้าม เมื่อเทอมนี้เท่ากับ 1 ( $\Lambda = 1$ ) จะหมายถึง พลังงานสุทธิที่พื้นผิวได้รับจะถูกใช้ในการระเหยน้ำทั้งหมดไม่มีการถ่ายเทสู่อากาศ

การหาสัดส่วนการระเหย อ้างอิงตามสองแนวทาง ได้แก่ วิธี Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998a) และ วิธี Simplified Surface Energy Balance Index, S-SEBI (Menenti and Choudhury, 1993; Roerink et al., 2000)

## 1. กระบวนการวิธี SEBAL

กระบวนการวิธี SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) ต้องทำการประเมินค่าพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงานที่พื้นผิว 3 ตัวในการคำนวณ ได้แก่

- พลังงานการแผ่รังสีสุทธิที่พื้นผิวได้รับ ( $R_n$ )
- พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน ( $G$ )
- พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ ( $H$ )

จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มาแทนในสมการสมดุลพลังงานเพื่อหาค่าพลังงานที่ระเหยน้ำ ( $\lambda E$ ) ตามสมการ

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (6-7)$$

เมื่อแทนสมการ (6-8) ลงในสมการ (6-7) ค่าสัดส่วนการระเหยตามกระบวนการวิธี SEBAL จึงหาได้ตามสมการ

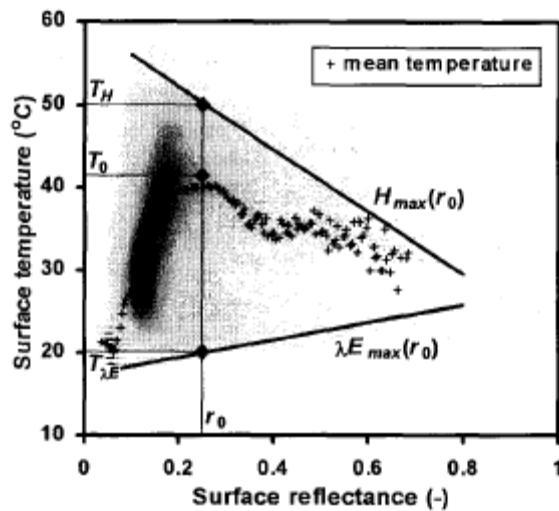
$$\Lambda = \frac{(R_n - G - H)}{(R_n - G)} \quad (6-8)$$

การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ ( $H$ ) ถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่ซับซ้อนที่สุดของกระบวนการวิธี SEBAL ในการคำนวณต้องทำซ้ำหลาย ๆ รอบเพื่อให้ได้คำตอบ และ ต้องเลือกพื้นที่อ้างอิงสองลักษณะจากแผนที่อุณหภูมิพื้นผิว โดยจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดในแผนที่ถือว่าเป็นจุดที่ชุ่มชื้น และ จุดที่อุณหภูมิสูงสุดถือว่าเป็นจุดที่แห้ง

## 2. กระบวนวิธี S-SEBI

กระบวนวิธี S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index) เป็นกระบวนวิธีหาปริมาณการระเหยโดยไม่ต้องประเมินค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ  $H$  และพลังงานที่ใช้ในการระเหย  $\lambda E$

การประมาณค่าสัดส่วนการระเหยใช้ข้อมูลค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface reflectance หรือ surface albedo,  $r_0$ ) และอุณหภูมิพื้นผิวปรับค่ามาที่ระดับความสูงอ้างอิงเดียวกัน (surface temperature for reference elevation,  $T_0$ ) มาพล็อตกราฟดังแสดงในภาพที่ 6-6



ภาพที่ 6-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับค่าการสะท้อนของพื้นผิว

ที่มา: Roerink et al., 2000

จากกราฟจะสามารถสังเกตเห็นแนวเส้นตรงที่เกิดจากจุดหลายจุดเรียงกันเป็นขอบเขตล่างและขอบเขตบนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิว ( $r_0$ ) โดยแนวของขอบเขตล่างถือว่าเป็นบริเวณที่ชุ่มชื้นซึ่งพลังงานที่ได้รับ

ทั้งหมดถูกใช้ในการระเหยน้ำ  $\lambda E_{\max}(r_0)$  ในทางตรงข้าม แนวขอบเขตบนถือเป็นบริเวณที่แห้งซึ่งพลังงานที่ได้รับทั้งหมดถูกถ่ายเทสู่อากาศ  $H_{\max}(r_0)$

ค่าสัดส่วนการระเหยของวิธี S-SEBI คำนวณโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว  $T_0$ , ค่าการสะท้อนของพื้นผิว  $r_0$ , อุณหภูมิสูงสุด  $T_H$  และอุณหภูมิต่ำสุด  $T_{\lambda E}$  โดยค่าของ  $T_H$  และ  $T_{\lambda E}$  นั้นจะแปรผันตาม  $r_0$  ซึ่งเขียนเป็นสมการเชิงเส้นได้เป็น  $T_H = a_H + b_H r_0$  และ  $T_{\lambda E} = a_{\lambda E} + b_{\lambda E} r_0$  ตามลำดับ และสัดส่วนการระเหยของวิธี S-SEBI หาได้จากสมการ

$$\Lambda = \frac{T_H - T_0}{T_H - T_{\lambda E}} \quad (6-9)$$

ในกรณีที่ ต้องการทราบค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ  $H$  และพลังงานที่ใช้ในการระเหย  $\lambda E$  ในช่วงเวลาขณะถ่ายภาพ สามารถนำค่าสัดส่วนการระเหย มาคำนวณย้อนกลับได้ตามสมการ ( 6-10 ) และสมการ ( 6-11 ) ตามลำดับ

$$H = (1-\Lambda)(R_n - G) \quad (6-10)$$

$$\lambda E = \Lambda(R_n - G) \quad (6-11)$$



### ค. ปริมาณการระเหยตลอดวัน

---

ปริมาณการระเหยตลอดวัน คำนวณจากผลคูณของสัดส่วนการระเหย กับพลังงานสุทธิตลอดวัน ( $R_{n24} - G_{o24}$ ) โดยตั้งสมมติฐานว่าค่าสัดส่วนการระเหย คงที่ตลอดทั้งวัน จากนั้น แปลงผลลัพธ์ที่เป็นจากหน่วยพลังงานเป็นปริมาณน้ำด้วย ค่าความร้อนแฝงของการระเหย ( $\lambda$ ) ตามสมการ

$$ET_{a24} = \Lambda \frac{(R_{n24} - G_{o24})}{\lambda} \quad (6-12)$$

โดยที่

$ET_{a24}$  = การใช้น้ำของพืชที่แท้จริงในรอบ 24 ชั่วโมง [mm/day]

$\Lambda$  = ค่าสัดส่วนการระเหย (evaporative fraction) [-]

$R_{n24}$  = พลังงานการแผ่รังสีสุทธิในรอบ 24 ชั่วโมง [ $W/m^2$ ]

$G_{o24}$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดินสุทธิในรอบ 24 ชั่วโมง [ $W/m^2$ ] (กรณีคิดเป็นรายวัน กำหนดให้ เท่ากับ 0)

$\lambda$  = ความร้อนแฝงของการระเหย [J/kg]

- พลังงานการแผ่รังสีสุทธิในรอบ 24 ชั่วโมง ( $R_{n24}$ ) คำนวณจากสมการ

$$R_{n24} = [(1 - \alpha_0)(R_{a24} \times \tau_{sw})] - 110\tau_{sw} \quad (6-13)$$

โดยที่

$\alpha_0$  = สภาพการสะท้อนแสง (surface albedo) เฉลี่ยในรอบ 24 ชั่วโมง

$R_{a24}$  = พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่ชั้นนอกบรรยากาศโลก ในรอบ 24 ชั่วโมง [ $W/m^2$ ]

$\tau_{sw}$  = ค่าการส่งผ่านในหนึ่งทิศทาง

- ความร้อนแฝงของการระเหย [J/kg] คำนวณจากสมการ

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_o)] \times 10^6 \quad (6-14)$$

โดยที่

$T_o$  = อุณหภูมิพื้นผิวที่ปรับแก้ตามระดับความสูง [K]

## 6.3 การคำนวณพารามิเตอร์พื้นผิว

ในหัวข้อนี้ อธิบายวิธีการประมวลผลข้อมูลสภาพพื้นผิวจากข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR ประกอบด้วย สภาพการสะท้อนของพื้นผิว ดัชนีพืชพรรณ และ อุณหภูมิพื้นผิว

### ก. สภาพการสะท้อนของพื้นผิว (Surface Albedo)

---

สภาพการสะท้อนของพื้นผิวจากข้อมูลดาวเทียมเป็นสภาพการสะท้อนในแต่ละช่วงคลื่น การนำไปใช้งานจะต้องปรับเป็นข้อมูลสภาพการสะท้อนโดยรวม (broadband albedo) ซึ่งเป็นค่าการสะท้อนของพื้นผิวที่วัดได้ ณ ชั้นนอกของบรรยากาศ (albedo at the top of atmosphere หรือ planetary albedo) จากนั้น จะทำการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนจากบรรยากาศ (atmospheric correction) จึงจะได้ค่าของสภาพการสะท้อนของพื้นผิว

#### 1. สภาพการสะท้อนของพื้นผิวที่วัดได้ ณ ชั้นนอกของบรรยากาศ

สภาพการสะท้อนของพื้นผิวที่วัดได้ ณ ชั้นนอกของบรรยากาศ (albedo at the top of atmosphere (TOA) หรือ planetary albedo) คำนวณจากสมการ

$$\alpha_p = c_0 + c_1\alpha_1 + c_2\alpha_2 + \dots + c_n\alpha_n \quad (6-15)$$

โดยที่

$\alpha_p$  = สภาพการสะท้อนของพื้นผิวที่ชั้นบนของบรรยากาศโลก

$c_0 \dots c_n$  = ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weight factor)

$\alpha_1 \dots \alpha_n$  = ค่าการสะท้อนรังสีในแต่ละแบนด์ (spectral reflectance)

Valiente และคณะ (1995) ได้แนะนำให้ใช้ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนักสำหรับข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR ดังสมการ

$$\alpha_p = 0.035 + 0.545\alpha_1 + 0.320\alpha_2 \quad (6-16)$$

โดยที่

$\alpha_1$  = ค่าการสะท้อนของข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR แบนด์ที่ 1

$\alpha_2$  = ค่าการสะท้อนของข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR แบนด์ที่ 2

## 2. สภาพการสะท้อนของพื้นผิว

สภาพการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) คำนวณจากสภาพการสะท้อนของพื้นผิวที่วัดได้ ณ ชั้นนอกของบรรยากาศ (planetary albedo) ที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากบรรยากาศ (atmospheric correction) ตามสมการ

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_p - \alpha_{path\_radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad (6-17)$$

โดยที่

$\alpha_0$  = สภาพการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo)

$\alpha_p$  = สภาพการสะท้อนของพื้นผิวที่วัดได้ ณ ชั้นนอกของบรรยากาศ (planetary albedo)

$\alpha_{path\_radiance}$  = สภาพการสะท้อนที่ผิวบนของบรรยากาศ (path radiance albedo)

$\tau_{sw}$  = สภาพการส่งผ่านของบรรยากาศในทิศทางเดียว

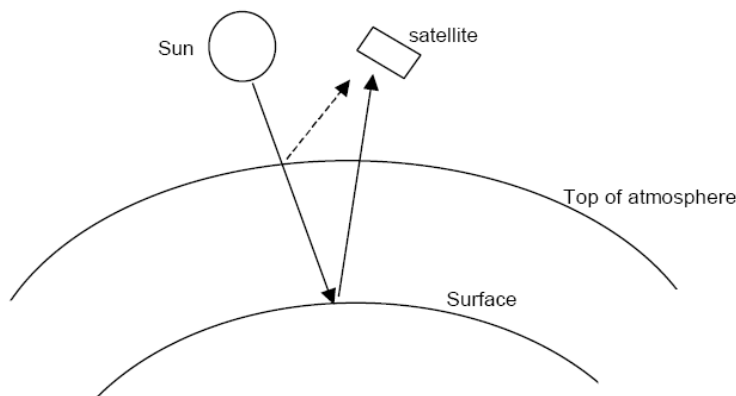
สภาพการสะท้อนที่ผิวบนของบรรยากาศ (path radiance albedo) อาจประมาณได้จากค่าการสะท้อนของทะเลลึกที่ไม่เท่ากับ 0 ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนจากสภาพการสะท้อนที่ผิวบนของบรรยากาศ โดยทั่วไป  $\alpha_{path\_radiance}$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.025 ถึง 0.04

ค่ายกกำลังสองของสภาพการส่งผ่านเป็นการพิจารณาความคลาดเคลื่อนจากการผ่านบรรยากาศใน 2 ทิศทาง ทั้งจากบรรยากาศชั้นนอกสู่ผิวโลกและจากผิวโลกสู่ดาวเทียม สภาพการส่งผ่านสามารถประมาณค่าจากสมการ

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} z \quad (6-18)$$

โดย

$z$  = ระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง [m MSL]



ภาพที่ 6-7 พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และความคลาดเคลื่อนจากบรรยากาศ

ที่มา: Morse et al., 2000

พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือบนดาวเทียม ส่วนหนึ่งสูญหายไประหว่างผ่านชั้นบรรยากาศ และบางส่วนสะท้อนมาจากผิวบนของบรรยากาศโลก

## ข. ดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index)

---

ดัชนีพืชพรรณที่ใช้ในการประมวลผลเป็น ค่า NDVI หรือ Normalized Difference Vegetation Index ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$NDVI = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1} \quad (6-19)$$

โดยที่

$\alpha_1$  = ค่าการสะท้อนของข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR แบนด์ที่ 1

$\alpha_2$  = ค่าการสะท้อนของข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR แบนด์ที่ 2

## ค. อุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature)

---

### 1. อุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature)

การคำนวณค่าอุณหภูมิพื้นผิวจากข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR ใช้วิธี Split-window ซึ่งเขียนในรูปสมการทั่วไป ดังนี้ (Giles, 1993)

$$T_s = c_4 \alpha_2 T_4^2 + c_4 T_4 + c_{45} T_4 T_5 + c_5 T_5 + c_5 \alpha_2 T_5^2 + offset \quad (6-20)$$

โดยที่

$T_s$  = อุณหภูมิพื้นผิว [ K ]

$T_4$  = brightness temperature ของข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR แบนด์ที่ 4 [ K ]

$T_5$  = brightness temperature ของข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR แบนด์ที่ 5 [ K ]

Brightness temperature เป็น อุณหภูมิที่เทียบเท่ากับค่าความสว่างของพื้นผิว ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ ( $c$ ) และ ค่า offset เป็นค่าที่หาจากการวิเคราะห์

การถดถอย (regression analysis) วิธี Split-Window มีผู้ที่ทำการศึกษาและพัฒนาสมการขึ้นมาหลายสมการ ดังสรุปในตารางที่ 6-1

## 2. สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิว

สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิว (surface emissivity) เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุที่อุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุใด ๆ ต่อพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกัน สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวในช่วงคลื่นระหว่าง 8 ถึง 14 ไมโครเมตร ประมาณค่าจาก NDVI ตามสมการ

$$\varepsilon_0 = 1.0094 + 0.047 \ln(NDVI) \quad (6-21)$$

โดยค่า NDVI ที่นำมาคำนวณต้องมากกว่า 0 ในกรณีที่ค่า NDVI น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 ให้กำหนดค่าสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิว เป็น 1 (เช่น พื้นผิวน้ำ) และสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.9

สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวในช่วงคลื่นของแบนด์ที่ 4 ( $\varepsilon_4$ ) และแบนด์ที่ 5 ( $\varepsilon_5$ ) คำนวณได้จากสมการ (Sobrino et al., 1993)

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_0 - 0.03 \quad (6-22)$$

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_0 + 0.01 \quad (6-23)$$

## 3. อุณหภูมิที่พื้นผิวอ้างอิง (surface temperature for reference elevation)

บางกรณี การคำนวณต้องใช้อุณหภูมิที่พื้นผิวอ้างอิงหรือที่ระดับเฉื่อยน้ำทะเล ( $T_0$ ) ซึ่งสามารถปรับแก้ค่าอุณหภูมิตามสมการ

$$T_0 = T_s + 0.0065z \quad (6-24)$$

โดยที่

$$z = \text{ค่าระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง [ m MSL ]}$$

**ตารางที่ 6-1      คำสัมประสิทธิ์ของวิธี Split-window**

ค่าสัมประสิทธิ์	ที่มา
$c_{4^{\wedge}2} = 0$	Price, 1984
$c_4 = 4.33(5.5 - \varepsilon_4)/4.5$	
$c_{45} = 0$	
$c_5 = -3.33(5.5 - \varepsilon_4)/4.5 - 0.75\Delta\varepsilon$	
$c_{5^{\wedge}2} = 0$	
$offset = 0$	
$c_{4^{\wedge}2} = 0$	Becker and Li, 1990
$c_4 = 3.63 + 2.06808(1 - \varepsilon)/\varepsilon + 18.924\Delta\varepsilon/\varepsilon^2$	
$c_{45} = 0$	
$c_5 = -2.63 - 1.91192(1 - \varepsilon)/\varepsilon - 19.406\Delta\varepsilon/\varepsilon^2$	
$c_{5^{\wedge}2} = 0$	
$offset = 0$	
$c_{4^{\wedge}2} = 0$	Prata and Pratt, 1991
$c_4 = 3.46/\varepsilon_4$	
$c_{45} = 0$	
$c_5 = -2.46/\varepsilon_5$	
$c_{5^{\wedge}2} = 0$	
$offset = 40(1 - \varepsilon_4)/\varepsilon_4 + 273.15(1 - c_4 - c_5)$	
$c_{4^{\wedge}2} = 0$	Vidal, 1991
$c_4 = 3.78$	
$c_{45} = 0$	
$c_5 = -2.78$	
$c_{5^{\wedge}2} = 0$	
$offset = 50(1 - \varepsilon)/\varepsilon - 300\Delta\varepsilon/\varepsilon$	

## ตารางที่ 6-1 (ต่อ)

---

$c_4^{\wedge 2}$	=	0	Ulivieri et al.,
$c_4$	=	2.8	1994
$c_{45}$	=	0	
$c_5$	=	-1.8	
$c_5^{\wedge 2}$	=	0	
$offset$	=	$48(1-\varepsilon) - 75\Delta\varepsilon$	

---

ที่มา: Parodi, 2002a

หมายเหตุ

$$\varepsilon = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5) / 2$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$$

$\varepsilon_4$  = สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวในช่วงคลื่นของแบนด์ที่ 4

$\varepsilon_5$  = สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวในช่วงคลื่นของแบนด์ที่ 5



## 6.4 การคำนวณพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงาน

ในหัวข้อนี้ อธิบายวิธีการประมวลผลข้อมูลองค์ประกอบของสมการสมดุลพลังงานจากข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR ประกอบด้วย พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน และ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ

### ก. พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ

---

พารามิเตอร์ที่ต้องคำนวณสำหรับสมดุลพลังงานการแผ่รังสี (radiation balance) ประกอบด้วย

- พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นที่ตกกระทบพื้นผิว
- พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวที่ตกกระทบพื้นผิว
- พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวที่สูญเสียจากพื้นผิว

#### 1. พลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์คลื่นสั้นที่ตกกระทบพื้นผิว

พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นที่ตกกระทบพื้นผิว (incoming shortwave radiation) หาจากสมการ

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} \cos(\theta) d_r \tau_{sw} \quad (6-25)$$

โดยที่

$$G_{SC} = \text{ค่าคงที่ของพลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบ  
บรรยากาศโลกชั้นบนสุด } G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$$

- $\theta$  = มุมเอียงรังสีดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแนวแกนเส้นตรงศีรษะบน  
ท้องฟ้า [radian]
- $\tau_{sw}$  = ค่าการส่งผ่านในหนึ่งทิศทาง
- $d_r$  = ส่วนกลับของระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์  
คำนวณตามสมการ

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \quad (6-26)$$

โดยที่

- $J$  = วันนับจากวันที่ 1 มกราคม โดยเริ่มจาก 1  
และเท่ากับ 365 ในวันที่ 31 ธันวาคม

- ค่า cosine ของมุมเอียงรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแนวแกนเส้นตรงศีรษะบนท้องฟ้า ( $\theta$ ) คำนวณจากสมการ

$$\cos \theta = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \quad (6-27)$$

