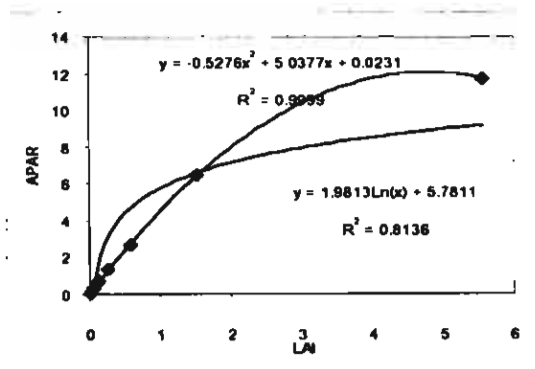
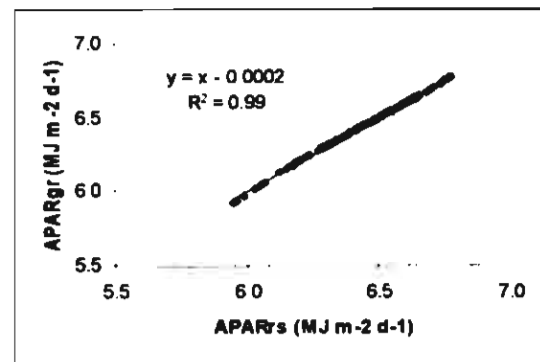
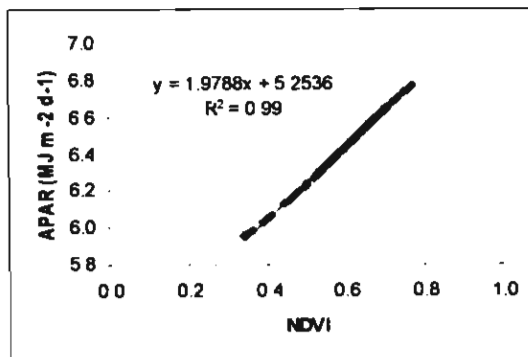




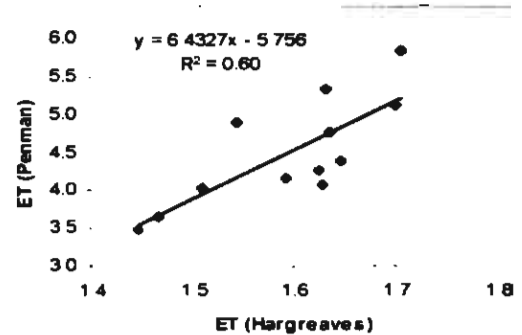
ภาพ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง LAI_{GR} และ $APAR_{GR}$



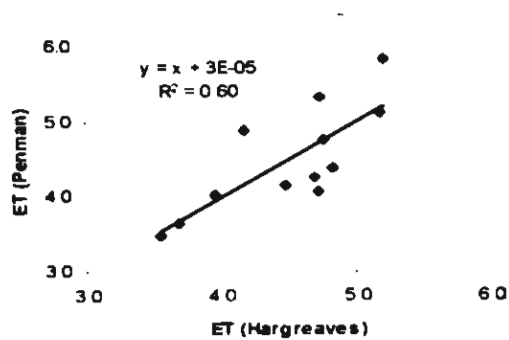
ภาพ 6 กราฟแสดงการถดถอยระหว่าง ข้อมูล $APAR_{RS}$ and $APAR_{GR}$



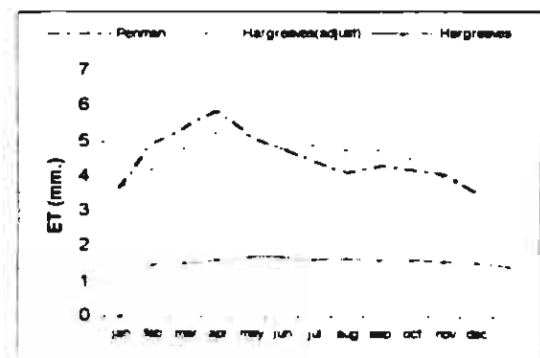
ภาพ 7 กราฟแสดงการถดถอยระหว่าง ข้อมูล NDVI and $APAR_{RS}$



ภาพ 8 กราฟกระจายระหว่าง Hargreaves-based ET และ Penman-based ET



ภาพ 9 กราฟกระจายระหว่าง ET_{RS} ที่ปรับแก้และ Penman-based ET



ภาพ 10 กราฟเส้นเปรียบเทียบระหว่าง Modeled- ET และ Penman-based ET

จากแบบจำลองในสมการ 17, 18, 21 และ 22 เมื่อนำมาคำนวณโดยใช้ข้อมูลสำรวจจากระยะไกลที่สำรวจในวันที่ 31 มกราคม, 16 กุมภาพันธ์, 13 มีนาคม, 29 มีนาคม และ 18 เมษายน 2545 ผลการวิเคราะห์จากข้อมูลสำรวจระยะไกล MODIS พบว่า ปริมาณการคายระเหยเฉลี่ยของพื้นที่ศึกษาในช่วงฤดูนาปรัง (ตาราง 1) เท่ากับ 4.53 มิลลิเมตรต่อวัน ในเดือนมกราคมมีความผันแปรของค่าการคายระเหยมากที่สุด ($SD = 0.49$) เนื่องจากจากรายงานสำรวจการเพาะปลูกพบว่าเป็นช่วงคาบเกี่ยวระหว่างการปลูกข้าวในฤดูนาปีและนาปรัง ดังนั้นพื้นที่บางส่วนจึงอยู่ในช่วงเตรียมแปลงจนถึงช่วงเก็บเกี่ยว ดังจะเห็นได้จากค่า NDVI ในวันที่ 31 มกราคม มีค่าต่ำสุดและสูงสุดเมื่อเทียบกับวันอื่น ๆ อีกทั้งมีค่า SD มากที่สุด ($SD = 0.11$) เมื่อพิจารณากราฟฮิสโตแกรม (histogram) ในภาพ 11 พบว่า ในวันที่ 31 มกราคม มีค่า NDVI และ APAR อยู่ในช่วงกว้างที่สุด ซึ่งแสดงว่ามีระยะต่าง ๆ ของการเจริญเติบโตของข้าวคือตั้งแต่ช่วงเตรียมแปลงจนถึงช่วงเก็บเกี่ยว จากการที่อุณหภูมิในช่วงเดือนมีนาคมและเมษายนสูงจึงทำให้ค่าการคายระเหยเฉลี่ยในช่วงเดือนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ ภาพ 12 ถึง 15 แสดงการกระจายเชิงพื้นที่ของค่า NDVI, APAR, LST และ ET จากภาพพบว่าบริเวณที่มีค่า LST สูงและมีค่า NDVI สูงจะมีค่า ET สูงกว่าบริเวณที่มีค่า LST ต่ำและมีค่า NDVI ต่ำ

จากข้อมูลการระเหยน้ำจากถาด (Pan evaporation) ที่ตรวจวัดจากสถานีอุตุนิยมวิทยาของกรมชลประทานและกรมอุตุนิยมวิทยา เมื่อนำมาประมาณค่าเชิงพื้นที่ (spatial interpolation) เพื่อหาค่าศักยภาพการระเหยน้ำจากถาด (potential evaporation) ของพื้นที่นาในโครงการชลประทานและบำรุงรักษาพลาญชุมพล ผลการศึกษา พบว่า ค่าศักยภาพการระเหยจากถาดที่ตรวจวัดข้อมูลโดยกรมอุตุนิยมวิทยา ทั้ง 5 ช่วงเวลา คือ 31 มกราคม, 16 กุมภาพันธ์, 29 มีนาคม และ 18 เมษายน พบว่ามีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 6.0 มิลลิเมตรต่อวันต่อไร่ เดือนเมษายนซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูง จึงทำให้การระเหยจากถาดสูงกว่าเดือนอื่นๆ ข้อมูลในตาราง 1 จึงแสดงให้เห็นว่าการคายระเหยที่คำนวณได้จากแบบจำลองข้อมูลระยะไกลมีค่าใกล้เคียงกับศักยภาพการระเหยจากถาด อย่างไรก็ตาม รูปแบบการกระจาย (distribution pattern) ค่าการระเหยจากถาดและการคายระเหยจากข้อมูลระยะไกลมีลักษณะแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าการระเหยจากถาดเป็นเพียงศักยภาพการระเหย ซึ่งวัดจากการระเหยของน้ำในถาด โดยทั่วไปแล้วงานด้านชลประทานใช้ค่าศักยภาพการระเหยจากถาดคูณกับค่าสัมประสิทธิ์พืชเพื่อคำนวณค่าความต้องการน้ำของพืชสำหรับใช้ในการคายระเหยน้ำในกระบวนการเจริญเติบโต ค่าศักยภาพการระเหยที่วัดจากน้ำที่ระเหยออกจากถาดระเหยนี้มักมีค่าสูงกว่าสภาพความเป็นจริงของพื้นที่ เพราะในสภาพจริงแล้ว อาจพบว่าน้ำฝนไม่ตกลงมาหรือน้ำในดินไม่มีเพียงพอที่จะเกิดการระเหยได้ ปริมาณการคายระเหยแท้จริงในพื้นที่นอกจากขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในรูปฝนและน้ำในดินแล้ว ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น ชนิด อายุ และเปอร์เซ็นต์การปกคลุมดินของพืช ดังนั้นการใช้แบบจำลองการคายระเหยน้ำจากข้อมูลการสำรวจระยะไกลจึงน่าจะเพิ่มประสิทธิภาพต่อการวางแผนการใช้น้ำชลประทานที่เหมาะสมตามสภาพจริงของอายุหรือช่วงการเจริญเติบโตของต้นข้าวซึ่งเกษตรกร แต่ละรายมักปลูกในเวลาที่ไม่ตรงกัน

ในการศึกษานี้ ได้จำแนกค่า NDVI ตามระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าวในตาราง 2 จากข้อมูลการสำรวจระยะไกล ได้ผลดังภาพ 16 ผลการจำแนกพบว่า ระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าวที่อายุ 0, 1-20, 21-65, 66-111 และ มากกว่า 111 มีค่าเฉลี่ย ET_{RS} เท่ากับ 2.54, 4.29, 4.59, 4.64 และ 4.54 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ (ตาราง 3) โดยค่าเฉลี่ย ET_{RS} และค่าเฉลี่ย NDVI สามารถแบ่งตามระยะ (อายุ) การเจริญเติบโตของต้นข้าวทั้ง 5 ระยะ ได้ดังภาพ 17 ซึ่งค่าเฉลี่ย NDVI สูงสุด (0.8) เมื่อต้นข้าวอยู่ในระยะแตกกอ (อายุ 21-65 วัน) ซึ่งในช่วงการเจริญเติบโตดังกล่าวมีค่า ET สูงสุดเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ค่า ET_{RS} สูงสุดปรากฏในช่วงการเจริญเติบโต 2 ระยะ คือ ระยะแตกกอ (อายุ 21-65 วัน) และระยะเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ (66-111 วัน) ดังนั้น ในการให้น้ำชลประทานแก่พื้นที่นาข้าวควรให้ความสำคัญตั้งแต่ช่วงระยะแตกกอ เนื่องจากผลจากการทดลองปลูกต้นข้าวพบว่า การขาดน้ำในช่วงต้นของการแตกกอมีผลทำให้ต้นข้าวชะงักการเจริญเติบโตทางสรีระทั้งทางความสูงและพื้นที่ใบ

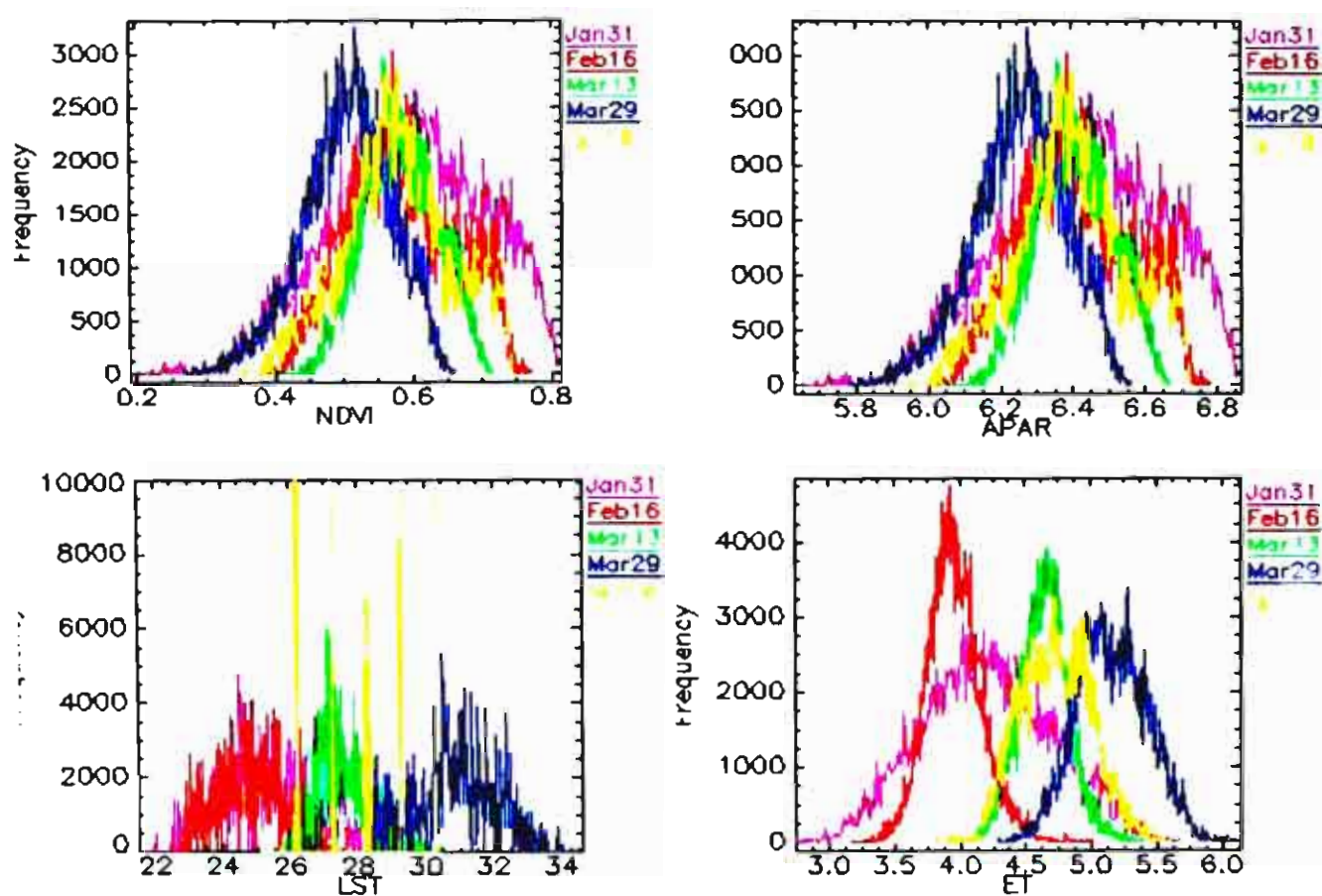
จากภาพ 18 พบว่า นาข้าวที่ระดับ NDVI หนึ่ง ๆ ไม่ได้มีค่าการคายระเหยเพียงค่าใดค่าหนึ่ง เพียงค่าเดียว แต่มีค่าการคายระเหยเป็นค่าช่วง (range) เนื่องจากการผันแปรของอุณหภูมิในแต่ละบริเวณ พื้นที่ที่มีระดับ NDVI เดียวกันแต่หากมีอุณหภูมิต่างกันย่อมมีค่าการคายระเหยต่างกัน พื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงมีค่าการคายระเหยมากกว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า พื้นที่ที่มีค่า NDVI ที่ระดับ 0.28 ซึ่งจัดเป็นระยะเตรียมแปลง (ต้นข้าวอายุ 0 วัน) มีค่าช่วงของการคายระเหยน้อยสุด (ค่าช่วง ET เท่ากับ 0.46 มิลลิเมตรต่อวัน) ส่วนต้นข้าวในระยะอายุ 1-65 วันมีค่าช่วงการคายระเหยแคบกว่าต้นข้าวในระยะอายุมากกว่า 65 วัน เนื่องจากระยะดังกล่าวเป็นช่วงว่องไว (sensitive) ของผลการให้น้ำต่อการตอบสนองการเจริญเติบโต ดังนั้นจึงเป็นช่วงที่เกษตรกรพยายามรักษาระดับการให้น้ำให้มากพอ ดังนั้นในช่วงนี้พื้นที่จึงมีความชื้นหรือน้ำในดินอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน เพื่อให้ต้นข้าวได้นำไปใช้ในการเจริญเติบโตทางใบ ส่วนพื้นที่ที่ต้นข้าวมีอายุมากกว่า 65 วัน นับเป็นช่วงที่ต้นข้าวไม่ว่องไวต่อภาวะปริมาณการให้น้ำ อย่างไรก็ตามค่าช่วงการคายระเหยที่กว้างกว่าระยะอื่น ๆ อาจเป็นผลจากสภาพความชื้นในดินที่แตกต่างกันตามพฤติกรรมการให้น้ำที่เกินพอในนาข้าวของเกษตรกรแต่ละแห่ง ซึ่งมักแตกต่างกันไปตามน้ำต้นทุนที่จัดหาเข้าสู่แปลงนาได้

