



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม

อนุรักษ์วิทยา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่นาข้าว และ ไร่มันสำปะหลัง

Estimation of Solar Radiation Use Efficiency in Paddy and Cassava Fields

นามผู้วิจัย นางสาวสิริพันธ์ ลิพิพัฒน์ไพบูลย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์สามัคคี บุญยะวัฒน์, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วีระศักดิ์ อุดม ไชค, D.Tech.Sc.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์เอ็ง สโรบล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.รรชนี เอมพันธุ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 5 เดือน เมษายน พ.ศ. 2560

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง

Estimation of Solar Radiation Use Efficiency in Paddy and Cassava Fields

โดย

นางสาวสิริพันธุ์ สิริพัฒน์ไพบูลย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำ และสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2550

สิริพันธุ์ สิริพัฒน์ไพบุลย์ 2550: การประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่นาข้าว และ
ไร่มันสำปะหลัง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม) สาขาการ
จัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา ภาควิชาการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์
สามัคคี บุญยะวัฒน์, Ph.D. 94 หน้า

การประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง กระทำโดย
เลือกศึกษาพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย และไร่มันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมาตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน พ.ศ.
2547 ถึง เดือน มกราคม พ.ศ. 2549 โดยแบ่งฤดูกาลเพาะปลูกออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเริ่มการเพาะปลูก ช่วงกำลัง
เจริญเติบโต และช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เปรียบเทียบสมดุลของพลังงาน และ
ประสิทธิภาพการใช้รังสีของพืช (Radiation Use Efficiency, RUE) 2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวล
ชีวภาพ และดัชนีพื้นที่ผิวใบกับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (absorbed Photosynthetically Active
Radiation; PARa) ในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง และ 3) ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาระบบ
สมดุลพลังงานในพื้นที่ลุ่มน้ำอื่นๆ ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินหลายรูปแบบ

ผลการเปรียบเทียบสมดุลพลังงานในพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง และพื้นที่นาข้าว พบว่า ไร่มันสำปะหลังมี
ค่าสมดุลพลังงานสูงกว่าพื้นที่นาข้าวเล็กน้อย โดยมีค่ารังสีสุทธิ (Rn) เท่ากับ $14.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ส่วนพื้นที่นา
ข้าวเท่ากับ $13.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ โดยไร่มันสำปะหลังรังสีสุทธิถูกใช้ในการคายระเหยน้ำ (LE) เฝ้าผลาญอากาศ (H)
และเก็บสะสมความร้อนในดิน (Gs) เท่ากับ 9.8, 3.9 และ $0.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ ส่วนพื้นที่นาข้าวเท่ากับ
9.5, 3.0 และ $0.4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ และเก็บสะสมความร้อนในน้ำ (Gw) เท่ากับ $0.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$

การเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) และประสิทธิภาพการใช้รังสีของพืช
(RUE) พบว่า พื้นที่ไร่มันสำปะหลังมีค่า PARa และ RUE สูงกว่าพื้นที่นาข้าว โดยพื้นที่ไร่มันสำปะหลังมีค่า
PARa ในช่วงกำลังเจริญเติบโตสูงสุดเท่ากับ 10.99 MJ m^{-2} ค่าเฉลี่ย PARa ตลอดฤดูกาลเพาะปลูกเท่ากับ 8.98
 MJ m^{-2} และมีค่า RUE เท่ากับ $1.09\text{-}4.42 \text{ g MJ}^{-1}$ ส่วนในพื้นที่นาข้าวมีค่า PARa สูงสุดในช่วงกำลังเจริญเติบโต
เท่ากับ 9.53 MJ m^{-2} ค่าเฉลี่ย PARa ตลอดฤดูกาลเพาะปลูกเท่ากับ 6.30 MJ m^{-2} และมีค่า RUE เท่ากับ $0.58\text{-}0.66$
 g MJ^{-1} ความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพ (biomass) กับ PARa ของพื้นที่นาข้าว พบว่า มีความสัมพันธ์
กันแบบเส้นตรง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.97 ส่วนดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับ PARa มีความสัมพันธ์แบบพหุนาม
มีค่า R^2 เท่ากับ 1.00 ส่วนไร่มันสำปะหลังความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพ กับ PARa มี
ความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.89 ส่วนดัชนีพื้นที่ผิวใบ กับ PARa มีความสัมพันธ์กันแบบ
พหุนาม โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.59

สิริพันธุ์ สิริพัฒน์ไพบุลย์
ลายมือชื่อนิติ


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

28 / ๖๓ / 2550

Siriphan Leepipatpaiboon 2007: Estimation of Solar Radiation Use Efficiency in Paddy and Cassava Fields. Master of Science (Watershed and Environment Management), Major Field: Watershed and Environment Management, Department of Conservation. Thesis Advisor: Associate Professor Samakkee Boonyawat, Ph.D. 94 pages.

The estimation of solar radiation use efficiency in paddy and cassava fields were studied in Sukhothai and Nakhon Ratchasima provinces, respectively, during November 2004 to January 2006. Crop growth was divided into 3 periods of cultivation (early vegetative period, actively growing period and before harvest period). The objectives of the study were 1) to compare energy balance and radiation use efficiency (RUE), 2) to study the relationship of biomass, leaf area index (LAI) and absorbed photosynthetically active radiation (PARa) in paddy and cassava fields 3) the results from 1) and 2) will be used as basic data for studying energy balance of other watershed areas with different land uses.

The comparison of energy balance between cassava field and paddy field revealed that the energy balance in cassava field was higher than paddy field. The daily average net radiation (R_n) in cassava field was $14.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ while in paddy field was $13.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$. The R_n was used for latent heat (LE), sensible heat (H) and storage in soil (Gs) with the average values of 9.8, 3.9 and $0.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for cassava, while in paddy field were 9.5, 3.0 and $0.4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, respectively, and storage in water (Gw) was $0.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$.

In cassava field, the daily absorbed photosynthetically active radiation (PARa) during actively growing period was the highest (10.99 MJ m^{-2}), the average PARa was 8.98 MJ m^{-2} and the radiation use efficiency (RUE) for cassava was $1.09 - 4.42 \text{ g MJ}^{-1}$. In paddy field, the daily PARa during actively growing period was the highest (9.53 MJ m^{-2}), the average PARa was 6.30 MJ m^{-2} and RUE of rice was $0.58 - 0.66 \text{ g MJ}^{-1}$. Therefore, PARa in cassava field was higher than paddy field. The relationship between biomass and PARa in paddy and cassava fields were linear with the R^2 of 0.97 and 0.89, respectively. Additionally, the relationship between leaf area index (LAI) and PARa in paddy and cassava fields were polynomial with the R^2 of 1.00 and 0.59, respectively.

S. Leepipatpaiboon

Student's signature

S. Boonyawat

Thesis Advisor's signature

28 / Mar / 2007

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สามัคคี บุญยะวัฒน์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาแนะนำ และตรวจแก้ข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ อุดมโชค กรรมการวิชาเอก รองศาสตราจารย์ ดร. เอ็จ สโรบล กรรมการวิชาการ และอาจารย์ เสาวนุช ถาวรพฤษ์ อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และคอยให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์จนสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ Prof. Dr. Massatoshi Aoki จาก Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan และ รองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย จาก คณะฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูล และให้ข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ขอขอบพระคุณ คุณปิยะพงษ์ ทองดินอก ที่คอยช่วยเหลือ และให้ปรึกษาคำแนะนำในการเก็บข้อมูล พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ คุณลุงน้ำ เกตุสอน และคุณลุงถ่วง สุขกระโทก ซึ่งเป็นคนดูแลสถานีตรวจวัดอากาศทุกสถานีของพื้นที่ศึกษาในครั้งนี้ ที่คอยดูแลช่วยเหลือทุกอย่างในการเก็บข้อมูลภาคสนาม ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สาขาวิชา การจัดการลุ่มน้ำ และสิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์ วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการเก็บข้อมูลภาคสนาม และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ ชี้นะ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้

น.ส. สิริพันธุ์ ลิพิพัฒน์ไพบูลย์

มีนาคม 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
วิธีการ	34
สถานที่ทำการวิจัย	46
ผลและวิจารณ์	49
สมมูลพลังงาน	49
น้ำหนักมวลชีวภาพ และดัชนีพื้นที่ผิวใบ	54
ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์	63
ความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพ และดัชนีพื้นที่ผิวใบ กับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน	75
ประสิทธิภาพการใช้รังสีในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง	79
ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหาร	82
สรุปและข้อเสนอแนะ	84
สรุป	84
ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	89

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สภาพการสะท้อนรังสีคลื่นสั้นของพื้นผิวต่างๆ	13
2	ลักษณะความยาวคลื่นต่างๆ ในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (visible light)	19
3	ลักษณะการสะท้อน และการส่องผ่านของใบ (สีเขียว) ในช่วงรังสีคลื่นสั้น	20
4	การผ่านของแสงในใบพืชแต่ละชนิด	20
5	กิจกรรมการปลูกมันสำปะหลังของเกษตรกร บริเวณพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง อำเภอบรรพตพิสัย จังหวัดนครราชสีมา	48
6	สมมูลพลังงาน และการคายระเหยน้ำในพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย ตั้งแต่เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2548	51
7	สมมูลพลังงานของพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา ตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2548	53
8	มวลชีวภาพ และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) ของพื้นที่นาข้าว ตั้งแต่เดือน สิงหาคม ถึง เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2548	55
9	มวลชีวภาพ และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) ของไร่มันสำปะหลัง ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2548 ถึง เดือน มกราคม พ.ศ. 2549	59
10	ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ของแต่ละเดือน ในปี พ.ศ. 2548	63
11	ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย	66
12	ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในไร่มันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา	69
13	เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ (PARa) ของพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง	72
14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ของพื้นที่นาข้าว	77
15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ของไร่มันสำปะหลัง	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) ในพื้นที่นาข้าว	80
17	เปรียบเทียบการใช้รังสี (RUE) ในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง	81
18	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) ในพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ แตกต่างกัน	82
19	ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหาร (HI) ประสิทธิภาพการใช้รังสี RUE) และปริมาณรังสีที่พืชดูดกลืน (PARa) ของข้าว และมันสำปะหลัง	83

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครื่องมือวัดค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบพืช (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer)	33
2	เครื่องมือวัดพลังงานรังแสงอาทิตย์ชนิดพาราโนมิเตอร์	33
3	สถานีตรวจอากาศอัตโนมัติของแต่ละรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน	35
4	แผนผังการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอากาศแบบอัตโนมัติในพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย	37
5	แผนผังการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอากาศแบบอัตโนมัติในไร่มันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา	38
6	แผนผังแสดงขั้นตอนการเก็บตัวอย่างมวลชีวภาพ	41
7	การตรวจวัดดัชนีพื้นที่ผิวใบ	42
8	แผนภาพกรอบแนวคิดในการศึกษาการประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน	45
9	พื้นที่ศึกษาในแต่ละรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินของสถานีตรวจวัดอากาศอัตโนมัติ	47
10	ความผันแปรของค่าสมมูลพลังงานรายเดือนของพื้นที่นาข้าว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ตั้งแต่เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2548	50
11	ความผันแปรของค่าสมมูลพลังงานรายเดือนของพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง อำเภอบรรพตพิสัย จังหวัดนครราชสีมา ตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2548	52
12	ความผันแปรระหว่างมวลชีวภาพกับดัชนีพื้นที่ผิวใบของพื้นที่นาข้าว	55
13	แสดงระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าวแต่ละช่วงการเพาะปลูก	57
14	ความผันแปรระหว่างมวลชีวภาพกับดัชนีพื้นที่ผิวใบของไร่มันสำปะหลัง	58
15	แสดงระยะการเจริญเติบโตของต้นมันสำปะหลังแต่ละช่วงการเพาะปลูก	60
16	เปรียบเทียบมวลชีวภาพในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง	61
17	เปรียบเทียบดัชนีพื้นที่ผิวใบในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ของจังหวัดสุโขทัย และจังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2548	64
19	ความผันแปรระหว่างมวลชีวภาพกับรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในพื้นที่นาข้าว	67
20	ความผันแปรระหว่างดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในพื้นที่นาข้าว	67
21	ความผันแปรระหว่างมวลชีวภาพกับรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในไร่มันสำปะหลัง	70
22	ความผันแปรระหว่างดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในไร่มันสำปะหลัง	70
23	เปรียบเทียบการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ระหว่างพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง	73
24	เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) กับดัชนีพื้นที่ผิวใบ	74
25	เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) กับมวลชีวภาพ	75
26	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในพื้นที่นาข้าว	76
27	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในไร่มันสำปะหลัง	78
28	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหาร (HI) ประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) และปริมาณรังสีที่พืชดูดกลืน (PARa) ของข้าว และมันสำปะหลัง	83

การประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง

Estimation of Solar Radiation Use Efficiency in Paddy and Cassava Fields

คำนำ

รังสีดวงอาทิตย์เป็นทรัพยากรที่มีใช้ไม่หมดสิ้น จึงนับได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลก เนื่องจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์เป็นการจ่ายพลังงานต่อระบบนิเวศ และการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตบนโลก รังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่มายังพื้นผิวโลกสามารถแบ่งได้ 2 ส่วน คือ ส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับออกไปในอวกาศ อีกส่วนหนึ่งถูกดูดซับเอาไว้ใช้ในกระบวนการต่างๆ บนพื้นผิวโลก เช่น การคายระเหยน้ำ การเกิดเมฆ และหยาดน้ำฟ้า การเจริญเติบโตของพืช เป็นต้น ซึ่งเป็นรากฐานของกระบวนการทางกายภาพ เคมี และปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ นอกจากนี้ปริมาณและระยะเวลาที่โลกได้รับรังสีดวงอาทิตย์เป็นส่วนหนึ่งของการผันแปรลมฟ้าอากาศ และการเกิดห่วงโซ่อาหารของโลกด้วย

รูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกันมีผลให้การดูดกลืน และสะท้อนของรังสีดวงอาทิตย์แตกต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์แตกต่างกัน เช่น ดินสนที่ขึ้นบริเวณที่โล่งเตียนมักแตกกิ่งก้านสาขาแผ่เป็นบริเวณกว้าง ลำต้นหนาแต่เรียว ส่วนบริเวณเรือนยอดมีลักษณะรูปร่างคล้ายกระโจม ส่วนดินสนที่ขึ้นหนาแน่น หรือเจริญเติบโตปะปนกับพรรณไม้อื่นๆ จะพยายามเลี้ยวร่มเงา เพราะต้องการรับพลังงานแสงให้มาก ทำให้การเจริญทางกิ่งก้านในแนวระดับลดลง แต่จะเพิ่มการเจริญเติบโตในแนวดิ่ง โดยการเพิ่มความสูงให้อยู่เหนือกว่าต้นไม้บริเวณโดยรอบ ทำให้สนมีลำต้นชะลูดมีกิ่งก้านสาขาเล็ก เป็นต้น การที่พื้นโลกได้รับพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ไม่เท่ากันทำให้เกิดความแตกต่างของความกดอากาศ ซึ่งก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศ และการหมุนเวียนของบรรยากาศ ซึ่งได้มีผู้ให้ความสนใจและศึกษาเกี่ยวกับรังสีดวงอาทิตย์เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น การออกแบบอุปกรณ์ เครื่องมือ และอาคารที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น

ในการศึกษาครั้งนี้เลือกพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง เป็นพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน เนื่องจากเป็นพืชที่การให้ผลผลิตในส่วนเหนือดิน คือ ต้นข้าว และส่วนใต้ดิน คือ ต้นมันสำปะหลัง และยังเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่มีการส่งออกมากของประเทศ ซึ่งการใช้รังสีแสง

สังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนเพื่อการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละช่วงเวลาการเพาะปลูกแตกต่างกัน ทำให้ได้ผลผลิตของพืชมีปริมาณ และคุณภาพมาก นอกจากนี้ยังทราบถึงศักยภาพที่แตกต่างกันในการนำรังสีดวงอาทิตย์ไปใช้ของแต่ละรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมดุลของพลังงานในพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย และไร่มันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้รังสีสังเคราะห์ (Radiation Use Efficiency, RUE) ของพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (PARa) ในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง
4. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาระบบสมดุลของพลังงานในพื้นที่ลุ่มน้ำอื่นที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินหลายรูปแบบ

การตรวจเอกสาร

1. รังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation)

1.1 นิยาม และความหมาย

มหาวิทยาลัยศิลปากร (2548) ได้อธิบายว่า ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์และเป็นศูนย์กลางของระบบสุริยะ (solar system) ซึ่งมีโลกและดาวเคราะห์อื่นๆ เป็นบริวาร มวลของดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ 1.989×10^{30} kg หรือประมาณ 3 แสนเท่าของมวลโลก มวลจำนวนมากนี้กดทับกันด้วยแรงโน้มถ่วงทำให้บริเวณใจกลางมีความดันสูงถึง 3.4×10^{16} ปาสคาล (pascal, Pa) และอุณหภูมิสูง 15×10^6 °K จนทำให้เกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ขึ้น จากปฏิกิริยาดังกล่าวไฮโดรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของดวงอาทิตย์จะหลอมรวมกันเป็นฮีเลียมและให้พลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นในช่วงของรังสีแกมมา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะส่งออกมาภายนอกผ่านมวลสารชั้นถัดออกมา มวลสารเหล่านี้จะดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วเปล่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นยาวขึ้น เมื่อมาถึงผิวดาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นในช่วงแสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด

รังสรรค์ (2547) ได้รายงานว่า ดวงอาทิตย์เป็นก้อนสสารทรงกลมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในสุริยจักรวาล มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.93×10^5 km น้ำหนักมวล 1.99×10^{30} kg มีระยะทางห่างจากโลกโดยเฉลี่ยประมาณ 149.6×10^6 km และหมุนรอบตัวเองหนึ่งรอบใช้เวลาประมาณ 27 วัน พลังงานบนดวงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ฟิวชัน อุณหภูมิที่พื้นผิวโฟโตสเฟียร์ (photosphere) มีค่าประมาณ 6,000 °K ส่วนผิวนอกโฟโตสเฟียร์อุณหภูมิลดลงเหลือ 4,3000 °K และมีแสงสว่างประมาณ 46,500 แคนเดลา เซนติเมตร⁻² รังสีดวงอาทิตย์มีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าแสง (ประมาณ $300,000 \text{ km s}^{-1}$) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดวงอาทิตย์แผ่รังสีมายังโลกประกอบด้วยช่วงคลื่นต่างๆ กัน ตั้งแต่รังสีแกมมาที่สั้นที่สุดจนถึงคลื่นวิทยุที่ยาวที่สุด สำหรับช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (visible light) มีความยาวคลื่น 0.4 - 0.7 μm คลื่นดังกล่าวนี้อยู่ระหว่างรังสีอัลตราไวโอเล็ตกับรังสีอินฟราเรด ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นคลื่นทั้งสองแต่มีความรู้สึกได้โดยทางอื่น

Sellers (1965) สันนิษฐานว่า ดวงอาทิตย์เป็นวัตถุดำซึ่งมีอิทธิพลต่อพื้นผิวที่ดูคลิ่น รังสีดวงอาทิตย์ และการประมาณค่าประสิทธิภาพพจนภูมิรังสีดวงอาทิตย์สามารถหาได้จากกฎของ Stefan-Boltzmann ที่กล่าวว่า พลังงานของรังสีดวงอาทิตย์มาจากวัตถุดำที่รังสีตรงมีสัดส่วนยกกำลังสี่ของอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิพื้นผิวประมาณ 6,000 °K ในช่วงสเปกตรัม ตั้งแต่ 1.2 μ ถึง น้อยกว่า 10 μ ($1\mu = 1 \text{ micron} = 10^{-6} \text{ cm}$) รังสีดวงอาทิตย์ประมาณ 99% เป็นรังสี คลื่นสั้นตั้งแต่ 0.15-4.0 μ ประกอบด้วย รังสีอุลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) ที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.4 μ ประมาณ 9% รังสีที่ตามองเห็นได้ (visible light) ที่มีความยาวคลื่นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.4 μ แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.74 μ ประมาณ 45% และที่เหลืออีก 46% เป็นรังสี อินฟราเรด ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 0.74 μ

1.2 พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์

พลังงานความร้อนที่กระจายจากดวงอาทิตย์มายัง โลก เรียกว่า รังสีจากดวงอาทิตย์ หรือ พลังงานจากดวงอาทิตย์ (solar radiation หรือ insolation) ส่วนใหญ่ธรรมชาติทั้งหลายในโลกดำรง อยู่ได้ด้วยพลังงานจากดวงอาทิตย์นี้เอง ดังนั้นการกระจายของพลังงานจากดวงอาทิตย์บนพื้น โลก จึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อลมฟ้าอากาศ

เสริม (2545) กล่าวว่า ดวงอาทิตย์แผ่รังสีออกมาภายนอกในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตั้งแต่รังสีแกมมาจนถึงคลื่นวิทยุ สำหรับส่วนที่ผ่านบรรยากาศมาถึงผิว โลกส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของพลังงานแสงสว่าง เนื่องจากดวงอาทิตย์มิได้ให้พลังงานในรูปแสง สว่างอย่างเดียว แต่ให้พลังงานในรูปรังสีต่างๆ ด้วย ดังนั้นจึงเรียกพลังงานซึ่งอยู่ในรูปคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้านี้ว่ารังสีดวงอาทิตย์

Monteith (1973) ได้อธิบายว่า อุณหภูมิพื้นผิวของดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ 6,000 °K จะแผ่รังสีในช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.3 ถึง 3.0 μm และปริมาณพลังงานต่อหน่วยความยาวคลื่นมีค่า มากกว่า 0.48 μm (จากกฎของ Wien สรุปว่า พลังงานสูงสุดต่อหน่วยความยาวคลื่นจะแผ่ที่ 0.48 μm ที่อุณหภูมิ 6,000 °K และ 9.7 μm ที่อุณหภูมิ 300 °K) สเปกตรัมทั้งหมดที่แผ่พลังงาน โดยดวงอาทิตย์ มีค่าประมาณ 74 ล้าน W m^{-2} (จากกฎของ Stefan สรุปว่า พลังงานที่ถูกแผ่รังสีทั้งหมดจะมีค่ายก กำลังสี่ของอุณหภูมิสมบูรณ์)