โดยที่

- $\phi$  = ตำแหน่งละติจูด มีค่าเป็นบวกสำหรับซีกโลกเหนือ [radian]
- $\omega$  = มุมของดวงอาทิตย์ตามเวลา (sunset hour angle) [radian]  
โดยกำหนดให้  $\omega = 0$  ในเวลาเที่ยงตรง  $\omega$  จะมีค่าเป็นบวก  
ในช่วงเช้า และมีค่าเป็นลบในช่วงบ่าย
- $\delta$  = มุมเบนของดวงอาทิตย์ตามฤดูกาล [radian] หาได้จากสมการ

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39\right) \quad (6-28)$$

โดยมุมเบนของดวงอาทิตย์มีค่าเป็นบวกในซีกโลกเหนือช่วงฤดูร้อน

## 2. พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวที่ตกกระทบพื้นผิว

พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวที่ตกกระทบพื้นผิว (incoming longwave radiation) คำนวณจากสมการ

$$R_{L\downarrow} = 1.08[-\ln(\tau_{sw})]^{0.265} \sigma T_{0ref}^4 \quad (6-29)$$

โดยที่

$\tau_{sw}$  = ค่าการส่งผ่านในหนึ่งทิศทาง

$\sigma$  = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann  $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8}$  [ W m<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup> ]

$T_{0ref}$  = อุณหภูมิพื้นผิวที่จุดอ้างอิง [ K ]

อุณหภูมิพื้นผิวที่จุดอ้างอิงเป็นอุณหภูมิพื้นผิวของจุดภาพ ณ ตำแหน่งที่คาดว่ามิพืชไม่มีการขาดน้ำ (well-irrigated pixel) ขณะบันทึกภาพ ซึ่งถือว่าเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิอากาศ และอุณหภูมิพื้นผิว เท่ากัน

## 3. พลังการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวที่สูญเสียจากพื้นผิว

พลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวที่สูญเสียจากพื้นผิว (outgoing longwave radiation) คำนวณจากสมการ

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \sigma T_0^4 \quad (6-30)$$

โดยที่

$\varepsilon_0$  = สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิว (surface emissivity) [-]

$T_0$  = อุณหภูมิพื้นผิว [ K ]

## ข. พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (Soil Heat Flux)

---

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดินไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงจากข้อมูลดาวเทียม เนื่องจากไม่ทราบข้อมูลสภาพการนำความร้อนของดินและอุณหภูมิของดินที่อยู่ชั้นลึกลงไป แต่สามารถประมาณค่าได้จากปริมาณพลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์สุทธิ ดังสมการ

$$G_0 = R_n \times \Gamma \quad (6-31)$$

โดยที่

$G_0$  = พลังงานความร้อนในดิน

$R_n$  = พลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์สุทธิ

$\Gamma$  = อัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนในดินและพลังงานการแผ่รังสีแสงอาทิตย์สุทธิ ประมาณค่าจากสมการ

$$\Gamma = \Gamma' \Gamma'' \quad (6-32)$$

โดยที่  $\Gamma'$  เป็นค่า proportion factor และ  $\Gamma''$  เป็นค่า extinction factor

- Proportion factor ประมาณค่าได้จากสมการ

$$\Gamma' = \frac{T_o}{r_o} \times [0.0032r_o + 0.0062r_o^2] \quad (6-33)$$

โดยที่

$T_o$  = อุณหภูมิพื้นผิว [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$r_o$  = สภาพการสะท้อนแสงของพื้นผิวเฉลี่ยตลอดวัน  
ประมาณค่าจากสภาพการสะท้อนแสงของพื้นผิวขณะถ่ายภาพดาวเทียม ( $\alpha_o$ ) ตามสมการ  $r_o = 1.1 \times \alpha_o$

- Extinction factor ประมาณค่าจากดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ตามสมการ

$$\Gamma'' = 1 - 0.978 \times NDVI^4 \quad (6-34)$$

### ค. พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ

---

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ หาจากสมการ

$$H = \frac{\rho_{air} \times C_{p_{air}} \times dT}{r_{ah}} \quad (6-35)$$

โดยที่

$$H = \text{พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux)} \\ [\text{W m}^{-2}]$$

$$\rho_{air} = \text{ความหนาแน่นของอากาศ (air density)}$$

$$C_{p_{air}} = \text{ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (} C_{p_{air}} = 1004 \text{ J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$$

$$r_{ah} = \text{สภาพความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน} \\ \text{(aerodynamic resistance to heat transport)}$$

$$dT = \text{ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิอากาศ (} T_s - T_a \text{)}$$

ความหนาแน่นของอากาศ (air density) คำนวณจากสมการ

$$\rho_{air} = \frac{1000 \times P}{1.01 \times T_a \times 287} \quad (6-36)$$

โดย

$$T_a = \text{อุณหภูมิอากาศ [K] หาจาก } T_s - dT$$

$$P = \text{ความดันบรรยากาศ ที่เปลี่ยนแปลงตามระดับความสูงจากน้ำ} \\ \text{ทะเลปานกลาง (z) ตามสมการ}$$

$$P = 101.3 \times \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (6-37)$$

จากสมการพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศตัวแปรไม่ทราบค่าได้แก่ ความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน ( $r_{ah}$ ) ซึ่งเทอมนี้จำเป็นต้องใช้ค่า  $H$  ทางด้านซ้ายของสมการมาคำนวณ ทำให้ไม่สามารถแก้สมการได้โดยตรง กระบวนวิธี SEBAL จึงได้เสนอขั้นตอนการคำนวณไว้ดังนี้

- ขั้นตอนแรก คำนวณค่าเริ่มต้นของความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน ( $r_{ah}$ )
- ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ  $H$  จากค่า  $r_{ah}$  เริ่มต้น
- ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า  $r_{ah}$  ปรับแก้จากค่า  $H$  ที่คำนวณได้
- ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า  $H$  ซ้ำจากค่า  $r_{ah}$  ที่ปรับแก้ตามวิธีการในขั้นตอนที่ 2

#### 1. การคำนวณค่าเริ่มต้นของความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน

ค่าเริ่มต้นความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน ( $r_{ah}$ )  
คำนวณจากสมการ

$$r_{ah} = \frac{\ln(z_2/z_1)}{u_* \times k} \quad (6-38)$$

โดย

- $z$  = ระดับความสูง  $z_1$  และ  $z_2$  เหนือพื้นผิว ( $z_1 = 0.1\text{m}; z_2 = 2\text{m}$ )
- $k$  = ค่าคงที่ของ von Karman ( $k = 0.41$ )
- $u_*$  = ค่า friction velocity

จากสมการข้างต้นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ friction velocity ( $u_*$ ) การหาค่าต้องใช้ข้อมูลความเร็วลมที่สถานีตรวจวัด จากนั้นใช้ค่า  $u_*$  ที่สถานีตรวจวัด คำนวณความเร็วลมที่ระดับ 200 เมตร ( $u_{200m}$ ) โดยกำหนดว่าความเร็วลมที่ระดับความสูงนี้เท่ากันทั้งพื้นที่ ท้ายสุด จึงใช้  $u_{200m}$  ที่สถานีตรวจวัดไปคำนวณหาค่า  $u_*$  ที่ตำแหน่งอื่น ๆ ทั้งพื้นที่

- ค่า friction velocity ที่สถานีตรวจวัด

ค่า friction velocity ( $u_*$ ) ที่สถานีตรวจวัด คำนวณได้จากสมการ

$$u_* = \frac{u_x \times k}{\ln(z_x/z_{0m})} \quad (6-39)$$

โดยที่

$u_x$  = ความเร็วลมที่สถานีตรวจวัด [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$z_x$  = ความสูงของเครื่องวัดความเร็วลม [m]

$z_{0m}$  = สภาพความขรุขระของพื้นผิว (surface roughness)

ประมาณจากความสูงเฉลี่ยของพืชพรรณบริเวณใกล้เคียง ( $H$ )

จากสมการ  $z_{0m} = 0.123H$  [m]

- ความเร็วลมที่ระดับ 200 เมตรที่สถานีตรวจวัด

กำหนดให้ ที่ระดับ 200 เมตร ไม่มีอิทธิพลจากสภาพความขรุขระของพื้นผิว (surface roughness) จึงมีความเร็วลมเท่ากับ ความเร็วลมที่ระดับ 200 เมตร ( $u_{200m}$ ) คำนวณได้จากสมการ

$$u_{200m} = \frac{u_* \times \ln(200/z_{0m})}{k} \quad (6-40)$$

โดยที่

$u_*$  = ค่า friction velocity ที่สถานีตรวจวัด

$z_{0m}$  = สภาพความขรุขระของพื้นผิวที่สถานีตรวจวัด

$k$  = ค่าคงที่ของ von Karman ( $k = 0.41$ )

- ค่า friction velocity ที่ pixel อื่น ๆ

ค่า friction velocity ที่ pixel อื่น ๆ ( $u_*(x, y)$ ) คำนวณจากสมการ

$$u_* = \frac{u_{200m} \times k}{\ln(200/z_{0m})} \quad (6-41)$$

โดยที่

$u_{200m}$  = ความเร็วลมที่ระดับ 200 เมตรที่สถานีตรวจวัด

$z_{0m}$  = สภาพความขรุขระของพื้นผิว

ประมาณจากค่า  $NDVI$  ตามสมการ

$$z_{0m} = \exp(a \times NDVI - b) \quad (6-42)$$

โดยที่

$a$  มีค่าใกล้เคียง 1 ในพื้นที่ราบ และ 5.5 ในพื้นที่ภูเขา

$b$  มีค่าประมาณ 3.3



2. การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ [ $\text{W m}^{-2}$ ] คำนวณได้จากสมการ

$$H = \frac{\rho_{air} C_{p_{air}} dT}{r_{ah}} \quad (6-43)$$

ในขั้นตอนนี้ ตัวแปรไม่ทราบค่าคือ  $dT$  ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิว ( $T_s$ ) กับอุณหภูมิอากาศ ( $T_a$ ) การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ ต้องเลือกพื้นที่อ้างอิงสองลักษณะ กล่าวคือ

(1) บริเวณที่ชุ่มชื้น (wet pixel) ถือว่าเป็นพื้นที่ซึ่งพลังงานที่ได้รับทั้งหมด ( $R_n - G$ ) ถูกใช้ในการระเหยน้ำ ( $\lambda E = (R_n - G)$ ) และไม่มีพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ  $H = 0$

(2) บริเวณที่แห้ง (dry pixel) ถือว่าเป็นพื้นที่ซึ่งไม่มีการระเหยของน้ำ ( $\lambda E = 0$ ) และพลังงานที่ได้รับทั้งหมดถูกถ่ายเทสู่อากาศ ( $H = (R_n - G)$ )

การเลือกบริเวณที่ชุ่มชื้น และบริเวณที่แห้ง ใช้ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ระดับอ้างอิง ( $T_0$ ) โดยเลือกบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำสุด ( $T_{cold}$ ) สำหรับที่ชุ่มชื้น (wet pixel) และอุณหภูมิสูงสุด ( $T_{hot}$ ) สำหรับบริเวณที่แห้ง (dry pixel)

▪ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ ที่ dry pixel

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ ที่ dry pixel คำนวณจาก  $H = (R_n - G)$  โดย  $R_n$  คือ ค่าพลังงานการแผ่รังสีสุทธิ และ  $G$  คือ ค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดินที่ตำแหน่ง dry pixel

▪ ค่า  $dT$  ที่ dry pixel

ค่า  $dT$  ที่ dry pixel คำนวณจากสมการ

$$dT = \frac{H \times r_{ah}}{\rho_{air} \times C_{p_{air}}} \quad (6-44)$$

- ค่า  $dT$  ที่ pixel อื่น ๆ

ค่า  $dT$  ที่ pixel อื่น ๆ ได้จากสมการ

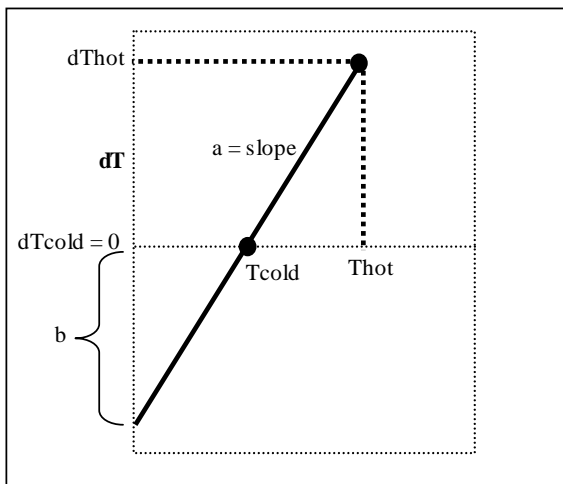
$$dT = aT_o + b \quad (6-45)$$

โดยสัมพันธ์ และ คำนวณจากข้อมูล  $T_{cold}$ ,  $T_{hot}$  และ  $dT$  ที่ dry pixel ดังภาพที่ 6-8

- พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ ที่ pixel อื่น ๆ

เมื่อทราบค่า  $dT$  ก็สามารถคำนวณหาค่า  $H$  ได้จากสมการ

$$H = \frac{\rho_{air} C_{p_{air}} dT}{r_{ah}} \quad (6-46)$$



ภาพที่ 6-8 การหาค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิอากาศ

### 3. การปรับแก้ค่าความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศที่คำนวณได้จากค่าเริ่มต้นของ  $r_{ah}$  นั้นยังไม่ใช้ค่าที่ถูกต้อง จะต้องคำนวณซ้ำโดยทำการปรับแก้ค่า  $r_{ah}$  แล้วจึงย้อนกลับไปคำนวณหา  $H$  ตามขั้นตอนก่อนหน้าซ้ำอีก โดยกระบวนการวิธี SEBAL แนะนำให้คำนวณซ้ำประมาณ 5 รอบจึงจะได้ ค่า  $H$  ที่ถูกต้อง

การปรับแก้ค่าความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน มีการเพิ่มค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ (stability correction factor,  $\Psi_{h(z)}$ ) ดังสมการ

$$r_{ah} = \frac{\ln(z_2/z_1) - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}}{u_* \times k} \quad (6-47)$$

กระบวนการวิธี SEBAL ถือว่าค่า  $\Psi_{h(z)}$  มีค่าน้อยมาก จึงเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$r_{ah} = \frac{\ln(z_2/z_1) - \Psi_{h(z_2)}}{u_* \times k} \quad (6-48)$$

โดยที่ค่า friction velocity ( $u_*$ ) คำนวณจากสมการ

$$u_* = \frac{u_{200m} \times k}{\ln(200/z_{0m}) - \Psi_{h(200m)}} \quad (6-49)$$

จากสองสมการข้างต้นตัวแปรไม่ทราบค่าคือ stability correction factor ( $\Psi_{h(z)}$ ) ซึ่งเลือกคำนวณตามสภาพความเสถียร โดยค่าความเสถียรพิจารณาจากค่าของ Monin-Obukov length ( $L$ ) ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$L = \frac{\rho_{air} \times C_{p,air} \times u_*^3 \times T_0}{k \times g \times H} \quad (6-50)$$

- กรณี  $L$  มีค่าเป็นลบ ( $L < 0$ ) ถือว่าเป็นสภาพไม่เสถียร (unstable condition) ค่าของ stability correction factor คำนวณจากสมการ

$$\Psi_{h(z_2)} = 2 \ln \left( \frac{1 + x_{(z_2)}^2}{2} \right) \quad (6-51)$$

และ

$$\begin{aligned} \Psi_{h(200m)} = & 2 \ln \left( \frac{1 + x_{(200m)}}{2} \right) + \ln \left( \frac{1 + x_{(200m)}^2}{2} \right) \\ & - 2 \arctan \left( x_{(200m)} \right) + 0.5\pi \end{aligned} \quad (6-52)$$

โดยที่  $x$  หาจากสมการ

$$x_{(height)} = \left( 1 - 16 \frac{height}{L} \right)^{0.25} \quad (6-53)$$

และ height คือค่าระดับความสูง  $z_2$  เมตรหรือ 200 เมตร

- กรณี  $L$  มีค่าเป็นบวก ( $L > 0$ ) ถือว่าเป็นสภาพเสถียร (stable condition) ค่าของ stability correction factor คำนวณจากสมการ

$$\Psi_{h(z_2)} = -5 \left( \frac{z_2}{L} \right) \quad (6-54)$$

และ

$$\Psi_{h(200m)} = -5 \left( \frac{z_2}{L} \right) \quad (6-55)$$

## 6.5 กรณีศึกษา

การศึกษานี้ได้ใช้เทคนิคสำรวจระยะไกลสำหรับการประเมินปริมาณการใช้น้ำของพืชในพื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยา ระหว่างฤดูแล้งปี 2544-45 โดยได้เลือกใช้หลักสมมูลของพลังงานที่พื้นผิวสำหรับการประเมินอัตราการระเหย จาก 2 กระบวนวิธี เปรียบเทียบกัน คือ กระบวนวิธี SEBAL และ กระบวนวิธี S-SEBI พร้อมกันนี้ ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์กับการใช้น้ำของพืชที่หาจากวิธี FAO Penman-Monteith และถาดวัดการระเหย Class-A สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมอาจดูได้จาก (เอกสิทธิ์, 2547; 2548)

### ก. คำนำ

---

การใช้น้ำเพื่อการเกษตรเป็นกิจกรรมที่มีปริมาณการใช้น้ำมากที่สุด และมีลำดับความสำคัญสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่ทำการเกษตรเป็นหลัก อย่างประเทศไทย การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอย่างถูกต้องแม่นยำช่วยให้สามารถวางแผนบริหารจัดการน้ำอย่างมีประสิทธิภาพและใช้น้ำให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุด ถึงกระนั้น การทำงานในพื้นที่ขนาดใหญ่ระดับลุ่มน้ำหรือทั้งระบบส่งน้ำชลประทานมีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก การรวบรวมข้อมูลอย่างครบถ้วนและถูกต้องสมบูรณ์นั้นกระทำได้ยาก และยิ่งเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง การใช้เทคนิคการสำรวจระยะไกลเป็นแนวทางหนึ่งที่แก้ปัญหาในด้านข้อมูลได้ เนื่องจากแนวทางนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ดีกับพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยให้ผลที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง และไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดในภาคสนามมากนัก

การศึกษานี้เป็นการประเมินแนวทางการใช้ข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR ที่จัดหาได้จากอินเทอร์เน็ต เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สภาพการใช้น้ำของพืชทั้งภูมิภาค โดยมีวัตถุประสงค์การดำเนินการดังต่อไปนี้ (1) เพื่อศึกษาและทดสอบกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR สำหรับใช้ประเมิน

---

ปริมาณการใช้น้ำของพืช และ (2) เพื่อประเมินปริมาณการใช้น้ำของพืชในเขตที่ราบลุ่มเจ้าพระยาโดยเทคนิคการสำรวจระยะไกล พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับเทคนิคที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

## ข. เครื่องมือและวิธีการ

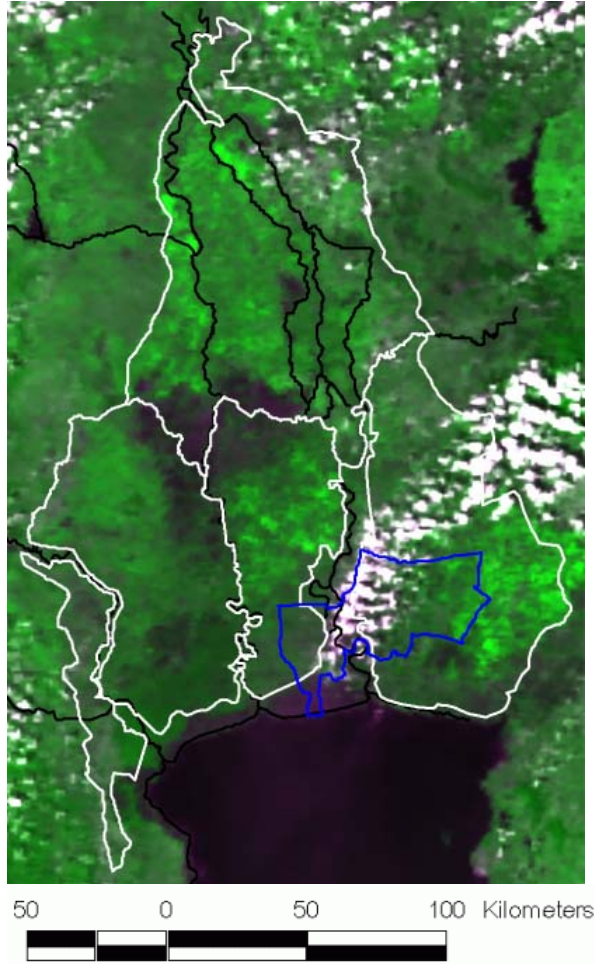
---

### ข.1 พื้นที่ศึกษา

ที่ราบลุ่มเจ้าพระยา หรือ Chao Phraya Delta เป็นพื้นที่ราบลุ่มรูปสามเหลี่ยมอยู่บริเวณตอนล่างของที่ราบลุ่มภาคกลาง (Central Plain) สภาพภูมิอากาศของพื้นที่นี้ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคมทำให้มีฝนตก และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเมษายน มีผลให้อากาศแห้งแล้งและหนาวเย็นเป็นบางช่วง ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีในพื้นที่ราบภาคกลาง อยู่ระหว่าง 1,000 ถึง 1,400 มิลลิเมตร