ตาราง 1 ค่า NDVI และการคายระเหย (ET_{RS}) ที่คำนวณจากข้อมูล MODIS (มิลลิเมตรต่อไร่)

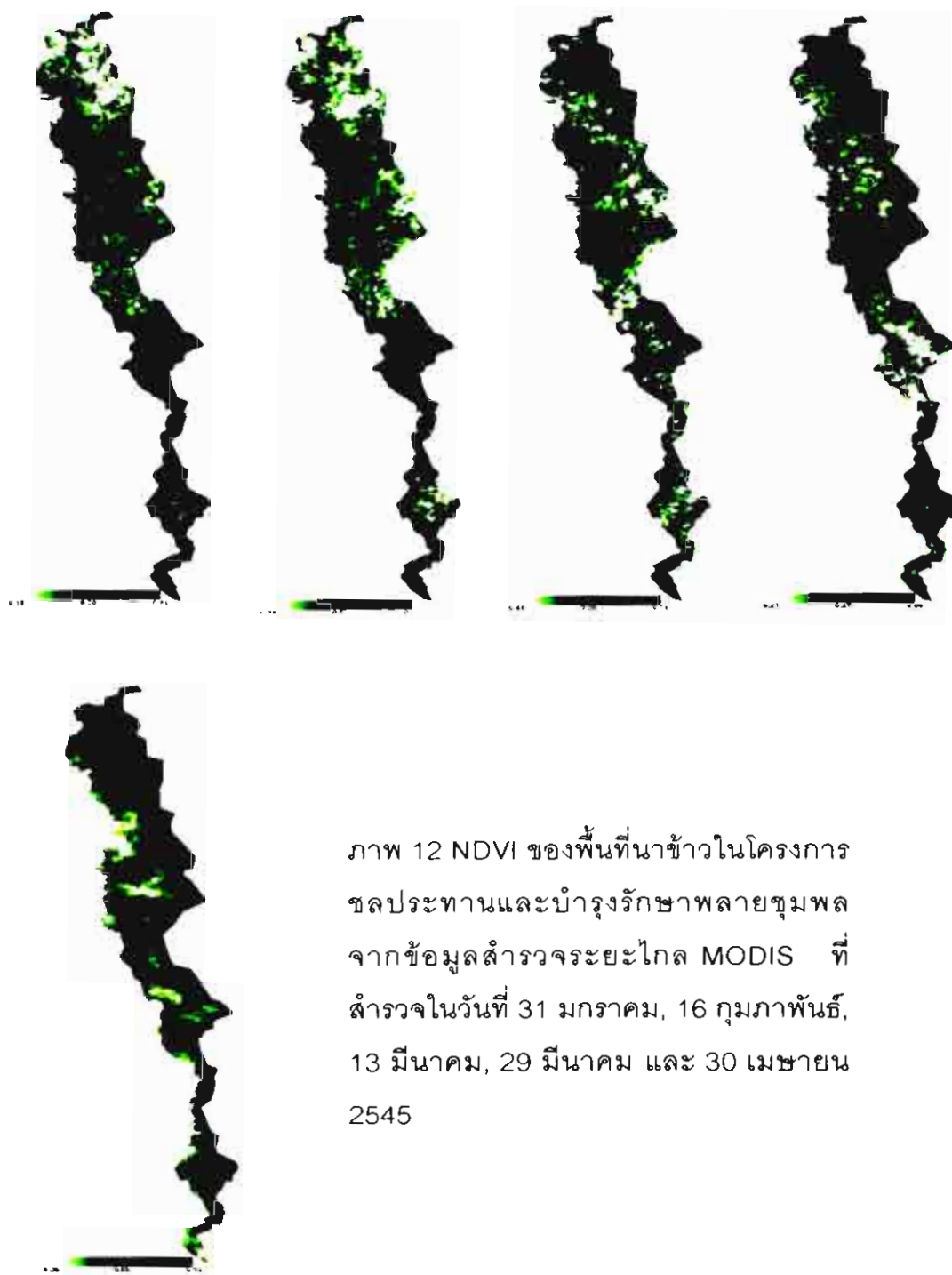
เดือน	NDVI				ET_{RS}			
	MIN	MAX	MEAN	SD	MIN	MAX	MEAN	SD
31 มกราคม 2545	0.19	0.81	0.59	0.11	2.74	5.67	4.21	0.49
16 กุมภาพันธ์ 2545	0.40	0.77	0.58	0.08	3.16	4.99	3.94	0.21
13 มีนาคม 2545	0.40	0.71	0.58	0.05	3.91	5.40	4.63	0.19
29 มีนาคม 2545	0.27	0.66	0.51	0.06	4.28	6.13	5.14	0.27
18 เมษายน 2545	0.35	0.74	0.58	0.08	3.79	5.59	4.72	0.27
เฉลี่ย	0.32	0.74	0.57	0.08	3.43	5.56	4.53	0.29

ตาราง 2 ค่า NDVI ที่จำแนกจากข้อมูล MODIS

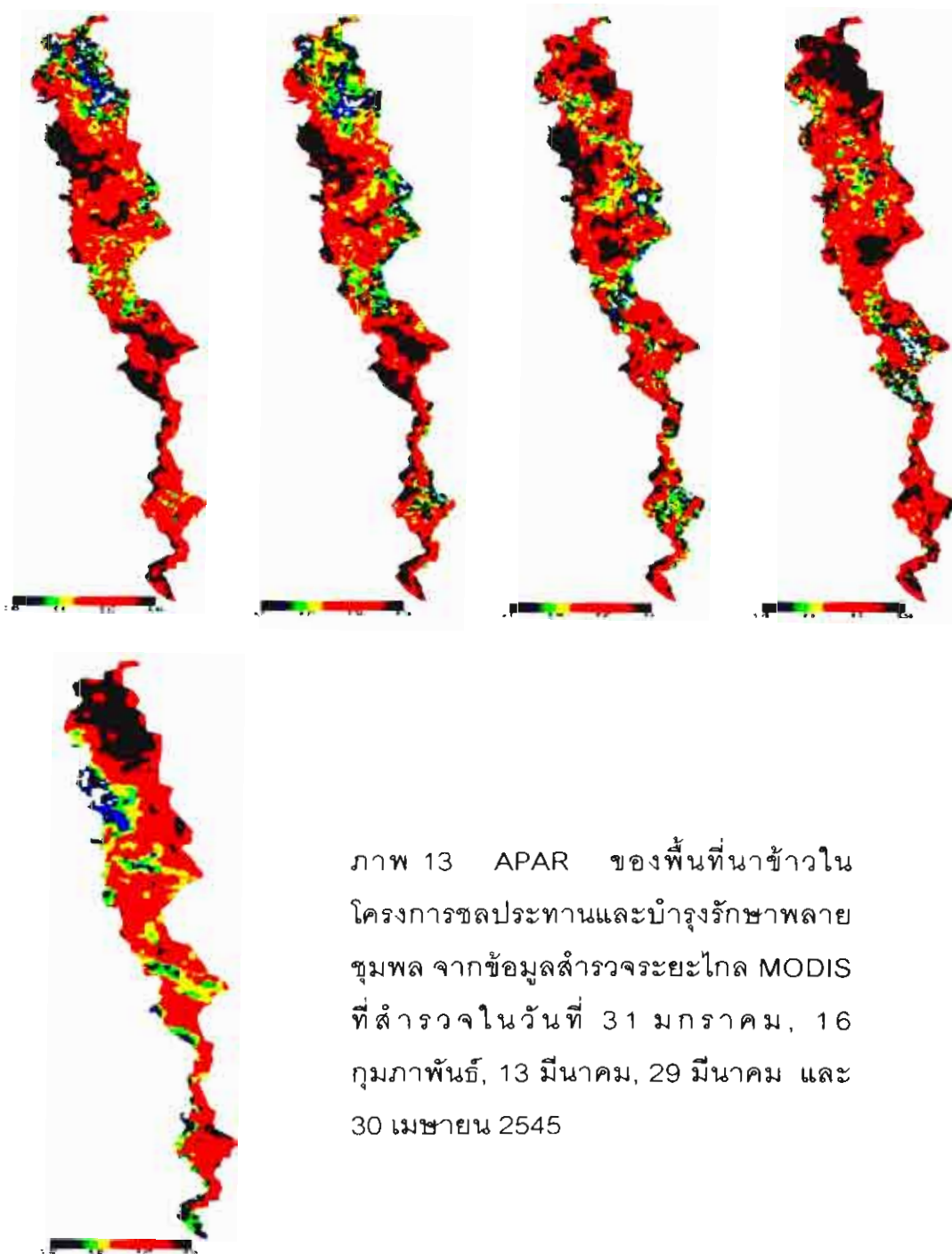
อายุ	ระยะการเจริญเติบโต	$NDVI_{min}$	$NDVI_{max}$	$NDVI_{mean}$
0	เตรียมแปลง	0.19	0.36	0.28
1-20	ต้นกล้า	0.40	0.48	0.44
21-65	แตกกอ	0.72	0.81	0.76
66-111	ตั้งท้องออกรวง	0.61	0.71	0.66
> 111	เก็บเกี่ยว	0.54	0.60	0.56



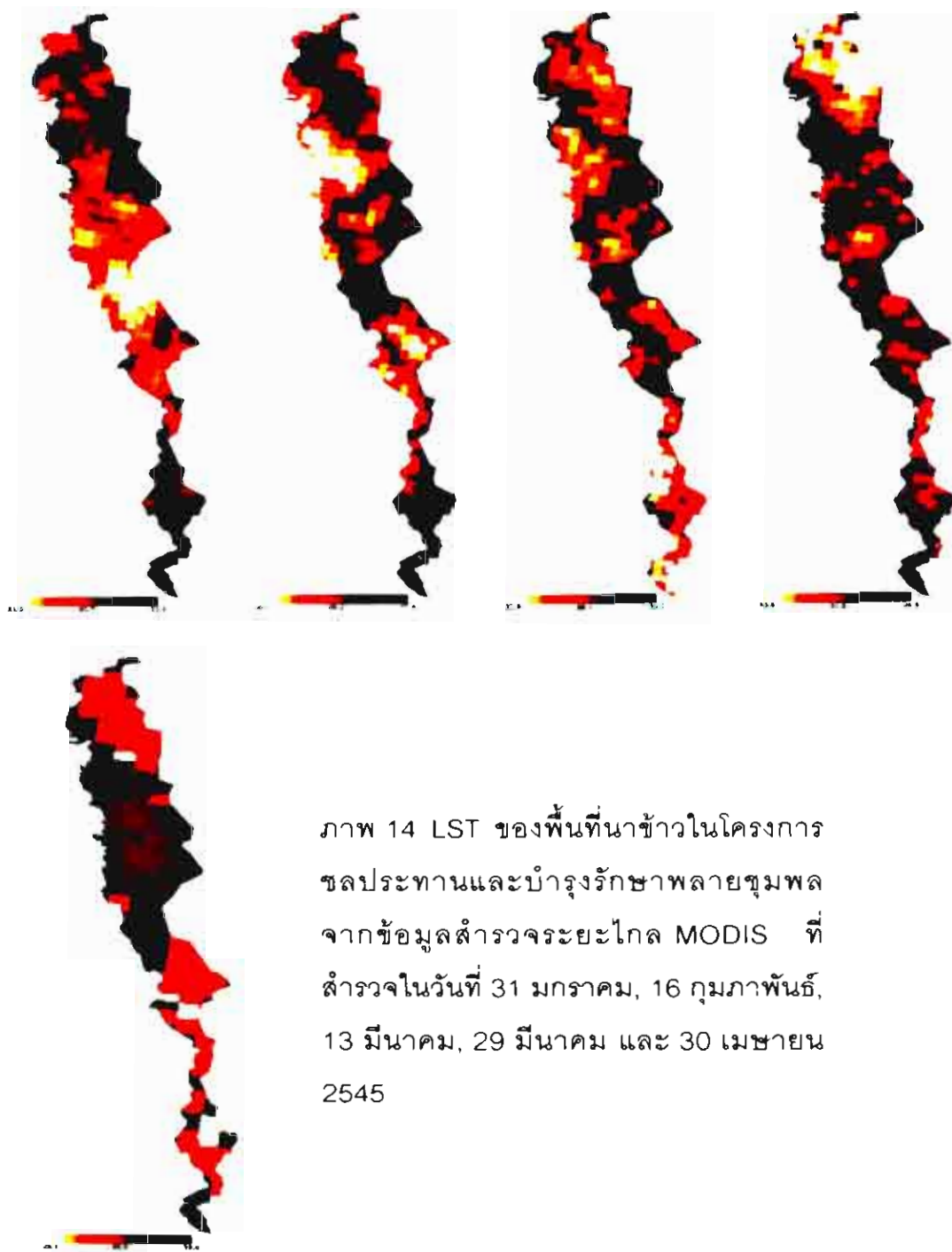
ภาพ 11 ฮิสโตแกรม (histogram) ของค่า NDVI, APAR, LST และ ET พื้นที่นาข้าวในโครงการชลประทานและบำรุงรักษาพลายชุมพล จากข้อมูลสำรวจระยะไกล MODIS ที่สำรวจในวันที่ 3 มกราคม, 16 กุมภาพันธ์, 13 มีนาคม, 29 มีนาคม และ 30