Lee (1926) อธิบายว่า การแบ่งสเปกตรัมของพลังงานดวงอาทิตย์ที่อยู่บนชั้นบรรยากาศโลก โดยปกติสเปกตรัมพลังงานดวงอาทิตย์แบ่งเป็น รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) ที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า $0.4 \mu\text{m}$ รังสีที่ตามองเห็น (visible) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ $0.4-0.7 \mu\text{m}$ และรังสีใกล้อินฟราเรด (near-infrared) ที่มีความยาวคลื่น มากกว่า $0.7 \mu\text{m}$ ในช่วงรังสีที่ตามองเห็นสามารถแบ่งย่อยได้เป็นสี่ในแต่ละแบนด์ คือ สีม่วงถึงสีฟ้า ($0.4-0.5 \mu\text{m}$) สีเขียวถึงสีเหลือง ($0.5-0.6 \mu\text{m}$) และสีส้มถึงสีแดง ($0.6-0.7 \mu\text{m}$)

การแผ่พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ทั้งหมดอยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ซึ่งแหล่งกำเนิดของรังสีความร้อน หรืออุณหภูมิของรังสีดวงอาทิตย์มาจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ในระหว่างที่มีการชนกันของโมเลกุล หรือผลของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุล ทำให้พลังงานบางส่วนจะถูกเปลี่ยนแปลงกลายเป็นรังสีดวงอาทิตย์ ดังนั้นวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลมีการดูดกลืนพลังงาน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นศักยภาพการเคลื่อนที่ของพลังงาน การแผ่ และการดูดกลืนพลังงานความร้อนของรังสีดวงอาทิตย์จะถูกควบคุมโดยอุณหภูมิ และสสารที่มีการดูดกลืนและการแผ่พลังงานโดยธรรมชาติ เมื่อมีการกระตุ้นโดยอะตอมขนาดเล็ก เช่น อิเล็กตรอน หรือการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นจากภายนอกแหล่งพลังงาน ทำให้โมเลกุลสามารถแผ่พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ได้ (Wijk and Ubing, 1966)

1.3 พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่โลกได้รับ

1.3.1 พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่โลกได้รับ (ไม่รวมชั้นบรรยากาศ)

Barry and Chorley (1971) ได้อธิบายว่า ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่มายังโลก มีปัจจัยที่สำคัญอยู่ 4 ประการ คือ

- 1) ค่าคงที่รังสีดวงอาทิตย์ (solar constant) มีสาเหตุหลัก 2 ประการที่ทำให้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเหนือบรรยากาศโลก (extraterrestrial radiation) มีค่าไม่คงที่ คือ การแปรเปลี่ยนของปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากดวงอาทิตย์ และการแปรเปลี่ยนของระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่แผ่ออกจากดวงอาทิตย์มีค่าน้อยมาก จึงกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ดังนั้นระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์จึงเป็นสาเหตุเดียวที่ทำให้พลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบเหนือบรรยากาศโลกในแต่ละวันมีค่าไม่เท่ากัน ระยะทางระหว่าง

โลกกับดวงอาทิตย์มีค่าแตกต่างกันออกไปในการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นวงรี โดยแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ประมาณ 1.7% ระยะห่างเฉลี่ยประมาณ 1.495×10^8 กิโลเมตร มุมรองรับดวงอาทิตย์เมื่อมองจากโลกเท่ากับ 32 ลิปดา ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ในหนึ่งหน่วยเวลาที่ตกกระทบตั้งฉากบนพื้นที่หนึ่งหน่วยนอกระบบสุริยะโลกที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ เรียกว่าค่าคงที่แสงอาทิตย์ (solar constant) มีค่าประมาณ $1,353 \text{ W m}^{-2}$ หรือ $4.871 \text{ MJ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$

Barry and Chorley (1971) ได้รายงานไว้ว่า รังสีความร้อนที่ดวงอาทิตย์ที่ผิวโลกเฉลี่ยประมาณ $1.94 \text{ cal min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ หมายถึงว่าเป็นการประเมินจากสมมติฐานที่ว่า ผิวโลกราบเรียบ และห่างจากดวงอาทิตย์เท่ากัน แต่ข้อเท็จจริงแล้วผิวโลกไม่ราบเรียบ ขรุขระ สูงต่ำ แตกต่างกันไปทุกแห่ง และโลกยังหมุนรอบดวงอาทิตย์มิใช่เป็นวงกลม แต่เป็นไปในลักษณะวงรี ดังนั้นระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์จึงไม่เท่ากัน

Monteith (1973) กล่าวว่า ระยะห่างของโลกถึงดวงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยประมาณ $1.5 \times 10^8 \text{ Km}$ ซึ่งรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกตั้งฉากกับพื้นผิว เรียกว่า ค่าคงที่ของรังสีดวงอาทิตย์ แต่เป็นการยากที่จะกำหนดค่าคงที่ของรังสีดวงอาทิตย์จากการวัดได้ชั้นบรรยากาศของโลก ในระหว่าง 40 ปีที่ผ่านมา ได้มีการกำหนดค่ารังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง $1,360 - 1,400 \text{ W m}^{-2}$ ($1.94 - 2.00 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) และสุดท้ายได้มีการบันทึกค่าคงที่ของรังสีดวงอาทิตย์จากบอลลูน เครื่องบิน และจรวด ที่ความสูงเหนือชั้นสตราโตสเฟียร์ ให้ผลยืนยันค่าคงที่ของรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ $1,360 \text{ W m}^{-2}$

2) ระยะทางจากดวงอาทิตย์ การแปรเปลี่ยนการรับพลังงานจากดวงอาทิตย์เนื่องจากวงโคจรของโลกเป็นวงรี ทำให้การรับพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิวแตกต่างกัน กล่าวคือ ในวันที่ 3 มกราคม เป็นวันที่โลกเข้าใกล้ดวงอาทิตย์มากที่สุด และในวันที่ 4 กรกฎาคม เป็นวันที่โลกอยู่ไกลจากดวงอาทิตย์มากที่สุด ซึ่งพื้นผิวของโลกในเดือน มกราคม มีอุณหภูมิสูงกว่าเดือน กรกฎาคม ประมาณ 4°C ในฤดูหนาวทางซีกโลกเหนืออุณหภูมิอุ่นกว่าทางซีกโลกใต้ และในฤดูร้อนทางซีกโลกใต้อุ่นกว่าทางซีกโลกเหนือ

3) มุมอัตรัดิจของดวงอาทิตย์ (altitude of the sun) คือ มุมเงย ณ ตำแหน่งผู้สังเกตของเส้นตรงซึ่งเชื่อมโยงระหว่างดวงอาทิตย์กับผู้สังเกต ถ้ามุมอัตรัดิจมีค่ามาก ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่ผิวจะมากตามไปด้วย นอกจากนี้มุมอัตรัดิจยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ

รังสีที่ถูกสะท้อนจากพื้นผิว โดยเฉพาะพื้นผิวของน้ำ ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการคำนวณมุมอัลติจูด คือ ตำแหน่งละติจูด เวลาในแต่ละวัน และฤดูกาล

4) ช่วงเวลาของวัน (length of day) ความยาวนานของแสงแดดยังมีระยะเวลา ยาวนาน

ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นการสร้างรูปแบบการรับพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่เหนือชั้นบรรยากาศ ในเขตขั้วโลกจะได้รับปริมาณการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์สูงสุดในช่วง summer solstices ในระหว่าง December solstices ทางซีกโลกใต้ได้รับปริมาณการแผ่รังสีดวงอาทิตย์มาก ในระหว่าง June solstices ทางซีกโลกเหนือได้รับปริมาณการแผ่รังสีดวงอาทิตย์มาก เนื่องจากการโคจรของโลกที่หมุนรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรี ในเขตศูนย์สูตรได้รับปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์สูงสุดที่จุด equinoxes 2 ครั้ง และได้รับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ต่ำสุดที่จุด solstices 2 ครั้ง

1.3.2 อิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์ต่อพื้นผิวที่ได้รับพลังงานรังสีดวงอาทิตย์

การที่พื้นผิวโลกของเรามีความร้อนไม่เท่ากันนั้น เนื่องมาจากพื้นผิวโลกได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ไม่เท่ากัน Barry and Chorley (1971) อธิบายว่า การที่พื้นผิวโลกได้รับพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ไม่เท่ากันนั้น เนื่องจากปัจจัยสำคัญ 6 ประการ คือ

1) การถ่ายเทพลังงานในชั้นบรรยากาศ (energy transfer within the earth-atmosphere system) พื้นผิวโลกเมื่อได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและถ่ายเทไปสู่ที่อื่นๆ ที่มีพลังงานน้อยกว่าโดยกระบวนการสำคัญ 3 ประการ คือ การแผ่รังสี (radiation) การนำความร้อน (conduction) และการพาความร้อน (convection) ในบรรยากาศของผิวโลกการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการพาความร้อนนั้น ถือได้ว่าสำคัญที่สุด เนื่องจากการพาความร้อนจะเกิดได้ทั้งโดยการผสมผสานคลุกเคล้ากันของอากาศที่ร้อน (sensible heat) และการพาความร้อนในรูปความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat of vaporization) ซึ่งถ้าน้ำมีอุณหภูมิ 0°C แล้ว ความร้อนแฝงมีค่าเท่ากับ 597 แคลอรีต่อน้ำ 1 กรัม ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นที่หนึ่งหน่วยพื้นระนาบของพื้นโลกขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ที่สำคัญ ประกอบด้วย

2) อิทธิพลของบรรยากาศโลก (effect of the atmosphere) เนื่องจากบรรยากาศของโลกประกอบด้วยก๊าซต่างๆ รวมทั้งไอน้ำและอากาศจะมีฝุ่นผงต่างๆ รวมอยู่ด้วยจึงมีผลต่อการถ่ายทอดพลังงานจากนอกบรรยากาศมาสู่ผิวดิน จากส่วนผสมของบรรยากาศปกติที่ประกอบด้วยก๊าซออกซิเจน โอโซน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ซึ่งรวมเป็นตัวกลางที่ดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดี โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์พวกคลื่นสั้น ดังนั้นพลังงานที่ผิวพื้นดินจะได้รับนั้นจึงลดลงมาน้อยแตกต่างกันไปตามความแตกต่างของช่วงคลื่น

เมื่อท้องฟ้าแจ่มใสความเข้มรังสีดวงอาทิตย์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญในขณะที่ผ่านมาชั้นบรรยากาศของโลก การลดลงของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์มีสาเหตุบางส่วนจากการกระจายแสงโดยโมเลกุลของอากาศ และฝุ่นละอองขนาดเล็ก และรังสีดวงอาทิตย์บางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยไอน้ำ ออกซิเจน โอโซน และคาร์บอนไดออกไซด์ ในชั้นบรรยากาศของโลก รังสีสุทธิที่ส่องลงมาโดยตรงที่ระดับน้ำทะเล ในขณะที่อากาศแห้ง และไม่มีฝุ่นปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธิจะลดลง 14% แต่ในขณะที่อากาศมีความชื้น และมีฝุ่นละอองในบรรยากาศ ปริมาณรังสีสุทธิจะลดลงประมาณ 40% เมื่อเทียบกับค่าที่อยู่เหนือขึ้นไปในชั้นบรรยากาศ สัดส่วนของพลังงานรังสีตกกระทบในชั้นบรรยากาศจะเพิ่มขึ้น เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ทำมุมกับแนวระนาบลดลง ซึ่งสอดคล้องกับความกว้างของทางเดินแสงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้น การประมาณค่าทางเดินของแสงอาทิตย์ในชั้นบรรยากาศเป็นสัดส่วนกับมุมของดวงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น เช่น จะมีความยาวสองเท่าเมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม 30° ที่จุดสูงสุด (Kirk, 1994)

3) อิทธิพลของเมฆในท้องฟ้า (effect of clouds cover) เนื่องจากเมฆเป็นตัวกลางที่อาจจะบังแสงอาทิตย์ ทำให้พลังงานแสงในส่วนที่จะส่งตรงลงมายังพื้นดินนั้นถูกกำจัดออกไป อย่างไรก็ตามเกี่ยวกับอิทธิพลของเมฆนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของเมฆด้วย

ปริมาณ ความหนา และชนิดเมฆเป็นตัวกลางที่บดบังรังสีดวงอาทิตย์ ทำให้รังสีดวงอาทิตย์ในส่วนที่ส่องลงมายังพื้นดินนั้นลดลง โดยเมฆชนิดต่างๆ มีผลต่อปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน คือ เมฆแต่ละชนิดจะอยู่ที่ระดับความสูง และความหนาของเมฆแตกต่างกัน เมฆที่อยู่ในระดับความสูงมากๆ มีการบดบังปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมายังพื้นผิวโลกได้น้อยกว่าเมฆที่อยู่ใกล้พื้นดิน ส่วนความหนาของเมฆ เมฆชนิดที่มีความหนามาก การบดบังปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมายังผิวโลกก็มากตามไปด้วย เช่น เมฆเซอร์รัส (cirrus) เป็นเมฆที่มีลักษณะเป็นปุย

หรือเป็นเส้นสีขาว ไม่ติดกันเป็นแผ่น อยู่ที่ระดับความสูง 6-12 กิโลเมตร ซึ่งเป็นระดับที่สูงที่สุด จึงมีผลต่อการลดลงของปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกน้อยที่สุด

รังสรรค์ (2547) ได้อธิบายว่า เมฆมีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดปริมาณพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ อิทธิพลนี้เปลี่ยนแปลงไปกับชนิดของเมฆในท้องฟ้า และไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางปริมาณได้แน่นอน สภาพทั่วไปเมฆชั้นสูงที่เรียกว่า เมฆซีร์รัส (cirrus clouds) มีอิทธิพลน้อยที่สุด เมฆชั้นกลางและเมฆชั้นต่ำจะมีอิทธิพลต่อการลดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้นตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมฆคิวมูลัส (cumulus) ที่แตกเป็นก้อนกระจายในท้องฟ้าช่วงฤดูร้อนมักทำให้รังสีดวงอาทิตย์เกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาระหว่างก้อนเมฆ และทำให้ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ลงสู่พื้นโลกได้มากขึ้นด้วย

4) อิทธิพลของเส้นรุ้ง (effect of latitude) เนื่องจากโลกนี้มีพื้นฐานคล้ายทรงกลมที่มีบริเวณเส้นศูนย์สูตรอยู่ใกล้ดวงอาทิตย์มากที่สุด ประกอบกับการหมุนของโลกรอบแกนที่เอียง $23\frac{1}{2}^{\circ}$ ทำให้แนวตั้งฉากลำแสงของดวงอาทิตย์กับผิวโลกอยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ $23\frac{1}{2}^{\circ}$ N จึงมีผลทำให้บริเวณผิวโลกที่เส้นรุ้งต่ำๆ มีโอกาสได้รับพลังงานมากตลอดปี และการได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ในบริเวณเส้นรุ้งต่ำๆ นี้ Nieuwolt (1977) ได้อธิบายว่า นอกจากจะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มาก เนื่องจากมีระยะทางใกล้กับดวงอาทิตย์แล้ว มุมของลำแสงที่ตกกระทบกับผิวโลกตอนเที่ยงวันนั้นส่วนใหญ่ยังตั้งฉากกับผิวโลก ซึ่งตามกฎของแลมเบิร์ต และ โคซายน์แล้วบริเวณนี้จะได้รับพลังงานมากกว่าบริเวณที่มีเส้นรุ้งสูงๆ ที่ลำแสงตกกระทบกับผิวโลกแคบกว่าและอีกประการหนึ่งเมื่อพิจารณาถึงความหนาของชั้นบรรยากาศที่ลำแสงส่องผ่านแล้วบริเวณเส้นศูนย์สูตรจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าบริเวณเส้นรุ้งสูงๆ ดังนั้นบริเวณเส้นรุ้งสูงๆ จึงได้รับพลังงานแสงน้อยกว่าบริเวณเส้นรุ้งต่ำๆ

5) อิทธิพลของความสูงและทิศทางของความลาดเท (effect of elevation and aspect) เนื่องจากบนที่สูงความหนาแน่นของอากาศจะลดลงรวมทั้งไอน้ำในอากาศด้วย จึงมีผลทำให้พลังงานแสงแดดสามารถเล็ดลอดเข้ามาสู่ผิวพื้นได้มากขึ้น Barry และ Chorley (1971) กล่าวว่า ในบริเวณเส้นรุ้งตอนกลาง เมื่อความสูงของพื้นที่เพิ่มขึ้น 1,000 m พื้นที่นั้นมีโอกาสได้รับพลังงานแสงแดดเพิ่มขึ้น 5 – 15 % เมื่อวัดในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ทั้งนี้เมื่อเทียบกับสถานที่ซึ่งอยู่ใกล้ระดับน้ำทะเล

เกี่ยวกับทิศทางของความลาดเทมีผลต่อการได้รับพลังงานแสงแดดด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าทิศทางของความลาดเทนั้นหันด้านหน้าไปทางทิศเหนือ ผิวพื้นบนความลาดเทนั้นจะสูญเสียพลังงานออกไปได้มากกว่าความลาดเทที่หันไปทางทิศใต้ ดังนั้นทั้งความสูงของพื้นผิวโลกและทิศทางของความลาดเทมีอิทธิพลต่อการได้รับและการเก็บกักพลังงานแสงแดด

6) อิทธิพลของพื้นดิน และพื้นทะเล (effect of land and sea) เนื่องจากพื้นดินและพื้นทะเลมีความสามารถในการดูดกลืน หรือสะท้อนพลังงานที่ตกกระทบผิวโลกได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ พื้นน้ำจะสามารถเก็บสะสมความร้อนได้มากกว่าพื้นดิน ในทางกลับกันพื้นน้ำจะคายความร้อนสู่ชั้นบรรยากาศอย่างรวดเร็ว

1.4 การถ่ายเทพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ในบรรยากาศของโลก (disposition of solar radiation in the earth atmosphere system)

กระบวนการของสมดุลของพลังงานของพื้นผิวโลก และชั้นบรรยากาศ ซึ่งค่าที่ทำให้มีค่าในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ยของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ลงสู่พื้นโลกทั้งหมด ซึ่งโลกจะดูดซับ (absorbed) ไว้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และสะท้อนกลับ (reflection) 30 % และ 50 % ของแสงที่ลงมาสู่พื้นโลก จะถูกดูดซับที่ระดับสูงสุดของชั้นบรรยากาศ 3 % จะถูกดูดซับในชั้นสตราโทสเฟียร์ (stratosphere) ซึ่งเป็นชั้นของโอโซน และ โมเลกุลของออกซิเจน ในขณะที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำอยู่ในชั้นนี้เพียง 0.5 % และ 17 % ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ลงสู่พื้นผิวโลกจะถูกดูดซับโดยชั้นโทรโปสเฟียร์ (troposphere) ซึ่งประกอบด้วย ไอน้ำ 0 – 4 % และเมฆ 3 %

Forrester (1957) ได้รายงานว่า ปรากฏการณ์ของความร้อนในโลกเรานี้มีขึ้น เนื่องด้วยผิวพื้นโลกได้รับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์ ซึ่งมีทั้งพลังงานคลื่นส่วนที่เป็นแสงสว่าง และส่วนที่เป็นคลื่นพลังงานความร้อน แต่พลังงานส่วนที่เป็นคลื่นแสงสว่างนี้เมื่อกระทบที่ผิวพื้นโลกแล้วปริมาณเกือบทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเช่นเดียวกัน ดังนั้นปริมาณพลังงานความร้อนที่ผิวพื้นโลกได้รับทั้งหมดจึงมีความสัมพันธ์อย่างเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกได้รับ

Lee (1926) ได้อธิบายว่า พลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ส่งมายังโลก ส่วนหนึ่งของพลังงานนี้จะถูกโลกดูดซับเอาไว้ (absorbed) เพื่อใช้ในกระบวนการต่างๆ ส่วนที่เหลือจะถูกสะท้อนกลับ

ออกไปสู่อวกาศ (scattering or reflection) ซึ่งในลักษณะที่แตกต่างกันก็จะมีการสะท้อนที่ต่าง
กัน

1.5 สมดุลรังสี (radiation balance)

Budyko (1974) อธิบายว่า สมดุลรังสีของพื้นผิวโลก (R) เท่ากับความแตกต่างระหว่าง
การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์กับรังสีคลื่นยาวสุทธิ ดังสมการที่ (1)

$$R = Q(1-\alpha) - I \quad \dots(1)$$

เมื่อ Q คือ รังสีคลื่นสั้นทั้งหมด (รวมรังสีตรงและรังสีกระจาย)

α คือ อัลบีโด (albedo) เป็นการสะท้อนรังสีคลื่นสั้นทั้งหมดโดยพื้นผิวโลก

I คือ รังสีคลื่นยาวสุทธิ

Monteith (1973) อธิบายว่า สมดุลรังสีเป็นผลรวมของรังสีตกกระทบคลื่นสั้นกับการ
ดูดกลืนรังสีคลื่นยาวหักออกจากผลรวมของการสะท้อนและการผ่านของรังสีคลื่นสั้นกับการแผ่
รังสีคลื่นยาว ซึ่งสมดุลรังสีต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยของพื้นผิวสามารถเขียนสมการที่ (2) ดังนี้

$$R_n = (I - \rho_b)(S_i + S_c) + \epsilon(L_d + L_c - L_b) \quad \dots(2)$$

เมื่อ R_n	คือ	ปริมาณรังสีสุทธิที่โลกได้รับ	($W m^{-2}$)
ρ_b	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวัตถุ	($W m^{-2}$)
S_i	คือ	รังสีคลื่นสั้นที่ลงมาถึงพื้นผิวโลก	($W m^{-2}$)
S_c	คือ	รังสีคลื่นสั้นที่มาจากสิ่งแวดล้อม	($W m^{-2}$)
L_d	คือ	รังสีคลื่นยาวที่ลงมาถึงชั้นบรรยากาศของโลก	($W m^{-2}$)
L_c	คือ	รังสีคลื่นยาวที่แผ่ออกมาจากสิ่งแวดล้อมต่างๆ	($W m^{-2}$)
L_b	คือ	ค่าเปลี่ยนแปลงรังสีคลื่นยาวที่อุณหภูมิพื้นผิว	($W m^{-2}$)