ปริมาณน้ำท่าสูงสุดของลำน้ำสายหลักในพื้นที่ เกิดขึ้นในช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม อันมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของลมมรสุมและลมพายุโซนร้อนจากทะเลจีนใต้ ลำน้ำสายหลักที่ไหลผ่านที่ราบภาคกลาง ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำสุพรรณ (หรือแม่น้ำท่าจีน) และ แม่น้ำแม่กลอง

ที่ราบลุ่มเจ้าพระยามีสภาพเป็นพื้นที่ราบลุ่มและดินเป็นดินตะกอนเหนียวมีสภาพพื้นที่เหมาะสมต่อการเกษตร โดยเฉพาะการทำนา เมื่อมีการพัฒนาแหล่งเก็บกักน้ำบริเวณต้นน้ำและระบบชลประทาน ทำให้มีน้ำเพียงพอสำหรับการทำนาปรัง นอกจากนี้ ยังได้มีการพัฒนาพื้นที่จากการทำนา เป็นการทำสวนผลไม้ สวนผัก สวนดอกไม้ และบางบริเวณได้พัฒนาไปเป็นพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ



**ภาพที่ 6-9 ที่ราบลุ่มเจ้าพระยา**

หมายเหตุ: ข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR สีผสม RGB 1:2:1 ภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544

ที่มา: เอกสิทธิ์, 2547

## ข.2 ข้อมูลที่ใช้

ข้อมูล AVHRR ของดาวเทียม NOAA ได้จากการประมวลผลผ่านเครือข่ายโดยโปรแกรม PaNDA (Package for Noaa Data Analysis) ที่เว็บไซต์ของ Institute of Industrial Science, University of Tokyo ข้อมูลดาวเทียมมีขนาดจุดภาพ 30 พิลิปดา ในการประมวลผลได้ทำการแปลงระบบพิกัดเป็นระบบ UTM, Datum WGS84 โดยมีขนาดจุดภาพ 1,000 เมตร

ตารางที่ 6-2 ข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRRs ที่ใช้ศึกษา

เดือน	วันที่มีข้อมูลดาวเทียม
พฤศจิกายน 2544	วันที่ 10, 19, 29
ธันวาคม 2544	วันที่ 9, 27
มกราคม 2545	วันที่ 3, 23, 30
กุมภาพันธ์ 2545	วันที่ 10, 20, 28
มีนาคม 2545	วันที่ 2, 10, 16, 27
เมษายน 2545	วันที่ 5, 22

ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ เป็นข้อมูลแบบจำลองระดับความสูง (Digital Elevation Model, DEM) จัดทำโดยสถาบัน National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ข้อมูลเป็นแบบราสเตอร์ มีขนาดจุดภาพ (pixel size) 30 พิลิปดา

ข้อมูล DEM และข้อมูลดาวเทียมที่เลือกใช้ครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาและแม่กลอง โดยมีพิกัดระหว่างละติจูด 13°N ถึง 17°N และลองจิจูด 98°E ถึง 102°E โดยข้อมูลดาวเทียมเป็นข้อมูลในช่วงฤดูแล้งเดือนพฤศจิกายน 2544 ถึงเมษายน 2545

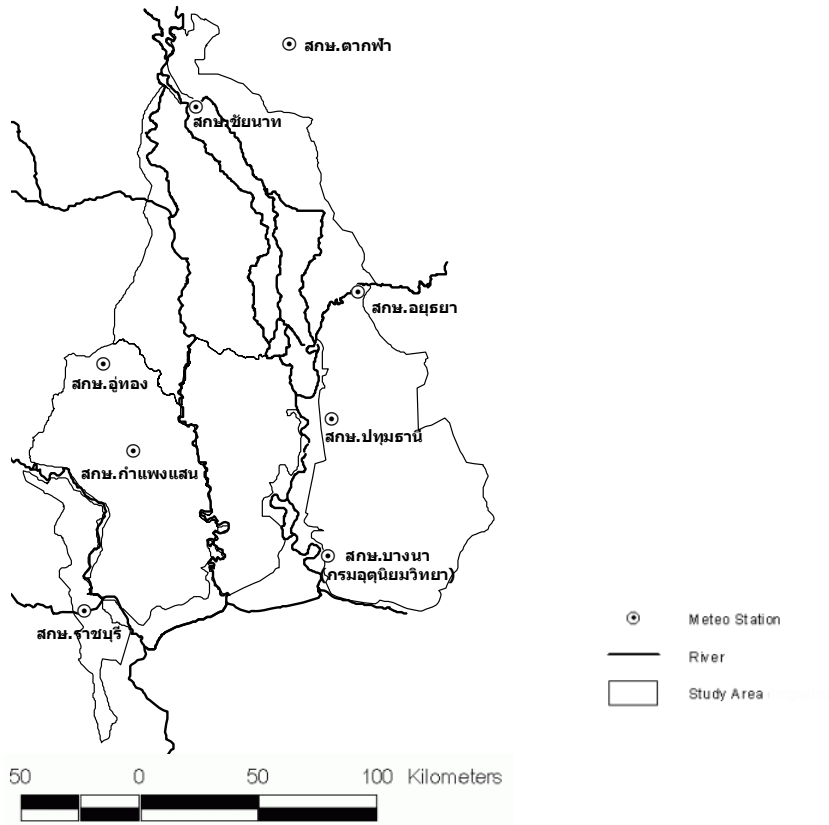


ข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันระหว่างปี 2544 ถึง 2545 ใช้สำหรับการประเมินการใช้น้ำของพืชโดยวิธี FAO Penman-Monteith และถาดวัดการระเหย Class A ประกอบด้วย

- อุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุด
- ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดและต่ำสุด
- ทิศทางและความเร็วลมเฉลี่ย
- ความยาวนานของแสงแดด
- ปริมาณน้ำระเหยจากถาดวัดการระเหย
- ปริมาณน้ำฝน

สถานีตรวจอากาศเกษตร (สกษ.) ที่ตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ศึกษา จำนวน 8 สถานี ดังตารางที่ 6-3

ตารางที่ 6-3		สถานีตรวจอากาศในบริเวณพื้นที่ศึกษา		
รหัสสถานี	ชื่อสถานี	พิกัด		ระดับความสูง (เมตร รทก.)
		ละติจูด	ลองจิจูด	
400301	สกษ. ดากฟ้า	15° 21' 00"	100° 30' 00"	87
402301	สกษ. ชัยนาท	15° 09' 00"	100° 11' 00"	15
415301	สกษ. อยุธยา	14° 32' 00"	100° 43' 40"	8
419301	สกษ. ปทุมธานี	14° 07' 00"	100° 38' 00"	7
424301	สกษ. ราชบุรี	13° 29' 14"	99° 47' 51"	-
425301	สกษ. อุทอง	14° 18' 00"	99° 52' 00"	6
451301	สกษ. กำแพงแสน	14° 01' 00"	99° 58' 00"	7
455301	สกษ. บางนา	13° 40' 00"	100° 37' 00"	3



**ภาพที่ 6-10**      **สถานีตรวจอากาศในเขตพื้นที่ศึกษา**  
 ที่มา: เอกสิทธิ์, 2547

### ข.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

การประเมินปริมาณการระเหยจากข้อมูลดาวเทียม ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นแรกเป็นการเตรียมข้อมูล ซึ่งเป็นการจัดหาข้อมูลดาวเทียมโดยการดาวน์โหลดจากอินเทอร์เน็ต รวมถึง การปรับรูปแบบของข้อมูลและระบบพิกัดอ้างอิง และ การตัดจุดภาพที่เป็นเมฆออกจากภาพถ่าย (cloud masking)

ขั้นที่สอง เป็นการประเมินอัตราการระเหยจากข้อมูลดาวเทียมตามหลักสมมูลพลังงาน แบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนย่อย ประกอบด้วย

- การหาพารามิเตอร์พื้นผิว
- การหาพารามิเตอร์ของสมการสมมูลพลังงาน
- การหาสัดส่วนการระเหย
- การหาอัตราการระเหยเฉลี่ยในรอบวัน

ขั้นที่สาม การแปลผลลัพธ์และตรวจสอบ การตรวจสอบผลเชิงคุณภาพ เป็นการพิจารณาความเป็นไปได้และความสอดคล้องของข้อมูลที่ปรากฏขึ้นในแผนที่ ทั้งในเรื่องของตำแหน่งและเวลา ซึ่งกระทำร่วมกับการแปลผลลัพธ์เชิงบรรยาย และการตรวจสอบภาคสนาม

นอกจากนี้ ได้ใช้วิธีการทางสถิติช่วยในการสรุปข้อมูลเชิงปริมาณ เพื่อใช้ตรวจสอบเปรียบเทียบกับผลการใช้น้ำของพืชจากวิธีต่าง ๆ

## ค. ผลและวิจารณ์

---

### ค.1 สัดส่วนการระเหย

การหาสัดส่วนการระเหย ได้กระทำตามสองกระบวนการวิธี ได้แก่ SEBAL (ภาพที่ 6-13) และ S-SEBI (ภาพที่ 6-14) จากการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ (ตารางที่ 6-4 และ ภาพที่ 6-11) พบว่า สัดส่วนการระเหยที่หาจากทั้งสองกระบวนการวิธีให้ผลลัพธ์ที่ไม่ต่างกันมากนัก โดยมีค่าต่างกันน้อยกว่า 0.10 ทั้งพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation) โดยเดือนที่มีค่าต่างกันค่อนข้างมาก (มากกว่า 0.10) เป็นผลลัพธ์ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์และเดือนมีนาคมของพื้นที่ในเขตชลประทาน

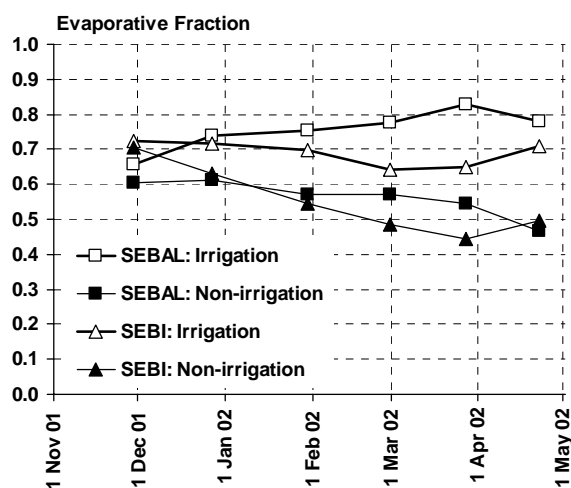
ความแตกต่างของสัดส่วนการระเหยระหว่างพื้นที่ในกับนอกเขตชลประทานมีค่าน้อยในช่วงปลายฤดูฝน/ต้นฤดูแล้ง และค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงปลายฤดูแล้ง เนื่องจาก ในช่วงฤดูแล้งพื้นที่ในเขตชลประทานยังคงมีความชุ่มชื้นจากน้ำชลประทาน เมื่อได้รับพลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์ พื้นที่นี้ยังคงมีปริมาณน้ำสำหรับการระเหย ทำให้ค่าสัดส่วนการระเหยมีค่าสูงและมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย

ในทางตรงกันข้ามกับพื้นที่นอกเขตชลประทาน ซึ่งในช่วงปลายฤดูฝนมีความชุ่มชื้นใกล้เคียงกับพื้นที่ในเขตชลประทานทำให้ค่าสัดส่วนการระเหยในช่วงนี้ไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูแล้งปริมาณความชื้นในดินลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งมีผลให้ค่าสัดส่วนการระเหยมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 6-4 สัดส่วนการระเหยโดยวิธี SEBAL และ S-SEBI

DATE	$\Lambda$ [SEBAL]		$\Lambda$ [S-SEBI]	
	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation
29 Nov 01	0.61	0.66	0.71	0.73
27 Dec 01	0.61	0.74	0.63	0.72
30 Jan 02	0.57	0.75	0.54	0.70
28 Feb 02	0.57	0.78	0.49	0.64
27 Mar 02	0.54	0.83	0.44	0.65
22 Apr 02	0.47	0.78	0.50	0.71

ที่มา: เอกสิทธิ์, 2548

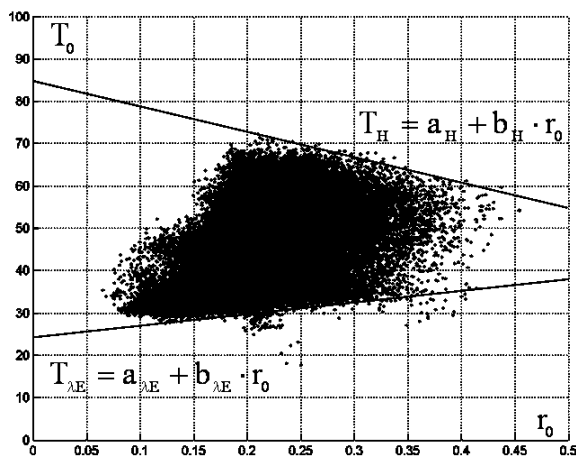


ภาพที่ 6-11 สัดส่วนการระเหยโดยวิธี SEBAL และ S-SEBI ในพื้นที่ชลประทานและนอกเขตชลประทาน

ที่มา: เอกสิทธิ์, 2548

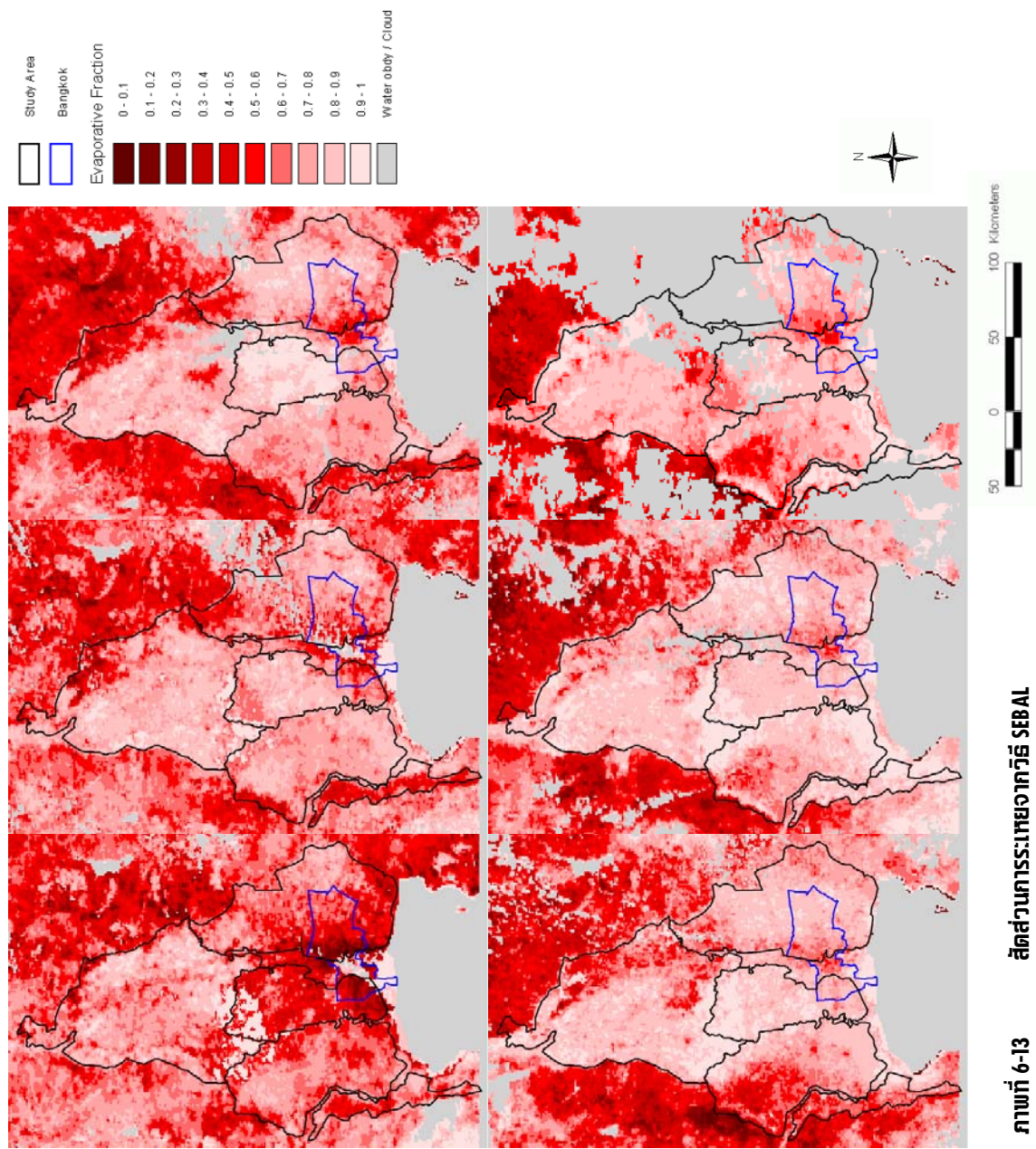
อนึ่ง ในการคำนวณหาสัดส่วนการระเหยโดยวิธี SEBAL และ วิธี S-SEBI นั้น ทั้งสองวิธีจำเป็นต้องกำหนดพื้นที่อ้างอิงเป็นบริเวณที่ชุ่มชื้น และบริเวณที่แห้ง ข้อจำกัดประการหนึ่งของทั้งสองวิธีสำหรับการนำมาใช้กับพื้นที่ในเขตชลประทาน คือ การกำหนดบริเวณที่แห้ง ซึ่งหาได้ยากในเขตชลประทาน

นอกจากนี้ วิธี SEBAL เลือกจุดภาพเพียงจุดเดียวเป็นพื้นที่อ้างอิง หากเลือกจุดภาพที่ไม่เหมาะสมจะมีผลอย่างมากต่อผลลัพธ์ ส่วนวิธี S-SEBI (ภาพที่ 6-12) ถึงแม้ว่าจะใช้จุดภาพหลายจุดที่เรียงเป็นแนวขอบเขตล่างและขอบเขตบน ทำให้ผลลัพธ์น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น แต่ปัญหาที่พบคือมีจำนวนจุดภาพไม่พอเพียงที่จะเรียงเป็นแนวเส้นตรงขอบเขตบนของบริเวณที่แห้ง