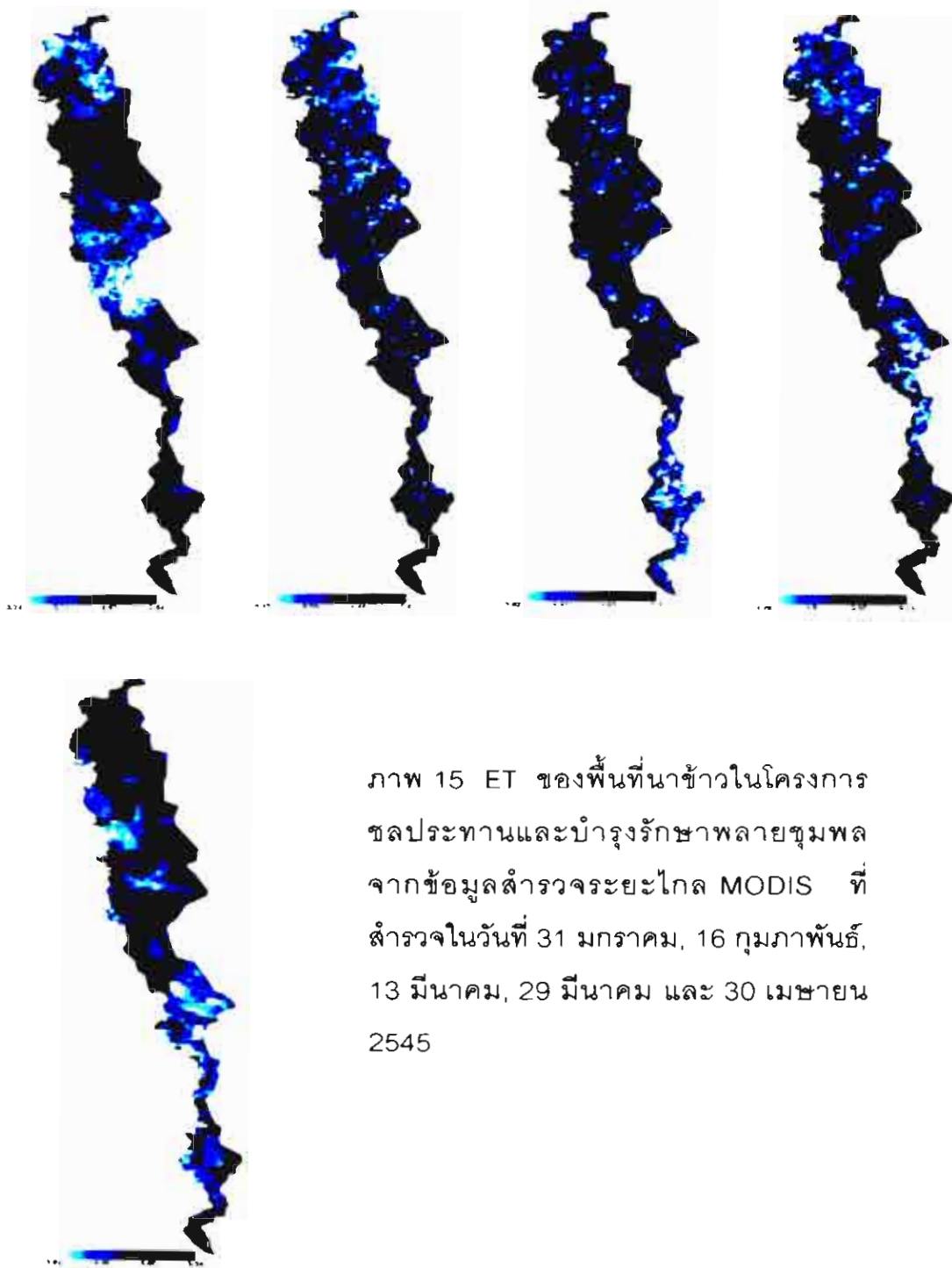
ภาพ 12 NDVI ของพื้นที่นาข้าวในโครงการ
ชลประทานและบำรุงรักษาผลผลิต
จากข้อมูลสำรวจระยะไกล MODIS ที่
สำรวจในวันที่ 31 มกราคม, 16 กุมภาพันธ์,
13 มีนาคม, 29 มีนาคม และ 30 เมษายน
2545



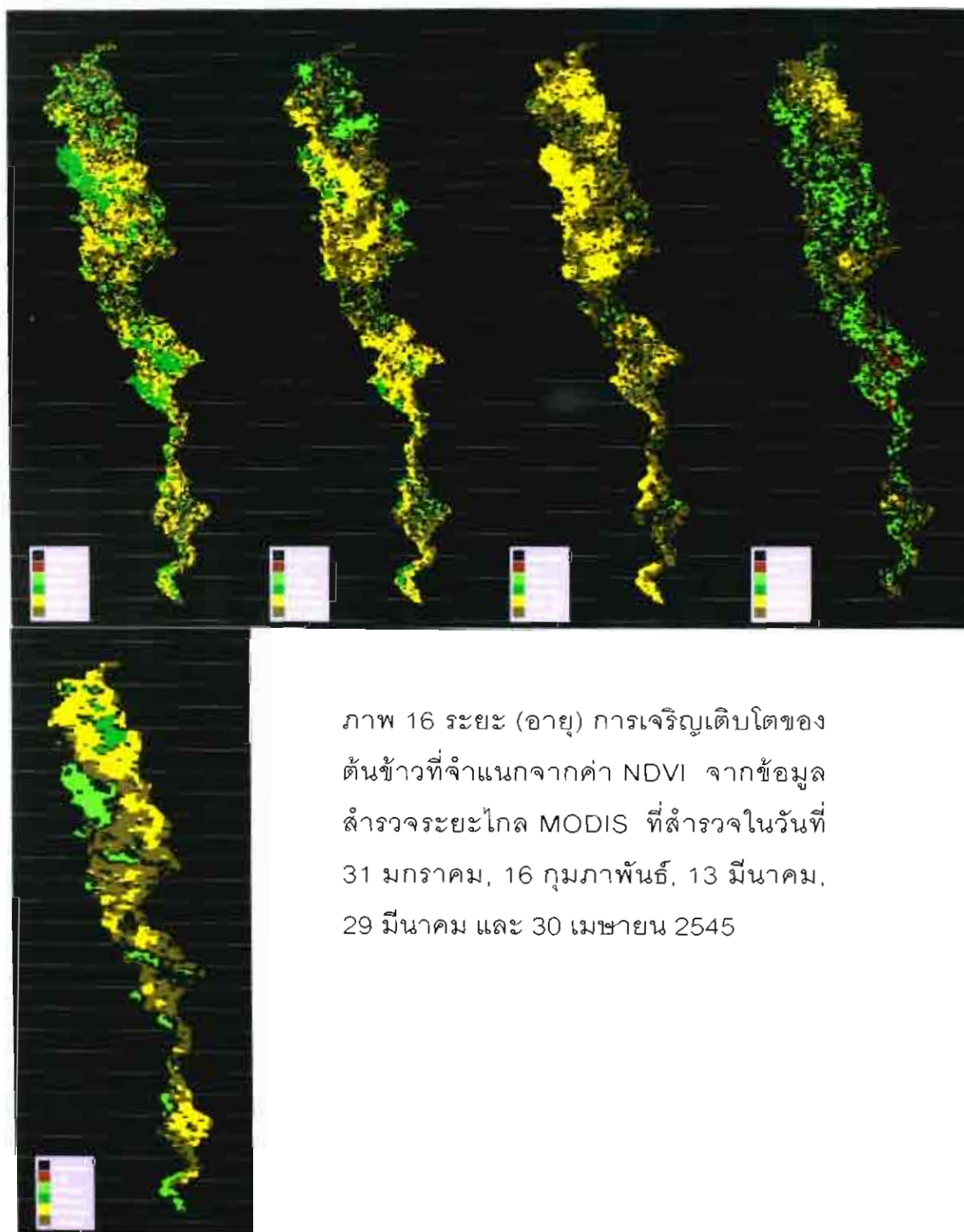
ภาพ 13 APAR ของพื้นที่นาข้าวใน
โครงการชลประทานและบำรุงรักษาพลาย
ชุมพล จากข้อมูลสำรวจระยะไกล MODIS
ที่สำรวจในวันที่ 31 มกราคม, 16
กุมภาพันธ์, 13 มีนาคม, 29 มีนาคม และ
30 เมษายน 2545



ภาพ 14 LST ของพื้นที่นาข้าวในโครงการ
ชลประทานและบำรุงรักษาพลายชุมพล
จากข้อมูลสำรวจระยะไกล MODIS ที่
สำรวจในวันที่ 31 มกราคม, 16 กุมภาพันธ์,
13 มีนาคม, 29 มีนาคม และ 30 เมษายน
2545



ภาพ 15 ET ของพื้นที่นาข้าวในโครงการชลประทานและบำรุงรักษาปลายชุมพล จากข้อมูลสำรวจระยะไกล MODIS ที่สำรวจในวันที่ 31 มกราคม, 16 กุมภาพันธ์, 13 มีนาคม, 29 มีนาคม และ 30 เมษายน 2545



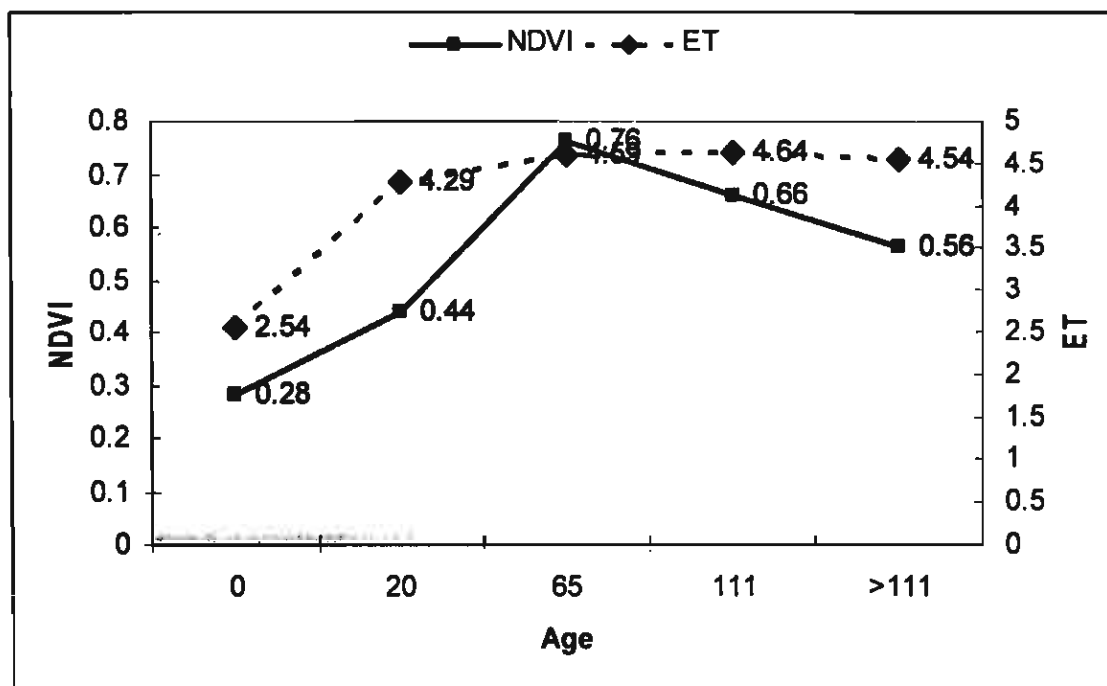
ภาพ 16 ระยะ (อายุ) การเจริญเติบโตของ
ต้นข้าวที่จำแนกจากค่า NDVI จากข้อมูล
สำรวจระยะไกล MODIS ที่สำรวจในวันที่
31 มกราคม, 16 กุมภาพันธ์, 13 มีนาคม,
29 มีนาคม และ 30 เมษายน 2545

ตาราง 3 ปริมาณ ET_{RS} (mm/day) แยกตามอายุต้นข้าว

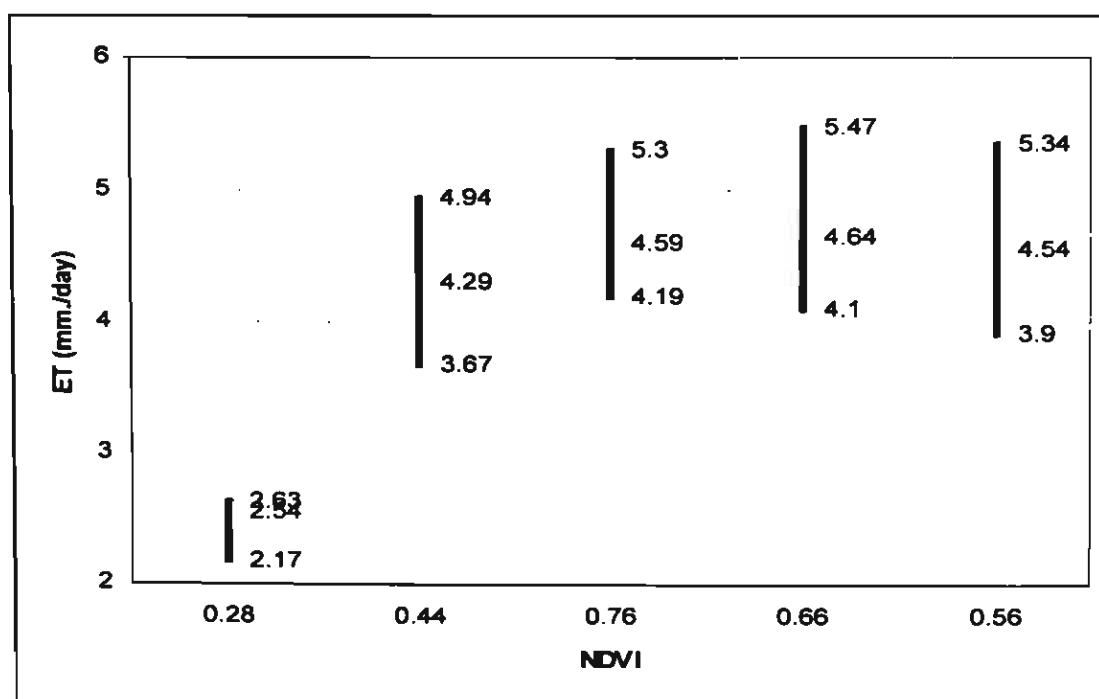
NDVI เฉลี่ย	อายุ (วัน)	วันที่	Min	Max	Mean	S.D.
0.28	0	31-ม.ค.	2.79	3.93	4.22	0.24
		16-ก.พ.	-	-	-	-
		13-มี.ค.	-	-	-	-
		29-มี.ค.	4.28	5.41	4.67	0.18
		18-เม.ย.	3.80	3.83	3.82	0.02
		เฉลี่ย	2.17	2.63	2.54	0.09
0.44	1-20	31-ม.ค.	2.94	4.77	3.77	0.35
		16-ก.พ.	3.17	4.32	3.72	0.16
		13-มี.ค.	3.92	4.91	4.42	0.20
		29-มี.ค.	4.36	5.76	5.08	0.24
		18-เม.ย.	3.96	4.95	4.48	0.21
		เฉลี่ย	3.67	4.94	4.29	0.23
0.76	21-65	31-ม.ค.	3.99	5.67	4.65	0.33
		16-ก.พ.	3.86	5.00	4.11	0.19
		13-มี.ค.	-	-	-	-
		29-มี.ค.	-	-	-	-
		18-เม.ย.	4.72	5.24	5.02	0.05
		เฉลี่ย	4.19	5.30	4.59	0.19
0.66	66-111	31-ม.ค.	3.53	5.57	4.41	0.39
		16-ก.พ.	3.60	4.87	4.03	0.18
		13-มี.ค.	4.33	5.38	4.73	0.14
		29-มี.ค.	4.89	5.92	5.13	0.18
		18-เม.ย.	4.16	5.59	4.90	0.21
		เฉลี่ย	4.10	5.47	4.64	0.22

ตาราง 3 ปริมาณ ET (mm/day) แยกตามอายุต้นข้าว (ต่อ)

NDVI เฉลี่ย	อายุ (วัน)	วันที่	Min	Max	Mean	S.D.
0.56	มากกว่า 111	31-ม.ค.	3.09	5.24	4.14	0.41
		16-ก.พ.	3.40	4.60	3.97	0.18
		13-มี.ค.	4.15	5.38	4.63	0.18
		29-มี.ค.	4.68	6.14	5.22	0.26
		18-เม.ย.	4.19	5.36	4.72	0.23
		เฉลี่ย	3.90	5.34	4.54	0.25