Lee (1926) ได้อธิบายไว้ว่า ภูมิอากาศรังสีดวงอาทิตย์ (radiation climate) เกิดจาก
ระบบในชั้นบรรยากาศของโลกที่กำหนดโดยปัจจัยทางดาราศาสตร์ และการสะท้อนรังสีดวง

อาทิตย์ของระบบ นอกชั้นบรรยากาศโลกมีองค์ประกอบ 3 ส่วน คือ รังสีที่เข้ามาในชั้นบรรยากาศโลก ส่วนที่สะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ และรังสีที่ออกไปนอกโลกจากการแผ่รังสีของโลก ปริมาณรังสีที่แผ่จากโลกแตกต่างกับปริมาณรังสีที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่จากโลกเป็นรังสีคลื่นยาว แต่รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์เป็นรังสีคลื่นสั้น เมื่อประมาณค่าแล้วระบบทั้งหมดต้องสมดุลระหว่างพลังงานที่เข้ามา และออกไป ดังสมการที่ (3)

$$R_n = S_b - S_r - L_o = 0 \quad \dots(3)$$

เมื่อ R_n	คือ	รังสีดวงอาทิตย์สุทธิ	($ly \text{ min}^{-1}$)
S_b	คือ	รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์	($ly \text{ min}^{-1}$)
S_r	คือ	รังสีสะท้อนของรังสีคลื่นสั้น	($ly \text{ min}^{-1}$)
L_o	คือ	รังสีคลื่นยาวที่แผ่ออกนอกโลก	($ly \text{ min}^{-1}$)

พื้นโลกนอกจากจะได้รับรังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์และท้องฟ้าแล้ว โลกยังได้รับรังสีคลื่นยาวจากการแผ่รังสีความร้อนของเมฆและท้องฟ้าด้วย ดังนั้นสมดุลรังสีบนพื้นผิวใดๆ ของโลกจะเป็นผลของความสมดุลรังสีคลื่นสั้น และรังสีคลื่นยาว (รังสรรค์, 2547)

1.5.1 สมดุลรังสีคลื่นสั้น (short wave radiation balance) เป็นความสมดุลระหว่างรังสีคลื่นสั้นที่ลงสู่พื้นผิวในทิศทางต่างๆ กัน ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (4)

$$R_{swbal} = R_{sw} \downarrow - R_{sw} \uparrow = (1-r) R_{sw} \uparrow \quad \dots(4)$$

เมื่อกำหนดให้	R_{swbal}	คือ สมดุลรังสีคลื่นสั้น	($cal \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
	$R_{sw} \downarrow$	คือ รังสีคลื่นสั้นที่ลงสู่พื้นผิวที่พิจารณา	($cal \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
	$R_{sw} \uparrow$	คือ รังสีคลื่นสั้นที่สะท้อนออกจากพื้นผิวนั้นๆ	($cal \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
	r	คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของรังสีคลื่นสั้น	

ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงสู่พื้นผิวโลกจะมีมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ สำหรับปริมาณรังสีคลื่นสั้นที่ออกจากพื้นผิวโลกส่วนใหญ่เกิดจากการสะท้อนกลับของรังสีปริมาณการสะท้อนกลับของรังสีคลื่นสั้นนี้จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น โดยทั่วไป

อัตราส่วนระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.3 - 0.4 ไมโครเมตรที่สะท้อนออกทั้งหมดกับรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงมาบนพื้นผิวนั้นๆ เรียกว่า แอลบีโด (albedo) ในการพิจารณาการสะท้อนกลับของรังสีจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะของพื้นผิวที่รังสีตกกระทบ ธรรมชาติของรังสีจะสะท้อนกลับในทุกทิศทางบนพื้นผิวขรุขระ ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับของรังสีคลื่นสั้นบนพื้นผิวต่างๆ จะแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาพการสะท้อนรังสีคลื่นสั้นของพื้นผิวต่างๆ

ชนิดของพื้นผิว	สัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีคลื่นสั้น (r)
1. แปลงพืชปลูก	
อัลฟัลฟา	0.02 - 0.05
ฝ้าย	0.20 - 0.22
หญ้า	0.14 - 0.37
ข้าวโพด	0.16 - 0.23
ข้าว	0.12
2. ชนิดดิน	
ดินทรายแห้ง	0.25 - 0.45
ดินสีดำ	0.16 - 0.17
ดินเหนียวแห้ง	0.20 - 0.35
ดินพืด	0.05 - 0.15
3. ป่าไม้	
ป่าไม้สีเขียว	0.03 - 0.06
ป่าไม้ผลัดใบ	0.15 - 0.20
ป่าสนเมืองหนาว	0.10 - 0.15
ป่าชายเลน	0.10 - 0.12
4. หิมะ	
หิมะสีขาว	0.80 - 0.95
หิมะสีคล้ำ	0.42 - 0.70
5. ทะเล	
ทะเลเรียบ	0.07 - 0.08
ทะเลมีคลื่น	0.12 - 0.14

ที่มา: ริงสรรค์ (2547)

1.5.2 สมดุลรังสีคลื่นยาว (long wave radiation balance) เป็นสมดุลระหว่างรังสีคลื่นยาวที่ลงสู่พื้นผิวในทิศทางต่างๆ กัน ซึ่งแสดงได้ดังสมการ (5)

$$R_{lwbal} = R_{lw\downarrow} - R_{lw\uparrow} \quad \dots(5)$$

เมื่อกำหนดให้ R_{lwbal} คือ สมดุลรังสีคลื่นยาว ($\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$)

$R_{lw\downarrow}$ คือ รังสีคลื่นยาวที่ลงสู่พื้นผิวที่พิจารณา ($\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$)

$R_{lw\uparrow}$ คือ รังสีคลื่นยาวที่ออกจากพื้นผิวนั้นๆ ($\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$)

รังสีคลื่นยาวเป็นรังสีความร้อนที่เปล่งออกจากพื้นผิวนั้นรวมทั้งพื้นผิวโลกและบรรยากาศ เกิดจากการที่พื้นโลกและบรรยากาศดูดกลืนพลังงานรังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ไว้จนทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ต่อมาพื้นโลกและบรรยากาศแผ่รังสีออกมาในรูปของรังสีความร้อนคลื่นยาวในช่วงรังสีอินฟราเรด รังสีคลื่นยาวที่แผ่จากโลกเข้าสู่บรรยากาศที่เรียกว่า รังสีแห่งโลก (terrestrial radiation) ส่วนใหญ่มีความยาวคลื่นระหว่าง 3 – 80 μm ช่วงคลื่นความร้อนดังกล่าวนี้คาดคะเนว่า ประมาณร้อยละ 90 จะถูกดูดกลืนไว้ในบรรยากาศโดยไอน้ำ เมฆ และคาร์บอนไดออกไซด์ ยกเว้นที่ความยาวคลื่นระหว่าง 8 – 11 μm สูญเสียออกจากบรรยากาศโลกทางหน้าต่างบรรยากาศ ส่วนใหญ่ของรังสีคลื่นยาวที่บรรยากาศดูดกลืนไว้จะมีการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนให้กับพื้นโลกได้อีก รังสีคลื่นยาวมักมีความเข้าใจผิด และสับสนว่าเป็นรังสีที่เกิดเฉพาะกลางคืน (nocturnal radiation) แต่ในสภาพที่เป็นจริงแล้วรังสีคลื่นยาวเกิดขึ้นได้ทั้งกลางวันและกลางคืน อีกทั้งปริมาณรังสีคลื่นยาวในช่วงเวลากลางวันก็มีปริมาณมาก เนื่องจากโลกมีอุณหภูมิสูงกว่า igit ตามรังสีคลื่นยาวในช่วงกลางคืนนั้นที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของสมดุลพลังงานโลก

ปริมาณพลังงานรังสีคลื่นยาวจากการแผ่รังสีของโลกและบรรยากาศขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิโดยมีความผันแปรตรงกับกำลังสี่ของอุณหภูมิพื้นผิวนั้นๆ ในหน่วยเคลวิน ($^{\circ}\text{K}$) ดังนั้นหากทราบค่าอุณหภูมิพื้นผิวโลกและอุณหภูมิอากาศส่วนที่ใกล้พื้นผิวดินในช่วงขณะนั้นๆ แล้ว พลังงานรังสีคลื่นยาวที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลกเข้าสู่บรรยากาศ และจากบรรยากาศลงสู่พื้นผิวโลก สามารถประมาณค่าว่ามีปริมาณมากน้อยเท่าใดได้ ความแตกต่างระหว่างปริมาณรังสีคลื่นยาวทั้งสองที่มีทิศทางเคลื่อนที่ตรงข้ามกันนี้ที่เรียกว่า รังสีแห่งโลกประสิทธิผล (effective

terrestrial radiation, R_T) อาจประมาณค่าจากสมการของบรุนท์ (Brunt equation) โดย R_T มีหน่วยเป็น $W m^{-2}$ ดังสมการ (6)

$$R_T = \sigma T^4 (0.56 - 0.8\sqrt{e})(1 - aC) \quad \dots(6)$$

เมื่อกำหนดให้ e คือ ความดันไอน้ำ มีหน่วยเป็น กิโลพาสคัล (kPa)

a คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดเมฆ โดย 0.025, 0.06 และ 0.09 สำหรับเมฆชั้นสูง ชั้นกลาง และชั้นต่ำ ตามลำดับ

C คือ จำนวนส่วนของท้องฟ้าที่มีเมฆ เมื่อท้องฟ้าทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็น 10 ส่วน

สมการที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียรังสีคลื่นยาวออกจากบรรยากาศโลกจะลดลงตามปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในบรรยากาศ และปริมาณเมฆที่ปกคลุมในท้องฟ้า

1.6 รังสีสุทธิ (net radiation; R_n)

เมื่อพิจารณาบนพื้นผิวใดๆ ปริมาณรังสีสุทธิ (R_n) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวนั้นๆ จะเป็นผลรวมของสมดุลรังสีคลื่นสั้น และสมดุลรังสีคลื่นยาว ซึ่งแสดงในรูปสมการอย่างง่าย ๆ ดังแสดงในสมการที่ (7) (รังสรรค์, 2547) คือ

$$R_n = R_{swbal} + R_{lwbal} = (1-r) R_{sw} \downarrow + R_{lwbal} \quad \dots(7)$$

ปริมาณพลังงานรังสีสุทธิที่พื้นผิวโลกมีประโยชน์ต่อกระบวนการสำคัญต่างๆ ที่เกี่ยวกับสมดุลพลังงาน ดังสมการที่ (8)

$$R_n = LE + H + G + PS + M \quad \dots(8)$$

เมื่อกำหนดให้ LE คือ พลังงานความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำ ($MJ m^{-2} \cdot day^{-1}$)

H คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น ($MJ m^{-2} \cdot day^{-1}$)

G คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้ดินมีภูมิเพิ่มขึ้น ($MJ m^{-2} \cdot day^{-1}$)

PS คือ พลังงานที่พืชใช้ในการสังเคราะห์แสง ($W m^{-2}$)

M คือ พลังงานที่ใช้เพื่อกระบวนการอื่นๆ ที่เกี่ยวกับการหายใจ และการเก็บกักความร้อนในพุ่มใบพืช (plant canopy) เป็นต้น

สมมูลรังสี และสมมูลพลังงานบนพื้นผิวดินใดๆ สภาวะโดยทั่วไปปริมาณรังสีสุทธิส่วนใหญ่ของพื้นผิวจะถูกใช้ไปในกระบวนการระเหยน้ำ หรือการเพิ่มอุณหภูมิอากาศมากกว่ากระบวนการอื่นๆ กล่าวคือ รังสีสุทธิจะถูกใช้เพื่อการระเหยน้ำมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิอากาศสำหรับบริเวณที่มีความชุ่มชื้น ในทางตรงข้ามรังสีสุทธิจะถูกใช้เพื่อการเพิ่มอุณหภูมิอากาศมากกว่าการระเหยน้ำในบริเวณพื้นที่ที่แห้งแล้ง

1.7 พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

เกษม และคณะ (2517) ได้อธิบายว่า ค่ารังสีคลื่นสั้นที่แผ่ลงสู่ผิวโลก (R_{sd}) และรังสีคลื่นยาวลงสู่ผิวดิน (R_{ld}) ในพื้นที่ป่าดิบแล้งสะแกราช อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา พบว่าค่าของรังสีคลื่นยาวที่ลงสู่ผิวดิน (R_{ld}) นั้นมีค่าไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก เพราะมาว่าในกรณีใดๆ พื้นที่ผิวของป่าสะแกราชจะทำให้การแผ่รังสีเกือบเท่าๆ กัน ส่วนค่าของรังสีคลื่นสั้นที่สะท้อนสู่บรรยากาศ (R_{su}) นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 25 เปอร์เซ็นต์ของค่ารังสีคลื่นสั้นที่แผ่ลงสู่ผิวโลก (R_{sd}) อนึ่งค่ารังสีดวงอาทิตย์สุทธิ (R_n) ทั้งของป่าไม้และป่าถูกทำลายมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักเช่นกัน ส่วนค่าของพลังงานความร้อนที่ลงสู่ผิวดิน (G) นั้นส่วนใหญ่แล้วมีน้อย อย่างไรก็ตามความผันแปรของรังสีความร้อนนั้น อาจมีการเปลี่ยนแปลงภายในหนึ่งวัน คือจะร้อนที่สุดก็ขึ้นอยู่กับสภาพของท้องฟ้านั่นเอง

ชยันต์ และคณะ (2536) ได้ศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีแสงอาทิตย์ของจังหวัดพิษณุโลก พบว่า ค่าเฉลี่ยรังสีรวมรายวันของดวงอาทิตย์ในแนวราบที่จังหวัดพิษณุโลกมีค่าเท่ากับ $18.508 \text{ MJ m}^{-2} \text{ D}^{-1}$ ปริมาณรังสีกระจายเท่ากับ $11.702 \text{ MJ m}^{-2} \text{ D}^{-1}$ ส่วนค่าเฉลี่ยรังสีรวมรายวันของดวงอาทิตย์ และรังสีกระจายที่เอ็กเซลได้รวบรวมข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยา 44 สถานีในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2494 – 2543 ได้ค่าเท่ากับ $19.693 \text{ MJ m}^{-2} \text{ D}^{-1}$ และ $8.38 \text{ MJ m}^{-2} \text{ D}^{-1}$ ตามลำดับ

วัชรา (2542) ได้รายงานผลว่า การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิวโลก โดยใช้ข้อมูลดาวเทียม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย มีการเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของพื้นผิว และเวลาในรอบปี พบว่าพื้นที่ป่าไม้แปรค่าอยู่ในช่วง 9 – 15% และพื้นที่การเพาะปลูกแปรค่าอยู่ในช่วง 12 – 20%

Exell (1977) ได้ทำการวัดค่าพลังงานรังสีดวงอาทิตย์คลื่นยาว (longwave radiation flux) ในบรรยากาศเหนือพื้นดินจนถึงระดับสูง 12 km ที่จังหวัดเชียงใหม่ อุบลราชธานี สงขลา และ กรุงเทพมหานคร พบว่า เมื่อท้องฟ้าปราศจากเมฆวัดค่าได้ 420 W m^{-2} ในเวลากลางวันในฤดูใบไม้ผลิที่กรุงเทพฯ และวัดค่าได้ 313 W m^{-2} ในเวลากลางคืนในฤดูหนาวที่จังหวัดเชียงใหม่

Mahammad (1976) ศึกษาการแผ่รังสีในบรรยากาศ และอุณหภูมิในท้องฟ้าที่จังหวัดเชียงใหม่ อุบลราชธานี สงขลา และกรุงเทพมหานคร ในช่วงเวลา 7.00 น. ทุกวัน ผลปรากฏว่ามีค่าการแผ่รังสีสูงสุด 457 W m^{-2} เมื่ออุณหภูมิในท้องฟ้าเป็น $26.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่จังหวัดอุบลราชธานี และค่าต่ำสุด 304 W m^{-2} เมื่ออุณหภูมิในท้องฟ้าเป็น $-2.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่จังหวัดเชียงใหม่

2. ประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ (radiation use efficiency, RUE)

2.1 ความหมาย

พงษ์ศักดิ์ (2522) กล่าวว่า ในช่วงเวลาที่พืชสร้างมวลชีวภาพนั้น จะเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานของดวงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานทางสัคดิ์เคมีที่ประกอบอยู่ในมวลของพืช ซึ่งวัดออกมาเป็นน้ำหนักแห้ง

รังสรรค์ (2538) กล่าวว่า ปริมาณมวลชีวภาพสะสมของพืชเป็นฟังก์ชันของปริมาณรังสีสะสมที่พืชดูดกลืนกับประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ของพืช (radiation use efficiency, RUE, g MJ^{-1})

Monteith (1977) ได้รายงานไว้ว่า ประสิทธิภาพการใช้รังสีของพืชหมายความถึงประสิทธิภาพของพืชในการแลกเปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์ให้กลายเป็นมวลชีวภาพ โดยมีความผันแปรกับ (1) สัมประสิทธิ์การลดปริมาณรังสี (radiation extinction coefficient) หมายถึงส่วนของรังสีที่

ถูกดูดกลืนต่อหน่วยระยะทางที่รังสีส่องผ่านตัวกลางนั้นๆ (2) สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี และ (3) สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์

ดังนั้นประสิทธิภาพการใช้รังสีของพืช (radiation use efficiency) หมายถึง ประสิทธิภาพของพืชที่ดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ หรือการเปลี่ยนพลังงานรังสีดวงอาทิตย์เป็นมวลชีวภาพ เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งในพืชแต่ละชนิดก็มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์แตกต่างกัน

2.2 พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

เอ็ง (2535) อธิบายไว้ว่า กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นเนื่องจากสารสี (pigment) ในพืช เช่น คลอโรฟิลล์ แครโรทีน ดูดกลืนโฟตอน โดยโฟตอนที่มีระดับพลังงานเหมาะสมเท่านั้นที่จะเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง โฟตอนที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 760 nm มีพลังงานน้อยเกินไปที่จะทำให้เกิดการสังเคราะห์แสง ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่า 390 nm มีพลังงานมากเกินไป จึงทำให้เกิด ionization และเกิดการเสื่อมสลายของสารสีที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง แสดงว่าเฉพาะโฟตอนในช่วงความยาวคลื่น 390-760 nm เท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว เรียกว่า visible light (ตารางที่ 2)

เมื่อสารสีดูดกลืนโฟตอน ปฏิกริยาร่วม (interaction) ระหว่างสารสี และ โฟตอนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับของพลังงานอิเล็กตรอน (electron excitation) ทำให้เกิด light reaction ของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ในการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของแสงกับพืชจำเป็นต้องทราบปริมาณแสงที่ตกกระทบกับพืช (ใบพืช) เนื่องจากอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงขึ้นอยู่กับอัตราการดูดกลืนโฟตอน

ตารางที่ 2 ลักษณะความยาวคลื่นต่างๆ ในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (visible light)

คลื่นสีต่างๆ	ช่วงความยาวคลื่น โดยประมาณ (nm)	ความยาวคลื่นที่ใช้ เป็นตัวแทน (nm)	ความถี่ (cycle s ⁻¹)	พลังงาน (KJ mol ⁻¹)
Ultraviolet (UV)	น้อยกว่า 400	254	11.80x10 ¹⁴	471
Violet	400-425	410	7.31 x10 ¹⁴	292
Blue	425-490	460	6.52 x10 ¹⁴	260
Green	490-560	520	5.77 x10 ¹⁴	230
Yellow	560-585	570	5.26 x10 ¹⁴	210
Orange	585-640	620	4.84 x10 ¹⁴	193
Red	640-740	680	4.41 x10 ¹⁴	176
Infrared (IR)	มากกว่า 740	1400	2.14 x10 ¹⁴	85

ที่มา : เอ็จ (2535)

2.3 ความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

Wijk (1966) กล่าวว่า พลังงานของการสังเคราะห์แสงเป็นอัตราส่วนระหว่าง พลังงานเคมีที่ถูกเก็บสะสมไว้ใช้ในการสังเคราะห์อินทรีย์วัตถุกับพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่ดูดกลืนในคลอโรฟิลล์ ในช่วงคลื่นสีแดงมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 20-35 % ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงจะลดลงในช่วงคลื่นรังสีใกล้อินฟราเรด โดยมีค่าเท่ากับศูนย์ และในช่วงคลื่นรังสีที่ตามองเห็นมีพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงสูง เมื่อประสิทธิภาพต่อควอนตัมของรังสีดวงอาทิตย์ที่ดูดกลืนเป็นค่าคงที่ ประสิทธิภาพพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงประมาณ 16% ของความยาวคลื่น 0.4 μ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

เมื่อพืชชนิดต่างๆ ได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ภายใต้สภาพธรรมชาติ บางส่วนของพืชจะทำการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์บางส่วน ซึ่งการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์โดยใบขึ้นกับชนิดและความหนาของใบ ซึ่งเป็นตัวแทนความสำคัญของปัจจัยการดูดกลืนพลังงานของแต่ละใบที่ได้รับพลังงาน (ตารางที่ 3 และ 4)

ตารางที่ 3 ลักษณะการสะท้อน และการส่องผ่านของใบ (สีเขียว) ในช่วงรังสีคลื่นสั้น

ช่วงความยาวคลื่น (μ)	การสะท้อน (%)	ช่วงความยาวคลื่น (μ)	การส่องผ่าน (%)
< 0.4	< 10	< 0.4	< 10
0.4-0.75	8-20	0.4-0.7	5-20
0.75-1.0	~ 40	0.7-1.0	40-50

ที่มา : เอ็จ (2535)

ตารางที่ 4 การผ่านของแสงในใบพืชแต่ละชนิด

ชนิดของใบ	การส่องผ่านของแสงทั้งหมด (%)
Common hazel (<i>Corylus avellana</i>)	26
Dandelion (<i>Taraxacum officinale</i>)	28
Lilac (<i>Seringa vulgaris</i>)	26
Roses (<i>Rosa</i>)	25
Alder (<i>Alnus vulgaris</i>)	21
Common birch (<i>Betula verrucosa</i>)	26
Aspen (<i>Populus tremula</i>)	21

ที่มา : เอ็จ (2535)

เอ็จ (2535) ได้อธิบาย ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบพืช ได้แก่

2.3.1 รังสีควงอาทิตย์ (irradiance/PPFD) อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (Ps rate) ของพืชเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามการเพิ่มขึ้นของ irradiance หรือโฟตอนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthetic photon flux density, PPF) เมื่อถึงระดับของ irradiance ค่าหนึ่งที่ Ps rate ของใบ

