



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การหาค่าการใช้น้ำของพืชในโครงการชลประทานขนาดใหญ่

โดยใช้การสำรวจระยะไกล

โดย เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย

กรกฎาคม 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การหาค่าการใช้น้ำของพืชในโครงการชลประทานขนาดใหญ่

โดยใช้การสำรวจระยะไกล

ผู้วิจัย

เอกสิทธิ์ โผสิตสกุลชัย

สังกัด

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งช่วยให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

Dr. Frédéric Born ที่รับเป็นนักวิจัยที่ปรึกษา และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้การสนับสนุนทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัย และได้เอื้อเฟื้อสถานที่ตลอดจนอุปกรณ์สำหรับการดำเนินงานวิจัย

หน่วยงานต่าง ๆ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำวิจัย ได้แก่ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Institute of Industrial Science (Japan), กรมอุตุนิยมวิทยา, กรมชลประทาน, DORAS Center, สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย

นิสิตปริญญาโทและเอกของภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยเฉพาะนิสิตในความดูแลของผู้วิจัย นายชูพันธุ์ ชมภูจักร์ นายไชยวัฒน์ เจริญจิระตระกูล นายณัฐพล เกิดสุข นายภาณุวัฒน์ ปิ่นทอง และนายยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์ ที่มีส่วนช่วยเหลือทั้งในเรื่องของการรวบรวมข้อมูลและเอกสาร การออกสำรวจภาคสนาม และการจัดเตรียมรายงาน

บุคคลในครอบครัวและเพื่อนทุก ๆ คน ที่ได้ให้กำลังใจและใช้เวลาแก่ผู้วิจัยในการทำงานอย่างเต็มที่

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG4680119

ชื่อโครงการ : การหาค่าการใช้ น้ำของพืชในโครงการชลประทานขนาดใหญ่

โดยใช้การสำรวจระยะไกล

ชื่อนักวิจัย : เอกสิทธิ์ โขสิตสกุลชัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

E-mail Address : ekasit.k@ku.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 กรกฎาคม 2546 ถึง 30 มิถุนายน 2547

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการใช้เทคนิคสำรวจระยะไกลสำหรับการประเมินการใช้น้ำของพืชในเขตชลประทานของที่ราบภาคกลางระหว่างฤดูแล้งปี 2544-45 ในการนี้ ได้เลือกใช้หลักสมมูลของพลังงานที่พื้นผิว สำหรับการประเมินอัตราการระเหย พร้อมกับได้เปรียบเทียบกับผลลัพท์กับการใช้น้ำของพืชที่หาจากวิธี FAO Penman-Monteith และถาดวัดการระเหย Class A

การสะท้อนของพื้นผิว ดัชนีพืชพรรณ และอุณหภูมิพื้นผิวที่หาจากภาพถ่ายดาวเทียม NOAA/AVHRR เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประเมินตัวแปรของสมการสมมูลพลังงาน ได้แก่ พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ พลังงานที่ถ่ายเทลงดิน และพลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ จากนั้น ข้อมูลเหล่านี้ได้ถูกใช้สำหรับหาสัดส่วนการระเหยจาก 2 วิธีเปรียบเทียบกัน (SEBAL และ S-SEBI) และท้ายสุด นำไปใช้หาอัตราการระเหยเฉลี่ยรายวัน ผลการประเมินพบว่า อัตราการใช้น้ำสูงสุดของพืชในเขตชลประทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการใช้น้ำของพืชอ้างอิงที่หาจากวิธี FAO Penman-Monteith ส่วนอัตราการระเหยจริงของพืชในเขตชลประทานมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับอัตราการใช้น้ำสูงสุด แต่พื้นที่นอกเขตชลประทานมีค่าต่ำกว่าอันเป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าสัดส่วนการระเหยของพื้นที่ทั้งสอง ซึ่งค่าสัดส่วนการระเหยนี้สามารถใช้อธิบายสถานะของความชื้นในพื้นที่ได้

กระบวนการหาการใช้น้ำของพืชจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยหลักสมมูลพลังงานให้ผลในเกณฑ์น่าเชื่อถือได้ แต่ยังต้องการงานวิจัยต่อเนื่องเพื่อให้ผลลัพท์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น และเพื่อลดข้อจำกัดของกระบวนการวิธีโดยเฉพาะในช่วงฤดูฝน นอกจากนี้ ยังมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาถึงแนวทางที่จะนำไปประยุกต์ในการบริหารจัดการน้ำและพัฒนาเป็นเครื่องมือใช้งานจริงต่อไป

คำหลัก : ปริมาณการใช้น้ำของพืช, การสำรวจระยะไกล, สมมูลพลังงานที่พื้นผิว, ที่ราบภาคกลาง

Abstract

Project Code :MRG4680119

**Project Title : Determination of Evapotranspiration of Large Irrigation Scheme
by Remote Sensing**

Investigator : Ekasit Kositsakulchai, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus

E-mail Address : ekasit.k@ku.ac.th

Project Period : July 1, 2003 – June 30, 2004

This research investigates the remote-sensing method in estimating crop evapotranspiration (ET) from a large-irrigation scheme in the Central Plain of Thailand, during the dry season 2001-2002. Evaporation flux was estimated by the surface-energy-balance approach, and validated with the results from the FAO Penman-Monteith and the pan-evaporation methods.

Surface albedo, vegetation index (NDVI) and surface temperature are fundamental data in assessing the energy-balance parameters, including the net radiation, the soil heat flux and the sensible heat flux. These parameters were next used for estimating the evaporative fraction (EF) from 2 comparative approaches: SEBAL and S-SEBI. Finally, the 24-h actual ET was retrieved. The results reveal that the maximum ET shows a good agreement in comparison with the reference-crop ET from the FAO Penman-Monteith method. The actual ET from the irrigated area presented also a similar tendency. While it was found the lower value in the non-irrigated area. This is due to the difference in the evaporative fraction between these areas. The evaporative fraction can besides imply their soil-moisture states.

The surface-energy-balance algorithm presents reliable results in estimating ET from satellite image. However, further researches seem essential in order to improve the estimation precision and to attenuate the algorithm limitation, especially during the cloudy period. Moreover, it is interesting to continue exploring options in water-management applications, and developing a real practical tool.

Keywords : Evapotranspiration, Remote Sensing, Surface Energy Balance, Central Plain of Thailand

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อ	iii
Abstract	iv
สารบัญ	v
สารบัญภาพ	vii
สารบัญตาราง	xi
1. บทนำ	- 1 -
1.1 ความสำคัญของเรื่อง	- 1 -
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการวิจัย	- 1 -
2. แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำของพืช	- 2 -
2.1 การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช	- 4 -
2.1.1 การหาการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโดยวิธีของ Penman	- 4 -
2.1.2 การหาการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโดยใช้ค่าวัดการระเหย	- 6 -
2.2 การสำรวจระยะไกลและการจัดการน้ำชลประทาน	- 8 -
2.3 การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชจากภาพถ่ายดาวเทียม	- 9 -
2.3.1 หลักการหาค่าการใช้น้ำของพืชจากภาพถ่ายดาวเทียม	- 9 -
2.3.2 การหาปริมาณการใช้น้ำโดยหลักสมดุลพลังงาน	- 13 -
3. พื้นที่ศึกษา: ที่ราบลุ่มภาคกลาง	- 19 -
3.1 สภาพทั่วไป	- 19 -
3.2 การพัฒนาระบบชลประทาน	- 22 -
3.2.1 การพัฒนาลุ่มน้ำเจ้าพระยาและแม่กลอง	- 22 -
3.2.2 ระบบควบคุมน้ำในที่ราบภาคกลาง	- 23 -
3.3 สภาพทางการเกษตร	- 25 -
3.4 การบริหารจัดการน้ำ	- 26 -
4. ข้อมูลและวิธีการดำเนินงาน	- 28 -
4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย	- 28 -
4.2 วิธีการดำเนินงาน	- 35 -

5. ผลลัพธ์.....	- 37 -
5.1 การประเมินพารามิเตอร์พื้นผิว.....	- 38 -
5.2 การประเมินพารามิเตอร์สมการสมดุลพลังงาน.....	- 43 -
5.3 การหาอัตราการระเหย.....	- 48 -
5.3.1 สัดส่วนการระเหย.....	- 48 -
5.3.2 อัตราการระเหยเฉลี่ยในรอบวัน.....	- 52 -
5.4 การตรวจสอบผลลัพธ์.....	- 62 -
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	- 65 -
บรรณานุกรม.....	- 68 -
ภาคผนวก รายละเอียดการคำนวณและผลลัพธ์ การหาอัตราการระเหยจากภาพถ่ายดาวเทียม	ก-1
ก รายละเอียดการคำนวณ.....	ก-2
ก.1 ข้อมูลพื้นผิว (Surface Parameters).....	ก-2
ก.1.1 การสะท้อนของพื้นผิว (Surface Albedo)	ก-2
ก.1.2 ดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index).....	ก-4
ก.1.3 ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิว (Surface Emissivity)	ก-4
ก.1.4 อุณหภูมิพื้นผิว (Surface Temperature).....	ก-5
ก.1.5 อุณหภูมิที่พื้นผิวอ้างอิง (surface temperature for reference elevation).....	ก-5
ก.2 พารามิเตอร์ของสมดุลพลังงาน.....	ก-8
ก.2.1 รังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (Net Radiation).....	ก-8
ก.2.2 ความร้อนที่ถ่ายเทสู่ในดิน (Soil Heat Flux)	ก-12
ก.2.3 ความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux)	ก-13
ก.3 อัตราการใช้น้ำของพืชเฉลี่ยตลอดวัน (24-h evapotranspiration).....	ก-17
ข. ผลการคำนวณ.....	ข-1
ข.1 พารามิเตอร์พื้นผิว (Surface Parameters)	ข-1
ข.2 พารามิเตอร์ของสมดุลพลังงาน.....	ข-9
ข.3 สัดส่วนการระเหย.....	ข-17
ข.4 การระเหยของน้ำ	ข-23

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2-1	ถาดวัดการระเหยมาตรฐานแบบ Class A.....	- 6 -
ภาพที่ 2-2	สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ถาดตั้งอยู่แยกเป็น 2 กรณี (Allen et al., 1998).....	- 7 -
ภาพที่ 2-3	องค์ประกอบหลักของกระบวนการวิธี SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998)	- 12 -
ภาพที่ 2-4	สมดุลพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ผิวโลก	- 14 -
ภาพที่ 2-5	การถ่ายเทพลังงานความร้อนลงดิน	- 14 -
ภาพที่ 2-6	ค่าความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน (r_{ah})	- 15 -
ภาพที่ 2-7	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับค่าการสะท้อนของพื้นผิว (Roerink et al., 2000)	- 17 -
ภาพที่ 3-1	ลุ่มน้ำแม่น้ำเจ้าพระยา (Binnie et al., 1997).....	- 20 -
ภาพที่ 3-2	ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีของที่ราบภาคกลาง (ดัดแปลงจาก Binnie et al., 1997).....	- 21 -
ภาพที่ 3-3	แม่น้ำสายหลัก ในที่ราบภาคกลาง.....	- 21 -
ภาพที่ 3-4	คลองชลประทานสายหลัก ในที่ราบภาคกลาง	- 24 -
ภาพที่ 4-1	ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูง เชิงตัวเลข (DEM).....	- 29 -
ภาพที่ 4-2	ตำแหน่งของสถานีตรวจอากาศ ในบริเวณพื้นที่ศึกษา	- 30 -
ภาพที่ 4-3	ภาพสีผสม RGB 1:2:1 ภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544	- 32 -
ภาพที่ 4-4	ตัวอย่างหัวเรื่องของภาพถ่ายจากการประมวลผลผ่านเครือข่าย.....	- 33 -
ภาพที่ 5-1	พื้นที่ในเขตชลประทาน แยกตามกลุ่มโครงการชลประทาน	- 36 -
ภาพที่ 5-2	ค่าการสะท้อนของพื้นผิว จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544	- 39 -
ภาพที่ 5-3	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของค่าการสะท้อนของพื้นผิว จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 39 -
ภาพที่ 5-4	ดัชนีพืชพรรณ จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544.....	- 40 -
ภาพที่ 5-5	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีพืชพรรณ (NDVI) จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 40 -
ภาพที่ 5-6	อุณหภูมิพื้นผิว จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544.....	- 41 -
ภาพที่ 5-7	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิว จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 41 -
ภาพที่ 5-8	พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544	- 44 -
ภาพที่ 5-9	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)	- 44 -
ภาพที่ 5-10	พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544	- 45 -
ภาพที่ 5-11	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทลงดิน จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 45 -

ภาพที่ 5-12	พลังงานความร้อนที่ถ่ายเท สู่อากาศโดยวิธี SEBAL จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544	- 46 -
ภาพที่ 5-13	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 46 -
ภาพที่ 5-14	สัดส่วนการระเหย (EF) หาโดยวิธี SEBAL จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544	- 49 -
ภาพที่ 5-15	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของสัดส่วนการระเหย จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 49 -
ภาพที่ 5-16	ดัชนีสมมูลพลังงาน (SEBI) หาโดยวิธี S-SEBI จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544	- 50 -
ภาพที่ 5-17	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีสมมูลพลังงาน SEBI จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 50 -
ภาพที่ 5-18	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBAL จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 54 -
ภาพที่ 5-19	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBI จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 54 -
ภาพที่ 5-20	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงหาโดยวิธี SEBAL แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	- 55 -
ภาพที่ 5-21	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงหาโดยวิธี SEBI แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	- 56 -
ภาพที่ 5-22	อัตราการการระเหยเฉลี่ยตลอดวัน หาโดยวิธี SEBAL	- 57 -
ภาพที่ 5-23	อัตราการการระเหยเฉลี่ยตลอดวัน หาโดยวิธี SEBI.....	- 59 -
ภาพที่ 5-24	การเปลี่ยนแปลงของอัตราการระเหยจากวิธีต่าง ๆ.....	- 63 -
ภาพที่ ก-1	การตรวจวัดการสะท้อนของพื้นผิว	ก-3
ภาพที่ ก-2	สมมูลพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ผิวโลก	ก-8
ภาพที่ ก-3	มุมเอียงรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแนวแกนเส้นตรงศีรษะบนท้องฟ้า	ก-10
ภาพที่ ก-4	มุมเอียงรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแนวแกนเส้นตรงศีรษะบนท้องฟ้า กรณีที่พื้นที่มีความลาดชัน.....	ก-10
ภาพที่ ก-5	ค่าความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน (r_{ah}).....	ก-13
ภาพที่ ก-6	การหาค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิอากาศ.....	ก-15
ภาพที่ ข-1	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของค่าการสะท้อนของพื้นผิว จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-1
ภาพที่ ข-2	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีพืชพรรณ (NDVI) จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-2
ภาพที่ ข-3	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิว จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-2

ภาพที่ ข-4	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของค่าการสะท้อนของพื้นผิว แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-3
ภาพที่ ข-5	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีพืชพรรณ (NDVI) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-4
ภาพที่ ข-6	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิว แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-5
ภาพที่ ข-7	การสะท้อนแสงที่พื้นผิว (surface albedo).....	ข-6
ภาพที่ ข-8	ดัชนีพืชพรรณ (NDVI).....	ข-7
ภาพที่ ข-9	อุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature).....	ข-8
ภาพที่ ข-10	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-9
ภาพที่ ข-11	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทลงดิน จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-10
ภาพที่ ข-12	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-10
ภาพที่ ข-13	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-11
ภาพที่ ข-14	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทลงดิน แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-12
ภาพที่ ข-15	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-13
ภาพที่ ข-16	พลังงานรังสีดวงอาทิตย์สุทธิ (net radiation).....	ข-14
ภาพที่ ข-17	พลังงานที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux).....	ข-15
ภาพที่ ข-18	พลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux).....	ข-16
ภาพที่ ข-19	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของสัดส่วนการระเหย จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-18
ภาพที่ ข-20	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีสมดุลพลังงาน SEBI จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-18
ภาพที่ ข-21	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของสัดส่วนการระเหย (EF) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-19
ภาพที่ ข-22	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีสมดุลพลังงาน (SEBI) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-20
ภาพที่ ข-23	สัดส่วนการระเหยจากวิธี SEBAL (evaporative fraction, EF).....	ข-21
ภาพที่ ข-24	ดัชนีสมดุลพลังงานจากวิธี SEBI (surface energy balance index, SEBI).....	ข-22
ภาพที่ ข-25	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBAL จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-23

ภาพที่ ข-26	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBI จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-24
ภาพที่ ข-27	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงหาโดยวิธี SEBAL แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-25
ภาพที่ ข-28	การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงหาโดยวิธี SEBI แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-26
ภาพที่ ข-29	อัตราการระเหยจริง จากวิธี SEBAL (actual evapotranspiration by SEBAL).....	ข-27
ภาพที่ ข-30	อัตราการระเหยจริง จากวิธี SEBI (actual evapotranspiration by SEBI)	ข-28
ภาพที่ ข-31	ลำดับการเรียงภาพที่นำเสนอ.....	ข-29

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1	ค่า Pan Coefficient ของดาวัดการระเหย Class A (Allen et al., 1998).....	- 7 -
ตารางที่ 4-1	สถานีตรวจอากาศเกษตร (สกษ.) ในบริเวณพื้นที่ศึกษา.....	- 30 -
ตารางที่ 4-2	ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม NOAA ที่รวบรวม ระหว่าง ฤดูแล้ง 2544 – 45.....	- 31 -
ตารางที่ 4-3	รายละเอียดของข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม NOAA	- 32 -
ตารางที่ 5-1	ค่าพารามิเตอร์พื้นผิว (surface parameters) จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 38 -
ตารางที่ 5-2	ค่าพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงาน จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 43 -
ตารางที่ 5-3	ค่าสัดส่วนการระเหย จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 48 -
ตารางที่ 5-4	อัตราการระเหยจริง (actual evapotranspiration) จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	- 51 -
ตารางที่ 5-5	อัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBAL แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก	- 55 -
ตารางที่ 5-6	อัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBI แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก	- 56 -
ตารางที่ 5-7	อัตราการระเหยจากวิธีต่าง ๆ เป็นมิลลิเมตรต่อวัน	- 63 -
ตารางที่ ก-1	วิธี Split-window ที่มีการศึกษาพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้งาน	ก-6
ตารางที่ ก-2	สมการสำหรับการคำนวณค่าปรับแก้ (stability correction factor, $\Psi_{h(z)}$)	ก-16
ตารางที่ ข-1	ค่าพารามิเตอร์พื้นผิว (surface parameters) จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-1
ตารางที่ ข-2	ค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-3
ตารางที่ ข-3	ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก	ข-4
ตารางที่ ข-4	อุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-5
ตารางที่ ข-5	ค่าพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงาน จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-9
ตารางที่ ข-6	พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-11
ตารางที่ ข-7	พลังงานที่ถ่ายเทลงดินแยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก	ข-12
ตารางที่ ข-8	พลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศแยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก	ข-13
ตารางที่ ข-9	ค่าสัดส่วนการระเหย จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-17

ตารางที่ ข-10 สัดส่วนการระเหย (EF) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก	ข-19
ตารางที่ ข-11 ดัชนีสมดุลพลังงาน (SEBI) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก	ข-20
ตารางที่ ข-12 อัตราการระเหยจริง (actual evapotranspiration) จำแนกตามพื้นที่ ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation).....	ข-23
ตารางที่ ข-13 อัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBAL แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก.....	ข-25
ตารางที่ ข-14 อัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBI แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก	ข-26

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญของเรื่อง

การใช้น้ำเพื่อการเกษตรเป็นกิจกรรมที่มีการใช้น้ำมากที่สุดและมีลำดับความสำคัญสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่ทำการเกษตรเป็นหลักอย่างประเทศไทย การประเมินค่าการใช้น้ำของพืชอย่างถูกต้องแม่นยำช่วยให้ทำการวางแผนบริหารจัดการน้ำอย่างมีประสิทธิภาพและใช้น้ำให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุด ถึงกระนั้น การวางแผนในพื้นที่ขนาดใหญ่ระดับลุ่มน้ำหรือทั้งระบบส่งน้ำชลประทานจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก การรวบรวมข้อมูลอย่างครบถ้วนและถูกต้องสมบูรณ์นั้นกระทำได้ยาก และยังเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง การใช้วิธีสำรวจระยะไกลเป็นแนวทางหนึ่งที่แก้ปัญหาในด้านข้อมูลได้ แต่ก็มีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ทั้งในด้านเทคนิคที่ต้องใช้กระบวนการวิเคราะห์ขั้นสูง และเสียค่าใช้จ่ายมากในการจัดหาภาพถ่ายดาวเทียม

เนื่อง งานด้านการวางแผนจัดสรรน้ำนั้น กระทำเป็นรายสัปดาห์ และครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 3-5 แสนไร่ต่อโครงการส่งน้ำฯ จนถึงหลายล้านไร่เมื่อพิจารณาทั้งระบบส่งน้ำ ดังนั้น ภาพ AVHRR จากดาวเทียม NOAA จึงมีข้อน่าสนใจในด้านความถี่ในการถ่ายภาพ พื้นที่เดิม ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ และมีค่าใช้จ่ายในการจัดหาต่ำ แม้ว่าจะมีข้อด้อยในด้านความละเอียด (resolution) ของภาพถ่ายเมื่อเทียบกับข้อมูลจากดาวเทียมแบบอื่น

งานวิจัยนี้ จึงเป็นการศึกษาเพื่อตอบคำถามถึง ความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการใช้ภาพถ่ายของดาวเทียม NOAA/AVHRR ที่หาได้จากอินเทอร์เน็ต เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สภาพการใช้น้ำของพืชทั้งภูมิภาค (regional-scale evapotranspiration) ซึ่งผลของงานวิจัยจะให้แนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินปริมาณน้ำชลประทานที่ต้องส่ง การวางแผนจัดสรรน้ำทั้งระบบส่งน้ำ และการประเมินผลสัมฤทธิ์ของการบริหารจัดการน้ำชลประทาน ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาวิธีสำรวจระยะไกลสำหรับการประเมินการใช้น้ำของพืชสำหรับโครงการชลประทานขนาดใหญ่ โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- ศึกษาและทดสอบกระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียม NOAA/AVHRR สำหรับใช้ประเมินค่าการใช้น้ำของพืชโดยมุ่งเน้นวิธีที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติ
- ประเมินปริมาณการใช้น้ำของพืชในเขตชลประทานของที่ราบภาคกลางจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม NOAA/AVHRR พร้อมกับเปรียบเทียบกับวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

2. แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำของพืช

การคายระเหย (evapotranspiration) เป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูญเสียจากพื้นที่สู่บรรยากาศในรูปของไอน้ำ ปริมาณดังกล่าวนี้ประกอบขึ้นด้วยสองส่วนหลัก (อภิชาติ และคณะ, 2524; วิบูลย์, 2526) คือ

1. ปริมาณที่พืชดูดไปจากดิน นำไปใช้สร้างเซลล์และเนื้อเยื่อและคายออกทางใบสู่บรรยากาศ ซึ่งเรียกว่า การคายน้ำ (transpiration) และ
2. ปริมาณน้ำที่ระเหยจากผิวดินบริเวณรอบ ๆ ต้นพืช จากผิวน้ำในขณะให้น้ำหรือขณะที่มีน้ำขังอยู่ และจากน้ำที่เกาะอยู่ตามใบเนื่องจากฝนหรือการให้น้ำ ซึ่งเรียกว่า การระเหย (evaporation)

จากนิยามข้างต้น เห็นได้ว่าการคายน้ำ (transpiration) นั้นเป็นส่วนหนึ่งของน้ำที่ระเหยไปทั้งหมดนั่นเอง โดยน้ำส่วนนี้ระเหยสู่บรรยากาศจากดินโดยผ่านต้นพืช ส่วน การระเหย (evaporation) เป็นกระบวนการที่น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ จากผิวน้ำ ผิวดิน หรือผิวของพืชพรรณ และคำว่า การคายระเหย (evapotranspiration) เป็นคำที่เรียกรวมของกระบวนการทั้งสอง

แนวคิดของการคายระเหยนั้น ได้นำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางวิศวกรรมชลประทาน ในบางครั้งเทอม evapotranspiration มักใช้ในภาษาไทยว่า การใช้น้ำของพืช ซึ่งมีความหมายเกี่ยวข้องกับการหาปริมาณน้ำชลประทานที่พืชต้องการ ในขณะที่คำว่า การคายระเหยนั้นเป็นคำซึ่งใช้ทั่ว ๆ ไป ไม่เฉพาะเจาะจง ซึ่งมีเทอมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ (เอกสิทธิ์, 2547)

- ศักยภาพการคายระเหย (potential evapotranspiration, ET_p) จากนิยามของกรมอุตุนิยมวิทยา¹ ศักยภาพการคายระเหย เป็นอัตราสูงสุดของปริมาณน้ำที่พืชคายออกมา (transpiration) รวมกับปริมาณน้ำที่ระเหยจากพื้นดินหรือพื้นน้ำ (evaporation) ในบริเวณที่มีพืชเดี่ยว ๆ หรือหญ้าปกคลุมอย่างสมบูรณ์ และมีน้ำหล่อเลี้ยงไม่จำกัด
- การคายระเหยของพืชอ้างอิงหรือปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง² (reference crop evapotranspiration, ET_r หรือ ET_o) เป็นอัตราการคายน้ำรวมการระเหยจากพื้นผิวที่มีหญ้าสูง 8 ถึง 15 ซม. ปกคลุมสม่ำเสมอ ซึ่งหญ้านี้จะต้องเป็นช่วงกำลังเจริญเติบโตและปกคลุมเต็มพื้นผิวดิน และอยู่ในสภาพไม่ขาดน้ำ³ (Dorenbos et al., 1977)

¹ ที่มา : อุตุนิยมวิทยาเพื่อการเกษตร กรมอุตุนิยมวิทยา (<http://www.tmd.go.th/program/ngr.php>)

² ในการใช้งานในทางปฏิบัตินั้นเทอมของ potential evapotranspiration และ reference crop evapotranspiration นั้นแทบไม่มีความแตกต่างกันมากนัก กล่าวคือเป็นการคายระเหยของน้ำจากพื้นผิวที่มีพืชพรรณปกคลุม โดยที่มีปริมาณน้ำไม่จำกัด แต่เทอมของ reference crop evapotranspiration มีการระบุลักษณะของพืชพรรณที่ปกคลุมให้เป็นมาตรฐานอ้างอิง

³ 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).

- พืชอ้างอิง (reference crop) เป็นพืชที่มีความสูง 0.12 ม. มีค่าความต้านทานพื้นผิวดังที่ (surface resistance) เท่ากับ 70 s.m^{-1} และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (albedo) 0.23^4 (Allen et al., 1998)
- การใช้น้ำของพืช (crop evapotranspiration, ET_c) หรือ การใช้น้ำสูงสุด (maximum evapotranspiration, ET_m) เป็นการนำปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพืชมาพิจารณาทั้งชนิดของพืช และช่วงการเจริญเติบโตในระยะต่าง ๆ แต่ยังคงว่ามีปริมาณน้ำไม่จำกัด สามารถหาได้โดยการปรับค่าการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ET_o ด้วยสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชในช่วงระยะการเจริญเติบโตต่าง ๆ ดังสมการที่ 2-1

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad \text{สมการที่ 2-1}$$

- สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (crop coefficient, K_c) เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของพืช หาได้จากการทดลองวัดการใช้น้ำจริงจากถังวัดการใช้น้ำที่มีการปลูกหญ้า (พืชอ้างอิง) ET_o^5 และพืชที่ต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์ ET_c ซึ่งตั้งในบริเวณใกล้เคียงกันค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำในช่วงการเจริญเติบโตช่วงใดช่วงหนึ่งหรือตลอดฤดูการเพาะปลูก คำนวณได้จากสมการที่ 2-2

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad \text{สมการที่ 2-2}$$

- การใช้น้ำของพืชที่แท้จริง (actual evapotranspiration, ET_a) การหาใช้น้ำของพืชที่แท้จริงสามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่อง lysimeter แต่เนื่องจากความยุ่งยากในการติดตั้งเครื่องมือทั้งในเรื่องค่าใช้จ่ายและเวลา การหาค่า ET_a มักจะใช้วิธีประมาณค่าโดยพิจารณาจากความชื้นที่มีอยู่ในดิน และการปรับค่าการใช้น้ำของพืช ET_c ด้วยสัมประสิทธิ์การขาดน้ำของดิน (water stress coefficient, K_s) ดังสมการที่ 2-3

$$ET_a = K_s \cdot ET_c \quad \text{สมการที่ 2-3}$$

หรือเขียนในเทอมของ reference crop evapotranspiration ได้ดังสมการที่ 2-4

$$ET_a = K_s \cdot K_c \cdot ET_o \quad \text{สมการที่ 2-4}$$

รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถศึกษาได้จาก อภิชาติและคณะ (2524), วิบูลย์ (2526) หรือ Allen et al. (1998)

⁴ Reference crop: A hypothetical reference crop with an assumed crop height of 0.12 m, a fixed surface resistance of 70 s.m^{-1} and an albedo of 0.23 (Allen et al., 1998).

⁵ ในปัจจุบันมักนิยมหาการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโดยการคำนวณจากข้อมูลภูมิอากาศตามวิธีของ FAO Penman-Monteith

2.1 การหาปริมาณการใช้น้ำของพืช

การคำนวณหาค่าการใช้น้ำของพืชจากข้อมูลภูมิอากาศ อาจแบ่งตามชนิดของข้อมูลที่น่ามาใช้ออกได้เป็น 4 กลุ่ม (Jensen et al., 1990) กล่าวคือ

- 1) วิธีการหาโดยใช้อุณหภูมิ (temperature-based estimating methods) เช่น วิธีของ Blaney-Criddle
- 2) วิธีการหาโดยใช้รังสีแสงอาทิตย์ (radiation methods) เช่น วิธีของ Makkink
- 3) วิธีการหาโดยใช้วิธีผสม (combination methods) เช่น วิธีของ Penman
- 4) วิธีการหาโดยภาวัดการระเหย (pan-evaporation methods)

สำหรับในประเทศไทย วิธีการหาค่าการใช้น้ำของพืชโดยวิธีผสมจากสูตรที่พัฒนามาจากวิธีของ Penman และโดยภาวัดการระเหยได้รับความนิยมใช้มากกว่าวิธีการหาโดยใช้อุณหภูมิและโดยใช้รังสีแสงอาทิตย์ แม้ว่าการหาโดยใช้อุณหภูมิและรังสีแสงอาทิตย์จะต้องการข้อมูลและมีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่าวิธีผสมอย่างวิธีของ Penman แต่เนื่องจากวิธีของ Penman ได้รวบรวมองค์ประกอบทุกอย่างที่มีผลต่อการใช้น้ำของพืชมาอยู่ในสูตร จึงให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ดีกว่าวิธีอื่น ๆ (วิบูลย์, 2526) ในขณะที่ วิธีการหาโดยภาวัดการระเหยเป็นวิธีที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ

2.1.1 การหาการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโดยวิธีของ Penman

- วิธีของ Penman ได้มีการพัฒนาปรับปรุงมาตลอดนับแต่ปี 1948 จากวิธีที่เสนอมาเพื่อใช้สำหรับหาค่าการระเหยจากผิวน้ำ มาเป็นวิธีหาค่าการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (reference crop evapotranspiration) แต่ในภาพรวมแล้วข้อมูลที่น่ามาใช้ในการคำนวณหาค่าการใช้น้ำของพืชมิได้เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ สมดุลของพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ (radiation balance) และองค์ประกอบในด้านของการหมุนเวียนของมวลอากาศ (aerodynamic term) (คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, 2546) ดังแสดงในสมการที่ 2-5

$$ET_o = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \underbrace{(R_n - G)}_{\text{radiation balance}} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot \underbrace{f(u) \cdot (e_s - e_a)}_{\text{aerodynamic term}} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-5}$$

- วิธี FAO modified Penman (Doorenbos & Pruitt, 1977) หรือ Modified Penman มีวิธีการคำนวณเทอมของลม (wind function, $f(u)$) และความชื้น (vapor pressure deficit, $e_s - e_a$) ต่างไปจากวิธีดั้งเดิม และมีการปรับค่าการใช้น้ำของพืชอ้างอิงด้วยสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดยิ่งขึ้น

$$ET_o = c \cdot \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(u) \cdot (e_s - e_a) \right] \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-6}$$

- วิธี FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) เป็นการปรับปรุงวิธี FAO Modified Penman ที่แนะนำไว้ในคู่มือ FAO24 (Doorenbos & Pruitt, 1977) เพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ยิ่งขึ้น โดยใช้สมการ Penman-Monteith เป็นพื้นฐานและ FAO ได้แนะนำให้ใช้วิธีนี้สำหรับการหาค่าการใช้น้ำของพืช (Smith et al., 1992) โดยรายละเอียดการคำนวณสามารถศึกษาได้ในคู่มือ FAO56 (Allen et al., 1998)

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-7}$$

โดยที่

- ET_o : ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง [mm day^{-1}]
 R_n : รังสีแสงอาทิตย์สุทธิที่พืช [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$]
 G : ปริมาณความร้อนในดิน [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$]
 T : อุณหภูมิอากาศ [$^{\circ}\text{C}$]
 u_2 : ความเร็วลมที่ระดับความสูง 2 เมตรจากผิวดิน [m s^{-1}]
 e_s : แรงดันไอน้ำอิ่มตัว [kPa]
 e_a : แรงดันไอน้ำในอากาศ [kPa]
 $e_s - e_a$: ค่าต่างระหว่างแรงดันไอน้ำอิ่มตัวกับแรงดันไอน้ำในอากาศ [kPa]
 Δ : slope ของโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไอน้ำ [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
 γ : ค่าคงที่ของ psychrometric [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

2.1.2 การหาการใช้ น้ำของพืชอ้างอิงโดยใช้ภาควัดการระเหย

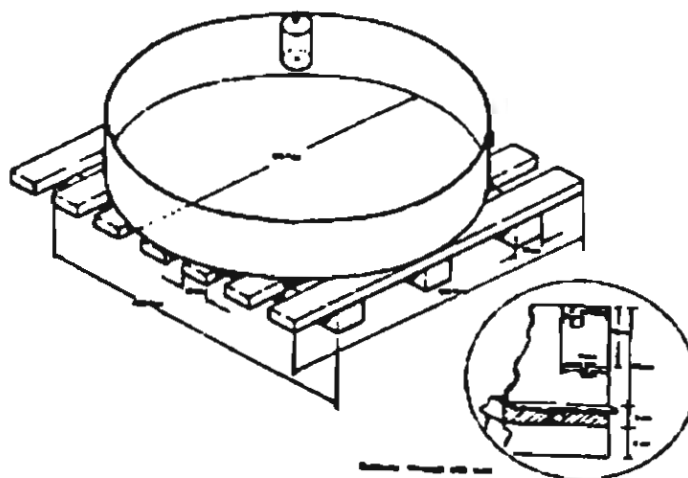
ภาควัดการระเหยมีอยู่หลายรูปแบบ แต่ที่ใช้เป็นมาตรฐานในสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยานั้นเป็นภาควัดการระเหยแบบ Class-A (Class-A evaporation pan) ดังแสดงในภาพที่ 2-1 การหาปริมาณน้ำระเหยจากภาควัดการระเหยนั้นกระทำได้ไม่ยุ่งยากนัก โดยในกรณีที่ไม่มีฝนตกลงมา การระเหยจะมีค่าเท่ากับน้ำที่ลดลงไปในภาควัดการระเหย ถึงกระนั้น ค่าที่วัดได้จากภาควัดการระเหยยังไม่เป็นค่าเดียวกับค่าการใช้ น้ำของพืชอ้างอิง ดังนั้น ในคู่มือ FAO24 (Doorenbos & Pruitt, 1977) จึงได้แนะนำค่าปรับแก้สำหรับการหาการใช้ น้ำของพืชอ้างอิงจากข้อมูลของภาควัดการระเหยดังสมการที่ 2-8

$$ET_o = k_p \cdot E_{pan} \quad \text{สมการที่ 2-8}$$

โดยที่

- ET_o : reference crop coefficient
 E_{pan} : pan evaporation
 k_p : pan coefficient

การหาค่าปรับแก้ของภาควัดการระเหย k_p จะพิจารณาปัจจัย 3 ประการ ได้แก่ สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ภาควัดตั้งอยู่ (fetch (m)) ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (RH_{mean} (%)) และความเร็วลมที่ระดับ 2 ม. จากพื้นผิว (U_2 ($m \cdot s^{-1}$)) เมื่อทราบปัจจัยทั้งสาม ก็สามารถหาค่า k_p ได้จากตารางที่ 2-1 โดย สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ภาควัดตั้งอยู่ (fetch) เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งมีผลต่อปริมาณการระเหยของภาควัดเป็นอย่างมาก สามารถแยกได้เป็น 2 กรณี ดังภาพที่ 2-2 คือ case A เป็นกรณีที่ภาควัดตั้งในสิ่งแวดล้อมที่ชุ่มชื้น มีพืชพรรณในบริเวณใกล้เคียงเป็นระยะทางเท่ากับ fetch และ case B เป็นกรณีที่ภาควัดตั้งในสิ่งแวดล้อมที่แห้งแล้ง ซึ่งหากภาควัดตั้งในบริเวณที่แห้งแล้งจะมีผลทำให้การระเหยจากภาควัดมีค่าเพิ่มขึ้น

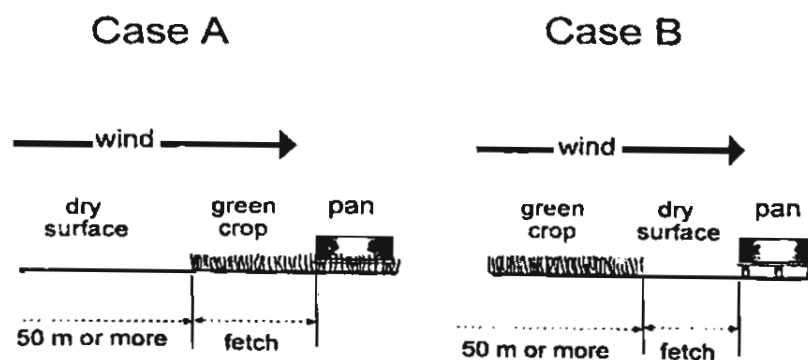


ภาพที่ 2-1 ภาควัดการระเหยมาตรฐานแบบ Class A

ตารางที่ 2-1 ค่า Pan Coefficient ของภาควัดการระเหย Class A (Allen et al., 1998)

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 2-2 สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณที่ภาควัดตั้งอยู่แยกเป็น 2 กรณี (Allen et al., 1998)

2.2 การสำรวจระยะไกลและการจัดการน้ำชลประทาน

การสำรวจระยะไกล (remote sensing) เป็นศาสตร์และศิลป์ของการได้มาซึ่งข้อสนเทศเกี่ยวกับวัตถุ พื้นที่หรือปรากฏการณ์ โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องบันทึกข้อมูลโดยปราศจากการเข้าไปสัมผัสวัตถุเป้าหมาย การสำรวจระยะไกลเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบสามส่วน (สมพร, 2543) กล่าวคือ

1. ระบบบันทึกข้อมูลชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ห่างไกลจากวัตถุหรือพื้นที่เป้าหมาย
2. พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า
3. การวิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูลภาพที่บันทึกด้วยสายตาและด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อเอาข้อมูลที่ได้ออกมาใช้ประโยชน์

การสำรวจระยะไกลเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ทางด้านอุทกวิทยาและการจัดการน้ำ เนื่องจากแนวทางนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ดีกับพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยให้ผลที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง และไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดในภาคสนามมากนัก อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์และแปลผลภาพถ่ายดาวเทียมร่วมกับการสำรวจภาคสนาม (ground-truth) สามารถช่วยให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องยิ่งขึ้น (Kite & Droogers, 2000a)

Bastiaanssen (1998) ได้รวบรวมแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้การสำรวจระยะไกลในงานด้านการจัดการน้ำโดยแยกออกเป็น 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) และ การประเมินผลกระทบจากการพัฒนาการชลประทาน (impact assessment) อนึ่ง ค่าการใช้น้ำของพืชนี้เป็นการนำผลจากแนวทางการวิจัยในหลาย ๆ ส่วนดังที่กล่าวข้างต้นมาใช้งาน และเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการชลประทานและการจัดการน้ำอีกชั้นหนึ่ง

งานศึกษาทางด้านการหาค่าการระเหยและการใช้น้ำของพืชถือได้ว่าเป็นงานหลักอันหนึ่งในการนำเทคนิคการสำรวจระยะไกลมาใช้ทางด้านอุทกวิทยาและการจัดการน้ำ (D'Souza et al., 1993; Diekkruiger et al., 1999; Schultz & Engman, 2000; Schmugge et al., 2002) ถึงกระนั้น การนำเทคนิคนี้มาประยุกต์ใช้นั้นยังคงจำกัดอยู่ในระดับงานวิจัยเท่านั้น ข้อจำกัดนี้เป็นผลมาจากการขาดต้นทุนในการจัดหาภาพถ่ายดาวเทียมที่สูงและต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญทั้งในด้านการสำรวจระยะไกลและด้านการจัดการน้ำในการทำงาน (Bastiaanssen et al., 2000)

2.3 การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชจากภาพถ่ายดาวเทียม

2.3.1 หลักการหาค่าการใช้น้ำของพืชจากภาพถ่ายดาวเทียม

การศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าการใช้น้ำของพืชจากภาพถ่ายดาวเทียม โดยมากแล้วมักจะเป็นการประยุกต์หลักการสมดุลของน้ำ (water budget) หรือ สมดุลของพลังงาน (energy budget) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ ดังสมการที่ 2-9 และสมการที่ 2-10 ตามลำดับ (Brutsaert, 1982)

(ก) สมการสมดุลน้ำ

สมการสมดุลน้ำเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dS}{dt} = (P - E) \cdot A + Q_i - Q_o \quad \text{..... สมการที่ 2-9}$$

โดยที่

- S : ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในระบบที่พิจารณา
- P : อัตราการตกของฝน คิดเป็นความลึก
- E : อัตราการระเหย คิดเป็นความลึก
- A : พื้นที่ผิวของระบบที่พิจารณา
- Q_i : อัตราการไหลเข้าสู่ระบบทั้งทางผิวดินและใต้ดิน
- Q_o : อัตราการไหลออกจากระบบทั้งทางผิวดินและใต้ดิน

(ข) สมการสมดุลพลังงานที่พื้นผิว

สมการสมดุลพลังงานเขียนได้ดังนี้

$$R_n = G_o + H + \lambda \cdot E \quad \text{..... สมการที่ 2-10}$$

โดยที่

- R_n : รังสีแสงอาทิตย์สุทธิที่ได้รับ (net incoming radiation)
- G_o : ความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (heat conducted into the earth)
- H : ความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat into the atmosphere)
- λ : ความร้อนแฝงของการระเหย (latent heat of evaporation)
- E : อัตราการระเหย (rate of evaporation)

(ค) ผลการศึกษาที่ผ่านมา

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

1. การใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดจากแปลงเพาะปลูกและสถานีตรวจอากาศคำนวณตามขั้นตอนของ FAO-24 (Doorenbos & Pruitt, 1977) และ FAO-56 (Allen et al., 1998)
2. การใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยา
3. การใช้วิธีการสำรวจระยะไกล (Granger, 1997; Bastiaanssen et al., 1998; Choudhury & DiGirolamo, 1998)

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

นอกจากนี้ Kite และ Droogers (2000a; 2000b) ยังได้สรุปประเด็นเกี่ยวกับความต้องการใช้ข้อมูลเพื่อการหาปริมาณค่าการใช้น้ำ และการนำไปใช้งาน โดยเกือบทุกเทคนิคการหาค่าการใช้น้ำของพืชต้องการข้อมูลภูมิอากาศ โดยวิธีในกลุ่มของการคำนวณตามขั้นตอนของ FAO และการใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยาต้องการข้อมูลดินเพิ่มเติมในการคำนวณ ในขณะที่ การใช้วิธีสำรวจระยะไกลต้องการข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม

ในส่วนของการนำไปใช้งาน วิธีการใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยาและวิธีสำรวจระยะไกล จะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณมากกว่าวิธีการคำนวณตามขั้นตอนของ FAO ในขณะที่ วิธีสำรวจระยะไกลมีจุดเด่นในเรื่องการครอบคลุมพื้นที่กว้างได้ดีโดยมีรายละเอียดระดับปานกลางถึงดี ส่วนแบบจำลองทางอุทกวิทยามีจุดเด่นในเรื่องของการคำนวณที่เวลาต่อเนื่องและการนำไปใช้เพื่อการทำนายการใช้น้ำของพืชล่วงหน้า

ในส่วนของการใช้วิธีการสำรวจระยะไกลในการหาค่าการใช้ น้ำของพืชนั้น Kite และ Droogers ได้เลือก 3 วิธี ดังจะกล่าวแต่พอสังเขป ดังนี้

— วิธี Satellite-Derived Feedback Mechanism (Granger, 1997)

เป็นวิธีที่พิจารณาค่ารังสีแสงอาทิตย์สุทธิเป็นตัวที่ทำให้ น้ำระเหยและใช้ค่าผลต่างระหว่างแรงดันไอน้ำอิ่มตัวกับแรงดันไอน้ำในบรรยากาศ (vapor pressure deficit) ในการประเมินการหมุนเวียนถ่ายเทของไอน้ำ

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

— วิธีจำลองกระบวนการทางชีวฟิสิกส์ (biophysical processes) (Choudhury & DiGirolamo, 1998)

วิธีจำลองกระบวนการทางชีวฟิสิกส์โดยข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมใช้ทั้งหลักการสมดุลของน้ำและสมดุลของพลังงานในการหาค่าการใช้ น้ำของพืช โดยถือว่าค่าการคาย น้ำของพืชมีความสัมพันธ์กับอัตราการใช้คาร์บอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง

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

- ค่าการคายน้ำของพืชหาได้จากสมการของ Penman-Monteith โดยเชื่อมโยงกระบวนการควบคุมการคายน้ำของปากใบเข้ากับอัตราการใช้คาร์บอน
- ค่าการระเหยจากผิวดินหาได้จากสมการของ Priestley-Taylor และสมการของ Philip
- ปริมาณมวลชีวภาพประเมินได้จากอัตราการใช้คาร์บอนร่วมกับอัตราการหายใจของพืชและการขาดน้ำของดิน

โดยข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมจะใช้ในการหาสัดส่วนที่พืชปกคลุมดิน ค่าการสะท้อนแสงจากพื้นผิว ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวและที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ชีตความชื้นของเมฆ อุณหภูมิอากาศ และแรงดันไอน้ำ ส่วนข้อมูลอื่น ๆ ที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนหาได้จากการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมร่วมกับข้อมูลที่ตรวจวัดไว้ ค่าพารามิเตอร์ทางด้านชีวฟิสิกส์อื่น ๆ (biophysical parameters) หาได้จากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ

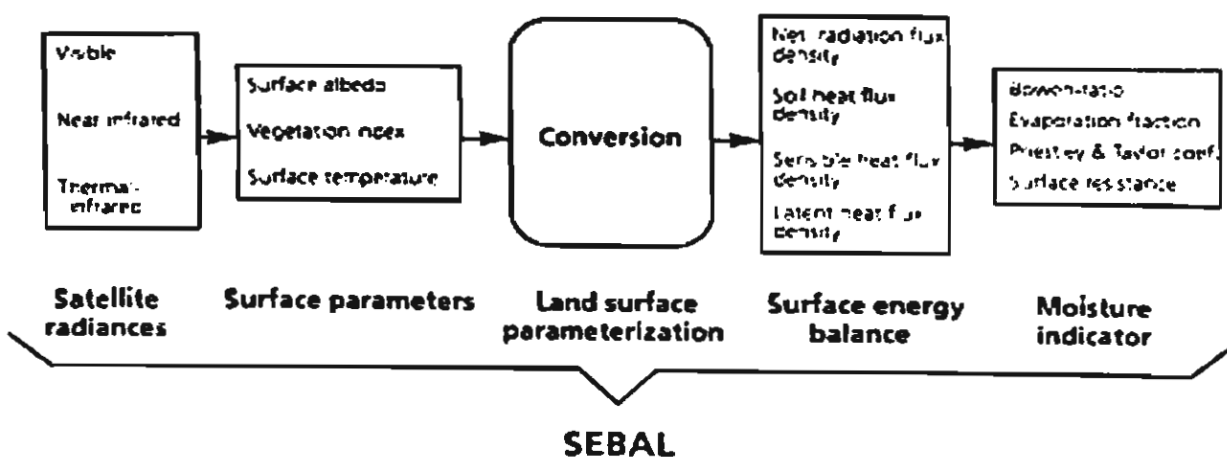
แบบจำลองกระบวนการทางชีวฟิสิกส์จะใช้ข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ในการหาค่าการใช้ น้ำของพืช โดยใช้การวิเคราะห์สมการสมดุลของพลังงานและสมการสมดุลของน้ำ

- วิธี Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) (Bastiaanssen et al., 1998) เป็นขั้นตอนสำหรับประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียม ที่ใช้หลักการสมดุลทางอุณหพลวัต (thermodynamics equilibrium) เพื่อหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการสมดุลพลังงาน

โดยอาศัยหลักการที่ว่าค่าพลังงานที่สะท้อนจากพื้นผิวโลกจะมีความสัมพันธ์กับภาพในช่วงคลื่นต่าง ๆ ของภาพถ่ายดาวเทียม โดยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ต้องใช้ในการประมวลผล ได้แก่ ภาพถ่ายดาวเทียมในช่วงคลื่นตามองเห็น (visible) ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (near-infrared) และช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน (thermal infrared)

จากนั้นจึงทำการประมวลผลภาพในช่วงคลื่นต่าง ๆ ให้เป็นค่าพารามิเตอร์ของพื้นผิวดิน (surface parameters) ได้แก่ ค่าการสะท้อนแสงจากพื้นผิว (surface albedo) ค่าดัชนีพืชพรรณ (vegetation index) และ ค่าอุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature)

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณและแปลผลทีละจุดภาพ (pixel-by-pixel) ของภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งจะให้ผลลัพธ์เป็นค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการสมดุลพลังงาน ซึ่งประกอบด้วย พลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (net solar radiation) พลังงานที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux) และ พลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux) และนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าการใช้น้ำของพืชต่อไป



ภาพที่ 2-3 องค์ประกอบหลักของกระบวนการวิธี SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998)

2.3.2 การหาปริมาณการใช้ น้ำ โดยหลักสมดุลพลังงาน

การหาค่าการระเหยจากพื้นผิวโดยภาพถ่ายดาวเทียม ได้เลือกใช้หลักการของสมดุลของพลังงานที่พื้นผิว (surface energy balance) ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่ภาพถ่ายดาวเทียมตรวจวัดนั้นเป็นค่าที่สะท้อนถึงปริมาณพลังงานจากผิวโลกในช่วงคลื่นต่าง ๆ อยู่แล้ว ทำให้สามารถประเมินหาพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงานได้โดยใช้ข้อมูลอื่น ๆ มาประกอบเพิ่มเติมไม่มากนัก โดยสมการสมดุลพลังงานเขียนได้ตามสมการที่ 2-10 โดยมีรายละเอียดของพารามิเตอร์แต่ละตัวดังนี้

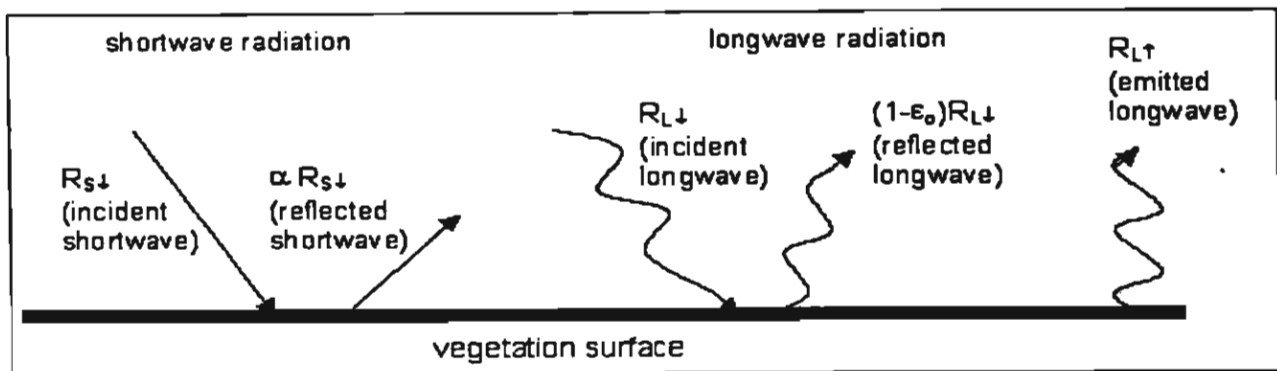
(ก) พารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงาน

- พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (net radiation) เป็นผลต่างระหว่างพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวกับพลังงานรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิว สามารถหาได้จากสมการสมดุลรังสีที่พื้นผิว (radiation balance) ดังนี้

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) \cdot R_{L\downarrow} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-11}$$

โดยที่

- R_n = รังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (net radiation) (W/m^2)
- α = ค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo)
- ϵ_0 = ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิว (surface emissivity)
- $R_{s\downarrow}$ = รังสีแสงอาทิตย์คลื่นสั้นที่ตกกระทบพื้นผิว (incoming shortwave radiation) (W/m^2)
- $R_{L\downarrow}$ = รังสีแสงอาทิตย์คลื่นยาวที่ตกกระทบพื้นผิว (incoming longwave radiation) (W/m^2)
- $R_{L\uparrow}$ = รังสีแสงอาทิตย์คลื่นยาวที่สูญเสียจากพื้นผิว (outgoing longwave radiation) (W/m^2)



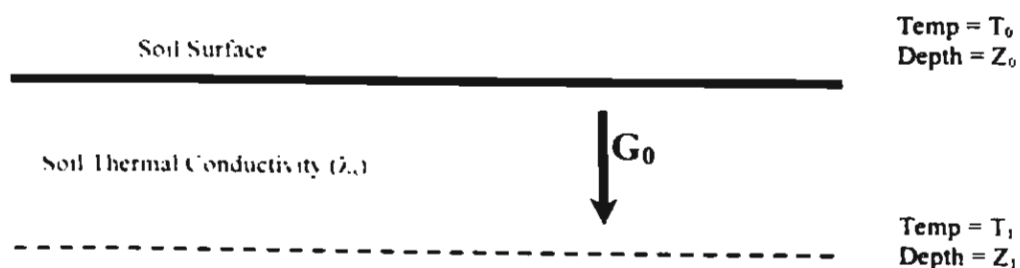
ภาพที่ 2-4 สมดุลพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ผิวโลก

- พลังงานที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux) เป็นค่าการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวลงสู่ดินชั้นลึกลงไป ดังแสดงในภาพที่ 2-5 ความร้อนในดินคำนวณจากสมการการนำความร้อนในดิน ซึ่งมีสมการดังนี้

$$G_o = \lambda_s \cdot \frac{dT}{dz} = \lambda_s \cdot \frac{T_o - T_1}{Z_o - Z_1} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-12}$$

โดยที่

- G_o = ความร้อนในดิน (soil heat flux)
- λ_s = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดิน (soil thermal conductivity)
- dz = ระยะความลึกของดินนับจากผิวดิน
- dT = ผลต่างของอุณหภูมิผิวดินกับอุณหภูมิที่ระยะความลึกของดิน



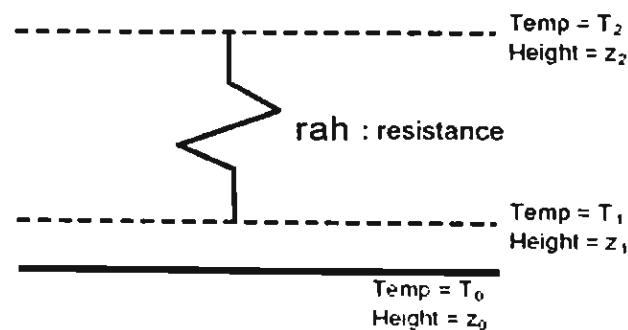
ภาพที่ 2-5 การถ่ายเทพลังงานความร้อนลงดิน

- พลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ หรือ พลังงานความร้อนที่รู้สึกได้ (sensible heat flux) หาจากสมการการพาความร้อนของอากาศ โดยมีรูปสมการดังนี้

$$H = \frac{\rho_{\text{air}} \times C_{p_{\text{air}}} \times dT}{r_{\text{ah}}} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-13}$$

โดยที่

- H = ความร้อนในอากาศ (sensible heat flux)
- ρ_{air} = ความหนาแน่นของอากาศ (air density)
- $C_{p_{\text{air}}}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (มีค่า 1,004 J/Kg/K)
- r_{ah} = ค่าความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน
(aerodynamic resistance to heat transport)
- dT = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิอากาศ



ภาพที่ 2-6 ค่าความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน (r_{ah})

(ข) สัดส่วนการระเหยและอัตราการระเหยเฉลี่ยตลอดวัน

ในกระบวนการหาอัตราการระเหยจากสมการสมดุลพลังงาน อ้างอิงตามสองแนวทาง ได้แก่ วิธี Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) และ วิธี Simplified Surface Energy Balance Index, S-SEBI (Menenti & Choudhury, 1993; Roerink et al., 2000) ทั้งสองวิธี ได้นิยามอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการระเหยกับพลังงานสุทธิที่พื้นผิวได้รับ (radiation net ลบด้วย soil heat flux, $(R_n - G_o)$) ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ 2-14

$$\Lambda = \frac{\lambda \cdot E}{(R_n - G_o)} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-14}$$

โดยกระบวนการวิธี SEBAL เรียกเทอมนี้ว่า ค่าสัดส่วนการระเหย (evaporative fraction, Λ หรือ EF) ส่วนกระบวนการวิธี S-SEBI เรียกว่า ดัชนีสมดุลพลังงาน (surface energy balance index, SEBI) ทั้งสองเทอมสามารถแปลความหมายได้เหมือนกัน โดยเทอมนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 เมื่อมีค่าเท่ากับ 0 จะหมายถึง พลังงานสุทธิที่ได้รับจะไม่ได้ถูกใช้ในการระเหยและจะถูกถ่ายเทไปสู่อากาศเป็นความร้อนที่รู้สึกได้ (sensible heat flux) ในทางตรงกันข้าม เมื่อเทอมนี้เท่ากับ 1 จะหมายถึง พลังงานสุทธิที่ได้รับจะถูกใช้ในการระเหยทั้งหมดไม่มีการถ่ายเทสู่อากาศ

การหาค่าสัดส่วนการระเหยของทั้งสองวิธี ต้องทำการกำหนดพื้นที่อ้างอิงสองลักษณะ ได้แก่ บริเวณที่ชุ่มชื้น และบริเวณที่แห้ง โดยบริเวณที่ชุ่มชื้นจะถือว่าเป็นพื้นที่ซึ่งพลังงานที่ได้รับทั้งหมดที่ถูกใช้ในการระเหยน้ำ ส่วนบริเวณที่แห้งจะถือว่าเป็นพื้นที่ซึ่งไม่มีการระเหยของน้ำ พลังงานที่ได้รับทั้งหมดถูกถ่ายเทสู่อากาศเป็นความร้อนที่รู้สึกได้ (sensible heat) หรือ เทอม H ในสมการสมดุลพลังงาน

— กระบวนการวิธี SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land)

กระบวนการวิธี SEBAL ต้องทำการประเมินพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux, H) จากนั้นจึงนำค่า H มาแทนในสมการสมดุลพลังงานเพื่อหาพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยของน้ำ (latent heat flux) ตามสมการที่ 2-14 ซึ่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยนี้เป็นค่าขณะที่ดาวเทียมถ่ายภาพ

$$\lambda \cdot E = R_n - G_o - H \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-15}$$

เมื่อแทนสมการที่ 2-15 ลงในสมการที่ 2-14 ค่าสัดส่วนการระเหย SEBAL จึงหาได้ ดังนี้

$$EF = \frac{(R_n - G_o - H)}{(R_n - G_o)} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-16}$$

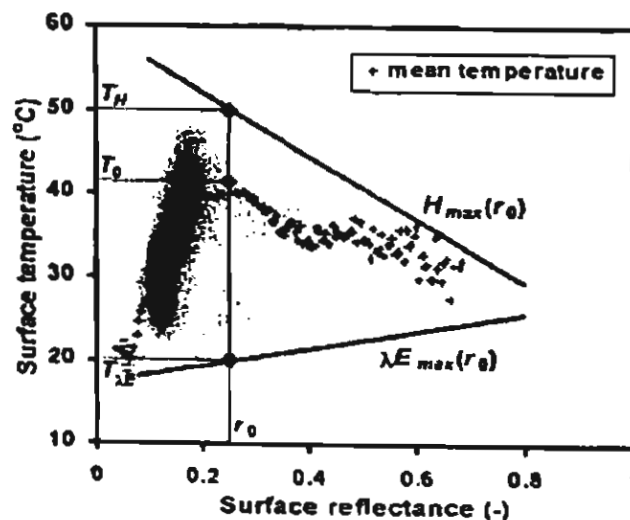
— กระบวนวิธี S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index)

กระบวนวิธี S-SEBI ไม่จำเป็นต้องประเมินค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ H และพลังงานที่ใช้ในการระเหย λE การประมาณค่าสัดส่วนการระเหยหรือดัชนี SEBI ใช้ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวปรับค่ามาที่ระดับความสูงอ้างอิงเดียวกัน (surface temperature for reference elevation, T_0) ร่วมกับค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface reflectance หรือ surface albedo, r_0) มาพล็อตกราฟดังแสดงภาพที่ 2-7

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

ค่าสัดส่วนการระเหย SEBI ประเมินได้โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว T_0 , ค่าการสะท้อนของพื้นผิว r_0 , อุณหภูมิสูงสุด T_H และอุณหภูมิต่ำสุด $T_{\lambda E}$ ตามสมการที่ 2-17 โดยที่ค่าของ T_H และ $T_{\lambda E}$ นั้นจะแปรผันตาม r_0 ซึ่งเขียนเป็นสมการเชิงเส้นได้เป็น $T_H = a_H + b_H \cdot r_0$ และ $T_{\lambda E} = a_{\lambda E} + b_{\lambda E} \cdot r_0$

$$SEBI = \frac{T_H - T_0}{T_H - T_{\lambda E}} \dots \dots \dots \text{สมการที่ 2-17}$$



ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับค่าการสะท้อนของพื้นผิว
(Roerink et al., 2000)

หากต้องการทราบค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ H และพลังงานที่ใช้ในการระเหย λE ในขณะที่ถ่ายภาพ สามารถนำค่าดัชนี SEBI มาคำนวณหาได้ตามสมการที่ 2-19 และสมการที่ 2-18 ตามลำดับ

$$H = (1 - \text{SEBI}) \cdot (R_n - G_o) \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-18}$$

$$\lambda E = \text{SEBI} \cdot (R_n - G_o) \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-19}$$

— อัตราการระเหยเฉลี่ยตลอดวัน (24-h actual evapotranspiration)

อัตราการระเหยเฉลี่ยตลอดวันประเมินได้จากผลคูณของสัดส่วนการระเหยกับพลังงานสุทธิตลอดวัน $(R_{n24} - G_{o24})$ และแปลงเป็นปริมาณน้ำโดยการหารด้วยค่าความร้อนแฝงของการระเหย (λ) ตามสมการที่ 2-20 โดยตั้งสมมติฐานว่าค่าสัดส่วนการระเหยนี้ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน

$$ET_{s24} = \Lambda \cdot \frac{(R_{n24} - G_{o24})}{\lambda} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2-20}$$

3. พื้นที่ศึกษา: ที่ราบลุ่มภาคกลาง

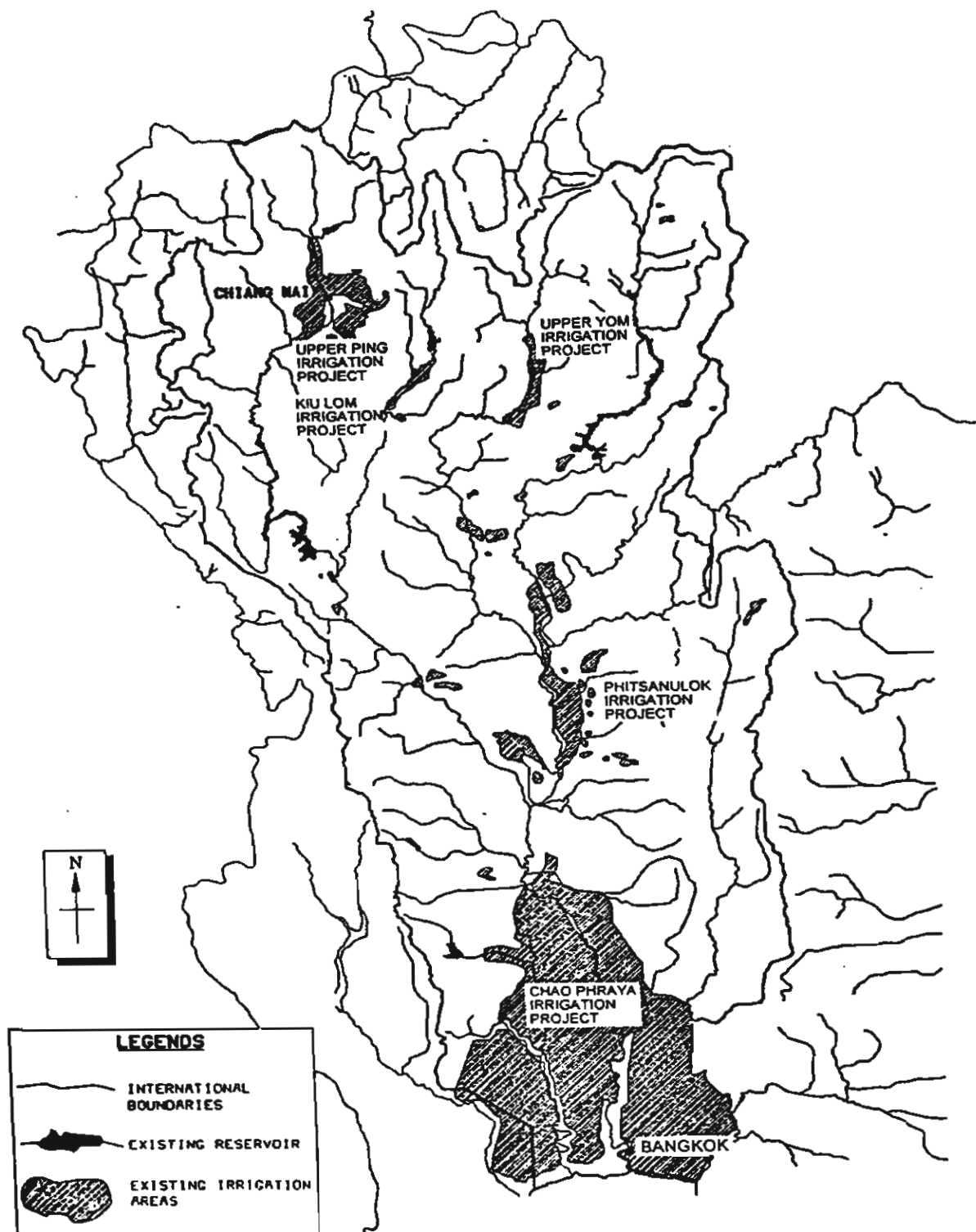
3.1 สภาพทั่วไป

ที่ราบภาคกลาง (Central Plain) เป็นพื้นที่ราบลุ่มรูปสามเหลี่ยม (delta plain) อยู่บริเวณตอนล่างของลุ่มน้ำแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำแม่กลอง (ภาพที่ 3-1) มีสภาพพื้นที่เหมาะสมต่อการเกษตร โดยเฉพาะการทำนา สภาพภูมิอากาศของพื้นที่นี้ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมทำให้มีฝนตก และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างเดือนตุลาคมถึงเดือนเมษายน มีผลให้อากาศแห้งแล้งและหนาวเย็นเป็นบางช่วง ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีในพื้นที่ราบภาคกลาง อยู่ระหว่าง 1,000 ถึง 1,400 มิลลิเมตร (ภาพที่ 3-2) ปริมาณน้ำท่าสูงสุดของลำน้ำสายหลักในพื้นที่ เกิดขึ้นในช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม อันมีสาเหตุมาจากอิทธิพลของลมมรสุมและลมพายุกุดร่อนจากทะเลจีนใต้

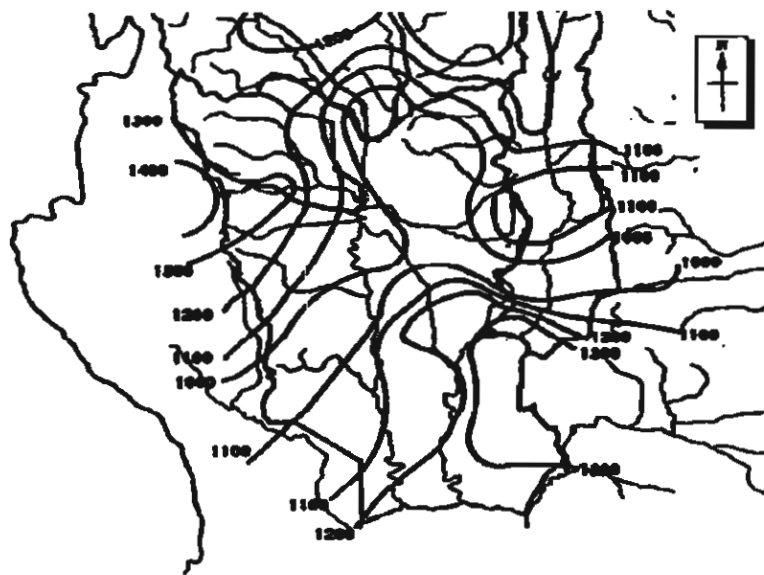
ลำน้ำสายหลักที่ไหลผ่านที่ราบภาคกลาง (ภาพที่ 3-3) ได้แก่ แม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งมีต้นน้ำเกิดจากเทือกเขาในภาคเหนือของประเทศไทย (ภาพที่ 3-1) โดยมีลำน้ำสาขา ได้แก่ ปิง วัง ยม และ น่าน ไหลมาบรรจบกันที่อำเภอปากน้ำโพธิ์ จังหวัดนครสวรรค์ และไหลจากทิศเหนือมาทางทิศใต้ออกสู่อ่าวไทย บริเวณจังหวัดสมุทรปราการ มีแม่น้ำสะแกกรังไหลมาบรรจบแม่น้ำเจ้าพระยาที่บริเวณอำเภอบรรพตพิสัย

เมื่อแม่น้ำเจ้าพระยาไหลผ่านที่ราบบริเวณเขตติดต่อระหว่างจังหวัดนครสวรรค์ อุทัยธานี ชัยนาท ลำน้ำจะแยกสาขาออกทางฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเป็นแม่น้ำสุพรรณ (หรือแม่น้ำท่าจีน) ซึ่งจะไหลขนานกับแม่น้ำเจ้าพระยาไปออกสู่อ่าวไทยบริเวณจังหวัดสมุทรสาคร นอกจากนี้ ยังมีแม่น้ำน้อยแยกออกจากแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณอำเภอสรรพยา จังหวัดชัยนาท โดยแม่น้ำน้อยจะไหลกลับลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาที่อำเภอเสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ส่วนทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา มีแม่น้ำลพบุรีซึ่งแยกออกจากแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณอำเภอเมือง จังหวัดสิงห์บุรี โดยแม่น้ำลพบุรีจะไหลไปบรรจบกับแม่น้ำป่าสัก บริเวณอำเภออุทัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และแม่น้ำป่าสักจะไหลลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

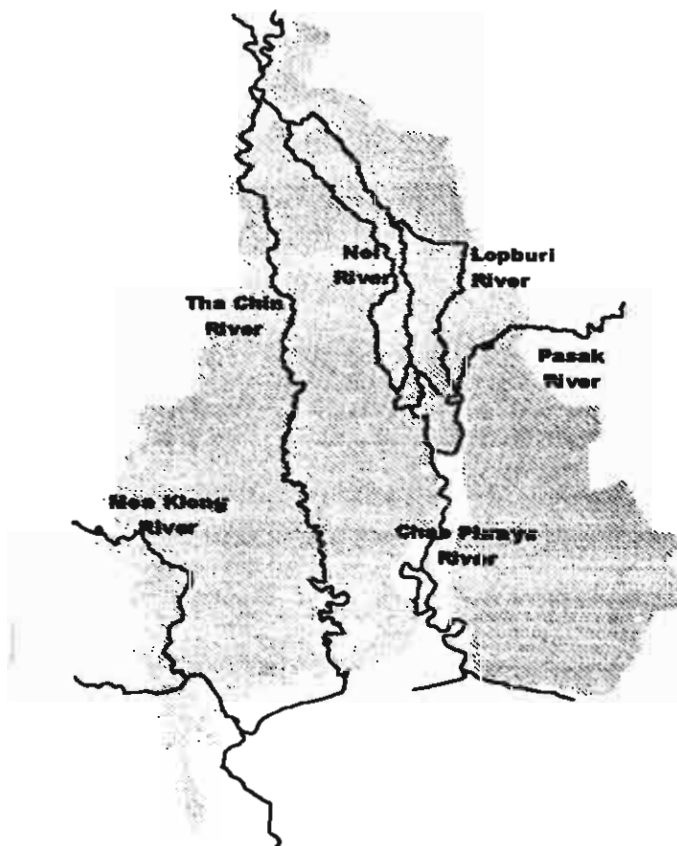
ส่วนแม่น้ำแม่กลอง เกิดจากแควใหญ่และแควน้อยไหลมาบรรจบกันที่อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี โดยต้นน้ำของลำน้ำสาขาต่าง ๆ นั้น อยู่ในบริเวณพรมแดนด้านทิศตะวันตกระหว่างไทยกับพม่า หลังจากนั้น แม่น้ำแม่กลองไหลผ่านจังหวัดราชบุรีลงสู่อ่าวไทยที่จังหวัดสมุทรสงคราม



ภาพที่ 3-1 ลุ่มน้ำแม่น้ำเจ้าพระยา (Binnie et al., 1997)



ภาพที่ 3-2 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีของที่ราบภาคกลาง
(ดัดแปลงจาก Binnie et al., 1997)



 Chao Phraya
 River

ภาพที่ 3-3 แม่น้ำสายหลัก
ในที่ราบภาคกลาง

3.2 การพัฒนาระบบชลประทาน

การพัฒนาลุ่มน้ำทั้งการสร้างอ่างเก็บน้ำและการพัฒนาระบบชลประทานสามารถช่วยให้ควบคุมปริมาณน้ำท่าอย่างได้ผล และทำให้มีการนำน้ำไปใช้ตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ได้ตามความต้องการและอย่างมีประสิทธิภาพ มีผลให้ให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มมากขึ้นและส่งผลดีต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศโดยรวม

3.2.1 การพัฒนาลุ่มน้ำเจ้าพระยาและแม่กลอง

การพัฒนาลุ่มน้ำเจ้าพระยา ได้ดำเนินมาตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 5 จนกระทั่งถึงปี พ.ศ. 2500 จึงได้เริ่มมีการพัฒนาระบบชลประทานสมัยใหม่ ด้วยการก่อสร้างเขื่อนทดน้ำเจ้าพระยาที่จังหวัดชัยนาท และก่อสร้างระบบส่งน้ำให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งสองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 17 จังหวัด ซึ่งเรียกว่า โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ (The Greater Chao Phraya Irrigation Project) ต่อมาได้มีการก่อสร้างอ่างเก็บน้ำทางด้านเหนือน้ำ และทำการเก็บกักน้ำทางด้านต้นน้ำให้กับโครงการชลประทานต่าง ๆ ได้แก่ การก่อสร้างอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในแม่น้ำปิงที่จังหวัดตาก แล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2507 อ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ในแม่น้ำน่านที่จังหวัดอุตรดิตถ์ แล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2514 และต่อมาได้ทำการก่อสร้างโครงการชลประทานพิษณุโลกในลุ่มน้ำน่าน ในปี พ.ศ. 2524

ส่วนการพัฒนาลุ่มน้ำแม่กลอง ได้กำหนดแผนไว้ 4 ระยะ ได้แก่ ระยะที่ 1 การก่อสร้างเขื่อนทดน้ำวชิราลงกรณ์ แล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2513 (ปัจจุบัน เปลี่ยนชื่อเป็นเขื่อนแม่กลอง) กั้นแม่น้ำแม่กลอง ที่อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี พร้อมระบบส่งน้ำในเขตลุ่มน้ำแม่กลองตอนล่างฝั่งซ้าย ระยะที่ 2 เป็นการก่อสร้างเขื่อนเก็บน้ำศรีนครินทร์กั้นแม่น้ำแควใหญ่ แล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2523 พร้อมทั้งขยายระบบส่งน้ำจากเขื่อนแม่กลองไปยังบริเวณลุ่มน้ำแม่กลองทั้งฝั่งซ้ายและฝั่งขวา จำนวน 1.8 ล้านไร่ ในระยะที่ 3 เป็นการก่อสร้างเขื่อนเขาแหลม (ปัจจุบัน เปลี่ยนชื่อเป็นเขื่อนวชิราลงกรณ์) กั้นแม่น้ำแควน้อยแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2527 โดยการพัฒนาได้ดำเนินตามแผนอย่างต่อเนื่องเป็นลำดับจนถึงแผนในระยะที่ 3 ส่วนแผนในระยะที่ 4 เป็นก่อสร้างเขื่อนน้ำโจนปิดแม่น้ำแควใหญ่ตอนบน ได้รับโครงการเนื่องจากปัญหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม พื้นที่ชลประทานในเขตลุ่มน้ำแม่กลอง เรียกว่า โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ (The Greater Mae Klong Irrigation Project)

3.2.2 ระบบควบคุมน้ำในที่ราบภาคกลาง

(ก) เชื่อนทดน้ำ

- เขื่อนเจ้าพระยา ทำหน้าที่ทดน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาให้สูงที่ระดับ +16.5 เมตร (รทก.) เพื่อส่งน้ำเข้าตามคลองส่งน้ำสายต่าง ๆ ก่อสร้างที่ตำบลบางหลวง อำเภอสรรพยา จังหวัดชัยนาท สามารถระบายน้ำผ่านตัวเขื่อนได้สูงสุด 3,300 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ทางด้านขวาของตัวเขื่อนมีประตูเรือสัญจรและฝายระบายน้ำฉุกเฉิน ส่วนทางด้านซ้ายได้สร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำ มีกำลังผลิต 300 กิโลวัตต์
- เขื่อนพระรามหก ทำหน้าที่ทดน้ำในแม่น้ำป่าสักให้มีระดับ +7.50 เมตร (รทก.) และส่งน้ำเข้าคลองส่งน้ำสายใหญ่ระพีพัฒน์เพื่อนำน้ำไปใช้ในโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันออก สามารถระบายน้ำได้สูงสุด 1,360 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ที่ระดับ +10.50 เมตร (รทก.) ในปัจจุบันได้มีการเสริมบานระบายให้สามารถเก็บกักระดับน้ำไว้ได้ที่ 7.80 เมตร (รทก.) เพื่อขยายพื้นที่ของโครงการชลประทานนครหลวงเพิ่มขึ้น
- เขื่อนแม่กลอง เดิมชื่อเขื่อนวชิราลงกรณ์ ทำหน้าที่ทดน้ำจากแม่น้ำแม่กลองให้มีระดับ +22.5 เมตร (รทก.) เพื่อส่งน้ำเข้าพื้นที่โครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ ทางฝั่งซ้ายและขวาของแม่น้ำแม่กลองตั้งอยู่ที่ตำบลม่วงชุม อำเภอดำม่วง จังหวัดกาญจนบุรี สามารถระบายน้ำได้สูงสุด 3,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

(ข) ระบบส่งน้ำ

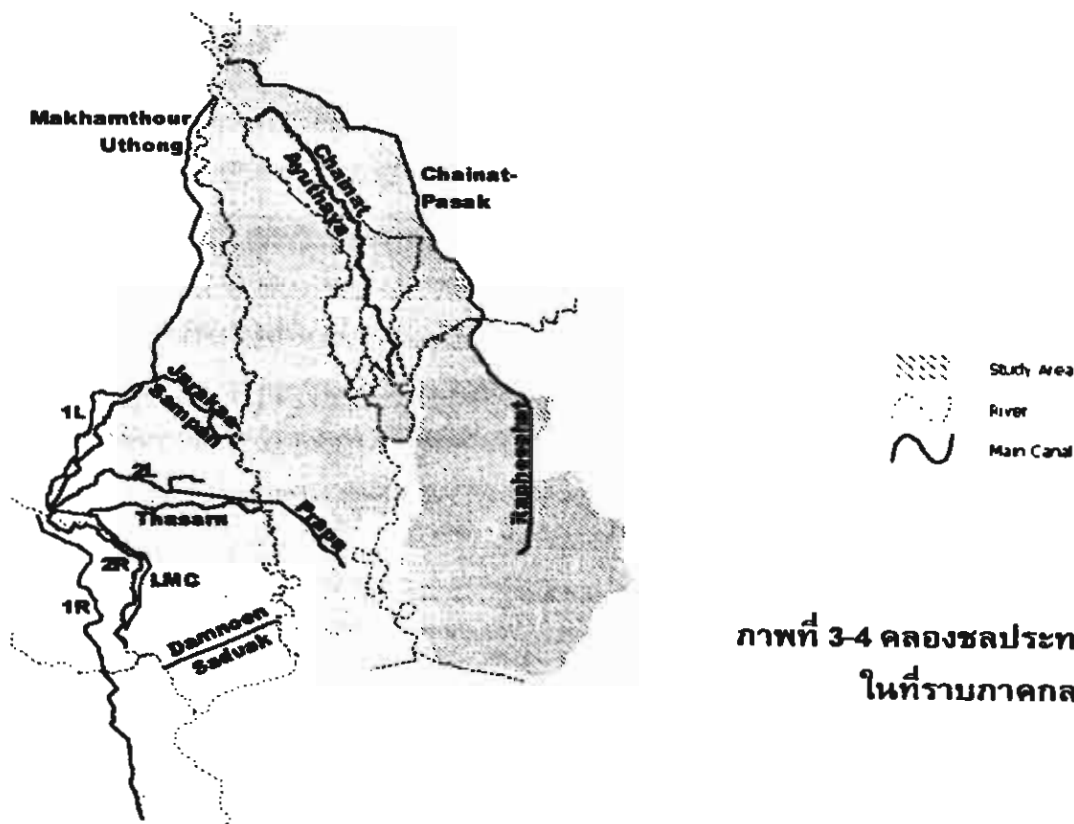
ระบบส่งน้ำของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ทำหน้าที่ส่งน้ำให้แก่พื้นที่เพาะปลูกทางฝั่งขวาและฝั่งซ้ายของแม่น้ำเจ้าพระยา โดยได้ใช้แม่น้ำธรรมชาติและคลองที่ขุดขึ้นมาใหม่เป็นระบบส่งน้ำสายหลักของโครงการฯ รวม 6 สาย ได้แก่

- แม่น้ำสุพรรณหรือแม่น้ำท่าจีนเป็นลำน้ำสาขาที่แยกออกมาจากแม่น้ำเจ้าพระยา
- แม่น้ำน้อยเป็นลำน้ำสาขาที่แยกออกมาจากแม่น้ำเจ้าพระยาเช่นกัน
- คลองส่งน้ำสายใหญ่มะขามเฒ่า-อุทุมพร เป็นคลองส่งน้ำที่ขุดขึ้น จากบริเวณอำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดชัยนาท และสิ้นสุดที่อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดสุพรรณบุรี
- คลองชัยนาท-ป่าสัก เป็นคลองส่งน้ำที่ขุดขึ้น จากบริเวณอำเภอมโนรมย์ จังหวัดชัยนาท และไปลงแม่น้ำป่าสักบริเวณเหนือเขื่อนพระรามหก
- คลองชัยนาท-อยุธยา เป็นคลองที่ขุดขึ้น จากบริเวณอำเภอมโนรมย์ จังหวัดชัยนาท เหนือเขื่อนเจ้าพระยาขึ้นมาเล็กน้อย โดยได้ขุดคลองเลียบแม่น้ำเจ้าพระยาลอดแม่น้ำลพบุรีและคลองบางแก้ว และปลายคลองทั้งนี้ลงแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา
- คลองระพีพัฒน์ เป็นคลองที่ขุดขึ้นเพื่อส่งน้ำจากแม่น้ำป่าสักส่งน้ำให้กับโครงการเจ้าพระยาตอนล่างฝั่งตะวันออก

โดยที่แม่น้ำสุพรรณ แม่น้ำน้อย และคลองมะขามเฒ่า-อุทุมพร อยู่ทางฝั่งขวาของแม่น้ำเจ้าพระยา ส่วนคลองชัยนาท-ป่าสักและคลองชัยนาท-อยุธยา อยู่ทางฝั่งซ้ายของแม่น้ำเจ้าพระยา ในขณะที่คลองระพีพัฒน์อยู่ทางฝั่งซ้ายของแม่น้ำป่าสัก

ระบบส่งน้ำของโครงการแม่กลองใหญ่ ทำหน้าที่ส่งน้ำที่ทดจากเขื่อนแม่กลองให้กับพื้นที่เพาะปลูกทางฝั่งขวาและฝั่งซ้ายของแม่น้ำ รวมถึงผันน้ำไปยังลุ่มน้ำใกล้เคียง โดยทางด้านฝั่งขวาของแม่น้ำ คลองส่งน้ำสายหลัก ได้แก่ คลอง 1-ขวา (1R) และคลอง 2-ขวา (2R) ส่วนทางฝั่งซ้ายของโครงการฯ มี feeder canal รับน้ำแม่น้ำแม่กลองผ่านประตูระบายน้ำปากคลองสายใหญ่ และแจกจ่ายน้ำให้กับคลองส่งน้ำสายหลัก 3 สาย ได้แก่ (1) คลองสายใหญ่ฝั่งซ้ายที่ขุดในช่วงแผนพัฒนาระยะที่ 1 (2) คลอง 1-ซ้าย (1L) และ (3) คลอง 2-ซ้าย (2L)

ในโครงการแม่กลอง นอกจากการขุดคลองส่งน้ำชลประทานแล้ว ยังมีการปรับปรุงคลองทำสารบบางปลา และคลองจะเข้สามพัน ซึ่งเป็นคลองระบายน้ำสายหลักของโครงการฯ เพื่อผันน้ำไปแม่น้ำท่าจีน และขุดคลองประปาขนานไปกับแนวคลอง 2-ซ้าย เพื่อผันน้ำจากแม่น้ำแม่กลองไปผลิตน้ำประปาสำหรับกรุงเทพมหานคร



ภาพที่ 3-4 คลองชลประทานสายหลัก
ในที่ราบภาคกลาง

3.3 สภาพทางการเกษตร

ที่ราบลุ่มภาคกลางถือได้ว่าเป็นอยู่ข้าวอยู่น้ำของประเทศไทย เนื่องจาก มีสภาพพื้นที่ราบและดินเป็นดินตะกอนเหนียวเหมาะกับการทำนา เมื่อมีการพัฒนาแหล่งเก็บกักน้ำบริเวณต้นน้ำและระบบชลประทาน ทำให้มีปริมาณน้ำเพียงพอสำหรับการทำนาปรังในฤดูแล้ง นอกจากนี้ ยังได้มีการพัฒนาพื้นที่จากการทำนา เป็นการทำสวนผลไม้ สวนผัก สวนดอกไม้ และบางบริเวณได้พัฒนาไปเป็นพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ในเขตพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ทั้งหมดประมาณ 7.5 ล้านไร่ เกษตรกรจะทำนาปีเฉลี่ย 5 ถึง 6.2 ล้านไร่ คงมีพื้นที่บางส่วนเป็นที่ลุ่มต่ำซึ่งมีน้ำท่วมเป็นประจำ เกษตรกรจึงไม่นิยมทำนาปี แต่จะทำนาปรังทดแทน ส่วนการทำนาปรัง เขตโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่มีพื้นที่ที่เหมาะสมประมาณ 5.5 ล้านไร่ ที่เหลือเป็นที่ดอนหรือที่ไม่สามารถส่งน้ำได้ โดยพื้นที่ที่เหมาะสมแก่การทำนาปรังแบ่งได้เป็น 2 บริเวณใหญ่ ๆ คือ พื้นที่ดอนบนซึ่งส่งน้ำด้วยระบบแรงโน้มถ่วง ตั้งแต่จังหวัดนครสวรรค์ถึงจังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีพื้นที่ทำนาปรังได้ประมาณ 3.5 ล้านไร่ และพื้นที่ที่อยู่ในที่ราบลุ่มดอนล่าง ตั้งแต่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาไปจรดทะเลทั้งฝั่งตะวันตกและตะวันออกของแม่น้ำซึ่งเป็นระบบชลประทานประเภทเก็บกักน้ำ (water conservation) มีพื้นที่ทำนาปรังประมาณ 2.0 ล้านไร่

การทำสวนผลไม้โดยเกษตรกรได้พัฒนาพื้นที่ดินที่ให้ผลผลิตข้าวต่ำ ในเขตพื้นที่ของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษารังสิตเหนือและรังสิตใต้ ด้วยการปรับปรุงดิน ทำร่องสวน และคันกันน้ำ เพื่อเป็นสวนส้ม เป็นพื้นที่ประมาณ 200,000 ไร่

การปลูกพืชไร่-พืชผักของเกษตรกรรอบ ๆ เขตกรุงเทพมหานครและบริเวณใกล้เคียงจะทำการปลูกพืชผักเป็นจำนวนมากเพื่อส่งออกจำหน่ายในเมือง ส่วนพืชไร่มีการกระจายเพาะปลูกในบางโครงการที่มีสภาพดินเอื้ออำนวย เช่น จังหวัดสุพรรณบุรี สิงห์บุรี เป็นต้น

การเลี้ยงสัตว์น้ำมีพื้นที่รวมกันไม่ต่ำกว่า 100,000 ไร่ โดยเลี้ยงกันมากในบริเวณทุ่งดอนล่าง ในเขตจังหวัดสมุทรปราการ ฉะเชิงเทรา กรุงเทพมหานคร ปทุมธานี พระนครศรีอยุธยา และสุพรรณบุรี ได้แก่ การเลี้ยงปลาน้ำกร่อย อาทิจี ปลาสลิด, การเลี้ยงปลาน้ำจืด อาทิจี ปลาดุก ปลาช่อน และการเลี้ยงกุ้ง

3.4 การบริหารจัดการน้ำ

สภาพน้ำในที่ราบภาคกลางแบ่งได้เป็นสองช่วงจากอิทธิพลของลมมรสุม คือ สภาพน้ำในฤดูฝน และฤดูแล้ง โดยสภาพน้ำในฤดูฝนที่เกิดจากปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ จะมีปริมาณร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำทั้งหมด ส่วนในฤดูแล้งแทบจะไม่มีฝนตกเลย ทำให้การใช้น้ำในฤดูแล้งต้องอาศัยน้ำจากอ่างเก็บน้ำเป็นหลัก การจัดสรรน้ำเพื่อกิจกรรมการใช้น้ำต่าง ๆ เป็นไปในลักษณะอเนกประสงค์ ได้แก่ เพื่อการอุปโภคบริโภค การประปา การเดินเรือ การอุตสาหกรรม การผลักดันน้ำเค็ม การส่งเสริมการท่องเที่ยว การอนุรักษ์ระบบนิเวศน์ รวมทั้งการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังน้ำ

หากในปีใด น้ำในอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ มีปริมาณน้อยจนไม่สามารถจัดสรรน้ำได้อย่างเพียงพอกับความ ต้องการ จะมีการจัดลำดับความสำคัญให้แก่กิจกรรมการใช้น้ำต่าง ๆ ดังนี้

1. การใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคและการประปาในเมืองหรือชุมชน รวมทั้งการอุตสาหกรรมเป็นอันดับแรก
2. การใช้น้ำเพื่อการผลักดันน้ำเค็มบริเวณปากแม่น้ำเป็นอันดับสอง
3. การใช้น้ำเพื่อการเกษตรที่ใช้น้ำน้อยเป็นอันดับสาม
4. การเพื่อการเดินเรือและการท่องเที่ยวเป็นอันดับสี่
5. การใช้น้ำเพื่อการเกษตรที่ใช้น้ำมาก เช่น การทำนาปรัง บ่อปลา เป็นอันดับสุดท้าย

กรมชลประทานเป็นหน่วยงานหลักในการก่อสร้างและการบริหารจัดการระบบชลประทานในที่ราบภาคกลาง ซึ่งแบ่งเป็นการพัฒนาระบบการชลประทานของพื้นที่ในเขตโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ และโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่

โครงการเจ้าพระยาใหญ่ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 7.5 ล้านไร่ การบริหารจัดการแบ่งเป็นโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา 25 โครงการ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามสภาพพื้นที่ คือ โครงการเจ้าพระยาตอนบนและโครงการเจ้าพระยาตอนล่าง โดยโครงการเจ้าพระยาตอนบน เป็นโครงการชลประทานที่ส่งน้ำให้แก่พื้นที่ชลประทานโดยวิธีแรงโน้มถ่วง (gravity) เป็นส่วนใหญ่ และมีพื้นที่บางส่วนที่ส่งน้ำโดยวิธีการสูบ โดยที่โครงการเจ้าพระยาตอนบนจะประกอบไปด้วยโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาจำนวน 13 โครงการ ได้แก่ โครงการพลเทพ ท่าโบสถ์ สามชุก ดอนเจดีย์ โพธิ์พระยา บรมธาตุ ชันสูตร ยางมณี มหาราช มโนรมย์ ชองแค โคกกระเทียม และเริงราว มีพื้นที่รวมประมาณ 3.5 ล้านไร่

โครงการเจ้าพระยาตอนล่าง เป็นโครงการชลประทานประเภทเก็บกักรักษาน้ำ (water conservation) โครงการเหล่านี้ได้เริ่มมีการพัฒนามาตั้งแต่รัชกาลที่ 5 ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น โครงการฝั้ง ตะวันออกและฝั้งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา โดยฝั้งตะวันตกจะประกอบด้วย โครงการฝั้งให้ บางบาล เจ้าเจ็ดบางยี่หน พระยาบรรลือ พระพิมลและภาษีเจริญ รวม 6 โครงการ มีโครงการที่เพาะปลูกประมาณ 1.5 ล้านไร่ ส่วนทางฝั้งตะวันออกประกอบด้วย โครงการนครหลวง ป่าสักใต้ รังสิตเหนือ รังสิตใต้ คลองด่านและพระองค์ไชยานุชิตรวม 6 โครงการ และมีพื้นที่โครงการประมาณ 2.5 ล้านไร่

ส่วนโครงการแม่กลองใหญ่ มีพื้นที่โครงการประมาณ 3.2 ล้านไร่ แบ่งการบริหารจัดการเป็นโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา รวม 10 โครงการ โดยสามารถแบ่งเป็นฝั่งซ้ายและฝั่งขวาของแม่น้ำแม่กลอง โครงการแม่กลองฝั่งซ้ายประกอบไปด้วยโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา จำนวน 8 โครงการ ได้แก่โครงการท่าแพงแสน นครปฐม นครชุม ราชบุรีฝั่งซ้าย ดำเนินสะดวก มีพื้นที่รวมประมาณ 2.5 ล้านไร่ ส่วนฝั่งขวาประกอบด้วยโครงการท่ามะกา และราชบุรีฝั่งขวา รวม 2 โครงการ มีพื้นที่ประมาณ 0.65 ล้านไร่ โครงการชลประทานแม่กลองส่วนใหญ่ส่งน้ำให้แก่พื้นที่โดยวิธีแรงโน้มถ่วงและมีพื้นที่บางส่วนที่ส่งน้ำโดยวิธีการสูบ ยกเว้นโครงการดำเนินสะดวกซึ่งเป็นโครงการประเภทเก็บกักรักษาน้ำ

4. ข้อมูลและวิธีการดำเนินงาน

4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

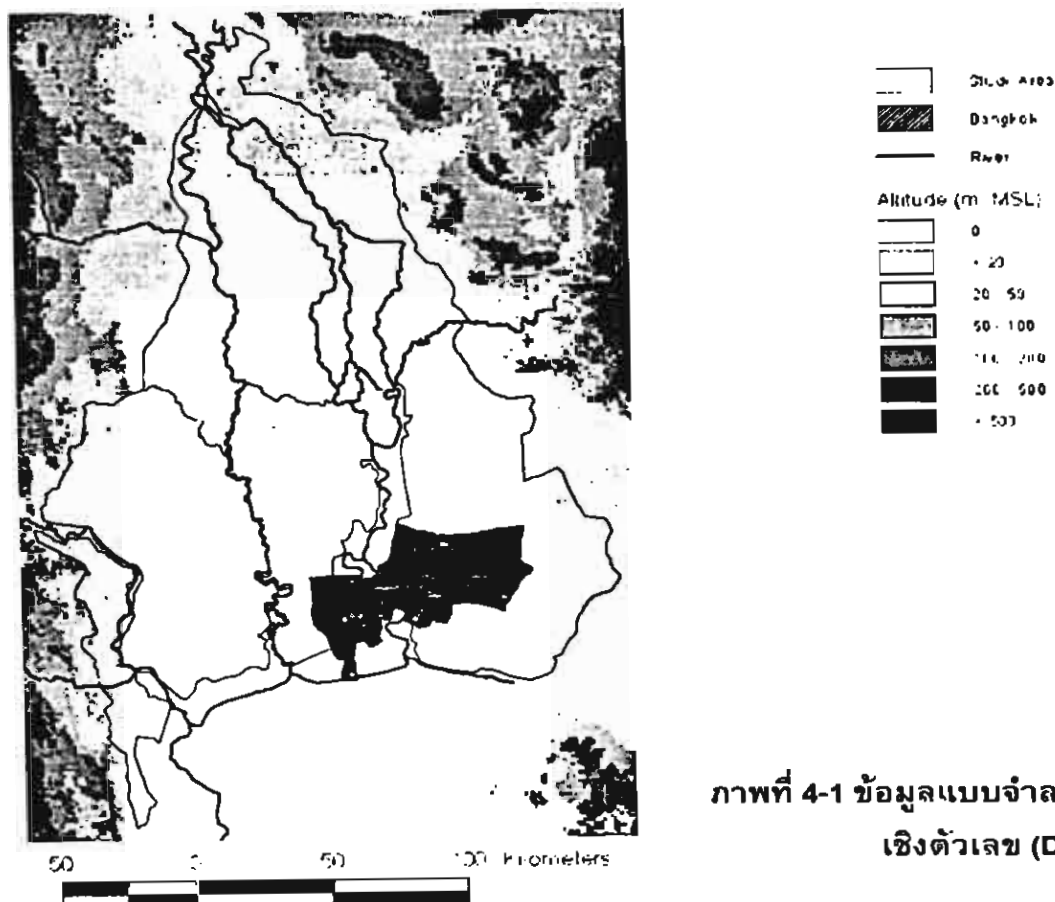
ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย ประกอบไปด้วย ข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่ศึกษา ข้อมูลภูมิอากาศ และข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

(ก) ข้อมูลพื้นฐานของพื้นที่ศึกษา

- ขอบเขตพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ขอบเขตของพื้นที่ชลประทานและระบบส่งน้ำ รวมถึงแม่น้ำในเขตที่ราบภาคกลางเป็นข้อมูล GIS ที่ได้รับความเอื้อเฟื้อจาก DORAS Center⁶ และบางส่วนเป็นข้อมูลจาก THAILAND on a DISC ของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย
- ลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา อาทิ ลักษณะภูมิอากาศ น้ำฝนและน้ำท่า ของที่ราบภาคกลางได้จากการศึกษาและรวบรวมจากรายงานผลการศึกษาที่ผ่านมา
- ลักษณะภูมิประเทศ เป็นข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงตัวเลข (digital elevation model, DEM) จัดทำโดย National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)⁷ ข้อมูลเป็นแบบราสเตอร์ (raster data) ขนาดจุดภาพ (pixel size) 30 ฟิลิปดา และได้เลือกให้ครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาและแม่กลองทั้งหมด โดยมีพิกัดระหว่างละติจูด 13°N ถึง 17°N และ ลองจิจูด 98°E ถึง 102°E ในการประมวลผลได้ทำการแปลงเป็นระบบพิกัด UTM, Datum WGS 1984, zone 47 ขนาดจุดภาพ 1 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3-4
- ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ได้จาก 2 แหล่ง ได้แก่ กรมพัฒนาที่ดิน และ ผลงานวิจัยของ DORAS Center โดยข้อมูลจากกรมพัฒนาที่ดินเป็นข้อมูลปริภูมิ (spatial data) แยกเป็นรายจังหวัด ได้มาจาก Internet ส่วนผลงานวิจัยของโครงการ DORAS เป็นแผนที่แสดงรูปแบบการเพาะปลูกในเขตพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาและแม่กลอง (Kasetsart University & ORSTOM, 1996)

⁶ DORAS ย่อจาก Development Oriented Research on Agrarian Systems เป็นศูนย์วิจัยภายใต้ความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และสถาบันวิจัยจากประเทศฝรั่งเศส ได้แก่ CIRAD และ IRD (เดิมชื่อ ORSTOM)

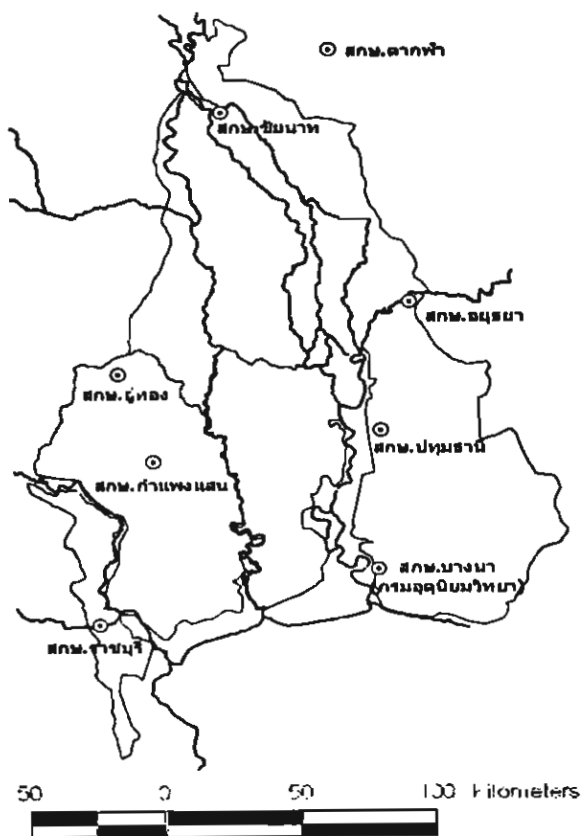
⁷ <http://ngdc.noaa.gov/ngdc.html>



ภาพที่ 4-1 ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูง
เชิงตัวเลข (DEM)

(ข) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาใช้สำหรับการประเมินการใช้น้ำของพืชโดยวิธี FAO Penman-Monteith และ การวัดการระเหย Class A เป็นข้อมูลรายวันระหว่างปี 2544 ถึง 2545 จากสถานีตรวจอากาศเกษตรที่ตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ศึกษา จำนวน 8 สถานี ดังแสดงในตารางที่ 4-1 และในภาพที่ 4-2 ข้อมูลประกอบไปด้วย อุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุด, อุณหภูมิที่ความลึกต่าง ๆ จากผิวดิน, ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดและต่ำสุด, ทิศทางและความเร็วลมเฉลี่ย, ความยาวนานของแสงแดด, ปริมาณน้ำระเหยจากภาควัดการระเหย Class A และ ปริมาณน้ำฝน



ภาพที่ 4-2 ตำแหน่งของสถานีตรวจอากาศ
ในบริเวณพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 4-1 สถานีตรวจอากาศเกษตร (สกษ.) ในบริเวณพื้นที่ศึกษา

รหัสสถานี	ชื่อสถานี	พิกัด		ระดับความสูง (เมตร รทก.)
		ละติจูด	ลองจิจูด	
400301	สกษ. ตากฟ้า	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. อุททอง	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

(ค) ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม NOAA/AVHRR ได้จากการประมวลผลผ่านเครือข่าย (online data processing) โดยโปรแกรม PaNDA (Package for Noaa Data Analysis) ที่เว็บไซต์ของ Yasuoka Laboratory⁸, Institute of Industrial Science, University of Tokyo ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมมีขนาดจุดภาพ 30 พิลิปดา โดยรายละเอียดของข้อมูลสรุปได้ในตารางที่ 4-3

ข้อมูลที่เลือกนั้นเป็นภาพถ่ายจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) จังหวัดปทุมธานี การเลือกภาพถ่ายดาวเทียมได้เลือกให้ครอบคลุมพื้นที่โครงการชลประทานเจ้าพระยาและแม่กลอง โดยมีพิกัดระหว่าง ละติจูด 13°N ถึง 17°N และ ลองจิจูด 98°E ถึง 102°E โดยพิจารณาเลือกเฉพาะวันที่มีเมฆปกคลุมน้อย ข้อมูลที่ได้อยู่ระหว่างปี พ.ศ. 2544 ถึง พ.ศ. 2546 ดังแสดงในตารางที่ 4-2

ส่วนในภาพที่ 4-3 และภาพที่ 4-4 เป็นตัวอย่างข้อมูลของวันที่ 27 ธันวาคม 2544 ซึ่งประกอบด้วย หัวเรื่อง (header) และข้อมูล หนึ่ง ในการประมวลผลเพื่อหาปริมาณการใช้น้ำของพืชได้ทำการแปลงระบบพิกัดเป็น UTM, Datum WGS 1984, zone 47 โดยมีขนาดจุดภาพ 1,000 เมตร

ตารางที่ 4-2 ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม NOAA ที่รวบรวม ระหว่าง ฤดูแล้ง 2544 – 45

เดือน	ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม
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

⁸ <http://webpanda.iis.u-tokyo.ac.jp/WebPaNDA/>

ตารางที่ 4-3 รายละเอียดของข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม NOAA

Band	ช่วงคลื่นที่ ตรวจวัด (ไมโครเมตร)	ลักษณะ ช่วงคลื่น	ลักษณะของข้อมูล ที่ได้จากการประมวลผลผ่านเครือข่าย
1	0.58 - 0.68	Visible	ch. 1 % Albedo (x 100)
2	0.725 - 1.10	Near-infrared	ch. 2 % Albedo (x 100)
3	3.55 - 3.93	Middle-infrared	ch. 3 Brightness Temperature (°C) (x 100)
4	10.50 - 11.50	Thermal-infrared	ch. 4 Brightness Temperature (°C) (x 100)
5	11.5 - 12.5	Thermal-infrared	ch. 5 Brightness Temperature (°C) (x 100)



ภาพที่ 4-3
ภาพสีผสม RGB 1:2:1
ภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544

ภาพที่ 4-4 ตัวอย่างหัวเรื่องของภาพถ่ายจากการประมวลผลผ่านเครือข่าย

```
:KEYWORD ; DATA ; EXPLAINE
SATNAME ; NOAA ; satellite name
NUMBER ; 16 ; satellite number
SENSOR ; AVHRR ; sensor name
YMD ;101 12 27 ;date of observation
HOUR ;6 ;time of observation
S_TIME ; 2001 12 27 6 34 17.118 ;
LOCATION;Institute of Industrial Science;receiving station
BIT ;10 ;bits per pixel
ADDR ;A;direction of movement
PSMP ; 1 1 1 ; pixel sampling parameter
LSMP ; 1 1 1 ; line sampling parameter
GO1 ; 100.0000 0 ; gain and offset to ch.1
CEX1 ; ch. 1 % albed value ; explaine of ch.1
GO2 ; 100.0000 0 ; gain and offset to ch.2
CEX2 ; ch. 2 % albed value ; explaine of ch.2
GO3 ; 100.00000 0 ; gain and offset to ch.3
CEX3 ; ch. 3 deg.C temp. value ; explaine of ch.3
GO4 ; 100.00000 0 ; gain and offset to ch.4
CEX4 ; ch. 4 deg.C temp. value ; explaine of ch.4
GO5 ; 100.00000 0 ; gain and offset to ch.5
CEX5 ; ch. 5 deg.C temp. value ; explaine of ch.5
CH3A ; 1 ; ch. id. of ch.3
CH3B ;0 ; ch. id. of ch.3
CH3FLAG ;CH3A ; id. name of ch.3
PIXEL ; 480 ; Pixels per Line
LINE ; 480 ; Lines per Image
CHANNEL ; 11 ; Number of Channels
CHID ; 1 2 3 4 5 21 22 23 24 25 26 ; Channel No. Identifiers
CH. 21 ; Pixel No. of Original Image ; explanation of channel 21
CH. 22 ; line No. of Original Image ; explanation of channel 22
CH. 23 ; Satellite Zenith Angle (unit:x10000rad); explanation of channel 23
CH. 24 ; Satellite Azimuth Angle (unit:x10000rad); explanation of channel 24
CH. 25 ; Solar Zenith Angle (unit:x10000rad); explanation of channel 25
CH. 26 ; Solar Azimuth Angle (unit:x10000rad); explanation of channel 26
MAP ; 1 ; LONGITUDE & LATITUDE
MITYPE ; 2 ; Specification Type of Mapping Area
PTYPE ; 17.000000 98.000000 13.000000 102.000000 ; Mapping Area
M_AREA ; 17.000000 98.000000 13.000000 102.000000 ; Mapped
Area in Degree
UTIME ; 6 34 17.118 ;
SLATLON ; 17.0000 98.0000 ;
ELATLON ; 13.0000 102.0000 ;
```

4.2 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้หลักสมดุลพลังงาน โดยทำการประเมินตามแนวของกระบวนวิธี SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) และวิธี S-SEBI (Menenti & Choudhury, 1993; Roerink et al., 2000) จากนั้น ได้ตรวจสอบผลโดยเปรียบเทียบกับ การใช้น้ำของพืชที่หาจากวิธี FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) และถาดวัดการระเหย Class A (Doorenbos & Pruitt, 1977)

การประเมินการระเหยตามวิธี FAO Penman-Monteith และถาดวัดการระเหย Class A ใช้ข้อมูล ภูมิอากาศจากสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยา โดยผลลัพธ์เป็นค่าอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยรายวันของพืชอ้างอิง

การประเมินการระเหยจากภาพถ่ายดาวเทียม ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมข้อมูล การประมวลผลข้อมูล และการแปลผลลัพธ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การเตรียมข้อมูล

เป็นงานที่เริ่มตั้งแต่ การจัดหาภาพถ่ายดาวเทียมซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการดาวน์โหลดจากอินเทอร์เน็ต จากนั้น เป็นการตรวจสอบและปรับข้อมูลก่อนการประมวลผล ซึ่งครอบคลุมงานตั้งแต่การปรับรูปแบบของข้อมูลและการจัดเก็บ ระบบพิกัดอ้างอิง การกำหนดขอบเขตพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ ยังรวมถึงการตัดจุดภาพที่เป็นเมฆออกจากภาพถ่าย (cloud masking)

2. การประเมินอัตราการระเหยจากภาพถ่ายดาวเทียมตามหลักสมดุลพลังงาน แบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

2.1. การหาพารามิเตอร์พื้นผิว (surface parameters) จากภาพถ่ายดาวเทียม

ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) ดัชนีพืชพรรณ (vegetation index) และอุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) โดยค่าการสะท้อนของพื้นผิว และดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ประเมินจาก band 1 (visible) และ band 2 (near-infrared) ของภาพ NOAA/AVHRR แผนที่การใช้ที่ดินเป็นข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการประเมิน ร่วมกับการออกสำรวจภาคสนาม ส่วนอุณหภูมิพื้นผิวใช้ภาพถ่ายช่วงคลื่น thermal infrared (band 4 และ band 5) ในการประเมิน

2.2. การหาพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงาน

ได้แก่ พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (net radiation) พลังงานที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux) และพลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux) งานในขั้นตอนนี้ ใช้ข้อมูลพารามิเตอร์พื้นผิวข้างต้น ร่วมกับข้อมูล DEM และข้อมูลประกอบอื่น ๆ ในการประมวลผล

2.3. การหาสัดส่วนการระเหยของวิธี SEBAL และของวิธี S-SEBI

วิธี SEBAL ใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงานทั้งสามตัวในการประเมินค่าสัดส่วนการระเหย ส่วนวิธี S-SEBI ใช้เพียงข้อมูลค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวกับอุณหภูมิพื้นผิวที่ระดับอ้างอิง ในขั้นตอนนี้ มีการเลือกพื้นที่อ้างอิงที่แห้งและที่ชุ่มชื้นจากข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว ซึ่งมีความจำเป็นต้องมีการตรวจสอบภาคสนามเช่นกัน

2.4. การหาอัตราภาระเหี้ยเฉลี่ยในรอบวัน

ใช้ข้อมูลพลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิและ พลังงานที่ถ่ายเทลงดินเฉลี่ยในรอบวัน ร่วมกับค่า สัดส่วนการระเหย ในการประเมิน

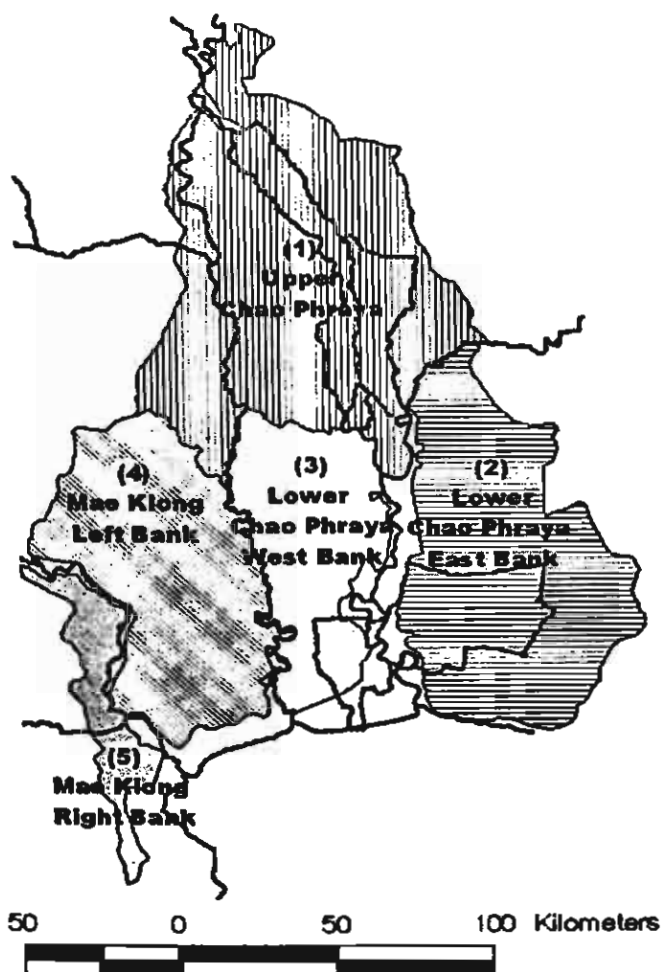
3. การแปลผลลัพธ์และตรวจสอบ

การตรวจสอบผลเชิงคุณภาพ เป็นการพิจารณาความเป็นไปได้และความสอดคล้องของข้อมูลที่ปรากฏขึ้นในแผนที่ ทั้งในเรื่องของตำแหน่งและเวลา ซึ่งกระทำร่วมกับการแปลผลลัพธ์เชิงบรรยาย นอกจากนี้ ได้ใช้วิธีการทางสถิติช่วยในการสรุปข้อมูลเชิงปริมาณ เพื่อใช้ตรวจสอบเปรียบเทียบกับ การหาการใช้น้ำของพืชจากวิธีต่าง ๆ

5. ผลลัพธ์

การวิเคราะห์เพื่อประเมินอัตราการระเหยของพื้นที่ชลประทานในเขตที่ราบภาคกลางโดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียม NOAA/AVHRR ตามหลักการสมดุลพลังงาน ได้เลือกนำเสนอผลลัพธ์ ในช่วงฤดูแล้ง ปี 2544-45 ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2544 ถึงเดือนเมษายน 2545 โดยได้เลือกช่วงเวลาของแต่ละภาพถ่ายห่างกันประมาณ 1 เดือน จำนวน 6 ภาพ

ลักษณะของพื้นที่ที่วิเคราะห์จำแนกพื้นที่ได้เป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ พื้นที่ในเขตชลประทาน และพื้นที่นอกเขตชลประทาน โดยพื้นที่ในเขตชลประทานเป็นพื้นที่ของโครงการชลประทานเจ้าพระยาใหญ่ (The Greater Chao Phraya Irrigation Project) และโครงการชลประทานแม่กลองใหญ่ (The Greater Mae Klong Irrigation Project) นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ยังได้แยกพิจารณาพื้นที่ชลประทานออกเป็น 5 กลุ่มหลัก ตามแนวทางการบริหารจัดการของกรมชลประทาน ดังแสดงในภาพที่ 5-1



ภาพที่ 5-1
พื้นที่ในเขตชลประทาน
แยกตามกลุ่มโครงการชลประทาน

1. โครงการเจ้าพระยาตอนบน
(Upper Chao Phraya)
2. โครงการเจ้าพระยาตอนล่างฝั่งตะวันออก
(Lower Chao Phraya – East Bank)
3. โครงการเจ้าพระยาตอนล่างฝั่งตะวันตก
(Lower Chao Phraya – West Bank)
4. โครงการแม่กลองฝั่งซ้าย
(Mae Klong – Left Bank)
5. โครงการแม่กลองฝั่งขวา
(Mae Klong – Right Bank)

5.1 การประเมินพารามิเตอร์พื้นผิว

พารามิเตอร์ของพื้นผิวที่จำเป็นสำหรับการนำไปประเมินพารามิเตอร์อื่น ๆ ต่อไป ประกอบไปด้วย ค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) ดัชนีพืชพรรณ (vegetation index) และอุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature)

1. การสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) เป็นอัตราส่วนระหว่างรังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนออกจากพื้นผิวโลกต่อรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในช่วงคลื่นสั้น ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (visible) ถึงช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (near-infrared) มีความยาวคลื่นระหว่าง 0.3 ถึง 3 ไมโครเมตร (Basstiaanssen, 1998) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1
2. ดัชนีพืชพรรณ (vegetation index, VI) เป็นค่าที่บอกถึงสัดส่วนของแผ่นดินที่ถูกปกคลุมด้วยพืชพรรณ โดยหาจากค่าความแตกต่างของการสะท้อนของพื้นผิวระหว่างช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ กับช่วงคลื่นที่ตามองเห็นสีแดง และเมื่อนำค่าผลบวกของค่าการสะท้อนของช่วงคลื่นทั้งสองมาหารกับผลต่างดังแสดงในสมการที่ 5-1 จะเป็นการปรับค่าของผลต่างให้อยู่ในช่วงระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งช่วยให้แปลผลลัพธ์ได้ง่ายขึ้นดัชนีนี้เรียกว่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) พืชพรรณต่าง ๆ นั้นจะมีค่าการสะท้อนที่สูงในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ทำให้ผลต่างมีค่าเป็นบวก ในขณะที่ดินจะมีค่าการสะท้อนใกล้เคียงกันระหว่างสองช่วงคลื่นทำให้ผลต่างมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ ส่วนน้ำจะมีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ค่อนข้างต่ำ ทำให้ผลต่างมีค่าเป็นลบ

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 5-1}$$

โดยที่

NIR = ค่าการสะท้อนของพื้นผิวในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

RED = ค่าการสะท้อนของพื้นผิวในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นสีแดง

3. อุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) เป็นค่าอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นดินหรือผิวของสิ่งที่ปกคลุมดิน

ผลการประเมินพารามิเตอร์พื้นผิวสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5-1 และแสดงในภาพที่ 5-2 ถึงภาพที่ 5-7 โดยในตารางที่ 5-1 เป็นค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ของพื้นผิวซึ่งประกอบด้วย ค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิว (surface albedo) ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) และอุณหภูมิที่พื้นผิว (surface temperature) ซึ่งแยกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน และนอกเขตชลประทาน โดยตัวอย่างผลการประเมินพารามิเตอร์พื้นผิวแต่ละตัวของภาพถ่ายในวันที่ 27 ธันวาคม 2544 แสดงในภาพที่ 5-2, ภาพที่ 5-4 และภาพที่ 5-6 ตามลำดับ ส่วนผลของภาพอื่น ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ส่วนกราฟในภาพที่ 5-3, ภาพที่ 5-5 และภาพที่ 5-7 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของพารามิเตอร์พื้นผิว

จากการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ตลอดช่วง 6 เดือน ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2544 ถึงเดือนเมษายน 2545 มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.19 ถึง 0.24 (ภาพที่ 5-3) โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงปลายฤดูแล้ง และพื้นที่นอกเขตชลประทานมีค่าสูงกว่าพื้นที่ในเขตชลประทานเล็กน้อย

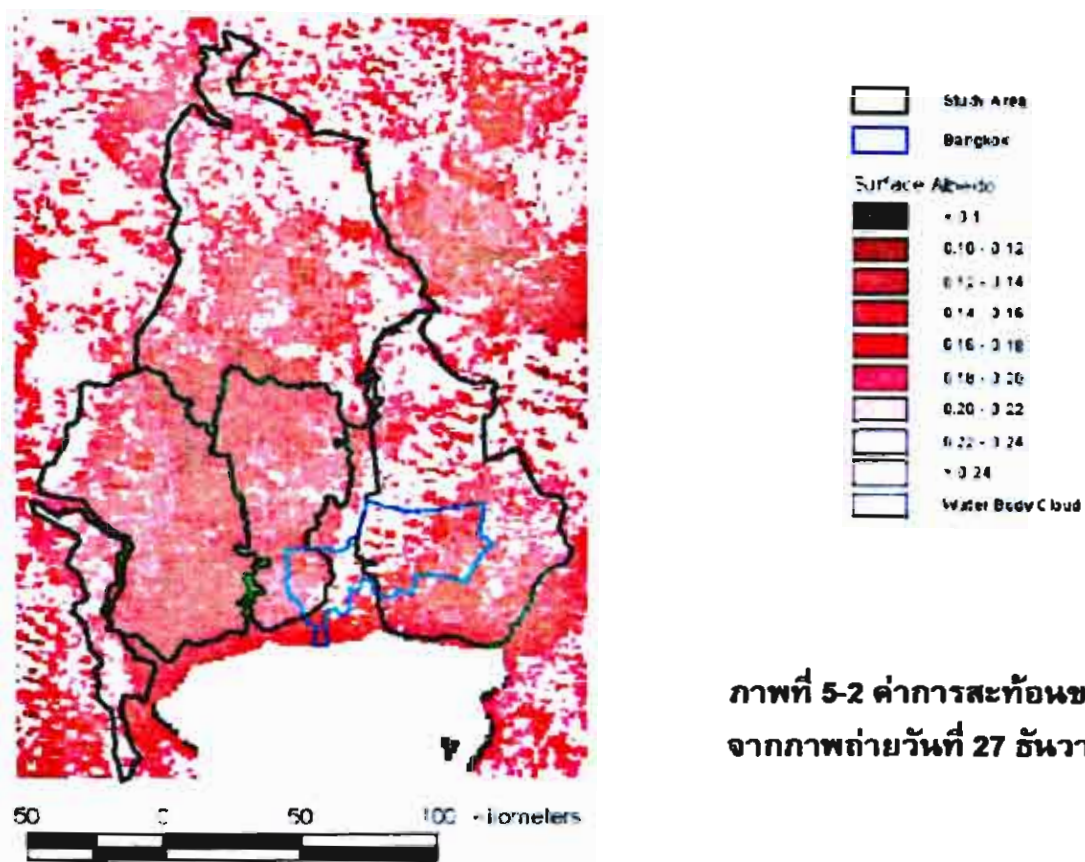
ส่วนค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดระหว่างพื้นที่ในเขตชลประทาน กับนอกเขตชลประทาน โดยค่า NDVI ของพื้นที่ในเขตชลประทานมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับ 0.35 ตลอดช่วงฤดูแล้ง ส่วนพื้นที่นอกเขตชลประทานมีค่าเฉลี่ยค่อนข้างสูงในช่วงเดือนพฤศจิกายนซึ่งเป็นช่วงปลายฤดูฝน และมีแนวโน้มลดลงในเดือนถัด ๆ มา โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.19 – 0.47 (ภาพที่ 5-5) ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงที่ในเขตชลประทานยังคงมีการปลูกพืชในช่วงฤดูแล้ง ในขณะที่ พืชที่อยู่นอกเขตชลประทานมีความหนาแน่นลดน้อยลงในช่วงฤดูแล้ง

อุณหภูมิที่พื้นผิว มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันในพื้นที่ทั้งสองกลุ่ม กล่าวคือมีค่าค่อนข้างต่ำ ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมกราคม ซึ่งเป็นช่วงปลายฤดูฝนและต่อเนื่องถึงฤดูหนาว และมีแนวโน้มสูงขึ้นในฤดูร้อน (ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน) โดยอุณหภูมิที่พื้นผิวเฉลี่ยของพื้นที่นอกเขตชลประทานมีค่าสูงกว่าพื้นที่ในเขตชลประทาน โดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวระหว่างพื้นที่ทั้งสองจะมีเพียงเล็กน้อยในช่วงปลายฤดูฝนและเพิ่มมากขึ้นในเดือนถัด ๆ มา

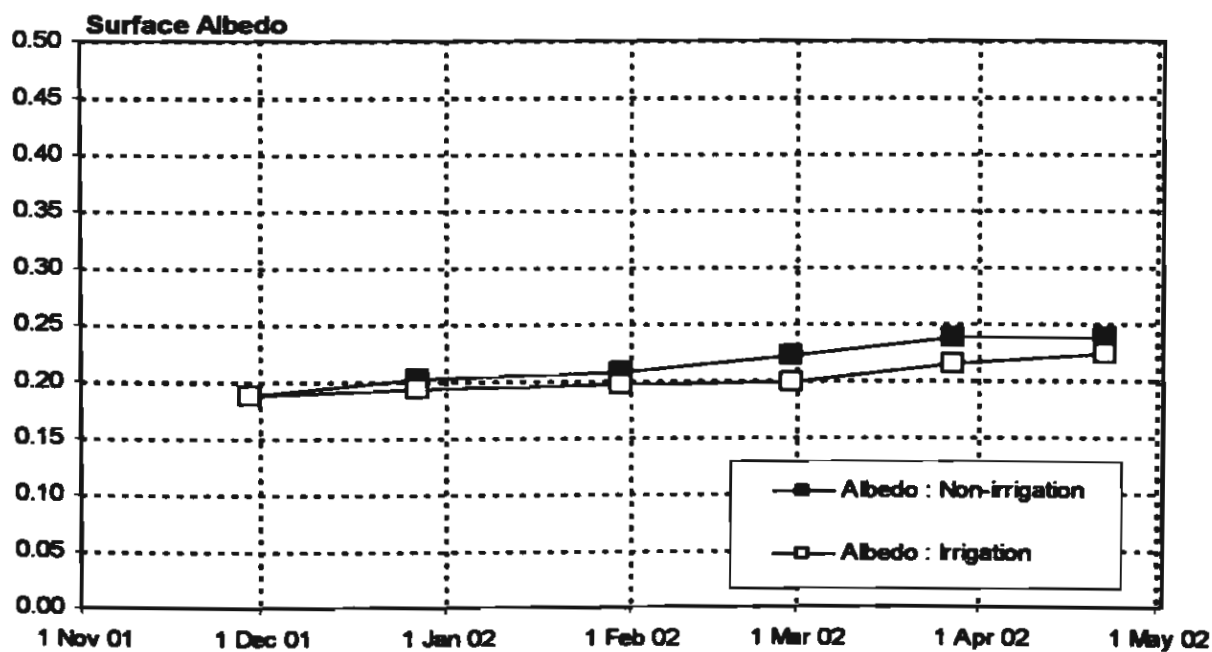
ตารางที่ 5-1 ค่าพารามิเตอร์พื้นผิว (surface parameters)

จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

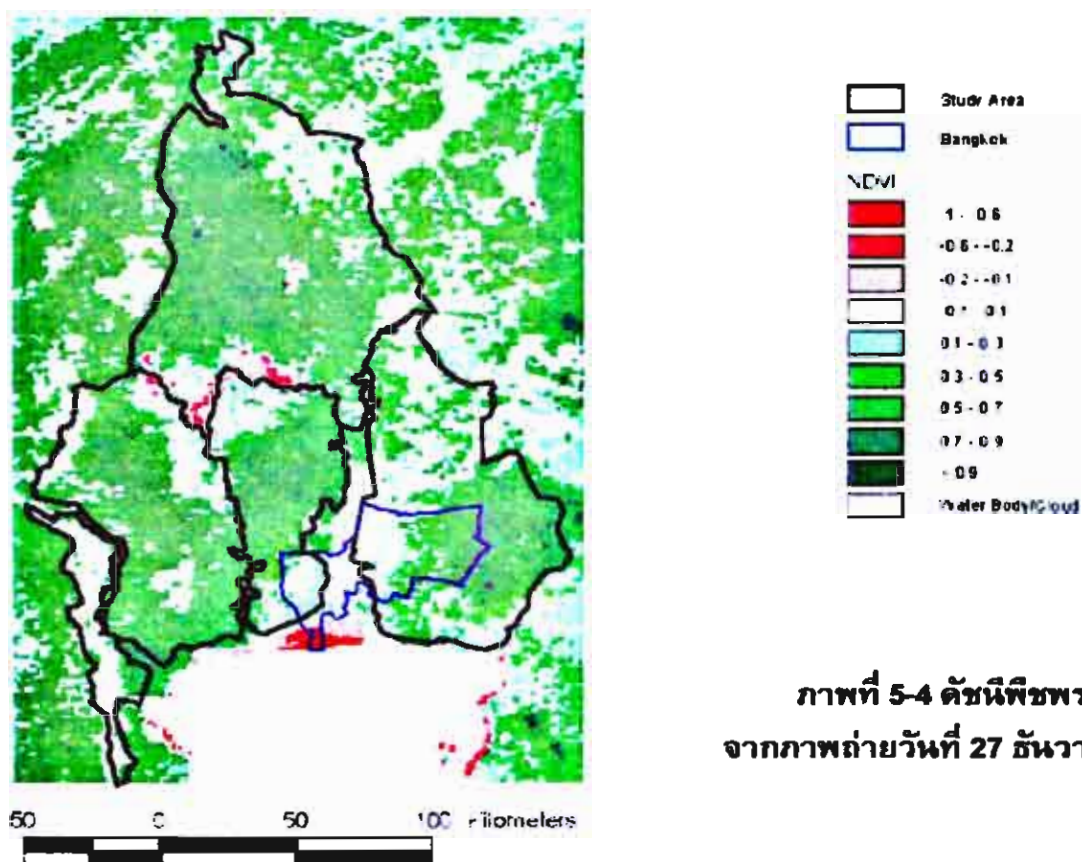
DATE	Albedo		NDVI		Ts (°C)	
	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation
29 Nov 01	0.19	0.19	0.47	0.34	37.87	37.62
27 Dec 01	0.20	0.19	0.33	0.34	40.30	37.92
30 Jan 02	0.21	0.20	0.31	0.37	43.37	38.49
28 Feb 02	0.22	0.20	0.19	0.32	53.36	46.93
27 Mar 02	0.24	0.21	0.27	0.36	55.18	46.57
22 Apr 02	0.24	0.22	0.23	0.36	51.49	43.76



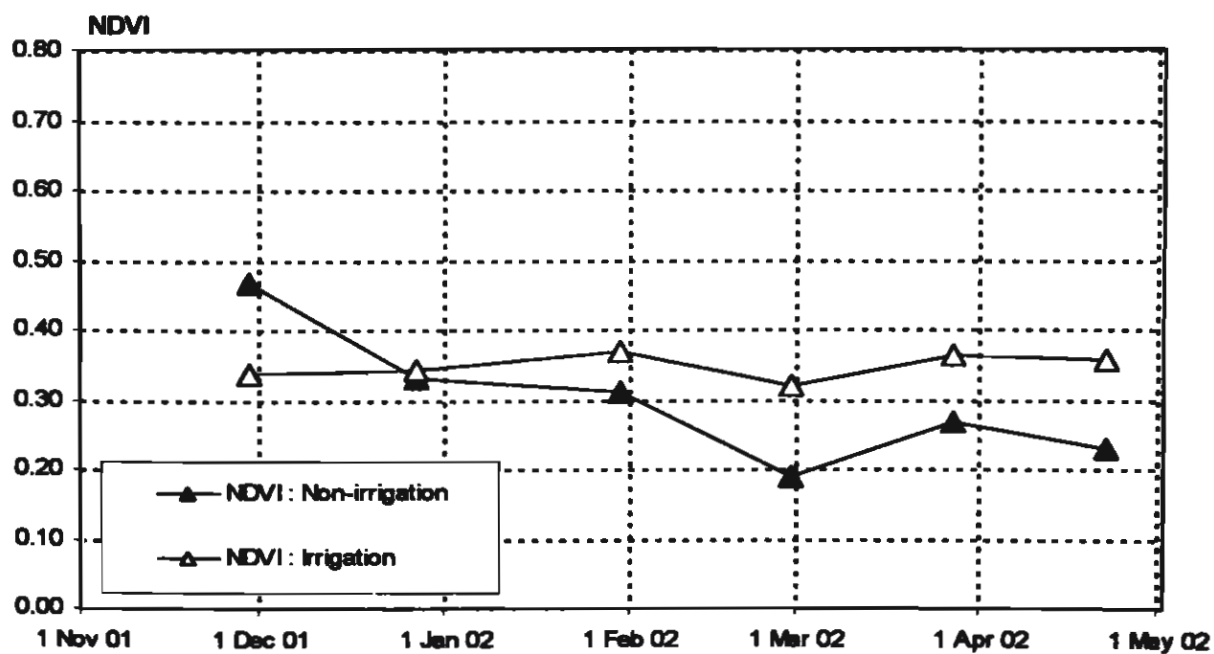
ภาพที่ 5-2 ค่าการสะท้อนของพื้นผิว
จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544



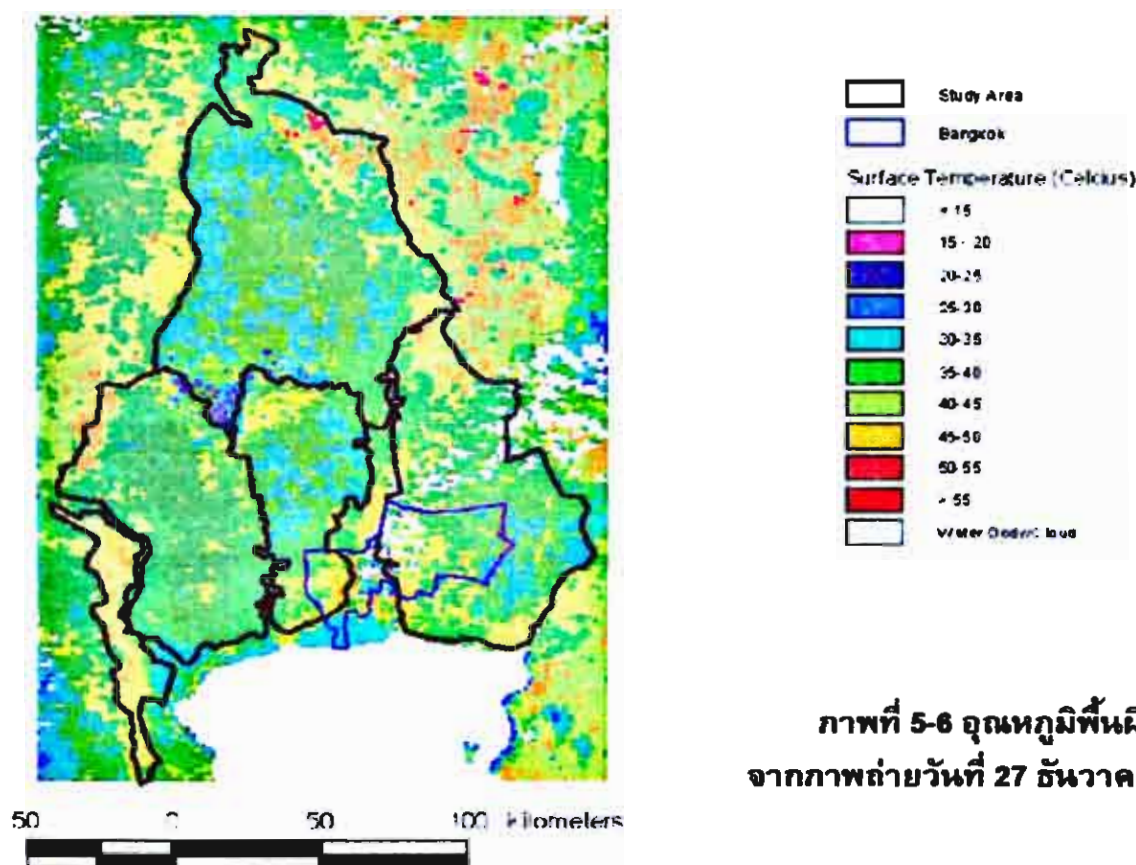
ภาพที่ 5-3 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของค่าการสะท้อนของพื้นผิว
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (Irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-Irrigation)