ภาพ 17 ค่าเฉลี่ย NDVI และ ET ตามช่วงอายุการเจริญเติบโตของต้นข้าว 5 ระยะ



ภาพ 18 ช่วงของ ET ตามค่า NDVI ที่แบ่งตามช่วงอายุการเจริญเติบโตของต้นข้าว 5 ระยะ

2. การทดลองปลูกพืชในตู้ทดลอง

หลังจากได้แบบจำลอง ET_{RS} แล้วได้นำค่า ET_{RS} ที่ได้จากแบบจำลองมาทดสอบโดยการทดลองปลูกต้นข้าวในกระถางทดลองที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว (หรือคิดเป็นพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.314 เมตร) ดังนั้น เมื่อคำนวณปริมาณการให้น้ำจากค่าเฉลี่ย ET_{RS} ต่ำสุดถึงสูงสุด ในตาราง 1 ซึ่งอยู่ในช่วงเท่ากับ 3.43 ถึง 5.56 มิลลิเมตรต่อวัน จึงมีค่าเท่ากับปริมาณการให้น้ำตั้งแต่ 108 ถึง 175 มิลลิเมตรต่อวันต่อกระถาง อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ต้องการทดสอบเพื่อลดปริมาณการใช้น้ำ จึงได้ทดลองปลูกต้นข้าวโดยให้ปริมาณน้ำ 8 ระดับ ตั้งแต่ประมาณ 7 ถึง 144 มิลลิเมตรต่อวันต่อกระถาง สำหรับช่วงปริมาณน้ำที่ทดสอบกับต้นข้าวใช้ตัวเลขประมาณการได้จากค่าความต้องการใช้น้ำของต้นข้าวแล้วนำมาปรับค่าให้เหมาะสมกับสภาพความชื้นที่สังเกตจากการทดสอบเบื้องต้น (preliminary experiment) โดยไม่ใช้ค่าจากแบบจำลอง ET_{RS} เนื่องจากแบบจำลองนี้พัฒนามาจากพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของต้นข้าว ดังนั้นปริมาณน้ำในช่วงดังกล่าวนี้จึงใช้ทดสอบกับพืชเฉพาะต้นข้าว แต่ไม่นำมาทดสอบกับต้นถั่ว

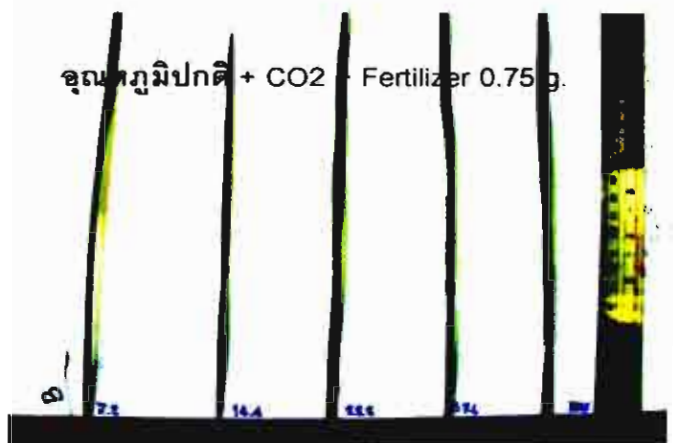
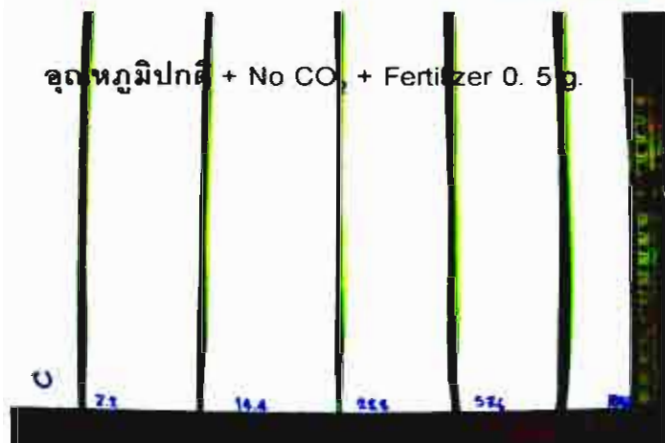
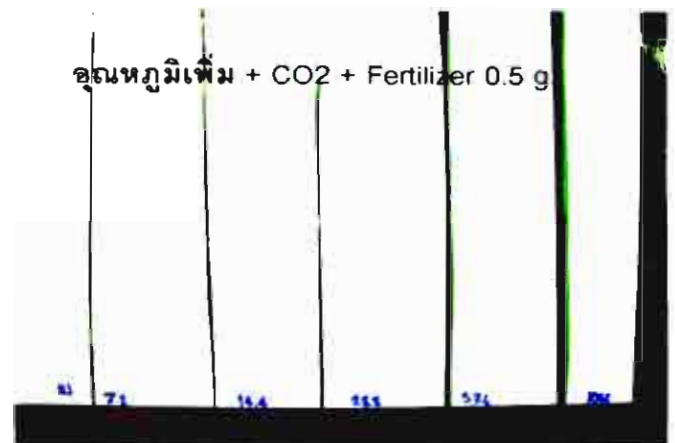
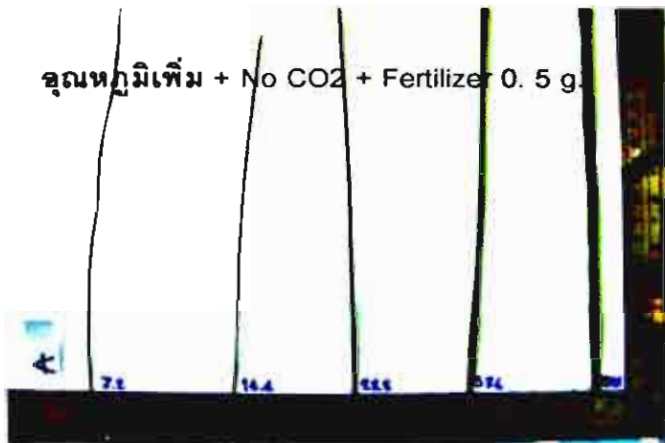
ลักษณะการเจริญเติบโตของต้นข้าว

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทดลองปลูกต้นข้าวภายใต้อุณหภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้นประมาณ 2 °C จากอุณหภูมิอากาศปกติ การทดลองครั้งเบื้องต้นเริ่มดำเนินการในเดือนพฤศจิกายน 2546 (ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศปกติเท่ากับ 25.6 °C) แล้วนำผลการทดสอบเบื้องต้นมากำหนดแผนการทดลองครั้งที่ 2 ซึ่งเริ่มในเดือนกรกฎาคม 2547 (ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศปกติเท่ากับ 29.4 °C) ผลการทดลองครั้งที่ 2 พบว่า ลักษณะการเจริญเติบโตของข้าว อันได้แก่ LAI และความสูงของต้นข้าว ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ แต่กลับพบว่าต้นข้าวชะงักการเจริญเติบโตอันเป็นผลจากภาวะขาดแคลนน้ำซึ่งสังเกตได้จากผิวดินบนมีลักษณะแห้งเพิ่มขึ้นตามจำนวนวันของการทดลอง โดยภายใต้สภาพการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิประมาณ 2 องศาเซลเซียส แต่หากยังคงให้น้ำในปริมาณเท่ากับค่าการคายระเหยปกติที่กรมชลประทานคำนวณมาจากอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนนั้น จะพบว่าต้นข้าวแสดงการชะงักการเจริญเติบโตอย่างสังเกตได้ชัดเจนภายหลังการทดลองตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2 เป็นต้นไป (หรือต้นข้าวมีอายุประมาณ 30 วัน) โดยต้นข้าวที่ปลูกในกระถางที่ได้รับปริมาณน้ำ 7.2, 14.4 และ 28.8 มิลลิเมตรต่อวัน มีขนาดพื้นที่ใบ ความสูงของต้น และความชื้นของดินบนแตกต่างจากกระถางทดลองที่ได้รับน้ำปริมาณ ตั้งแต่ 58 ถึง 144 มิลลิเมตรต่อวัน (ภาพ 20 และ 21) และภายหลังการทดลองสัปดาห์ที่ 4 (ต้นข้าวมีอายุ 55 วัน โดยประมาณ) พบว่าต้นข้าวที่ได้รับปริมาณน้ำน้อยกว่า 58 มิลลิเมตรต่อวัน จะเหี่ยวเฉาและตายไปในที่สุด (ภาพ 22 และ 23) ดังนั้นระดับปริมาณการให้น้ำขั้นต่ำที่ต้นข้าวสามารถเจริญเติบโตจนครบ 120 วัน คือ 86 มิลลิเมตรต่อวัน

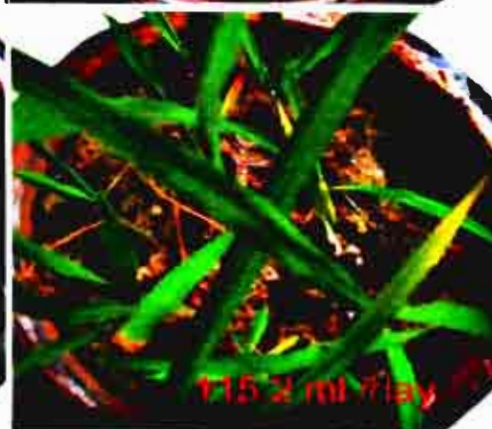
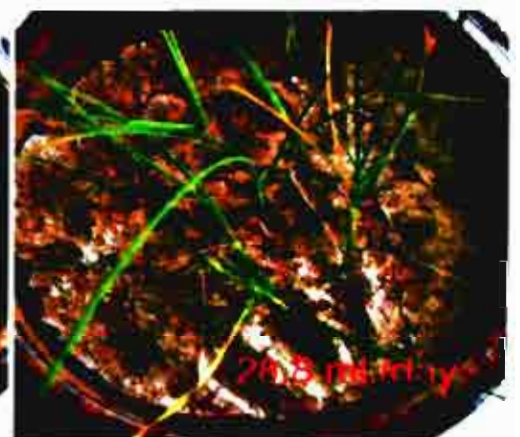
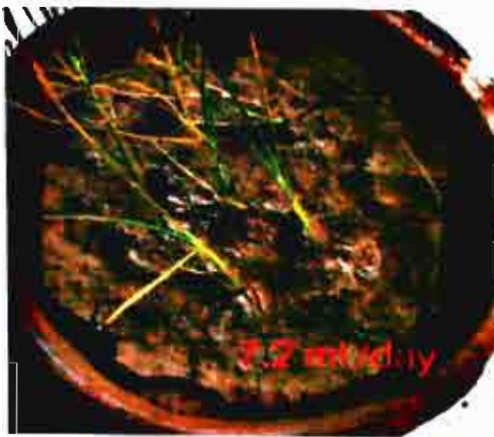
จากผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตด้านความสูงและพื้นที่ใบของต้นข้าวอายุ 20 วัน โดยทำการตรวจวัดทุก ๆ สัปดาห์ รวม 10 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อต้นข้าวมีอายุประมาณ 55 วัน

(หรืออยู่ในช่วงการเจริญเติบโตระยะแตกกอ) จะแสดงอาการชะงักการเจริญเติบโตทางความสูง และเมื่อต้นข้าวมีอายุตั้งแต่ 68 วัน (หรืออยู่ในช่วงการเจริญเติบโตระยะการตั้งท้องออกรวง) จะแสดงอาการชะงักการเจริญเติบโตทางทั้งด้านความสูงและพื้นที่ใบ ดังภาพ 22 และภาพ 23 ความแตกต่างของการเจริญเติบโตยิ่งแสดงผลอย่างชัดเจนมากขึ้นตามจำนวนวันของการทดลอง โดยปริมาณการให้น้ำกับการเจริญเติบโตทางความสูงและพื้นที่ใบมีความสัมพันธ์ในลักษณะกราฟเส้นโค้ง จากภาพ 24 แสดงให้เห็นว่า ต้นข้าวที่ได้รับปริมาณน้ำน้อยกว่า 58 มิลลิลิตรต่อวัน จะไม่สามารถทนทานและเจริญเติบโตปกติจนครบ 120 วันได้ ส่วนที่ระดับ 86, 115 และ 144 มิลลิลิตรต่อวัน ไม่ทำให้การเจริญเติบโตด้านความสูงแตกต่างอย่างเด่นชัด แต่ที่ระดับน้ำดังกล่าวแสดงผลอย่างชัดเจนต่อการเจริญเติบโตทางพื้นที่ใบ

จากตาราง 7 แสดงให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมของอากาศ อันได้แก่ อุณหภูมิ แสง รวมทั้งลมระหว่างในตู้และนอกตู้ทำให้พื้นที่ใบและปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากตาราง 17 แม้ว่าความชื้นในดินกระถางทดลองในและนอกตู้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ผลแสดงให้เห็นว่าความชื้นในดินของกระถางในตู้มากกว่าของกระถางภายนอกตู้ อยู่ประมาณ 8.23% ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากอิทธิพลของลมเป็นประการสำคัญกว่าด้านความร้อนจากความเข้มแสง เพราะจากการตรวจวัดอุณหภูมิอากาศพบว่าอุณหภูมิอากาศในตู้สูงกว่าภายนอกประมาณ 2°C นั่นคือ อิทธิพลของลมทำให้สูญเสียความชื้นในดินไปประมาณ 8.23 % ซึ่งเมื่อพิจารณาตาราง 8 พบว่า พบว่าความชื้นในดินระหว่างกระถางในและนอกตู้แตกต่างกันอยู่ในช่วง 3.47 ถึง 11.36 % โดยที่ระดับการให้น้ำเพิ่มขึ้นทำให้ความแตกต่างของความชื้นในดินเพิ่มขึ้น ที่ระดับปริมาณการให้น้ำ 57 มิลลิลิตรต่อวัน มีความต่างของความชื้นในดินระหว่างในและนอกตู้ต่ำสุดเนื่องจากเป็นปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดภาวะความชื้นในดินต่ำสุด อนุภาคดินจึงจับยึดกับโมเลกุลน้ำในลักษณะน้ำเยื่อ (hygroscopic moisture) ซึ่งทำให้การสูญเสียน้ำโดยการคายระเหยออกจากระบบยากขึ้น จากตาราง 7 และ 8 จึงชี้ให้เห็นว่า อิทธิพลของลมจะมีผลต่อค่าการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองข้อมูลระยะไกลเฉลี่ยอยู่ในประมาณ 8.23 % หรือเท่ากับ 0.28 ถึง 0.45 มิลลิเมตรต่อวัน (คิดจากข้อมูล ในตาราง 1 ซึ่งอยู่ในช่วงเท่ากับ 3.43 ถึง 5.56 มิลลิเมตรต่อวัน) แต่หากกำจัดอิทธิพลของลมโดยการทดลองในตู้ พบว่า ปริมาณการให้น้ำที่ระดับ 86 มิลลิลิตรต่อวัน แม้ในสภาพอุณหภูมิที่สูงขึ้น ประมาณ 2°C ก็เพียงพอต่อการเจริญเติบโตทางพื้นที่ใบและความสูง อย่างไรก็ตามระดับปริมาณการให้น้ำขั้นต่ำที่เหมาะสมที่สุดคือ 115 มิลลิลิตรต่อวัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากแบบจำลองแล้ว ถือเป็นระดับที่มากกว่าปริมาณที่ได้จากแบบจำลองอยู่ประมาณ 6% (เทียบกับ ค่าเฉลี่ย ET_{rs} ต่ำสุดที่ 3.43) และน้อยกว่าอยู่ประมาณ 34% (เทียบกับ ค่าเฉลี่ย ET_{rs} สูงสุดที่ 5.56)



ภาพ 22 ลักษณะการเจริญเติบโตด้านพื้นที่ใบของต้นข้าวอายุ 6 สัปดาห์
(จากขวาไปซ้ายให้น้ำ 7.2, 14.4, 28.8, 57.6, และ 115.2 มิลลิลิตรต่อวัน)



ภาพ 23 สัดส่วนการปกคลุมของพื้นที่ใบของต้นข้าวที่เจริญเติบโตภายใต้การได้รับปริมาณน้ำแตกต่างกัน เมื่อต้นข้าวมีอายุ 6 สัปดาห์