พืช C_3 ไม่เพิ่มขึ้น แต่คงที่ สำหรับระดับของ irradiance ที่ทำให้ Ps rate เท่ากับ Rd rate (carbondioxide exchange rate, CER = 0) เรียกว่า light compensation point ส่วนประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบพืชนั้น มีค่าสูงกว่าที่ low irradiance และประสิทธิภาพจะค่อยๆ ลดลงตามระดับของ irradiance ที่เพิ่มขึ้น

2.3.2 อุณหภูมิ มีผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ จึงมีผลต่อค่าการสังเคราะห์ด้วยแสงทั้งหมด (gross photosynthesis, Pg) การหายใจ (Rd) และมีผลต่อค่าการสังเคราะห์ด้วยแสงปรากฏ (apparent photosynthesis, AP) เดิมเรียกกันว่า net photosynthesis) อุณหภูมิที่ปรากฏตามธรรมชาติ ไม่มีผลต่อ photochemical reaction

2.3.3 ความสามารถในการรับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 availability)

1) ความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 (CO_2 concentration) ซึ่งในปัจจุบันปริมาณ CO_2 มีค่า 345 – 350 ml/l ของอากาศ จะเป็น limiting factor สำหรับ Ps เพราะกระบวนการ turbulence (การเคลื่อนที่ของอากาศแบบปั่นป่วน) จะพัดเอา CO_2 เข้ามาชดเชยในบริเวณที่มีการปลูกพืช

2) ความต้านทานต่อการแพร่กระจายของ CO_2 (resistance to CO_2 diffusion) สำหรับใบพืชมี 3 ค่า คือ ความต้านทานอันเนื่องมาจากมีชั้นอากาศบางๆ หุ้มอยู่โดยรอบของตัวใบ (Boundary layer resistance, r_a) ความต้านทานเนื่องจากการปิดเปิดของปากใบ (stomatal resistance, r_s) และความต้านทานเนื่องจาก mesophyll cell (mesophyll resistance, r_m) โดย r_a และ r_s เป็นความต้านทานต่อ CO_2 ในสภาพ gaseous phase และ r_m เป็นความต้านทานต่อ CO_2 ในสภาพ liquid phase ตั้งแต่ mesophyll apoplast จนกระทั่งถึง fixation site ดังสมการที่ (9)

$$r_{CO_2} = r_a + r_s + r_m \quad \dots(9)$$

2.3.4 น้ำ โดยทั่วไปเมื่อพืชขาดน้ำ (absorption < transpiration) ผลประการแรก คือ r_s เพิ่มขึ้น เพราะปากใบปิด P_s เริ่มลดลงเมื่อ leaf water potential มีค่าประมาณ -0.8 KJ Kg^{-1} และ slope ของเส้นกราฟค่อนข้างชัน ค่า P_s เริ่มคงที่ เมื่อ leaf water potential มีค่า -0.14 KJ Kg^{-1}

2.3.5 อายุใบ Ps rate มีค่าสูงสุด เมื่อใบพืชมีการขยายตัวของใบสูงสุด (maximum leaf expansion)

2.3.6 ธาตุอาหาร จัดเป็นปัจจัยรอง (secondary factor) กล่าวคือ ทำให้มีการเพิ่มพื้นที่ใบเพื่อ Ps โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุไนโตรเจน ส่วนธาตุฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียมมีส่วนช่วยลดค่า Ps (เพิ่ม stomatal conductance)

2.4 การคำนวณประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์

การประเมินประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานรังสีดวงอาทิตย์อยู่บนพื้นฐานพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่เข้ามาทั้งหมด (total incoming solar radiation) และรังสีแสงสังเคราะห์เท่านั้น (Ondok, Nečcas and Jarvis, 1971) การหาประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ ได้มีผู้ศึกษา ดังนี้

2.4.1 พลังงานรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนไว้ขณะช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัลที่เสนอโดย Goss *et al.* (1986); Varlet-Grancher *et al.* (1989) ดังแสดงในสมการที่ (10)

$$PAR_a = \epsilon_i PAR_i \quad \dots(10)$$

เมื่อกำหนดให้ PAR_a คือ ปริมาณรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน ($MJ\ m^{-2}$)

PAR_i คือ ปริมาณรังสีสังเคราะห์เหนือแปลงพืช ($MJ\ m^{-2}$)

ϵ_i คือ ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีของพืชปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืชประมาณค่าได้จากการประยุกต์สมการอังกตรอม คือ

$$PAR_i = PAR_o (a+b (n/N)) \quad \dots(11)$$

เมื่อกำหนดให้ PAR_o คือ ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือบรรยากาศโลก ($MJ\ m^{-2}$)

a, b คือ ค่าคงที่ ซึ่งแปรผันตามละติจูด

n คือ ระยะเวลาที่มีแสงแดดจ้า (ชั่วโมงต่อวัน)

N คือ ระยะเวลาที่คาดว่ามิแสงแดดสูงสุด (ชั่วโมงต่อวัน)

ริงสรรค (2547) ได้รายงานค่า n จากการหาชั่วโมงที่มีแสงแดด ส่วนค่า a และค่า b เป็นค่าคงที่มีความผันแปรตามละติจูด และสภาพอากาศ สำหรับประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ระหว่างละติจูดที่ $6^{\circ} - 20^{\circ} N$ นั้น วิบูลย์ บุญยชโรกุล (2518) ได้แนะนำให้ใช้ค่า $a = 0.26$ และค่า $b = 0.50$ ส่วนภูมิอากาศภาคใต้ค่าคงที่ a และ b ที่เหมาะสมคือ 0.24 และ 0.40 ตามลำดับ (ชัยวิทย์, 2527)

สำหรับค่าประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงของพืช พบว่ามีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลกับค่าดัชนีพื้นที่ใบ ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ

$$E_i = 0.95 (1 - \text{EXP}(-KL)) \quad \dots(12)$$

เมื่อกำหนดให้ K คือ สัมประสิทธิ์การลดปริมาณรังสีในพุ่มใบพืช (extinction coefficient)

L คือ ดัชนีพื้นที่ใบ

2.4.2 Anderson (1971) ได้อธิบายไว้ว่า Ross และ Nil'son (1963) ชี้ให้เห็นว่า รังสีแสงสังเคราะห์ (photosynthetically active radiation, PAR) สามารถประเมินได้จากการวัดรังสีรวมคลื่นสั้น โดยใช้สมการวิเคราะห์ข้อมูลที่ Efimova (1965, 1967) ได้เสนอไว้ ดังแสดงในสมการที่ (13)

$$R_{\text{PHAR}} = 0.43S' + 0.57D' \quad \dots(13)$$

โดยที่ R_{PHAR} คือ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่พืชใช้ในการสังเคราะห์แสง (PAR)
 S' คือ รังสีตรง (direct solar radiation)
 D' คือ รังสีกระจาย (scattered solar radiation)

2.4.3 Oka, M. *et al.* (1987) กล่าวว่า ประสิทธิภาพการใช้พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ (efficiency of solar energy utilization, EU) สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (14)

$$EU (\%) = (K1*\Delta L + K2*\Delta S + K3*\Delta T + K4*\Delta D) / \Sigma S \quad \dots(14)$$

เมื่อกำหนดให้	K1	=	น้ำหนักแห้งของใบ (Kcal g ⁻¹)
	K2	=	น้ำหนักแห้งของลำต้น (Kcal g ⁻¹)
	K3	=	น้ำหนักแห้งของส่วนหัวใต้ดิน (Kcal g ⁻¹)
	K4	=	น้ำหนักแห้งของใบที่แห้ง (ตาย) และก้านใบ (Kcal g ⁻¹)
	ΔL	=	ผลต่างของน้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้นในใบ (g)
	ΔS	=	ผลต่างของน้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้นในลำต้น (g)
	ΔT	=	ผลต่างของน้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้นในส่วนหัวใต้ดิน (g)
	ΔD	=	ผลต่างของน้ำหนักแห้งที่เพิ่มขึ้นในใบแห้ง และก้านใบ (g)
	S	=	พลังงานรังสีตกกระทบ (cal cm ⁻² day ⁻¹)

2.5 การสังเคราะห์ด้วยแสงของพุ่มใบพืช (canopy or crop photosynthesis)

การผลิตน้ำหนักแห้งทั้งหมดของพืชเป็นผลมาจากการสะสมอาหารที่สร้างได้ (net CO₂ assimilatoin) ตลอดฤดูปลูก อาหารที่สร้างได้เป็นผลมาจากการดูดกลืนพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ และพลังงานรังสีดวงอาทิตย์กระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นโลก ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีผลต่อผลผลิตน้ำหนักแห้งทั้งหมด คือ การดูดกลืนพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของการใช้พลังงานที่ดูดกลืนได้ไปในการตรึง CO₂ (เอ็จ, 2535)

3. การใช้ประโยชน์ที่ดิน

3.1 นิยาม และความหมาย

ดรรรชนี (2531) ได้ให้ความหมายของการใช้ที่ดินไว้ว่า การนำที่ดินมาใช้บรรเทาความต้องการของมนุษย์ในด้านต่างๆ เช่น เกษตรกรรม อุตสาหกรรม และที่อยู่อาศัย เป็นต้น

เอิบ (2526) กล่าวว่า ที่ดินเป็นสิ่งที่บุคคลมีกรรมสิทธิ์ได้ แต่คำว่า ดิน หมายถึง ดินเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และยังประกอบไปด้วยสิ่งแวดล้อมต่างๆ ทั้งทางด้านกายภาพ และสิ่งที่มีอิทธิพลต่อศักยภาพของการใช้ที่ดินนั้นๆ โดยไม่ได้มุ่งพิจารณาเฉพาะดินประการเดียว แต่ได้รวมถึง

ลักษณะทางธรณีวิทยา ภูมิประเทศ ลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา พืชพรรณ สัตว์ และแมลง ตลอดจนสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ในดินในท้องที่นั้นด้วย

FAO (1976) ได้ให้คำนิยามของคำว่า ที่ดิน ไว้ว่า ที่ดิน หมายถึง ส่วนประกอบต่างๆ ทางกายภาพของสิ่งแวดล้อม ได้แก่ สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ดิน อุตุนิยมวิทยา รวมทั้งสิ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และสิ่งที่มนุษย์สร้างในที่ติดกับพื้นผิวโลก

3.2 สิ่งปกคลุมดิน และการใช้ประโยชน์ที่ดิน (land cover and land use)

3.2.1 สิ่งปกคลุมดิน (land cover)

บุญเกียรติ และคณะ (2531) ได้ให้ความหมายของสิ่งปกคลุมดินไว้ว่า สภาพสิ่งของหรือเทวดัตถุใดๆ ที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวดิน โดยมีค่าการสะท้อนพลังงานที่ความยาวช่วงคลื่นต่างๆ กัน

Lambin (1994) ได้ให้ความหมายของสิ่งปกคลุมดินไว้ว่า เทวดัตถุต่างๆ ที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวโลก และส่วนที่อยู่ถัดไปจากพื้นผิวโลกลงไป รวมทั้งสิ่งมีชีวิต ดิน ภูมิประเทศ น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และสิ่งก่อสร้างต่างๆ ที่มนุษย์สร้างขึ้น นอกจากนั้นยังสามารถจำแนกสิ่งปกคลุมดินได้อีกหลายประการตามวัตถุประสงค์ของผู้ศึกษา เช่น พื้นที่ป่าไม้ ทุ่งหญ้าเขตร้อน ทุ่งหญ้าเขตอบอุ่น พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ชุ่มน้ำ และการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์

3.2.2 การใช้ประโยชน์ที่ดิน (land use)

บุญเกียรติ และคณะ (2531) ได้ให้ความหมายของการใช้ประโยชน์ที่ดินไว้ว่า การนำที่ดินมาใช้ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ในด้านต่างๆ เช่น เกษตรกรรม อุตสาหกรรม พาณิชยกรรม และที่อยู่อาศัย ดังนั้นการใช้ประโยชน์ที่ดินมีความเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของมนุษย์ที่มีต่อที่ดินนั้นๆ

นิพนธ์ (2525) ได้ให้ความหมายของการใช้ประโยชน์ที่ดินไว้ว่า การใช้ที่ดิน เพื่อบำบัดความต้องการของมนุษย์ เช่น ใช้ในการเกษตร ใช้เป็นพื้นที่ป่า ใช้เป็นพื้นที่แหล่งน้ำ ใช้เป็นที่ตั้งบ้านเรือนที่อยู่อาศัย ใช้เป็นแหล่งอุตสาหกรรม เป็นต้น

สถิติ (2521) การแบ่งการใช้ที่ดินของประเทศไทยออกเป็น 5 ประเภท คือ

- 1) เมือง และสิ่งก่อสร้าง (urban and built-up land) ได้แก่ ที่อยู่อาศัย ย่านการค้า ย่านอุตสาหกรรม คมนาคม และสถานที่ราชการอื่นๆ
- 2) พื้นที่เกษตรกรรม (agriculture land) ได้แก่ พื้นที่ปลูกพืชล้มลุก และพืชถาวร เช่น สวนผัก สวนผลไม้ พืชไร่ นาข้าว ทุ่งปศุสัตว์ และไร่เลื่อนลอย (shifting cultivation)
- 3) ป่าไม้ (forest land) ได้แก่ พื้นที่ป่าไม้ทั่วไป และจัดแยกย่อยไปตามประเภทของป่าไม้ เช่น ป่าเต็งรัง ป่าเต็งรังผสมไม้สน ป่าเบญจพรรณ ป่าเบญจพรรณผสม ไม้สัก ป่าดิบแล้ง ป่าดิบชื้น ป่าดิบเขา ป่าชายเลน ป่าไผ่ ทุ่งหญ้าธรรมชาติ และสวนป่า เป็นต้น
- 4) แหล่งน้ำ (water bodies) ได้แก่ พื้นที่ที่เป็นแม่น้ำ ลำธาร หนอง บึง ทะเลสาบ และแหล่งกักเก็บน้ำที่สร้างขึ้น
- 5) พื้นที่ว่างเปล่า (idle land) ได้แก่ พื้นที่ที่ปราศจากสิ่งปกคลุม และรวมไปถึงไร่ร้าง

3.3 การใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีผลต่อรังสีดวงอาทิตย์

การใช้ประโยชน์ที่ดินในด้านต่างๆ จะส่งผลทำให้รังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมาสู่พื้นผิวโลกมีปริมาณมากขึ้นเท่าใด ซึ่งการที่รังสีดวงอาทิตย์ส่องลงมายังโลกในปริมาณที่มากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งต่างๆ เช่น ระบบนิเวศ ลักษณะทางอุณหภูมิมิวิทยา เป็นต้น

เกษม และณรงค์ (2526) กล่าวว่า ป่าดิบแล้งมีความสามารถในการดูดซับรังสีคลื่นสั้นทั้งหมด คือ ช่วงคลื่นสั้นกว่า 3 ไมครอน ได้ประมาณ 90 – 95% ค่าต่ำสุด และสูงสุด คือ 80 และ

97% ตามลำดับ โดยคลื่นรังสี ultraviolet และ visible light จะถูกดูดซับมากที่สุดโดยมีค่าคือ ประมาณ 90 – 100% การดูดซับนี้ถือผลจากการปกคลุมของเมฆหมอกจะไม่มีผลเลย และแสง infrared จะมีมากที่ได้เรือนยอดของป่าดิบแล้ง สาเหตุอันสำคัญคือ มีความสามารถซึมผ่านเรือนยอดได้ดี อีกทั้งการแผ่รังสีของป่าโดยขบวนการ reradiation ให้ infrared มากขึ้น

จากการวัดระยะเวลาที่รังสีดวงอาทิตย์ส่องลงมายังพื้นโลก บริเวณสถานีวิจัย ลิงแควลุ่มสะแกราช โดยค่าเฉลี่ยตั้งแต่ปี พ.ศ. 1969 – 1980 มีค่าเฉลี่ยประมาณวันละ 5 ชั่วโมง 40 นาที โดยในช่วงฤดูฝน (มิถุนายน – กันยายน) จะมีช่วงที่รังสีจากดวงอาทิตย์ส่งถึงพื้นโลกนั้น มีค่าอยู่ระหว่าง 3.5 – 5.0 ชั่วโมงต่อวัน ในช่วงฤดูหนาว (ตุลาคม – มกราคม) จะรองลงมาระยะเวลาที่แสงจากดวงอาทิตย์ส่องมามีค่าระหว่าง 5 – 7 ชั่วโมงต่อวัน โดยเฉพาะในช่วงต้นฤดูจะมีระยะเวลาที่สั้น และจะยาวนานขึ้นตอนปลายฤดู และในช่วงฤดูร้อนจะมีระยะเวลาที่แสงส่องมายังพื้นโลกแตกต่างกันตามลักษณะของท้องฟ้า

ความสัมพันธ์ของการใช้รังสีดวงอาทิตย์ในลักษณะพื้นที่ต่างๆ เช่น พื้นที่ที่เป็นป่า หรือพื้นที่ที่มีพืชปกคลุม ปริมาณรังสีความร้อนสุทธิ (R_n) มักถูกนำไปใช้เพื่อการคายระเหยน้ำเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือจะไหลลงสู่ดิน และเผาอากาศ ซึ่งมีค่าน้อย ทำให้พื้นที่ป่า หรือพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมมีอากาศเย็นสบาย ในขณะที่พื้นที่ป่าที่ถูกทำลาย ค่ารังสีดวงอาทิตย์จะถูกใช้เพื่อการระเหยน้ำน้อย เพราะไม่มีน้ำในการระเหยน้ำ ทำให้มีการแปรสภาพความร้อนมีค่ามาก ทำให้มีอากาศร้อนในบริเวณนี้ นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิวของสิ่งก่อสร้าง เช่น อาคาร ตึก ถนนคอนกรีต เป็นต้น จะเป็นส่วนลดค่าของความร้อนรังสีดวงอาทิตย์ เพื่อการระเหยน้ำ แต่ความร้อนจะถูกใช้เพื่อการเผาผลาญอากาศ และเก็บสะสมไว้ในดินมาก จึงทำให้อากาศในเมืองใหญ่ที่มีสิ่งก่อสร้างเหล่านี้มีความร้อนเพิ่มขึ้น หรืออบอ้าวขึ้นทั้งกลางวัน และกลางคืน (วิชา, 2535)

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน (2542) ได้ทำการศึกษาศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละเดือน พบว่า การกระจายความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ของประเทศไทยได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือน เมษายน และเดือน พฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง $20 - 25 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ เมื่อพิจารณาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี

พบว่า บริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยครอบคลุม บางส่วนของจังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี และ อุดรธานี และบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อโยธยา และลพบุรี โดยได้รับรังสี ดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี $19 - 20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด ของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์ต่ำกว่า $16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ จากการคำนวณรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศ พบว่ามีค่า เท่ากับ $18.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ ค่อนข้างสูง

กฤษณพงศ์ และคณะ (2523) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ค่าของการแผ่รังสี และข้อมูล อุตุนิยมวิทยาของสงขลา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2506 – 2510, กรุงเทพฯ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2515 – 2519, นครพนม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2506 – 2510 และเชียงใหม่ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2507 – 2511 ผลการหาค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่า ค่าการแผ่รังสีมีความสัมพันธ์ลำดับสูงกับค่าความยาวนานของ แสงแดด สำหรับสงขลา กรุงเทพฯ และนครพนม ซึ่งสมการที่สร้างขึ้นเพื่อประมาณค่าการแผ่รังสี จากค่าความยาวนานของแสงแดด

นฤมล (2546) ศึกษาการประเมินศักยภาพและโอกาสการเกิดฝน บริเวณภาคเหนือของ ประเทศไทย โดยอาศัยค่าพลังงานแสงอาทิตย์สุทธิ และค่าดัชนีเสถียรภาพอากาศ พบว่า พลังงาน แสงอาทิตย์สุทธิเฉลี่ยรายวันสูงสุดมีค่าเท่ากับ 13.6 MJ m^{-2} และต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 8.4 MJ m^{-2} โดยใน ฤดูร้อนจะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์สุทธิเฉลี่ยรายวันสูงสุด คือ 11.5 MJ m^{-2} รองลงมาคือ ฤดูฝน และฤดูหนาว มีค่าเท่ากับ 10.5 และ 8.9 MJ m^{-2} ตามลำดับ ส่วนปริมาณน้ำฝนรายปีเท่ากับ 1,377 mm ความแปรผันของปริมาณน้ำฝนรายเดือนในแต่ละฤดู จะเห็นได้ว่าฤดูฝนมีปริมาณน้ำฝนมาก ที่สุด รองลงมาคือ ฤดูร้อน และฤดูหนาว ตามลำดับ ซึ่งประเมินศักยภาพและโอกาสการเกิดฝน บริเวณ ภาคเหนือ จากพลังงานแสงอาทิตย์สุทธิ พบว่า ฤดูแล้ง ตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์ – เมษายน ได้สมการ $\%Prob = -71.401 \ln(Rn) + 200.62$ ส่วนฤดูฝน ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม – กันยายน ได้สมการ $\%Prob = -215.87 \ln(Rn) + 592.25$ โดยเดือนกรกฎาคมมีโอกาสการเกิดฝนสูงสุดถึง 86.62% รองลงมา คือ เดือน สิงหาคม, กันยายน, พฤษภาคม, มิถุนายน และกุมภาพันธ์ มีโอกาสเกิดฝน 76.25%, 72.29%, 69.82%, 64.05%, 47.21% และ 40.21% ตามลำดับ ส่วนในเดือน เมษายนมีโอกาสเกิดฝนน้อยที่สุด คือ 14.52% นอกจากนี้โอกาสการเกิดฝนไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่าง

เดียว แต่ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ปริมาณไอน้ำในอากาศ ขบวนการเกิดความชื้น และฝุ่นละอองในอากาศ