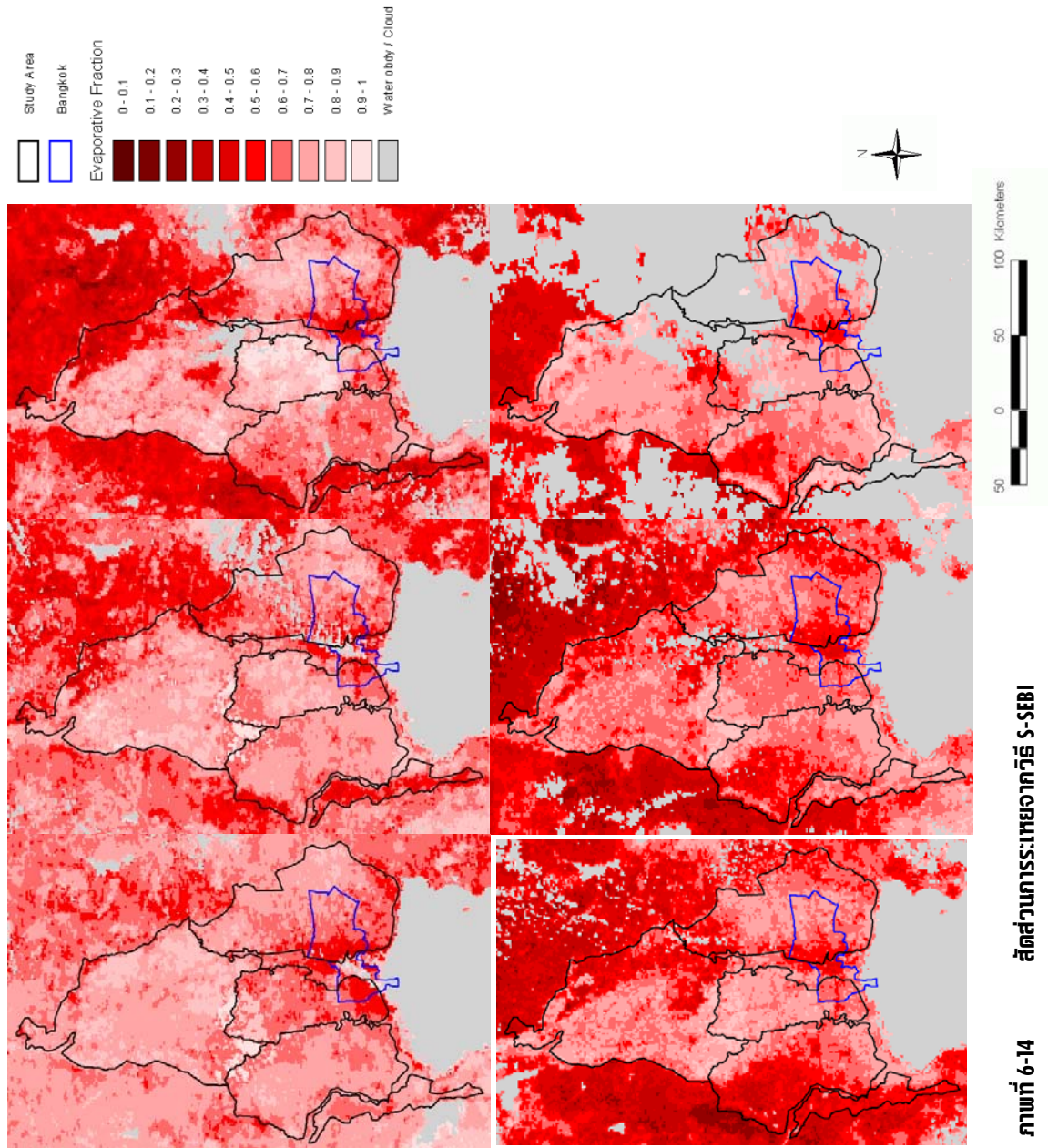
ภาพที่ 6-12 ข้อมูลสภาพการสะท้อนที่พื้นผิวและอุณหภูมิพื้นผิวที่ระดับอ้างอิง สำหรับการหาสัดส่วนการระเหยโดยวิธี S-SEBI

ที่มา: เอกสิทธิ์, 2548











## ค.2 ปริมาณการใช้น้ำของพืช

ผลการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชรายวันจากสองวิธีเปรียบเทียบกันได้แก่ วิธี SEBAL (ภาพที่ 6-15 (ก) และภาพที่ 6-17) และวิธี S-SEBI (ภาพที่ 6-15 (ข) และภาพที่ 6-18) พบว่า ทั้งสองวิธีให้ค่าเฉลี่ยของปริมาณการใช้น้ำของพืชไม่ต่างกันมากนัก โดยมีค่าต่างกันน้อยกว่า 1 มิลลิเมตรต่อวัน ทั้งพื้นที่ในเขตชลประทานและนอกเขตชลประทาน โดยเดือนที่มีค่าต่างกันค่อนข้างมาก (มากกว่า 0.5 มิลลิเมตรต่อวัน) เป็นผลลัพท์ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์และเดือนมีนาคม โดยเฉพาะผลของพื้นที่ในเขตชลประทาน ซึ่งมีผลคล้ายคลึงกับผลของค่าสัดส่วนการระเหย

ความแตกต่างของปริมาณการใช้น้ำของพืชระหว่างพื้นที่ในเขตชลประทานกับนอกเขตชลประทานของทั้งสองวิธี มีค่าน้อยในช่วงปลายฤดูฝน/ต้นฤดูแล้ง และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูแล้ง (ภาพที่ 6-15) ซึ่งสามารถอธิบายได้คล้ายคลึงกับกรณีผลลัพท์ของค่าสัดส่วนการระเหย นอกจากนี้ ได้แสดงเส้นทึบสีเข้ม (ภาพที่ 6-15) ซึ่งเป็นค่าของปริมาณการใช้น้ำของพืชในกรณีที่ค่าสัดส่วนการระเหย เท่ากับ 1 โดยสามารถแปลความหมายได้ว่าเป็นปริมาณการใช้น้ำของพืชในกรณีที่มิมีน้ำไม่จำกัด (ETc) โดยเส้นนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ฤดูแล้ง เมื่อพิจารณาพื้นที่ในเขตชลประทาน ปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แท้จริง (ETa) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นขนานไปกับแนวโน้มของปริมาณการใช้น้ำของพืชสูงสุดของพืช ส่วนปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แท้จริงของพื้นที่นอกเขตชลประทานมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

ส่วนปริมาณการใช้น้ำที่แท้จริง (ETa) ทั้งที่หาจากวิธี SEBAL และ วิธี S-SEBI มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากค่าน้อยในช่วงปลายฤดูฝนจนไปหาค่ามากในฤดูแล้ง ซึ่งเป็นแนวโน้มที่สมเหตุสมผล เนื่องจาก อัตราการระเหยส่วนนี้เป็นผลลัพท์จากพื้นที่ในเขตชลประทาน ซึ่งในฤดูแล้งยังคงมีการส่งน้ำชลประทานทำให้ยังคงมีน้ำสำหรับการระเหย แต่ให้ค่าต่ำกว่าเนื่องจากยังคงมีปริมาณน้ำที่จำกัดและการกระจายไม่สม่ำเสมอ

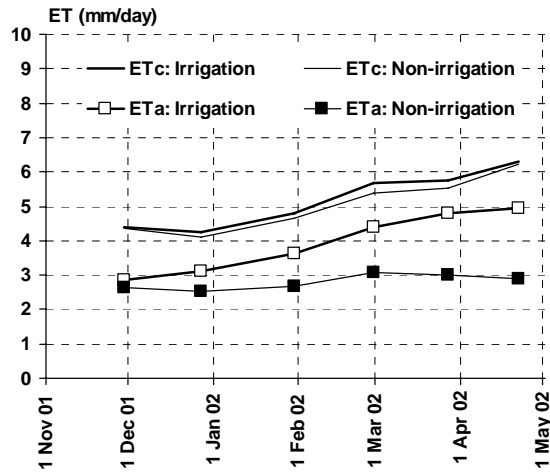
**ตารางที่ 6-5 ปริมาณการใช้น้ำของพืช**

DATE	ETa [SEBAL]		ETa [S-SEBI]		ETc	ETo	ETo
	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	EF = 0	Evap. Pan	Penman-Monteith
29 Nov 01	2.87	2.65	3.18	3.09	4.39	3.45	3.71
27 Dec 01	3.12	2.51	3.03	2.59	4.23	3.70	3.94
30 Jan 02	3.62	2.67	3.36	2.54	4.80	3.84	4.42
28 Feb 02	4.39	3.07	3.62	2.61	5.66	3.93	4.87
27 Mar 02	4.78	3.02	3.75	2.45	5.76	5.21	6.12
22 Apr 02	4.94	2.90	4.48	3.07	6.32	5.84	7.14

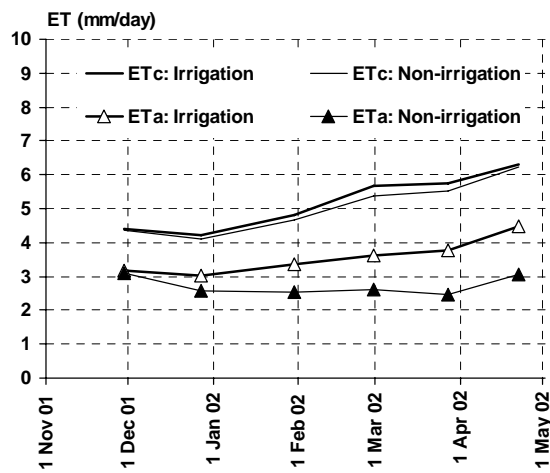
ที่มา: เอกสิทธิ์, 2548

การเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำของพืชกับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงที่คำนวณโดยวิธี FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) และถาดวัดการระเหย Class A (Doorenbos and Pruitt, 1977)

ในการเปรียบเทียบจึงเลือกใช้ปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของพืช (crop evapotranspiration, ETc) ที่ประเมินจากข้อมูลดาวเทียมซึ่งได้กำหนดให้ค่าสัดส่วนการระเหย เท่ากับ 1 (ภาพที่ 6-16) ซึ่งค่า ETc นี้ได้ลดปัจจัยความแตกต่างเรื่องปริมาณความชื้นในดิน ผลการเปรียบเทียบพบว่า ค่า ETc ประเมินจากข้อมูลดาวเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่า ETo จากวิธี FAO Penman-Monteith โดยมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยในช่วง 4 เดือนแรก (ระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์) และต่ำกว่าในช่วง 2 เดือนหลัง และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

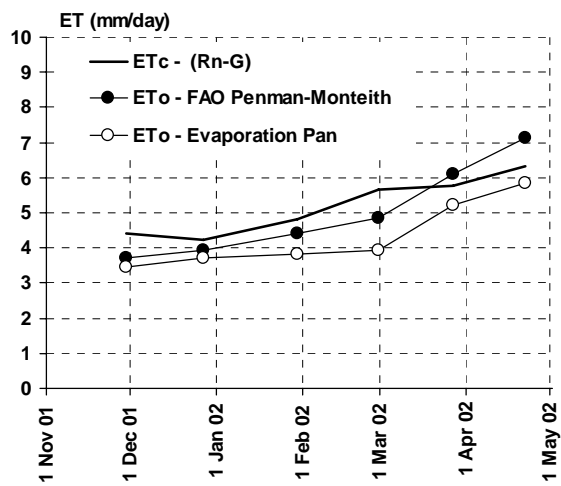


(ก) วิธี SEBAL



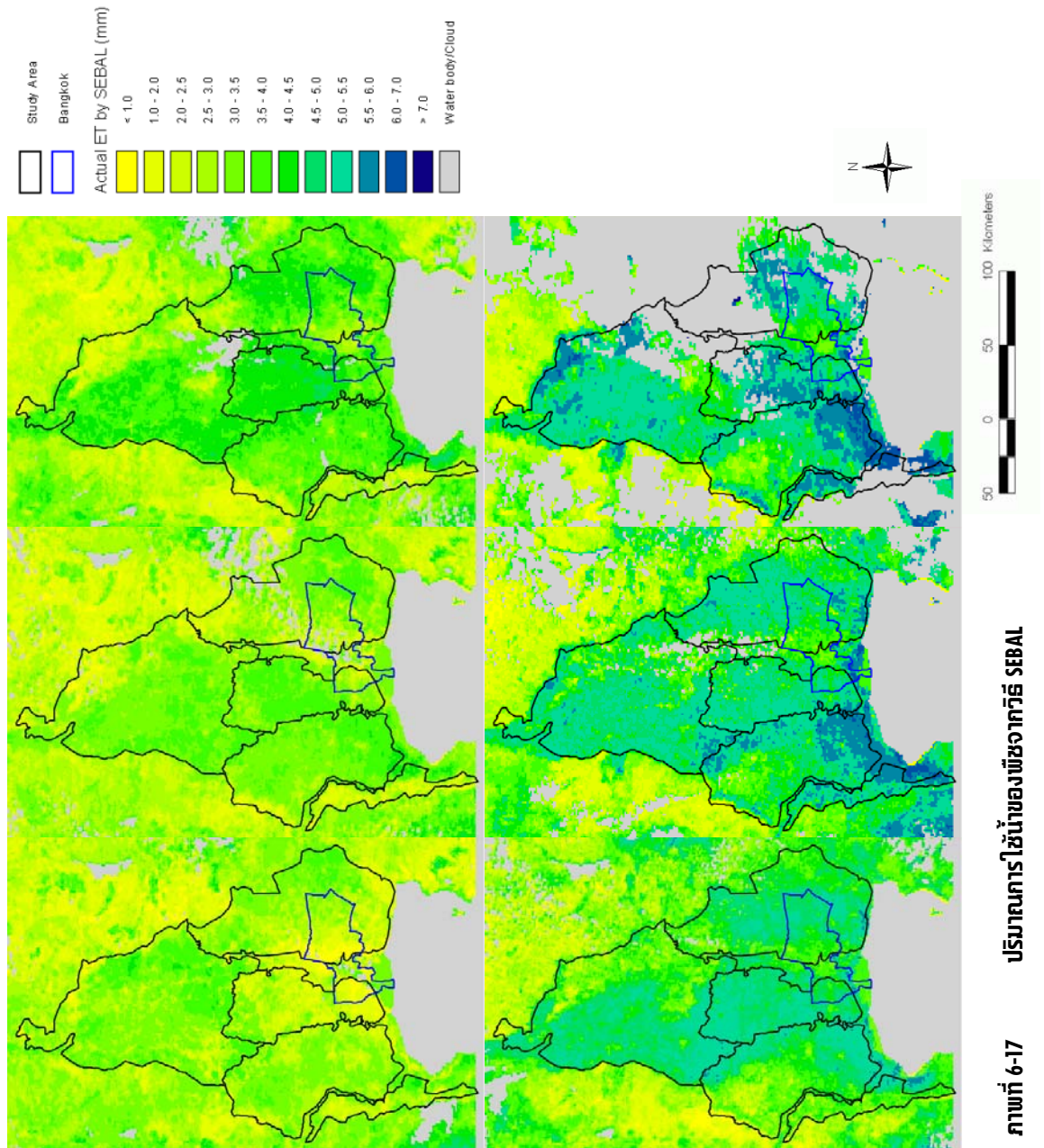
(ข) วิธี S-SEBI

ภาพที่ 6-15 ปริมาณการใช้น้ำของพืช (ก) วิธี SEBAL (ข) วิธี S-SEBI  
ที่มา: เอกสิทธิ์, 2548



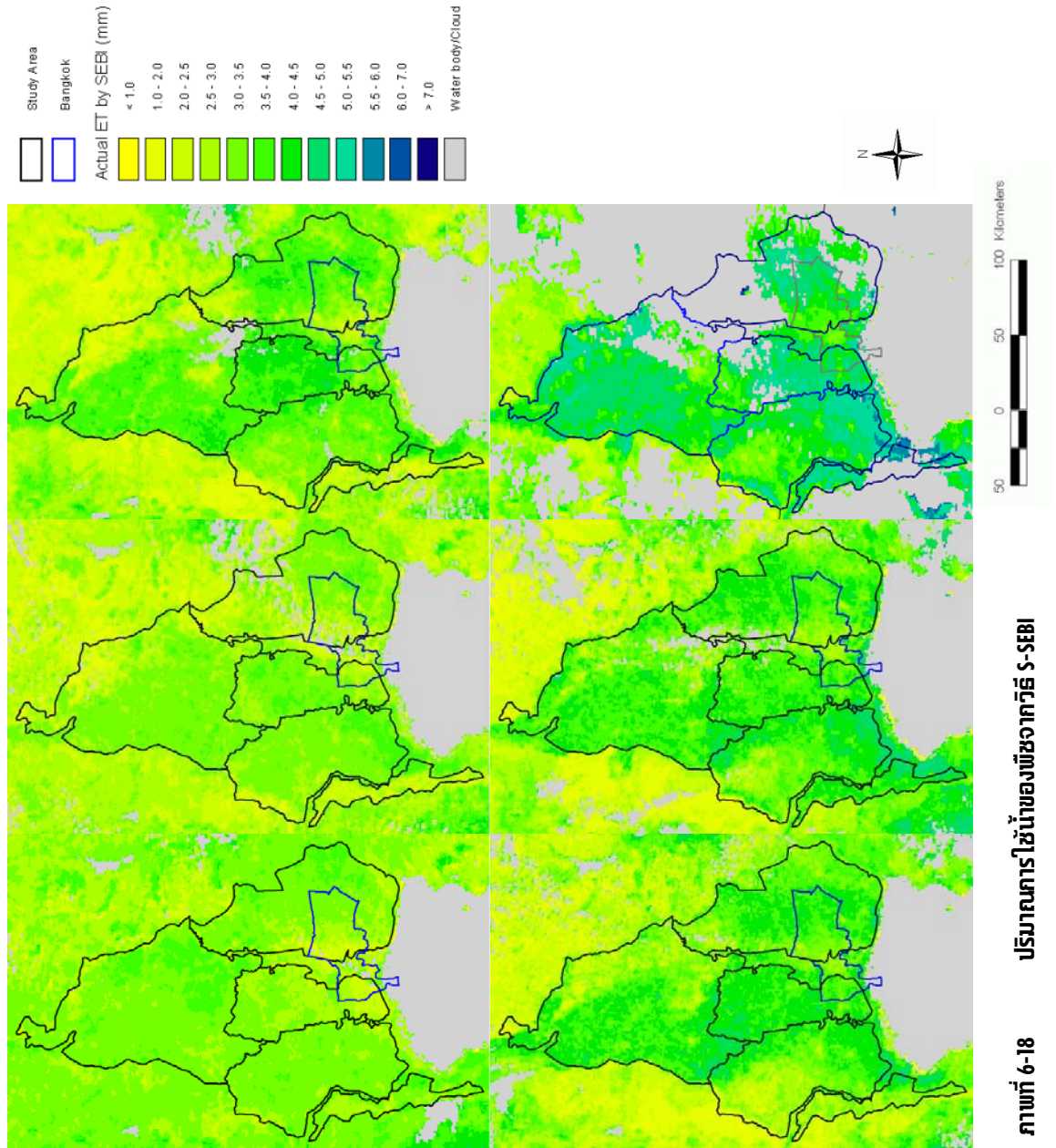
ภาพที่ 6-16 การเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำของพืช (ETc) กับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ETo)

ที่มา: เอกสิทธิ์, 2548









ภาพที่ 6-18 ปริมาณการใช้น้ำของพืชจากวิธี S-SEBI



## ง. สรุปผล

---

การศึกษานี้ได้ใช้เทคนิคสำรวจระยะไกลสำหรับการประเมินปริมาณการใช้น้ำของพืชในพื้นที่ราบลุ่มเจ้าพระยา ระหว่างฤดูแล้งปี 2544-45 โดยได้เลือกใช้หลักสมมูลของพลังงานที่พื้นผิวสำหรับการประเมินอัตราการระเหย จาก 2 กระบวนวิธี เปรียบเทียบกัน คือ กระบวนวิธี SEBAL และ กระบวนวิธี S-SEBI พร้อมกันนี้ ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์กับการใช้น้ำของพืชที่หาจากวิธี FAO Penman-Monteith และถาดวัดการระเหย Class-A

ผลการประเมิน พบว่า ปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของพืชในเขตชลประทานมีค่าระหว่าง 4.2 ถึง 6.3 มิลลิเมตรต่อวัน โดยมีแนวโน้มเพิ่มจากช่วงต้นฤดูแล้งในเดือนพฤศจิกายน และสูงสุดในเดือนเมษายน ส่วนปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แท้จริงมีค่าอยู่ระหว่าง 3 ถึง 5 มิลลิเมตรต่อวัน สำหรับพื้นที่ในเขตชลประทาน โดยมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับปริมาณการใช้น้ำสูงสุด สำหรับพื้นที่นอกเขตชลประทาน ปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แท้จริงมีค่าอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 3 มิลลิเมตรต่อวัน ความแตกต่างของปริมาณการใช้น้ำของพืชนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าสัดส่วนการระเหยของพื้นที่ทั้งสอง โดยพื้นที่ในเขตชลประทานมีค่าสัดส่วนการระเหยเฉลี่ยราว 0.7 ถึง 0.75 ในขณะที่พื้นที่นอกเขตมีค่าเฉลี่ยราว 0.55 เท่านั้น ส่วนผลการเปรียบเทียบกับวิธี FAO Penman-Monteith พบว่าปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของพืชที่หาจากข้อมูลดาวเทียม NOAA/AVHRR ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงและมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการประยุกต์การสำรวจระยะไกลสำหรับหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทาน ในส่วนกระบวนวิธีหาการใช้น้ำของพืชจากข้อมูลดาวเทียมโดยวิธี SEBAL ให้ผลที่น่าเชื่อถือ ในขณะที่วิธี S-SEBI มีความเหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจาก กระบวนวิธีไม่ซับซ้อนมากนัก