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ปริมาณน้ำที่ให้แก่ต้นข้าวมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความสูงของต้นและพื้นที่ใบ แต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ (ตาราง 4) ในขณะที่ปริมาณการให้ปุ๋ยให้ผลในทางตรงกันข้าม (ตาราง 5) ตั้งแต่ระดับการให้น้ำตั้งแต่ 86 มิลลิลิตร ทำให้การเจริญเติบโตทางสรีระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และปริมาณให้น้ำที่ 144 มิลลิลิตร ทำให้การเจริญเติบโตทางสรีระสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความชื้นในดิน ส่วนปริมาณการให้ปุ๋ยตั้งแต่ 1.5 กรัมต่อกระถาง (หรือประมาณ 75 กิโลกรัมต่อไร่) ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และที่ปริมาณการให้ปุ๋ยสูงสุดคือ 2.5 กรัมต่อกระถาง (หรือประมาณ 125 กิโลกรัมต่อไร่) ทำให้ค่าคลอโรฟิลล์สูงสุด ส่วนการได้รับก๊าซ CO₂ พบว่า ทำให้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความชื้นดินและความสูงของลำต้นของพืชทดลองในตู้ แต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อพื้นที่ใบและปริมาณคลอโรฟิลล์ (ตาราง 6) โดยต้นข้าวในตู้ทดลองที่ได้รับ CO₂ มีค่าเฉลี่ยความสูงเท่ากับ 34.58 cm. แต่ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าก๊าซ C₃ มีความเย็นจึงทำให้ใบลดอุณหภูมิภายในตู้ทดลอง (ประมาณ 0.5 °C ซึ่งมีผลต่อการระเหยของน้ำ) ผลการทดลองในตาราง 6 แสดงให้เห็นว่าการปลูกในตู้และนอกตู้มีผลทำให้ขนาดพื้นที่ใบและปริมาณคลอโรฟิลล์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยต้นข้าวที่ทดลองในตู้ซึ่งได้รับแสงจากหลอดไฟเมธาฮาไลด์ ที่มีค่าความสว่างประมาณ 9600 LUX พบว่า มีพื้นที่ใบเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.68-8.98 m²/m² และ ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ บี และเอบี เฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.13-2.20, 0.926-0.978, 3.06-3.18 ตามลำดับ ในขณะที่ปลูกนอกตู้ซึ่งได้รับแสงแดด ซึ่งมีค่าความสว่างประมาณ 18,000-83,000 LUX (ทั้งนี้ในแต่ละวันและแต่ละเวลาความสว่างมีความผันแปรมาก) พบว่า มีพื้นที่ใบเฉลี่ย 11.67 m²/m² และ ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ บี และเอบี เฉลี่ย 1.76, 0.70, 2.46 ตามลำดับ จึงแสดงให้เห็นว่าความชื้นไม่ได้มีผลต่อพื้นที่ใบข้าว แต่แสงไฟเมธาฮาไลด์ ที่ติดตั้งในตู้ทดลองที่มีผลต่อพื้นที่ใบทำให้การเจริญเติบโตทางพื้นที่ใบลดลงและปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการให้น้ำตั้งแต่ 7 ถึง 28 มิลลิลิตรต่อวันต่อกระถาง นั้นไม่เพียงพอต่อความต้องการในการเจริญเติบโตของต้นข้าว โดยต้นข้าวเริ่มแสดงการชะงักการเจริญเติบโตและเหี่ยวเฉาตายตั้งแต่สัปดาห์ที่ 6 ของการทดลอง หรือที่ต้นข้าวอายุได้ 55 วันโดยประมาณ ซึ่งเป็นระยะการเจริญเติบโตในช่วงแตกกอ ส่วนปริมาณการให้น้ำตั้งแต่ 57 มิลลิลิตรต่อวันต่อกระถาง ขึ้นไป พบว่า ต้นข้าวสามารถเจริญเติบโตได้ตลอดการทดลองระยะเวลา 120 วัน โดยผลการวิเคราะห์สถิติโดยวิธี ANOVA และ Duncan สรุปได้ว่า ปริมาณการให้น้ำที่ 86 และ 144 มิลลิลิตรต่อวัน ทำให้ความสูงและพื้นที่ใบของต้นข้าวเพิ่มขึ้นจากปริมาณการให้น้ำที่ระดับอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตได้ดีทั้งทางความสูงและพื้นที่ใบคือที่ปริมาณเท่ากับ 115 มิลลิลิตรต่อวันต่อ ซึ่งเป็ปริมาณการให้น้ำที่มากกว่าค่า ET_{RS} ที่คำนวณได้จากแบบจำลองเท่ากับ 0.93 เท่า (คิดจาก ET_{RS} ต่ำสุดของการเจริญเติบโตคือ 3.43 มิลลิเมตรต่อวัน หรือเท่ากับปริมาณการให้น้ำ 108 มิลลิลิตรต่อวัน)

จากภาพถ่ายเชิงเลขที่ถ่ายจากมุมบนของกระถางทดลอง ด้วยกล้องดิจิทัล ยี่ห้อ CANON รุ่น G2 ที่รายละเอียด 4 ล้านพิกเซล เมื่อนำภาพเชิงเลขมาวิเคราะห์ภาพตัดตามขวาง (profile) ดังภาพ 25 เพื่อศึกษาการสะท้อนของแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน ของข้อมูลภาพเชิงเลขที่บันทึกจากมุมบนของกระถาง ผลการศึกษา พบว่า ที่ปริมาณการให้น้ำที่ระดับ 115 มิลลิลิตร ข้อมูลภาพสามารถแยกบันทึกตามการสะท้อนของแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน ของใบข้าวที่เจริญเติบโต โดยมี profile ของตามการสะท้อนของแสงสีเขียวมากกว่าแสงสีแดงและน้ำเงิน และเมื่อศึกษาค่าการสะท้อนตามส่วนต่าง ๆ ของใบได้ผลดังภาพ 26 ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความเขียวแตกต่างกันตามตำแหน่งใบและตามการแก่ของใบสามารถแยกความแตกต่างของค่าการสะท้อนแสง สีแดง เขียว และน้ำเงิน ได้โดยใช้การวิเคราะห์จากข้อมูลภาพเชิงเลขที่บันทึกด้วยกล้องดิจิทัล

ลักษณะการเจริญเติบโตของต้นถั่ว

ในลักษณะเดียวกันกับการทดลองกับต้นข้าว ในการศึกษานี้ได้ทดลองกับต้นถั่วพันธุ์เชียงใหม่ 60 ผลการศึกษาลักษณะการเจริญเติบโตของต้นถั่ว พบว่า ปริมาณน้ำและการให้ก๊าซ CO_2 ที่ให้แก่ต้นถั่วไม่มีผลต่อความสูงของต้น พื้นที่ใบ และปริมาณคลอโรฟิลล์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 4 และ ตาราง 5) ผลการทดลองในตาราง 6 แสดงให้เห็นว่าการปลูกในตู้และนอกตู้มีผลทำให้ความสูง ขนาดพื้นที่ใบและปริมาณคลอโรฟิลล์แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยต้นถั่วที่ทดลองในตู้ซึ่งได้รับแสงจากหลอดไฟเมธาฮาไลด์มีความสูงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 97.94-103.38 cm. พื้นที่ใบเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.94-8.70 m^2/m^2 และ ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ บี และเอบี เฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.72-1.80, 0.736-0.786, และ 2.52-2.73 ตามลำดับ ในขณะที่ปลูกนอกตู้ซึ่งได้รับแสงแดดมีความสูงเฉลี่ย 55.74 cm. พื้นที่ใบเฉลี่ย 16.97 m^2/m^2 และ ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ บี และเอบี เฉลี่ย 1.39, 0.538, และ 1.93 ตามลำดับ จึงแสดงให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมอากาศในตู้ทำให้ความสูงและปริมาณคลอโรฟิลล์สูงกว่าสภาพแวดล้อมอากาศนอกตู้ แต่ทำให้พื้นที่ใบต่ำกว่าเล็กกว่าภายนอกตู้ จากการที่ความชื้นในและนอกตู้ทดลองไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าความชื้นไม่ได้มีผลต่อลักษณะการเจริญเติบโตของต้นถั่ว แต่แสงไฟเมธาฮาไลด์ที่ติดตั้งในตู้ทดลองมีผลต่อลักษณะการเจริญเติบโตของต้นถั่ว

ผลการทดลองสรุปได้ว่าปัจจัยด้านปริมาณน้ำมีผลต่อการเจริญเติบโตทางความสูงและดัชนีพื้นที่ใบมากกว่าปัจจัยด้านปุ๋ยและก๊าซ CO_2 อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อมูลการทดลองให้ก๊าซนี้เป็นผลการทดลองให้ก๊าซเพียงวันละ 4 ชั่วโมง ซึ่งอาจเป็นปริมาณก๊าซที่ยังไม่มากเพียงพอที่จะมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชทดลอง

ตาราง 4 ผลของปริมาณน้ำที่มีต่อความชื้นและลักษณะการเจริญเติบโต (N= 10)

Water (ml.)	พืช	Soil Moist. (%)	Height (cm.)	LAI (m ²)	Chlo _a	Chlo _b	Chlo _{ab}
58	ข้าว	15.62 ^a	19.44 ^a	7.64 ^a	2.02 ^{ns}	.855 ^{ns}	2.87 ^{ns}
	ถั่ว	17.99 ^{ns}	78.94 ^{ns}	11.20 ^{ns}	1.69 ^{ns}	.733 ^{ns}	2.55 ^{ns}
86	ข้าว	22.50 ^b	25.22 ^b	9.25 ^{ab}	2.07 ^{ns}	.874 ^{ns}	2.94 ^{ns}
	ถั่ว	22.73 ^{ns}	94.63 ^{ns}	9.89 ^{ns}	1.61 ^{ns}	.654 ^{ns}	2.29 ^{ns}
115	ข้าว	24.75 ^b	27.74 ^b	11.19 ^b	1.90 ^{ns}	.799 ^{ns}	2.70 ^{ns}
	ถั่ว	23.56 ^{ns}	85.53 ^{ns}	10.98 ^{ns}	1.66 ^{ns}	.697 ^{ns}	2.42 ^{ns}
144	ข้าว	29.41 ^c	31.26 ^c	11.26 ^b	1.90 ^{ns}	.803 ^{ns}	2.70 ^{ns}
	ถั่ว	25.15 ^{ns}	85.64 ^{ns}	11.40 ^{ns}	1.57 ^{ns}	.638 ^{ns}	2.27 ^{ns}

ตาราง 5 ผลของปริมาณปุ๋ยที่มีต่อความชื้นและลักษณะการเจริญเติบโต (N= 8)

Fertilizer (g.)	พืช	Soil Moist. (%)	Height (cm.)	LAI (m ²)	Chlo _a	Chlo _b	Chlo _{ab}
0.5	ข้าว	21.40 ^{ns}	23.48 ^{ns}	9.04 ^{ns}	1.78 ^a	.73 ^a	2.50 ^a
	ถั่ว	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.0	ข้าว	22.32 ^{ns}	26.40 ^{ns}	10.45 ^{ns}	1.85 ^a	.76 ^a	2.62 ^a
	ถั่ว	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1.5	ข้าว	23.80 ^{ns}	25.42 ^{ns}	9.80 ^{ns}	2.00 ^{ab}	.84 ^{ab}	2.84 ^{ab}
	ถั่ว	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2.0	ข้าว	23.91 ^{ns}	25.41 ^{ns}	9.76 ^{ns}	2.04 ^{ab}	.87 ^{ab}	2.92 ^{ab}
	ถั่ว	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2.5	ข้าว	23.91 ^{ns}	28.85 ^{ns}	10.14 ^{ns}	2.19 ^b	.96 ^b	3.15 ^b
	ถั่ว	NA	NA	NA	NA	NA	NA

ตาราง 6 ผลของอากาศ (ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ที่มีต่อความชื้น
และลักษณะการเจริญเติบโตของต้นข้าวและต้นถั่ว (N= 10)

Treatment	พืช	Soil Moist. (%)	Height (cm.)	LAI (m ²)	Chlo _a	Chlo _b	Chlo _{ab}
Chamber CO ₂	ข้าว	34.39 ^c	34.58 ^b	8.98 ^a	2.13 ^b	.926 ^b	3.06 ^b
	ถั่ว	27.57 ^a	103.38 ^b	8.70 ^a	1.72 ^b	.736 ^b	2.52 ^b
Chamber	ข้าว	24.78 ^b	25.19 ^a	7.68 ^a	2.20 ^b	.978 ^b	3.18 ^b
	ถั่ว	25.48 ^a	97.94 ^b	6.94 ^a	1.80 ^b	.786 ^b	2.73 ^b
Outdoor	ข้าว	18.96 ^a	24.29 ^a	11.67 ^b	1.76 ^a	.700 ^a	2.46 ^a
	ถั่ว	21.44 ^a	55.74 ^a	16.97 ^b	1.39 ^a	.538 ^a	1.93 ^a

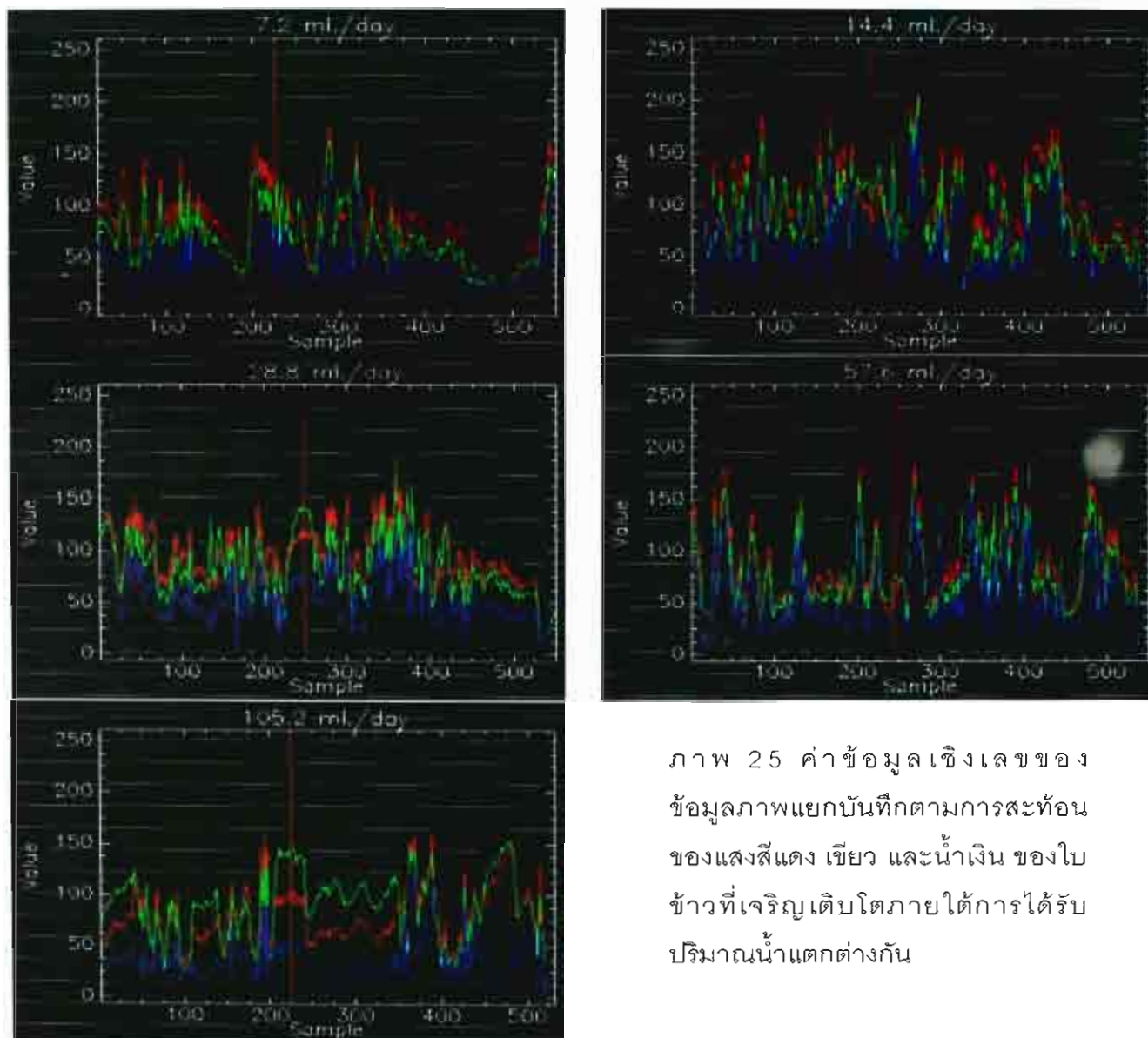
ตาราง 7 ผลของสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกตู้ที่มีต่อความชื้น
และลักษณะการเจริญเติบโตของต้นข้าว (N= 20)