พิมพ์พงศ์ (2547) ศึกษาการประเมินค่าการคายระเหยน้ำสูงสุด โดยใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกล และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา บริเวณลุ่มน้ำมูล-ชี ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พบว่า วิธีของ Panman Method เป็นวิธีที่ดีที่สุดและมีความถูกต้องที่สุดในการประเมินค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดในพื้นที่ลุ่มน้ำมูล-ชี ส่วนประเมินค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดโดยใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล หาความสัมพันธ์เชิงเส้นพหุระหว่างค่าการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้กับดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) และอุณหภูมิพื้นผิว (LST) ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งมีรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้ $ET=A+B(NAVI)+C(LST)$ มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) ที่วิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพหุอยู่ในช่วง 0.5-0.7 นำสมการที่ได้ไปคำนวณการคายระเหยน้ำสูงสุดพร้อมทั้งสร้างแผนที่การคายระเหยน้ำสูงสุด ในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำมูล-ชี ทำให้ทราบว่าค่าการคายระเหยน้ำในเดือน พฤษภาคม, มิถุนายน และกรกฎาคม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.14, 4.45 และ 4.06 mm day⁻¹ ตามลำดับ

รัชนิวรรณ (2547) ศึกษาความผันแปรของความชื้นในดินบริเวณไร่มันสำปะหลัง อำเภอบรรพตพิสัย จังหวัดนครราชสีมา พบว่า ความชื้นในดินเฉลี่ยรายวันสูงสุดมีค่าเท่ากับ 40.3% โดยปริมาตรในเดือน กันยายน และต่ำสุด 18.4% โดยปริมาตร ในเดือน กุมภาพันธ์ บริเวณที่มีความผันแปรความชื้นในดินมากที่สุด คือ ที่ระดับความลึก 0-5 cm และ 5-20 cm จากผิวดิน ปริมาณความชื้นในดินจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และช่วงเวลาเพาะปลูก กล่าวคือ ในช่วงเพาะปลูกมันสำปะหลังช่วงเก็บเกี่ยวมีปริมาณความชื้นในดินต่ำที่สุด และความชื้นในดินเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าสู่ฤดูฝนซึ่งเป็นระยะตั้งตัว และเริ่มมีหัวของมันสำปะหลัง ส่วนความสามารถในการกักเก็บน้ำของดิน พบว่า ความชื้นในดินที่ความจุความชื้นสนามมีค่าเฉลี่ย 32.0% โดยปริมาตร จุดเหี่ยวถาวรมีค่าเฉลี่ย 27.9 % โดยปริมาตร ปริมาณความชื้นที่เป็นประโยชน์ที่ดินเก็บเอาไว้เพียงพอสำหรับพืช อยู่ในชั้นดินที่ระดับความลึกจากผิวดิน 0-20 cm

รังสรรค์ (2538) ได้รายงานผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ของข้าวภายใต้แบบการทำนาและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งทดสอบในแปลงนาเกษตรกร และแปลงนาทดลองที่มีการปลูกแบบหว่านน้ำตม และแบบปักดำที่จังหวัดพัทลุง โดยใช้ข้าวสุพรรณบุรี 90 ในช่วงฤดูนาปรัง ปี พ.ศ. 2536 และข้าวเลี้ยงในช่วงฤดูนาปี ปี พ.ศ. 2536 – 2537 กล่าวว่า เฉพาะ

ช่วงแรกเพียงช่วงเดียวของการเจริญเติบโตจนถึงระยะช่ดลำต้นของข้าวทั้งสองพันธุ์ที่ปลูกแบบนาหว่านน้ำตมมีอัตราการสร้างมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน และดัชนีพื้นที่ใบมากกว่าการปลูกแบบปักดำ ความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพตลอดช่วงการเจริญเติบโตกับปริมาณแสงที่สังเคราะห์ที่ข้าวดูดกลืนไว้มีลักษณะแบบรีเกรสชันเส้นตรงในเชิงบวก ค่า R^2 มากกว่า 0.85 ข้าวใบตั้งสุพรรณบุรี 90 มีค่าประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์มากกว่าข้าวใบแผ่ราบพันธุ์เฉียง และปริมาณวัชพืชของแปลงนาหว่านน้ำตมที่มีมากกว่าแปลงนาปักดำ มีผลทำให้ประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ของข้าวแต่ละพันธุ์ลดลง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.77 และ 3.20 $g MJ^{-1}$ ของข้าวสุพรรณบุรี 90 และเท่ากับ 2.13 และ 2.67 $g MJ^{-1}$ ของข้าวเฉียง

สมบุรณ์ (2547) ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการคายระเหยน้ำโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามเวลาและค่าการชักนำของปากใบพืชในพื้นที่ทำการเกษตรและสวนป่า พบว่า ความผันแปรของค่า ET และ gc รวมทั้งค่า LAI มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างดี คือ ในพื้นที่นาข้าวและไร่มันสำปะหลังมีค่า ET มากในช่วงที่พืชเจริญเติบโตเต็มที่และมีค่าน้อยในช่วงต้นฤดูการเพาะปลูกและก่อนเก็บเกี่ยวผลผลิต ส่วนพื้นที่สวนสักมีค่า ET มากในช่วงกลางฤดูฝนและมีค่าน้อยในช่วงต้นสัปดาห์ใหม่และทิ้งใบในช่วงฤดูแล้ง เมื่อเปรียบเทียบค่า ET เฉลี่ยรายวันตลอดปีพบว่า พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3.5 mm รองลงมาคือ พื้นที่นาข้าวและสวนสัก มีค่าเท่ากับ 3.4 และ 3.1 mm ตามลำดับ สำหรับค่า gc (stomatal conductance) พื้นที่ไร่มันสำปะหลังมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.1 $cm s^{-1}$ รองลงมาคือ พื้นที่นาข้าวและสวนสักมีค่าเท่ากับ 1.5 และ 1.1 $cm s^{-1}$ ตามลำดับ และการศึกษาค่า LAI พบว่า ในพื้นที่นาข้าว สวนสัก และไร่มันสำปะหลัง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.49, 2.89 และ 2.50 ตามลำดับ

สุธาณี (2544) ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานแสงอาทิตย์กับค่าความยาวนานของแสงอาทิตย์ในแต่ละเดือน พบว่า ในสถานีที่มีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้ง 11 สถานีทั่วประเทศ ทำให้สามารถสร้างสมการเส้นตรงเพื่อใช้ในการประเมินค่าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ซึ่งในการศึกษารุ่นนี้ยังได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร a และ b ในแต่ละเดือนของสถานีที่ตั้งอยู่ในภูมิภาคเดียวกันเป็นตัวแทนในแต่ละภูมิภาค และจากการทดสอบทางสถิติพบว่า ค่า a และ b ในแต่ละสถานีที่อยู่ในภูมิภาคเดียวกันมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % และยังได้ประเมินค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันในแต่ละเดือน พบว่า ภาคเหนือได้รับพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยน้อยที่สุด รองลงมา คือ ภาคใต้ ภาคกลาง และภาค

ตะวันออกเฉียงเหนือได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุด 17.06, 17.17, 17.53 และ 18.47 MJ m⁻² d⁻¹ ตามลำดับ และได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานแสงอาทิตย์กับปริมาณฝน ระหว่างปี พ.ศ. 2541 – 2542 พบว่า ปริมาณน้ำฝนในปี พ.ศ. 2542 มากกว่าปริมาณน้ำฝนในปี พ.ศ. 2541 จึงทำให้ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2541 จึงมีค่ามากกว่าในปี พ.ศ. 2542

Exell and Saricali (1976) ได้ทำการสำรวจทางด้านภูมิศาสตร์ ฤดูกาล และพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลปริมาณเมฆจำนวน 44 สถานี และข้อมูลความยาวนานของแสงแดดจำนวน 18 สถานี และได้หาความสัมพันธ์กับค่าพลังงานแสงอาทิตย์กับค่าความยาวนานของแสงแดด พบว่า ค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยมีค่ามากกว่า 470 ly day⁻¹ และพบว่าค่าพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำสุดเท่ากับ 350 ly day⁻¹ ในช่วงฤดูฝน โดยเฉพาะวันที่มีฝนตกหนักมากๆ

Jacovides *et al.* (2004) ศึกษาอัตรารังสีแสงสังเคราะห์ (PAR) ที่วัดในประเทศไซปรัส (Cyprus) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ 2 ชนิดที่ศึกษาในระยะเวลา 3 ปี เป็นข้อมูลรายชั่วโมงของรังสีแสงสังเคราะห์ (photosynthetically active photon flux, Qp) และรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก (Rs) โดยข้อมูลเหล่านี้ใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนของอัตราส่วนในแต่ละช่วงเวลาซึ่งขึ้นกับสภาพของท้องฟ้าในแต่ละฤดูกาลความแตกต่างของอัตราส่วนมีความแตกต่างของสัดส่วน Qp/Rs จากข้อมูลรายวันมีค่าระหว่าง 1.942 E MJ⁻¹ (ฤดูร้อน) ถึง 1.892 E MJ⁻¹ (ฤดูหนาว) มีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 1.919 E MJ⁻¹ อัตราการเพิ่มขึ้นจาก 1.865 – 2.01 E MJ⁻¹ (รายวัน) หรือจาก 1.878 – 2.197 E MJ⁻¹ (รายชั่วโมง) ขณะที่เมฆมีการเปลี่ยนแปลงจากที่ไม่มีเมฆจนมีเมฆปกคลุมทั่วท้องฟ้า ตัวแปรของบรรยากาศ ได้แก่ ท้องฟ้าโปร่ง ความสว่าง และระยะทางเดินของแสงซึ่งจะมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรังสีแสงสังเคราะห์ (PAR)

Papaioannou *et al.* (1996) ศึกษาปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ในประเทศเอเธนส์ (Athens) ได้ผลการศึกษาว่า การวัดรังสีดวงอาทิตย์รายชั่วโมงในช่วงคลื่น 295–385 nm, 285–2800 nm (Rs) และ 695–2800 nm และ ตั้งแต่เดือน มกราคม 1990 ถึง เดือน ธันวาคม 1992 เพื่อนำมาสรุปการกระจายรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงคลื่นตามมองเห็น (385–695 nm) ซึ่ง รังสีแสงสังเคราะห์ (photosynthetically active photon flux, Rp) ถูกนำมาใช้ในการประเมินค่าในแต่ละช่วงเวลาของ Rp และต้องอาศัยสภาพท้องฟ้า และมวลอากาศในฤดูกาลต่างๆ และสัดส่วนระหว่าง Rp/Rs หาได้จากข้อมูลรายชั่วโมง กล่าวคือ ในช่วงฤดูหนาวเท่ากับ 0.419 ส่วนฤดูร้อนเท่ากับ 0.446 โดยมีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 0.436 ซึ่งสัดส่วน Rp/Rs เพิ่มขึ้นจาก 0.428 เป็น 0.444 (ค่ารายชั่วโมง)

Udo, S.O. and T.O. Aro (1999) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง รังสีแสงสังเคราะห์ (PAR) ที่พื้นผิวโลก กับรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก ของภาคกลางในประเทศไทยในจังหวัดบุรีรัมย์ พบว่า การวัดรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก (Rs) และรังสีแสงสังเคราะห์บนพื้นผิวโลก (PAR) ในระยะเวลา 12 เดือน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Rs/PAR ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่าง PAR/ Rs ตลอดปีมีค่า 2.05 E MJ^{-1} ในฤดูร้อน และฤดูฝนมีค่าเท่ากับ 2.02 และ 2.12 E MJ^{-1} ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยรายวันต่ำที่สุดในเดือน มกราคม เท่ากับ 1.92 E MJ^{-1} มีค่าสูงสุดในเดือน พฤษภาคม เท่ากับ 2.15 E MJ^{-1} โดยปกติ อัตราส่วน PAR/ Rs ในฤดูฝน และฤดูร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 2.1 E MJ^{-1} ยกเว้นในเดือน พฤษภาคม PAR ต่อ Rs ค่าสูงสุด และต่ำสุดรายวัน เท่ากับ 1.86 และ 2.31 E MJ^{-1} ตามลำดับ ค่ารายชั่วโมง PAR/Rs จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ย 2.07 เป็น 2.15 E MJ^{-1} ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณเมฆมีการเปลี่ยนแปลงจากไม่มีเมฆจนมีเมฆมาก ความยาวนานของวันไม่มีผลกระทบต่ออัตรา PAR/ Rs

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือวัดค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ
ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องมือวัดค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบพืช (LAI-2000 Plant Canopy Analyser)

2. เครื่องมือวัดพลังงานแสงอาทิตย์ (ภาพที่ 2) สำหรับบันทึกข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์



ภาพที่ 2 เครื่องมือวัดพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดไพราโนมิเตอร์

3. คู่มือตัวอย่างพีช
4. กล้องถ่ายรูป
5. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
6. โปรแกรม microsoft office
7. เครื่องพิมพ์สีและขาวดำ

วิธีการ

1. การเลือกพื้นที่ศึกษา

การเลือกพื้นที่ศึกษาเพื่อเป็นตัวแทนแต่ละประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน ได้แก่ พื้นที่นาข้าว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย และพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง อำเภอศรีนคร จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งถือได้ว่าพื้นที่ทั้ง 2 ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินนั้นถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของแต่ละภูมิภาคที่ทำรายได้เข้าสู่ประเทศไทยเป็นอย่างมาก และมีการปลูกกันอย่างแพร่หลายในแต่ละพื้นที่ นอกจากนี้พื้นที่ดังกล่าวมีการติดตั้งสถานีตรวจวัดอากาศแบบอัตโนมัติภายใต้โครงการ GEWEX Asian Monsoon Experiment Tropics (GAME-T) และ Coordinated Enhanced Observational Period (CEOP) ดังภาพที่ 3



(1) พื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย



(2) พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา

ภาพที่ 3 สถานีตรวจวัดอากาศอัตโนมัติของแต่ละรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน

2. เครื่องมือตรวจวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์แบบอัตโนมัติ

ในแต่ละพื้นที่ศึกษามีสถานีตรวจวัดอากาศแบบอัตโนมัติ (Automatic Weather Station, AWS) โดยมีเสาตรวจวัดอากาศสูง 10 เมตร ซึ่งมีการติดตั้งเครื่องมือ และเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่องตลอดทั้งปี ประกอบด้วยเครื่องมือต่างๆ ดังภาพที่ 4 และ 6 อธิบายได้ดังนี้

2.1 เครื่องมือวัดความชื้น และอุณหภูมิของอากาศที่ 2 ระดับความสูง โดยทำการติดตั้งเครื่องมือที่ระดับความสูงที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ศึกษาตามช่วงอายุของการเจริญเติบโตในแต่ละชนิดพืช

2.1.1 พื้นที่นาข้าว ติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นและอุณหภูมิของอากาศ (ล่าง) ที่ระดับความสูง 2.0 m และเครื่องมือวัดความชื้นและอุณหภูมิของอากาศ (บน) ที่ระดับความสูง 10.0 m

2.1.2 พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง ติดตั้งเครื่องมือวัดความชื้นและอุณหภูมิของอากาศ (ล่าง) ที่ระดับความสูง 0.5 m และเครื่องมือวัดความชื้นและอุณหภูมิของอากาศ (บน) ที่ระดับความสูง 9.5 m

2.2 เครื่องมือตรวจวัดรังสีดวงอาทิตย์ และรังสีสุทธิ (pyrheliometer และ net radiometer)

2.2.1 พื้นที่นาข้าว ติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีดวงอาทิตย์และรังสีสุทธิ ที่ระดับความสูง 1.0 m

2.2.2 พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง ติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีดวงอาทิตย์และรังสีสุทธิ ที่ระดับความสูง 3.0 m

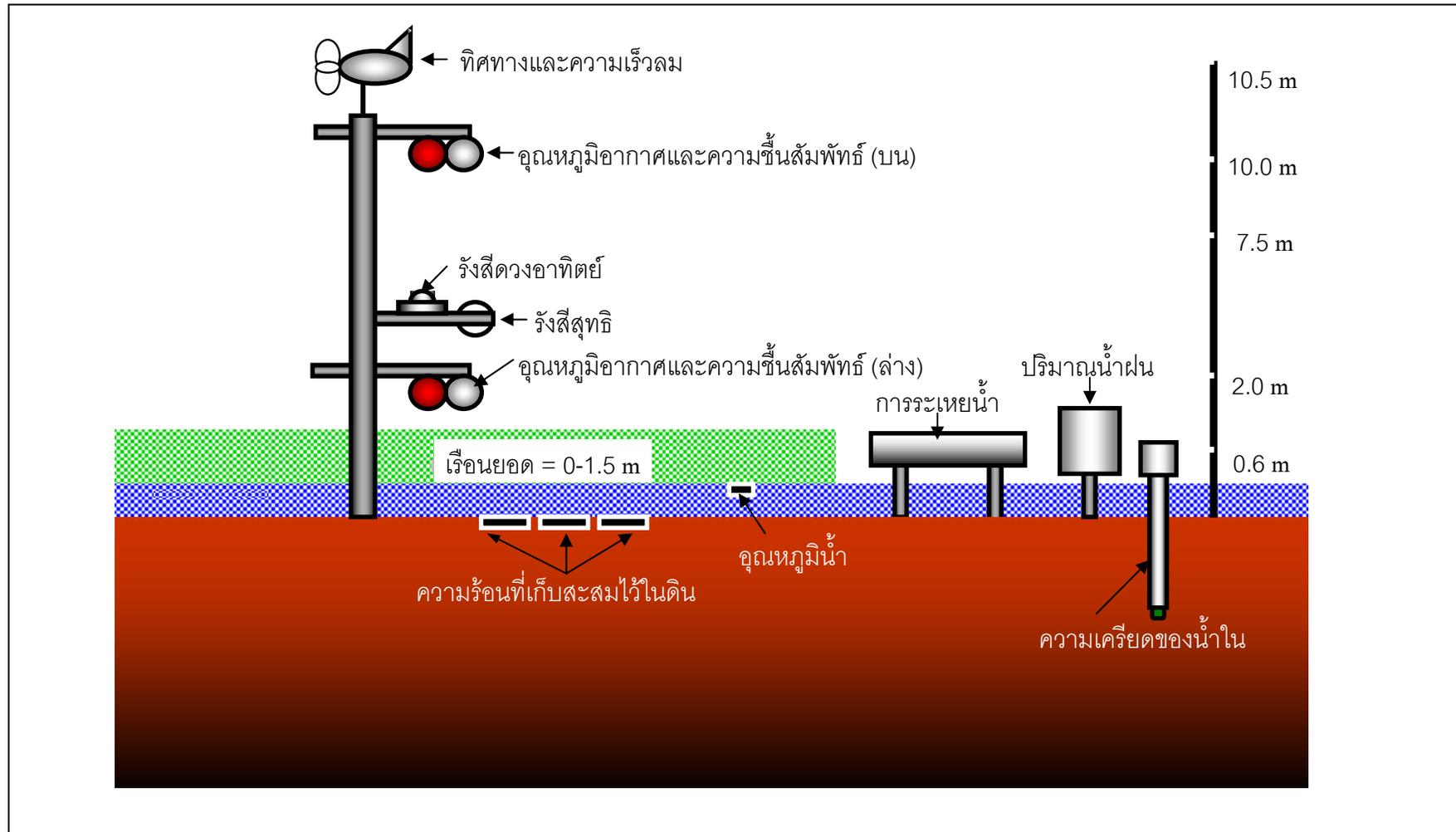
2.3 เครื่องมือวัดความเคี้ยวของน้ำในดิน (tensiometer) ที่ระดับความลึก 15 cm จำนวน 3 เครื่อง โดยทำการติดตั้งบริเวณใกล้เสาตรวจวัดอากาศ

2.4 เครื่องมือวัดปริมาณความร้อนที่เก็บสะสมไว้ในดิน (soil heat flux plate) ที่ระดับความลึก 1 cm จำนวน 3 เครื่อง ทำการติดตั้งบริเวณใกล้เสาตรวจวัดอากาศ

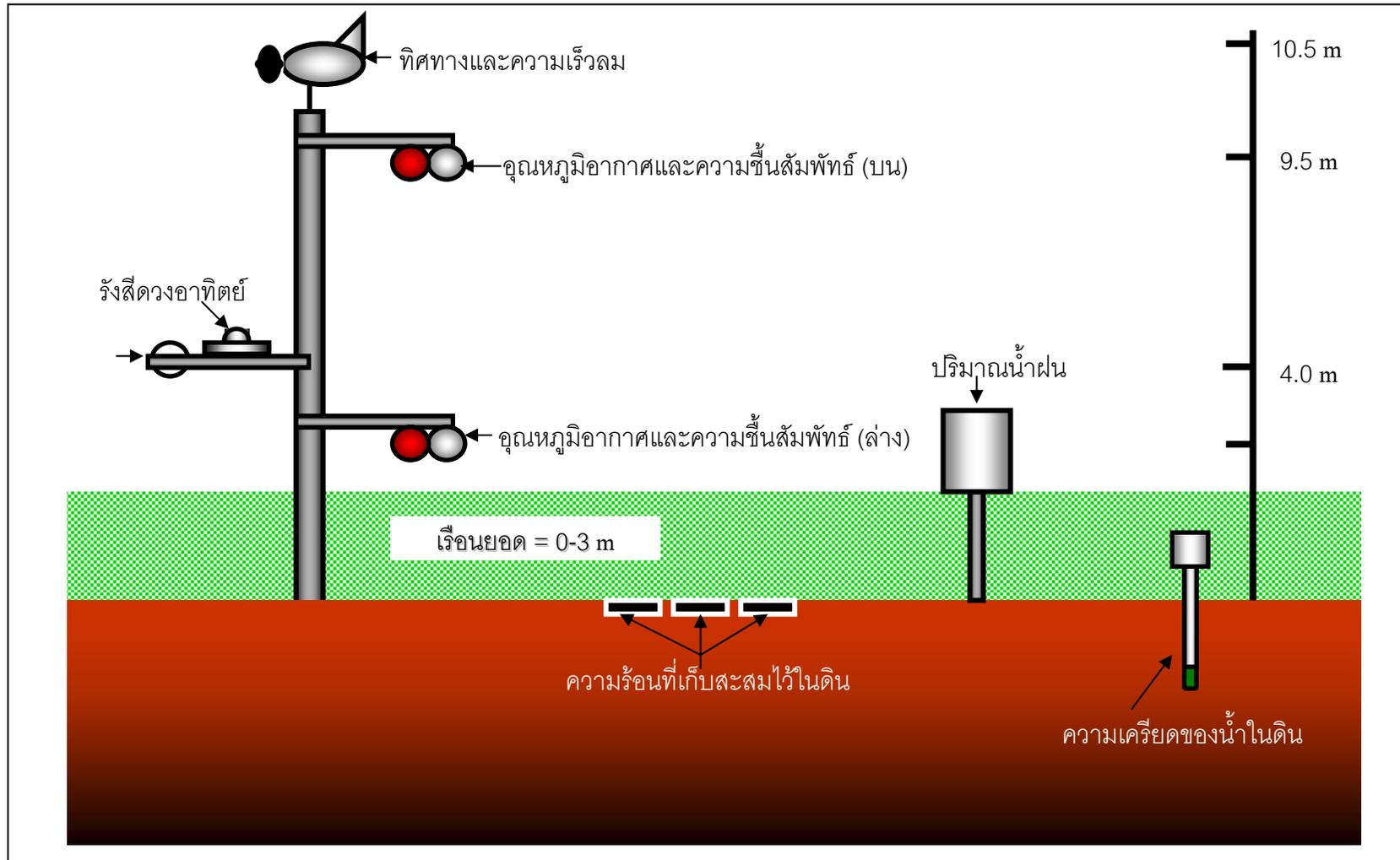
2.5 เครื่องมือวัดความเร็วและทิศทางลม (anemometer) โดยทำการติดตั้งให้อยู่ตำแหน่งสูงสุดของเสาตรวจวัดอากาศ (tower) จำนวน 1 เครื่อง