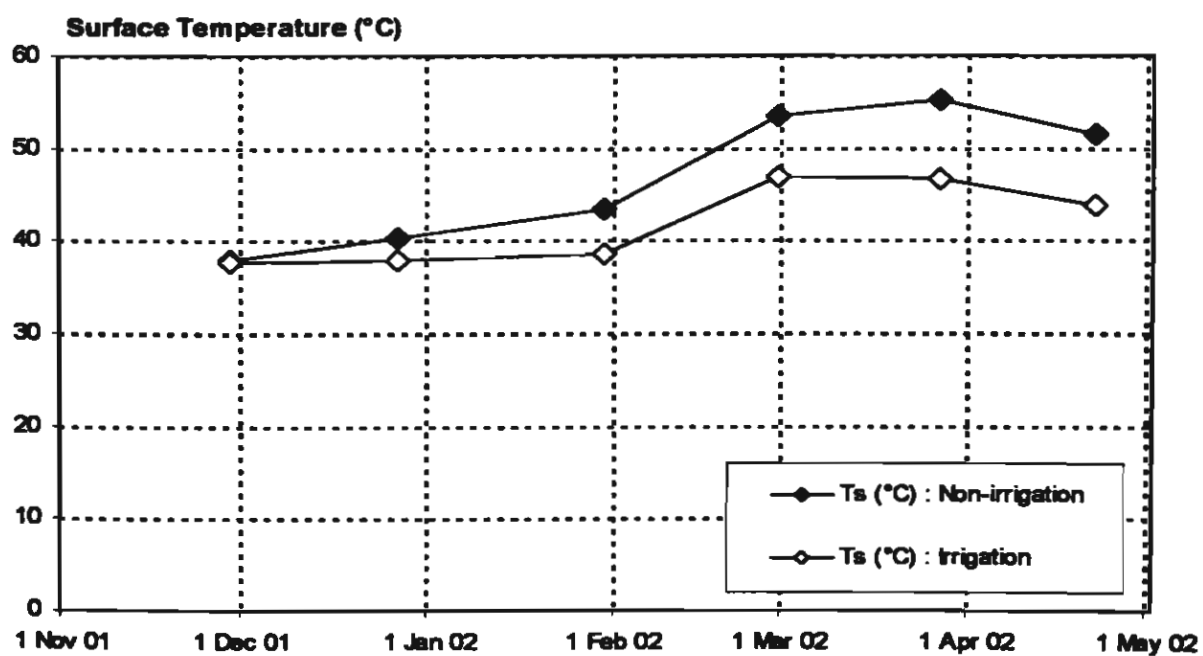
ภาพที่ 5-4 ดัชนีพืชพรรณ
จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544



ภาพที่ 5-5 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีพืชพรรณ (NDVI)
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (Irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)



ภาพที่ 5-6 อุณหภูมิพื้นผิว
จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544



ภาพที่ 5-7 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิว
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

5.2 การประเมินพารามิเตอร์สมการสมดุลพลังงาน

พารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงานประกอบไปด้วย พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (net radiation, R_n), พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux, G_o) และ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux, H)

ผลการประเมินพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงานสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5-2 และแสดงในภาพที่ 5-8 ถึงภาพที่ 5-13 โดยในตารางที่ 5-2 เป็นค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงานแยกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน และนอกเขตชลประทาน โดยตัวอย่างผลการประเมินพารามิเตอร์พื้นผิวแต่ละตัวของภาพถ่ายในวันที่ 27 ธันวาคม 2544 แสดงในภาพที่ 5-8, ภาพที่ 5-10 และภาพที่ 5-12 ตามลำดับ ส่วนผลของภาพอื่น ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ส่วนกราฟในภาพที่ 5-9, ภาพที่ 5-11 และภาพที่ 5-13 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงาน

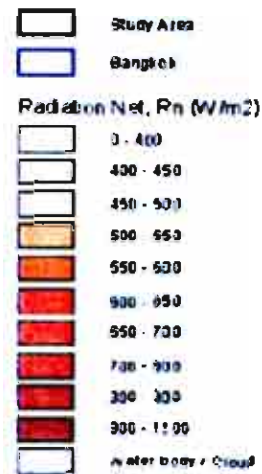
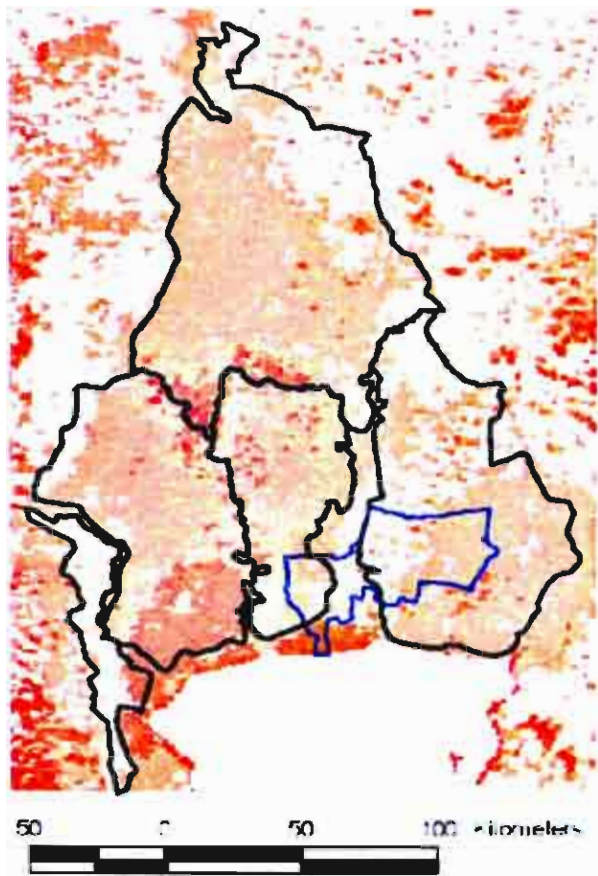
จากการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ พบว่า พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิที่ได้รับเฉลี่ยมีค่าระหว่าง 488 ถึง 622 W/m^2 โดยพื้นที่ในเขตชลประทานได้รับพลังงานสุทธินี้มากกว่าพื้นที่นอกเขต และพื้นที่ทั้งสองส่วนมีแนวโน้มได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูร้อน (ภาพที่ 5-9) เช่นเดียวกับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดินที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่มีค่าไม่ต่างกันมากนักระหว่างพื้นที่ทั้งสองเขต โดยมีค่าระหว่าง 92 ถึง 150 W/m^2 (ภาพที่ 5-11)

ส่วนพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักตลอดช่วง 6 เดือน (ภาพที่ 5-13) พื้นที่นอกเขตชลประทานมีการถ่ายเทความร้อนสู่อากาศสูงกว่าโดยมีค่าระหว่าง 147 ถึง 210 W/m^2 ขณะที่พื้นที่ในเขตชลประทานมีค่าระหว่าง 75 ถึง 147 W/m^2

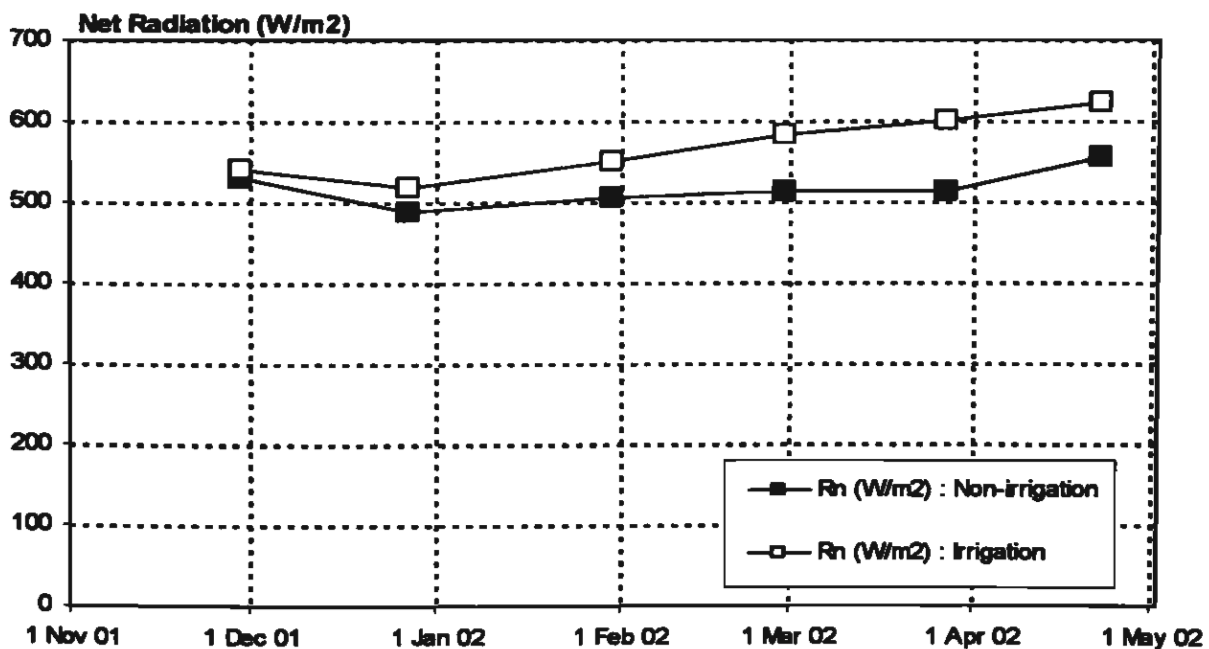
ความแตกต่างของการถ่ายเทพลังงานความร้อนสู่อากาศระหว่างพื้นที่ทั้งสองมีค่าน้อยในช่วงปลายฤดูฝน และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าสู่ฤดูแล้ง ทั้งนี้ เนื่องจากพื้นที่ในเขตชลประทานยังคงมีความชุ่มชื้นที่ได้จากน้ำชลประทาน เมื่อได้รับพลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์ พลังงานเหล่านี้จะถูกใช้ในการระเหย ในขณะที่พื้นที่นอกเขตชลประทานมีความชุ่มชื้นเหลือน้อยกว่า พลังงานที่ได้รับนั้นจะถูกถ่ายเทสู่อากาศ ดังนั้น เมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูแล้งพื้นที่ทั้งสองมีความชุ่มชื้นต่างกันมากขึ้น จึงมีผลให้พลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศต่างกันมากขึ้น

ตารางที่ 5-2 ค่าพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงาน
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

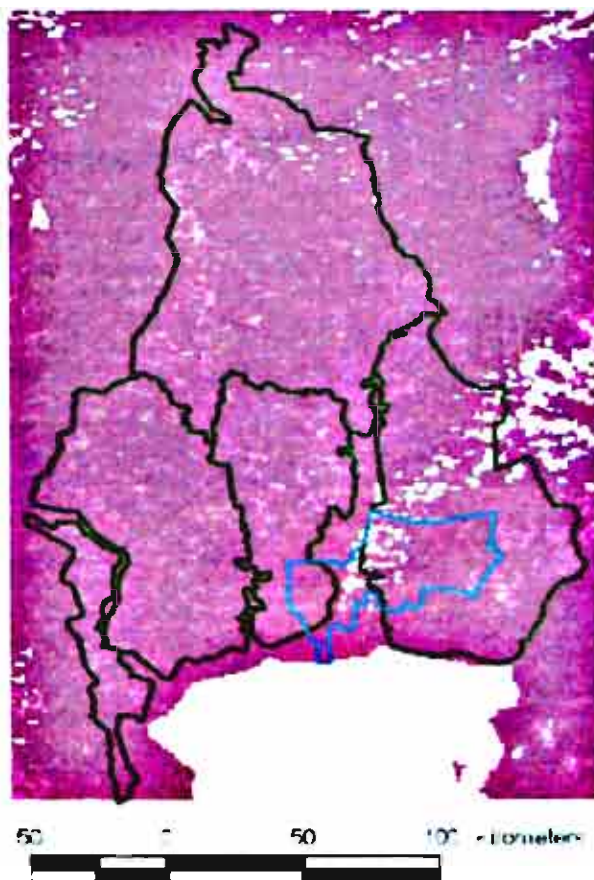
DATE	Rn (W/m2)		G (W/m2)		H (W/m2)	
	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation
29 Nov 01	530.86	539.56	92.81	96.68	168.46	147.50
27 Dec 01	488.19	518.19	96.41	94.39	147.52	107.17
30 Jan 02	503.84	549.94	108.50	101.66	163.55	104.91
28 Feb 02	512.32	583.63	139.17	132.61	151.08	94.67
27 Mar 02	511.48	599.47	146.33	138.66	157.12	75.38
22 Apr 02	554.74	622.34	149.75	137.81	210.04	101.99



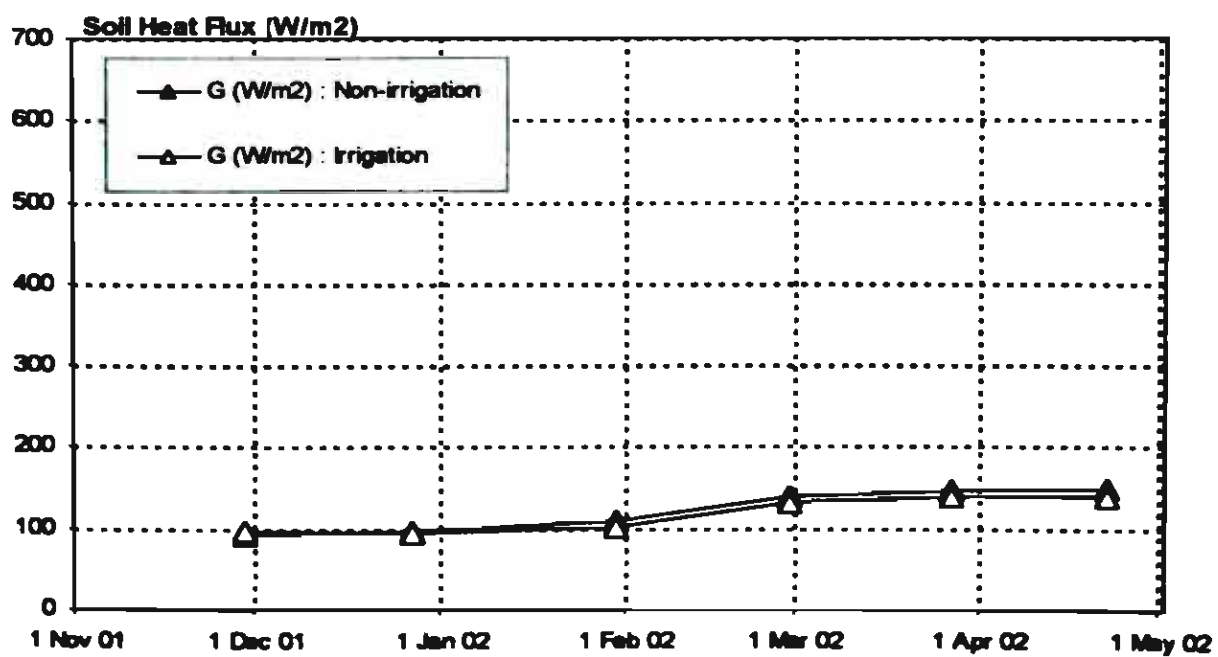
ภาพที่ 5-8 พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ
จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544



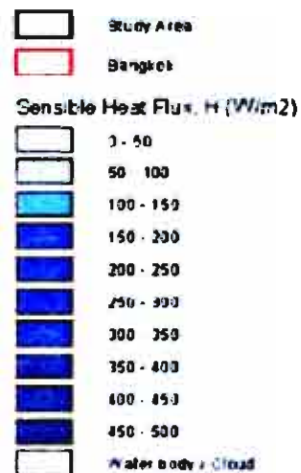
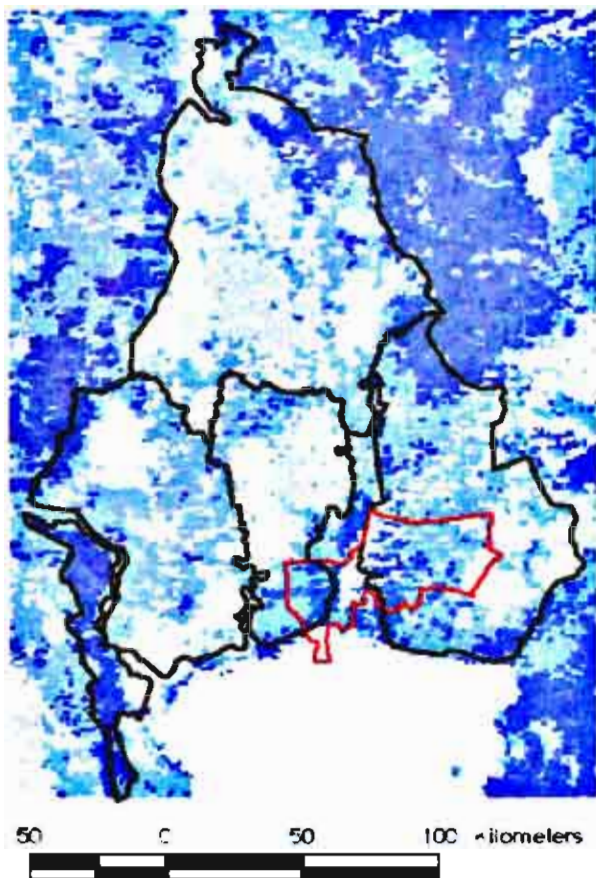
ภาพที่ 5-9 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)



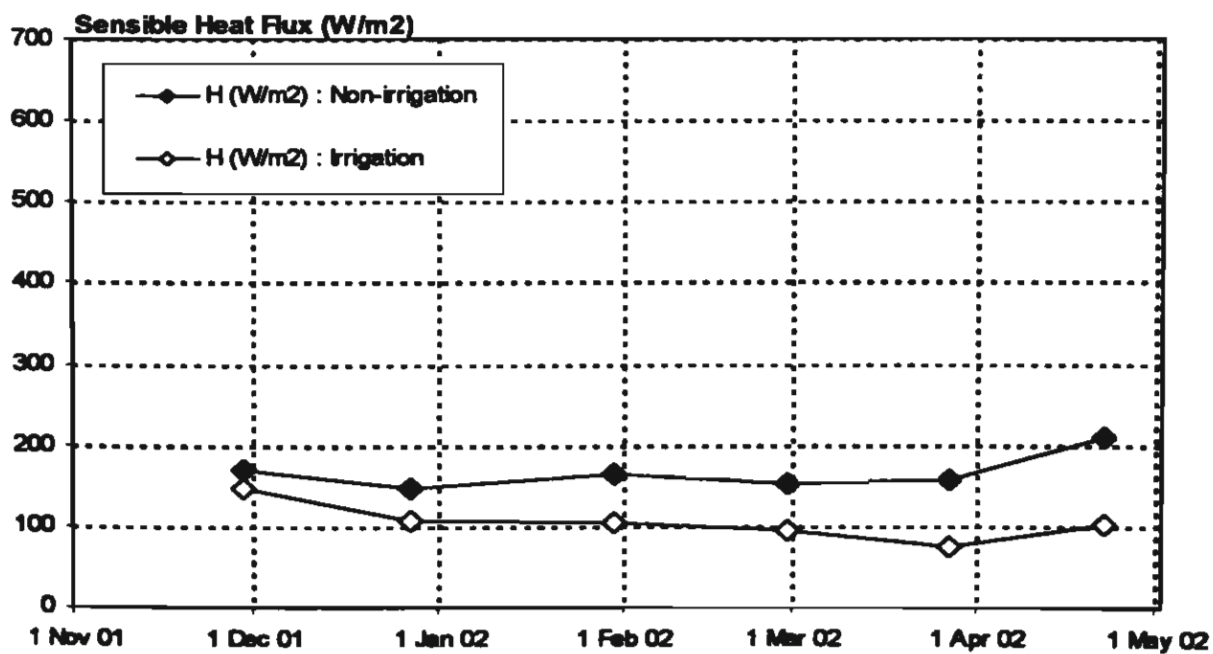
ภาพที่ 5-10 พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน
จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544



ภาพที่ 5-11 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทลงดิน
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (Irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)



ภาพที่ 5-12 พลังงานความร้อนที่ถ่ายเท
สู่อากาศโดยวิธี SEBAL
จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544



ภาพที่ 5-13 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

5.3 การหาอัตราการระเหย

5.3.1 สัดส่วนการระเหย

สัดส่วนการระเหย (evaporative fraction) เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการระเหยกับพลังงานสุทธิที่พื้นผิวได้รับ (radiation net ลบด้วย soil heat flux, $(R_n - G_o)$) โดยสัดส่วนการระเหยนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 เมื่อสัดส่วนการระเหยมีค่าเท่ากับ 0 หมายถึง พลังงานสุทธิที่ได้รับจะไม่ได้ถูกใช้ในการระเหยและจะถูกถ่ายเทไปสู่อากาศเป็นความร้อนที่รู้สึกได้ (sensible heat flux) ในทางตรงกันข้ามเมื่อสัดส่วนการระเหย เท่ากับ 1 หมายถึง พลังงานสุทธิที่ได้รับจะถูกใช้ในการระเหยทั้งหมดไม่มีการถ่ายเทสู่อากาศ

การหาสัดส่วนการระเหยจากสมการสมดุลพลังงาน ได้กระทำตามสองแนวทาง คือ ตามวิธี SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) โดยหาเป็นสัดส่วนการระเหย (Evaporative Fraction, EF) และตามวิธี S-SEBI (Menenti & Choudhury, 1993; Roerink et al., 2000) โดยหาเป็นดัชนีสมดุลพลังงาน (Surface Energy Balance Index, SEBI) ซึ่งทั้งสองเทอมนั้นแปลความหมายได้เหมือนกัน แต่ประเมินมาโดยกระบวนการวิธีต่างกันเท่านั้น

ผลการประเมินค่าสัดส่วนการระเหยจากทั้งสองวิธีสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 5-3 และแสดงในภาพที่ 5-14 ถึงภาพที่ 5-17 โดยในตารางที่ 5-3 เป็นค่าเฉลี่ยของสัดส่วนการระเหยแยกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน และนอกเขตชลประทาน โดยตัวอย่างผลการประเมินสัดส่วนการระเหยของภาพถ่ายในวันที่ 27 ธันวาคม 2544 ตามวิธี SEBAL และตามวิธี SEBI แสดงในภาพที่ 5-14 และภาพที่ 5-16 ตามลำดับ ส่วนผลของภาพอื่น ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ส่วนกราฟในภาพที่ 5-15 และภาพที่ 5-17 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของค่าสัดส่วนการระเหยจากทั้งสองวิธี

จากการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ พบว่า ค่าสัดส่วนการระเหยที่หาจากวิธี SEBAL กับวิธี S-SEBI ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ต่างกันมากนัก โดยมีค่าต่างกันน้อยกว่า 0.10 ทั้งพื้นที่ในเขตชลประทานและนอกเขตชลประทาน โดยเดือนที่มีค่าต่างกันค่อนข้างมาก (มากกว่า 0.10) เป็นผลลัพธ์ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์และเดือนมีนาคมของพื้นที่ในเขตชลประทาน

ความแตกต่างของค่าสัดส่วนการระเหยระหว่างพื้นที่ในเขตชลประทานกับนอกเขตชลประทานมีค่าน้อยในช่วงปลายฤดูฝน และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูแล้ง ซึ่งสามารถอธิบายได้คล้ายกับกรณีของพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ กล่าวคือ พื้นที่ในเขตชลประทานยังคงมีความชุ่มชื้นที่ได้จากน้ำชลประทาน เมื่อได้รับพลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์ ในพื้นที่นี้ยังคงมีปริมาณน้ำที่ใช้ในการระเหย ทำให้ค่าสัดส่วนการระเหยมีค่าสูงและมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยกว่า ในทางตรงกันข้ามกับพื้นที่นอกเขตชลประทาน ซึ่งในช่วงปลายฤดูฝนมีความชุ่มชื้นใกล้เคียงกับพื้นที่ในเขตชลประทานทำให้ค่าสัดส่วนการระเหยในช่วงนี้ไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูแล้งปริมาณความชื้นในดินลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งมีผลให้ค่าสัดส่วนการระเหยมีแนวโน้มลดลง

อนึ่ง การหาค่าสัดส่วนการระเหยจากวิธี SEBAL กับวิธี S-SEBI ให้ผลลัพธ์ของพื้นที่ในเขตชลประทานไม่สอดคล้องกัน โดยค่าสัดส่วนการระเหยจากวิธี SEBAL มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนผลลัพธ์จากวิธี S-SEBI มีแนวโน้มลดลง ความแตกต่างอันนี้น่าจะเป็นผลมาจากข้อจำกัดของกระบวนการหาค่าสัดส่วนการระเหยของทั้งสองวิธี

ในการหาค่าสัดส่วนการระเหยของทั้งสองวิธีนั้น มีความจำเป็นต้องกำหนดพื้นที่อ้างอิงสองลักษณะ ได้แก่ บริเวณที่ชุ่มชื้น และบริเวณที่แห้ง โดยบริเวณที่ชุ่มชื้นจะถือว่าเป็นพื้นที่ซึ่งพลังงานที่ได้รับทั้งหมดที่ถูกใช้ในการระเหยน้ำ ส่วนบริเวณที่แห้งจะถือว่าเป็นพื้นที่ซึ่งไม่มีการระเหยของน้ำ พลังงานที่ได้รับทั้งหมดถูกถ่ายเทสู่อากาศเป็นความร้อนที่รู้สึกได้ (sensible heat) หรือ เทอม H. ในสมการสมดุลพลังงาน

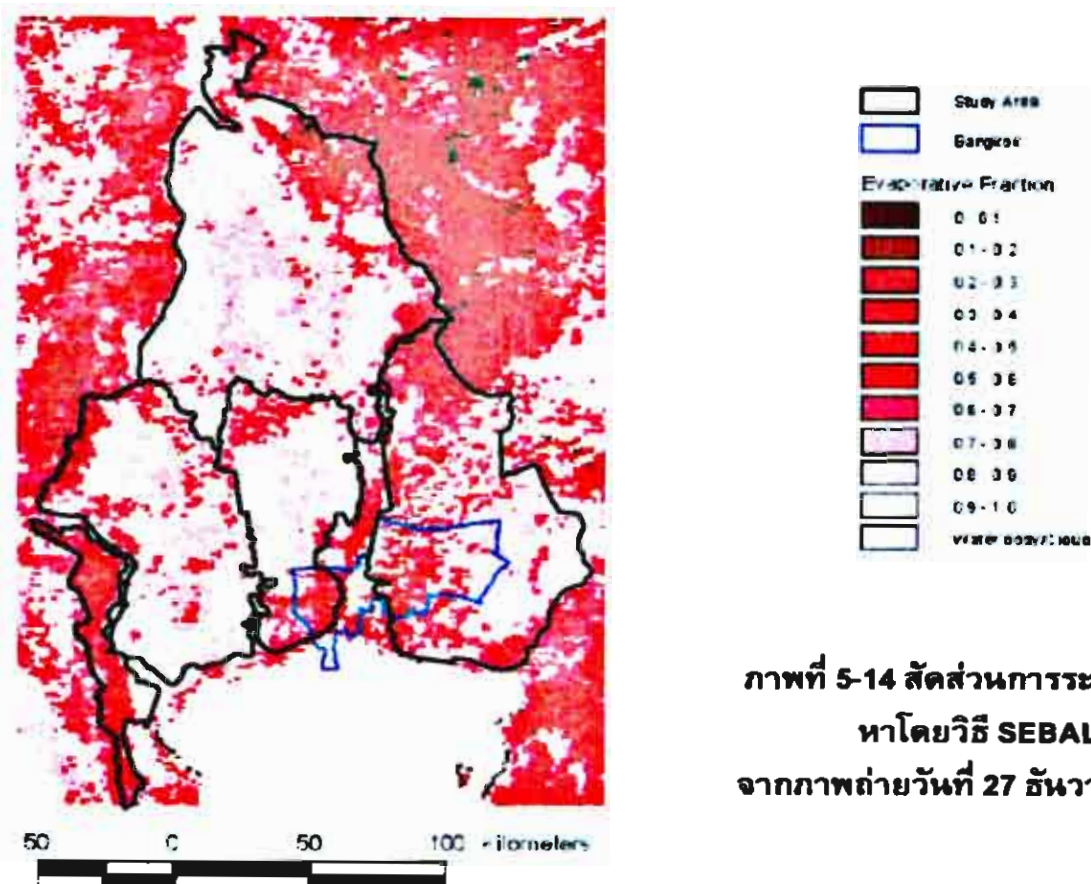
วิธี SEBAL นั้นเลือกพื้นที่อ้างอิงทั้งสองลักษณะจากแผนที่แสดงข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่ปรับแก้มาที่ค่าระดับความสูงอ้างอิง จุดที่อุณหภูมิพื้นผิวต่ำสุดในแผนที่ถือว่าเป็นจุดที่ชุ่มชื้น (wet pixels) และ จุดที่อุณหภูมิพื้นผิวสูงสุดถือว่าเป็นจุดที่แห้ง (dry pixels) ส่วนวิธี S-SEBI จะเพิ่มข้อมูลค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวมาพิจารณา โดยนำค่าการสะท้อนแสงมาพล็อตกราฟเทียบกับอุณหภูมิพื้นผิว ซึ่งจะสามารถสังเกตแนวเส้นตรงของบริเวณที่ชุ่มชื้นซึ่งเปลี่ยนแปลงตามค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวเป็นขอบเขตล่างได้จากกราฟ และบริเวณที่แห้งเป็นขอบเขตบน

ข้อจำกัดของทั้งสองวิธีสำหรับการนำมาใช้กับพื้นที่ในเขตชลประทาน คือ การกำหนดบริเวณที่แห้ง เนื่องจากพื้นที่ในเขตชลประทานมีการให้น้ำแก่พื้นที่เพาะปลูกอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ไม่ปรากฏบริเวณที่แห้งในพื้นที่ศึกษาเลย สำหรับงานวิจัยนี้ ได้เลือกบริเวณพื้นที่นอกเขตชลประทานเป็นพื้นที่อ้างอิงบริเวณที่แห้ง นอกจากนี้ วิธี SEBAL เลือกจุดภาพเพียงจุดเดียวมาใช้เป็นบริเวณอ้างอิง ความผิดพลาดในการเลือกจุดภาพที่ไม่เหมาะสมมีผลอย่างมากต่อผลลัพธ์ ส่วนวิธี S-SEBI ถึงแม้ว่าจะใช้จุดภาพหลายจุดที่เรียงเป็นแนวขอบเขตล่างและขอบเขตบน ทำให้ผลลัพธ์น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น แต่ปัญหาที่พบคือมีจำนวนจุดภาพไม่พอเพียงที่จะเรียงเป็นแนวเส้นตรงขอบเขตบนของบริเวณที่แห้ง

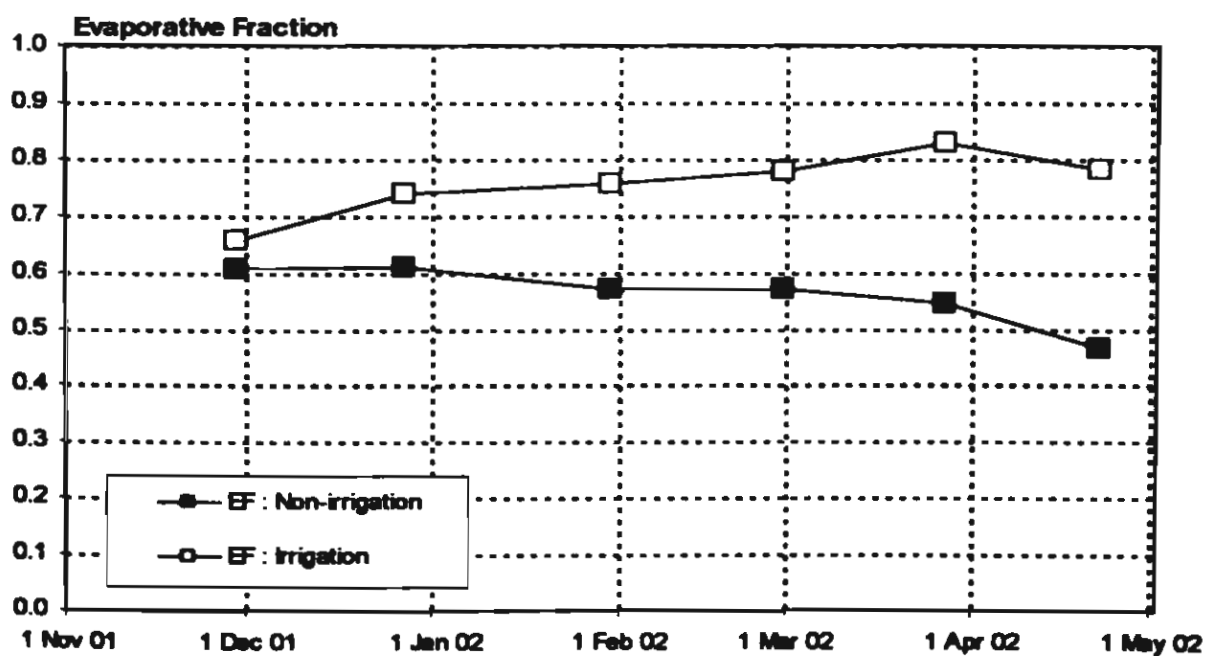
ตารางที่ 5-3 ค่าสัดส่วนการระเหย

จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

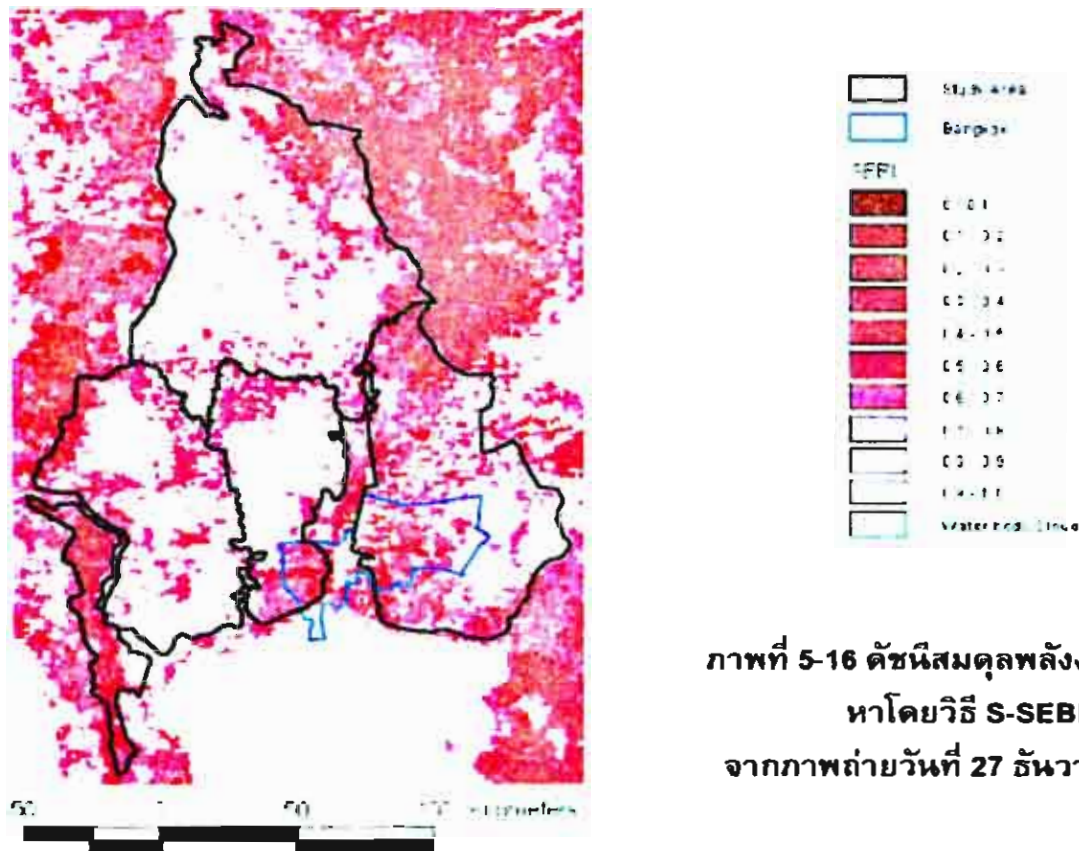
DATE	วิธี SEBAL (EF)		วิธี S-SEBI	
	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation
29 Nov 01	0.61	0.66	0.71	0.73
27 Dec 01	0.61	0.74	0.63	0.72
30 Jan 02	0.57	0.75	0.54	0.70
28 Feb 02	0.57	0.78	0.49	0.64
27 Mar 02	0.54	0.83	0.44	0.65
22 Apr 02	0.47	0.78	0.50	0.71



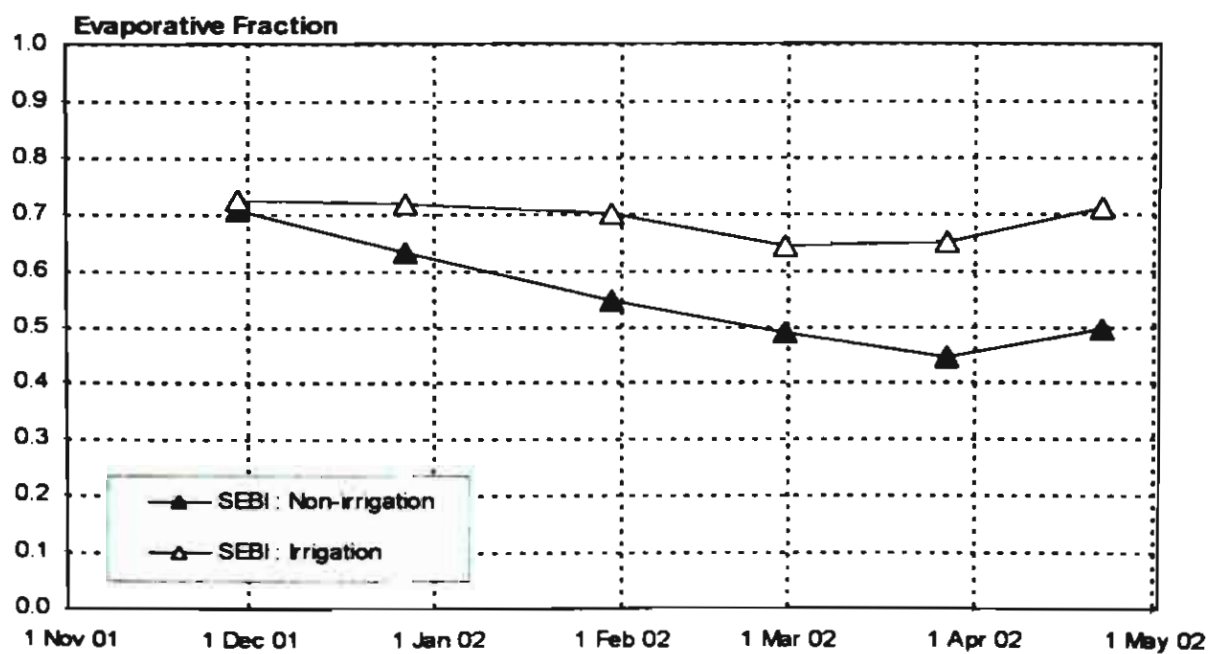
ภาพที่ 5-14 สัดส่วนการระเหย (EF)
หาโดยวิธี SEBAL
จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544



ภาพที่ 5-15 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของสัดส่วนการระเหย
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)



ภาพที่ 5-16 ดัชนีสมดุลพลังงาน (SEBI)
หาโดยวิธี S-SEBI
จากภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544



ภาพที่ 5-17 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีสมดุลพลังงาน SEBI
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

5.3.2 อัตราการระเหยเฉลี่ยในรอบวัน

การประเมินพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ทั้งพารามิเตอร์พื้นผิว และพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงาน เป็นการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายขณะที่ดาวเทียม NOAA เคลื่อนผ่าน ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้ภาพที่ถ่ายในช่วงเวลาประมาณ 14.00 น. ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดก็เป็นผลขณะที่ถ่ายภาพเช่นกัน ในส่วนของอัตราการระเหยนั้น ค่าอัตราการระเหยขณะถ่ายภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ค่อนข้างจำกัด งานวิจัยนี้จึงได้ทำการประเมินเป็นค่าอัตราการระเหยเฉลี่ยตลอดทั้งวัน ซึ่งทำการประเมินโดยใช้ข้อมูลพลังงานสุทธิเฉลี่ยตลอดวันร่วมกับค่าสัดส่วนการระเหยทั้งที่ได้จากวิธี SEBAL และวิธี S-SEBI

ผลการประเมินอัตราการระเหยเฉลี่ยตลอดวันจากทั้งสองวิธีสรุปได้ตามตารางที่ 5-4 ถึง ตารางที่ 5-6 และแสดงในภาพที่ 5-18 ถึงภาพที่ 5-23 โดยในตารางที่ 5-4 เป็นค่าเฉลี่ยของอัตราการระเหยตลอดวันจากวิธี SEBAL แยกตามพื้นที่ในเขตชลประทานและนอกเขตชลประทาน และแสดงผลเป็นกราฟในภาพที่ 5-18 และภาพที่ 5-19 เป็นผลจากวิธี S-SEBI

นอกจากนี้ได้แยกผลลัพธ์ในเขตพื้นที่ชลประทานออกเป็น 5 กลุ่ม ตามขอบเขตของโครงการชลประทานหลัก ๆ ในพื้นที่ศึกษา คือ โครงการเจ้าพระยาใหญ่แยกเป็นพื้นที่ดอนบน พื้นที่ดอนล่างฝั่งตะวันออกและฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา ส่วนโครงการแม่กลองใหญ่แยกเป็นพื้นที่ฝั่งซ้ายและขวาของแม่น้ำแม่กลอง ดังแสดงในตารางที่ 5-5 เป็นค่าเฉลี่ยของอัตราการระเหยตลอดวันจากวิธี SEBAL และแสดงผลเป็นกราฟในภาพที่ 5-20 ส่วนตารางที่ 5-6 และกราฟในภาพที่ 5-21 เป็นผลจากวิธี S-SEBI และท้ายสุด ภาพที่ 5-22 (ก) ถึง (ง) เป็นแผนที่แสดงอัตราการระเหยเฉลี่ยตลอดวันจากวิธี SEBAL ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2544 ถึงเมษายน 2545 ตามลำดับ ส่วนภาพที่ 5-23 (ก) ถึง (ง) เป็นผลจากวิธี SEBI

ตารางที่ 5-4 อัตราการระเหยจริง (actual evapotranspiration)
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

DATE	ETa - SEBAL (mm/day)		ETa - SEBI (mm/day)	
	Non-Irrigation	Irrigation	Non-Irrigation	Irrigation
29 Nov 01	2.65	2.87	3.09	3.18
27 Dec 01	2.51	3.12	2.59	3.03
30 Jan 02	2.67	3.62	2.54	3.36
28 Feb 02	3.07	4.39	2.61	3.62
27 Mar 02	3.02	4.78	2.45	3.75
22 Apr 02	2.90	4.94	3.07	4.48

จากการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ พบว่า อัตราส่วนการระเหยเฉลี่ยตลอดวันที่หาจากวิธี SEBAL กับ วิธี S-SEBI ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ต่างกันมากนัก (ตารางที่ 5-4) โดยมีค่าต่างกันน้อยกว่า 1 มิลลิเมตรต่อวัน ทั้งพื้นที่ในเขตชลประทานและนอกเขตชลประทาน โดยเดือนที่มีค่าต่างกันค่อนข้างมาก (มากกว่า 0.5 มิลลิเมตรต่อวัน) เป็นผลลัพธ์ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์และเดือนมีนาคม โดยเฉพาะผลของพื้นที่ในเขตชลประทาน ซึ่งมีผลคล้ายคลึงกับผลของค่าสัดส่วนการระเหย

ความแตกต่างของอัตราการระเหยระหว่างพื้นที่ในเขตชลประทานกับนอกเขตชลประทานของทั้งสองวิธี มีค่าน้อยในช่วงปลายฤดูฝน และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูแล้ง (กราฟในภาพที่ 5-18 และภาพที่ 5-19) ซึ่งสามารถอธิบายได้คล้ายคลึงกับกรณีผลลัพธ์ของค่าสัดส่วนการระเหย นอกจากนี้ ในภาพที่ 5-18 และภาพที่ 5-19 ได้แสดงเส้นทึบสีเข้ม ซึ่งเป็นค่าของอัตราการระเหยในกรณีที่ค่าสัดส่วนการระเหยเท่ากับ 1 โดยสามารถแปลความหมายได้ว่าเป็นอัตราการระเหยของพืชในกรณีที่น้ำไม่จำกัด หรือเป็นอัตราการระเหยสูงสุดของพืช (crop evapotranspiration, ETC) โดยเส้นนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ฤดูแล้ง เมื่อพิจารณาพื้นที่ในเขตชลประทาน อัตราการระเหยของแนวโน้มเพิ่มขึ้นขนานไปกับแนวโน้มของอัตราการระเหยสูงสุดของพืช ส่วนอัตราการระเหยของพื้นที่นอกเขตชลประทานมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