Variables	Chamber	Mean	Std. Deviation
Height (cm.)	in	27.54	5.85
	out	24.28	4.67
LAI (m ² /m ²)	in	8.00*	1.49
	out	11.66*	2.33
Soil moisture(%)	in	27.18	6.59
	out	18.95	4.47
Chl-a	in	2.18*	0.12
	out	1.76*	0.23
Chl-b	in	0.96	0.07
	out	0.70	0.12
Chl-ab	in	3.15	0.20
	out	2.46	0.35
Total N (%)	in	0.43	0.08
	out	0.37	0.07

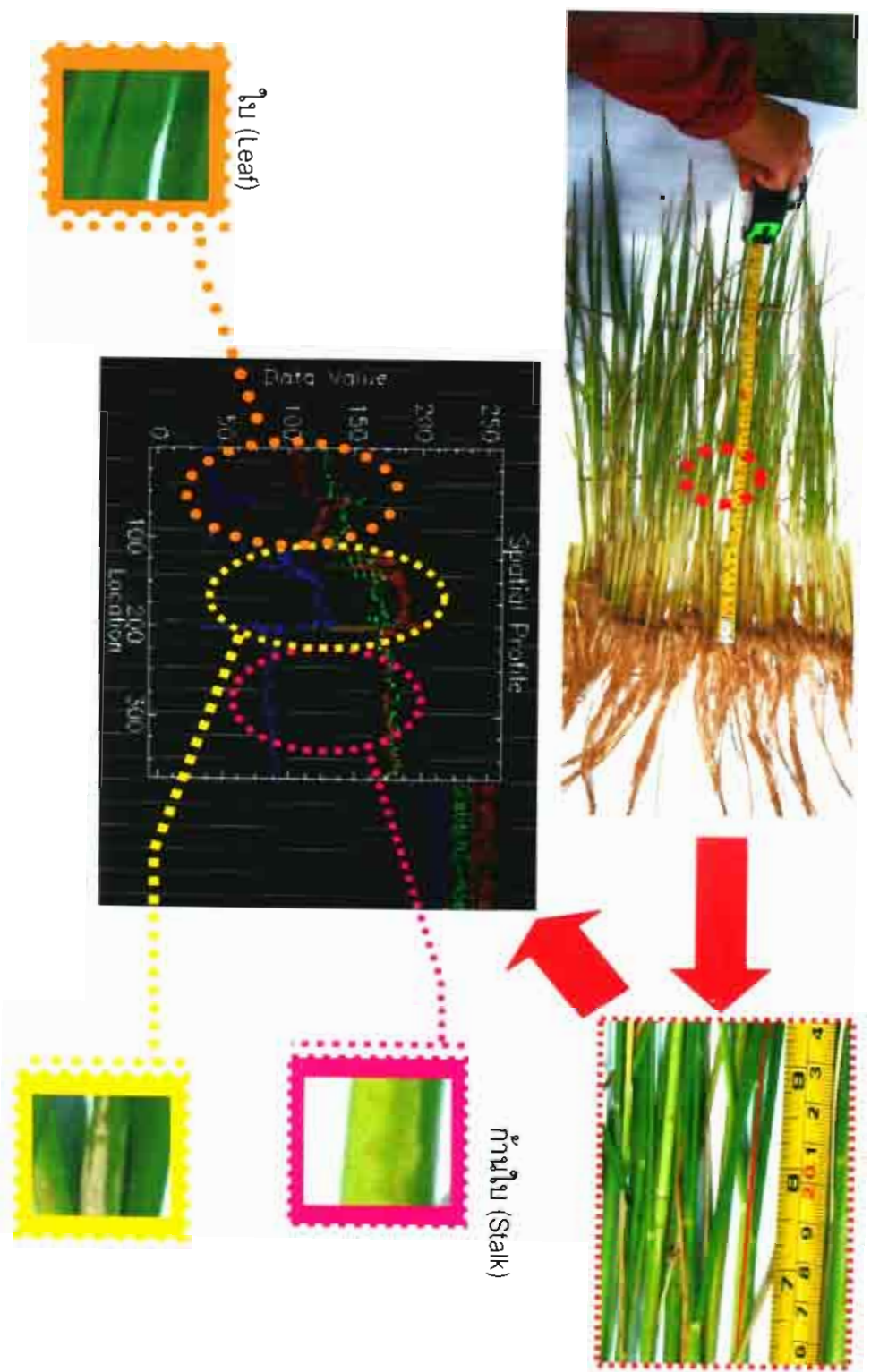
หมายเหตุ * = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตาราง 8 ผลของสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกตู้ที่ระดับการให้น้ำต่างกันมีต่อความชื้น
และลักษณะการเจริญเติบโตของต้นข้าว (N= 5)

environment		%soil moisture	Height (cm.)	LAI (m ² /m ²)	Chl-a	Chl-b	Chl-ab	Total N (%)
chamber	ml.							
in	57(2)	17.36 ^b	19.34 ^a	6.28 ^a	2.16 ^b	0.96 ^b	3.13 ^b	0.39 ^{ab}
	86(3)	28.18 ^e	28.03 ^b	7.87 ^b	2.29 ^b	1.02 ^b	3.31 ^b	0.49 ^b
	115(4)	28.81 ^e	28.21 ^b	8.90 ^b	2.16 ^b	0.95 ^b	3.11 ^b	0.41 ^{ab}
	144(6)	34.39 ^f	34.58 ^c	8.98 ^b	2.13 ^b	0.93 ^b	3.06 ^b	0.44 ^{ab}
out	57(7)	13.89 ^a	19.53 ^a	9.01 ^b	1.88 ^a	0.74 ^a	2.62 ^a	0.37 ^a
	86(8)	16.82 ^b	22.41 ^a	10.63 ^c	1.85 ^a	0.73 ^a	2.57 ^a	0.36 ^a
	115(9)	20.69 ^c	27.28 ^b	13.48 ^d	1.65 ^a	0.65 ^a	2.29 ^a	0.39 ^{ab}
	144(10)	24.43 ^d	27.93 ^b	13.55 ^d	1.67 ^a	0.68 ^a	2.35 ^a	0.38 ^a



ภาพ 25 ค่าข้อมูลเชิงเลขของ
ข้อมูลภาพแยกบันทึกตามการสะท้อน
ของแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน ของใบ
ข้าวที่เจริญเติบโตภายใต้การได้รับ
ปริมาณน้ำแตกต่างกัน



ภาพ 26 การวัดความสูงและการแสดงค่าการสะท้อนของคลื่นแสงในบริเวณ ใบข้าว และก้านข้าว

สรุปผล

1. ข้อมูลสำรวจจากระยะไกลจากดาวเทียม Terra/MODIS เมื่อนำมาคำนวณค่า อุณหภูมิพื้นผิว (LST) และค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) แล้ว สามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองการคายระเหยจากระยะไกลได้ ดังสมการด้านล่าง

$$ET_{RS} = (6.4327[0.0135 (LST + 17.78) APAR_{RS} [a / (595.5 - 0.55 LST)]] - 5.756$$

$$LST = BT_1 + 1.11 (BT_1 - BT_2) - 273$$

$$APAR_{RS} = 1.9788NDVI_{RS} + 5.2536$$

2. จากการทดสอบแบบจำลองการคายระเหยน้ำของต้นข้าวจากข้อมูลสำรวจจากระยะไกล พบว่ายังมีค่าประมาณที่ได้จากแบบจำลองต่ำกว่าปริมาณที่พืชได้น้ำในระดับการเจริญปกติอยู่ 0.93 เท่า อันเนื่องมาจากแบบจำลองยังไม่ได้นำอิทธิพลของลมเข้ามาคำนวณในแบบจำลองนี้

3. ปริมาณการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองข้อมูลระยะไกลมีค่าอยู่ในช่วง 3.43 ถึง 5.56 มิลลิเมตรต่อวัน หรือเท่ากับปริมาณการให้น้ำตั้งแต่ 108 ถึง 175 มิลลิลิตรต่อวันต่อเนื้อที่กระถาง ผลการทดสอบที่ควบคุมอิทธิพลของลมโดยการทดลองในตู้ทดลอง แต่เพิ่มอุณหภูมิของอากาศในตู้ขึ้นประมาณ 2 องศาเซลเซียส พบว่า ปริมาณการให้น้ำตั้งแต่ 115 มิลลิลิตรต่อวัน จึงจะทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตทางใบและความสูงได้ปกติจนกระทั่งออกรวง

4. ปริมาณการให้น้ำมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการเจริญเติบโตทางสรีระวิทยาและปริมาณการให้ปุ๋ยมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ของพืชทั้งต้นข้าวและต้นถั่ว ส่วนการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ในผลการศึกษานี้ยังไม่พบว่ามีผลต่อสรีระวิทยาและปริมาณคลอโรฟิลล์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5. การศึกษาเบื้องต้น พบความเป็นไปได้ในการใช้ข้อมูลภาพที่บันทึกจากกล้องดิจิตอลเพื่อแยกพื้นที่สีเขียวของใบออกจากดิน และแยกระดับความเขียวที่ส่วนต่าง ๆ ของใบ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ภาวะการขาดน้ำและ/หรือภาวะการให้ปุ๋ยที่มากเกินไป

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. ได้แบบจำลองการคายระเหยน้ำของต้นข้าวจากข้อมูลสำรวจจากระยะไกลที่มีการปรับแก้แล้ว จากแบบจำลองการคายระเหยน้ำของ Hargreave ทำให้มีความเหมาะสมกับข้อมูลภูมิอากาศของประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดพิษณุโลก
2. สามารถใช้แบบจำลองการคายระเหยน้ำของต้นข้าวจากข้อมูลสำรวจจากระยะไกล ในการจัดสรรปริมาณการให้น้ำชลประทานให้เหมาะสมกับสภาพการเพาะปลูกของเกษตรกร อันจะช่วยให้การจัดสรรน้ำชลประทานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- 1) Ahmad I.S., Reid, J.F., Noguchi, N., and Hansen, A.C.1999. Nitrogen Sensing for Precision Agriculture Using Chlorophyll Map. Paper No. 993035. ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting. Sheraton Center, Toronto, ON, Canada, July 18-21, 1999, <http://www.age.uiuc.edu/oree/pdf/Chlorophyll-NSensing3.PDF>
- 2) Bella, C.M.D., Rebella, C.M., and Paruelo, J.M. 2000. Evapotranspiration Estimates Using NOAA AVHRR Imageries in the Pampa Region of Argentina. International Journal of Remote Sensing. 21(4):791-797
- 3) Chada, N., Tokunaga, M., Murai, S., Kaew, N., Apisit, E. and Suphat, V. 2000. Environmental Factors Effect on Spatial Variation of Land Surface Temperature in Thailand Estimated from Day and Night Time NOAA-AVHRR Data. ASIAN-PACIFIC Remote Sensing and GIS Journal. 13: 65-71.
- 4) Chada N., Tokunaga, M., Murai, S., Kaew N., Apisit E., and Suphat V., 2002. Accuracy Improvement of Cover Type Classification Using Night time AVHRR Data. Journal of Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 41(3): 4-13
- 5) Chada, N., and Yasuoka, Y. 2002. Daily Evapotranspiration Estimated from MODIS Data. Annual Research Report, the Matsumae International Foundation, Japan
- 6) Houghton, R.A. 2001. Changes in the Storage of Terrestrial Carbon Since 1850. p. 45 - 65, In Soils and Global Change, Lewis Publishers
- 7) Jensen, M., Burman, R. D., and Allen, R. G. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE manuals and Reports on Engineering Practice No.70 American Society of Civil Engineers NY 1-332, <http://weather.nmsu.edu/math/penmans.html>

- 8) Kaisi, M.M. and Broner I. 2002. Crop Water Use and Growth Stages.
<http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/04715.html>
- 9) Kooaly, R.F. and Clark, R.N. 1999. Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Linear Regression. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 67: 267-287
- 10) Kovar, M., Brestic, M. and Olsovska, K. 2001. Chlorophyll A Fluorescence as a Bioindicator of the Plant Environmental Stress. In *Proceeding of the International Scientific Conference on the Occasion of the 55th Anniversary of the Slovak Agricultural University in Nitra*
- 11) Marker, A.F.H., Nusch, E.A., Rai, H., and Riemann, B. 1980. The Measurement of Photosynthetic Pigments in Freshwaters and Standardization of Methods: Conclusions and recommendations. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 14:91-106.
- 12) McNairn, H., Deguise, J.C., Pacheco, A., Shang, J. and Rabe, N. 2001. Estimation of Crop Cover and Chlorophyll from Hyperspectral Remote Sensing. 23rd Canadian Remote Sensing Symposium. Sainte-Foy. Quebec. Canada. August 21-24, 2001.
http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/rd/sci_pub/bibpdf/13096.pdf
- 13) Pablo J. 2000. Hyperspectral Remote Sensing of Closed Forest Canopies: Estimation of Chlorophyll Fluorescence and Pigment Content. Unpublished Dissertation, York University, Toronto, Canada.
- 14) Photonics. 1998. NASA Builds Chlorophyll Measurement System. In *Technology News Section*, August 1998.
<http://www.laurin.com/Center/Aug98/techChloro.html>.
- 15) Verma, S. B., Kim, J., Clement, R.J., Shurpali, N.J., and Billesbach, D. P. 2000. Trace Gas and Energy Fluxes: Micrometeorological Perspectives. p. 361-376, In *Soils and Global Change*, Lewis Publishers
- 16) Wu, I. P. 1997. A Simple Evapotranspiration Model for Hawaii: The Hargreaves Model. CTAHR Fact Sheet, Engineer's Notebook No. 106, Collage of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Monoa (www.tropical-seeds.com/technology/growingtech/evapa-transpiration.pdf)

- 17) Zhang, L., Lemeur R., and Goutorbe J.P., 1995. A One Layer Resistance Model for Estimating Regional Evapotranspiration Using Remote Sensing Data. Journal of Agriculture and Meteorology, 77: 241-261

Output ที่ได้จากโครงการ

1. ดัชนีบ่งชี้ทางวิชาการสำหรับตีพิมพ์เผยแพร่ 1 บทความ

ภาคผนวก

บทความสำหรับการเผยแพร่
(manuscript)

Development and Validation of Rice Evapotranspiration Model Based on Terra/MODIS Remotely Sensed Data

Chada Narongrit^{(1)*}, Kasem Chankao⁽²⁾ and Yoshifumi Yasuoka⁽³⁾

⁽¹⁾ Department of Natural Resource and Environment, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand

⁽²⁾ College of Environment, Kasetsart University, Bangkok, 10903, Thailand

⁽³⁾ Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Komaba, Tokyo 153-8505, Japan

Abstract. The simple model was developed to estimate daily evapotranspiration (ET) by using Terra-MODIS remotely sensed data. The satellite ET model was based on the Hargreaves model which requires only two climatic variables; temperature and incident solar radiation. By using the satellite ET model, temperature in terms of LST_{RS} was directly calculated from brightness temperatures of MODIS channels 31 and 32; while incident solar radiation in terms of $APAR_{RS}$ was calculated from $NDVI_{RS}$ computed from reflectance of MODIS channels 1 and 2. ET calibrated from the model was experimented to assess sensitivity of ET on rice grown under increased temperature (2°C.) The result showed that modeled ET had a good agreement with Penman-based ET, a typical model widely used for estimating irrigated water supply. ET_{RS} models showed a better correlation with LST_{RS} , compared to that with $NDVI_{RS}$. The experimental pots results showed that ET amount based on developed model was sufficient for water consumption of rice. ET computed from the model ranged from 3.43 to 5.56 mm/day. However, from rice's height and leaf area growth data, it was found that the optimal amount of water supply was between 3.65–4.57 mm/day, indicating 6–17% error of the developed model.