2.5.1 พื้นที่นาข้าว ติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วและทิศทางลม ที่ระดับความสูง 10.00 m

2.5.2 พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง ติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วและทิศทางลม ที่ระดับความสูง 10.50 m



ภาพที่ 4 แผนผังการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอากาศแบบอัตโนมัติ (Automatic Weather Station, AWS) ในพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย



ภาพที่ 5 แผนผังการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดอากาศแบบอัตโนมัติ (Automatic Weather Station, AWS) ในพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา

3. การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.1 รวบรวมข้อมูลปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ และความยาวนานแสงแดดรายวันของสถานีตรวจอากาศเกษตรแบบอัตโนมัติของพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย ตั้งแต่เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2548 และพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง ตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2547 ถึง เดือน มกราคม พ.ศ. 2549

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ

3.2.1 การเก็บตัวอย่างพืช

เก็บตัวอย่างพืช 2 ชนิด คือ ข้าว พันธุ์ กข.1 และมันสำปะหลัง พันธุ์ เกษตรศาสตร์ 50 โดยแบ่งช่วงเวลาการเก็บข้อมูลเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเริ่มการเพาะปลูก ช่วงกำลังเจริญเติบโต และช่วงก่อนการเก็บเกี่ยวผลผลิต เพื่อนำมาหาค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index; LAI) และมวลชีวภาพ มีขั้นตอนดังนี้

1) สอบถามข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปลูกพืชจากเกษตรกร เช่น ชนิดพันธุ์ของพืชที่ปลูก วิธีการปลูกพืช เป็นต้น เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาครั้งนี้ พร้อมทั้งเป็นแนวทางในการสุ่มเก็บตัวอย่างพืช เนื่องจากพื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่เกษตรกร จึงไม่สามารถเก็บตัวอย่างพืชได้ตามรูปแบบการเก็บตัวอย่างได้ การสุ่มเก็บตัวอย่างจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด โดยสุ่มเก็บตัวอย่างพืชที่มีขนาดใกล้เคียงกัน

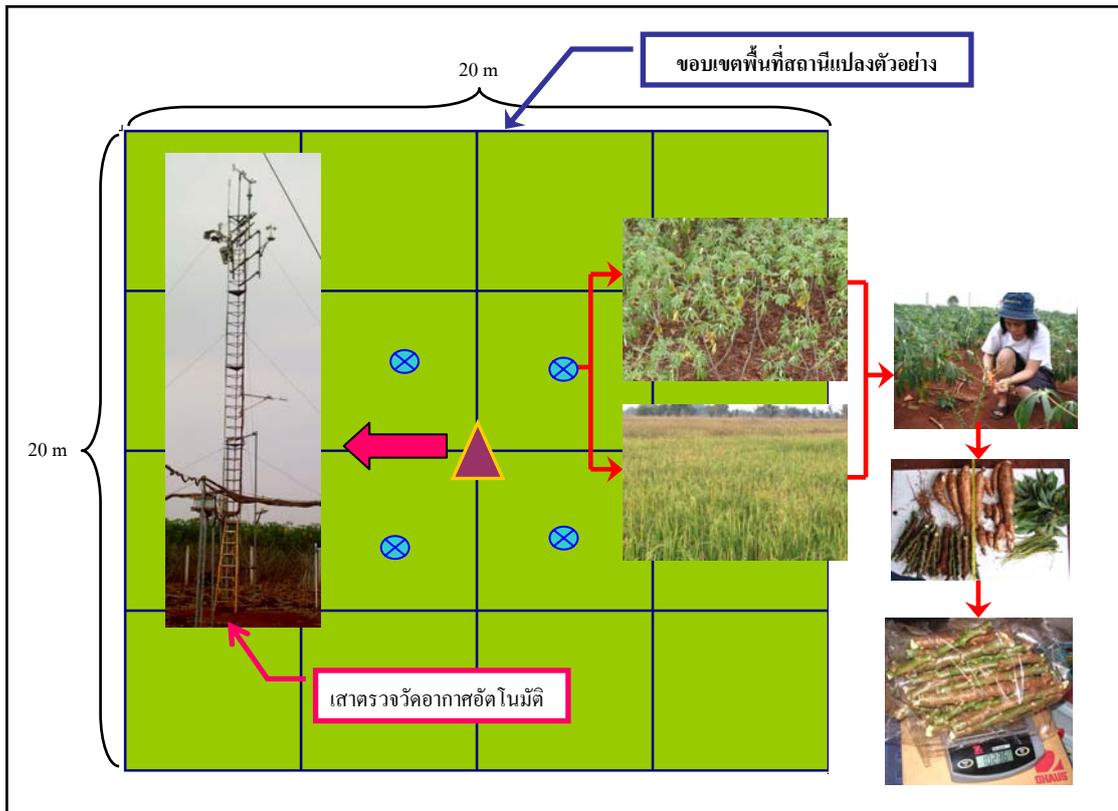
2) การสุ่มเลือกเก็บตัวอย่างพืช พื้นที่ศึกษามีการเก็บข้อมูลทางอุณหภูมิตามด้านอื่นๆ เช่น การเก็บข้อมูลการคายระเหยของน้ำ การวัดค่าความชื้นในดิน เป็นต้น ทำให้การเก็บตัวอย่างพืชไม่สามารถเก็บตัวอย่างพืชซ้ำในบริเวณที่เดิมได้ทุกครั้ง เนื่องจากการเก็บตัวอย่างพืชซ้ำบริเวณเดิมทุกๆ ครั้ง อาจส่งผลกระทบต่อข้อมูลอื่นๆ ที่ทำการเก็บในบริเวณพื้นที่ศึกษาได้ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงทำการสุ่มเก็บตัวอย่างพืช คือ ดันข้าว และดันมันสำปะหลัง บริเวณใกล้เสาตรวจวัดอากาศ โดยให้ห่างออกมาประมาณ 1.5 เมตร นับจำนวนต้นบริเวณรอบจุดที่เก็บตัวอย่างพืช

3) การเก็บตัวอย่างพืชแต่ละช่วงเวลาการเจริญเติบโต โดยชุดตัวอย่างพืชออกจากดินและไม่ให้ส่วนของรากต้องขาดหายไป เพื่อจะได้ตัวอย่างพืชพร้อมรากที่สมบูรณ์ที่สุด แล้วแยกส่วนต่างๆ ออกจากกัน (ส่วนราก ต้น ใบ และผลผลิต) เพื่อชั่งน้ำหนักสดของราก ต้น ใบ และผลผลิต การแยกมวลชีวภาพของรากออกจากดินใช้วิธีล้างด้วยน้ำ แล้วผึ่งรากให้แห้ง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักสด ตัวอย่างมวลชีวภาพบนดิน และได้ดินนี้จะต้องนำไปชั่งน้ำหนักแห้งในห้องปฏิบัติการต่อไป (ภาพที่ 6) การเก็บตัวอย่างพืชแต่ละชนิด ดังนี้

(1) ต้นข้าว ทำการเก็บข้อมูลมวลชีวภาพในแต่ละช่วงฤดูการเจริญเติบโต ซึ่งแบ่งเป็น ช่วงเริ่มการเพาะปลูกในเดือน สิงหาคม ช่วงกำลังเจริญเติบโตในเดือน ตุลาคม และช่วงก่อนการเก็บเกี่ยวผลผลิตในเดือน พฤศจิกายน เป็นระยะเวลา 3 เดือน การเก็บตัวอย่างต้นข้าวครั้งละ 1 กอ ในแต่ละช่วงฤดูการเจริญเติบโต โดยค่อยๆ ดึงกอของต้นข้าวขึ้นมา และพยายามให้มีการขาดหายของส่วนรากน้อยที่สุด นำกอข้าวไปล้างน้ำ แล้วผึ่งแดดให้แห้ง จากนั้นแยกกอต้นข้าวให้เป็นต้นข้าวแต่ละต้น ซึ่งใน 1 กอต้นข้าวมีต้นข้าวประมาณ 3-4 ต้น (เก็บตัวอย่างเพียง 3 ต้น) เมื่อแยกได้ต้นข้าวแล้วแยกส่วนต่างๆ ออกจากกัน ได้ส่วนลำต้น 3 ต้น รวงข้าว 3 รวง และรากข้าว 3 ราก และนำไปชั่งน้ำหนักสดของพืชตัวอย่าง

(2) ต้นมันสำปะหลัง ทำการเก็บข้อมูลมวลชีวภาพทุกเดือนในแต่ละช่วงฤดูการเจริญเติบโต ซึ่งแบ่งเป็น ช่วงเริ่มการเพาะปลูกในช่วงเดือน กรกฎาคม ถึง เดือน สิงหาคม เป็นระยะเวลา 2 เดือน ช่วงกำลังเจริญเติบโตในช่วงเดือน กันยายน ถึง เดือน พฤศจิกายน เป็นระยะเวลา 3 เดือน และช่วงก่อนการเก็บเกี่ยวผลผลิตในช่วงเดือน ธันวาคม ถึง เดือน มกราคม เป็นระยะเวลา 2 เดือน การเก็บตัวอย่างต้นมันสำปะหลังครั้งละ 3 ต้น โดยชุดต้นมันสำปะหลังขึ้นจากดิน ซึ่งต้องชุดอย่างระมัดระวัง เพื่อให้รากของต้นมันสำปะหลังที่สมบูรณ์ที่สุด แล้วนำส่วนที่มีดินติดไปล้างน้ำ ผึ่งให้แห้ง จากนั้นการแยกส่วนต่างๆ ของต้นมันสำปะหลังแยกได้ ใบ ก้านใบ ลำต้น ราก และหัวมัน แล้วนำไปชั่งน้ำหนักสดของพืช โดยทำการเก็บข้อมูลรวมทั้งสิ้น 7 ครั้ง

4) การหาน้ำหนักแห้งของมวลชีวภาพ นำตัวอย่างของต้นข้าว และมันสำปะหลังที่แยกส่วนต่างๆ ออกจากกัน นำมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างพืชที่อบแห้งไปชั่งน้ำหนักแห้ง



ภาพที่ 6 แผนผังแสดงขั้นตอนการเก็บตัวอย่างมวลชีวภาพ

หมายเหตุ ⊗ คือ จุดเก็บตัวอย่างมวลชีวภาพในพื้นที่ศึกษา

3.2.2 การตรวจวัดดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index, LAI)

ทำการวัดข้อมูลดัชนีพื้นที่ผิวใบด้วยเครื่อง LAI-2000 Plant Canopy Analyzer ซึ่งหลักการทำงานของเครื่องวัด LAI นั้นอาศัยหลักการวัดการลดลงของความเข้มแสงอย่างต่อเนื่องเมื่อแสงผ่านเข้าไปในทรงพุ่ม การวัดแสงวัดในลักษณะมุมต่างๆ กัน 5 มุมพร้อมกัน โดยปริมาณแสงจากการวัดมีความเข้มแสงลดน้อยลงเมื่อแสงทำมุมต่างๆ กันกับตำแหน่งใบ โดยการใช้เครื่องวัด LAI รุ่น LAI-2000 จะวัดค่า LAI ของพืชในรัศมีรอบเสาตรวจวัดอากาศ 5 เมตร (แบบสุ่ม) ซึ่งวัดเหนือเรือนยอดพืช 2 ครั้ง และได้เรือนยอด 5 ครั้ง โดยทำการเก็บข้อมูล 3 ชั่วโมง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยหาค่า LAI ในช่วงเวลาเดียวกับที่เก็บข้อมูลมวลชีวภาพ (ภาพที่ 7)



(1)



(2)

ภาพที่ 7 การตรวจวัดดัชนีพื้นผิวใบ (1) วัดใต้เรือนยอดพืช (2) วัดเหนือเรือนยอดพืช

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 วิเคราะห์สมดุลพลังงาน ศึกษาในแต่ละพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน คือ พื้นที่นาข้าว และพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง ดังสมการที่ (15)

$$R_n = H + G_s + G_w + LE \quad \dots(15)$$

เมื่อกำหนดให้ R_n = รังสีดวงอาทิตย์สุทธิ ($W m^{-2}$)

H = ความร้อนในการเผาผลาญอากาศ ($W m^{-2}$)

G_s = ความร้อนที่เก็บไว้ในดิน ($W m^{-2}$)

G_w = ความร้อนที่เก็บไว้ในน้ำ ($W m^{-2}$)

LE = ความร้อนในการเผาผลาญน้ำ ($W m^{-2}$)

4.2 วิเคราะห์ความผันแปรของค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละพื้นที่ศึกษา

ทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน ตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2547 ถึงเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2548 โดยใช้ข้อมูลจากเสาตรวจวัด

อากาศเกษตรแบบอัตโนมัติของพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย และพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา

4.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ ในการทดลองครั้งนี้ได้นำเสนอสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่ารังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับ และได้พิสูจน์แล้วว่ามี ความถูกต้องแม่นยำมาใช้ในการศึกษาพืชพรรณ ดังนี้

พลังงานแสงรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนไว้ขณะช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ซึ่งเสนอโดย Goss *et al.* (1986); Varlet-Grancher *et al.* (1989) จากสมการที่ (16)

$$PAR_a = \epsilon_i PAR_i \quad \dots(16)$$

เมื่อกำหนดให้ PAR_a คือ ปริมาณรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน ($MJ m^{-2}$)

PAR_i คือ ปริมาณรังสีสังเคราะห์เหนือแปลงพืช ($MJ m^{-2}$)

ϵ_i คือ ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีของพืชปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืช ดังสมการที่ (16)

สำหรับค่าประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงของพืช พบว่ามีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลกับค่าดัชนีพื้นที่ใบ ซึ่งคำนวณ ได้ดังสมการที่ (17)

$$\epsilon_i = 0.95 (1 - \exp(-KL)) \quad \dots(17)$$

เมื่อกำหนดให้ K คือ สัมประสิทธิ์การลดปริมาณรังสีในพุ่มใบพืช (extinction coefficient)

L คือ ดัชนีพื้นที่ใบ

4.4 เปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์กับค่ามวลชีวภาพ และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) ที่วัดได้จากการเก็บตัวอย่างพืช

เปรียบเทียบค่าการใช้รังสีสังเคราะห์ของพืชตลอดระยะเวลาในการเจริญเติบโต และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมาถึงพื้นผิวโลกในแต่ละพื้นที่การใช้

ประโยชน์ที่ดิน ในแต่ละช่วงฤดูกาลเพาะปลูก คือ ช่วงระยะเริ่มการเพาะปลูก ช่วงระยะกำลังเจริญเติบโต และช่วงระยะก่อนการเก็บเกี่ยว

4.5 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพ ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) และการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (PARa)

4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ (RUE) ในแต่ละรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยเปรียบเทียบการนำรังสีแสงสังเคราะห์มาช่วยในการเจริญเติบโตของพืชแต่ละชนิด

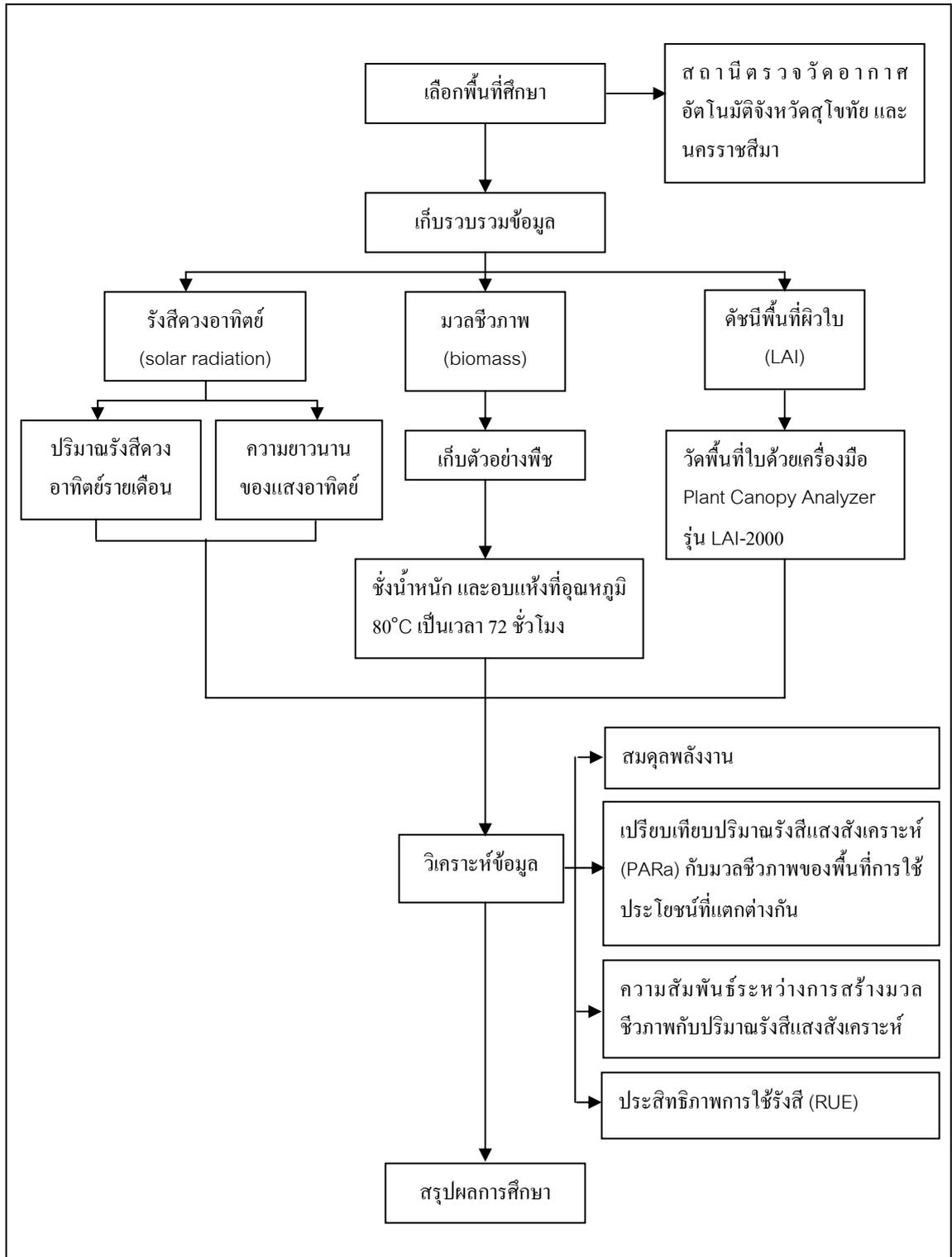
4.7 การคำนวณหาสัดส่วนของ economic yield และ biological yield หรือเรียกว่า harvest index, HI จากสมการที่ (18)

$$\text{harvest index} = (\text{economic yield} / \text{biological yield}) \quad \dots(18)$$

เมื่อกำหนดให้ economic yield คือ น้ำหนักส่วนของพืชที่นำไปใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจ

biological yield คือ น้ำหนักส่วนของพืชทั้งหมด

จากขั้นตอนการศึกษการประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน สามารถสรุปกรอบแนวคิดในการศึกษาได้ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แผนภาพกรอบแนวคิดในการศึกษาการประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน

สถานที่ทำการวิจัย

1. พื้นที่นาข้าว

1.1 ที่ตั้ง

พื้นที่นาข้าว อำเภอ เมือง จังหวัด สุโขทัย ตั้งอยู่ที่เส้นรุ้งที่ $17^{\circ}04'16''$ เหนือ และ $99^{\circ}42'18''$ ตะวันออก สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 50 m มีพื้นที่ขนาด 20x20 km (ภาพที่ 9)