## บรรณานุกรม

- กรมชลประทาน. 2534. อภิธานศัพท์เทคนิคด้านการชลประทานและระบายน้ำ. กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ. 140 น.
- กาญจน์ หมวกกุล. 2545. การศึกษาความต้องการน้ำของการผลิตเมล็ดพันธุ์แตงกวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 260 น.
- ขวัญชัย เดชอุปการ. 2552. การศึกษาปริมาณการใช้น้ำของสบู่ดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. สนพ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา. 2547. พืชเศรษฐกิจ. พิมพ์ครั้งที่ 2. สนพ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 460 น.
- คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน. 2546. การวางแผนและการออกแบบระบบส่งน้ำชลประทาน. สนพ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 250 น.
- จงจิตร หิรัญลาภ มปป.. กระบวนการพลังงานรังสีอาทิตย์ในรูปความร้อน. สนพ.ดวงกมล(2520), กรุงเทพฯ. 295 น.
- จรรยา นามแก้ว. 2543. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวโพดฝักอ่อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 96 น.
- ชาญณรงค์ ตั้งคณาทรัพย์. 2551. การวิเคราะห์ผลผลิตภาพของน้ำสำหรับการปลูกข้าวในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนโดยใช้แบบจำลองพยากรณ์ผลผลิตพืชและเทคนิคการสำรวจระยะไกล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชาญณรงค์ ตั้งคณาทรัพย์ และ เอกสิทธิ์ โสมลิตสกุลชัย. 2550. การวิเคราะห์อิทธิพลของภูมิอากาศต่อผลผลิตภาพของน้ำในการทำนาข้าวโดยแบบจำลอง SWAP. ใน: การ

- ประชุมวิชาการวิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งชาติ ครั้งที่ 2, 30-31 สิงหาคม 2550.  
คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำในคณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรม  
โยธา, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท),  
กรุงเทพฯ.
- ชูพันธุ์ ชมภูจันทร์. 2547. วิธีการสำรวจระยะไกลสำหรับประเมินการใช้น้ำในนาข้าว:  
กรณีศึกษาโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชูพันธุ์ ชมภูจันทร์ และ เอกสิทธิ์ โสมิตตกุลชัย. 2548. การศึกษาปฏิทินการเพาะปลูกข้าว  
ฤดูแล้งในโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกโดยภาพถ่ายจากดาวเทียม  
NOAA/AVHRR. ใน: เรื่องเต็มการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ครั้งที่ 43 เล่ม 2 สาขาวิศวกรรมศาสตร์, 1-4 กุมภาพันธ์ 2548.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. น. 30-37.
- ชูพันธุ์ ชมภูจันทร์ และ เอกสิทธิ์ โสมิตตกุลชัย. 2548. การประเมินการใช้น้ำของพืชใน  
โครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม  
NOAA/AVHRR. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ  
ครั้งที่ 10 เล่ม 2, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน, ชลบุรี, 2-4 พฤษภาคม  
2548. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและสมาคม  
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท), กรุงเทพฯ. น.  
WRE48-WRE53.
- ชูศักดิ์ จอมพุก และ ทิวา พาโลกทม. 2547. ข้าวโพด (corn), น 54-73. ใน: คณาจารย์  
ภาควิชาพืชไร่นา. พืชเศรษฐกิจ. สนพ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ดิเรก ทองอร่าม. 2526. ความต้องการน้ำชลประทาน และ ค่าชลประทานในการออกแบบ  
ระบบส่งน้ำ, น 7-103. ใน เทคโนโลยีที่เหมาะสมในการทำงานชลประทาน. กรม  
ชลประทานสัมมนาทางวิชาการ, 14-16 ธันวาคม 2526. สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรม  
ชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- ถนอม นิลน้อย. 2543. การศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของถั่วและถั่วป่น.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 128 น.
- ทวีศักดิ์ กาญจนศักดิ์ชัย. 2526. Potential Evapotranspiration สำหรับลุ่มน้ำแม่กลอง  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 107 น.
- ทวีศักดิ์ ธนเดโชพล. 2544. การศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของหม่อน.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 144 น.
- เทียมใจ คมกฤต. 2549. ภายวิภาคของพฤษภ. พิมพ์ครั้งที่ 6. สนพ.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 308 น.
- ธีรพงษ์ พินทอง. 2545. การศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของมะเขือเทศ.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 142 น.

- นเรศ ช่วยชู. 2547. การทดลองหาผลกระทบต่องา๊วะขาดน้ำในข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์  
แปซิฟิก 984. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 190  
น.
- นิพนธ์ สนั่นเรื่องศักดิ์. 2546. การศึกษาปริมาณการให้น้ำที่เหมาะสมสำหรับการปลูก  
ทานตะวัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 90 น.
- บุญฤทธิ์ จำปาเงิน. 2548. การศึกษาการใช้ น้ำของหญ้ากินนีสีม่วง. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
โท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 139 น.
- บุญหงษ์ จงคิด. 2547. ข้าวและเทคโนโลยีการผลิต. สนพ.มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์,  
กรุงเทพฯ. 184 น.
- ปกรณ์ สุดสุนทร. 2545. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกระเจี๊ยบเขียว (*Hibiscus  
esculentus*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 214 น.
- ประศาสน์ สุขอินทร์. 2547. การตอบสนองของผลผลิตต่อปริมาณน้ำที่ได้รับแต่ละช่วง  
การเจริญเติบโตของถั่วเหลืองพันธุ์ สจ.5. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 190 น.
- ประเสริฐ นัตรวชิระวงษ์. 2547. อ้อย (sugarcane), น 272-295. ใน: คณาจารย์ภาควิชาพืช  
ไร่. ไร่. พืชเศรษฐกิจ. สนพ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- พันธ์พิทย์ พืชมงคล. 2542. การศึกษาความเหมาะสมและความสำคัญของตัวแปรของสูตร  
เพนแมนใน สภาวะลมฟ้าอากาศของสถานีอุดุมนิยมนิเวศวิทยากรม. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 151 น.
- พีระชาติ อุดาการ. 2545. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำขององุ่น. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 351 น.
- พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์. 2547. ถั่วเหลือง (soybean), น 132-151. ใน: คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่  
ไร่. พืชเศรษฐกิจ. สนพ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์. 2547. ถั่วเขียว (mungbean), น 152-165. ใน: คณาจารย์ภาควิชาพืช  
ไร่. พืชเศรษฐกิจ. สนพ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ไพรัช สุกรกมล. 2536. การวิเคราะห์ความถี่ของปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงทั้งกลุ่มน้ำ.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 183 น.
- ไพรัตน์ ทับประเสริฐ. 2546. การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของแดงโม.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 144 น.
- ลิลลี่ กาวีตะ. 2546. การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานและพัฒนาการของพืช. สนพ.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 320 น.
- ลิลลี่ กาวีตะ, มาลี ณ นคร, ศรีสม สุวรรณวงศ์ และ สุริยา ดันติวิวัฒน์. 2549. สรีรวิทยา  
ของพืช. สนพ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 261 น.

- รัฐชัย สายรวมญาติ. 2552. การวิเคราะห์การใช้น้ำและการรั่วซึมผ่านดินในนาข้าวโดยใช้ถังวัดการใช้น้ำของพืชและแบบจำลอง ORYZA. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รังสฤษฎ์ กาวิต๊ะ. 2547. ถั่วลิสง (groundnut), น 166-189. ใน: คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา. พืชเศรษฐกิจ. สนพ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รังสรรค์ อากาศพะกุล. 2546. อดุณิคมวิทยาเบื้องต้น. สนพ.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 226 น.
- ราชบัณฑิตยสถาน. 2549. พจนานุกรมศัพท์ภูมิศาสตร์. ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. พิมพ์ครั้งที่ 4. ราชบัณฑิตยสถาน, กรุงเทพฯ. 668 น.
- วราวุธ วุฒินิชย์. 2539. การคำนวณ ETo ของประเทศไทยโดยวิธี Penman-Monteith. วิศวกรรมสาร มก., 29: 92-103.
- วิบูลย์ บุญขจรโรกุล. 2526. หลักการชลประทาน. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน, นครปฐม. 274 น.
- วีระชัย จันทบูรณ์. 2545. การศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของถั่วลิสง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 181 น.
- ศจี เจริญยิ่ง และคณะ. 2533. ค่าสัมประสิทธิ์พืชและค่าสหสัมพันธ์พืช. ฝ่ายเกษตรชลประทาน กองจัดสรรน้ำและบำรุงรักษา กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ. 31 น.
- ศุภชัย มะพล. 2543. การศึกษาการใช้น้ำเตรียมแปลงสำหรับนาข้าวในฤดูฝนของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษามูลบน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 146 น.
- สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. 2544. สรีรวิทยาของพืช. สนพ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 237 น.
- สมพร สว่างศ์. 2543. รีโมทเซนซิงเบื้องต้นและกรณีศึกษารีโมทเซนซิง. คณะสังคมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. 243 น.
- สมพร สว่างศ์. 2552. การสำรวจจากระยะไกลในด้านการใช้ประโยชน์ที่ดิน/สิ่งปกคลุมดินและการประยุกต์. สนพ.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 280 น.
- สรศักดิ์ ทรงศิริพันธุ์. 2533. การศึกษาการใช้น้ำเตรียมแปลงสำหรับการปลูกข้าวในฤดูแล้งของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาดงศรีชัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 138 น.
- สิทธิพงษ์ เฟิงชะตา. 2548. การศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกระชายดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 102 น.
- สุนทร สุทัศนมาลี. 2536. การศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของหน่อไม้ฝรั่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 133 น.



- สุนันท์ ศรีชัยนิตย์. 2545. การถ่ายเทความร้อน. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ. 467 น.
- สุประพล วัตตะสิริชัย. 2542. การคาดคะเนอัตราการระเหยจากผิวดินและการระเหยแบบ เอ และการวิเคราะห์ค่าการระเหยของน้ำจากอ่างเก็บน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 409 น.
- อนันต์ โหมยิตพิพัฒน์. 2546. การศึกษาหาปริมาณความต้องการน้ำของถั่วเหลือง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 120 น.
- อรรควุฒิ ทัศนีสองชั้น และ นพพร คล้ายพงษ์พันธุ์. 2547. ข้าว (rice), น 23-53. ใน: คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา. พืชเศรษฐกิจ. สนพ.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อภิชาติ อนุกุลอำไพ, วิบูลย์ บุญยธโรกุล, วราวุธ วุฒิมิษฐ์, โกวิท ท่วมเสงี่ยม และ มนตรี คำชู. 2524. คู่มือการชลประทานระดับไร่นา. สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย, กรุงเทพฯ. 354 น.
- เอกชัย เกษรปทุมานันท์. 2525. การประมาณค่าการระเหยทางภาคเหนือของประเทศไทย โดยใช้สถิติทางอุตุนิยมวิทยากับสูตรต่าง ๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 116 น.
- เอกสิทธิ์ โหมยิตสกุลชัย. 2547. อุทกวิทยา. เอกสารประกอบการสอน. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- เอกสิทธิ์ โหมยิตสกุลชัย. 2547. การหาค่าการใช้น้ำของพืชในโครงการชลประทานขนาดใหญ่โดยใช้การสำรวจระยะไกล. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ทบวงมหาวิทยาลัยและสงนง.กองทุนสนับสนุนงานวิจัย, กรุงเทพฯ.
- เอกสิทธิ์ โหมยิตสกุลชัย. 2548. การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยวิธีการสำรวจระยะไกล กรณีศึกษาพื้นที่ราบภาคกลาง. วิทยาสารกำแพงแสน, 3(3): 44-53.
- เอกสิทธิ์ โหมยิตสกุลชัย และ คณะ. 2550. โครงการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำในการเพาะปลูก เรื่อง แบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชสำหรับการประเมินผลผลิตและการใช้น้ำของพืชในเขตชลประทาน. รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์. โครงการความร่วมมือระหว่างกรมชลประทานกับมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- โอสถ ชาญเวช และ ชีระพล ตั้งสมบูรณ์. 2543. เอกสารวิชาการเรื่องปริมาณการใช้น้ำของพืช ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงและค่าสัมประสิทธิ์พืช. ส่วนเกษตรชลประทาน สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ กรมชลประทาน, กรุงเทพฯ. 109 น.

- Allen, R. G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 300 pp.
- Allen, R.G., W.O. Pruitt, J.L. Wright, T.A. Howell, F. Ventura, R. Snyder, D. Itenfisu, P. Steduto, J. Berengena, J.B. Yrisarry, M. Smith, L.S. Pereira, D. Raes, A. Perrier, I. Alves, I. Walter, and R. Elliott. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 81(1-2): 1-22.
- Anderson, M.G., and J.J. McDonnell (eds). 2005. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons, West Sussex, England.
- ASCE-EWRI. 2005. *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*. Environmental and Water Resources Institute, American Society of Civil Engineers, 216 pp.
- Bastiaanssen, W.G.M. 1998. *Remote Sensing in Water Resources Management : The State of the Art*. International Water Management Institute (IWMI), Colombo. 118 pp.
- Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A. Feddes, and A.A.M. Holtslag. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213 (1-4): 198-212.
- Bastiaanssen, W.G.M., H. Pelgrum, J. Wang, Y. Ma, J.F. Moreno, G.J. Roerink, and T. van der Wal. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2: Validation. *Journal of Hydrology*, 212-213 (1-4):213-229.
- Bastiaanssen, W.G.M., D.J. Molden, and I.W. Makin. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, 46: 137-155.
- Bastiaanssen, W.G.M., E.J.M. Noordman, H. Pelgrum, G. Davids, B.P. Thoreson, and R.G. Allen. 2005. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131 (1): 85-93, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85).

- Brutsaert, W. 1982. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. D.Reidel Publishing Company, Dordrecht. 299 pp.
- Campbell, G.S., and J.M. Norman. 1998. *An Introduction to Environmental Biophysics*. 2nd ed. Springer, New York, NY. 286 pp.
- Chemin, Y. and M.D. Ahmad. 2000. *Estimating Evaporation Using the Surface Energy Balance Model (SEBAL). A Manual for NOAA-AVHRR in Pakistan*. International Water Management Institute (IWMI), Lahore, Pakistan. 27 pp.
- Choudhury, B.J., and N.E. DiGirolamo. 1998. A biophysical process-based estimate of global land surface evaporation using satellite and ancillary data I. Model description and comparison with observations. *Journal of Hydrology* 205(3-4): 164-185.
- Choudhury, B.J., N.E. DiGirolamo, J. Susskind, W.L. Darnell, S.K. Gupta, and G. Asrar. 1998. A biophysical process-based estimate of global land surface evaporation using satellite and ancillary data II. Regional and global patterns of seasonal and annual variations. *Journal of Hydrology* 205(3-4): 186-204.
- D'Souza, G., A.S. Belward, and J. Malingreau. 1993. *Advances in the Use of NOAA-AVHRR Data for Land Application*. Institute of Remote Sensing Application., Isapra, Italy. 479 p.
- De Datta, S.K. 1981. *Principles and Practices of Rice Production* John Wiley & Sons, New York, NY. 618 pp.
- Diekkruger, B., M.J. Kirkby, and U. Schroder (eds) 1999. *Regionalization in Hydrology*. IAHS Publication No 254. International Association of Hydrological Sciences (IAHS), Wallingford.
- Doorenbos, J. 1976. *Agro-Meteorological Field Stations*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 27. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 94 pp.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. *Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 144 pp.
- Doorenbos, J., and A.H. Kassam. 1979. *Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Farnworth, J. 1997. *AGRI INFO. Guidelines for World Crop and Livestock Production*. John Wiley & Sons, Chichester. 576 pp.

- Gieske, A.S.M. 2003. Operational solutions of actual evapotranspiration, Chapter 3. In: Simmers, I. (ed) *Understanding Water in a Dry Environment*. A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands.
- Granger, R.J. 1997. Comparison of surface and satellite-derived estimates of evapotranspiration using a feedback algorithm, p. 71-81. In: Kite, G.W., A. Pietroniro, and T. Pultz (eds) *Applications of Remote Sensing in Hydrology*. Proc. Symp. No 17. National Hydrology Research Institute (NHRI), Saskatoon, Canada.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, San Diego, CA. 771 pp.
- Hillel, D. 2003. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier, URL: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123486554>.
- Jensen, M.E., R.D. Burman, and R.G. Allen. 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 70. American Society of Civil Engineering (ASCE), New York, NY. 332 pp.
- Kite, G.W. and P. Droogers. 2000a. Comparing Estimates of Actual Evapotranspiration from Satellites, Hydrological Models and Field Data: A Case Study from Western Turkey. Research Report 42. International Water Management Institute (IWMI), Colombo.
- Kite, G.W., and P. Droogers. 2000b. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *Journal of Hydrology*, 229(1-2):3-18.
- Kositsakulchai, E. and F. Borne. 2004. Estimation of Evapotranspiration from a Large Irrigation Scheme using Remote Sensing Method: A Case of Central Plain of Thailand, p. 957-962. In: *Proceeding of the 25th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS)*, November 21-26, 2004, Chiang Mai, Thailand. Asian Association on Remote Sensing (AARS), Tokyo.
- Kustas, W.P. And J.M. Norman. 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4): 495-516.
- Lingle, S.E. 1999. Sugarcane, p 287-310. in: D.L. Smith and C. Hamel (eds). *Crop Yield, Physiology and Processes*. Springer-Verlag, Berlin.
- Linsley, R.K., Jr., M.A. Kohler, and J.L.H. Paulhus. 1988. *Hydrology for Engineers*, SI Metric Edition. McGraw-Hill, London. 492 pp.
- Menenti, M., and B.J. Choudhury. 1993. Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range, pp. 561-568. In: *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of*

- Space and Times Scales. IAHS Publ. 212. International Association of Hydrological Sciences (IAHS), Wallingford, Oxfordshire (UK).
- Michael, A.M. 1978. Irrigation: Theory and Practice. Vani Educational Books, New Delhi. 801 pp.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment, p 205-234. In: The state and movement of water in living organisms, XIXth Symposium of the Society of Experimental Biologists, Swansea. Cambridge University Press, Cambridge, MA.
- Monteith, J.L. 1998. Evaporation Models. In: Peart, R.M., and R.B. Curry (eds). Agricultural Systems Modeling and Simulation. Maecel Dekker, New York, NY. p 197-234.
- Monteith, J.L., and M.H. Unsworth. 1990. Principles of Environmental Physics. 2nd ed. Edward Arnold, London.
- Morse, A., M. Tasumi, R.G. Allen, and W.J. Kramber. 2000. Application of the SEBAL Methodology for Estimating Consumptive Use of Water and Streamflow Depletion in the Bear River Basin of Idaho through Remote Sensing. Final Report: Phase 1, submitted to the Raytheon Systems Company, Earth Observation System Data and Information System Project. Idaho Department of Water Resources and University of Idaho, Idaho. 107 pp.
- Morse, A., R.G. Allen, M. Tasumi, W.J. Kramber, R. Trezza, and J.L. Wright. 2001. Application of the SEBAL Methodology for Estimating Consumptive Use of Water through Remote Sensing. Final Report: Phase 2, submitted to the Raytheon Systems Company, Earth Observation System Data and Information System Project. Idaho Department of Water Resources and University of Idaho, Idaho.
- Parodi, G.N. 2002a. AHVRR Hydrological Analysis System (AHAS). User Manual - Version 1.3. WRES, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, The Natherlands.
- Parodi, G.N. 2002b. AHVRR Hydrological Analysis System (AHAS). Algorithm and theory - Version 1.3. WRES, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, The Natherlands.
- Penman, H.L. 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences (1934-1990), 193(1032): 120-145.
- Pinker, R.T. 2005. 49: Estimation of Surface Insolation, vol. 2. In: Anderson, M.G., and J.J. McDonnell (eds). Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons, West Sussex, England.