Keywords: MODIS, ET, LST, APAR, LAI, Global Warming

1. Introduction

Climate change not only effects global crop production, but also hydrological water balance. As numerous concern in last decade has increased, crop production is biophysically affected by meteorological variations, particularly, rising temperatures, changing precipitation regimes, and increasing atmospheric carbon dioxide (Parry et. al., 2004). Global mean surface temperatures have increased 0.3–0.6 °C since the late 19th century and global average surface temperatures will increase 0.6–2.5 °C over the next 50 years, and 1.4–5.8 °C during the next century, with significantly regional variation (IPCC, 2001). Temperature is a significant climatic variable which directly relates to crop growth parameters such as growing degree day (GDD) and evapotranspiration (ET). ET is an ecological function, which is closely coupled to the growth stages and weather conditions, particularly temperature. ET is a sum of two separate processes; evaporation and transpiration. The first process is an evaporated or "lost" water from the wet soil and plant surface. The second process is a respired or "lost" water from small openings on the leaf surfaces, called stomata, to the atmosphere (Kaisi and Broner, 2002). The evaporation process relates to crop growth activities while the transpiration process relates to crop surrounding weather. ET varies spatially and temporally on crop species, growth stages, crop-soil fraction, available soil content, and surrounding weather (Kaisi and Broner, 2002; Jensen, et. al., 1990). The actual evapotranspiration (ET_a) or water consumption is a key parameter in the water balance, describing the processes within the soil–water–atmosphere–plant environment and is an important parameter for irrigation scheduling.

The estimation of ET is mostly based on ground meteorological parameters: temperature, relative humidity, wind, saturation vapor pressure, and net radiation. Among the ET models, the Penman model is widespread used, however, it requires complicated unit conversions and lengthy calculation. Then, Hargreaves model, the simplest ET model, is practically used because it requires only two parameters: temperature and solar energy (Wu, 1997). The methods of ET measurements using ground measurement are expensive, tedious, and can be done only at particular sites where meteorological data are measured. Therefore, ET estimated by using remote sensing means is promising. The satellite ET measurement owes to reflectance and brightness temperature remotely sensed at daytime. In modeling ET using remote sensing data, two methodologies were developed. The first method used a remotely sensed surface temperature in combination with air temperature to calculate the sensible heat flux. The second method used either remotely sensed vegetation index or from soil moisture measurements by microwave remotely sensed data to determine surface resistance for latent heat transfer (Zhang et al, 1995). However, ground meteorological data are an inherent part of satellite ET method.

Rice is as a major crop cultivated and consumed by the Asian people. In 2020, global rice demand will be increased by 35% over the 1995 level. The more rice demand, the more rice water consumption. Therefore, in order to reserve food security, it is essential to "produce more rice with less water" (Cabangon et al., 2002). Nowadays, the agricultural water drought is considered a severe problem since the ecosystem has been suffered by climatic change and hydrologic water imbalance. This study aimed to take advantage of the different spatial resolutions and the high temporal resolutions of MODIS sensor for developing a daily ET model which can be used as a tool to estimate rice water demand under variation of spatial temperature. The specific objective was to (1) develop a ground-independent method for estimation of daily ET and (2) validate a proposed ET model from rice growth experiment in different water supply under temperature increase.

*Corresponding author: chada@nu.ac.th

2. Materials and Methods

2.1 Development of MODIS-based ET Model

The eight days during January-April 2002 of 250-m and 1-Km MODIS data were used in this study. The 8 scenes of digital imagery data were initially processed for geometric correction. The 250 m-reflectance of MODIS channels 1 and 2 were transformed to normalized different vegetation index (NDVI) and the 1 Km-brightness temperatures of MODIS channels 31 and 32 were converted to land surface temperature (LST). These initial two variables were further used for constructing the remote sensing ET model.

2.2 Determination of Rice Response to Water Supply Based on Hargreaves-based ET in Pot Experiment under Increased 2 °C Temperature

Experimental study was conducted in pots (20 cm. diameter and 30 cm. high) put in open-top chambers. Air temperature in chambers was increased approximately 2 °C (compared with temperature of ambient air). The 20-days rice was transplanted at the density of 10 plants per pot and the experiment was started on the transplanting date with the soil water content of all pots at field capacity (measured by pot's weight). The investigation was about 120 days during the vegetative and yield formation. Rice's leaf area and height were investigated from pots which applied four water levels as W1 = 58, W2 = 86, W3 = 115 and W4 = 144 ml./pot/day. These water levels were correspond to ET values estimated from the developed model. During the period of the experiment, temperature, soil moisture, rice's height and rice's LAI were measured weekly.

3 Results and Discussions

3.1 Development of MODIS-based ET Model

The Hargreaves model, derived from only two common climatic variables, temperature and sunshine, was applied to establish remotely-sensed ET model expressed as follows:

$$ET = 0.0135 (T_s + 17.78) R_s [a / (595.5 - 0.55 T_s)] \quad (1)$$

where ET = potential daily evapotranspiration (mm/day), T_s = mean surface temperature (°C), R_s = incident solar radiation (Lengleys/day or MJ/m²/day), and $a = 10$ when R_s is expressed as Lengleys/day, or $a = 238.8$ when R_s is expressed as MJ/m²/day.

For parameters used in Eq. (1), T_s can be directly derived from remote sensing means by using land surface temperature (LST_{RS}) calculated from the split-window algorithm to correct atmospheric effects. In this study, LST_{RS} was computed based on the formulation initially proposed by Price (Price, 1984) and modified by Chada (Chada et al, 2000) to suit with the local conditions in the Thailand Kingdom. The modified formula is expressed below:

$$LST_{RS} = BT_1 + 1.11 (BT_1 - BT_2) - 273 \quad (2)$$

where LST_{RS} = land surface temperature (°C), BT_i = brightness temperatures of thermal wavelength, approximately range 10-12 μm. In this research, BT_1 and BT_2 were brightness temperatures from MODIS channels 31 and 32, respectively.

R_s can be derived from leaf area index (LAI) which is defined as the index of total leaf area per unit

of ground area. The function of leaf area is to absorb photosynthetic active radiation (PAR). In this study, the amount of absorbed photosynthetic active radiation (APAR or R_s) was therefore computed from LAI. Both LAI and APAR are crop growth variables. To compute these two variables, the ground temperature summation (T_{GR}), also known as growing degree day (GDD_{GR}), was first calculated from temperature difference between the daily temperature (T_a) and base temperature (T_b , which is equal to 9 °C in this study) in a number of observation days (1 January-30 April 2002). Then, ground LAI (LAI_{GR}) computed from GDD_{GR} was used to estimate the amount of absorbed radiation (Ss_{GR}), or generally called APAR (Chitnucha et al, 2001). The ground models of GDD_{GR} , LAI_{GR} , Ss_{GR} , and r_{GR} , are defined as follows:

$$GDD_{GR} = \sum_1^n (T_a - T_b) \quad (3)$$

$$LAI_{GR} = 0.015 \text{EXP} (0.003(GDD_{GR})) \quad (4)$$

$$Ss_{GR} = S_0 (1 - r_{GR} - (1 - r_0)) \text{EXP} (-(1 - m) k (LAI_{GR})) \quad (5)$$

$$r_{GR} = r_f - (r_f - r_0) \text{EXP} (-LAI_{GR}/2) \quad (6)$$

where T_a = average air temperature (°C), T_b = base temperature at which development stops (9 °C), Σ = Sum of temperature of observed days, 0.015 = empirical constant of initial LAI value of rice (m^2 of leaf / m^2 of ground), 0.003 = empirical constant of relative growth of leaf area (m^2 of leaf / m^2 of ground), S_0 = daily incident solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), r = reflectance of canopy, r_0 = reflectance of bare ground (0.1), r_f = reflectance of rice fully covered (0.22), m = empirical constant (0.25), and k = empirical constant (0.6).

In this study, S_0 was calculated based on irradiance or radiation output of the object using the Stefan-Boltzman law when the temperature is known.

$$E = \sigma(T_k)^4 \quad (7)$$

$$S_{GR} = EH \quad (8)$$

where E = irradiance (W/m^2), σ = Stefan-Boltzman constant (which is equal to 5.67×10^{-8}), and T_k = temperature (K), H = daily sunshine duration (second)

As shown in Figure 1, LAI_{GR} and Ss_{GR} (or $APAR_{GR}$) show the best fit with the 2nd order polynomial equation (Eq. 9). Therefore, this equation was used for estimating $APAR_{RS}$ from LAI_{RS} , which is computed from $NDVI_{RS}$ value, as in Eq. 10 (Saito et al, 2001). Figure 2 shows a regression plot between $APAR_{RS}$ and $APAR_{GR}$. In Figure 3, the $APAR_{RS}$ was correlated with $NDVI_{RS}$ to derive $APAR_{RS}$ based on $NDVI_{RS}$ (Eq. 11).

$$APAR_{GR} = -0.5276LAI^2 + 5.0377LAI + 0.0231 \quad (9)$$

$$LAI_{RS} = 0.57 \text{EXP} (2.33 NDVI_{RS}) \quad (10)$$

$$APAR_{RS} = 1.9788NDVI_{RS} + 5.2536 \quad (11)$$

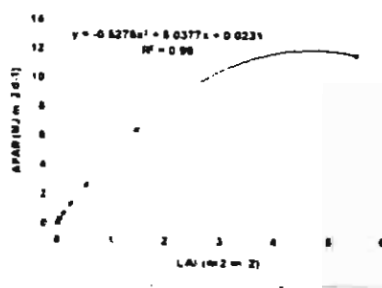


Figure 1 Regression Analysis between LAI_{GR} and $APAR_{GR}$

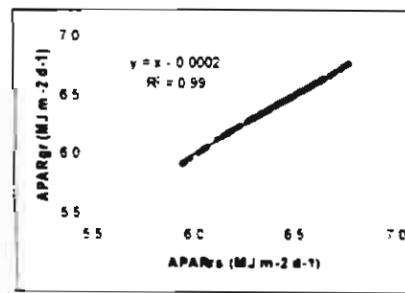


Figure 2 Regression Analysis between $APAR_{RS}$ and $APAR_{GR}$

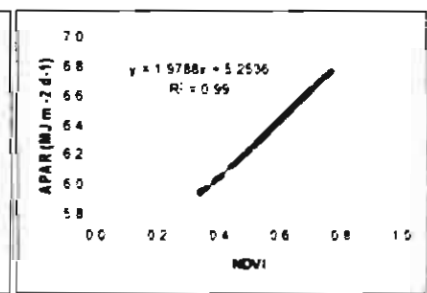


Figure 3 Regression Analysis between $NDVI$ and $APAR_{RS}$

3.2 Validation of Hargreaves-based ET Model

Hargreaves-based ET estimates were compared with Penman-based ET, a statistic record usually used as a reference for estimating local irrigated water allocation in Thailand. The estimates were calculated for data of January-December, 2002. In Figure 4, Hargreaves-based ET estimates fairly agreed with Penman-based ET records ($R^2 = 0.60$). However, the graph in Figure 4 shows that Hargreaves-based ET model in Eq. 1 is still under estimate. Then, the regression equation in Figure 4 was used to adjust Hargreaves-based ET in Eq. 1, hereafter called as *adjusted ET based on remotely sensed data* (ET_{RS}'). The below equation shows ET_{RS}' formula.

$$ET_{RS}' = 6.4327[0.0135 (T_s + 17.78) R_s [a / (595.5 - 0.55 T_s)]] - 5.756 \quad (12)$$

The reflectance of MODIS channels 1 and 2 were transformed to normalized different vegetation index ($NDVI_{RS}$) and the brightness temperatures of MODIS channels 31 and 32 were converted to land surface temperature (LST_{RS}). These initial two variables were then used to develop ET_{RS}' based on Eq. (11).

Compared with Penman-based ET, ET_{RS}' estimates show a better correspondence and show the least difference with Penman-based ET references (Figure 5), particularly in November-January (Figure 6). This indicates that the model is more reliable in winter season, the time when ET environments have the least climatic effect of long sunshine duration.

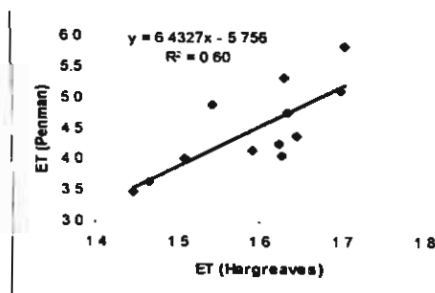


Figure 4 Regression Between Hargreaves-based ET and Penman-based ET

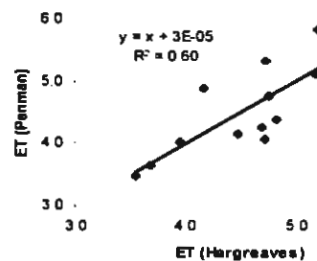


Figure 5 Regression Between Adjusted Hargreaves-based ET and Penman-based ET

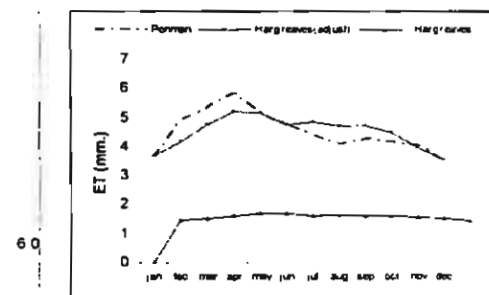


Figure 6 Graph Comparison between Modeled- ET and Penman-based ET

3.3 Hargreaves-based ET Derived from MODIS Data

As Eq. 12, ET_{RS}' was computed from MODIS imagery data acquired on January, 31, 2002. A profile was taken from irrigated paddy field in Phitsanulok province of Thailand to detect 143 pixels of ET_{RS}' , LST_{RS} , $NDVI_{RS}$, LAI_{RS} and $APAR_{RS}$. Table 1 shows descriptive statistics and correlation of variables of this profile. The result of correlation analysis of this profile data showed that ET_{RS}' estimates was stronger correlated with land surface temperature as LST ($R = 0.86$) than that with crop physiological variables as $NDVI$, LAI , and $APAR$ ($R = 0.48$). Figure 7 and 8 show scatter plots between $NDVI$ and LST , respectively. These two graphs show that ET_{RS}' model was better fit with LST compared to that with $NDVI$. ET_{RS}' regression equation was derived from $LSTRS$ and $NDVIRS$ as follows:

$$ET_{TV} = 0.241 LSTRS + 3.128 NDVIRS - 3.850 \quad (R^2 = 0.99, SE = 0.32) \quad (13)$$

It was found that ET_{TV} and ET_{RS} showed good agreement (Figure 9). From Eq. 13, evaporation (E) was estimated by setting $NDVI$ as 0, indicating that there is no canopy covers. The result reveals that ET and E were increased as temperature increased (as shown in slopes of graphs in Figure 8 and 10 with rates of 0.2348 and 0.241 mm./°C, respectively). With canopy covering on the soil, water loss from soil was reduced 0.006 mm./day or 2.49%.