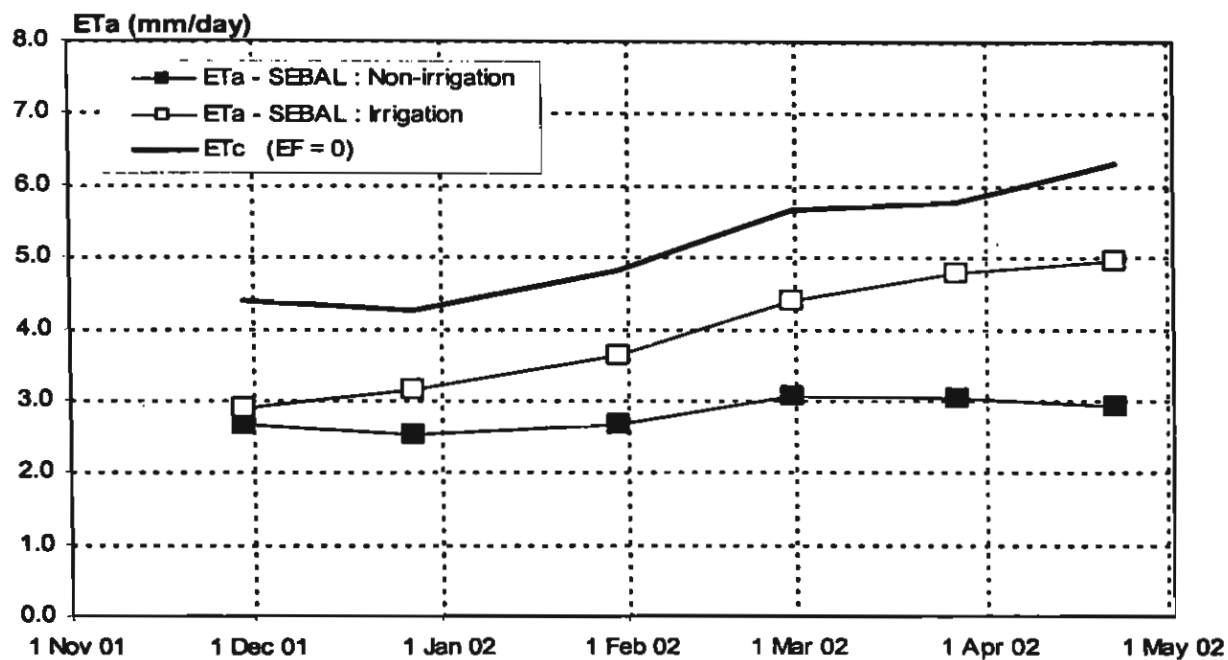
เมื่อพิจารณาอัตราการระเหยในเขตชลประทานโดยแยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก ๆ (ตารางที่ 5-5 และตารางที่ 5-6) พบว่าพื้นที่โครงการเจ้าพระยาตอมบ่น คอนล่างฝั่งตะวันออก และแม่กลองฝั่งซ้าย มีค่าอัตราการระเหยค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน (กราฟในภาพที่ 5-20 และภาพที่ 5-21) กล่าวคือ ค่อนข้างต่ำในช่วงปลายฤดูฝนและมีแนวโน้มสูงขึ้นในช่วงแล้ง ซึ่งแนวโน้มของกราฟของพื้นที่ในกลุ่มนี้ค่อนข้างขนานไปกับแนวโน้มแสดงอัตราการระเหยสูงสุดของพืช (สีทึบเข้ม)

พื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกคอนล่างซึ่งอยู่ตรงกลางของพื้นที่ศึกษา และโครงการแม่กลองฝั่งขวาซึ่งอยู่ทางขอบทิศตะวันตกสุดของพื้นที่ มีความต่างจากพื้นที่ในสามกลุ่มข้างต้น กล่าวคือพื้นที่โครงการเจ้าพระยาตอมบ่นฝั่งตะวันตก มีอัตราการระเหยต่ำสุดเมื่อเทียบกับพื้นที่อื่น ๆ ในช่วงปลายฤดูฝนในเดือนพฤศจิกายน และเพิ่มขึ้นจนเป็นค่าสูงสุดในเดือนถัด ๆ มาเมื่อเข้าสู่ฤดูแล้ง ส่วนพื้นที่โครงการแม่กลองฝั่งขวานั้นช่วงปลายฤดูฝนในเดือนพฤศจิกายนมีค่าอัตราการระเหยใกล้เคียงกับพื้นที่อื่น แต่ลดลงจนเป็นค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับพื้นที่อื่นในเดือนธันวาคมและเดือนมกราคม จากนั้นกลับเพิ่มสูงขึ้นเป็นค่าสูงสุดในช่วงปลายฤดูแล้ง

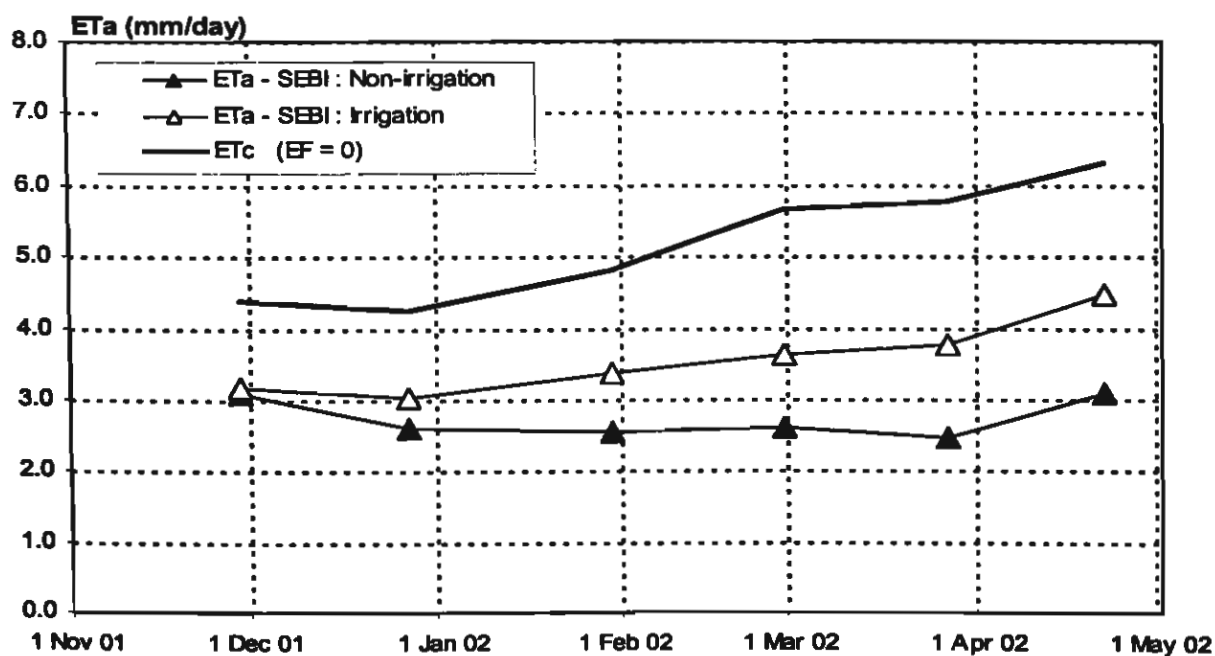
การที่อัตราการระเหยในพื้นที่หนึ่งมีค่าลดต่ำลงเมื่อเทียบกับพื้นที่ข้างเคียง อาจคาดได้ว่าเป็นช่วงเก็บเกี่ยวของพื้นที่นั้น ๆ เนื่องจากในช่วงเก็บเกี่ยวจะหยุดให้น้ำชลประทาน ทำให้พื้นที่นั้น ๆ มีอัตราการระเหยจากพื้นที่ลดน้อยลง ซึ่งจากการสำรวจภาคสนาม พื้นที่ส่วนใหญ่ของโครงการเจ้าพระยาตอมบ่นฝั่งตะวันตกเป็นพื้นที่เพาะปลูกข้าว และเปลี่ยนเป็นชุมชนเมืองบริเวณเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล โดยในช่วงเดือนพฤศจิกายน พื้นที่บริเวณนี้ได้สิ้นสุดฤดูนาปีไปแล้ว และอยู่ในช่วงเตรียมแปลงเพื่อทำนาปีครั้งที่ 1 จะสังเกตได้ว่าพื้นที่บริเวณนี้มีกิจกรรมการเพาะปลูกค่อนข้างเร็วกว่าพื้นที่

อื่น เนื่องจาก บริเวณนี้เป็นพื้นที่รับน้ำหลากเพื่อป้องกันอุทกภัยของกรุงเทพมหานครฯ จึงทำให้มีความเสี่ยงต่อน้ำท่วมในช่วงปลายฤดูฝนค่อนข้างสูง ดังนั้น การเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวข้าวนาปีจึงค่อนข้างเร็วกว่าพื้นที่อื่น และจะเริ่มทำนาปรังทันทีเมื่อสิ้นสุดฤดูฝน

ส่วนพื้นที่ในเขตโครงการแม่กลองฝั่งขวา ส่วนใหญ่เพาะปลูกข้าวโดยในเดือนพฤศจิกายนนั้นเป็นช่วงเก็บเกี่ยวของนาปี ถัดจากนั้น ระหว่างเดือนธันวาคมจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ โครงการชลประทานแม่กลองจะหยุดส่งน้ำ เนื่องจากบริเวณนี้เป็นพื้นที่สูง ทำให้หาน้ำจากแหล่งอื่นเพื่อการเพาะปลูกในฤดูแล้งได้ยาก ดังนั้น กิจกรรมการเพาะปลูกจึงค่อนข้างสอดคล้องกับปฏิทินการส่งน้ำชลประทาน ในช่วงหยุดส่งน้ำนี้อัตราการระเหยของพื้นที่นี้จะคล้ายกับพื้นที่นอกเขตชลประทานที่อยู่ใกล้เคียง เมื่อโครงการแม่กลองเริ่มส่งน้ำอีกครั้ง ราวปลายเดือนกุมภาพันธ์ บริเวณก็จะเริ่มทำนาปรังทำให้อัตราการระเหยกลับเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ ยังสามารถสังเกตรูปแบบการระเหยและกิจกรรมการเพาะปลูกแบบนี้ ในบริเวณตอนบนของโครงการแม่กลองฝั่งซ้ายได้เช่นเดียวกัน



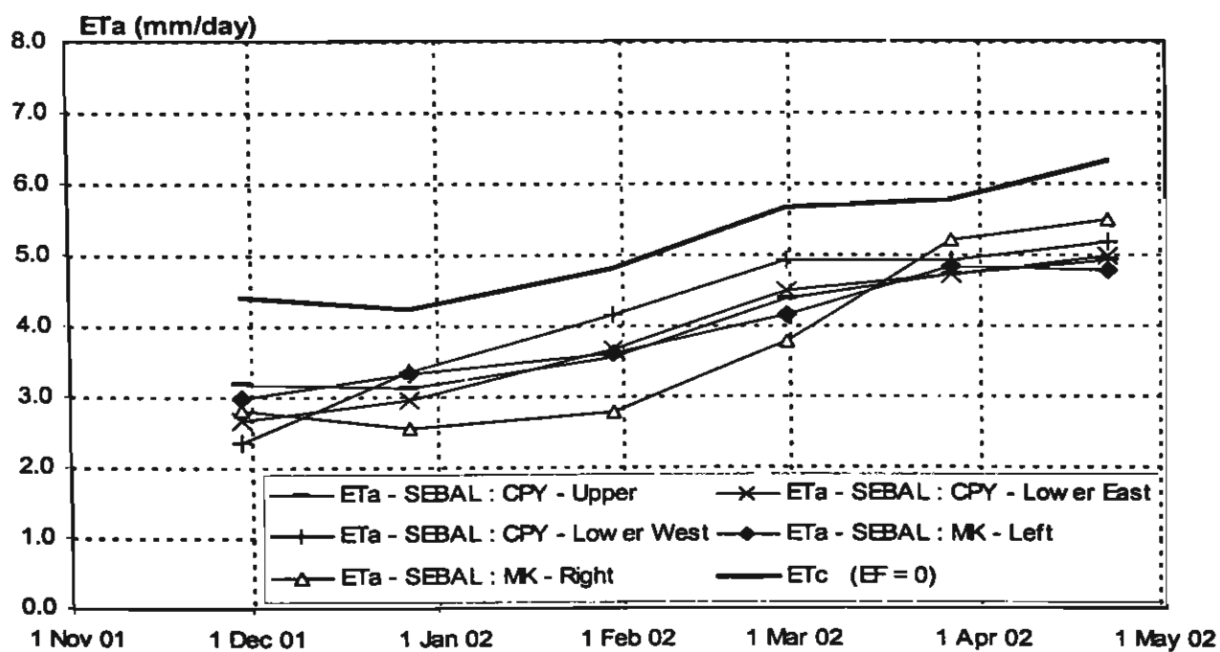
ภาพที่ 5-18 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBAL
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (Irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)



ภาพที่ 5-19 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBI
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (Irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

ตารางที่ 5-5 อัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBAL แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

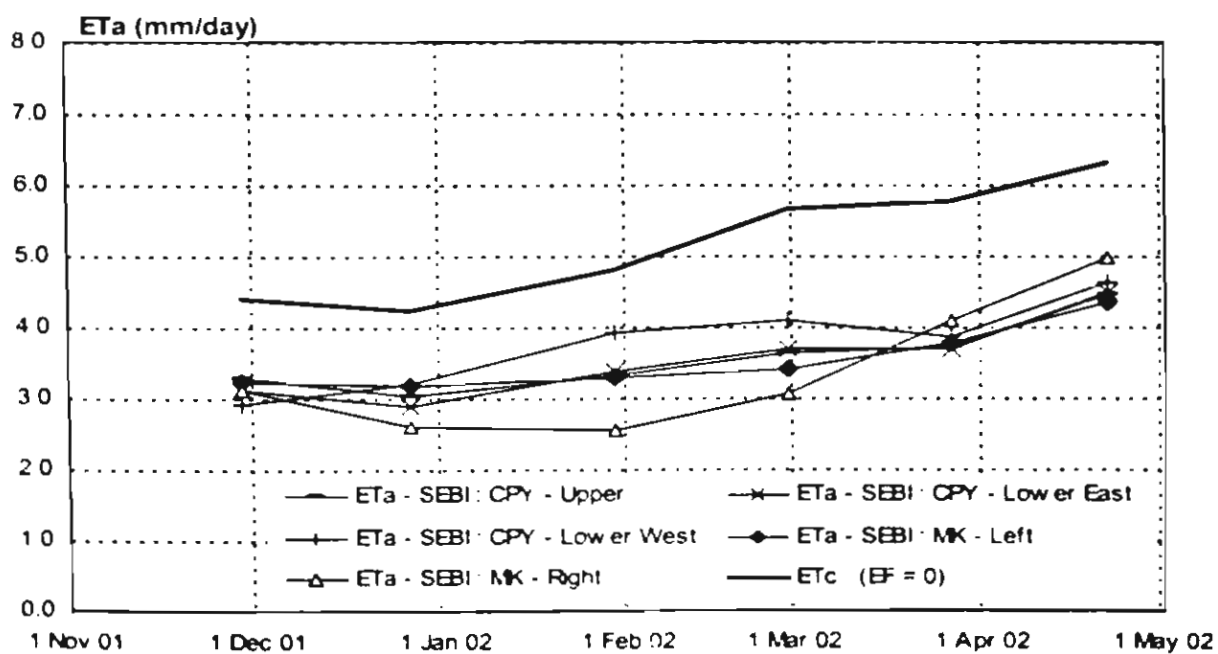
DATE	ETa by SEBAL (mm/day)				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	3.16	2.66	2.36	2.96	2.80
27 Dec 01	3.12	2.95	3.35	3.32	2.54
30 Jan 02	3.54	3.65	4.15	3.59	2.76
28 Feb 02	4.37	4.48	4.92	4.14	3.78
27 Mar 02	4.70	4.71	4.91	4.82	5.20
22 Apr 02	4.90	4.97	5.16	4.76	5.48



ภาพที่ 5-20 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงหาโดยวิธี SEBAL แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

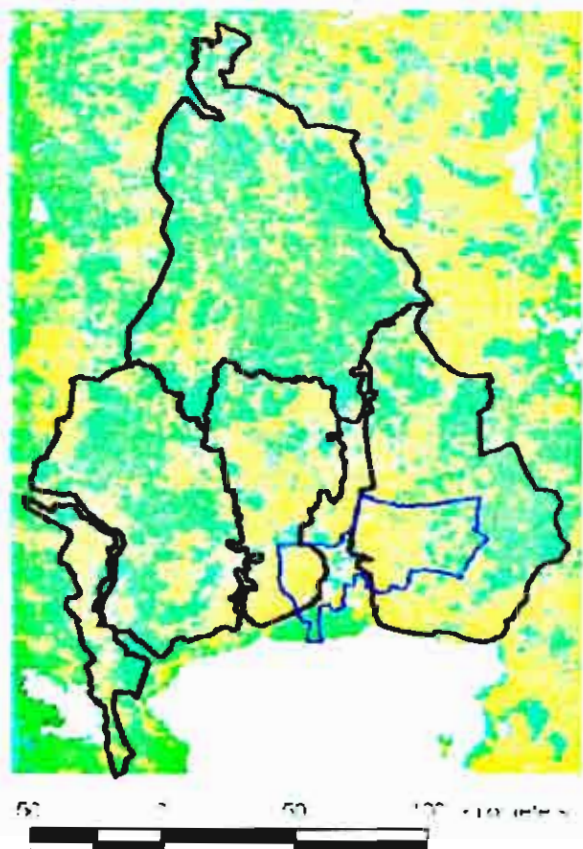
ตารางที่ 5-6 อัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBI แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

DATE	ETa by SEBI (mm/day)				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	3.29	3.12	2.91	3.24	3.13
27 Dec 01	3.02	2.90	3.20	3.18	2.61
30 Jan 02	3.30	3.37	3.90	3.28	2.55
28 Feb 02	3.62	3.68	4.09	3.40	3.07
27 Mar 02	3.70	3.68	3.87	3.77	4.00
22 Apr 02	4.46	4.49	4.64	4.34	4.96

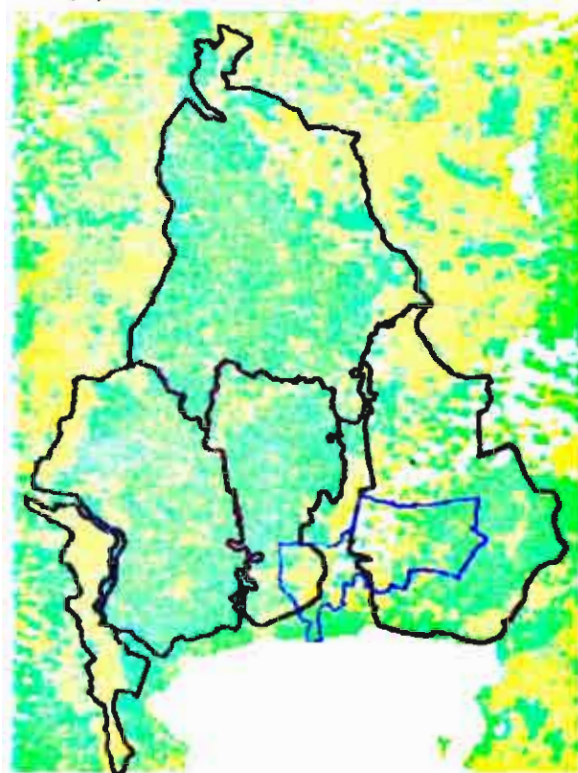


ภาพที่ 5-21 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงหาโดยวิธี SEBI แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

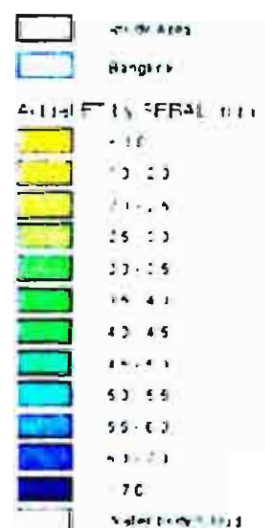
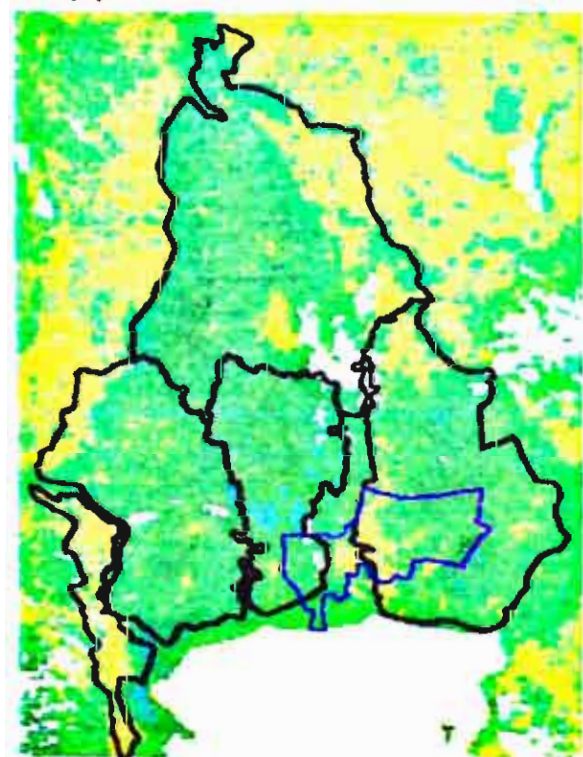
(ก) ภาพถ่ายวันที่ 29 พฤศจิกายน 2544



(ข) ภาพถ่ายวันที่ 27 ธันวาคม 2544

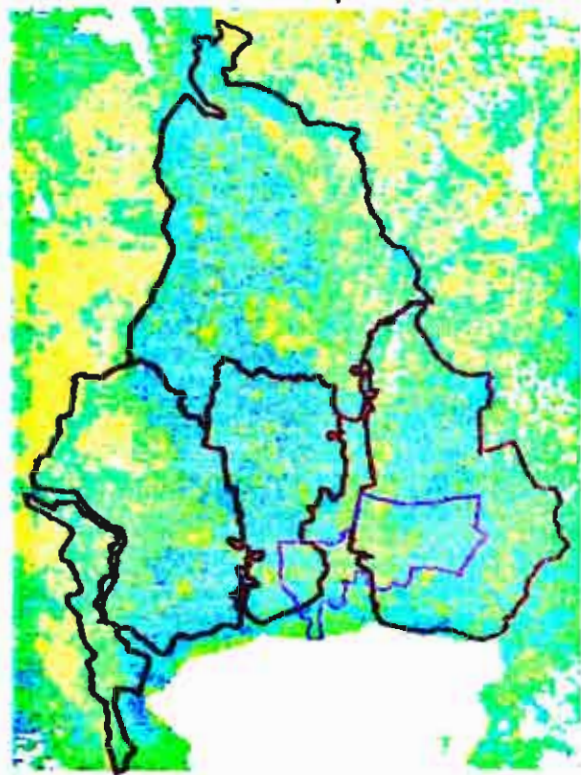


(ค) ภาพถ่ายวันที่ 30 มกราคม 2545



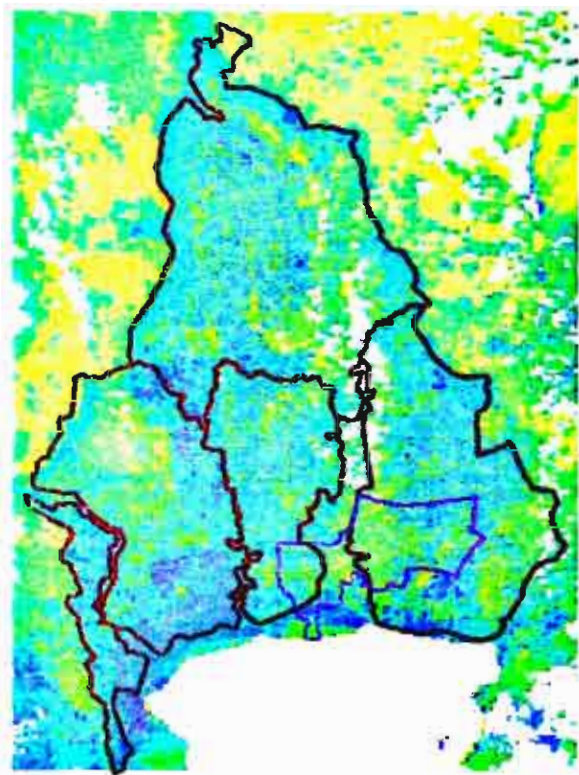
ภาพที่ 5-22
อัตราการการระเหยเฉลี่ยตลอดวัน
หาโดยวิธี SEBAL

(ง) ภาพถ่ายวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2545

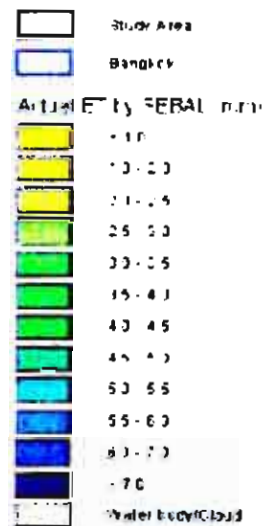
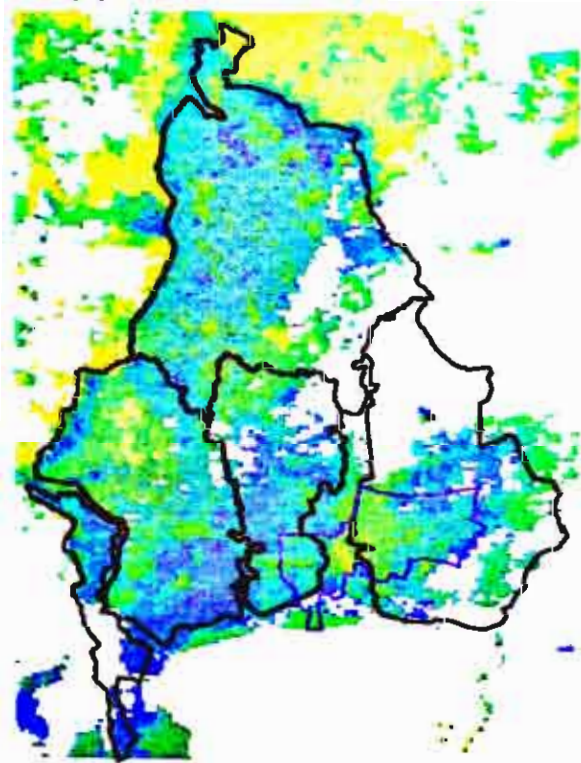


50 50 100 kilometers

(จ) ภาพถ่ายวันที่ 27 มีนาคม 2545

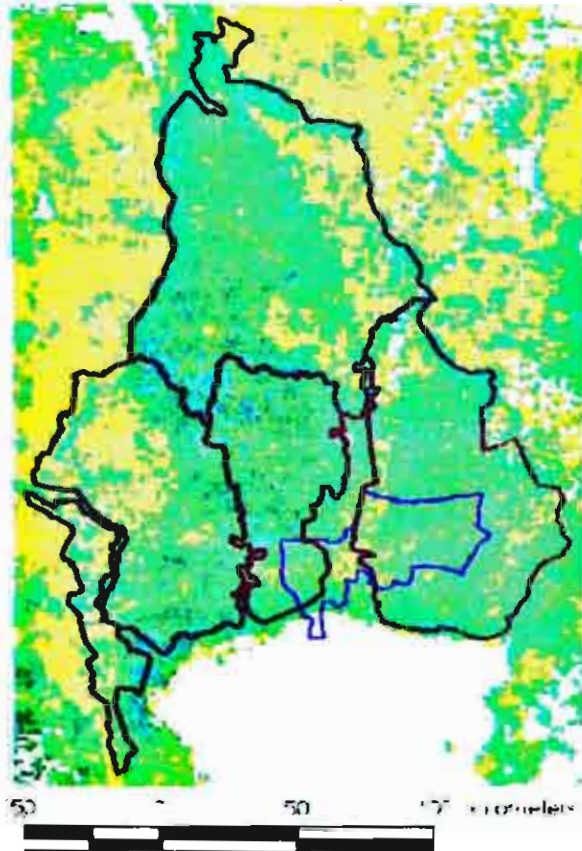


(ฉ) ภาพถ่ายวันที่ 22 เมษายน 2545

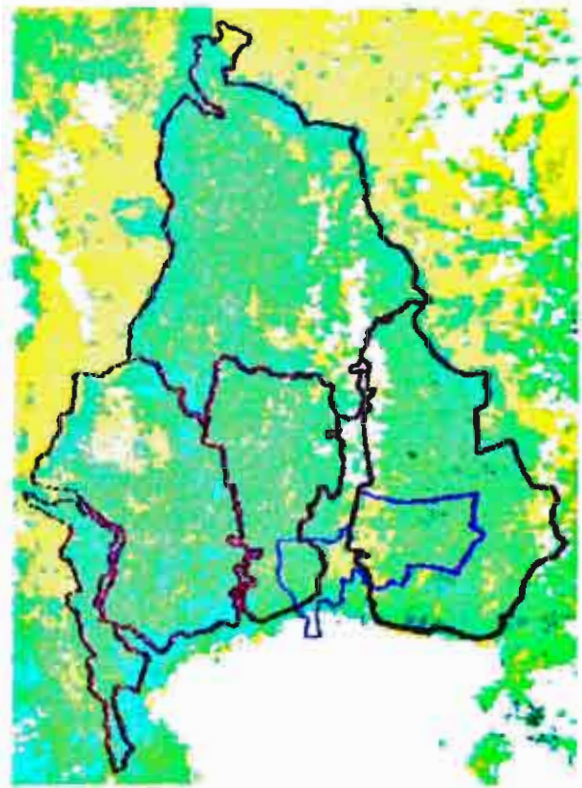


ภาพที่ 5-22 (ต่อ)
อัตราการการระเหยเฉลี่ยตลอดวัน
หาโดยวิธี SEBAL

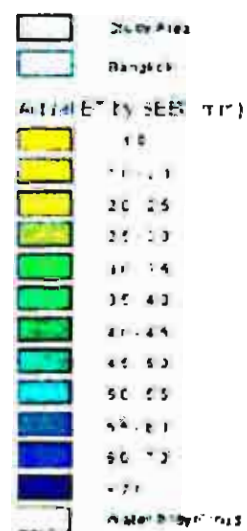
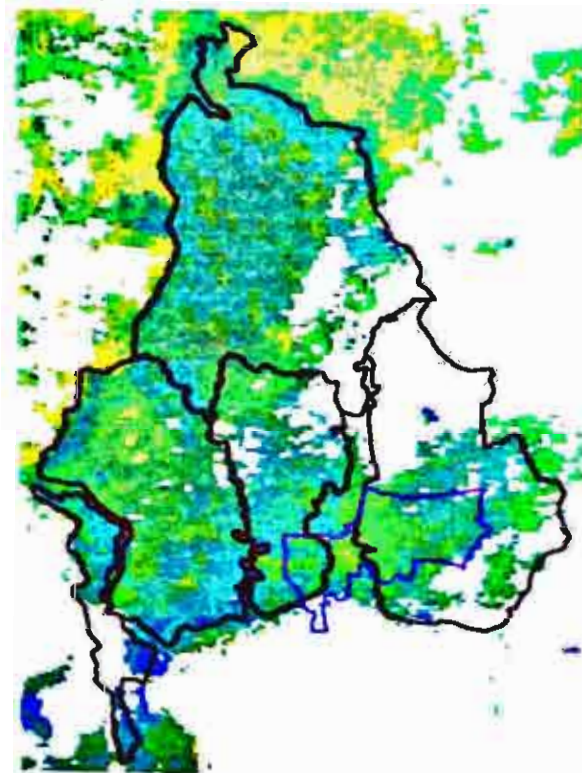
(ง) ภาพถ่ายวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2545



(จ) ภาพถ่ายวันที่ 27 มีนาคม 2545



(ฉ) ภาพถ่ายวันที่ 22 เมษายน 2545



ภาพที่ 5-23 (ต่อ)
อัตราการการะเหยน้ำเฉลี่ยตลอดวัน
หาโดยวิธี SEBI

5.4 การตรวจสอบผลลัพธ์

วิธีการหาอัตราการระเหยที่ใช้ในปัจจุบัน ที่ได้เลือกมาเปรียบเทียบกับอัตราการระเหยที่ประเมินจากภาพถ่ายดาวเทียม ได้แก่ การหาอัตราการระเหยโดยวิธี FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) และการหาอัตราการระเหยโดยใช้ค่าวัดการระเหย Class A (Doorenbos & Pruitt, 1977) อัตราการระเหยที่หาจากวิธี FAO Penman-Monteith นั้นเป็นอัตราการระเหยหรือปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (reference crop evapo-transpiration, ETo) ซึ่งมีสมมติฐานว่าเป็นอัตราการระเหยจากหญ้าที่ปกคลุมดินสม่ำเสมอและมีน้ำไม่จำกัด และอัตราการระเหยที่หาจากค่าวัดการระเหยได้ใช้ค่าปรับแก้มาเป็นปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง เช่นเดียวกัน

การเปรียบเทียบอัตราการระเหยจากภาพถ่ายดาวเทียมกับวิธีที่ใช้โดยทั่วไปจึงไม่สามารถกระทำได้โดยตรง เนื่องจาก อัตราการระเหยที่หาจากภาพถ่ายดาวเทียมเป็นอัตราการระเหยหรือปริมาณการใช้น้ำที่แท้จริงของพืช (actual evapotranspiration, ETa) ซึ่งมีปัจจัยเรื่องชนิดของพืชและปริมาณความชื้นในดินมาเกี่ยวข้องด้วย อีกประการหนึ่ง ผลการประเมินอัตราการระเหยจากภาพถ่ายดาวเทียมเป็นการประเมินทั้งพื้นที่ซึ่งแต่ละจุดภาพจะให้ผลลัพธ์ต่างกันไป ส่วนวิธีที่นำมาเปรียบเทียบนั้น เป็นการหาอัตราการระเหยเฉพาะจุดที่ทำการตรวจวัดข้อมูล ซึ่งในกรณีนี้ เป็นตำแหน่งที่ตั้งของสถานีตรวจวัดข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา

ในการเปรียบเทียบจึงเลือกใช้ผลลัพธ์เฉลี่ยของวิธี FAO Penman-Monteith และค่าวัดการระเหยที่ประเมินมาจากข้อมูลของสถานีตรวจวัดในพื้นที่ศึกษา นำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์เฉลี่ยจากภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่ในเขตชลประทาน ทั้งนี้ เพื่อนำมาพิจารณาแนวโน้มและความเป็นไปได้ของผลจากภาพถ่ายดาวเทียม

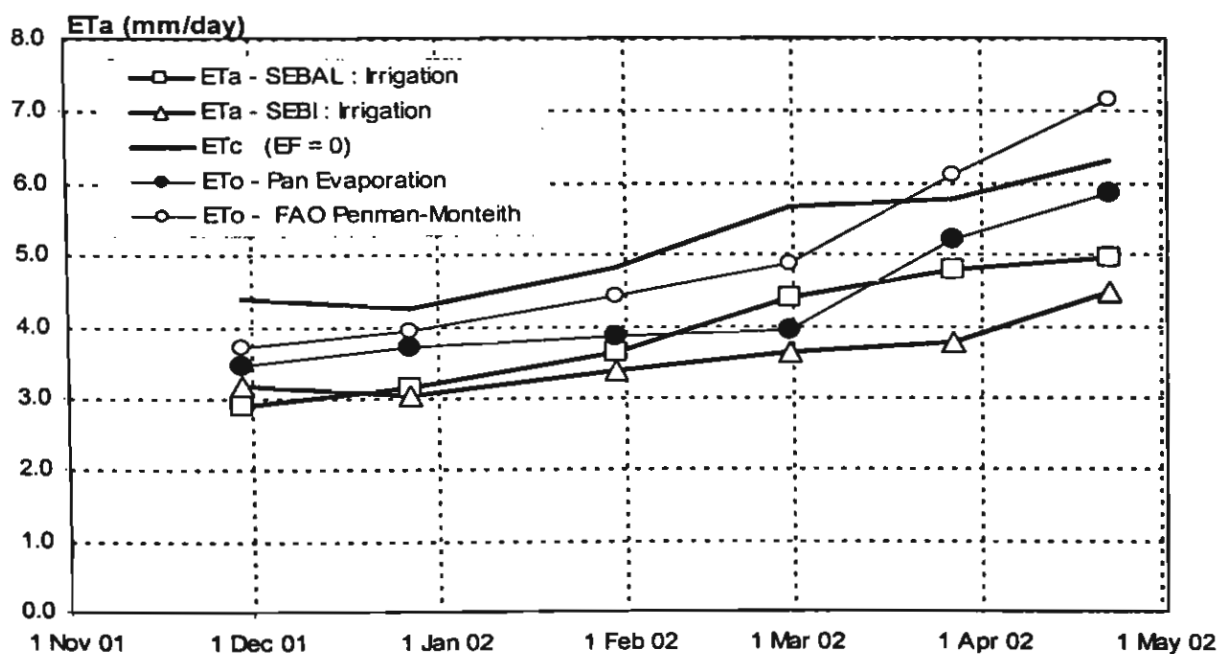
ผลการเปรียบเทียบสรุปไว้ในตารางที่ 5-7 และภาพที่ 5-24 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงระหว่างวิธี FAO Penman-Monteith และ ค่าวัดการระเหยที่ปรับค่าแล้ว พบว่า ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ETo) จากวิธี FAO Penman-Monteith มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากค่าวัดการระเหย และมีค่าต่างกันเพิ่มมากขึ้นในช่วงฤดูแล้ง ถึงกระนั้น ทั้งสองวิธีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปลายฤดูฝนจนถึงฤดูแล้งคล้ายคลึงกัน

ปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของพืช (ETc) ที่ประเมินจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยกำหนดให้ค่าสัดส่วนการระเหย เท่ากับ 1 (เส้นทึบเข้มในภาพที่ 5-24) เป็นข้อมูลอีกอันหนึ่งที่นำมาใช้เปรียบเทียบกับปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ETo) ซึ่งค่า ETc นี้ได้ลดปัจจัยความแตกต่างเรื่องปริมาณความชื้นในดิน แต่ยังคงมีความแตกต่างเรื่องชนิดของพืช ค่า ETc จากภาพถ่ายดาวเทียมมีค่าใกล้เคียงกับค่า ETo จากวิธี FAO Penman-Monteith มากที่สุด โดยมีค่าสูงกว่าในช่วง 4 เดือนแรก (ระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์) และต่ำกว่าในช่วง 2 เดือนหลัง และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่าวิธีการหาการใช้น้ำของพืชจากภาพถ่ายดาวเทียมนั้นให้ผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงพอสมควรกับผลลัพธ์จากวิธีที่ได้รับความนิยมเชื่อถืออย่างวิธี FAO Penman-Monteith

ส่วนปริมาณการใช้น้ำที่แท้จริง (ETA) ทั้งที่หาจากวิธี SEBAL และ วิธี S-SEBI มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากค่าน้อยในช่วงปลายฤดูฝนจนไปหาค่ามากในฤดูแล้งคล้ายคลึงกับวิธีอื่น ๆ แต่มีค่าต่ำกว่า ซึ่งเป็นแนวโน้มที่สมเหตุผล เนื่องจาก อัตราการระเหยส่วนนี้เป็นผลลัพธ์จากพื้นที่ในเขตชลประทาน ซึ่งในฤดูแล้งยังคงมีการส่งน้ำทำให้ยังคงมีน้ำสำหรับการระเหย แต่ให้ค่าต่ำกว่าเนื่องจากยังคงมีปริมาณน้ำที่จำกัดและการกระจายไม่ทั่วถึง อนึ่ง จากกราฟในภาพที่ 5-24 จะสังเกตได้ว่าวิธี SEBAL น่าจะให้ค่าอัตราการระเหยที่สูงเกินไปในเดือนกุมภาพันธ์และเดือนมีนาคม ส่วนวิธี SEBI น่าจะให้ค่าต่ำเกินไปในเดือนมีนาคม

ตารางที่ 5-7 อัตราการระเหยจากวิธีต่าง ๆ เป็นมิลลิเมตรต่อวัน

DATE	ETa	ETa	ETc	ETo	ETo
	SEBAL	SEBI	EF = 0	Pan	Penman-
				Evaporation	Monteith
29 Nov 01	2.87	3.18	4.39	3.45	3.71
27 Dec 01	3.12	3.03	4.23	3.70	3.94
30 Jan 02	3.62	3.36	4.80	3.84	4.42
28 Feb 02	4.39	3.62	5.66	3.93	4.87
27 Mar 02	4.78	3.75	5.76	5.21	6.12
22 Apr 02	4.94	4.48	6.32	5.84	7.14



ภาพที่ 5-24 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการระเหยจากวิธีต่าง ๆ

6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาการใช้เทคนิคสำรวจระยะไกลสำหรับการประเมินการใช้น้ำของพืชในพื้นที่โครงการชลประทานขนาดใหญ่ โดยได้เลือกใช้หลักสมมูลของพลังงานที่พื้นผิว สำหรับการประเมินอัตราการระเหย พร้อมกันนี้ ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์กับการใช้น้ำของพืชที่หาจากวิธี FAO Penman-Monteith และถาดวัดการระเหย Class-A

การสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) และอุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) ที่หาจากภาพถ่ายดาวเทียม NOAA/AVHRR เป็นข้อมูลหลักที่ใช้ในการประเมินตัวแปรของสมการสมมูลพลังงาน ซึ่งประกอบด้วย พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (net radiation) พลังงานที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux) และพลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux) จากนั้น ข้อมูลเหล่านี้ได้ถูกใช้สำหรับหาสัดส่วนการระเหย (evaporative fraction) ที่ประเมินจาก 2 แนวทางเปรียบเทียบกัน กล่าวคือ วิธี SEBAL และ วิธี S-SEBI และท้ายสุด อัตราการระเหยเฉลี่ยตลอดวันประเมินได้จากค่าสัดส่วนการระเหยและพลังงานสุทธิตลอดวัน ($R_{n24} - G_{o24}$)

ผลการประเมินอัตราการระเหยโดยหลักสมมูลพลังงานจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในพื้นที่ชลประทานในเขตที่ราบภาคกลาง ระหว่างฤดูแล้งปี 2544-45 พบว่า อัตราการใช้น้ำสูงสุดของพืชในเขตชลประทานมีค่าระหว่าง 4.2 ถึง 6.3 มิลลิเมตรต่อวัน โดยมีแนวโน้มเพิ่มจากต้นฤดูแล้งในเดือนพฤศจิกายน และสูงสุดในเดือนเมษายน ส่วนอัตราการระเหยจริงมีค่าอยู่ระหว่าง 3 ถึง 5 มิลลิเมตรต่อวัน สำหรับพื้นที่ในเขตชลประทาน โดยมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกับอัตราการใช้น้ำสูงสุด สำหรับพื้นที่นอกเขตชลประทาน อัตราการระเหยจริงมีค่าอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 3 มิลลิเมตรต่อวัน ความแตกต่างของอัตราการระเหยนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าสัดส่วนการระเหยของพื้นที่ทั้งสอง โดยพื้นที่ในเขตชลประทานมีค่าสัดส่วนการระเหยเฉลี่ยราว 0.7 ถึง 0.75 ในขณะที่พื้นที่นอกเขตมีค่าเฉลี่ยราว 0.55 เท่านั้น ซึ่งสัดส่วนการระเหยนี้เป็นข้อมูลที่สามารถใช้อธิบายถึงสถานะของความชื้นในพื้นที่ได้ ส่วนผลการเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้น้ำที่หาจากวิธีที่นิยมใช้ พบว่าอัตราการใช้น้ำสูงสุดของพืชหาจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกับวิธี FAO Penman-Monteith

ผลจากงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการประยุกต์การสำรวจระยะไกลสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทาน ซึ่งปริมาณการใช้น้ำของพืชเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นอย่างยิ่ง สำหรับกระบวนการหาการใช้น้ำของพืชจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยหลักสมมูลพลังงานให้ผลในเกณฑ์น่าเชื่อถือได้ โดยวิธี S-SEBI มีความเหมาะสมในทางปฏิบัติมากกว่า เนื่องจากการประเมินไม่ซับซ้อนมากนัก

ส่วนการวิจัยและพัฒนาต่อไป อาจแบ่งได้เป็น 3 แนวทาง กล่าวคือ

- การวิจัยพื้นฐานของการสำรวจระยะไกลทางทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ประเทศไทย จากการดำเนินงานวิจัยชิ้นนี้ พบว่าวิธีการประเมินข้อมูลพื้นผิวด่าง ๆ จากภาพถ่ายดาวเทียม เป็นแนวทางที่พัฒนาจากพื้นที่ในเขตต่าง ๆ ทั่วโลก และส่วนหนึ่งเป็นแนวทางในลักษณะ empirical ถึงแม้ว่า การนำแนวทางเหล่านี้มาใช้ จะได้รับผลลัพธ์ในเกณฑ์ที่พอเชื่อถือได้ และได้มีการตรวจสอบผลเบื้องต้น แต่ยังคงมีความไม่แน่ใจอยู่พอสมควรในเรื่องของความถูกต้องแม่นยำ

การวิจัยพื้นฐานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์จากแนวทางการประเมินข้อมูลพื้นผิวด่าง ๆ กับพื้นที่ในประเทศไทยยังคงจำเป็น ทั้งนี้ เพื่อที่จะได้เป็นแนวทางในการประยุกต์ขั้นต่อ ๆ ไปได้อย่างเชื่อมั่น

ในส่วนของกระบวนการวิธีหาปริมาณการใช้น้ำของพืชตามหลักสมดุลพลังงาน ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องการเลือกพื้นที่อ้างอิงที่แห้ง ซึ่งหาได้ลำบากในเขตชลประทานและในช่วงฤดูฝน สมควรมีการดำเนินการวิจัยเพื่อลดข้อจำกัดในเรื่องนี้ต่อไป

นอกจากนี้ เมฆที่ปกคลุมเหนือพื้นผิว เป็นข้อจำกัดอีกประการหนึ่งสำหรับวิธีการสำรวจระยะไกล และมีปัญหามากในฤดูฝน การวิจัยเพื่อประเมินสมดุลของพลังงานที่พื้นผิวและการระเหยภายใต้สภาพเมฆปกคลุมเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้การประยุกต์ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมเกิดประโยชน์สูงสุดและสามารถทำได้ทุกฤดูกาล

พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux) เป็นตัวแปรในสมการสมดุลพลังงานที่ประเมินได้ยากที่สุด ถึงแม้ว่า งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามที่วิธี SEBAL ได้เสนอไว้ แต่การตรวจสอบวิเคราะห์แนวทางอื่น ๆ รวมถึงการตรวจสอบความแม่นยำของผลลัพธ์ น่าจะเป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการต่อไป เช่นกัน

- การวิจัยประยุกต์สำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทาน

เนื่องจากข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของพืชเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นโดยสามารถนำผลไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ อาทิ

- การประเมินผลของการบริหารจัดการน้ำ
- การประเมินสมดุลของน้ำ/บัญชีน้ำ
- การสร้างแบบจำลองทางอุทกวิทยาสำหรับการประเมินแหล่งน้ำต้นทุน
- การสร้างแบบจำลองพืชสำหรับการคาดการณ์ผลผลิต
- การเชื่อมโยงกับปริมาณความชื้นในดินเพื่อใช้ในการวางแผนจัดส่งน้ำ

ถึงแม้ว่าวิธีสำรวจระยะไกลจะมีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้ แต่ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมมีรูปแบบและปริมาณที่ต่างไปจากข้อมูลแบบดั้งเดิมที่ใช้งาน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยในเรื่องของกระบวนการวิธีที่เหมาะสมและน่าเชื่อถือ สำหรับการนำข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลไปใช้งานและการแปลผลลัพธ์ ต่อไป

— การวิจัยและพัฒนาเป็นเครื่องมือเพื่อนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

ผลงานวิจัยได้แสดงถึงความเป็นไปได้และความน่าเชื่อถือของการหาอัตราการใช้น้ำของพืชจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้หลักสมมูลพลังงาน แต่ด้วยกระบวนการวิธีอันซับซ้อนในการทำงาน นับแต่การจัดเตรียมข้อมูล การประมวลผล และการแปลผลลัพธ์ การนำไปประยุกต์โดยเจ้าหน้าที่ระดับปฏิบัติยังคงเป็นไปได้ยาก

การจะนำวิธีการหาการใช้น้ำของพืชโดยภาพถ่ายดาวเทียมไปใช้สำหรับการปฏิบัติงานประจำวันนั้น สมควรที่จะมีการพัฒนาเครื่องมือเป็นลักษณะของซอฟต์แวร์ในการเตรียมข้อมูลและทำการประมวลผลแบบอัตโนมัติ เพื่อช่วยให้ทำงานได้อย่างสะดวกรวดเร็วและถูกต้อง

บรรณานุกรม

- คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน. 2546. การวางแผนและออกแบบระบบส่งน้ำชลประทาน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 250 น.
- ชูพันธุ์ ชมภูจันทร์. 2547. วิธีการสำรวจระยะไกลสำหรับการประเมินการใช้น้ำในนาข้าว: กรณีศึกษา โครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ไพโรจน์ ตีรณนากุล. 2542. ทฤษฎีพื้นฐานของควอนตัมและสัมพันธภาพ. กรุงเทพฯ: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ. 143 น.
- วิบูลย์ บุญยธโรกุล. 2526. หลักการชลประทาน. นครปฐม: ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน. 274 น.
- ศุทธิณี ดนตรี. 2543. ความรู้พื้นฐานด้านการสำรวจระยะไกล. เอกสารประกอบการสอน. เชียงใหม่: ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สมพร สว่างศ์. 2543. รีโมทเซนซิงเบื้องต้นและกรณีศึกษารีโมทเซนซิง. เชียงใหม่: ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 243 น.
- สุนันท์ ตรีณณินิตย์. 2545. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 476 หน้า.
- อภิชาติ อนุกุลอำไพ, วิบูลย์ บุญยธโรกุล, วราวุธ วุฒินิชย์, โกวิท ท้วมเสงี่ยม และ มนตรี คำชู. 2524. คู่มือการชลประทานระดับไร่นา. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย. 354 น.
- เอกสิทธิ์ ไชยิตสกุลชัย. 2547. เอกสารประกอบการสอนวิชา 209241 อุทกวิทยา 1. นครปฐม: ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน.
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith M. 1998. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements.** FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Anderson, K. 2002. **NOAA AVHRR Data Processing Software. User's Guide.** Finland: VTT Information Technology.
- Bastiaanssen, W.G.M., 1998. **Remote Sensing In Water Resources Management : The State of the Art.** Colombo: International Water Management Institute (IWMI). 118 p.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., & Holtslag, A.A.M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, 212-213: 198-212.

- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., & Makin, I.W. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. **Agricultural Water Management**, 46: 137-155.
- Becker, F. and Li, Z.L. 1990. Toward a Local Split Window Method Over Land Surface. **International Journal of Remote Sensing**. 3: 369 – 393.
- Binnie&Partners (ovesea), Ltd. et al. 1997. **Chao Phraya Basin Water Management Strategy**. Final Report submitted to NESDB, RID and PCD. Bangkok.
- Brutsaert, W. 1982. **Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications**. Dordrecht: D.Reidel Publishing Company. 298 p.
- Chemin, Y. & Ahmad, M. 2000. **Estimating Evaporation Using the Surface Energy Balance Model (SEBAL). A manual for NOAA-AVHRR in Pakistan**. Report No. R-103. Lahore: International Water Management Institute (IWMI).
- Choudhury, B.J., & DiGirolamo, N.E. 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: 164-185.
- D'Souza, G., Belward, A.S. & Malingreau, J., 1993. **Advances in the Use of NOAA-AVHRR Data for Land Application**. Isapra, Italy: Institute of Remote Sensing Application. 479 p.
- Diekkruger, B., Kirkby, M.J. & Schroder, U. (eds.), 1999. **Regionalization in Hydrology**. IAHS Publication No 254. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences (IAHS).
- Doorenbos, J. & Pruitt, W.O., 1977. **Crop Water Requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper No 24. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Dubayah, R., P.M. Rich. 1996. GIS-Based Solar Radiation Modeling. In **GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues**, edited by Goodchild, M.F. et al. (eds.), 129-134. Fort Collins, CO: GIS World Books.
- Eastman, J.E., 1997. **Idrisi for Windows. User's Guide**. Worcester, MA: Clark University.
- Giles D'Souza, Belward, A.S. and Malingreau J.P. 1993. **Advance in the Use of NOAA AVHRR Data for Land Applications**. Dordrecht, the Natherlands. 479 p.
- Goodchild, M.F. et al. (eds.). 1996. **GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues**. Fort Collins, CO: GIS World Books. 486 p.
- Granger, R.J., 1997. Comparison of surface and satellite-derived estimates of evapotranspiration using a feedback algorithm. In **Applications of Remote Sensing**

- in **Hydrology**. Proc. Symp. No 17, NHRI, Saskatoon, edited by Kite, G.W.; Pietroniro, A. & Pultz, T., p. 71-81. Canada: National Hydrology Research Institute (NHRI).
- Jensen, M.E., Burman, R.D. & Allen, R.G., 1990. **Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements**. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 70. New York, NY : American Society of Civil Engineering (ASCE). 332 p.
- Kerenyi, J. and Putsay, M. 2000. Investigation of Land Surface Temperature Algorithms Using NOAA AVHRR Images. **Advances in Space Research**. 26: 1077 – 1080.
- Kerr, Y.H., Lagouarde, J.P. and Imbernon, J. 1992. Accurate Land Surface Temperature Retrieval from AVHRR Data with Use of an Improved Split Window. **Remote Sensing of Environment**. 41: 197 – 209.
- Kite, G.W., & Droogers, P. 2000a. Comparing Estimates of Actual Evapotranspiration from Satellites, Hydrological Models and Field Data: A Case Study from Western Turkey. **Research Report 42**. Colombo: International Water Management Institute (IWMI).
- Kite, G.W., & Droogers, P. 2000b. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. **Journal of Hydrology**, 229: 3-18.
- Kramer, H.J. 1996. **Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors**, 3rd enlarged ed. Berlin: Springer-Verlag. 960 p.
- Kutilek, M & Nielsen, D.R. 1994. **Soil Hydrology**. Cremlingen-Destedt Catena-verlag. 370 p.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., and J.W. Chipman. 2004. **Remote Sensing and Image Interpretation**, 5th ed. New York, NY: John Wiley & Sons. 763 p.
- Menenti, M, and Choudhury, B.J. 1993. Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range. p 561-568. In: **Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Times Scales**. IAHS Publ. no. 212.
- Monteith, J.L. & Unsworth, M.H. 1990. **Principles of Environmental Physics**, 2nd ed. London: Edward Arnold. 291 p.
- Parodi, G.N. 2002. **AVHRR Hydrological Analysis System. Algorithms and Theory**. Enschede, The Netherlands: WRES Division, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Prata, J.C. and Platt, C.M.R. 1991. **Land Surface Temperature Measurement from the AVHRR**. p 433 – 438. In Proceedings of the 5th AVHRR Data Users' Conference, Tromso, Norway.

- Price, J.C. 1984. Land Surface Temperature Measurements from Split-window Channels of the NOAA 7 Advance Very High Resolution Radiometer. **Journal of Geophysics Research**. 89: 7231 – 7237.
- Roerink, G.J., Su, Z, and Menenti, M. 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.
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L. & Verma, S.B. 1983. **Microclimate: the biological environment**, 2nd ed. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Schmugge, T.J., Kustas, W.P., Ritchie, J.C., Jackson, T.J., & Rango, A. 2002. Remote sensing in hydrology. **Advances in Water Resources**, 25: 1367-1385.
- Schultz, G.A. & Engman, E.T. (eds.), 2000. **Remote Sensing in Hydrology and Water Management**. Berlin: Springer. 483 p.
- Shilpakar, R.L. 2003. **Geo-information Procedures for Water Accounting: A Case of The East Rapti River Basin, Nepal**. Master Thesis. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.
- Smith M., 1992. **CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management**. FAO Irrigation and Drainage Paper No 46. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Smith, M. et al. 1992. **Report on the Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 60 p.
- Sobrino, J.A., Li, Z.L., Stoll, M.P. and Becker, F. 1994. Improvements in the Split-Window Technique for Land Surface Temperature Determination. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. 32: 243 – 253.
- Ulivieri, C., Castronovo, M.M., Francioni, R. and Cardillo, A. 1994. A Split Window Algorithm for Estimate Land Surface Temperature from Satellites. **Advances in Space Research**. 14: 59 – 65.

ภาคผนวก

รายละเอียดการคำนวณและผลลัพธ์

การหาอัตราการเหยจากภาพถ่ายดาวเทียม

ก. รายละเอียดการคำนวณ

ก.1 ข้อมูลพื้นผิว (Surface Parameters)

ก.1.1 การสะท้อนของพื้นผิว (Surface Albedo)

การหาค่าการสะท้อน ณ ชั้นนอกของบรรยากาศ (albedo at the top of atmosphere (TOA)) ใช้หลักการถ่วงน้ำหนักค่าการสะท้อนในแต่ละแบนด์ของภาพถ่ายดาวเทียม ดังสมการที่ ก-1

$$\alpha_p = C_1 + C_2 \cdot \alpha_1 + C_3 \cdot \alpha_2 + \dots + C_n \cdot \alpha_{n-1} \quad \text{สมการที่ ก-1}$$

โดยที่

α_p = การสะท้อนของพื้นผิวที่ชั้นบนของบรรยากาศโลก

$C_1 \dots C_n$ = ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weight factor)

$\alpha_1 \dots \alpha_{n-1}$ = ค่าการสะท้อนรังสีในแต่ละแบนด์ (spectral reflectance)

Valiente และคณะ (1995) ได้แนะนำให้ใช้ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนักสำหรับภาพถ่าย AVHRR ของดาวเทียม NOAA ดังนี้

$$\alpha_p = 0.035 + 0.545 \cdot \alpha_1 + 0.320 \cdot \alpha_2 \quad \text{สมการที่ ก-2}$$

โดยที่

α_1 = ค่าการสะท้อนรังสีจากแบนด์ที่ 1

α_2 = ค่าการสะท้อนรังสีจากแบนด์ที่ 2

เนื่องจาก พลังงานรังสีแสงอาทิตย์จะถูกดูดกลืนหรือเกิดการแพร่กระจายระหว่างผ่านชั้นบรรยากาศไปบ้าง นอกจากนี้แล้วรังสีแสงอาทิตย์บางส่วนจะสะท้อนผิวบนของบรรยากาศโลกเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจวัดบนดาวเทียม ดังแสดงในภาพที่ ก-1 ดังนั้น การหาค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) จะต้องปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศ (atmospheric correction) ดังนี้

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_p - \alpha_{\text{path_radiance}}}{\tau_{\text{atm}}^2} \quad \text{สมการที่ ก-3}$$

โดยที่

α_0 = ค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo)

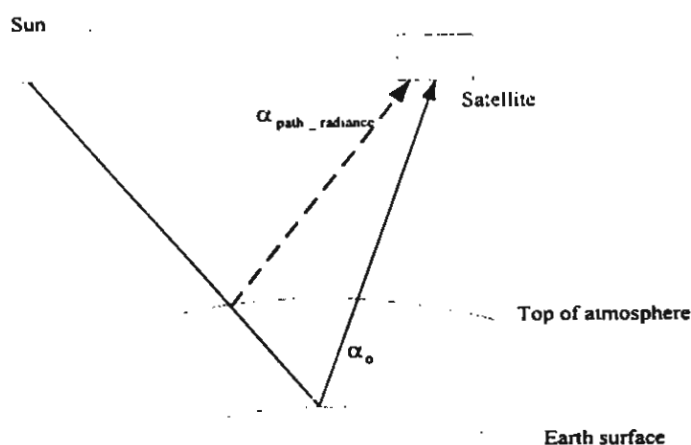
α_p = ค่าการสะท้อนของพื้นผิวที่ระดับวงโคจรของดาวเทียม (planetary albedo)

$\alpha_{\text{path_radiance}}$ = ค่าการสะท้อนของผิวบนของบรรยากาศโลก

τ_{atm} = ค่าการส่งผ่านในหนึ่งทิศทาง

ค่าการสะท้อนผิวบนของบรรยากาศโลก $\alpha_{\text{path_radiance}}$ สามารถประมาณได้จากค่าการสะท้อนของ มหาสมุทรส่วนที่ลึกสุด ซึ่งควรจะเท่ากับ 0 โดยทั่วไป $\alpha_{\text{path_radiance}}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.025 ถึง 0.04 ส่วน ค่าการส่งผ่านยกกำลังสอง τ_{sw}^2 หมายถึงการส่งผ่านใน 2 ทิศทาง กล่าวคือจากดวงอาทิตย์สู่ผิวโลกและ จากผิวโลกสู่ดาวเทียม ค่าการส่งผ่านสามารถประมาณจากค่าระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล z (หน่วย เป็น m) ดังนี้

$$\tau_{\text{sw}} = 0.75 + (2 \times 10^{-5} \times z) \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-4}$$



ภาพที่ ก-1 การตรวจวัดการสะท้อนของพื้นผิว

ก.1.2 ดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index)

การหาค่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) จากภาพถ่าย AVHRR ของดาวเทียม NOAA นั้น สามารถทำได้ดังนี้

$$NDVI = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1} \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-5}$$

โดยที่

α_1 = ค่าการสะท้อนรังสีจากแบนด์ที่ 1 ของ NOAA-AVHRR

α_2 = ค่าการสะท้อนรังสีจากแบนด์ที่ 2 ของ NOAA-AVHRR

ก.1.3 ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิว (Surface Emissivity)

ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิว (surface emissivity, ϵ_0) เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุที่อุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุใด ๆ ต่อพลังงานที่แผ่ออกมาจากเทหวัตถุดำที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งค่าเฉลี่ยการแผ่รังสีของพื้นผิวในช่วงคลื่นระหว่าง 8 ถึง 14 ไมโครเมตร หาจากค่า NDVI ดังนี้

$$\epsilon_0 = 1.0094 - 0.0047 \cdot \ln(NDVI) \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-6}$$

โดยค่า NDVI จะต้องมียค่ามากกว่า 0 ในกรณีที่ค่า NDVI น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิวจะถือว่ามียค่าเป็น 1 (เช่น พื้นผิวน้ำ เป็นต้น) และค่าการแผ่รังสีของพื้นผิวจะมีค่าสูงสุดไม่ต่ำกว่า 0.9

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแผ่รังสีของพื้นผิวจากแบนด์ที่ 4 (ϵ_4) และแบนด์ที่ 5 (ϵ_5) ของภาพ AVHRR จากการศึกษานของ Sobrino และคณะ (1993) พบว่า

$$\epsilon_4 = \epsilon_0 - 0.03 \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-7}$$

$$\epsilon_5 = \epsilon_0 + 0.01 \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-8}$$

ก.1.4 อุณหภูมิพื้นผิว (Surface Temperature)

วิธีการหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวจากภาพถ่าย AVHRR ใช้วิธี Split-window ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถลดผลกระทบเนื่องจากไอน้ำและก๊าซต่าง ๆ รวมทั้งการแผ่รังสีจากชั้นบรรยากาศโลก

วิธี Split-window สามารถเขียนเป็นสมการในรูปแบบทั่วไปได้ ดังนี้ (Giles, 1993)

$$T_s = a_0(T_4)^2 + a_1(T_4) + a_2(T_4 \cdot T_5) + a_3(T_5) + a_4(T_5)^2 + \text{offset} \quad \text{สมการที่ ก-9}$$

โดยที่

T_s = อุณหภูมิพื้นผิว (K)

T_4 = ค่า brightness temperature จากแบนด์ที่ 4 ของ NOAA-AVHRR (K)

T_5 = ค่า brightness temperature จากแบนด์ที่ 5 ของ NOAA-AVHRR (K)

Brightness temperature หมายถึง อุณหภูมิที่เทียบเท่ากับค่าความสว่างของพื้นผิว ส่วนค่า a_0 ถึง a_4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้เนื่องจากไอน้ำในชั้นบรรยากาศ หาได้จากการทดลองโดยวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) หรือได้จากการวิเคราะห์และจำลองปริมาณพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุที่สามารถส่งผ่านไปในชั้นบรรยากาศ ส่วนค่า offset เป็นค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้เนื่องจากการแผ่รังสีจากพื้นผิวในแบนด์ที่ 4 และ 5

โดยวิธี Split-Window นั้นได้มีผู้ที่ทำการศึกษาและพัฒนาสมการขึ้นมาเป็นจำนวนมาก ดังสรุปในตารางที่ ก-1

ก.1.5 อุณหภูมิที่พื้นผิวอ้างอิง (surface temperature for reference elevation)

อุณหภูมิอากาศจะลดลงโดยเฉลี่ย 6.5 °C ทุกระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น 1 กิโลเมตร ในกระบวนการหาค่าการระเหยโดยสมดุลพลังงาน บางครั้ง ต้องใช้อุณหภูมิที่พื้นผิวอ้างอิงหรือที่ระดับเฉลี่ยน้ำทะเล จึงทำการปรับแก้อุณหภูมิตามระดับความสูง z (หน่วยเป็น m) ดังนี้

$$T_0 = T_s + 0.0065 \cdot z \quad \text{สมการที่ ก-10}$$

ตารางที่ ก-1 วิธี Split-window ที่มีการศึกษาพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้งาน

ที่มา	ค่าสัมประสิทธิ์
Price (1984)	$a_0 = 0$
	$a_1 = 4.33 \times \frac{5.5 - \varepsilon_4}{4.5}$
	$a_2 = 0$
	$a_3 = \left(-3.33 \times \frac{5.5 - \varepsilon_4}{4.5} \right) - (0.75 \times \Delta\varepsilon)$
	$a_4 = 0$
	offset = 0
Becker และ Li (1990)	$a_0 = 0$
	$a_1 = 3.63 + \left(2.06808 \times \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) + \left(18.924 \times \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right)$
	$a_2 = 0$
	$a_3 = -2.63 - \left(1.91192 \times \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) - \left(19.406 \times \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2} \right)$
	$a_4 = 0$
	offset = 1.274
Prata และ Pratt (1991)	$a_0 = 0$
	$a_1 = \frac{3.46}{\varepsilon_4}$
	$a_2 = 0$
	$a_3 = \frac{-2.46}{\varepsilon_5}$
	$a_4 = 0$
	offset = $\left(40 \times \frac{1 - \varepsilon_4}{\varepsilon_4} \right) + (273.15 \times a_1 \times a_3)$
Ulivieri และคณะ (1994)	$a_0 = 0$
	$a_1 = 2.8$
	$a_2 = 0$
	$a_3 = -1.8$
	$a_4 = 0$
	offset = $[48.(1 - \varepsilon)] - [75.\Delta\varepsilon]$

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

ที่มา	ค่าสัมประสิทธิ์
Vidal (1991)	$a_0 = 0$
	$a_1 = 3.78$
	$a_2 = 0$
	$a_3 = -2.78$
	$a_4 = 0$
	$\text{offset} = \left(50 \times \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) - \left(300 \times \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \right)$
โดย	
ε	= ค่าเฉลี่ยการแผ่รังสีของพื้นผิว มีค่า = $(\varepsilon_4 + \varepsilon_5)/2$
$\Delta\varepsilon$	= $\varepsilon_4 - \varepsilon_5$
ε_4	= ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิวจากแบนด์ที่ 4 ของดาวเทียม NOAA
ε_5	= ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิวจากแบนด์ที่ 5 ของดาวเทียม NOAA

ก.2 พารามิเตอร์ของสมดุลพลังงาน

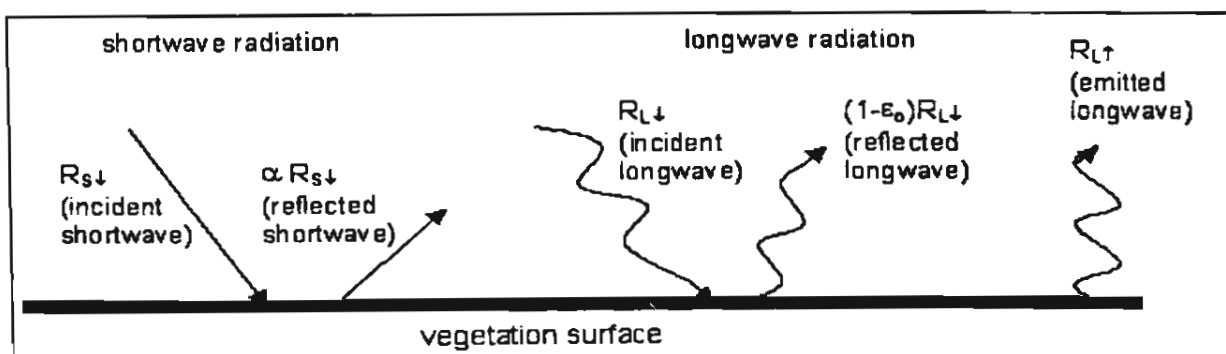
ก.2.1 รังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (Net Radiation)

พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิเป็นผลต่างระหว่างพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวกับพลังงานรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิว สามารถหาได้จากสมการสมดุลรังสีที่พื้นผิวโลก (radiation balance) ดังนี้

$$R_n = (1-\alpha) \cdot R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\varepsilon_0) \cdot R_{L\downarrow} \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-11}$$

โดยที่

- R_n = พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (net radiation) (W/m^2)
- α = ค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo)
- ε_0 = ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิว (surface emissivity)
- $R_{s\downarrow}$ = พลังงานรังสีแสงอาทิตย์คลื่นสั้นที่ตกกระทบพื้นผิว (incoming shortwave radiation) (W/m^2)
- $R_{L\downarrow}$ = พลังงานรังสีแสงอาทิตย์คลื่นยาวที่ตกกระทบพื้นผิว (incoming longwave radiation) (W/m^2)
- $R_{L\uparrow}$ = พลังงานรังสีแสงอาทิตย์คลื่นยาวที่สูญเสียจากพื้นผิว (outgoing longwave radiation) (W/m^2)



ภาพที่ ก-2 สมดุลพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ผิวโลก

(ก) รังสีแสงอาทิตย์คลื่นสั้นที่ตกกระทบพื้นผิว (Incoming Shortwave Radiation)

ค่าพลังงานรังสีแสงอาทิตย์คลื่นสั้นที่ตกกระทบพื้นผิว (incoming shortwave radiation) หาได้ดังนี้

$$R_{sl} = G_{sc} \cdot \cos(\theta) \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-12}$$

โดยที่

G_{sc} = พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบรรยากาศโลกชั้นบนสุด
เป็นค่าคงที่มีค่า 1367 W/m^2

θ = มุมเอียงรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแนวแกนเส้นตรงศีรษะบนท้องฟ้า (radian)

d_r = ส่วนกลับของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ $d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{J \times 2\pi}{365}\right)$
โดย J คือ วันที่นับจากวันที่ 1 มกราคมของปี มีค่าระหว่าง 1 (1 ม.ค.) ถึง 365 หรือ 366 (31 ธ.ค.)

τ_{sw} = ค่าการส่งผ่านในหนึ่งทิศทาง

ค่า cosine ของมุมเอียงรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแนวแกนเส้นตรงศีรษะบนท้องฟ้า (θ) หาได้เป็น 2 กรณี

— กรณีพื้นที่ราบ ค่า cosine ของมุมเอียงรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแนวแกนเส้นตรงศีรษะบนท้องฟ้า ($\cos(\theta)$) คำนวณได้จากสมการที่ ก-13 โดยค่าของมุมทั้งหมดมีหน่วยเป็น radian

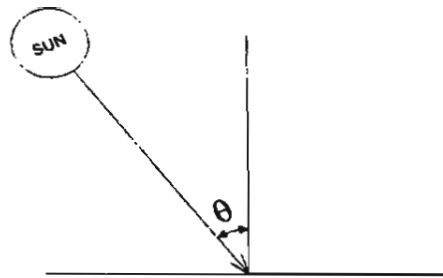
$$\cos\theta = \sin(\delta) \cdot \sin(\phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\omega) \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-13}$$

โดยที่

δ = มุมเบนของดวงอาทิตย์ตามฤดูกาล หาได้จาก $\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39\right)$ โดยค่าจะเป็นบวกในซีกโลกเหนือช่วงฤดูร้อน

ϕ = ตำแหน่งละติจูด มีค่าเป็นบวกสำหรับซีกโลกเหนือ

ω = มุมของดวงอาทิตย์ตามเวลา (sunset hour angle) โดยกำหนดให้ ω เท่ากับ 0 ในเวลาเที่ยงตรง, ω จะมีค่าเป็นบวกในช่วงเช้า และมีค่าเป็นลบในช่วงบ่าย



ภาพที่ ก-3 มุมเอียงรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแนวแกนเส้นตรงศีรษะบนท้องฟ้า

- กรณีพื้นที่มีความลาดชัน ดังภาพที่ ก-4 จะนำค่าความลาดชัน (slope, s) และ ทิศทางของความลาดชัน (aspect, γ) มาพิจารณา ค่า $\cos(\theta)$ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ ก-14

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin(\delta) \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(s) \\ & - \sin(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(s) \cdot \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(s) \cdot \cos(\omega) \quad \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-14} \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(s) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(s) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\omega) \end{aligned}$$

โดยที่

s = ความลาดชันของพื้นที่ (slope) โดยค่า s เท่ากับ 0 กรณีที่เป็นที่ราบ และ $s = \pi/2$ กรณีพื้นที่อยู่ในแนวตั้ง (s จะมีค่าเป็นบวกเสมอ)

γ = ทิศทางความลาดชัน (aspect) โดย γ กำหนดให้เท่ากับ 0 กรณีพื้นที่ลาดเอียงไปในทิศใต้, γ จะมีค่าเป็นบวกถ้าทิศทางความลาดชันไปทางทิศตะวันตก และเป็นลบในทิศตะวันออก ส่วนทิศเหนืออาจเป็นได้ทั้ง π และ $-\pi$



ภาพที่ ก-4 มุมเอียงรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแนวแกนเส้นตรงศีรษะบนท้องฟ้า
กรณีที่พื้นที่มีความลาดชัน

(ข) รังสีช่วงคลื่นยาวที่ตกกระทบพื้นผิว (Incoming Longwave Radiation)

ค่ารังสีช่วงคลื่นยาวที่ตกกระทบพื้นผิว (incoming longwave radiation) หาได้ดังนี้

$$R_{L\downarrow} = 1.08 \cdot (-\ln(\tau_{sw}))^{0.265} \cdot \sigma \cdot T_{0ref}^4 \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-15}$$

โดยที่

τ_{sw} = ค่าการส่งผ่านในหนึ่งทิศทาง

σ = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann เท่ากับ $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

T_{0ref} = อุณหภูมิพื้นผิว ณ จุดอ้างอิง (K)

อุณหภูมิพื้นผิว ณ จุดอ้างอิง คือ อุณหภูมิพื้นผิวของจุดภาพ ณ ตำแหน่งที่คาดว่าจะมีพืชไม่มีการขาดน้ำ (well-irrigated pixel) ขณะบันทึกภาพ ซึ่งถือว่าเป็นตำแหน่งที่อุณหภูมิอากาศ และอุณหภูมิพื้นผิว เท่ากัน

(ค) รังสีช่วงคลื่นยาวที่สูญเสียจากพื้นผิว (Outgoing Longwave Radiation)

ค่ารังสีช่วงคลื่นยาวที่สูญเสียจากพื้นผิว (outgoing longwave radiation) หาได้ดังนี้

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_o \cdot \sigma \cdot T_o^4 \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-16}$$

โดยที่

ϵ_o = ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิว (surface emissivity)

T_o = อุณหภูมิพื้นผิว (K)

ก.2.2 ความร้อนที่ถ่ายเทสู่ในดิน (Soil Heat Flux)

การถ่ายเทความร้อนในดินนั้นไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงจากภาพถ่ายดาวเทียม ทั้งนี้เนื่องจากไม่ทราบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดินและอุณหภูมิของดินที่อยู่ลึกลงไป ดังนั้น จึงใช้การประมาณอัตราส่วนระหว่างความร้อนในดินและรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ ดังสมการที่ ก-17

$$\Gamma = \frac{G_o}{R_n} = \Gamma' \cdot \Gamma'' \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-17}$$

โดยที่

Γ = อัตราส่วนระหว่างความร้อนในดินและรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ

G_o = ความร้อนในดิน

R_n = รังสีแสงอาทิตย์สุทธิ

Γ' = ค่า proportion factor

Γ'' = ค่า extinction factor

— ค่า proportion factor คำนวณตามสมการดังนี้

$$\Gamma' = \frac{T_o}{r_o} \times (0.0032 \cdot r_o + 0.0062 \cdot (r_o)^2) \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-18}$$

โดย

T_o = อุณหภูมิพื้นผิว (K)

r_o = ค่าเฉลี่ยการสะท้อนแสงที่พื้นผิวเฉลี่ยรายวัน (daily average) มีค่าเท่ากับ $1.1 \times \alpha_o$ ซึ่ง α_o เป็นค่าการสะท้อนแสงที่พื้นผิวขณะถ่ายภาพ (instantaneous value)

— ค่า extinction factor คำนวณจากดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ตามสมการดังนี้

$$\Gamma'' = 1 - (0.978 \times \text{NDVI})^4 \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-19}$$

จากสมการที่ ก-17 สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$G_o = R_n \times \Gamma = R_n \times \Gamma' \times \Gamma'' \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-20}$$

จากสมการที่ ก-18 และสมการที่ ก-19 สามารถคำนวณค่าความร้อนในดินได้ ดังสมการที่ ก-21

$$G_o = R_n \times \frac{T_o}{r_o} \times (0.0032 \cdot r_o + 0.0062 \cdot (r_o)^2) \times (1 - 0.978 \cdot \text{NDVI}^4) \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-21}$$

ก.2.3 ความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux)

ความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศหรือความร้อนที่รู้สึกได้ มาจากสมการการพาความร้อนของอากาศ โดยมีสมการดังนี้

$$H = \frac{\rho_{\text{air}} \times C_{p_{\text{air}}} \times dT}{r_{\text{ah}}} \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-22}$$

โดยที่

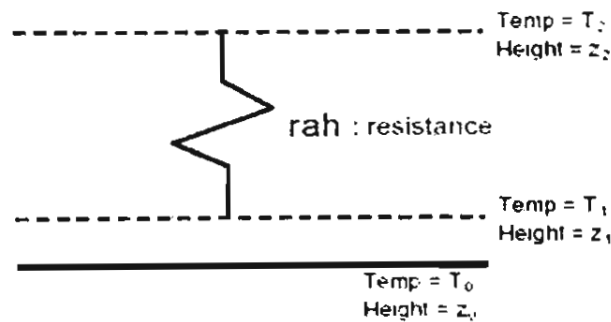
H = ความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ (sensible heat flux)

ρ_{air} = ความหนาแน่นของอากาศ (air density) มาจาก $\rho_{\text{air}} = \frac{1000 \times P}{1.01 \times T_a \times 287}$ โดย T_a คือ อุณหภูมิอากาศ (K) มาจาก $T_a - dT$ และ P คือ ความดันบรรยากาศ ที่เปลี่ยนแปลงตามระดับความสูงจากน้ำทะเลปานกลาง z ตามสมการ $101.3 \times \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26}$

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

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

dT = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิอากาศ ($T_s - T_a$)



ภาพที่ ก-5 ค่าความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน (r_{ah})

จากสมการที่ ก-23 ตัวแปรไม่ทราบค่า ได้แก่ ความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน (r_{ah}) ซึ่งเทอมนี้จำเป็นต้องใช้ค่า H ทางด้านซ้ายของสมการมาคำนวณ ทำให้ไม่สามารถแก้สมการได้โดยตรง กระบวนวิธี SEBAL ได้เสนอขั้นตอนการคำนวณไว้ดังนี้

(ก) การสมมติค่าความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน (r_{ah})

การสมมติค่าความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน (r_{ah}) ดังในภาพที่ ก-5 ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ ก-23

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* \times k} \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-23}$$

โดย

z = ระดับความสูง z_1 และ z_2 เหนือพื้นผิว ($z_1 = 0.1 \text{ m}; z_2 = 2 \text{ m}$)

k = ค่าคงที่ของ von Karman (มีค่า = 0.41)

u_* = ค่า friction velocity

- การหาค่า friction velocity (u_*) ณ สถานีตรวจอากาศ ตามวิธี SEBAL ต้องการข้อมูลความเร็วลมที่ตรวจวัดได้จริง ซึ่งหาได้จาก $u_* = \frac{u_x \times k}{\ln(z_x/z_{om})}$

โดย u_x เป็นความเร็วลมที่ตรวจวัดได้จริงจากสถานีตรวจอากาศ (m/s), z_x เป็นระดับความสูงของอุปกรณ์ที่ตรวจวัดความเร็วลม (m) และ z_{om} เป็นค่าความขรุขระของพื้นผิว (surface roughness) มีค่าประมาณ 0.123 เท่าของความสูงเฉลี่ยของพืชพรรณรอบบริเวณสถานีตรวจวัดอากาศ $0.123 \times (H)$ (หน่วยเป็น m)

- ค่าความเร็วลมที่ระดับความสูง 200 เมตร (u_{200m}) ถือได้ว่าความเร็วลมที่ระดับความสูงนี้ไม่มีผลกระทบจากความขรุขระของพื้นผิว (surface roughness) ดังนั้น จึงมีค่าเท่ากันตลอดทั้งพื้นที่ ซึ่งคำนวณได้จาก $u_{200m} = \frac{u_* \times \ln(200/z_{om})}{k}$

- การหาค่า friction velocity ที่ pixel ต่าง ๆ ($u_*(x,y)$) ซึ่งหาได้จาก $u_* = \frac{u_{200m} \times k}{\ln(200, Z_{um})}$

โดยใช้ u_{200m} จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ และ ส่วน z_{om} หาจาก $z_{om} = \exp(a \times NDVI - b)$ (หน่วยเป็น m) โดย a มีค่าใกล้เคียง 1 ในพื้นที่ราบ และ 5.5 ในพื้นที่ภูเขา ส่วน b มีค่าประมาณ 3.3

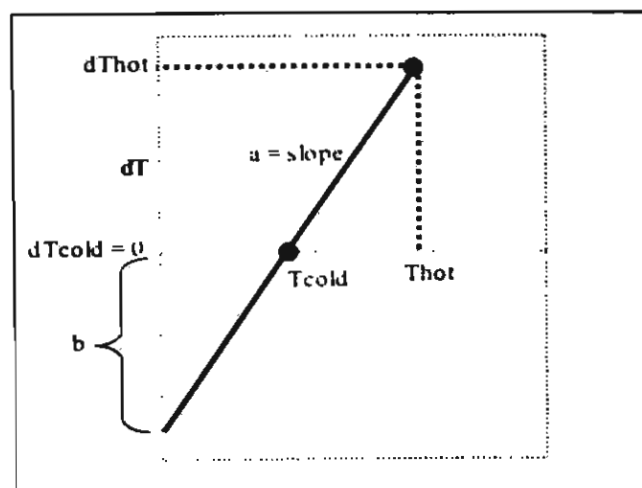
(ข) การหาพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ

การหาพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่อากาศ ต้องทำการกำหนดพื้นที่อ้างอิงสองลักษณะ ได้แก่ บริเวณที่ชุ่มชื้น และบริเวณที่แห้ง

- บริเวณที่ชุ่มชื้น (wet pixel) ถือว่าเป็นพื้นที่ซึ่งพลังงานที่ได้รับทั้งหมดถูกใช้ในการระเหยน้ำ $\lambda E = (R_n - G)$ หรือ $H = 0$
- บริเวณที่แห้ง (dry pixel) ถือว่าเป็นพื้นที่ซึ่งไม่มีการระเหยของน้ำ ($\lambda E = 0$) พลังงานที่ได้รับทั้งหมดถูกถ่ายเทสู่อากาศเป็นความร้อนที่รู้สึกได้ ($H = (R_n - G)$)

การเลือกบริเวณที่ชุ่มชื้น และบริเวณที่แห้ง ใช้ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวที่มีการปรับแก้ระดับความสูงมาที่ระดับอ้างอิง โดยเลือกบริเวณที่มีบริเวณอุณหภูมิต่ำสุด (T_{cold}) สำหรับที่ชุ่มชื้น (wet pixel) และอุณหภูมิสูงสุด (T_{hot}) สำหรับบริเวณที่แห้ง (dry pixel)

- จากข้อมูล $(R_n - G)$ ที่ตำแหน่ง T_{hot} สามารถประมาณค่า $H = (R_n - G)$ สำหรับ dry pixel ได้
- ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิอากาศ dT ที่ dry pixel หาได้จาก
$$dT = \frac{H \times r_{ah}}{\rho_{air} \times Cp_{air}}$$
- การหาค่า dT สำหรับ pixel อื่น ๆ กระทำโดยตั้งสมมติฐานว่าค่า dT มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่า T_0 ดังแสดงในภาพที่ ก-6 ดังนั้น เมื่อทราบ เมื่อทราบ T_0 ก็สามารถหา dT ได้จากสมการ $dT = aT_0 + b$ โดยสัมประสิทธิ์ของสมการหาจากข้อมูล T_{cold} , T_{hot} , และ dT ที่ dry pixel
- เมื่อทราบ dT ของทุก pixel ก็สามารถคำนวณหา H ได้จาก $H = \frac{\rho_{air} \times Cp_{air} \times dT}{r_{ah}}$



ภาพที่ ก-6 การหาค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิอากาศ

(ค) การปรับแก้ค่าความต้านทานของอากาศในการพาความร้อน (r_{ah})

ค่า H เริ่มต้นที่คำนวณได้จาก r_{ah} สมมติขั้นนั้นยังไม่ใช้ค่าที่ถูกต้อง ในการคำนวณจะต้องคำนวณซ้ำโดยทำการปรับแก้ค่า r_{ah} ใหม่ แล้วจึงย้อนกลับไปหา H ตามขั้นตอนก่อนหน้านี้ซ้ำประมาณ 5 รอบจึงจะได้ ค่า H ที่ถูกต้อง

ค่าปรับแก้ (stability correction factor, $\Psi_{h(z)}$) จะถูกเพิ่มเข้ามาในสมการ r_{ah} ดังสมการที่ ก-24

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}}{u_* \times k} \quad \text{สมการที่ ก-24}$$

ในการคำนวณวิธี SEBAL ถือว่าค่า $\Psi_{h(z_1)}$ จะมีค่าน้อยมาก สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_{h(z_2)}}{u_* \times k} \quad \text{สมการที่ ก-25}$$

ค่า friction velocity (u_*) หาจาก $u_* = \frac{u_{200m} \times k}{\ln(200 \cdot z_{om}) - \Psi_{h(200m)}}$

การหาค่าปรับแก้ (stability correction factor, $\Psi_{h(z)}$) นั้นจะขึ้นกับค่า Monin-Obukov length (L) ซึ่งหาจาก $L = -\frac{\rho_{air} \times Cp_{air} \times u_*^3 \times T_0}{k \times g \times H}$ ถ้า L มีค่าเป็นลบถือว่าเป็นสภาพไม่เสถียร (unstable condition) ถ้าเป็นบวกถือว่าเป็นสภาพเสถียร (stable condition) ซึ่งสามารถเลือกคำนวณค่าปรับแก้ได้จากตารางที่ ก-2

ตารางที่ ก-2 สมการสำหรับการคำนวณค่าปรับแก้ (stability correction factor, $\Psi_{h(z)}$)

$L \leq 0$ (unstable condition)	$L > 0$ (stable condition)
$\Psi_{h(z_2)} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + x_{(z_2)}^2}{2}\right)$	$\Psi_{h(z_2)} = -5 \cdot \left(\frac{z_2}{L}\right)$
$\Psi_{h(200m)} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + x_{(200m)}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + x_{(200m)}^2}{2}\right) - 2 \cdot \arctan(x_{(200m)}) + 0.5 \cdot \pi$	$\Psi_{h(200m)} = -5 \cdot \left(\frac{z_2}{L}\right)$

โดย x หาจาก $x_{(height)} = \left(1 - 16 \cdot \frac{(height)}{L}\right)^{0.25}$ และ height เท่ากับระดับความสูง z_2 หรือ 200 เมตร

ก.3 อัตราการใช้ น้ำของพืชเฉลี่ยตลอดวัน (24-h evapotranspiration)

การคำนวณค่าการใช้ น้ำของพืชในรอบ 24 ชั่วโมง คำนวณจากสมการที่ ก-26 ดังนี้

$$ET_{24} = \frac{86,400 \times EF \times (R_{n24} - G_{24})}{\lambda} \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-26}$$

โดยที่

- ET_{24} = การใช้ น้ำของพืชที่แท้จริงในรอบ 24 ชั่วโมง (mm/day)
 EF = ค่าสัดส่วนการระเหย (evaporative fraction)
 R_{n24} = รังสีแสงอาทิตย์สุทธิในรอบ 24 ชั่วโมง (W/m^2)
 G_{24} = ความร้อนในดินสุทธิในรอบ 24 ชั่วโมง (W/m^2) (กรณีคิดเป็นรายวันมีค่าประมาณ 0)
 λ = ความร้อนแฝงของการระเหย (J/Kg) หาจาก $\lambda = [2.501 - 0.00236(T_o)] \times 10^6$ โดย T_o คือ อุณหภูมิพื้นผิวที่ปรับแก้ตามระดับความสูง (K)

— รังสีแสงอาทิตย์สุทธิในรอบ 24 ชั่วโมง (R_{n24}) คำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

$$R_{n24} = [(1 - \alpha_o) \times (R_{a24} \times \tau_{sw})] - 110\tau_{sw} \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-27}$$

โดยที่

- α_o = ค่าการสะท้อนแสงที่พื้นผิว
 R_{a24} = รังสีแสงอาทิตย์ที่นอกบรรยากาศโลกในรอบ 24 ชั่วโมง
 τ_{sw} = ค่าการส่งผ่านในหนึ่งทิศทาง

— รังสีแสงอาทิตย์ที่นอกบรรยากาศโลกในรอบ 24 ชั่วโมง (R_{a24}) คำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$R_{a24} = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \dots\dots\dots \text{สมการที่ ก-28}$$

โดยที่

- G_{sc} = พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบรรยากาศโลกชั้นบนสุด (เป็นค่าคงที่มีค่า $0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
 d_r = ส่วนกลับของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (inverse relative distance Earth-Sun, d_r) หาจาก $d_r = 1 + 0.33 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right)$ โดย J คือ วันที่นับจากวันที่ 1 มกราคมของปี มีค่าระหว่าง 1 (1 ม.ค.) ถึง 365 (31 ธ.ค.)
 φ = ละติจูด, หน่วย radian
 δ = มุมเบนของดวงอาทิตย์ตามฤดูกาล (solar declination) หาจาก $\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1.39\right)$ หน่วยเป็น radian
 ω_s = มุมของดวงอาทิตย์ตามเวลา (sunset hour angle) หาจาก $\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)]$ หน่วยเป็น radian

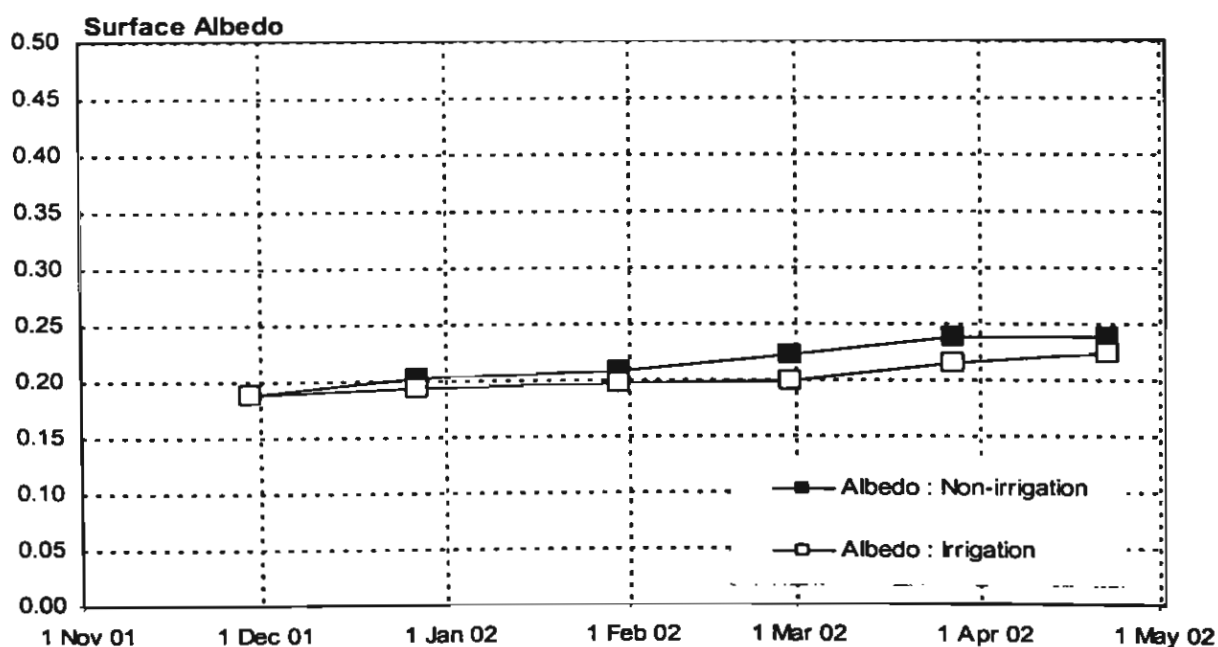
ข. ผลการคำนวณ

ข.1 พารามิเตอร์พื้นผิว (Surface Parameters)