- Roerink, G.J., Z. Su, and M. Menenti. 2000. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 25(2): 147-157.
- Rosney, J. de 1975. *Le Macroscopie : vers une vision globale*. Edition du Seuil, Paris.
- Savva, A.P., and K. Frenken. 2002. *Irrigation Manual. Planning, Development Monitoring and Evaluation of Irrigated Agriculture with Farmer Participation*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Schmugge, T.J., W.P. Kustas, J.C. Ritchie, T.J. Jackson, and A. Rango. 2002. Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25:1367-1385.
- Schultz, G.A. and E.T. Engman (eds.). 2000. *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*. Springer, Berlin. 483 pp.
- Sharma, A.R. and D.P. Singh. 1999. Rice, p 109-168. in: D.L. Smith and C. Hamel (eds). *Crop Yield, Physiology and Processes*. Springer-Verlag, Berlin.
- Smith, D.L. and C. Hamel (eds.). 1999. *Crop Yield, Physiology and Processes*. Springer-Verlag, Berlin. 504 pp.
- Simmers, I. (ed) 2003. *Understanding Water in a Dry Environment. Hydrological Processes in Arid and Semi-arid Zones*. IAH International Contributions to Hydrogeology, Volume 23. A.A. Balkema, Lisse, The Netherlands. 341 pp.
- Smith, M. 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper No 46. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Smith, M. et al. 1992. Report on the Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 60 pp.
- Stewart, B.A. and T.A. Howell (Eds.). 2003. *Encyclopedia of Water Science*. Maecel Dekker, New York, NY. 1076 pp.
- Su, Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6 (1): 85-99.
- Su, Z. 2005. 50: Estimation of the Surface Energy Balance, vol. 2. In: Anderson, M.G., and J.J. McDonnell (eds). *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons, West Sussex, England.
- Tollenaar, M. and L.M. Dwyer. 1999. Physiology of Maize, p 169-204. in: D.L. Smith and C. Hamel (eds). *Crop Yield, Physiology and Processes*. Springer-Verlag, Berlin.

- Unsworth, M.H. 2005. 39: Surface Radiation Balance, vol. 1. In: Anderson, M.G., and J.J. McDonnell (eds). Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons, West Sussex, England.
- Yoshida, S. 1981. Fundamentals of Rice Crop Science. International Rice Research Institute (IRRI), Los Banos, Philippines. 269 pp.
- Zhang, F. and D.L. Smith. 1999. Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.], Physiology and Symbiotic Dinitrogen Fixation. in: D.L. Smith and C. Hamel (eds). Crop Yield, Physiology and Processes. Springer-Verlag, Berlin.





## ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.

## ตารางข้อมูลอุตุนิยมวิทยา



ตารางผนวกที่ 1 พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก

Lat.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
60	3.25	8.11	16.57	27.55	36.66	41.22	39.14	31.25	20.52	10.82	4.37	2.16
58	4.30	9.32	17.75	28.40	37.05	41.30	39.36	31.92	21.59	12.04	5.48	3.12
56	5.39	10.54	18.91	29.22	37.44	41.41	39.58	32.56	22.64	13.26	6.62	4.14
54	6.53	11.77	20.04	30.02	37.81	41.52	39.81	33.18	23.66	14.46	7.78	5.22
52	7.70	12.99	21.15	30.79	38.17	41.62	40.02	33.77	24.65	15.65	8.97	6.35
50	8.89	14.21	22.24	31.52	38.50	41.71	40.21	34.34	25.61	16.83	10.17	7.51
48	10.10	15.42	23.30	32.23	38.81	41.79	40.39	34.87	26.54	18.00	11.38	8.69
46	11.32	16.63	24.33	32.89	39.08	41.84	40.54	35.37	27.43	19.15	12.60	9.89
44	12.55	17.82	25.33	33.52	39.33	41.87	40.66	35.83	28.30	20.28	13.82	11.11
42	13.78	18.99	26.31	34.12	39.54	41.87	40.74	36.26	29.13	21.38	15.04	12.34
40	15.01	20.15	27.25	34.67	39.71	41.84	40.80	36.65	29.92	22.47	16.25	13.58
38	16.24	21.30	28.15	35.19	39.85	41.77	40.82	37.00	30.68	23.53	17.46	14.82
36	17.47	22.42	29.02	35.66	39.95	41.67	40.81	37.31	31.40	24.56	18.65	16.06
34	18.68	23.51	29.86	36.10	40.01	41.54	40.75	37.58	32.08	25.57	19.84	17.29
32	19.89	24.59	30.66	36.49	40.03	41.37	40.66	37.81	32.72	26.55	21.01	18.52
30	21.08	25.64	31.43	36.84	40.02	41.16	40.53	38.00	33.33	27.49	22.16	19.74
28	22.26	26.66	32.15	37.15	39.95	40.91	40.36	38.15	33.89	28.41	23.30	20.95
26	23.42	27.65	32.84	37.41	39.85	40.62	40.16	38.25	34.41	29.29	24.41	22.14
24	24.56	28.62	33.49	37.63	39.71	40.30	39.91	38.31	34.89	30.14	25.50	23.32
22	25.68	29.55	34.09	37.81	39.53	39.94	39.62	38.32	35.33	30.96	26.57	24.48
20	26.78	30.45	34.66	37.94	39.30	39.53	39.29	38.30	35.72	31.74	27.61	25.62
18	27.85	31.32	35.18	38.02	39.03	39.09	38.92	38.23	36.08	32.48	28.63	26.74
16	28.90	32.15	35.66	38.06	38.72	38.61	38.52	38.11	36.38	33.18	29.61	27.84
14	29.92	32.94	36.10	38.06	38.37	38.09	38.07	37.95	36.65	33.85	30.57	28.92
12	30.90	33.70	36.49	38.01	37.97	37.54	37.58	37.75	36.86	34.47	31.49	29.96
10	31.86	34.42	36.84	37.92	37.54	36.94	37.05	37.51	37.04	35.06	32.39	30.98
8	32.79	35.10	37.15	37.78	37.06	36.31	36.49	37.22	37.17	35.60	33.25	31.97
6	33.69	35.73	37.40	37.60	36.55	35.64	35.89	36.89	37.25	36.10	34.07	32.93
4	34.55	36.33	37.62	37.37	35.99	34.94	35.25	36.52	37.29	36.56	34.86	33.86
2	35.37	36.89	37.78	37.10	35.40	34.20	34.57	36.11	37.28	36.98	35.61	34.75
<b>0</b>	<b>36.16</b>	<b>37.41</b>	<b>37.91</b>	<b>36.78</b>	<b>34.77</b>	<b>33.42</b>	<b>33.86</b>	<b>35.65</b>	<b>37.23</b>	<b>37.35</b>	<b>36.32</b>	<b>35.61</b>

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

Lat.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0	36.16	37.41	37.91	36.78	34.77	33.42	33.86	35.65	37.23	37.35	36.32	35.61
-2	36.91	37.88	37.98	36.42	34.10	32.62	33.11	35.15	37.13	37.67	36.99	36.43
-4	37.62	38.31	38.01	36.02	33.39	31.78	32.33	34.62	36.99	37.96	37.63	37.22
-6	38.29	38.69	37.99	35.58	32.65	30.91	31.51	34.04	36.80	38.20	38.22	37.97
-8	38.93	39.03	37.93	35.09	31.88	30.01	30.67	33.42	36.57	38.39	38.77	38.68
-10	39.52	39.32	37.82	34.56	31.07	29.08	29.79	32.77	36.29	38.54	39.28	39.36
-12	40.07	39.57	37.67	33.99	30.22	28.13	28.89	32.08	35.97	38.64	39.75	39.99
-14	40.58	39.78	37.47	33.38	29.35	27.15	27.95	31.35	35.60	38.69	40.18	40.59
-16	41.05	39.94	37.22	32.73	28.45	26.14	26.99	30.59	35.19	38.70	40.56	41.14
-18	41.47	40.05	36.93	32.05	27.51	25.11	26.00	29.80	34.74	38.67	40.90	41.65
-20	41.86	40.12	36.59	31.32	26.55	24.06	24.99	28.97	34.25	38.59	41.20	42.13
-22	42.20	40.14	36.21	30.56	25.56	22.99	23.96	28.10	33.71	38.46	41.45	42.56
-24	42.49	40.12	35.79	29.76	24.55	21.90	22.90	27.21	33.14	38.29	41.66	42.94
-26	42.75	40.05	35.32	28.93	23.52	20.79	21.83	26.29	32.52	38.07	41.82	43.29
-28	42.96	39.93	34.81	28.07	22.46	19.67	20.73	25.34	31.86	37.81	41.94	43.60
-30	43.12	39.77	34.25	27.17	21.38	18.54	19.63	24.36	31.17	37.51	42.02	43.86
-32	43.25	39.57	33.66	26.24	20.28	17.39	18.50	23.35	30.44	37.16	42.06	44.08
-34	43.34	39.32	33.02	25.28	19.17	16.24	17.37	22.33	29.67	36.77	42.05	44.27
-36	43.38	39.03	32.35	24.29	18.04	15.08	16.23	21.28	28.86	36.33	42.00	44.41
-38	43.38	38.70	31.63	23.28	16.91	13.92	15.08	20.20	28.02	35.86	41.91	44.52
-40	43.35	38.33	30.88	22.24	15.76	12.76	13.92	19.11	27.14	35.34	41.78	44.59
-42	43.28	37.91	30.09	21.18	14.60	11.60	12.76	18.00	26.24	34.78	41.62	44.63
-44	43.17	37.46	29.26	20.09	13.44	10.44	11.61	16.88	25.30	34.19	41.41	44.63
-46	43.03	36.96	28.40	18.98	12.27	9.30	10.46	15.74	24.33	33.55	41.17	44.60
-48	42.86	36.43	27.50	17.85	11.11	8.17	9.31	14.59	23.33	32.88	40.90	44.54
-50	42.66	35.87	26.57	16.71	9.95	7.06	8.18	13.44	22.30	32.17	40.60	44.46
-52	42.44	35.27	25.61	15.55	8.80	5.97	7.07	12.27	21.24	31.43	40.27	44.37
-54	42.20	34.64	24.61	14.37	7.66	4.91	5.98	11.11	20.16	30.66	39.92	44.26
-56	41.94	33.98	23.59	13.19	6.54	3.90	4.92	9.94	19.06	29.86	39.54	44.14
-58	41.69	33.30	22.54	11.99	5.44	2.94	3.90	8.78	17.93	29.03	39.16	44.03
-60	41.43	32.59	21.46	10.80	4.38	2.04	2.92	7.62	16.78	28.17	38.77	43.95

หมายเหตุ:

ละติจูด (Latitude) บวกเป็นองศา

ในกรณีที่ละติจูดเป็นค่าบวก หมายถึง องศาเหนือ ( $^{\circ}\text{N}$ )

กรณีที่ เป็นค่าลบ หมายถึง องศาใต้ ( $^{\circ}\text{S}$ )

พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของบรรยากาศโลก ( $R_a$ ) หน่วยเป็น  $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$

ตารางผนวกที่ 2 จำนวนชั่วโมงแสงแดดในรอบวัน

Lat.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
60	6.37	8.72	11.37	14.25	16.83	18.44	17.72	15.33	12.49	9.71	7.06	5.56
58	6.88	8.98	11.42	14.07	16.41	17.81	17.20	15.06	12.45	9.89	7.49	6.18
56	7.32	9.21	11.46	13.92	16.05	17.29	16.75	14.82	12.42	10.05	7.86	6.70
54	7.69	9.42	11.50	13.78	15.73	16.85	16.37	14.61	12.39	10.19	8.18	7.15
52	8.03	9.61	11.54	13.65	15.45	16.46	16.03	14.42	12.36	10.32	8.47	7.53
50	8.33	9.78	11.57	13.53	15.20	16.12	15.73	14.25	12.34	10.44	8.73	7.88
48	8.60	9.93	11.60	13.43	14.97	15.81	15.45	14.09	12.31	10.54	8.97	8.18
46	8.84	10.08	11.62	13.33	14.76	15.53	15.20	13.95	12.29	10.64	9.18	8.46
44	9.07	10.21	11.65	13.24	14.57	15.28	14.97	13.81	12.27	10.74	9.38	8.72
42	9.27	10.33	11.67	13.16	14.39	15.04	14.76	13.69	12.25	10.82	9.56	8.95
40	9.47	10.45	11.70	13.08	14.22	14.83	14.57	13.57	12.24	10.90	9.74	9.17
38	9.65	10.56	11.72	13.00	14.06	14.62	14.39	13.46	12.22	10.98	9.90	9.37
36	9.82	10.66	11.74	12.93	13.91	14.43	14.21	13.36	12.20	11.05	10.05	9.57
34	9.98	10.75	11.76	12.86	13.77	14.25	14.05	13.26	12.19	11.12	10.19	9.75
32	10.13	10.85	11.77	12.80	13.64	14.08	13.90	13.17	12.18	11.18	10.32	9.92
30	10.27	10.94	11.79	12.74	13.51	13.92	13.75	13.08	12.16	11.25	10.45	10.08
28	10.41	11.02	11.81	12.68	13.39	13.77	13.61	12.99	12.15	11.31	10.58	10.23
26	10.55	11.10	11.82	12.62	13.28	13.62	13.47	12.91	12.14	11.36	10.70	10.38
24	10.67	11.18	11.84	12.57	13.17	13.47	13.34	12.83	12.13	11.42	10.81	10.52
22	10.80	11.26	11.85	12.52	13.06	13.34	13.22	12.75	12.11	11.47	10.92	10.66
20	10.92	11.33	11.87	12.47	12.95	13.20	13.10	12.68	12.10	11.53	11.03	10.80
18	11.03	11.40	11.88	12.42	12.85	13.07	12.98	12.61	12.09	11.58	11.13	10.93
16	11.15	11.47	11.90	12.37	12.75	12.95	12.86	12.53	12.08	11.63	11.24	11.05
14	11.26	11.54	11.91	12.32	12.65	12.82	12.75	12.46	12.07	11.67	11.34	11.18
12	11.37	11.61	11.92	12.27	12.55	12.70	12.64	12.40	12.06	11.72	11.43	11.30
10	11.48	11.68	11.94	12.23	12.46	12.58	12.53	12.33	12.05	11.77	11.53	11.42
8	11.58	11.74	11.95	12.18	12.37	12.46	12.42	12.26	12.04	11.82	11.63	11.54
6	11.69	11.81	11.96	12.13	12.27	12.35	12.32	12.20	12.03	11.86	11.72	11.65
4	11.79	11.87	11.97	12.09	12.18	12.23	12.21	12.13	12.02	11.91	11.81	11.77
2	11.90	11.94	11.99	12.04	12.09	12.11	12.10	12.06	12.01	11.95	11.91	11.88
<b>0</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

Lat.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
60	6.37	8.72	11.37	14.25	16.83	18.44	17.72	15.33	12.49	9.71	7.06	5.56
58	6.88	8.98	11.42	14.07	16.41	17.81	17.20	15.06	12.45	9.89	7.49	6.18
56	7.32	9.21	11.46	13.92	16.05	17.29	16.75	14.82	12.42	10.05	7.86	6.70
54	7.69	9.42	11.50	13.78	15.73	16.85	16.37	14.61	12.39	10.19	8.18	7.15
52	8.03	9.61	11.54	13.65	15.45	16.46	16.03	14.42	12.36	10.32	8.47	7.53
50	8.33	9.78	11.57	13.53	15.20	16.12	15.73	14.25	12.34	10.44	8.73	7.88
48	8.60	9.93	11.60	13.43	14.97	15.81	15.45	14.09	12.31	10.54	8.97	8.18
46	8.84	10.08	11.62	13.33	14.76	15.53	15.20	13.95	12.29	10.64	9.18	8.46
44	9.07	10.21	11.65	13.24	14.57	15.28	14.97	13.81	12.27	10.74	9.38	8.72
42	9.27	10.33	11.67	13.16	14.39	15.04	14.76	13.69	12.25	10.82	9.56	8.95
40	9.47	10.45	11.70	13.08	14.22	14.83	14.57	13.57	12.24	10.90	9.74	9.17
38	9.65	10.56	11.72	13.00	14.06	14.62	14.39	13.46	12.22	10.98	9.90	9.37
36	9.82	10.66	11.74	12.93	13.91	14.43	14.21	13.36	12.20	11.05	10.05	9.57
34	9.98	10.75	11.76	12.86	13.77	14.25	14.05	13.26	12.19	11.12	10.19	9.75
32	10.13	10.85	11.77	12.80	13.64	14.08	13.90	13.17	12.18	11.18	10.32	9.92
30	10.27	10.94	11.79	12.74	13.51	13.92	13.75	13.08	12.16	11.25	10.45	10.08
28	10.41	11.02	11.81	12.68	13.39	13.77	13.61	12.99	12.15	11.31	10.58	10.23
26	10.55	11.10	11.82	12.62	13.28	13.62	13.47	12.91	12.14	11.36	10.70	10.38
24	10.67	11.18	11.84	12.57	13.17	13.47	13.34	12.83	12.13	11.42	10.81	10.52
22	10.80	11.26	11.85	12.52	13.06	13.34	13.22	12.75	12.11	11.47	10.92	10.66
20	10.92	11.33	11.87	12.47	12.95	13.20	13.10	12.68	12.10	11.53	11.03	10.80
18	11.03	11.40	11.88	12.42	12.85	13.07	12.98	12.61	12.09	11.58	11.13	10.93
16	11.15	11.47	11.90	12.37	12.75	12.95	12.86	12.53	12.08	11.63	11.24	11.05
14	11.26	11.54	11.91	12.32	12.65	12.82	12.75	12.46	12.07	11.67	11.34	11.18
12	11.37	11.61	11.92	12.27	12.55	12.70	12.64	12.40	12.06	11.72	11.43	11.30
10	11.48	11.68	11.94	12.23	12.46	12.58	12.53	12.33	12.05	11.77	11.53	11.42
8	11.58	11.74	11.95	12.18	12.37	12.46	12.42	12.26	12.04	11.82	11.63	11.54
6	11.69	11.81	11.96	12.13	12.27	12.35	12.32	12.20	12.03	11.86	11.72	11.65
4	11.79	11.87	11.97	12.09	12.18	12.23	12.21	12.13	12.02	11.91	11.81	11.77
2	11.90	11.94	11.99	12.04	12.09	12.11	12.10	12.06	12.01	11.95	11.91	11.88
<b>0</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>	<b>12.00</b>

หมายเหตุ:

ละติจูด (Latitude) บวกเป็นองศา

ในกรณีที่ละติจูดเป็นค่าบวก หมายถึง องศาเหนือ ( $^{\circ}N$ )

กรณีที่ เป็นค่าลบ หมายถึง องศาใต้ ( $^{\circ}S$ )

จำนวนชั่วโมงแสงแดดในรอบวัน (daylight hours,  $N$ ) หน่วยเป็น ชั่วโมงต่อวัน



**ตารางผนวกที่ 3 วันของปี (J)**

Day	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29		88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365

ตารางผนวกที่ 4 ส่วนกลับของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์สัมพัทธ์