Table 1 Descriptive Statistics and Correlation (R) of Variables derived from MODIS Data

Variables	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Skewness	Kurtosis	R*
ET (mm.)	3.20	5.40	4.25	0.59	0.20	-0.97	1.00
LST (°C)	22.50	29.80	25.82	2.13	0.36	-1.00	0.86
NDVI	0.34	0.77	0.60	0.09	-0.64	0.21	0.48
LAI (m ² /m ²)	1.30	3.40	2.34	0.48	-0.08	-0.25	0.48
APAR _{LAI} (MJ m ² d ⁻¹)	5.90	6.80	6.43	0.19	-0.62	0.28	0.48
APAR _{NDVI} (MJ m ² d ⁻¹)	5.90	6.80	6.43	0.19	-0.62	0.28	0.48

R* = Correlation value considered on ET

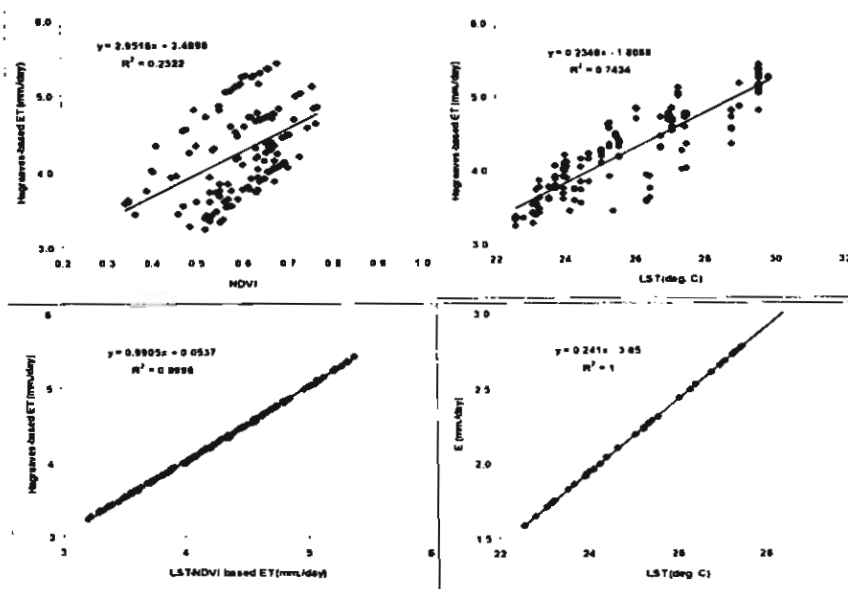


Figure 7 (Upper Left) Scatter Plot between NDVI and Adjusted Hargreaves-based ET

Figure 8 (Upper Right) Scatter Plot between LST and Adjusted Hargreaves-based ET

Figure 9 (Lower Left) Scatter Plot between LST-NDVI Based ET and Adjusted Hargreaves-based ET

Figure 10 (Lower Right) Scatter Plot between LST and E

3.4 Impact of Increased Temperature on ET and Crop Growth

The 31 years-meteorological statistics, collected from 1971 to 2001, were used for anomalies analysis. Figure 11 and 12 illustrate temperature and rainfall anomalies in a 30-year period, respectively. The results show that annual temperature increased 0.014 °C per year, and annual rainfall reduced 0.26 mm. per year. The average GDD of rice was 126.79 days without temperature increase and it was decreased about 5.5 days with 1 °C increase (Figure 13). However, GDD-increased crop growth could be occurred under sufficient water supply, including increasing water loss in form of ET caused by increased temperature. Because ET_{RS} is dominantly influenced by LST_{RS}, ET could be affected by increasing temperature due to global warming. Every 0.5 °C increased temperature can cause 0.1 mm ET increase. (Table 2). From pot experiment in open-top chamber with 2 °C -increased temperature, ET rate of rice grew under 2 °C -increased temperature was increased 11% from an average ET. An average rice's ET is 4.3 mm./day during the total growing season in order to obtain the maximum LAI). The experiments in the environmental-controlled chambers showed that the rice's growths both in height and LAI were significantly affected by water supply and were different after 3rd week of water supply (Figure 14 and 15). Both rice's height and LAI grew well with amount of water supply at least 115 ml. (Figure 16). By increasing temperature, leaf area can not be developed under normal ET rate. The experiments showed that amount of water supply affected significantly on height and LAI but did not significantly affect on chlorophyll (Table 3). Figure 17 shows leaf area of rice developed under variations of water supply. From the top of pots, leaf area shows more covering on the soil when water supply increased. By applying techniques of digital image processing, leaf's greenness is easily separated from soil area. Therefore, the profiles were taken (Figure 17, bottom). The results showed that the more continuous of green line in the taken profile, the more leaf's greenness.

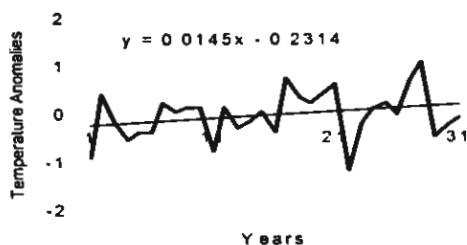


Figure 11 Temperature Anomalies (°C) in a 30-Year Period

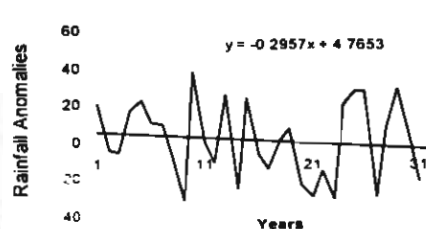


Figure 12 Rainfall Anomalies (mm.) in a 30-Year Period

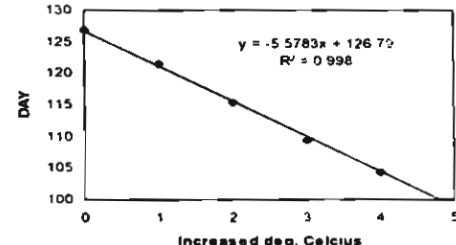


Figure 13 Rice Ripening Days Decreased by Temperature Increase

Table 2 Simulation of ET Increased Due to Temperature Increased

Increased Temperature (°C)	Average ET (mm.)	Percentage (%)	% ET Increased
0.0	4.3	100.0	0
0.5	4.4	102.8	2.8
1.0	4.5	105.5	5.5
1.5	4.6	108.3	8.3
2.0	4.7	111.1	11.1

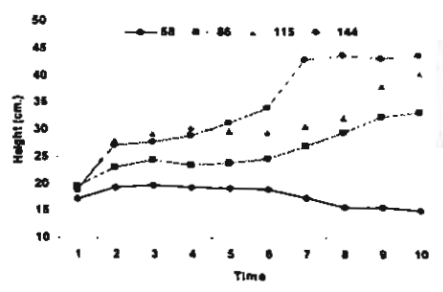


Figure 14 Height with Different Water Supply under 2 °C-Elevated Temperature

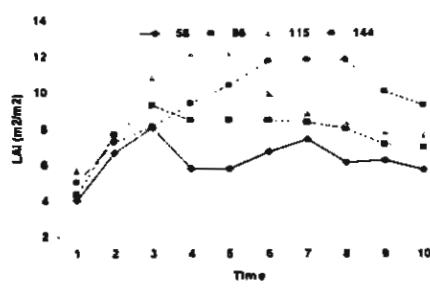


Figure 15 LAI with Different Water Supply under 2 °C-Elevated Temperature

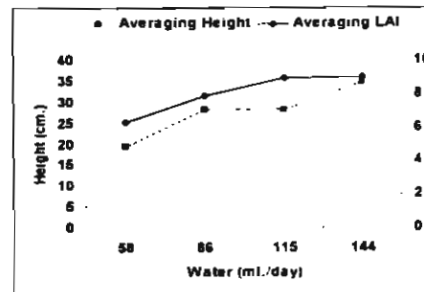


Figure 16 Height and LAI with Different Water Supply under 2 °C-Elevated Temperature

Table 3 Effect of Different Water Supplies on Rice Growth under 2 °C-Elevated Temperature

Water (ml.)	Moisture (‰)	Height (cm.)	LAI (m ²)	Chlo _a	Chlo _b	Chlo _{ab}
58	17.36 ^a	19.34 ^a	6.28 ^a	2.17 ^{ns}	0.96 ^{ns}	3.13 ^{ns}
86	28.18 ^b	28.06 ^b	7.87 ^b	2.29 ^{ns}	1.02 ^{ns}	3.31 ^{ns}
115	28.81 ^b	28.22 ^b	8.90 ^b	2.16 ^{ns}	0.95 ^{ns}	3.11 ^{ns}
144	34.39 ^c	34.60 ^c	8.98 ^b	2.13 ^{ns}	0.93 ^{ns}	3.06 ^{ns}

Means in column with same letters are not significantly different at $\alpha = 0.05$ (DMRT)

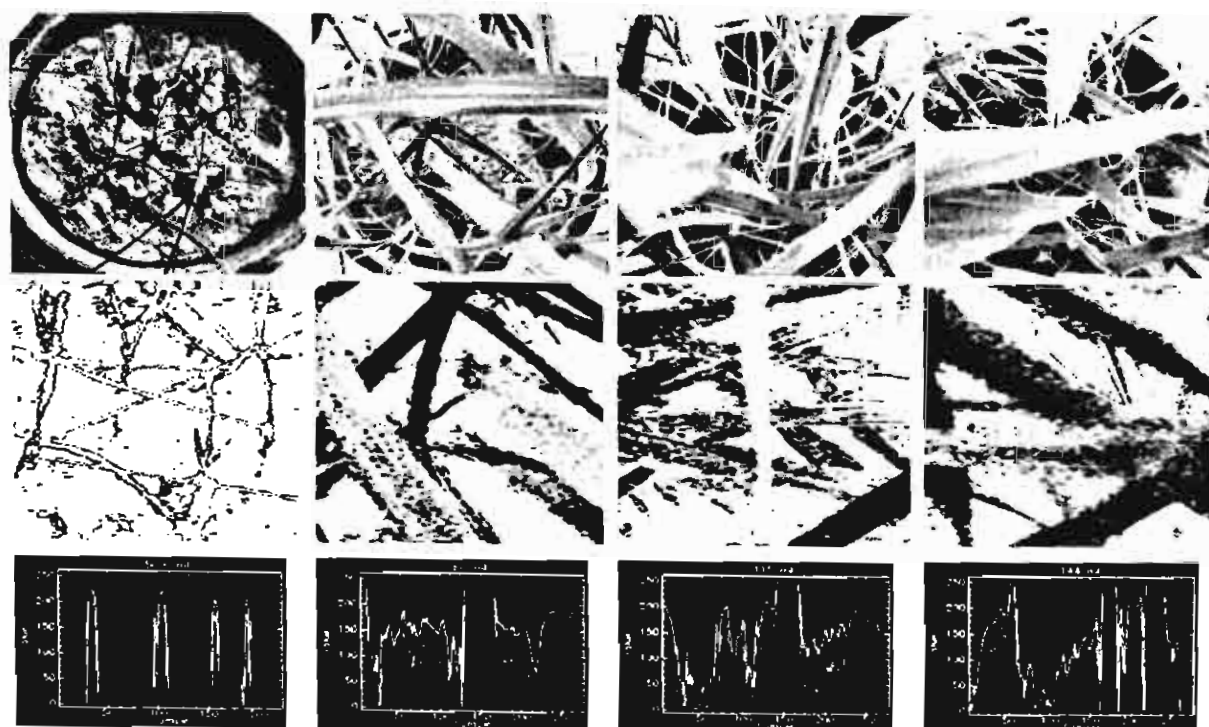


Figure 17 Cross Section of Digital Images Taken from Different Water Supplies under 2 °C-Elevated Temperature (X-axis is location of pixels crossing from left (0) to right (250) and Y-axis is spectral value of those pixels)

5. Conclusion

Two remotely-sensed data namely land surface temperature (LST_{RS}) and absorbed photosynthetic active radiation ($APAR_{RS}$) were incorporated in the simple models for estimating daily ET. Without aiding from ground data, the ET models based on Hargreaves models was determined from MODIS data. The models were validated with Penman method, which is locally used as a reference ET. There is a good correspondence between the modeled ET and Penman ET. The results from pot experiments showed that Hargreaves ET model which need only temperature and $APAR$ data is reliable for estimating daily ET from MODIS data. The results are useful for daily management and long term planning for irrigation purpose.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Thailand Research Fund (TRF) and Commission of Higher Education, Thailand, for providing the funds for this study under Project of MRG in 2003

References

- Bella, C.M.D., Rebella, C.M. and Paruelo, J.M. (2000). Evapotranspiration Estimates Using NOAA AVHRR Imageries in the Pampa Region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing*. 21(4), 791-797.
- Chada, N., Tokunaga, M., Murai, S., Kaew, N., Apisit, E. and Suphat, V. (2000). Environmental Factors Effect on Spatial Variation of Land Surface Temperature in Thailand Estimated from Day and Night Time NOAA-AVHRR Data. *ASIAN-PACIFIC Remote Sensing and GIS Journal*. 13, 65-71.
- Changming, L. (1997). Global Warming Impact on Transferable Water from Yangtze River Basin to the North China Plain. pp. 3-10. In *Proceeding of the International Symposium on Hydro-Environment in Asia*, Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Japan.
- Chitnucha, B. Daniel M. and Attachai, J. (2001). Methane Emission from Various Land Use Types in the Mae Chaem Watershed: Modeling of Methane Production/Consumption. *Thai Journal of Agricultural Science*. 34 (3-4), 175-186.
- IPCC, 2001 IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press (2001).
- Jensen, M., Burman, R. D. and Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and Irrigation water Requirements*, ASCE manuals and Reports on Engineering Practice No.70 American Society of Civil Engineers Y 1-332. <http://weather.nmsu.edu/math/penmans.html>.
- Kaisi, M.M. and Broner I. (2002). Crop Water Use and Growth Stages. <http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/04715.html>.
- Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. and Fischer, G. (2004) Effects of Climate Change on Global Food Production under SRES Emissions and Socio-economic Scenarios *Global Environmental Change*. 14: 53-67.
- Price, J.C. (1984). Land Surface Temperature Measurements from the Split Window Channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *Journal of Geophysical Research*. 89, 7231-7237.
- Saito, K., Ogawa, S., Aihara, M. and Otowa, K. (2001). Estimates of LAI for Forest Management in Okutama. pp. 600-605. In *The 22nd Asian Conference on Remote Sensing*, November 5-9, 2001, Singapore.
- Wu, I. P. (1997). A Simple Evapotranspiration Model for Hawaii: The Hargreaves Model, CTAHR Fact Sheet, Engineer's Notebook No. 106, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa (www.tropical-seeds.com/tec-forum/growingtech/evapotranspiration.pdf).
- Zhang, L., Lemmeur R. and Goutorbe J.P. (1995). A One Layer Resistance Model for Estimating Regional Evapotranspiration Using Remote Sensing Data. *Journal of Agricultural and Meteorological*. 77, 241-261.

Chada Narongrit is currently an associate professor of Faculty of Agriculture, Natural Resources, and Environments, Naresuan University, Thailand. In December 2000, Dr. Narongrit received her Ph.D. in Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) from the Asian Institute of Technology. After graduation, she joined the project of Great Mekong Sub-region, supported by the Japanese Government, as a research fellow, and she was a visiting researcher at the Institute of Industrial Science at the University of Tokyo, Japan in 2002. Dr. Narongrit's main research areas focus on the impact of global changes on water resource, especially agricultural water consumption, by using remote sensing, GIS, and modeling computerized package as the main tools.

Kasem Chankao is currently a professor at College of Environment, Kasetsart University. He is professional in about 33-years research in the field of watershed hydrology, micrometeorology, and environmental science. His professional affiliation are, for example, chairman of Thailand IGBP National Committee and member of UNESCO-MAB National Committee.

Yoshifumi Yasuoka is presently a professor at Institute of Industrial Science and International Center for Urban Safety Engineering, University of Tokyo. His study field is interdisciplinary areas dealing with environmental science and environmental impact assessment including radiobiology, remote sensing, as well as digital image processing and analysis. His current research themes are global environmental monitoring with remote sensing, environmental monitoring and assessment with image processing, and monitoring and modeling of terrestrial ecosystem. He has many research papers published in several journals such as the *Remote Sensing of Environment Journal*, *Journal of Applied Optics*, the *Optical Methods in Biomedical and Environmental Sciences*, the *International Journal of Remote Sensing*, the *Encyclopedia of Systems and Control*, and the *Journal of Pattern Recognition*.