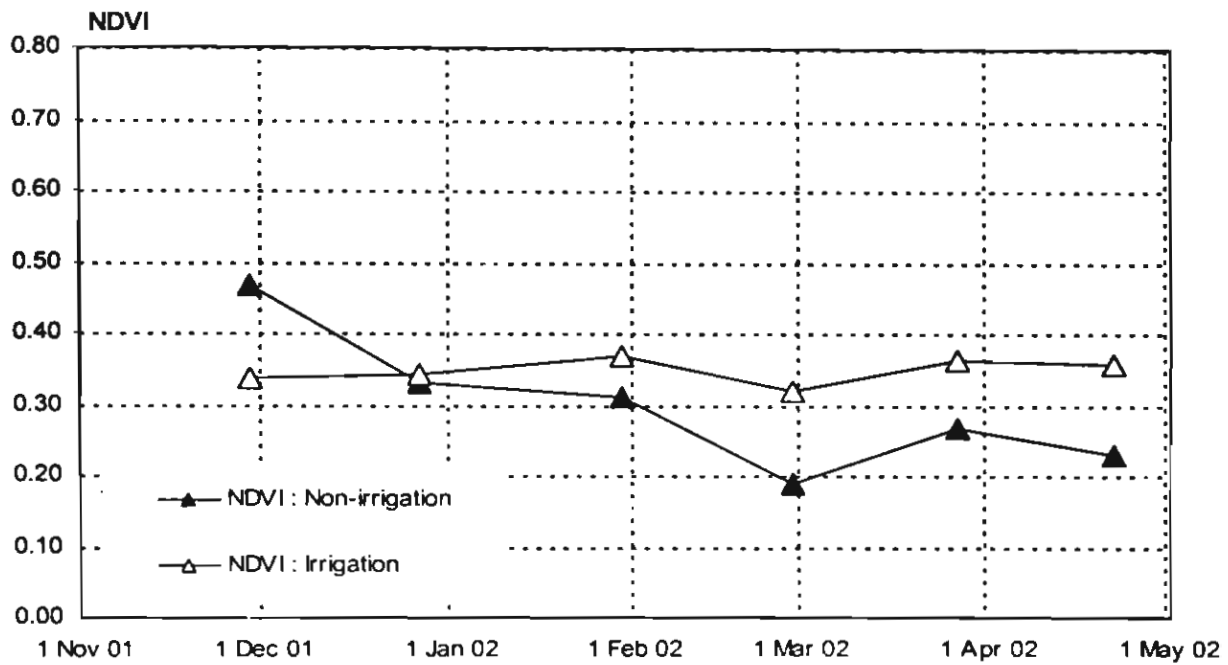
พารามิเตอร์ของพื้นผิวที่จำเป็นสำหรับการนำไปประเมินพารามิเตอร์อื่น ๆ ต่อไป ประกอบไปด้วย ค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) ดัชนีพืชพรรณ (vegetation index) และอุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature)

ตารางที่ ข-1 ค่าพารามิเตอร์พื้นผิว (surface parameters)
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

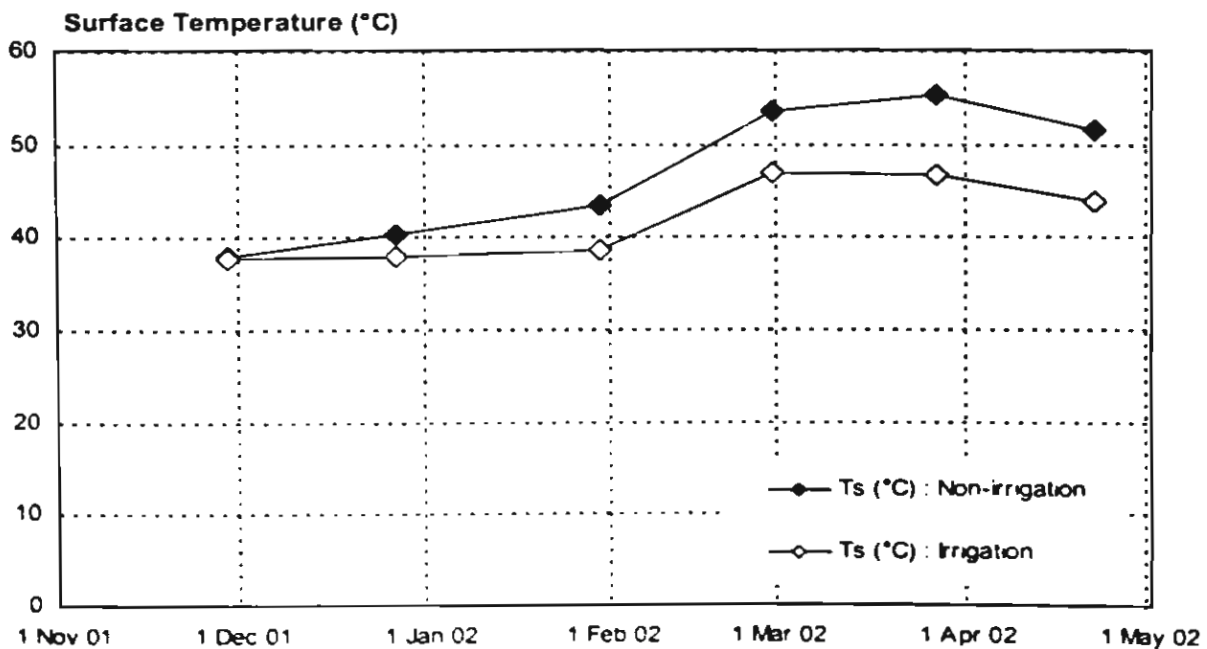
DATE	Albedo		NDVI		Ts (°C)	
	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation
29 Nov 01	0.19	0.19	0.47	0.34	37.87	37.62
27 Dec 01	0.20	0.19	0.33	0.34	40.30	37.92
30 Jan 02	0.21	0.20	0.31	0.37	43.37	38.49
28 Feb 02	0.22	0.20	0.19	0.32	53.36	46.93
27 Mar 02	0.24	0.21	0.27	0.36	55.18	46.57
22 Apr 02	0.24	0.22	0.23	0.36	51.49	43.76



ภาพที่ ข-1 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของค่าการสะท้อนของพื้นผิว
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (Irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-Irrigation)



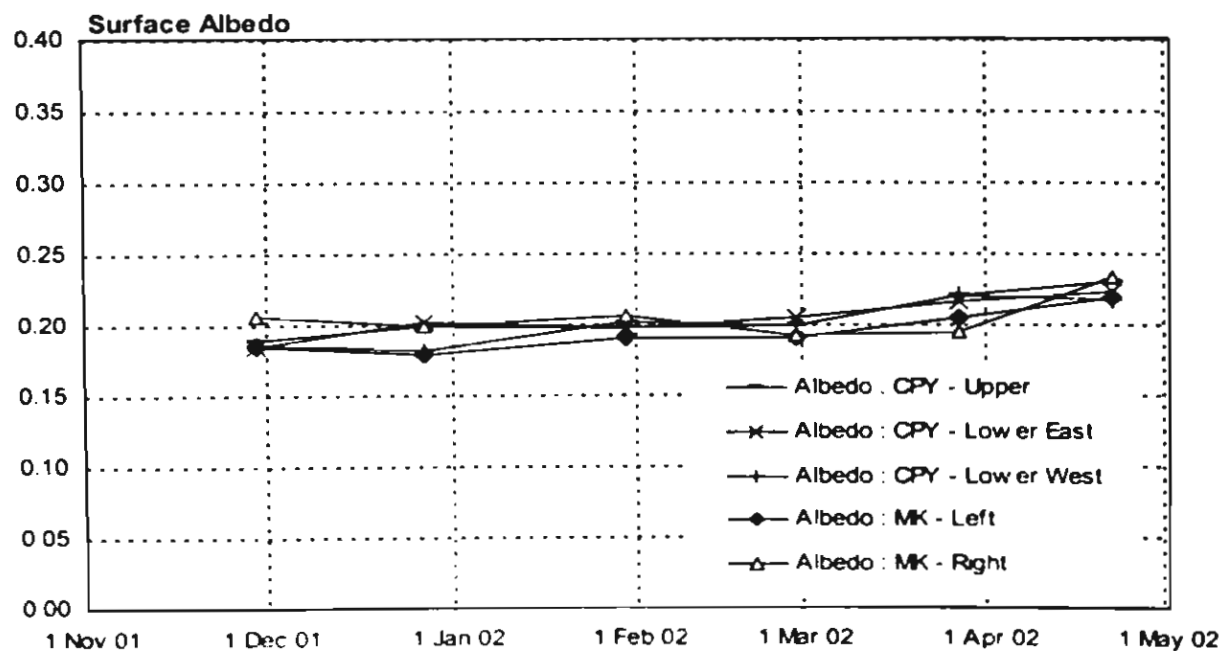
ภาพที่ ข-2 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีพืชพรรณ (NDVI)
 จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)



ภาพที่ ข-3 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิว
 จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

ตารางที่ ข-2 ค่าการสะท้อนของพื้นผิว (surface albedo) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

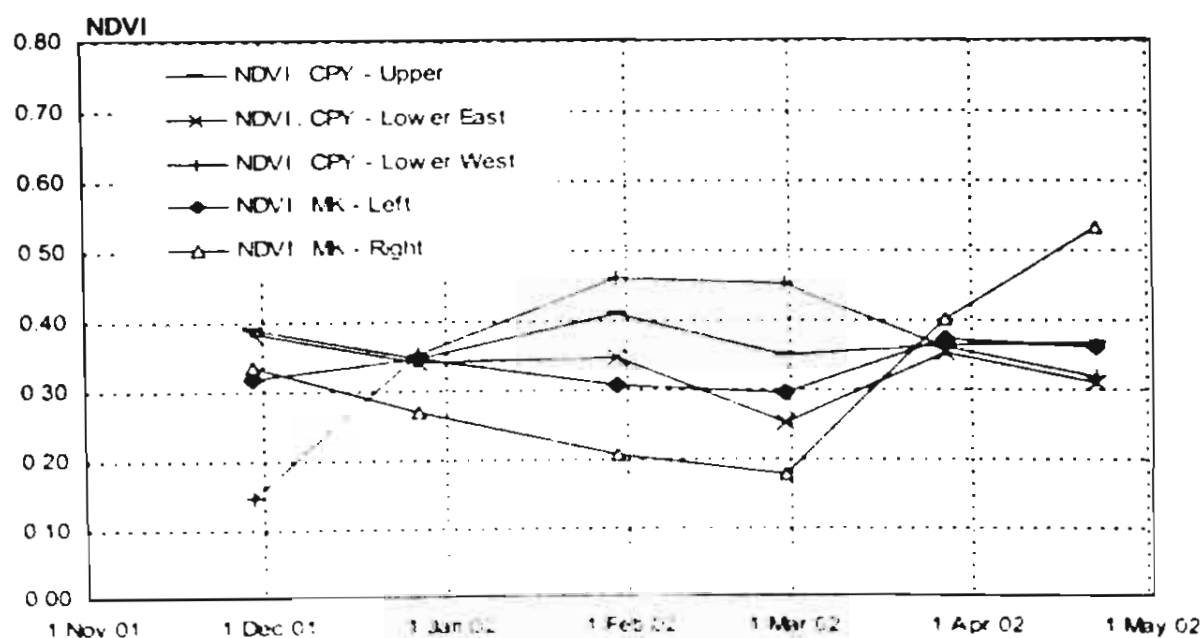
DATE	Surface Albedo				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	0.19	0.18	0.19	0.18	0.21
27 Dec 01	0.20	0.20	0.18	0.18	0.20
30 Jan 02	0.20	0.20	0.20	0.19	0.21
28 Feb 02	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19
27 Mar 02	0.22	0.22	0.22	0.20	0.19
22 Apr 02	0.23	0.22	0.22	0.22	0.23



ภาพที่ ข-4 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของค่าการสะท้อนของพื้นผิว
แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

ตารางที่ ข-3 ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

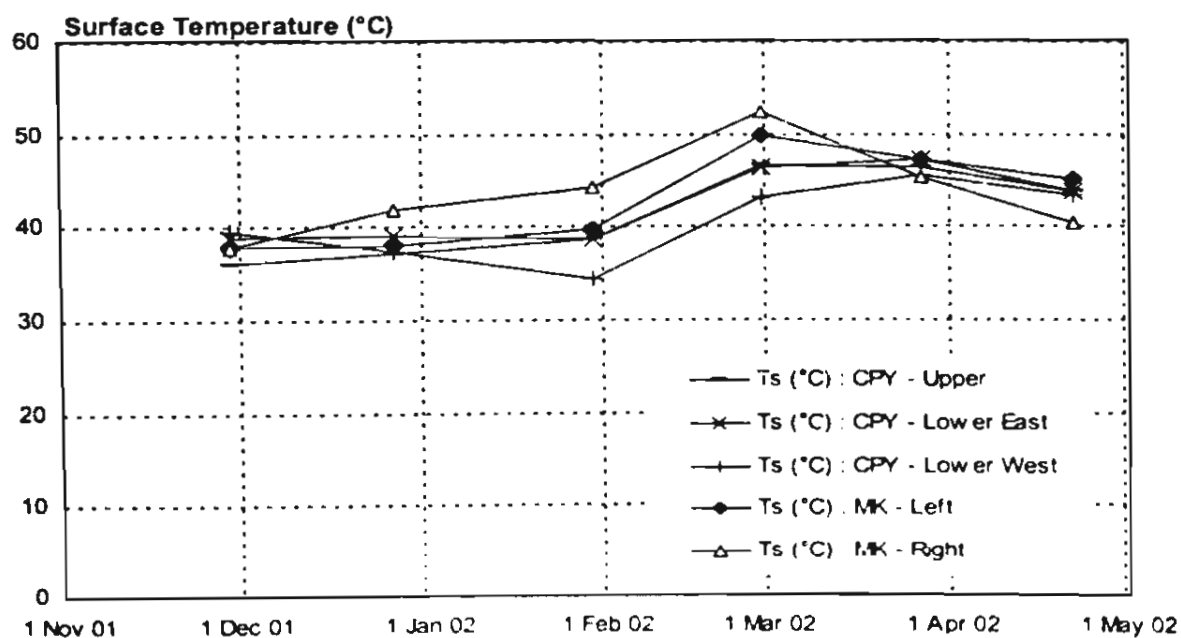
DATE	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	0.39	0.38	0.14	0.32	0.33
27 Dec 01	0.35	0.34	0.35	0.35	0.27
30 Jan 02	0.41	0.35	0.46	0.31	0.21
28 Feb 02	0.35	0.25	0.45	0.29	0.18
27 Mar 02	0.36	0.35	0.36	0.37	0.40
22 Apr 02	0.36	0.31	0.32	0.36	0.53



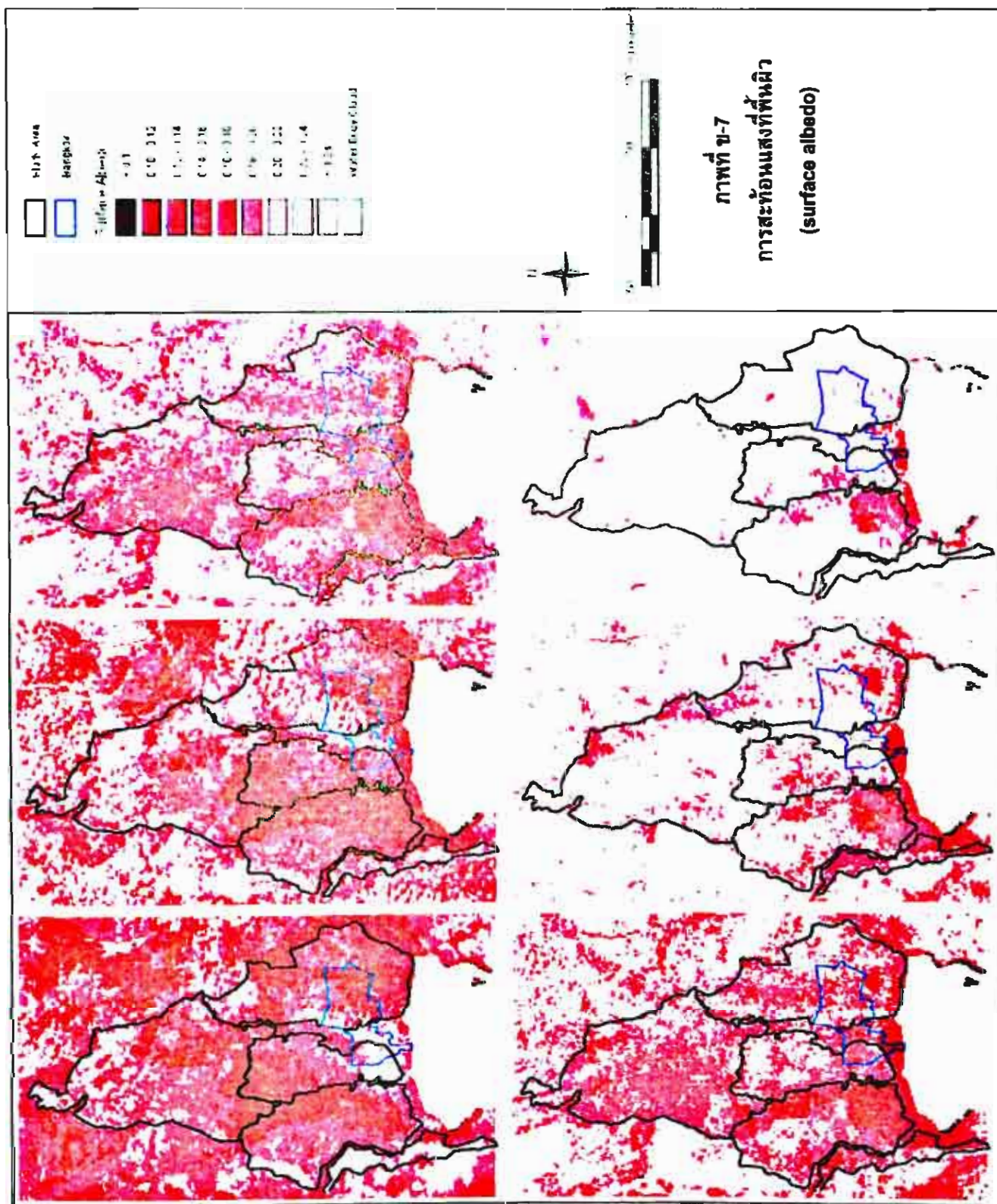
ภาพที่ ข-5 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีพืชพรรณ (NDVI) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

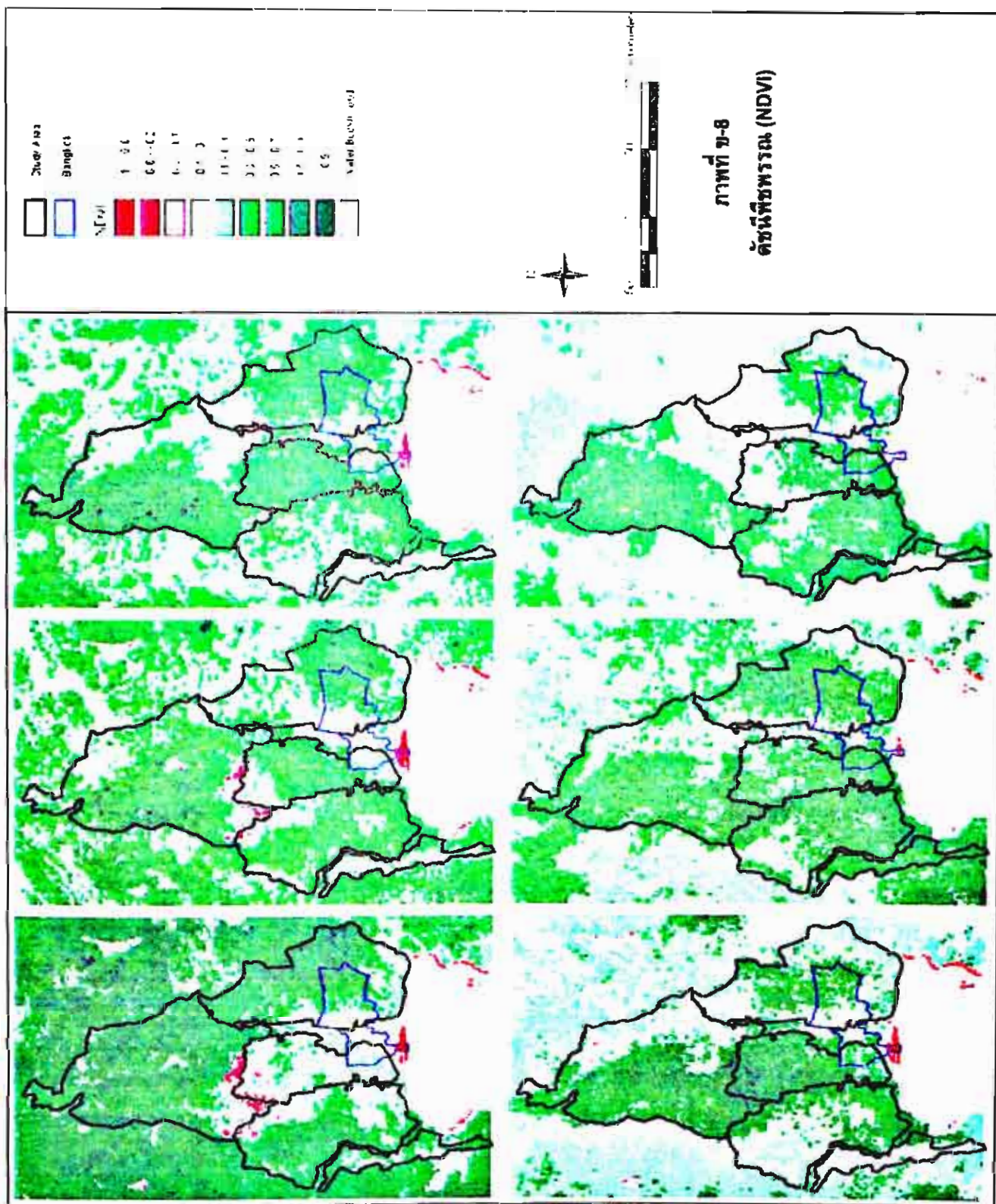
ตารางที่ ข-4 อุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

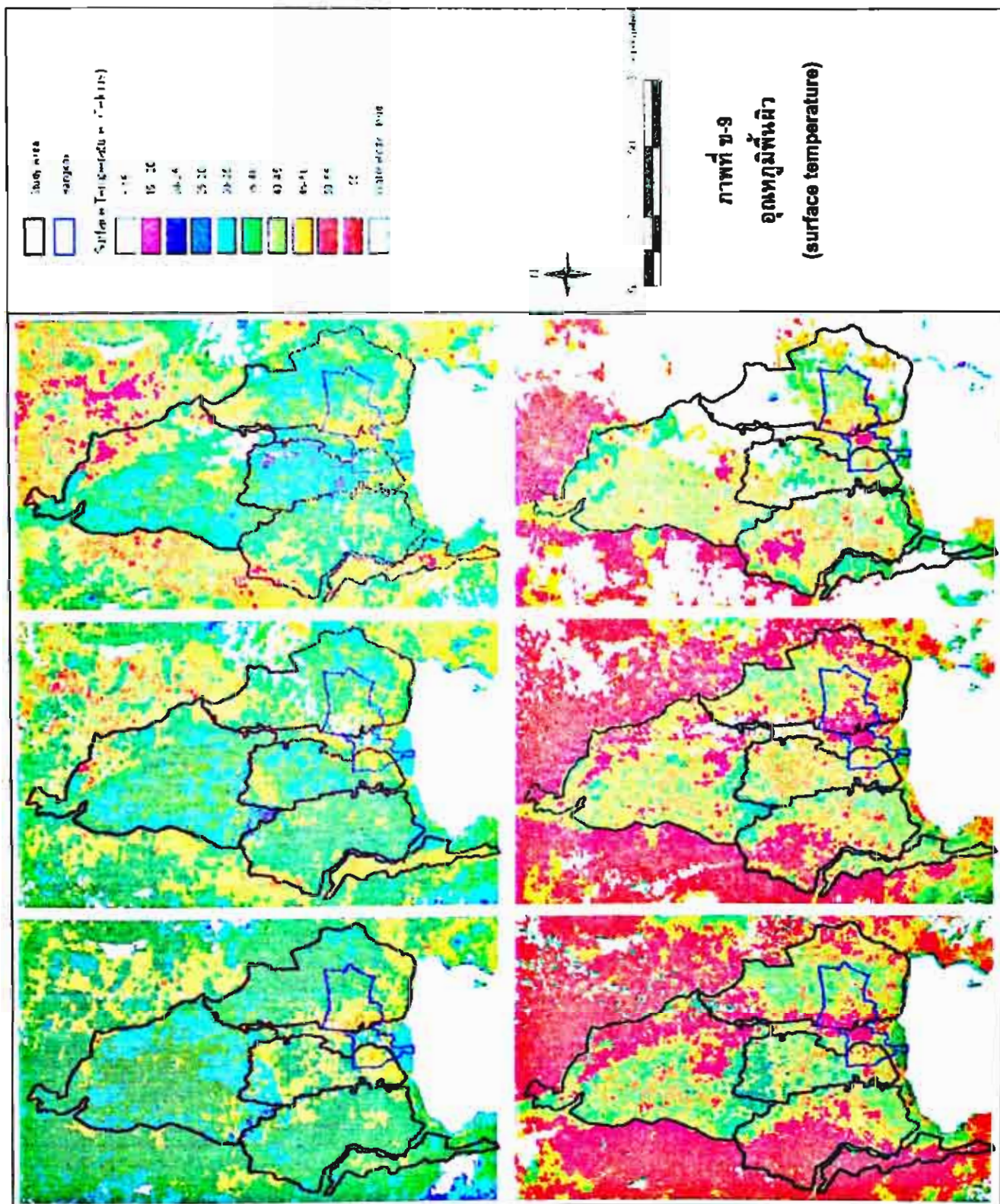
DATE	Surface Temperature, Ts (°C)				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	36.08	38.87	39.50	37.64	37.72
27 Dec 01	37.00	38.92	37.34	37.89	41.73
30 Jan 02	38.56	38.54	34.29	39.65	44.20
28 Feb 02	46.55	46.26	42.96	49.68	52.19
27 Mar 02	46.38	47.22	45.34	47.20	45.30
22 Apr 02	43.62	43.70	43.19	44.89	40.18



ภาพที่ ข-6 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิว
แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก





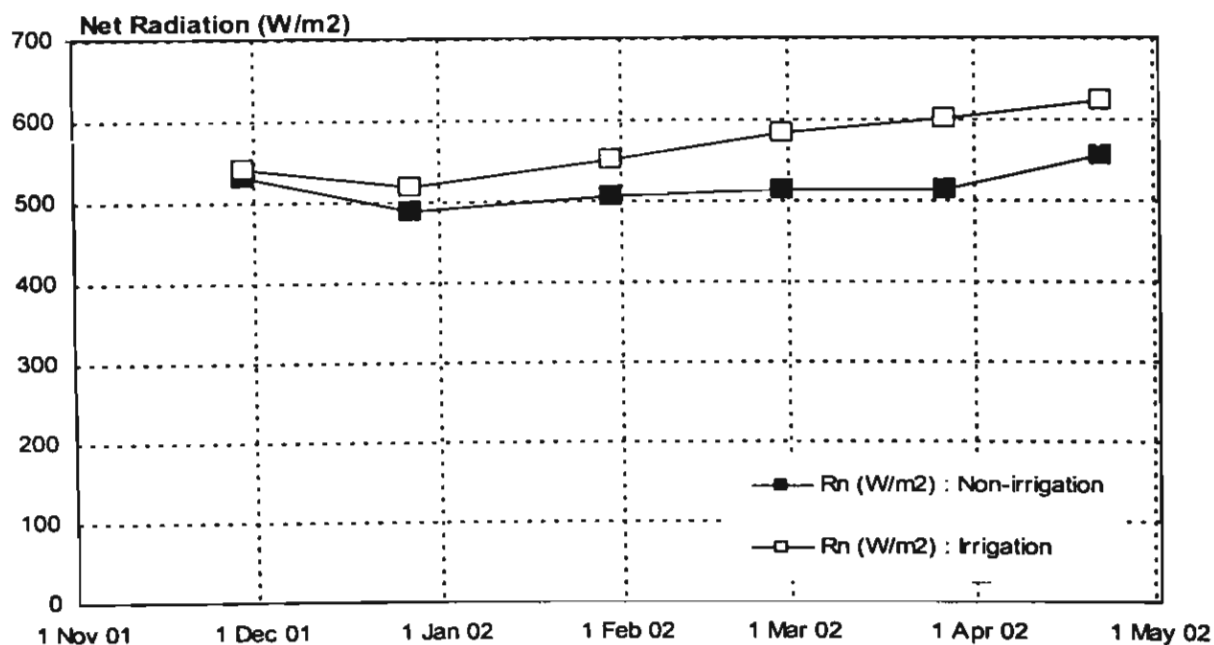


ข.2 พารามิเตอร์ของสมดุลพลังงาน

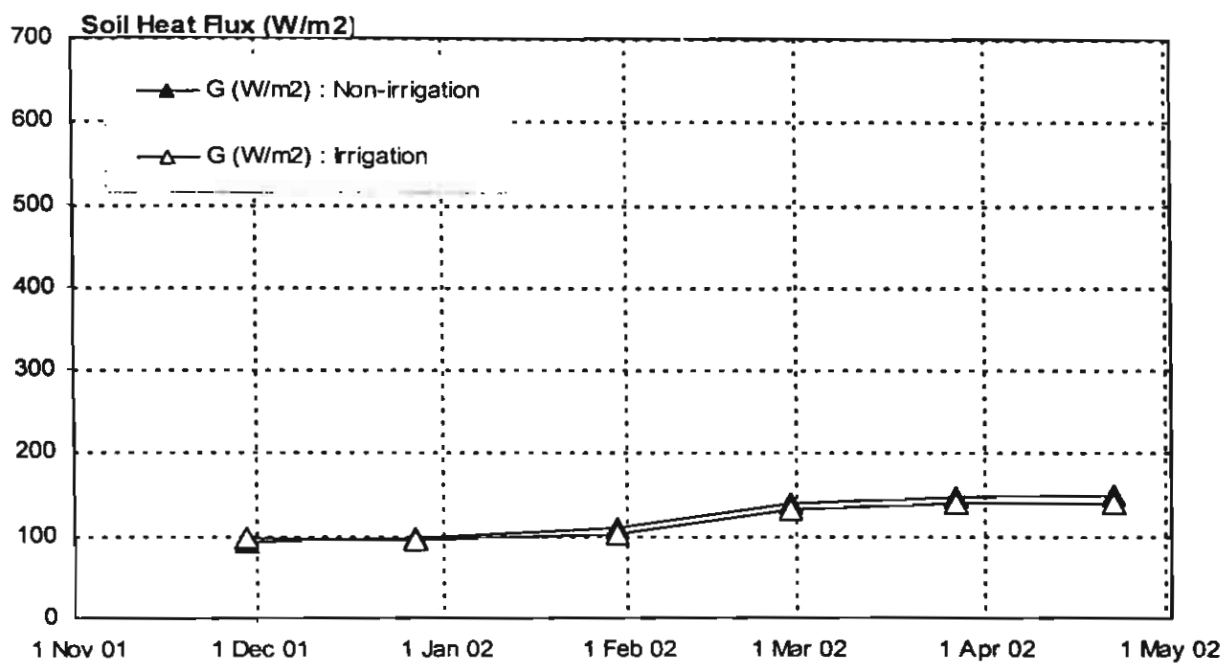
พารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงานประกอบไปด้วย พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ (net radiation, R_n), พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทลงดิน (soil heat flux, G_o), พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้อากาศ (sensible heat flux, H) และ พลังงานความร้อนแฝงสำหรับการระเหย (latent heat flux of evaporation, $\lambda \cdot E$)

ตารางที่ ข-5 ค่าพารามิเตอร์ของสมการสมดุลพลังงาน
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

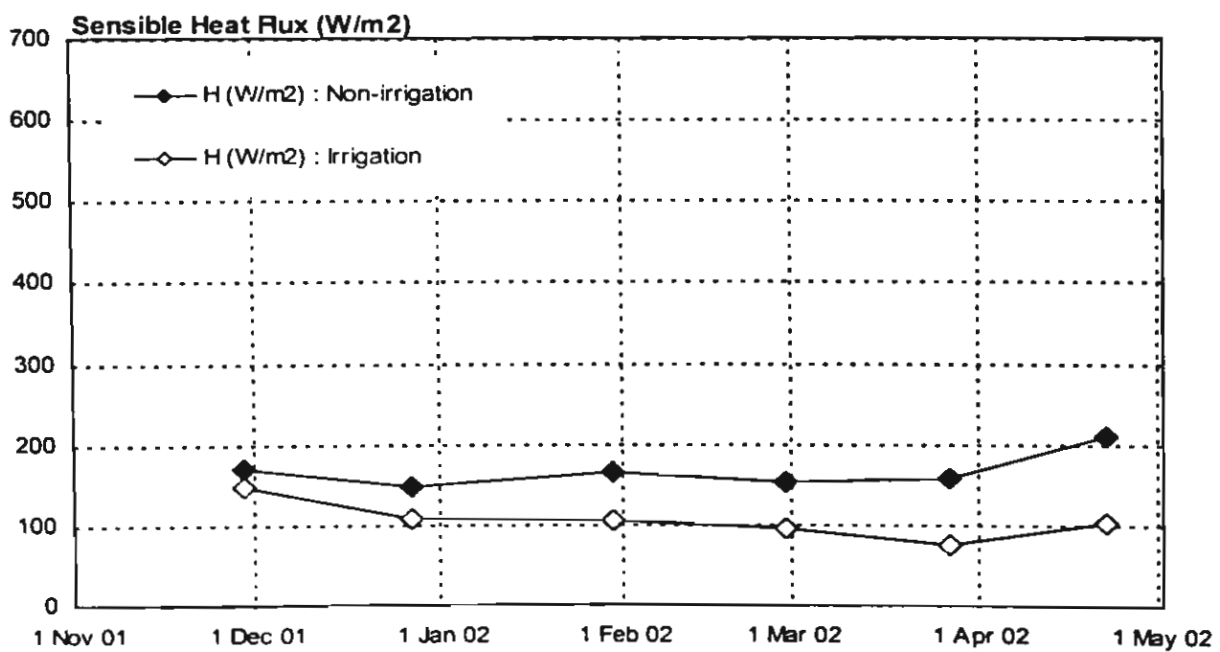
DATE	Rn (W/m ²)		G (W/m ²)		H (W/m ²)	
	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation
29 Nov 01	530.86	539.56	92.81	96.68	168.46	147.50
27 Dec 01	488.19	518.19	96.41	94.39	147.52	107.17
30 Jan 02	503.84	549.94	108.50	101.66	163.55	104.91
28 Feb 02	512.32	583.63	139.17	132.61	151.08	94.67
27 Mar 02	511.48	599.47	146.33	138.66	157.12	75.38
22 Apr 02	554.74	622.34	149.75	137.81	210.04	101.99



ภาพที่ ข-10 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)



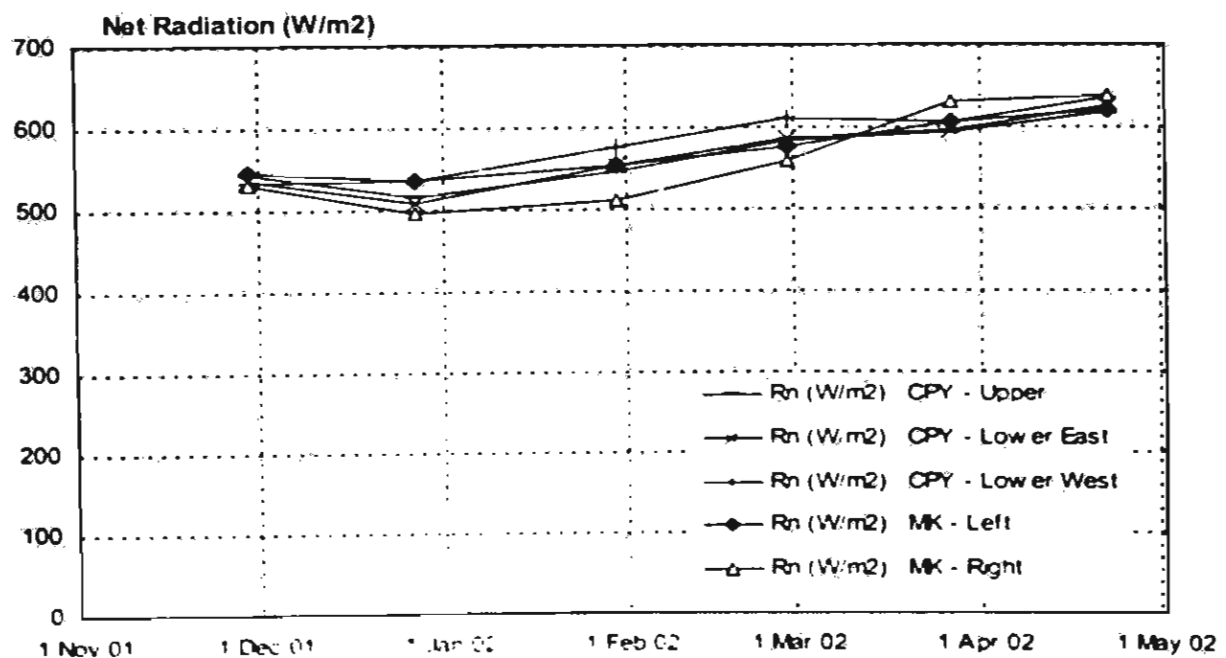
ภาพที่ ข-11 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทลงดิน
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)



ภาพที่ ข-12 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

ตารางที่ ข-6 พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

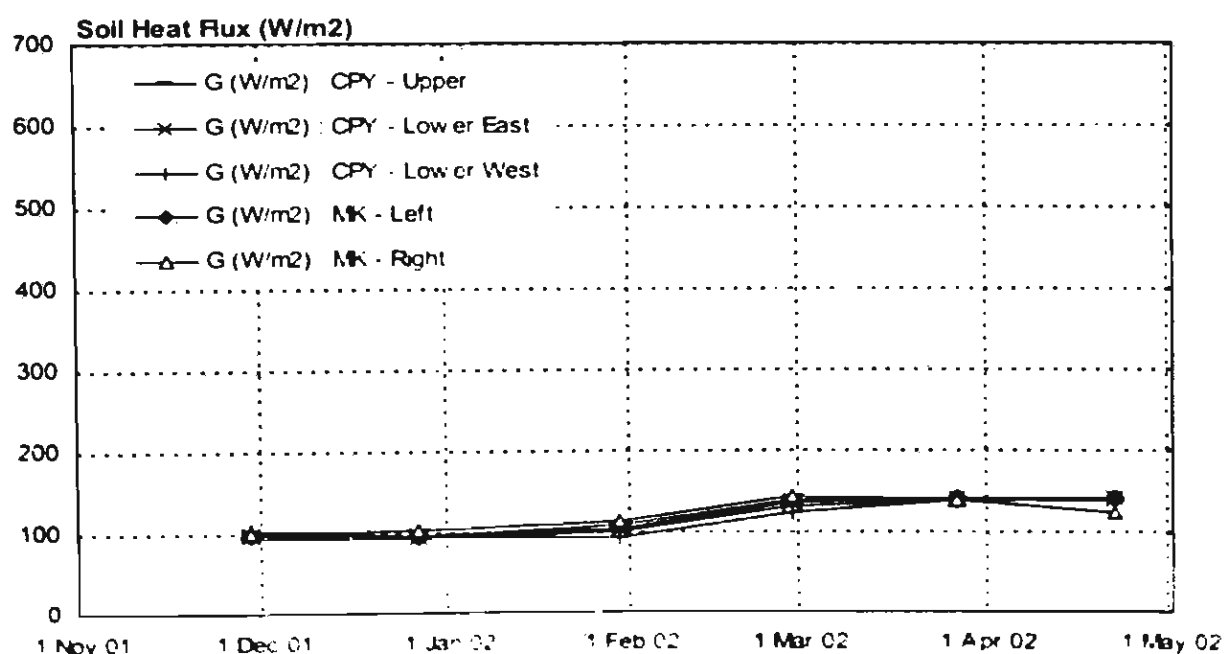
DATE	Net Radiation, Rn (W/m ²)				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	542.48	536.09	532.72	545.40	528.88
27 Dec 01	513.81	507.02	533.81	533.89	495.59
30 Jan 02	544.21	551.54	574.16	551.76	510.61
28 Feb 02	581.95	585.20	610.79	573.82	557.76
27 Mar 02	592.41	595.32	604.34	606.15	630.28
22 Apr 02	617.16	624.96	634.49	619.75	636.88



ภาพที่ ข-13 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิ
แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

ตารางที่ ข-7 พลังงานที่ถ่ายเทลงดินแยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

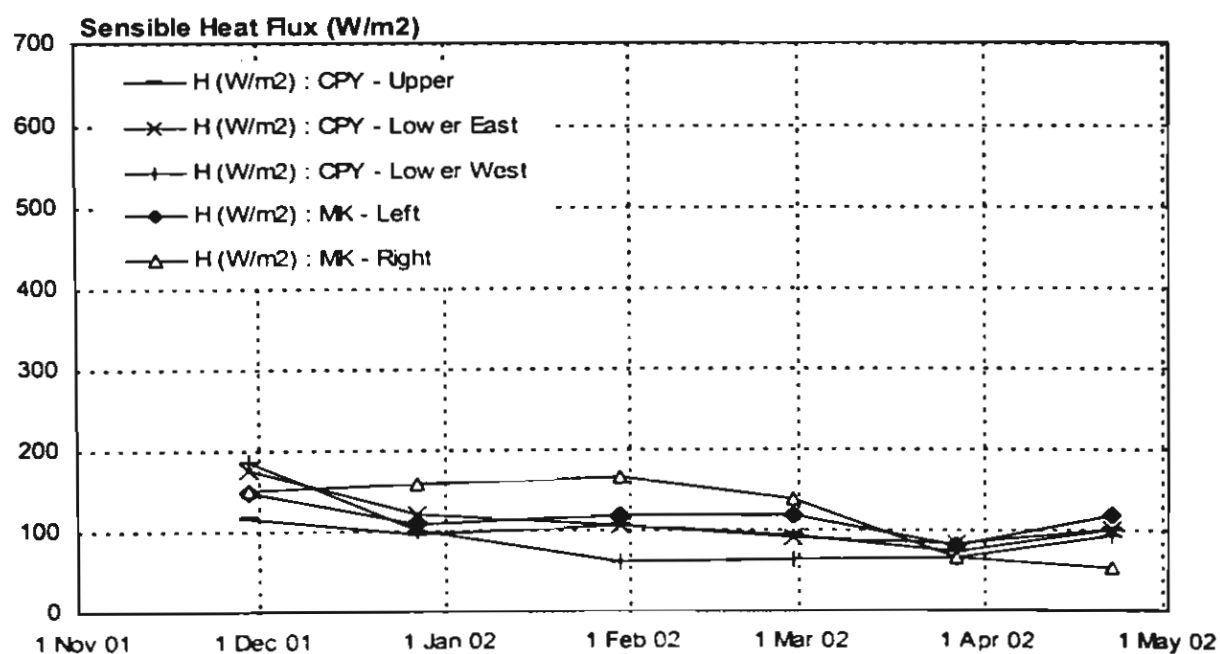
DATE	Soil Heat Flux, G (W/m ²)				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	92.50	97.76	102.61	98.43	99.20
27 Dec 01	91.98	95.69	93.97	95.71	101.70
30 Jan 02	99.19	103.65	93.01	106.36	113.06
28 Feb 02	130.24	135.05	123.71	137.30	142.32
27 Mar 02	137.37	140.57	137.99	139.41	137.04
22 Apr 02	137.33	139.60	138.56	139.51	122.28