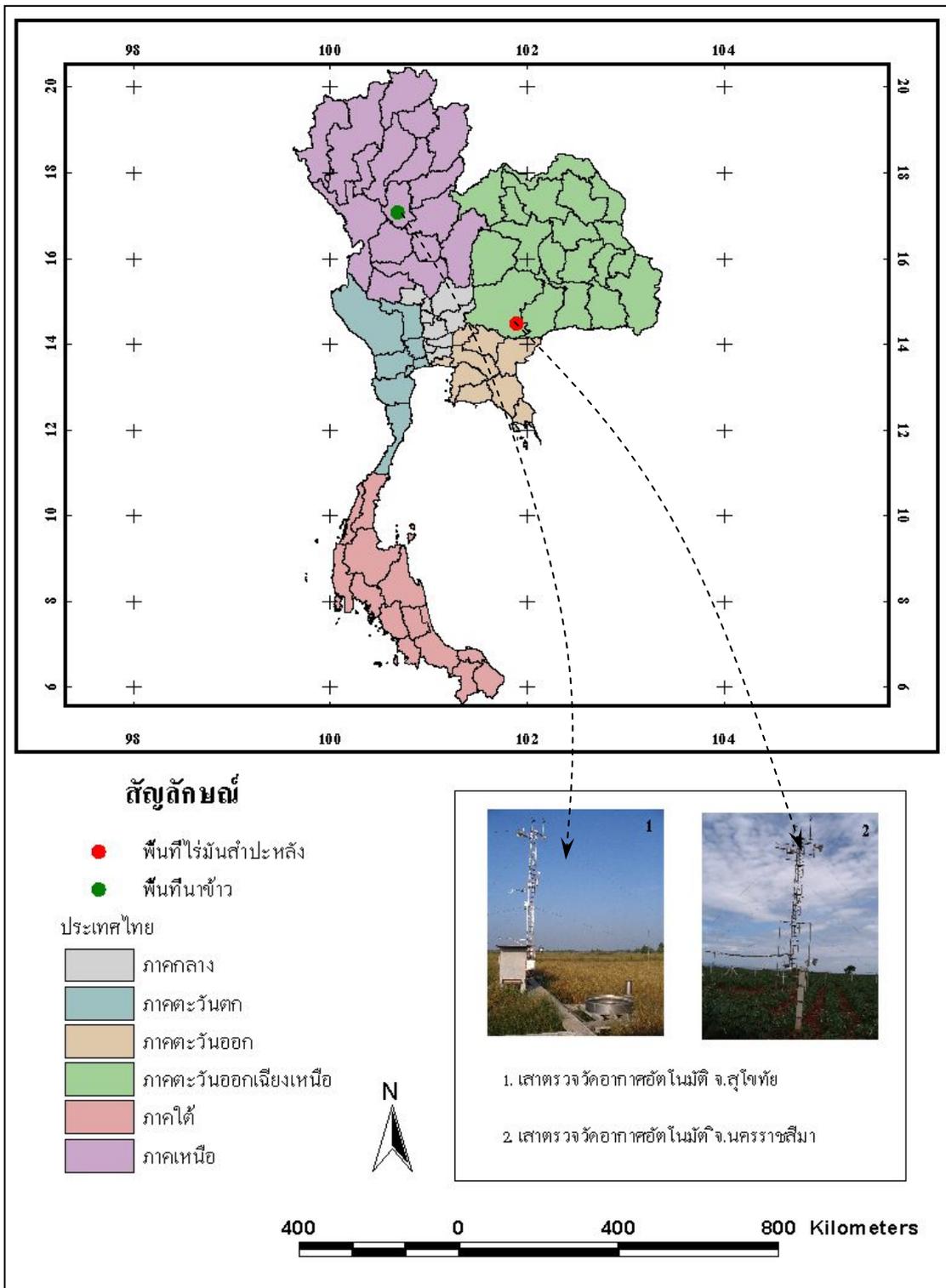
1.2 กิจกรรมการปลูกข้าว

พื้นที่นาข้าวอยู่ในเขตนาน้ำฝนไม่มีการชลประทานแต่อย่างใด การปลูกข้าวขึ้นอยู่กับฝนเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้วเกษตรกรทำนาหว่าน มีส่วนน้อยมากที่ทำนาดำซึ่งเริ่มการเพาะปลูกระหว่างกลางเดือนกรกฎาคมและเก็บเกี่ยวเดือนพฤศจิกายนหรือธันวาคม หลังจากเก็บเกี่ยวเสร็จจะทำการเผาตอซังทิ้งทั้งหมดและปล่อยเป็นพื้นที่ว่างเปล่าไม่มีการปลูกพืชแต่อย่างใด (พื้นที่ $1 \times 1 \text{ m}^2$ นับต้นข้าวที่ปลูกได้ 100 ต้น)

2. พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง

2.1 ที่ตั้ง

พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง อำเภอ ทรบุรี จังหวัด นครราชสีมา ตั้งอยู่ที่ เส้นรุ้งที่ $14^{\circ}29'50''$ เหนือ และ $102^{\circ}23'28''$ ตะวันออก สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 280 เมตร มีพื้นที่ขนาด 20x20 km (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 พื้นที่ศึกษาในแต่ละรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินของสถานีตรวจวัดอากาศอัตโนมัติ

2.2 กิจกรรมการปลูกมันสำปะหลัง

ในการปลูกมันสำปะหลังในพื้นที่โดยทั่วไปแล้วเกษตรกรปลูกมันสำปะหลัง 2 ช่วงเพาะปลูก ในช่วงแรก เริ่มปลูกต้นฤดูฝนประมาณต้นเดือนพฤษภาคม และเริ่มเก็บเกี่ยวประมาณเดือนมกราคมของปีถัดไปเป็นต้นไป จากนั้นเกษตรกรทำการพักดินและนำปุ๋ยคอกจากมูลไก่ วัควายหรือปุ๋ยหมักต่างๆ มาใส่ในพื้นที่และทำการไถพรวนทิ้งไว้รอจนกว่าฝนตกประมาณเดือนเมษายนถึงพฤษภาคมจึงทำการปลูกมันสำปะหลังอีกครั้งในฤดูกาลต่อไป ซึ่งในพื้นที่ศึกษา และเกษตรกรโดยส่วนใหญ่นิยมปลูกมันสำปะหลังในช่วงฤดูปลูกนี้ ส่วนอีกช่วงคือ เริ่มปลูกปลายฤดูฝนประมาณเดือนพฤศจิกายน และเริ่มเก็บเกี่ยวประมาณเดือนตุลาคมในปีถัดไปซึ่งเมื่อเกษตรกรเก็บเกี่ยวเสร็จแล้วก็รีบทำการไถพรวนและปลูกใหม่อีกครั้งในขณะที่ความชื้นในดินยังมีเพียงพอ (พื้นที่ 1x1 m² นับต้นมันสำปะหลังที่ปลูกได้ 4 ต้น) ซึ่งกิจกรรมการปลูกมันสำปะหลังสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 กิจกรรมการปลูกมันสำปะหลังของเกษตรกร บริเวณพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง อำเภอครบุรี จังหวัดนครราชสีมา

กิจกรรม	ช่วงเพาะปลูกที่ 1 *	ช่วงเพาะปลูกที่ 2
ช่วงพักดิน	มีนาคม – เมษายน	-
เริ่มเพาะปลูก	พฤษภาคม	พฤศจิกายน
ระยะตั้งตัว/เริ่มมีหัว	มิถุนายน – สิงหาคม	ธันวาคม – กุมภาพันธ์
ระยะเติบโตเต็มที่	กันยายน – ธันวาคม	มีนาคม – ตุลาคม
เก็บเกี่ยว	มกราคม – กุมภาพันธ์	พฤศจิกายน

หมายเหตุ * = พื้นที่ศึกษาเพาะปลูกมันสำปะหลังอยู่ในช่วงเพาะปลูกที่ 1

ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง โดยกำหนดให้พื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลังเป็นพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน และใช้ข้อมูลจากเสาคตรวจวัดอากาศแบบอัตโนมัติในจังหวัดสุโขทัย และจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งสามารถแบ่งช่วงระยะเวลาการเพาะปลูกเป็น 3 ช่วง คือ ระยะเวลาเริ่มการเพาะปลูก ระยะเวลากำลังเจริญเติบโต และระยะก่อนการเก็บเกี่ยว ทำการศึกษาตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2547 ถึง เดือน มกราคม พ.ศ. 2549 ได้ผลการศึกษาดังนี้

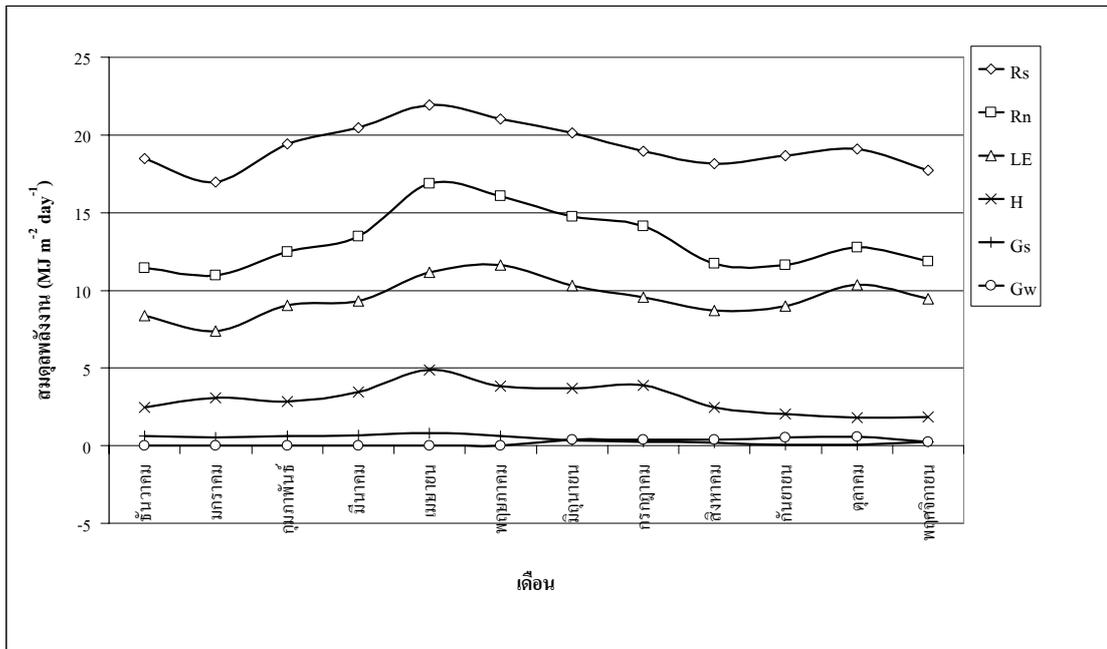
1. สมดุลพลังงาน

จากผลการศึกษาสมดุลพลังงาน โดยใช้วิธีสมดุลพลังงาน และ bowen ratio ของพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย ตั้งแต่เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2548 และพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง ตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2548 รวม 1 ปี ได้ผลการศึกษา ดังนี้

1.1 พื้นที่นาข้าว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย

จากผลการศึกษาสมดุลพลังงานในพื้นที่นาข้าว พบว่า ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ทั้งหมด (Rs) เท่ากับ $19.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ปริมาณรังสีสุทธิเฉลี่ย (net radiation, Rn) ตลอดปี $13.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ คิดเป็นร้อยละ 70.4 ของปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ โดยปริมาณรังสีสุทธิที่ใช้เพื่อการคายระเหยน้ำ (LE) การแผ่ผลลาญอากาศ (H) เก็บสะสมความร้อนไว้ในดิน (G_s) และเก็บสะสมความร้อนในน้ำ (G_w) คิดเป็นร้อยละ 72.3, 22.9, 3.1 และ 1.7 ของรังสีสุทธิ ตามลำดับ (ตารางที่ 6 และภาพที่ 10) ซึ่งปริมาณรังสีสุทธิมีค่าสูงในช่วงเดือน เมษายน ถึง พฤษภาคม มีค่ามากกว่า $16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และปริมาณรังสีสุทธิมีค่าต่ำในช่วงเดือน ธันวาคม ถึง มกราคม มีค่าน้อยกว่า $11.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ นอกจากนี้ในช่วงนอกฤดูการเพาะปลูกการเก็บสะสมความร้อนในดินมีค่ามากกว่าในช่วงฤดูการเพาะปลูก เนื่องจากในฤดูการเพาะปลูกปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่ถูกต้นข้าวนำไปใช้ในการคายระเหยน้ำ และในช่วงนอกฤดูการเพาะปลูกการเก็บความร้อนในน้ำมีค่าน้อยกว่าในช่วงฤดูการเพาะปลูก เนื่องจากในพื้นที่นาข้าวมีปริมาณน้ำขังในแปลงนา ดังนั้นปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมา

ส่วนหนึ่งจะเก็บสะสมความร้อนไว้ในน้ำ และอีกส่วนหนึ่งจะเก็บสะสมความร้อนไว้ในดิน ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับน้ำในแปลงนา กล่าวคือถ้าระดับน้ำในแปลงนามาก ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์จะถูกเก็บสะสมไว้ในดินน้อย



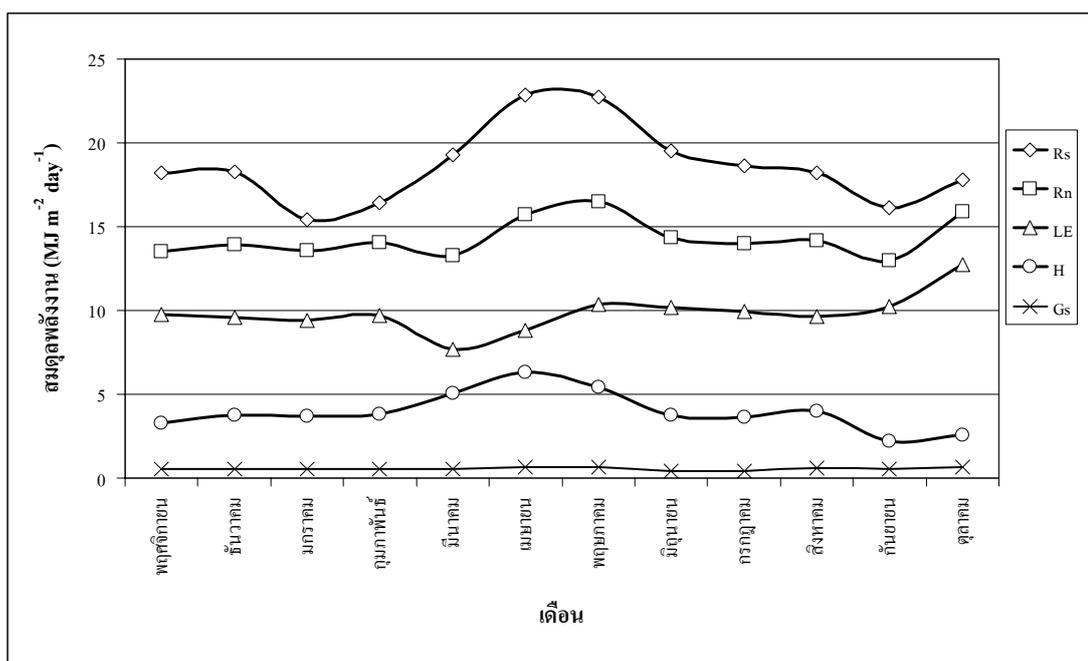
ภาพที่ 10 ความผันแปรของค่าสมดุลพลังงานรายเดือนของพื้นที่นาข้าว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย ตั้งแต่เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2547 ถึง พฤศจิกายน พ.ศ. 2548

ตารางที่ 6 สมดุลพลังงาน และการคายระเหยน้ำในพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย ตั้งแต่เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2548

ฤดูกาลเพาะปลูก/เดือน	Rs (MJ m ⁻² day ⁻¹)	สมดุลของพลังงาน (MJ m ⁻² day ⁻¹)					Bowen ratio	ET		Epan		Rain (mm.)	Ta (°C)	Ws (m s ⁻¹)	pF (-)	RH (%)
		Rn	LE	H	Gs	Gw		mm./วัน	mm./เดือน	mm./วัน	mm./เดือน					
ช่วงนอกฤดูกาลเพาะปลูก																
ธันวาคม	18.5	11.4	8.4	2.5	0.6	0.0	0.3	2.8	87.8	3.5	107.4	1.0	22.7	1.4	0.0	66.5
มกราคม	17.0	11.0	7.4	3.1	0.5	0.0	0.4	3.2	99.2	3.9	117.8	19.2	23.3	1.4	1.5	64.5
กุมภาพันธ์	19.4	12.5	9.0	2.9	0.6	0.0	0.3	3.1	90.7	4.5	133.7	20.9	25.6	1.8	2.8	60.4
มีนาคม	20.5	13.5	9.3	3.5	0.7	0.0	0.4	3.6	110.3	6.1	184.3	27.5	29.3	2.8	2.7	48.6
เมษายน	21.9	16.9	11.2	4.9	0.8	0.0	0.4	4.4	133.3	6.7	201.7	129.9	32.4	2.9	2.9	60.5
พฤษภาคม	21.0	16.1	11.6	3.8	0.6	0.0	0.3	5.0	154.0	6.1	185.6	184.3	28.8	2.6	0.7	71.0
มิถุนายน	20.1	14.7	10.3	3.7	0.3	0.4	0.4	4.8	144.8	4.9	146.4	93.6	27.6	2.6	0.7	71.3
กรกฎาคม	19.0	14.1	9.6	3.9	0.3	0.4	0.4	4.7	145.7	4.7	143.9	56.5	27.8	2.8	0.5	78.0
เฉลี่ย	19.7	13.8	9.6	3.5	0.6	0.1	0.4	3.9	120.7	5.1	152.6	66.6	27.2	2.3	1.5	65.1
ช่วงฤดูกาลเพาะปลูก																
สิงหาคม	18.1	11.7	8.7	2.5	0.2	0.4	0.3	4.3	132.6	4.7	141.2	156.4	26.1	2.7	0.0	76.2
กันยายน	18.7	11.6	9.0	2.0	0.1	0.5	0.2	5.1	154.5	4.1	123.7	231.2	28.0	2.4	0.0	77.9
ตุลาคม	19.1	12.8	10.3	1.8	0.1	0.6	0.2	4.5	140.2	3.7	112.7	285.4	26.6	1.1	0.0	79.6
พฤศจิกายน	17.7	11.9	9.4	1.9	0.2	0.3	0.4	4.0	122.4	3.7	110.2	24.7	25.9	1.0	0.0	71.1
เฉลี่ย	18.4	12.0	9.4	2.0	0.1	0.4	0.3	4.5	137.4	4.0	121.9	174.4	26.7	1.8	0.0	76.2
เฉลี่ยตลอดทั้งปี	19.3	13.2	9.5	3.0	0.4	0.2	-	4.1	126.3	4.7	142.4	102.6	-	-	-	-
ร้อยละของรังสีดวงอาทิตย์	100.0	70.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ร้อยละของรังสีสุทธิ	-	100.0	72.3	22.9	3.1	1.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1.2 ไร่มันสำปะหลัง อำเภอบรรพตพิสัย จังหวัดนครราชสีมา

จากผลการศึกษาสมดุลพลังงานในไร่มันสำปะหลัง พบว่า ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ทั้งหมดเท่ากับ $18.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ปริมาณรังสีสุทธิเฉลี่ย (net radiation, R_n) ตลอดปี $14.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ คิดเป็นร้อยละ 77.2 ของปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ โดยปริมาณรังสีสุทธิที่ใช้เพื่อการคายระเหย น้ำ (LE) การเผาผลาญอากาศ (H) และเก็บสะสมความร้อนไว้ในดิน (G_s) คิดเป็นร้อยละ 68.7, 27.5 และ 3.8 ของรังสีสุทธิ ตามลำดับ (ตารางที่ 7 และภาพที่ 11) ซึ่งปริมาณรังสีสุทธิมีค่าสูงในช่วงเดือน พฤษภาคม มีค่า $16.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือน กันยายน มีค่า $13.0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ นอกจากนี้ในช่วงฤดูแล้งการเก็บสะสมความร้อนในดินมีค่ามากกว่าในช่วงฤดูการฝน เนื่องจากช่วง ฤดูการฝนปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมาส่วนหนึ่งจะถูกพืชนำไปใช้ในการคายระเหยน้ำ และการ เผาผลาญอากาศ และอีกส่วนที่เหลือจะถูกเก็บสะสมไว้ในดิน



ภาพที่ 11 ความผันแปรของค่าสมดุลพลังงานรายเดือนของไร่มันสำปะหลัง อำเภอบรรพตพิสัย จังหวัดนครราชสีมา ตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2547 ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2548

จากการศึกษาสมดุลพลังงาน พบว่า เมื่อพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านมายังพื้นผิวโลก ถูกใช้ไปในกระบวนการต่างๆ คือ การคายระเหยน้ำ การเผาผลาญน้ำในอากาศ และการเก็บสะสมความร้อนในดินและน้ำ กล่าวคือ ในพื้นที่ที่มีการเพาะปลูกมีการคายระเหยน้ำมาก เนื่องจากมีปริมาณน้ำมากพอที่ทำให้เกิดการระเหยน้ำ แต่มีค่าการเผาผลาญน้ำในอากาศ และการสะสมความร้อนในดินและน้ำต่ำกว่าในช่วงนอกฤดูการเพาะปลูก เอ็จ (2535) กล่าวว่า พืชที่กำลังเจริญเติบโตยังปลดปล่อยน้ำเข้าสู่บรรยากาศ(โดยการคายน้ำ) คิดเทียบเท่ากับปริมาณน้ำฝนที่ตก 20-40 ชั่วโมงต่อเฮกตาร์ นอกจากนี้ช่วงฤดูแล้งปริมาณน้ำในอากาศมีน้อย ทำให้การระเหยน้ำมีน้อยกว่าฤดูฝน แต่การเผาผลาญน้ำในอากาศ และการสะสมความร้อนมีมากกว่าฤดูฝน ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมา จะเกิดการแผ่ สะท้อน และดูดกลืน โดยพืชก่อนลงมาถึงพื้นผิว ทำให้ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์มีปริมาณลดลงส่งผลให้ความร้อนที่จะเผาผลาญน้ำที่พื้นผิวมีน้อยลง การสูญเสียน้ำในพื้นที่จึงน้อยกว่าในพื้นที่ที่ไม่มีการเพาะปลูกพืช

2. น้ำหนักมวลชีวภาพ (biomass) และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index, LAI)

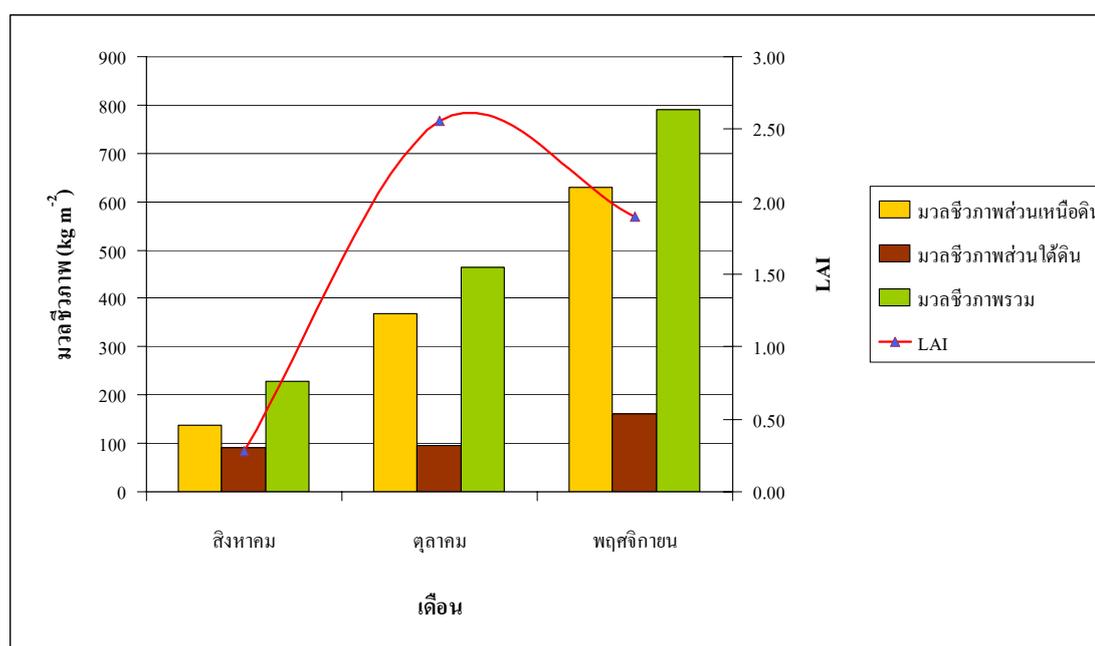
2.1 พื้นที่นาข้าว

2.1.1 มวลชีวภาพ (biomass)