Day	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	1.033	1.028	1.017	1.000	0.984	0.971	0.967	0.971	0.984	1.000	1.017	1.029
2	1.033	1.028	1.016	1.000	0.983	0.971	0.967	0.972	0.984	1.001	1.017	1.029
3	1.033	1.028	1.016	0.999	0.983	0.971	0.967	0.972	0.985	1.001	1.018	1.029
4	1.033	1.027	1.015	0.998	0.982	0.971	0.967	0.972	0.985	1.002	1.018	1.029
5	1.033	1.027	1.015	0.998	0.982	0.970	0.967	0.973	0.986	1.002	1.019	1.030
6	1.033	1.027	1.014	0.997	0.981	0.970	0.967	0.973	0.986	1.003	1.019	1.030
7	1.033	1.026	1.014	0.997	0.981	0.970	0.967	0.973	0.987	1.004	1.020	1.030
8	1.033	1.026	1.013	0.996	0.980	0.970	0.967	0.974	0.987	1.004	1.020	1.030
9	1.033	1.025	1.013	0.996	0.980	0.969	0.967	0.974	0.988	1.005	1.021	1.031
10	1.033	1.025	1.012	0.995	0.980	0.969	0.967	0.974	0.988	1.005	1.021	1.031
11	1.032	1.025	1.012	0.994	0.979	0.969	0.967	0.975	0.989	1.006	1.022	1.031
12	1.032	1.024	1.011	0.994	0.979	0.969	0.968	0.975	0.990	1.006	1.022	1.031
13	1.032	1.024	1.011	0.993	0.978	0.969	0.968	0.975	0.990	1.007	1.022	1.031
14	1.032	1.024	1.010	0.993	0.978	0.968	0.968	0.976	0.991	1.007	1.023	1.032
15	1.032	1.023	1.010	0.992	0.977	0.968	0.968	0.976	0.991	1.008	1.023	1.032
16	1.032	1.023	1.009	0.992	0.977	0.968	0.968	0.977	0.992	1.009	1.024	1.032
17	1.032	1.022	1.009	0.991	0.977	0.968	0.968	0.977	0.992	1.009	1.024	1.032
18	1.031	1.022	1.008	0.991	0.976	0.968	0.968	0.977	0.993	1.010	1.024	1.032
19	1.031	1.022	1.007	0.990	0.976	0.968	0.968	0.978	0.993	1.010	1.025	1.032
20	1.031	1.021	1.007	0.990	0.975	0.968	0.969	0.978	0.994	1.011	1.025	1.032
21	1.031	1.021	1.006	0.989	0.975	0.968	0.969	0.979	0.994	1.011	1.025	1.033
22	1.031	1.020	1.006	0.988	0.975	0.967	0.969	0.979	0.995	1.012	1.026	1.033
23	1.030	1.020	1.005	0.988	0.974	0.967	0.969	0.980	0.996	1.012	1.026	1.033
24	1.030	1.019	1.005	0.987	0.974	0.967	0.969	0.980	0.996	1.013	1.027	1.033
25	1.030	1.019	1.004	0.987	0.974	0.967	0.970	0.980	0.997	1.013	1.027	1.033
26	1.030	1.018	1.004	0.986	0.973	0.967	0.970	0.981	0.997	1.014	1.027	1.033
27	1.029	1.018	1.003	0.986	0.973	0.967	0.970	0.981	0.998	1.014	1.028	1.033
28	1.029	1.017	1.002	0.985	0.973	0.967	0.970	0.982	0.998	1.015	1.028	1.033
29	1.029		1.002	0.985	0.972	0.967	0.971	0.982	0.999	1.015	1.028	1.033
30	1.029		1.001	0.984	0.972	0.967	0.971	0.983	1.000	1.016	1.028	1.033
31	1.028		1.001		0.972		0.971	0.983		1.016		1.033

หมายเหตุ: ส่วนกลับของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์สัมพัทธ์ (inverse relative distance Earth-Sun,  $d_r$ ) เป็นค่าสัมพัทธ์ไม่มีหน่วย

ตารางผนวกที่ 5 มุมเบนของดวงอาทิตย์ตามฤดูกาล

Day	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	-0.401	-0.304	-0.143	0.072	0.261	0.385	0.403	0.311	0.133	-0.075	-0.269	-0.386
2	-0.400	-0.300	-0.136	0.079	0.267	0.387	0.402	0.307	0.126	-0.082	-0.275	-0.388
3	-0.398	-0.295	-0.130	0.086	0.272	0.390	0.400	0.302	0.120	-0.089	-0.280	-0.391
4	-0.396	-0.290	-0.123	0.093	0.277	0.392	0.399	0.297	0.113	-0.096	-0.285	-0.393
5	-0.395	-0.285	-0.116	0.099	0.282	0.394	0.397	0.292	0.106	-0.103	-0.290	-0.395
6	-0.393	-0.280	-0.110	0.106	0.287	0.395	0.395	0.287	0.099	-0.110	-0.295	-0.396
7	-0.391	-0.275	-0.103	0.113	0.292	0.397	0.394	0.282	0.092	-0.116	-0.300	-0.398
8	-0.388	-0.269	-0.096	0.120	0.297	0.399	0.392	0.277	0.086	-0.123	-0.304	-0.400
9	-0.386	-0.264	-0.089	0.126	0.302	0.400	0.390	0.272	0.079	-0.130	-0.309	-0.401
10	-0.384	-0.259	-0.082	0.133	0.307	0.402	0.387	0.267	0.072	-0.136	-0.314	-0.402
11	-0.381	-0.253	-0.075	0.140	0.311	0.403	0.385	0.261	0.065	-0.143	-0.318	-0.404
12	-0.379	-0.247	-0.068	0.146	0.316	0.404	0.383	0.256	0.058	-0.150	-0.322	-0.405
13	-0.376	-0.242	-0.061	0.153	0.320	0.405	0.380	0.250	0.051	-0.156	-0.327	-0.406
14	-0.373	-0.236	-0.054	0.159	0.325	0.406	0.377	0.245	0.044	-0.163	-0.331	-0.406
15	-0.370	-0.230	-0.047	0.166	0.329	0.407	0.375	0.239	0.037	-0.169	-0.335	-0.407
16	-0.367	-0.224	-0.040	0.172	0.333	0.407	0.372	0.233	0.030	-0.175	-0.339	-0.408
17	-0.364	-0.219	-0.033	0.179	0.337	0.408	0.369	0.227	0.023	-0.182	-0.343	-0.408
18	-0.361	-0.213	-0.026	0.185	0.341	0.408	0.366	0.222	0.016	-0.188	-0.347	-0.409
19	-0.357	-0.207	-0.019	0.191	0.345	0.409	0.362	0.216	0.009	-0.194	-0.350	-0.409
20	-0.354	-0.200	-0.012	0.197	0.349	0.409	0.359	0.210	0.002	-0.200	-0.354	-0.409
21	-0.350	-0.194	-0.005	0.203	0.352	0.409	0.356	0.203	-0.005	-0.207	-0.357	-0.409
22	-0.347	-0.188	0.002	0.210	0.356	0.409	0.352	0.197	-0.012	-0.213	-0.361	-0.409
23	-0.343	-0.182	0.009	0.216	0.359	0.409	0.348	0.191	-0.019	-0.219	-0.364	-0.409
24	-0.339	-0.175	0.016	0.222	0.362	0.408	0.345	0.185	-0.026	-0.224	-0.367	-0.408
25	-0.335	-0.169	0.023	0.227	0.366	0.408	0.341	0.179	-0.033	-0.230	-0.370	-0.408
26	-0.331	-0.163	0.030	0.233	0.369	0.407	0.337	0.172	-0.040	-0.236	-0.373	-0.407
27	-0.327	-0.156	0.037	0.239	0.372	0.407	0.333	0.166	-0.047	-0.242	-0.376	-0.406
28	-0.322	-0.150	0.044	0.245	0.375	0.406	0.329	0.159	-0.054	-0.247	-0.379	-0.406
29	-0.318		0.051	0.250	0.377	0.405	0.325	0.153	-0.061	-0.253	-0.381	-0.405
30	-0.314		0.058	0.256	0.380	0.404	0.320	0.146	-0.068	-0.259	-0.384	-0.404
31	-0.309		0.065		0.383		0.316	0.140		-0.264		-0.402

หมายเหตุ:

มุมเบนของดวงอาทิตย์ (solar declination,  $\delta$ ) หน่วยเป็น เรเดียน



ภาคผนวก ข.

ตารางข้อมูลพืช



**ตารางผนวกที่ 6 ระยะการเจริญเติบโตของพืช (วัน)**

Crop	Init. (L <sub>ini</sub> )	Dev. (L <sub>dev</sub> )	Mid (L <sub>mid</sub> )	Late (L <sub>late</sub> )	Total	Plant Date	Region
<b>a. Small Vegetables</b>							
Broccoli	35	45	40	15	135	Sept	Calif. Desert, USA
Cabbage	40	60	50	15	165	Sept	Calif. Desert, USA
Carrots	20	30	50/30	20	100	Oct/Jan	Arid climate
	30	40	60	20	150	Feb/Mar	Mediterranean
	30	50	90	30	200	Oct	Calif. Desert, USA
Cauliflower	35	50	40	15	140	Sept	Calif. Desert, USA
Celery	25	40	95	20	180	Oct	(Semi)Arid
	25	40	45	15	125	April	Mediterranean
	30	55	105	20	210	Jan	(Semi)Arid
Crucifers <sup>1</sup>	20	30	20	10	80	April	Mediterranean
	25	35	25	10	95	February	Mediterranean
	30	35	90	40	195	Oct/Nov	Mediterranean
Lettuce	20	30	15	10	75	April	Mediterranean
	30	40	25	10	105	Nov/Jan	Mediterranean
	25	35	30	10	100	Oct/Nov	Arid Region
	35	50	45	10	140	Feb	Mediterranean
Onion (dry)	15	25	70	40	150	April	Mediterranean
	20	35	110	45	210	Oct; Jan.	Arid Region; Calif.
Onion (green)	25	30	10	5	70	April/May	Mediterranean
	20	45	20	10	95	October	Arid Region
	30	55	55	40	180	March	Calif., USA
Onion (seed)	20	45	165	45	275	Sept	Calif. Desert, USA
Spinach	20	20	15/25	5	60/70	Apr; Sep/Oct	Mediterranean
	20	30	40	10	100	November	Arid Region
Radish	5	10	15	5	35	Mar/Apr	Medit.; Europe
	10	10	15	5	40	Winter	Arid Region
<b>b. Vegetables – Solanum Family (<i>Solanaceae</i>)</b>							
Egg plant	30	40	40	20	130\140	October	Arid Region
	30	45	40	25	0	May/June	Mediterranean
Sweet peppers (bell)	25/30	35	40	20	125	April/June	Europe and Medit.
	30	40	110	30	210	October	Arid Region
Tomato	30	40	40	25	135	January	Arid Region
	35	40	50	30	155	Apr/May	Calif., USA
	25	40	60	30	155	Jan	Calif. Desert, USA
	35	45	70	30	180	Oct/Nov	Arid Region
30	40	45	30	145	April/May	Mediterranean	
<b>c. Vegetables - Cucumber Family (<i>Cucurbitaceae</i>)</b>							
Cantaloupe	30	45	35	10	120	Jan	Calif., USA
	10	60	25	25	120	Aug	Calif., USA
Cucumber	20	30	40	15	105	June/Aug	Arid Region
	25	35	50	20	130	Nov; Feb	Arid Region
Pumpkin, Winter squash	20	30	30	20	100	Mar, Aug	Mediterranean
	25	35	35	25	120	June	Europe
Squash, Zucchini	25	35	25	15	100	Apr; Dec.	Medit.; Arid Reg.
	20	30	25	15	90	May/June	Medit.; Europe

continued...

\* Lengths of crop development stages provided in this table are indicative of general conditions, but may vary substantially from region to region, with climate and cropping conditions, and with crop variety. The user is strongly encouraged to obtain appropriate local information.

<sup>1</sup> Crucifers include cabbage, cauliflower, broccoli, and Brussel sprouts. The wide range in lengths of seasons is due to varietal and species differences.

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Crop	Init. (L <sub>ini</sub> )	Dev. (L <sub>dev</sub> )	Mid (L <sub>mid</sub> )	Late (L <sub>late</sub> )	Total	Plant Date	Region
Sweet melons	25	35	40	20	120	May	Mediterranean
	30	30	50	30	140	March	Calif., USA
	15	40	65	15	135	Aug	Calif. Desert, USA
	30	45	65	20	160	Dec/Jan	Arid Region
Water melons	20	30	30	30	110	April	Italy
	10	20	20	30	80	Mat/Aug	Near East (desert)
<b>d. Roots and Tubers</b>							
Beets, table	15	25	20	10	70	Apr/May	Mediterranean
	25	30	25	10	90	Feb/Mar	Mediterranean & Arid
Cassava: year 1 year 2	20	40	90	60	210	Rainy season	Tropical regions
	150	40	110	60	360		
Potato	25	30	30/45	30	115/130	Jan/Nov	(Semi)Arid Climate
	25	30	45	30	130	May	Continental Climate
	30	35	50	30	145	April	Europe
	45	30	70	20	165	Apr/May	Idaho, USA
	30	35	50	25	140	Dec	Calif. Desert, USA
Sweet potato	20	30	60	40	150	April	Mediterranean
	15	30	50	30	125	Rainy seas.	Tropical regions
Sugarbeet	30	45	90	15	180	March	Calif., USA
	25	30	90	10	155	June	Calif., USA
	25	65	100	65	255	Sept	Calif. Desert, USA
	50	40	50	40	180	April	Idaho, USA
	25	35	50	50	160	May	Mediterranean
	45	75	80	30	230	November	Mediterranean
	35	60	70	40	205	November	Arid Regions
<b>e. Legumes (<i>Leguminosae</i>)</b>							
Beans (green)	20	30	30	10	90	Feb/Mar	Calif., Mediterranean
	15	25	25	10	75	Aug/Sep	Calif., Egypt, Lebanon
Beans (dry)	20	30	40	20	110	May/June	Continental Climates
	15	25	35	20	95	June	Pakistan, Calif.
	25	25	30	20	100	June	Idaho, USA
Faba bean, broad bean	15	25	35	15	90	May	Europe
	20	30	35	15	100	Mar/Apr	Mediterranean
	90	45	40	60	235	Nov	Europe
- dry	90	45	40	0	175	Nov	Europe
- green	90	45	40	0	175	Nov	Europe
Green gram, cowpeas	20	30	30	20	110	March	Mediterranean
Groundnut	25	35	45	25	130	Dry season	West Africa
	35	35	35	35	140	May	High Latitudes
	35	45	35	25	140	May/June	Mediterranean
Lentil	20	30	60	40	150	April	Europe
	25	35	70	40	170	Oct/Nov	Arid Region
Peas	15	25	35	15	90	May	Europe
	20	30	35	15	100	Mar/Apr	Mediterranean
	35	25	30	20	110	April	Idaho, USA
Soybeans	15	15	40	15	85	Dec	Tropics
	20	30/35	60	25	140	May	Central USA
	20	25	75	30	150	June	Japan

continued...



ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Crop	Init. (L <sub>ini</sub> )	Dev. (L <sub>dev</sub> )	Mid (L <sub>mid</sub> )	Late (L <sub>late</sub> )	Total	Plant Date	Region
<b>f. Perennial Vegetables (with winter dormancy and initially bare or mulched soil)</b>							
Artichoke	40 20	40 25	250 250	30 30	360 325	Apr (1 <sup>st</sup> yr) May (2 <sup>nd</sup> yr)	California (cut in May)
Asparagus	50 90	30 30	100 200	50 45	230 365	Feb Feb	Warm Winter Mediterranean
<b>g. Fibre Crops</b>							
Cotton	30 45 30 30	50 90 50 50	60 45 60 55	55 45 55 45	195 225 195 180	Mar-May Mar Sept April	Egypt; Pakistan; Calif. Calif. Desert, USA Yemen Texas
Flax	25 30	35 40	50 100	40 50	150 220	April October	Europe Arizona
<b>h. Oil Crops</b>							
Castor beans	25 20	40 40	65 50	50 25	180 135	March Nov.	(Semi)Arid Climates Indonesia
Safflower	20 25 35	35 35 55	45 55 60	25 30 40	125 145 190	April Mar Oct/Nov	California, USA High Latitudes Arid Region
Sesame	20	30	40	20	100	June	China
Sunflower	25	35	45	25	130	April/May	Medit.; California
<b>i. Cereals</b>							
Barley/Oats/ Wheat	15 20 15 40 40 20 20 <sup>2</sup> 30 160	25 25 30 30 60 50 60 <sup>2</sup> 140 75	50 60 65 40 60 60 70 40 75	30 30 40 20 40 30 30 30 25	120 135 150 130 200 160 180 240 335	November March/Apr July Apr Nov Dec December November October	Central India 35-45 °L East Africa  Calif. Desert, USA Calif., USA Mediterranean Idaho, USA
Grains (small)	20 25	30 35	60 65	40 40	150 165	April Oct/Nov	Mediterranean Pakistan; Arid Reg.
Maize (grain)	30 25 20 20 30 30	50 40 35 35 40 40	60 45 40 40 50 50	40 30 30 30 30 50	180 140 125 125 150 170	April Dec/Jan June October April April	East Africa (alt.) Arid Climate Nigeria (humid) India (dry, cool) Spain (spr, sum.); Calif. Idaho, USA
Maize (sweet)	20 20 20 30 20	20 25 30 30 40	30 25 50/30 30 70	10 10 10 10 <sup>3</sup> 10	80 80 90 110 140	March May/June Oct/Dec April Jan	Philippines Mediterranean Arid Climate Idaho, USA Calif. Desert, USA
Millet	15 20	25 30	40 55	25 35	105 140	June April	Pakistan Central USA

continued...

- <sup>2</sup> These periods for winter wheat will lengthen in frozen climates according to days having zero growth potential and wheat dormancy. Under general conditions and in the absence of local data, fall planting of winter wheat can be presumed to occur in northern temperate climates when the 10-day running average of mean daily air temperature decreases to 17° C or December 1, whichever comes first. Planting of spring wheat can be presumed to occur when the 10-day running average of mean daily air temperature increases to 5° C. Spring planting of maize-grain can be presumed to occur when the 10-day running average of mean daily air temperature increases to 13° C.
- <sup>3</sup> The late season for sweet maize will be about 35 days if the grain is allowed to mature and dry.

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Crop	Init. (L <sub>ini</sub> )	Dev. (L <sub>dev</sub> )	Mid (L <sub>mid</sub> )	Late (L <sub>late</sub> )	Total	Plant Date	Region
Sorghum	20	35	40	30	130	May/June	USA, Pakis., Med. Arid Region
	20	35	45	30	140	Mar/April	
Rice	30	30	60	30	150	Dec; May	Tropics; Mediterranean Tropics
	30	30	80	40	180	May	
<b>j. Forages</b>							
Alfalfa, total season <sup>4</sup>	10	30	var.	var.	var.		last -4°C in spring until first -4°C in fall
Alfalfa <sup>4</sup> 1 <sup>st</sup> cutting cycle	10	20	20	10	60	Jan	Calif., USA. Idaho, USA.
	10	30	25	10	75	Apr (last -4°C)	
Alfalfa <sup>4</sup> , other cutting cycles	5	10	10	5	30	Mar	Calif., USA. Idaho, USA.
	5	20	10	10	45	Jun	
Bermuda for seed	10	25	35	35	105	March	Calif. Desert, USA
Bermuda for hay (several cuttings)	10	15	75	35	135	---	Calif. Desert, USA
Grass Pasture <sup>4</sup>	10	20	--	--	--		7 days before last -4°C in spring until 7 days after first -4°C in fall
Sudan, 1 <sup>st</sup> cutting cycle	25	25	15	10	75	Apr	Calif. Desert, USA
Sudan, other cutting cycles	3	15	12	7	37	June	Calif. Desert, USA
<b>k. Sugar Cane</b>							
Sugarcane, virgin	35	60	190	120	405		Low Latitudes Tropics Hawaii, USA
	50	70	220	140	480		
	75	105	330	210	720		
Sugarcane, ratoon	25	70	135	50	280		Low Latitudes Tropics Hawaii, USA
	30	50	180	60	320		
	35	105	210	70	420		
<b>l. Tropical Fruits and Trees</b>							
Banana, 1 <sup>st</sup> yr	120	90	120	60	390	Mar	Mediterranean
Banana, 2 <sup>nd</sup> yr	120	60	180	5	365	Feb	Mediterranean
Pineapple	60	120	600	10	790		Hawaii, USA
<b>m. Grapes and Berries</b>							
Grapes	20	40	120	60	240	April	Low Latitudes Calif., USA High Latitudes Mid Latitudes (wine)
	20	50	75	60	205	Mar	
	20	50	90	20	180	May	
	30	60	40	80	210	April	
Hops	25	40	80	10	155	April	Idaho, USA
<b>n. Fruit Trees</b>							
Citrus	60	90	120	95	365	Jan	Mediterranean
Deciduous Orchard	20	70	90	30	210	March	High Latitudes Low Latitudes Calif., USA
	20	70	120	60	270	March	
	30	50	130	30	240	March	

continued...