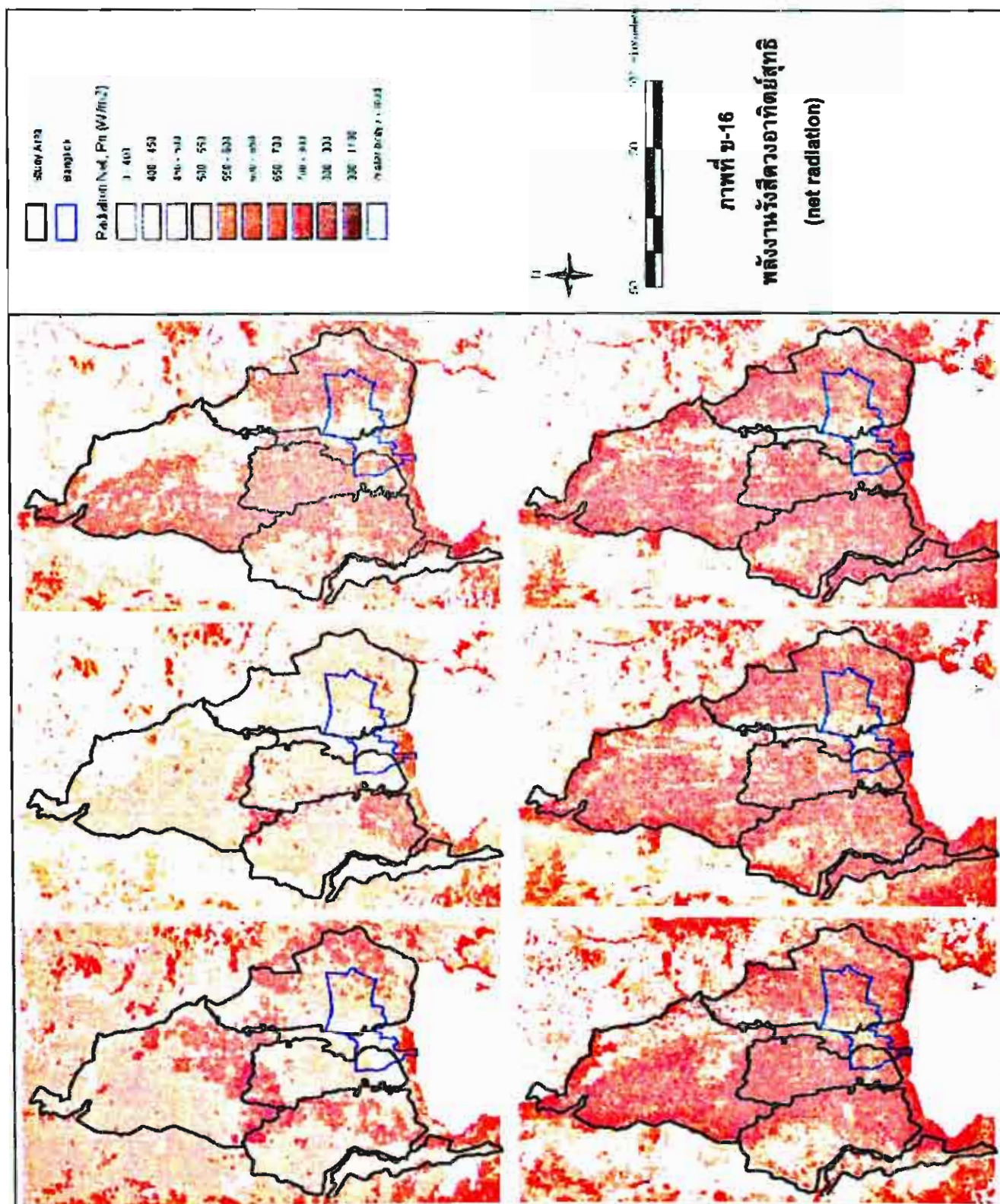
ภาพที่ ข-14 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทลงดิน
แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

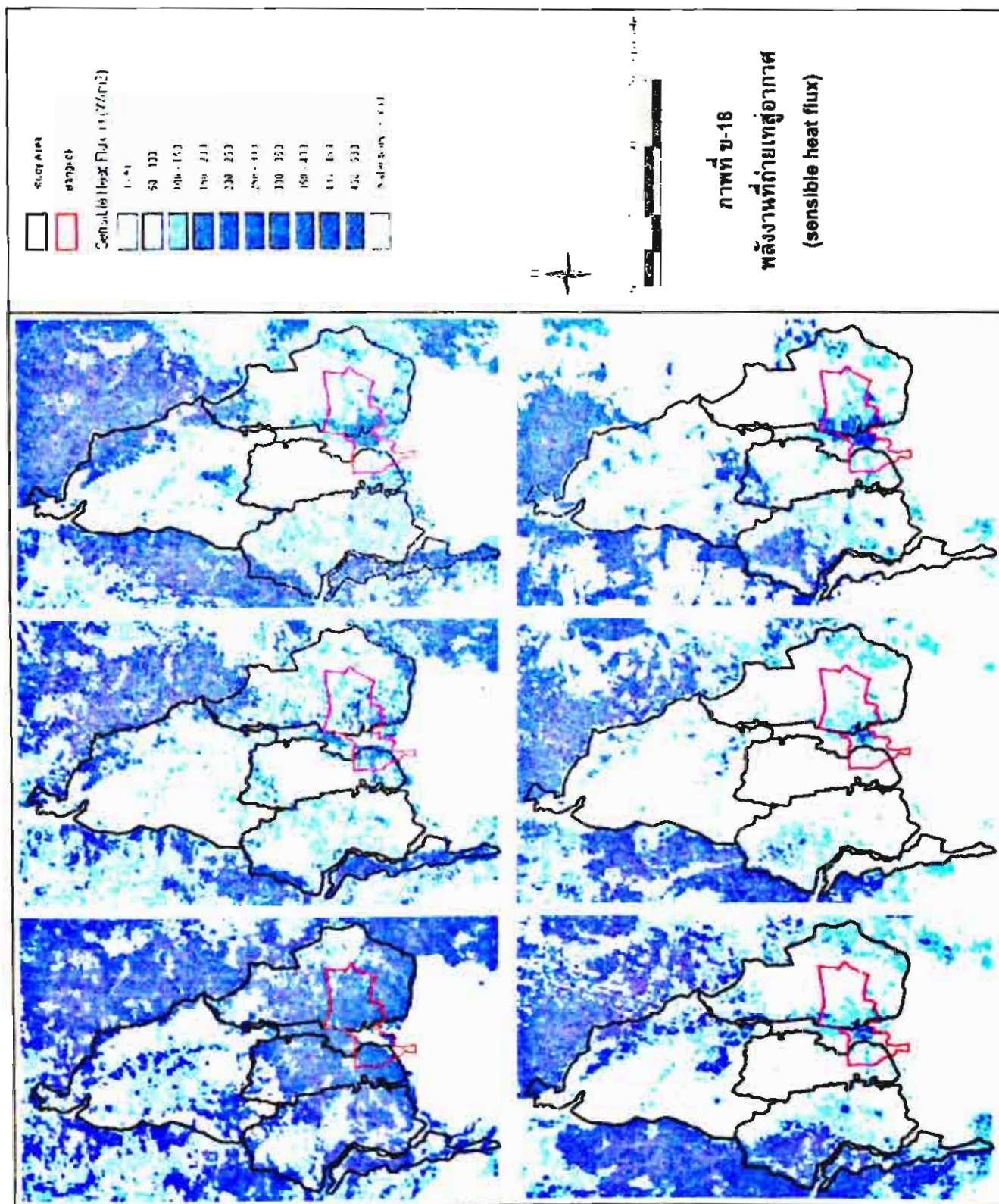
ตารางที่ ข-8 พลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศแยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

DATE	Sensible Heat Flux, H (W/m ²)				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	113.95	175.60	186.23	147.83	150.62
27 Dec 01	94.88	120.44	99.06	107.04	157.92
30 Jan 02	106.21	105.40	58.81	117.50	165.37
28 Feb 02	91.64	88.90	62.18	117.43	137.19
27 Mar 02	73.64	81.36	64.07	81.10	64.24
22 Apr 02	100.35	100.64	93.64	117.53	53.49



ภาพที่ ข-15 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของพลังงานที่ถ่ายเทสู่อากาศ
แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก



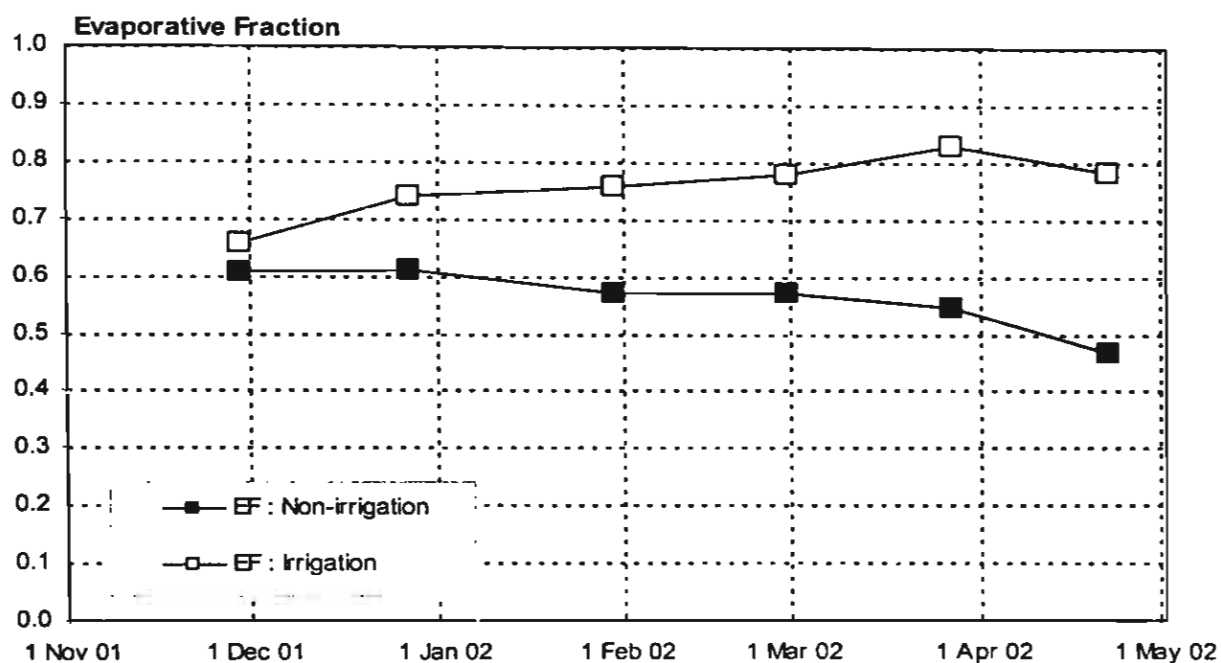


ข.3 สัดส่วนการระเหย

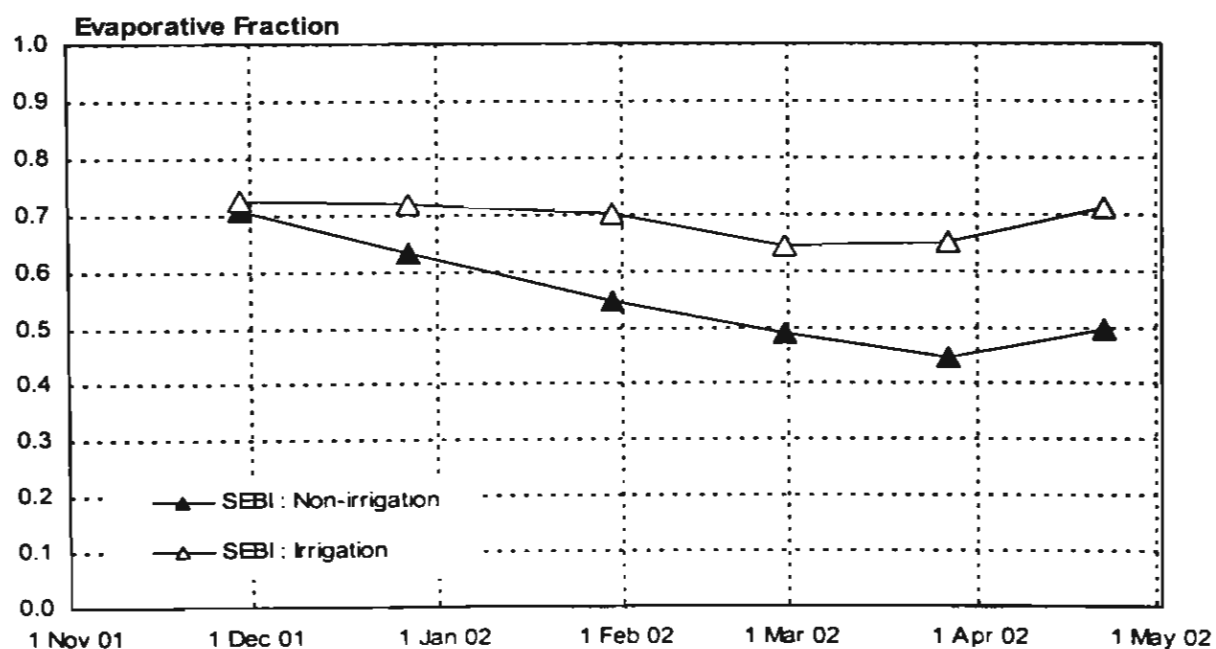
การหาสัดส่วนการระเหยจากสมการสมดุลพลังงาน ได้กระทำตามสองแนวทาง คือ ตามวิธีของ SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) โดยหาเป็นสัดส่วนการระเหย (Evaporative Fraction, EF) และตามวิธีของ SEBI (Menenti & Choudhury, 1993; Roerink et al., 2000) โดยหาเป็นดัชนี สมดุลพลังงาน (Surface Energy Balance Index, SEBI)

ตารางที่ ข-9 ค่าสัดส่วนการระเหย
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

DATE	EF		SEBI	
	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	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



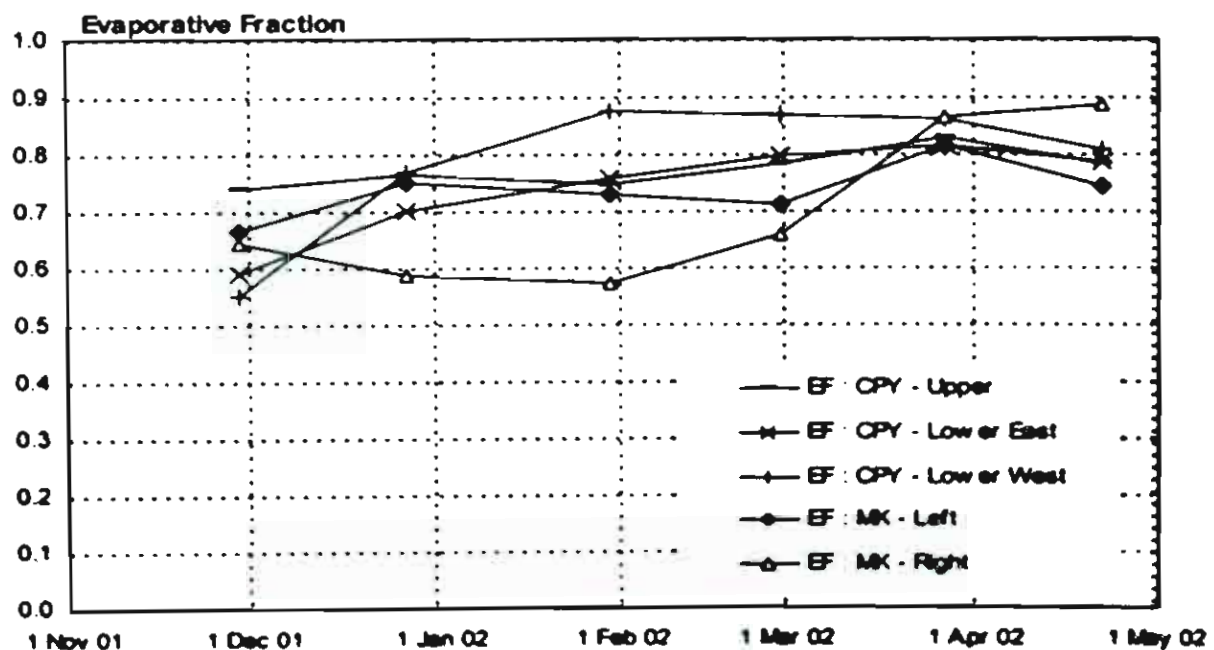
ภาพที่ ข-19 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของสัดส่วนการระเหย
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)



ภาพที่ ข-20 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีสมดุลพลังงาน SEBI
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

ตารางที่ ข-10 สัดส่วนการระเหย (EF) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

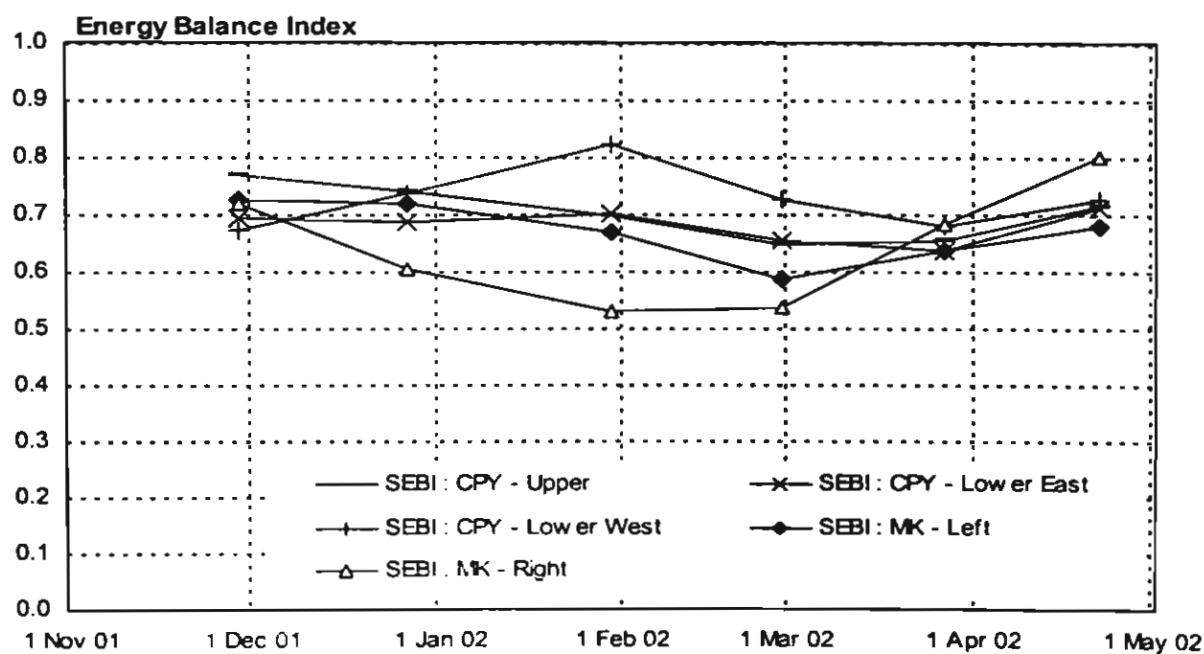
DATE	Evaporative Fraction, EF				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	0.74	0.59	0.55	0.68	0.64
27 Dec 01	0.76	0.70	0.77	0.75	0.59
30 Jan 02	0.75	0.76	0.87	0.73	0.57
28 Feb 02	0.78	0.80	0.87	0.71	0.66
27 Mar 02	0.83	0.81	0.86	0.81	0.80
22 Apr 02	0.78	0.79	0.81	0.74	0.89



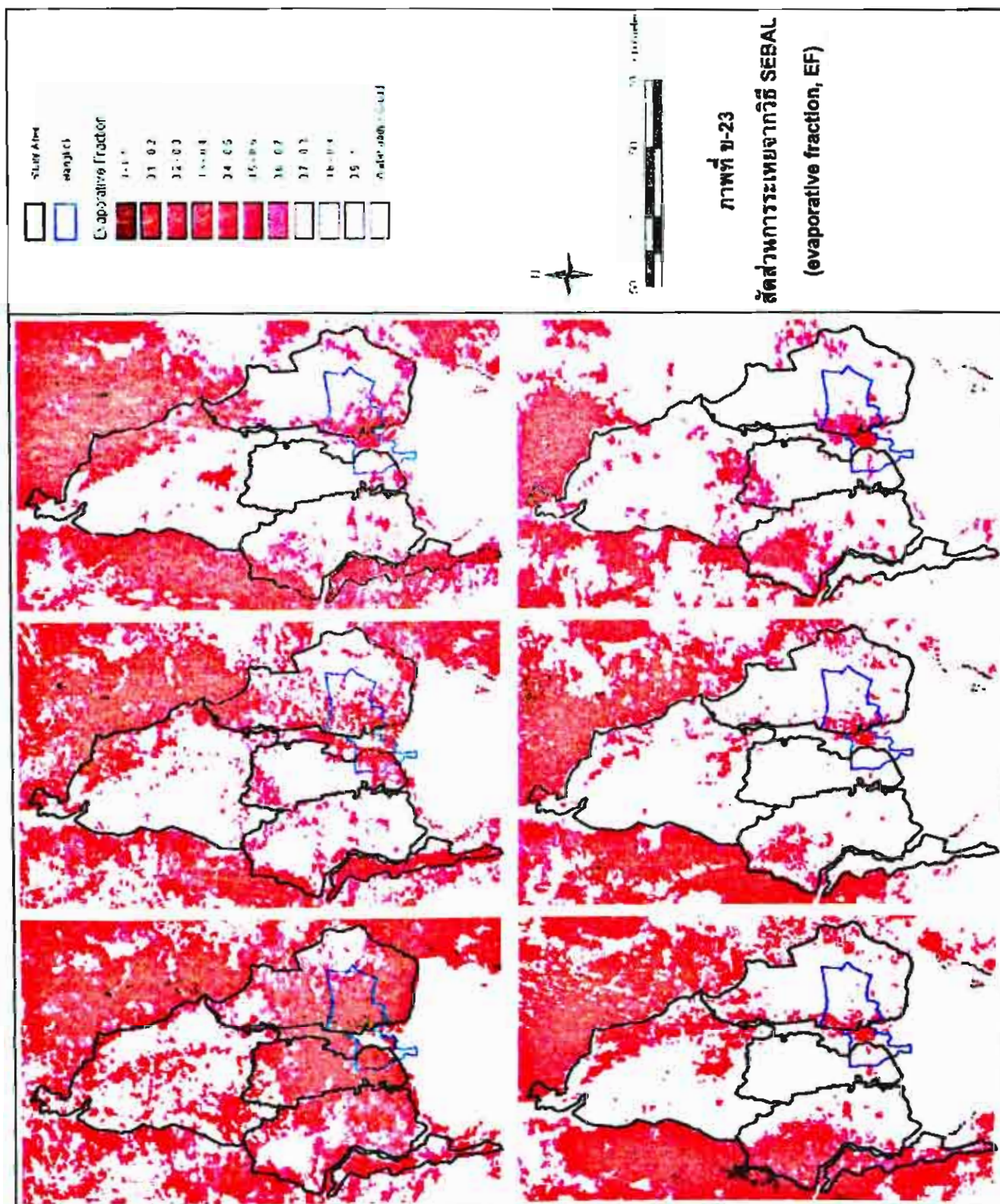
ภาพที่ ข-21 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของสัดส่วนการระเหย (EF)
แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

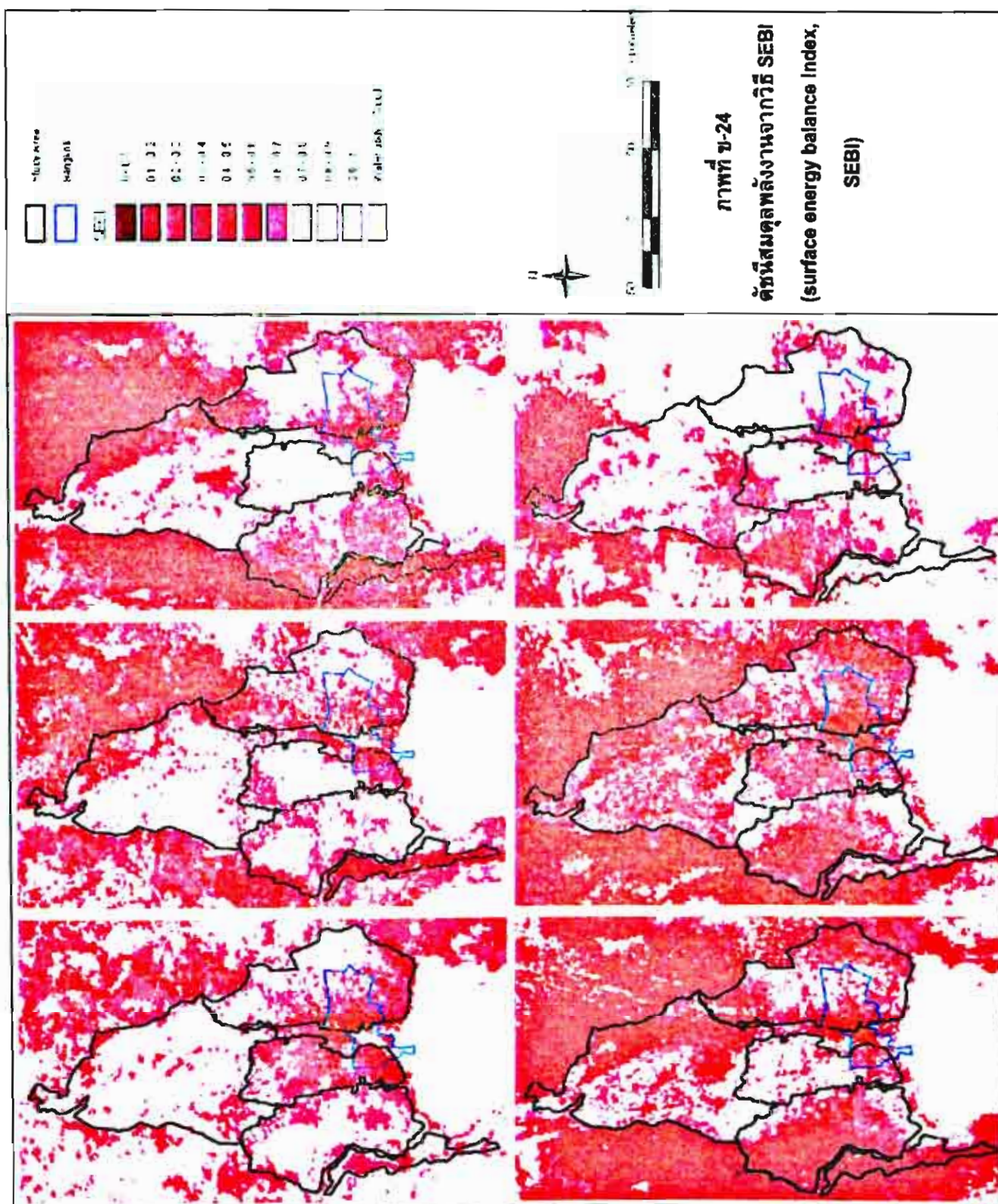
ตารางที่ ข-11 ดัชนีสมดุลพลังงาน (SEBI) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

DATE	Surface Energy Balance Index, SEBI				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	0.77	0.69	0.67	0.73	0.72
27 Dec 01	0.74	0.69	0.74	0.72	0.60
30 Jan 02	0.70	0.70	0.82	0.67	0.53
28 Feb 02	0.65	0.65	0.72	0.59	0.54
27 Mar 02	0.65	0.64	0.68	0.64	0.68
22 Apr 02	0.71	0.71	0.73	0.68	0.80



ภาพที่ ข-22 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของดัชนีสมดุลพลังงาน (SEBI) แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

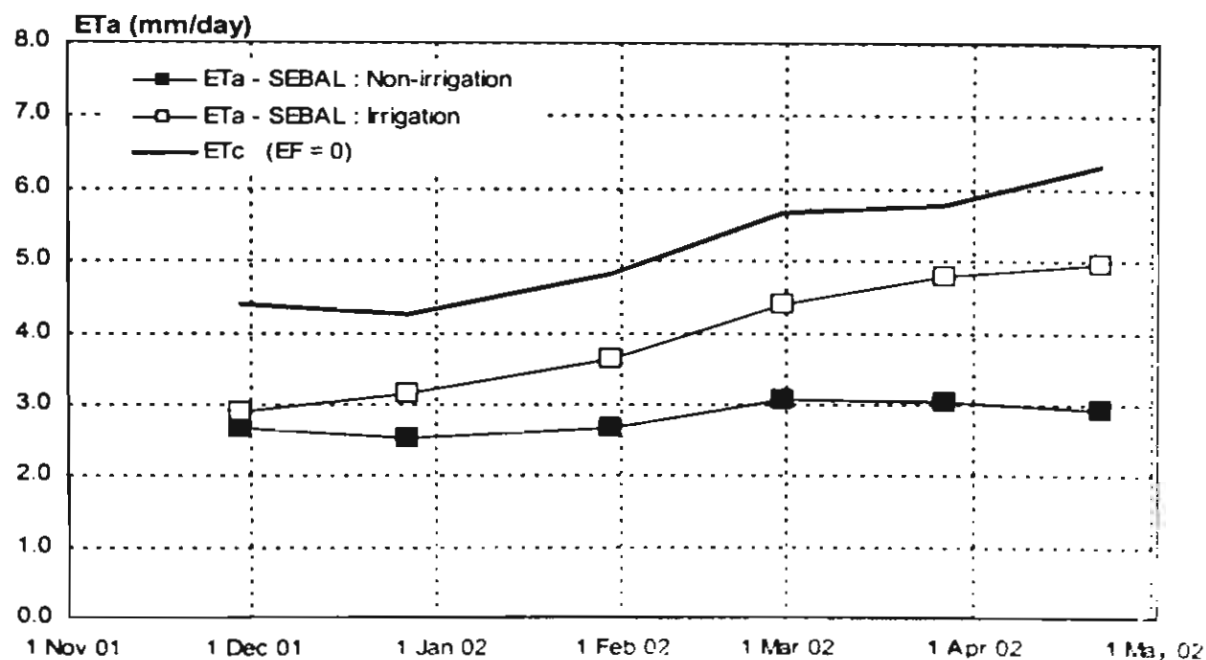




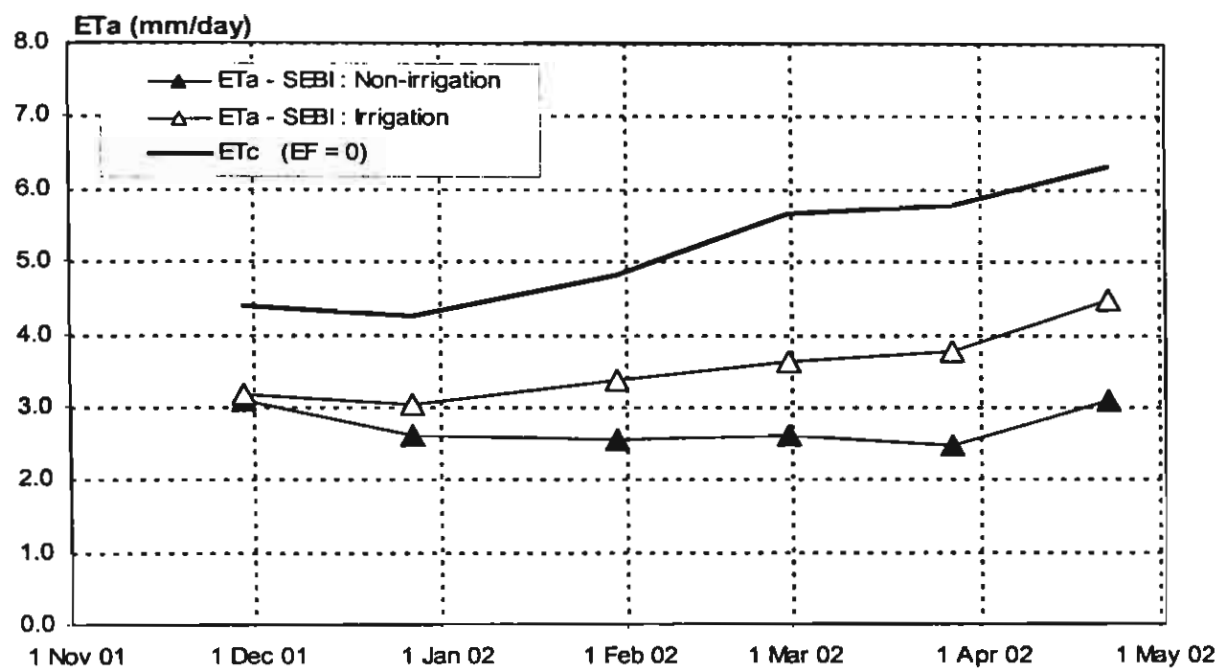
ข.4 การระเหยของน้ำ

ตารางที่ ข-12 อัตราการระเหยจริง (actual evapotranspiration)
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

DATE	ETa - SEBAL (mm/day)		ETa - SEBI (mm/day)	
	Non-irrigation	Irrigation	Non-irrigation	Irrigation
29 Nov 01	2.65	2.87	3.09	3.18
27 Dec 01	2.51	3.12	2.59	3.03
30 Jan 02	2.67	3.62	2.54	3.36
28 Feb 02	3.07	4.39	2.61	3.62
27 Mar 02	3.02	4.78	2.45	3.75
22 Apr 02	2.90	4.94	3.07	4.48



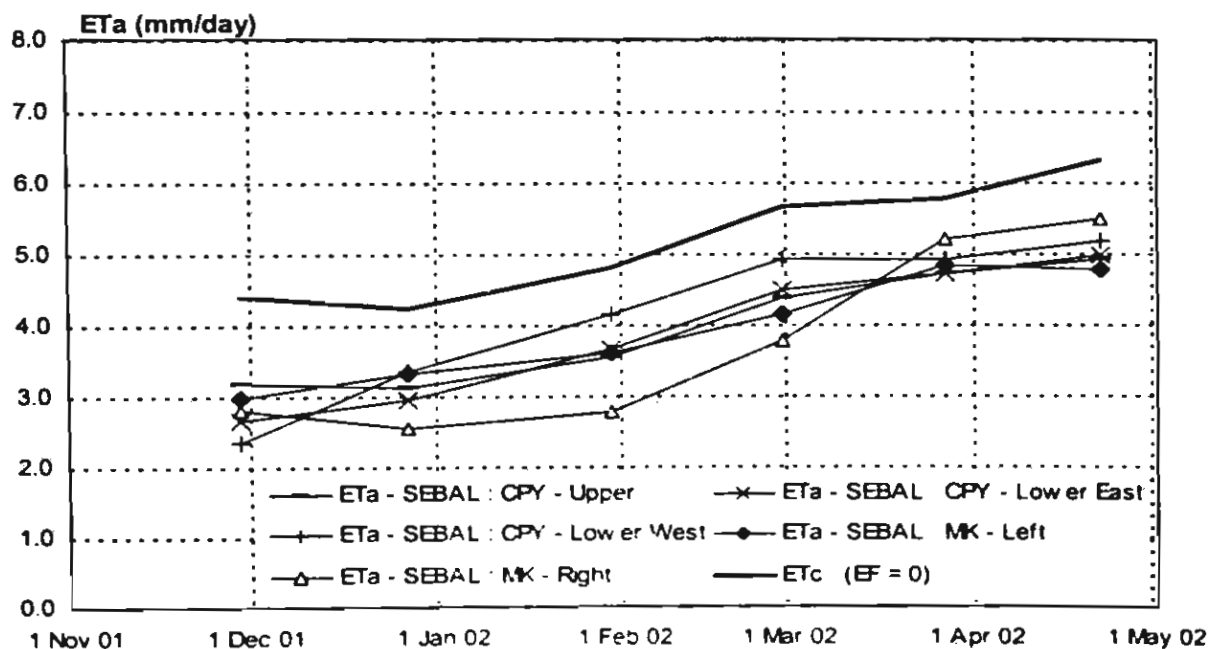
ภาพที่ ข-25 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBAL
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)



ภาพที่ ข-26 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBI
จำแนกตามพื้นที่ในเขตชลประทาน (irrigation) และนอกเขตชลประทาน (non-irrigation)

ตารางที่ ข-13 อัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBAL แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

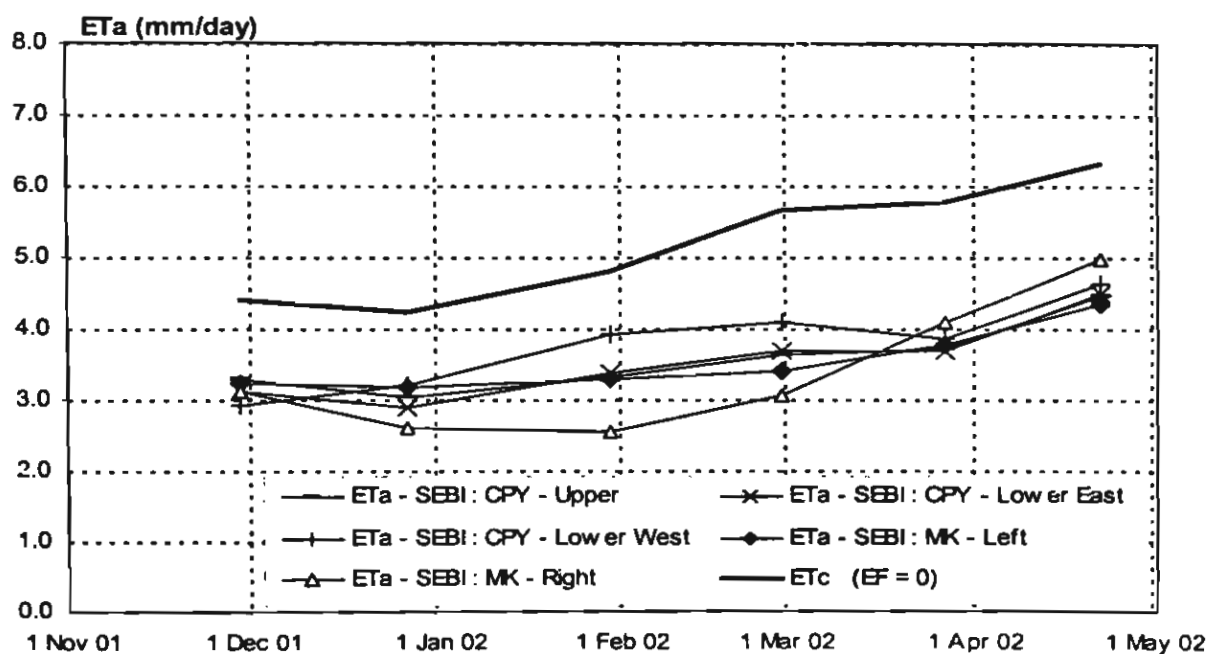
DATE	ETa by SEBAL (mm/day)				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	3.16	2.66	2.36	2.96	2.80
27 Dec 01	3.12	2.95	3.35	3.32	2.54
30 Jan 02	3.54	3.65	4.15	3.59	2.76
28 Feb 02	4.37	4.48	4.92	4.14	3.78
27 Mar 02	4.70	4.71	4.91	4.82	5.20
22 Apr 02	4.90	4.97	5.16	4.76	5.48



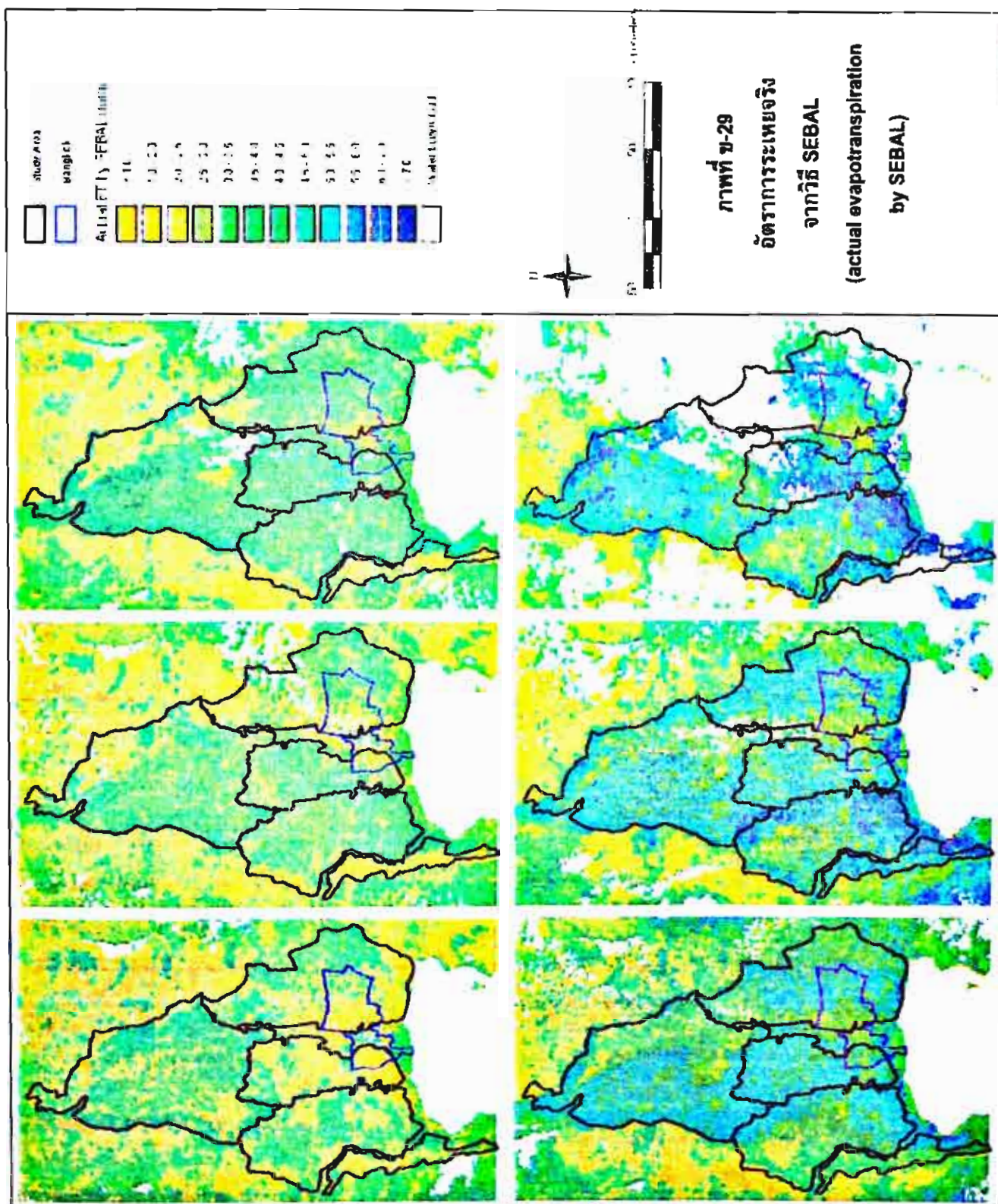
ภาพที่ ข-27 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงหาโดยวิธี SEBAL แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

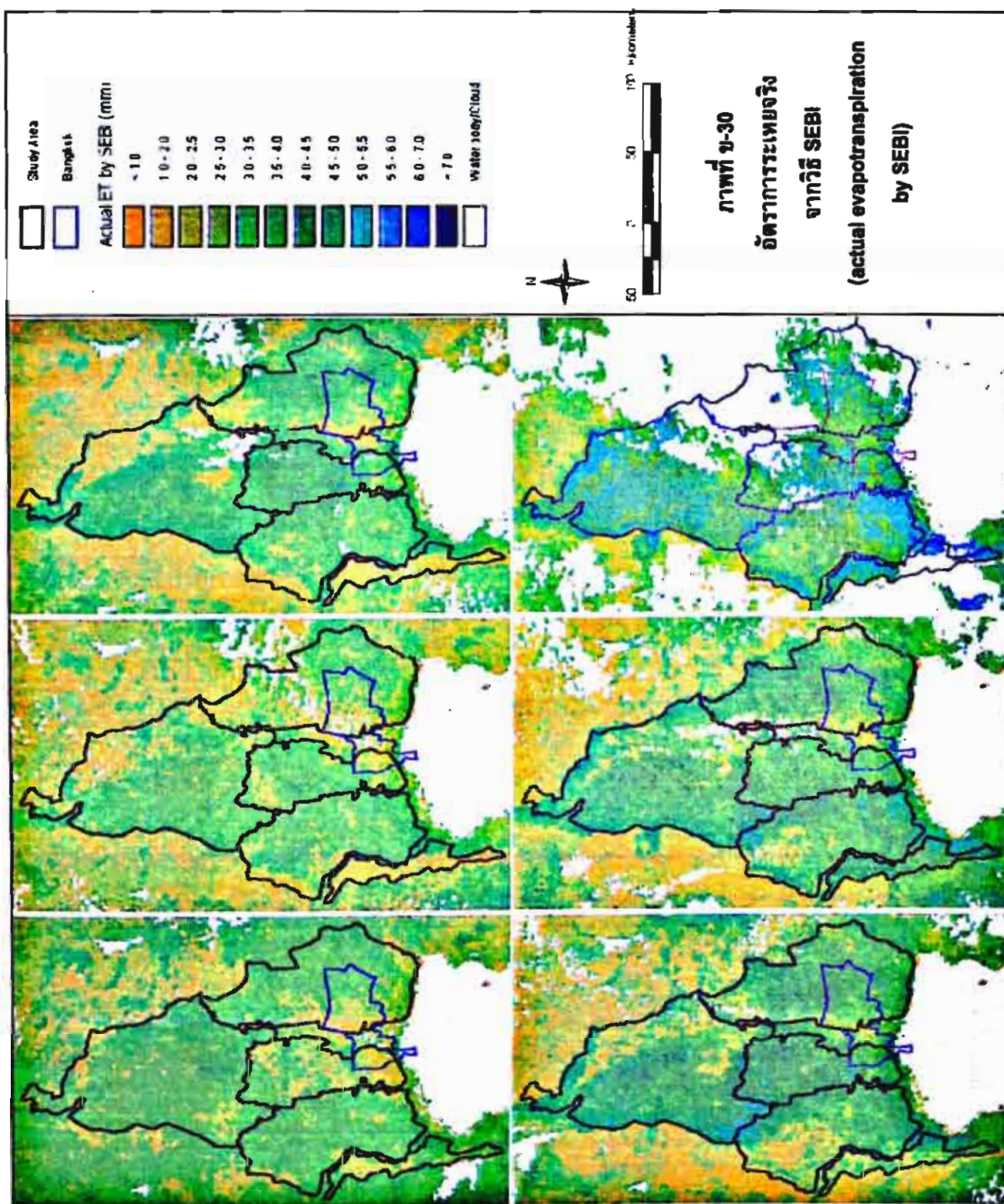
ตารางที่ ข-14 อัตราการระเหยจริงโดยวิธี SEBI แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก

DATE	ETa by SEBI (mm/day)				
	Upper Chao Phraya	Lower Chao Phraya East Bank	Lower Chao Phraya West Bank	Mae Klong Left Bank	Mae Klong Right Bank
29 Nov 01	3.29	3.12	2.91	3.24	3.13
27 Dec 01	3.02	2.90	3.20	3.18	2.61
30 Jan 02	3.30	3.37	3.90	3.28	2.55
28 Feb 02	3.62	3.68	4.09	3.40	3.07
27 Mar 02	3.70	3.68	3.87	3.77	4.09
22 Apr 02	4.46	4.49	4.64	4.34	4.96



ภาพที่ ข-28 การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยของอัตราการระเหยจริงหาโดยวิธี SEBI แยกตามกลุ่มของโครงการชลประทานหลัก





29 พฤศจิกายน 2544	27 ธันวาคม 2544	30 มกราคม 2545	ภาพที่ ข-31 ลำดับการเรียงภาพที่นำเสนอ
28 กุมภาพันธ์ 2545	27 มีนาคม 2545	22 เมษายน 2545	