<sup>4</sup> In climates having killing frosts, growing seasons can be estimated for alfalfa and grass as:  
 alfalfa: last -4°C in spring until first -4°C in fall (Everson, D.O., M. Faubion and D.E. Amos 1978. "Freezing temperatures and growing seasons in Idaho." Univ. Idaho Agric. Exp. station bulletin 494. 18 p.)  
 grass: 7 days before last -4°C in spring and 7 days after last -4°C in fall (Kruse E.G. and Haise, H.R. 1974. "Water use by native grasses in high altitude Colorado meadows." USDA Agric. Res. Service, Western Region report ARS-W-6-1974. 60 pages)

**ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)**

Crop	Init. (L <sub>ini</sub> )	Dev. (L <sub>dev</sub> )	Mid (L <sub>mid</sub> )	Late (L <sub>late</sub> )	Total	Plant Date	Region
Olives	30	90	60	90	270 <sup>5</sup>	March	Mediterranean
Pistachios	20	60	30	40	150	Feb	Mediterranean
Walnuts	20	10	130	30	190	April	Utah, USA
<b>o. Wetlands - Temperate Climate</b>							
Wetlands (Cattails, Bulrush)	10 180	30 60	80 90	20 35	140 365	May November	Utah, USA; killing frost Florida, USA
Wetlands (short veg.)	180	60	90	35	365	November	frost-free climate

<sup>5</sup> Olive trees gain new leaves in March. See footnote 24 of Table 12 for additional information, where the K<sub>C</sub> continues outside of the "growing period".

Primary source: **FAO Irrigation and Drainage Paper 24 (Doorenbos and Pruitt, 1977), Table 22.**

ที่มา: Allen et al., 1998

## ตารางผนวกที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

Crop	$K_c$ ini <sup>1</sup>	$K_c$ mid	$K_c$ end	Maximum Crop Height (h) (m)
<b>a. Small Vegetables</b>	<b>0.7</b>	<b>1.05</b>	<b>0.95</b>	
Broccoli		1.05	0.95	0.3
Brussel Sprouts		1.05	0.95	0.4
Cabbage		1.05	0.95	0.4
Carrots		1.05	0.95	0.3
Cauliflower		1.05	0.95	0.4
Celery		1.05	1.00	0.6
Garlic		1.00	0.70	0.3
Lettuce		1.00	0.95	0.3
Onions - dry		1.05	0.75	0.4
- green		1.00	1.00	0.3
- seed		1.05	0.80	0.5
Spinach		1.00	0.95	0.3
Radish		0.90	0.85	0.3
<b>b. Vegetables – Solanum Family (<i>Solanaceae</i>)</b>	<b>0.6</b>	<b>1.15</b>	<b>0.80</b>	
Egg Plant		1.05	0.90	0.8
Sweet Peppers (bell)		1.05 <sup>2</sup>	0.90	0.7
Tomato		1.15 <sup>2</sup>	0.70-0.90	0.6
<b>c. Vegetables – Cucumber Family (<i>Cucurbitaceae</i>)</b>	<b>0.5</b>	<b>1.00</b>	<b>0.80</b>	
Cantaloupe	0.5	0.85	0.60	0.3
Cucumber – Fresh Market	0.6	1.00 <sup>2</sup>	0.75	0.3
– Machine harvest	0.5	1.00	0.90	0.3
Pumpkin, Winter Squash		1.00	0.80	0.4
Squash, Zucchini		0.95	0.75	0.3
Sweet Melons		1.05	0.75	0.4
Watermelon	0.4	1.00	0.75	0.4
<b>d. Roots and Tubers</b>	<b>0.5</b>	<b>1.10</b>	<b>0.95</b>	
Beets, table		1.05	0.95	0.4
Cassava – year 1	0.3	0.80 <sup>3</sup>	0.30	1.0
– year 2	0.3	1.10	0.50	1.5
Parsnip	0.5	1.05	0.95	0.4
Potato		1.15	0.75 <sup>4</sup>	0.6
Sweet Potato		1.15	0.65	0.4
Turnip (and Rutabaga)		1.10	0.95	0.6
Sugar Beet	0.35	1.20	0.70 <sup>5</sup>	0.5

continued...

- 1 These are general values for  $K_c$  ini under typical irrigation management and soil wetting. For frequent wettings such as with high frequency sprinkle irrigation or daily rainfall, these values may increase substantially and may approach 1.0 to 1.2.  $K_c$  ini is a function of wetting interval and potential evaporation rate during the initial and development periods and is more accurately estimated using Figures 29 and 30, or Equation 7-3 in Annex 7, or using the dual  $K_{cb}$  ini +  $K_e$ .
- 2 Beans, Peas, Legumes, Tomatoes, Peppers and Cucumbers are sometimes grown on stalks reaching 1.5 to 2 meters in height. In such cases, increased  $K_c$  values need to be taken. For green beans, peppers and cucumbers, 1.15 can be taken, and for tomatoes, dry beans and peas, 1.20. Under these conditions h should be increased also.
- 3 The midseason values for cassava assume non-stressed conditions during or following the rainy season. The  $K_c$  end values account for dormancy during the dry season.
- 4 The  $K_c$  end value for potatoes is about 0.40 for long season potatoes with vine kill.
- 5 This  $K_c$  end value is for no irrigation during the last month of the growing season. The  $K_c$  end value for sugar beets is higher, up to 1.0, when irrigation or significant rain occurs during the last month.



### ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Crop	$K_c$ ini <sup>1</sup>	$K_c$ mid	$K_c$ end	Maximum Crop Height (h) (m)
<b>j. Forages</b>				
Alfalfa Hay – averaged cutting effects – individual cutting periods – for seed	0.40	0.95 <sup>13</sup>	0.90	0.7
	0.40 <sup>14</sup>	1.20 <sup>14</sup>	1.15 <sup>14</sup>	0.7
	0.40	0.50	0.50	0.7
Bermuda hay – averaged cutting effects – Spring crop for seed	0.55	1.00 <sup>13</sup>	0.85	0.35
	0.35	0.90	0.65	0.4
Clover hay, Berseem – averaged cutting effects – individual cutting periods	0.40	0.90 <sup>13</sup>	0.85	0.6
	0.40 <sup>14</sup>	1.15 <sup>14</sup>	1.10 <sup>14</sup>	0.6
Rye Grass hay – averaged cutting effects	0.95	1.05	1.00	0.3
Sudan Grass hay (annual) – averaged cutting effects – individual cutting periods	0.50	0.90 <sup>14</sup>	0.85	1.2
	0.50 <sup>14</sup>	1.15 <sup>14</sup>	1.10 <sup>14</sup>	1.2
Grazing Pasture - Rotated Grazing – Extensive Grazing	0.40	0.85-1.05	0.85	0.15-0.30
	0.30	0.75	0.75	0.10
Turf grass - cool season <sup>15</sup> – warm season <sup>15</sup>	0.90	0.95	0.95	0.10
	0.80	0.85	0.85	0.10
<b>k. Sugar Cane</b>	0.40	1.25	0.75	3
<b>l. Tropical Fruits and Trees</b>				
Banana – 1 <sup>st</sup> year – 2 <sup>nd</sup> year	0.50	1.10	1.00	3
	1.00	1.20	1.10	4
Cacao	1.00	1.05	1.05	3
Coffee – bare ground cover – with weeds	0.90	0.95	0.95	2-3
	1.05	1.10	1.10	2-3
Date Palms	0.90	0.95	0.95	8
Palm Trees	0.95	1.00	1.00	8
Pineapple <sup>16</sup> – bare soil – with grass cover	0.50	0.30	0.30	0.6-1.2
	0.50	0.50	0.50	0.6-1.2
Rubber Trees	0.95	1.00	1.00	10
Tea – non-shaded – shaded <sup>17</sup>	0.95	1.00	1.00	1.5
	1.10	1.15	1.15	2
<b>m. Grapes and Berries</b>				
Berries (bushes)	0.30	1.05	0.50	1.5
Grapes – Table or Raisin – Wine	0.30	0.85	0.45	2
	0.30	0.70	0.45	1.5-2
Hops	0.3	1.05	0.85	5

continued...

<sup>13</sup> This  $K_c$  mid coefficient for hay crops is an overall average  $K_c$  mid coefficient that averages  $K_c$  for both before and following cuttings. It is applied to the period following the first development period until the beginning of the last late season period of the growing season.

<sup>14</sup> These  $K_c$  coefficients for hay crops represent immediately following cutting; at full cover; and immediately before cutting, respectively. The growing season is described as a series of individual cutting periods (Figure 35).

<sup>15</sup> Cool season grass varieties include dense stands of bluegrass, ryegrass, and fescue. Warm season varieties include bermuda grass and St. Augustine grass. The 0.95 values for cool season grass represent a 0.06 to 0.08 m mowing height under general turf conditions. Where careful water management is practiced and rapid growth is not required,  $K_c$ 's for turf can be reduced by 0.10.

<sup>16</sup> The pineapple plant has very low transpiration because it closes its stomates during the day and opens them during the night. Therefore, the majority of  $ET_c$  from pineapple is evaporation from the soil. The  $K_c$  mid <  $K_c$  ini since  $K_c$  mid occurs during full ground cover so that soil evaporation is less. Values given assume that 50% of the ground surface is covered by black plastic mulch and that irrigation is by sprinkler. For drip irrigation beneath the plastic mulch,  $K_c$ 's given can be reduced by 0.10.

<sup>17</sup> Includes the water requirements of the shade trees.

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Crop	$K_C$ ini <sup>1</sup>	$K_C$ mid	$K_C$ end	Maximum Crop Height (h) (m)
<b>n. Fruit Trees</b>				
Almonds, no ground cover	0.40	0.90	0.65 <sup>18</sup>	5
Apples, Cherries, Pears <sup>19</sup>				
- no ground cover, killing frost	0.45	0.95	0.70 <sup>18</sup>	4
- no ground cover, no frosts	0.60	0.95	0.75 <sup>18</sup>	4
- active ground cover, killing frost	0.50	1.20	0.95 <sup>18</sup>	4
- active ground cover, no frosts	0.80	1.20	0.85 <sup>18</sup>	4
Apricots, Peaches, Stone Fruit <sup>19, 20</sup>				
- no ground cover, killing frost	0.45	0.90	0.65 <sup>18</sup>	3
- no ground cover, no frosts	0.55	0.90	0.65 <sup>18</sup>	3
- active ground cover, killing frost	0.50	1.15	0.90 <sup>18</sup>	3
- active ground cover, no frosts	0.80	1.15	0.85 <sup>18</sup>	3
Avocado, no ground cover	0.60	0.85	0.75	3
Citrus, no ground cover <sup>21</sup>				
- 70% canopy	0.70	0.65	0.70	4
- 50% canopy	0.65	0.60	0.65	3
- 20% canopy	0.50	0.45	0.55	2
Citrus, with active ground cover or weeds <sup>22</sup>				
- 70% canopy	0.75	0.70	0.75	4
- 50% canopy	0.80	0.80	0.80	3
- 20% canopy	0.85	0.85	0.85	2
Conifer Trees <sup>23</sup>	1.00	1.00	1.00	10
Kiwi	0.40	1.05	1.05	3
Olives (40 to 60% ground coverage by canopy) <sup>24</sup>	0.65	0.70	0.70	3-5
Pistachios, no ground cover	0.40	1.10	0.45	3-5
Walnut Orchard <sup>19</sup>	0.50	1.10	0.65 <sup>18</sup>	4-5

continued...

<sup>18</sup> These  $K_C$  end values represent  $K_C$  prior to leaf drop. After leaf drop,  $K_C$  end  $\approx$  0.20 for bare, dry soil or dead ground cover and  $K_C$  end  $\approx$  0.50 to 0.80 for actively growing ground cover (consult Chapter 11).

<sup>19</sup> Refer to Eq. 94, 97 or 98 and footnotes 21 and 22 for estimating  $K_C$  for immature stands.

<sup>20</sup> Stone fruit category applies to peaches, apricots, pears, plums and pecans.

<sup>21</sup> These  $K_C$  values can be calculated from Eq. 98 for  $K_C$  min = 0.15 and  $K_C$  full = 0.75, 0.70 and 0.75 for the initial, mid season and end of season periods, and  $f_c$  eff =  $f_c$  where  $f_c$  = fraction of ground covered by tree canopy (e.g., the sun is presumed to be directly overhead). The values listed correspond with those in Doorenbos and Pruitt (1977) and with more recent measurements. The midseason value is lower than initial and ending values due to the effects of stomatal closure during periods of peak ET. For humid and subhumid climates where there is less stomatal control by citrus, values for  $K_C$  ini,  $K_C$  mid, and  $K_C$  end can be increased by 0.1 - 0.2, following Rogers et al. (1983).

<sup>22</sup> These  $K_C$  values can be calculated as  $K_C = f_c K_C$  ngc + (1 -  $f_c$ )  $K_C$  cover where  $K_C$  ngc is the  $K_C$  of citrus with no active ground cover (calculated as in footnote 21),  $K_C$  cover is the  $K_C$  for the active ground cover (0.95), and  $f_c$  is defined in footnote 21. The values listed correspond with those in Doorenbos and Pruitt (1977) and with more recent measurements. Alternatively,  $K_C$  for citrus with active ground cover can be estimated directly from Eq. 98 by setting  $K_C$  min =  $K_C$  cover. For humid and subhumid climates where there is less stomatal control by citrus, values for  $K_C$  ini,  $K_C$  mid, and  $K_C$  end can be increased by 0.1 - 0.2, following Rogers et al. (1983).

For non-active or only moderately active ground cover (active indicates green and growing ground cover with LAI > about 2 to 3),  $K_C$  should be weighted between  $K_C$  for no ground cover and  $K_C$  for active ground cover, with the weighting based on the "greenness" and approximate leaf area of the ground cover.

<sup>23</sup> Conifers exhibit substantial stomatal control due to reduced aerodynamic resistance. The  $K_C$  can easily reduce below the values presented, which represent well-watered conditions for large forests.

**ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)**

Crop	$K_c$ ini <sup>1</sup>	$K_c$ mid	$K_c$ end	Maximum Crop Height (h) (m)
<b>o. Wetlands – temperate climate</b>				
Cattails, Bulrushes, killing frost	0.30	1.20	0.30	2
Cattails, Bulrushes, no frost	0.60	1.20	0.60	2
Short Veg., no frost	1.05	1.10	1.10	0.3
Reed Swamp, standing water	1.00	1.20	1.00	1-3
Reed Swamp, moist soil	0.90	1.20	0.70	1-3
<b>p. Special</b>				
Open Water, < 2 m depth or in subhumid climates or tropics		1.05	1.05	
Open Water, > 5 m depth, clear of turbidity, temperate climate		0.65 <sup>25</sup>	1.25 <sup>25</sup>	

<sup>24</sup> These coefficients represent about 40 to 60% ground cover. Refer to Eq. 98 and footnotes 21 and 22 for estimating  $K_c$  for immature stands. In Spain, Pastor and Orgaz (1994) have found the following monthly  $K_c$ 's for olive orchards having 60% ground cover: 0.50, 0.50, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.45, 0.55, 0.60, 0.65, 0.50 for months January through December. These coefficients can be invoked by using  $K_c$  ini = 0.65,  $K_c$  mid = 0.45, and  $K_c$  end = 0.65, with stage lengths = 30, 90, 60 and 90 days, respectively for initial, development, midseason and late season periods, and using  $K_c$  during the winter ("off season") in December to February = 0.50.

<sup>25</sup> These  $K_c$ 's are for deep water in temperate latitudes where large temperature changes in the water body occur during the year, and initial and peak period evaporation is low as radiation energy is absorbed into the deep water body. During fall and winter periods ( $K_c$  end), heat is released from the water body that increases the evaporation above that for grass. Therefore,  $K_c$  mid corresponds to the period when the water body is gaining thermal energy and  $K_c$  end when releasing thermal energy. These  $K_c$ 's should be used with caution.

Primary sources:  $K_c$  ini: Doorenbos and Kassam (1979)  
 $K_c$  mid and  $K_c$  end: Doorenbos and Pruitt (1977); Pruitt (1986); Wright (1981, 1982), Snyder et al., (1989)

ที่มา: Allen et al., 1998



# ดัชนี

- albedo, 31
- CLIMWAT, 148
- consumptive use of water, 7
- CROPWAT, 139
- effective rainfall, 169
- energy balance
  - SEBAL, 200
  - S-SEBI, 201
- energy balance, 20
- energy balance
  - surface energy balance, 21
- energy balance
  - surface energy balance, 195
- evaporation, 3
- evaporative fraction, 199, 230
- evapotranspiration, 7
  - actual evapotranspiration, 14
  - crop coefficient, 11, 12
  - crop evapotranspiration, 11
  - maximum evapotranspiration, 11
  - potential evapotranspiration, 11
  - reference crop evapotranspiration, 10, 63, 64, 73, 85
  - reference evapotranspiration, 10
  - water stress coefficient, 15
- field capacity (FC), 180
- humidity, 43
  - dew point, 45
  - psychrometer, 47, 48
  - relative humidity, 45
- hydraulic conductivity
  - saturated hydraulic conductivity, 180
- irrigation requirement
  - net irrigation requirement, 183
- land preparation, 177
- latent heat of vaporization, 3, 74
- lysimeters, 16
- meteorology, 25
- Penman, 65
- Penman-Monteith, 64, 65
- psychrometric constant, 74
- puddling, 177

- radiation, 26
  - extraterrestrial radiation, 27
  - net long wave radiation, 34
  - net radiation, 35
  - net short wave radiation, 31
  - radiation balance, 26
  - short wave radiation, 31
  - solar constant, 28
  - solar radiation, 26
- remote sensing, 188
- slope of vapor pressure curve, 75
- soil water balance, 18
- Stefan-Boltzmann, 34
- temperature, 42
  - thermometer, 42
- total available water (TAW), 180, 183
- transpiration, 6
- vapor pressure, 43
  - actual vapor pressure, 43
  - saturated vapor pressure, 4, 43
  - vapor pressure deficit, 45
- wilting point (WP), 180
- wind, 54
  - anemometer, 55
- การคายน้ำ, 6
- การใช้น้ำของพืช, 7
  - การใช้น้ำของพืชที่แท้จริง, 14
  - การใช้น้ำของพืชอ้างอิง, 10, 63, 64, 73, 85
  - การใช้น้ำสูงสุดของพืช, 11
  - ศักยภาพการคายระเหย, 11
  - สัมประสิทธิ์การขาดน้ำของดิน, 15
- สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช, 11, 12
- การเตรียมแปลง, 177
- การทำเทือก, 177
- การระเหยคายน้ำ, 7
- การระเหยน้ำ, 3
- การสำรวจระยะไกล, 188
- ความชื้นของโล้ังความดันไอน้ำอิ่มตัว, 75
- ความชื้น, 43
  - ความชื้นสัมพัทธ์, 45
  - เครื่องวัดความชื้นแบบเทอร์มิเตอร์
  - กระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง, 47
  - จุดน้ำค้าง, 45
  - ไซโครมิเตอร์, 47, 48
- ความชื้นชลประทาน, 180
- ความชื้นที่จุดเหี่ยวเฉา, 180
- ความชื้นที่พืชนำไปใช้ได้ทั้งหมด, 180
- ความดันไอน้ำ, 43
  - ความดันไอน้ำจริงในอากาศ, 43
  - ความดันไอน้ำที่ขาด, 45
  - ความดันไอน้ำอิ่มตัว, 4, 43
- ความต้องการน้ำชลประทาน
  - ความต้องการน้ำชลประทานสุทธิ, 183
- ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ, 3, 74
- ค่าคงที่ของเทอมความชื้น, 74
- ถังวัดการใช้น้ำของพืช, 16
- ปริมาณการใช้น้ำของพืช, 183
- ฝนใช้การ, 169

พลังงานการแผ่รังสี, 26  
    ค่าคงตัวพลังงานดวงอาทิตย์, 28  
พลังงานการแผ่รังสีดวงอาทิตย์, 26  
พลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกของ  
    บรรยากาศโลก, 27  
พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาว  
    สุทธิ, 34  
พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้น  
    , 31  
พลังงานการแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้น  
    สุทธิ, 31  
พลังงานการแผ่รังสีสุทธิ, 35  
สมดุลพลังงานการแผ่รังสี, 26  
เพนแมน, 65  
เพนแมน-มอนทิธ, 64, 65

ลม, 54  
    anemometer, 55  
สเตฟาน-โบลท์แมน, 34  
สภาพการนำน้ำ  
    สภาพการนำน้ำของดินอิมตัว, 180  
สมดุลน้ำในดิน, 18  
สมดุลพลังงาน, 20  
    SEBAL, 200  
    S-SEBI, 201  
    สมดุลพลังงานที่พื้นผิว, 21, 195  
สัดส่วนการระเหย, 199, 230  
อัลเบโด, 31  
อุณหภูมิจ, 42  
    เทอร์โมมิเตอร์, 42  
อุณหภูมิจ, 25