ในช่วงเริ่มการเพาะปลูก (เดือน สิงหาคม) พบว่า มวลชีวภาพรวมมีค่าเท่ากับ $229.33 \text{ kg rai}^{-1}$ ซึ่งมวลชีวภาพมีค่าต่ำ แต่ค่ามวลชีวภาพค่อยๆสูงขึ้นตามช่วงอายุของต้นข้าว ในช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน ตุลาคม) มวลชีวภาพรวมมีค่าเท่ากับ $408.00 \text{ kg rai}^{-1}$ เนื่องจากช่วงนี้เริ่มมีการออกดอก และรวงข้าว ทำให้ค่ามวลชีวภาพที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น และในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน พฤศจิกายน) มวลชีวภาพรวมมีค่าสูงสุดเท่ากับ $789.33 \text{ kg rai}^{-1}$ เนื่องจากในช่วงนี้ต้นข้าวมีการเจริญเติบโตเต็มที่ โดยให้ผลผลิตหรือรวงข้าว ทำให้มีค่ามวลชีวภาพเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 8 และ ภาพที่ 12)

ตารางที่ 8 มวลชีวภาพ และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) ของพื้นที่นาข้าว ตั้งแต่เดือน สิงหาคม ถึง เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2548

ระยะการเพาะปลูก	มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน (g m ⁻²)		มวลชีวภาพรวมส่วนเหนือดิน (g m ⁻²)	มวลชีวภาพส่วนใต้ดิน (g m ⁻²)	มวลชีวภาพรวม		ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI)
	ลำต้น	รวงข้าว			g m ⁻²	kg rai ⁻¹	
			ลำต้น	รวงข้าว			ราก
เริ่มการเพาะปลูก							
สิงหาคม	86.67	-	86.67	56.67	143.33	229.33	0.28
กำลังเจริญเติบโต							
ตุลาคม	160.00	70.00	230.00	60.00	290.00	408.00	2.56
ก่อนการเก็บเกี่ยว							
พฤศจิกายน	196.67	196.67	393.33	100.00	493.33	789.33	1.89
เฉลี่ย	147.78	133.33	236.67	72.22	308.99	494.22	1.58



ภาพที่ 12 ความผันแปรระหว่างมวลชีวภาพกับดัชนีพื้นที่ผิวใบของพื้นที่นาข้าว

จากภาพที่ 12 พบว่า ในแต่ละช่วงการเจริญเติบโตมวลชีวภาพของต้นข้าวใน ส่วนที่อยู่เหนือผิวดินมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุของต้นข้าว แต่มวลชีวภาพส่วนที่อยู่ใต้ดินมีการเพิ่มขึ้นน้อย และมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งค่า LAI มีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน พฤศจิกายน) แสดงว่า ในช่วงเริ่มการเพาะปลูก (เดือน สิงหาคม) พืชมีอายุน้อยความสามารถ ในการดูดกลืนแสงมีน้อย เมื่อเข้าสู่ช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน ตุลาคม) เป็นช่วงที่พืชมีการดูดกลืน แสง เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้ดี แต่ในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน พฤศจิกายน) พืชมีอายุมาก ความสามารถในการดูดกลืนแสงมีน้อย โดยในแต่ละช่วงการเจริญเติบโตของต้นข้าวค่า LAI มีค่า แตกต่างกัน

2.1.2 ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index, LAI)

ในช่วงเริ่มเพาะปลูก (เดือน สิงหาคม) เป็นการเจริญเติบโตในช่วงแรก มีการ สร้างมวลน้อย ทำให้ดัชนีพื้นที่ผิวใบมีค่าค่อนข้างต่ำ คือ 0.28 ในช่วงระยะกำลังเจริญเติบโต (เดือน ตุลาคม) ดัชนีพื้นที่ผิวใบ มีค่าสูงสุด คือ 2.56 เนื่องจากเป็นช่วงที่กำลังเจริญเติบโตมีการสร้างส่วน ต่างๆ ของพืชมาก ทำให้พื้นที่ผิวใบมีมาก แสงที่ผ่านใบไปได้มีน้อย ค่า LAI จึงมาก และในช่วงก่อน การเก็บเกี่ยว (เดือน พฤศจิกายน) ดัชนีพื้นที่ผิวใบมีค่า 1.89 เนื่องจากต้นข้าวมีการเจริญเติบโตช้าลง ส่วนลำต้นข้าวเริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาล ทำให้การดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ เพื่อการ สังเคราะห์แสงมีค่าน้อยลง ดังนั้นรังสีดวงอาทิตย์จึงผ่านใบลงไปได้มาก ค่า LAI จึงน้อย (ภาพที่ 13)



(1)



(2)



(3)

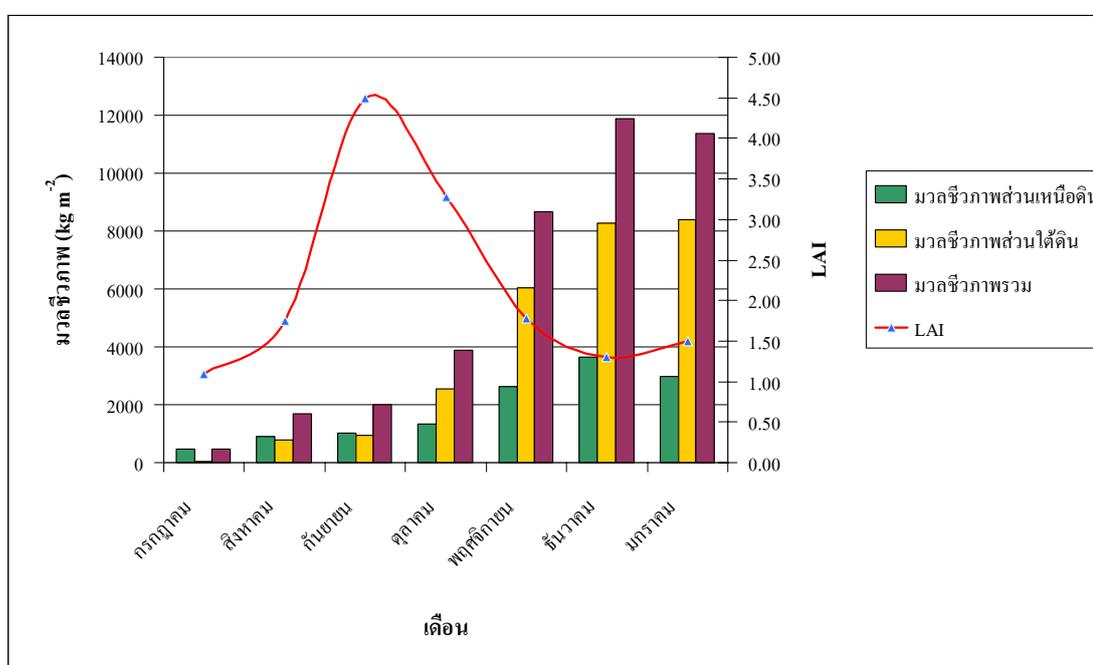
ภาพที่ 13 แสดงระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าวแต่ละช่วงการเพาะปลูก (1) ช่วงเริ่มการปลูก (เดือนสิงหาคม) (2) ช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน ตุลาคม) (3) ช่วงก่อนการเก็บ (เดือน พฤศจิกายน)

2.2 พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง

2.2.1 มวลชีวภาพ (biomass)

ในช่วงเริ่มการเพาะปลูก (เดือน กรกฎาคม ถึง สิงหาคม) คือ มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $677.12 \text{ kg rai}^{-1}$ มวลชีวภาพส่วนใต้ดิน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $408.11 \text{ kg rai}^{-1}$ และมวลชีวภาพรวม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,085.23 \text{ kg rai}^{-1}$ โดยมวลชีวภาพจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามช่วงอายุของต้นมันสำปะหลัง ในช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน กันยายน ถึง พฤศจิกายน) คือ มวลชีวภาพ

ส่วนเหนือดิน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,658.99 \text{ kg rai}^{-1}$ มวลชีวภาพส่วนใต้ดิน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $3,181.44 \text{ kg rai}^{-1}$ และมวลชีวภาพรวม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $4,840.43 \text{ kg rai}^{-1}$ เนื่องจากเป็นช่วงที่ต้นมันสำปะหลัง กำลังเจริญเติบโตโดยสร้างส่วนต่างๆ ของต้นมันสำปะหลัง และเป็นช่วงที่เริ่มมีหัวมัน ทำให้ค่ามวลชีวภาพเริ่มมีค่าสูง และในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน ธันวาคม ถึง มกราคม) มวลชีวภาพมีค่าสูงสุด คือ มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $3,311.04 \text{ kg rai}^{-1}$ มวลชีวภาพส่วนใต้ดิน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $8,331.20 \text{ kg rai}^{-1}$ และมวลชีวภาพรวม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $11,642.24 \text{ kg rai}^{-1}$ เนื่องจากต้นมันสำปะหลังเริ่มทิ้งใบ เพื่อลดการคายน้ำในช่วงหน้าแล้ง ทำให้มีการสร้างอาหาร และการย้ายสารอาหารไปเก็บสะสมไว้ที่ส่วนหัวมัน ดังนั้นค่ามวลชีวภาพจึงมีค่าสูง (ตารางที่ 9 และภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 ความผันแปรระหว่างมวลชีวภาพกับดัชนีพื้นที่ผิวใบของไร่มันสำปะหลัง

จากภาพที่ 14 เห็นได้ว่า มวลชีวภาพมีค่าสูงขึ้นตามอายุของต้นมันสำปะหลัง โดยในช่วงเริ่มเพาะปลูก ค่า LAI มีค่าค่อนข้างต่ำ และมีค่า LAI สูงในช่วงกำลังเจริญเติบโต โดยเฉพาะในเดือน กันยายนมีค่าสูงสุด และค่า LAI ลดน้อยลงในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว แสดงว่าอายุของพืชที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มีผลต่อการดูดกลืนแสง เพื่อนำมาใช้ในการเจริญเติบโต โดยการสร้างมวลชีวภาพ

ตารางที่ 9 มวลชีวภาพ และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) ของไร่มันสำปะหลัง ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2548 ถึง เดือน มกราคม พ.ศ. 2549

ระยะการเพาะปลูก	มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน			มวลชีวภาพรวม		มวลชีวภาพส่วนใต้ดิน		มวลชีวภาพรวม		มวลชีวภาพรวม		ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI)
	(g m ⁻²)			ส่วนเหนือดิน		(g m ⁻²)		ส่วนใต้ดิน		มวลชีวภาพรวม		
	ใบ	ก้านใบ	ลำต้น	g m ⁻²	kg rai ⁻¹	ราก	หัวมัน	g m ⁻²	kg rai ⁻¹	g m ⁻²	kg rai ⁻¹	
เริ่มการเพาะปลูก												
กรกฎาคม	101.07	32.67	149.07	282.80	452.48	19.73	-	19.73	31.57	302.53	484.05	1.09
สิงหาคม	165.8	53.2	344.6	563.6	901.76	15	475.4	490.4	784.64	1,054	1,686.40	1.75
เฉลี่ย	133.43	42.93	246.83	423.20	677.12	17.37	475.40	255.07	408.11	678.27	1,085.23	1.42
กำลังเจริญเติบโต												
กันยายน	216.4	64.8	362.4	643.6	1,029.76	11.6	587.8	599.4	959.04	1,243	1,988.80	4.50
ตุลาคม	149	39.6	635.2	823.8	1,318.08	30.8	1,568.2	1,599	2,558.40	2,422.8	3,876.48	3.28
พฤศจิกายน	260	72	1,311.2	1,643.2	2,629.12	19.2	3,747.6	3,766.8	6,026.88	5,410	8,656.00	1.79
เฉลี่ย	208.47	58.80	769.60	1,036.87	1,658.99	20.53	1,967.87	1,988.40	3,181.44	3,025.27	4,840.43	3.19
ก่อนการเก็บเกี่ยว												
ธันวาคม	102	31.2	2,141.6	2,274.8	3,639.68	38	5,124.4	5,162.4	8,259.84	7,437.2	11,899.52	1.30
มกราคม	164	41.6	1,658.4	1,864	2,982.40	11.6	5,240	5,251.6	8,402.56	7,115.6	11,384.96	1.49
เฉลี่ย	133	36.40	1,900	2,069.4	3,311.04	24.80	5,182.2	5,207	8,331.20	7,276.4	11,642.24	1.40

2.2.2 ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI)

ในช่วงเริ่มการเพาะปลูก (เดือน กรกฎาคม ถึง สิงหาคม) มีค่าเท่ากับ 1.42 ในช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน กันยายน ถึง พฤศจิกายน) ดัชนีพื้นที่ผิวใบมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.19 เนื่องจากเป็นช่วงกำลังเจริญเติบโต มีการสร้างใบจำนวนมาก ทำให้ค่า LAI มีค่าสูง และช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน ธันวาคม ถึง มกราคม) มีค่าเท่ากับ 1.40 เนื่องจากมีการทิ้งใบมาก รังสีดวงอาทิตย์จึงผ่านชั้นเรือนยอดของต้นมันสำปะหลังลงไปได้มาก ทำให้ค่า LAI ต่ำ (ภาพที่ 15)



(1) ช่วงเริ่มการเพาะปลูก (ก.ค. - ส.ค.)



(2) ช่วงกำลังเจริญเติบโต (ก.ย. - ต.ค.)



(3) ช่วงกำลังเจริญเติบโต (พ.ย.)

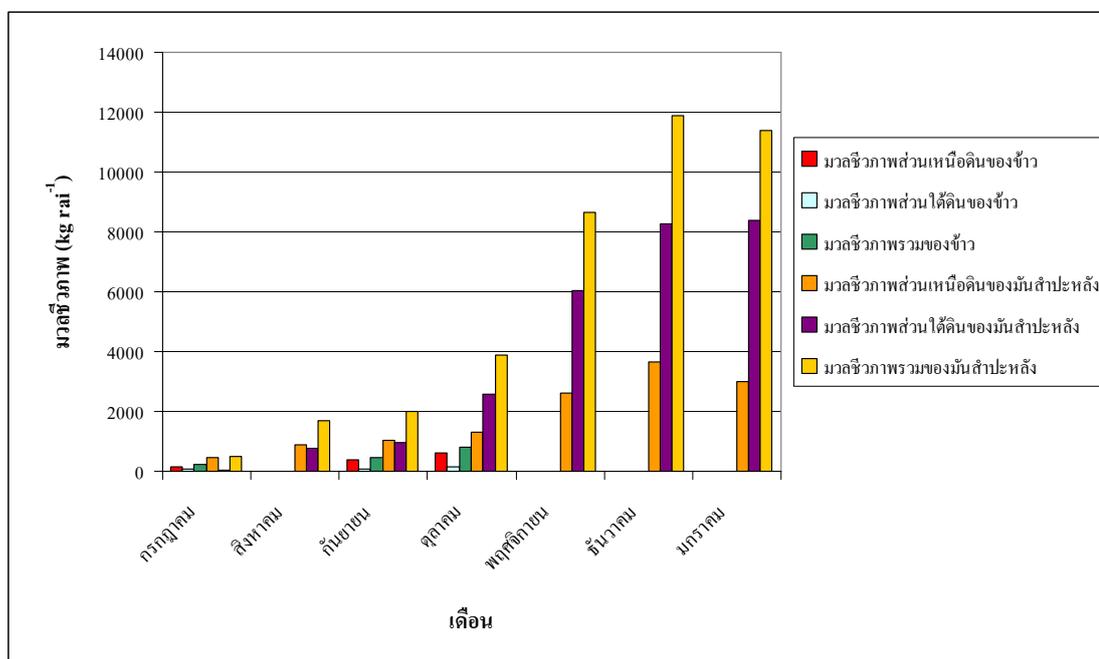


(4) ช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (ธ.ค. - ม.ค.)

ภาพที่ 15 แสดงระยะการเจริญเติบโตของต้นมันสำปะหลังแต่ละช่วงการเพาะปลูก

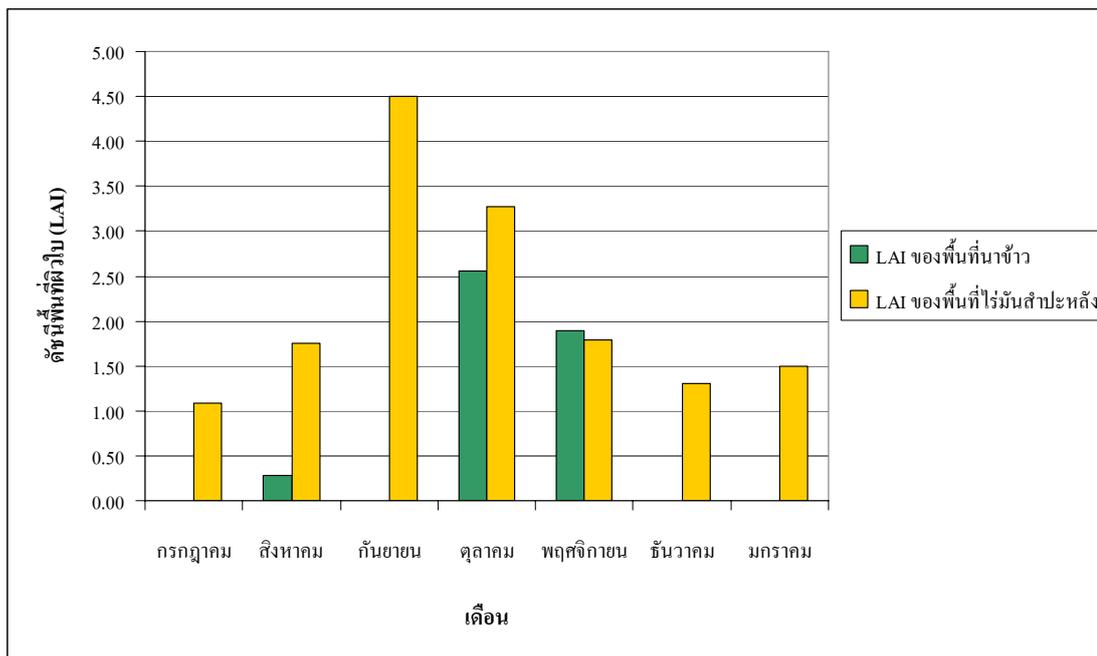
2.3 เปรียบเทียบมวลชีวภาพ และดัชนีพื้นที่ผิวใบในพื้นที่ศึกษา

จากการศึกษา ต้นข้าวมีมวลชีวภาพรวมสูงในเดือน พฤศจิกายน และต้นมันสำปะหลัง มีค่าสูงในเดือน ธันวาคม ซึ่งอยู่ในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว เนื่องจากมีการเจริญเติบโตเต็มที่ และมีการให้ผลผลิตของพืช กล่าวคือ ส่วนในช่วงเริ่มเพาะปลูกมีค่ามวลชีวภาพต่ำ เนื่องจากยังไม่มี การสร้างผลผลิตของพืช และพืชมีอายุน้อยยังความสามารถในการดูดกลืนแสงมาใช้ได้ค่อนข้างต่ำ แต่ค่ามวลชีวภาพของพืชจะค่อยๆ เริ่มสูงขึ้นตามอายุของพืช ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 เปรียบเทียบมวลชีวภาพในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง

ในช่วงกำลังเจริญเติบโต ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบพืชมีค่าสูงสุด เนื่องจากมีการปกคลุมของชั้นเรือนยอดพืชมาก ทำให้แสงที่ผ่านลงมาได้น้อย ทำให้ค่า LAI มีค่าสูง ส่วนในช่วงเริ่มเพาะปลูก มีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากพืชมีจำนวนใบน้อย แสงที่ตกกระทบผิวใบ และส่องผ่านใบลงมาน้อย ทำให้มีค่า LAI ต่ำ ในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยวต้นมันสำปะหลังเริ่มมีการทิ้งใบ ทำให้ได้ค่า LAI ต่ำ และต้นข้าวใบเปลี่ยนสีจากเขียวเป็นน้ำตาล ทำให้แสงที่ผ่านใบมีค่ามาก ทำให้ได้ค่า LAI ต่ำ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 เปรียบเทียบดัชนีพื้นที่ใบในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง

ดังนั้นปัจจัยด้านต่างๆ เช่น ปัจจัยที่เกี่ยวกับพืช ปัจจัยด้านอนุกรมวิธาน เป็นต้น มีผลต่อดัชนีพื้นที่ใบ และมวลชีวภาพของพืชในแต่ละช่วงการเพาะปลูกของพืช กล่าวคือ ช่วงก่อนการเก็บเกี่ยวพืชมีการเจริญเติบโตที่ช้าลง เพราะมีการเจริญเติบโตเต็มที่ และให้ผลผลิต เช่น ต้นข้าวการสังเคราะห์แสง หรือการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ได้น้อยลง และในช่วงนี้แปลงนาจะมีการเอาน้ำออกจากแปลง ส่งผลให้การสร้างมวลชีวภาพน้อย แต่มีการสะสมอาหารที่สร้างในช่วงกำลังเจริญเติบโตไว้ที่เมล็ดข้าว ทำให้มีค่ามวลชีวภาพในช่วงนี้สูง เป็นต้น และในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยวค่าดัชนีพื้นที่ใบมีค่าต่ำ เนื่องจากพื้นที่ใบมีการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์น้อย กล่าวคือ ต้นมันสำปะหลังมีการทิ้งใบ เพื่อลดการคายน้ำ และต้นข้าวในช่วงนี้ลำต้นเริ่มแห้ง กรอบ ทำให้การสังเคราะห์แสงได้น้อยลง รังสีดวงอาทิตย์จึงส่องผ่านใบได้มาก

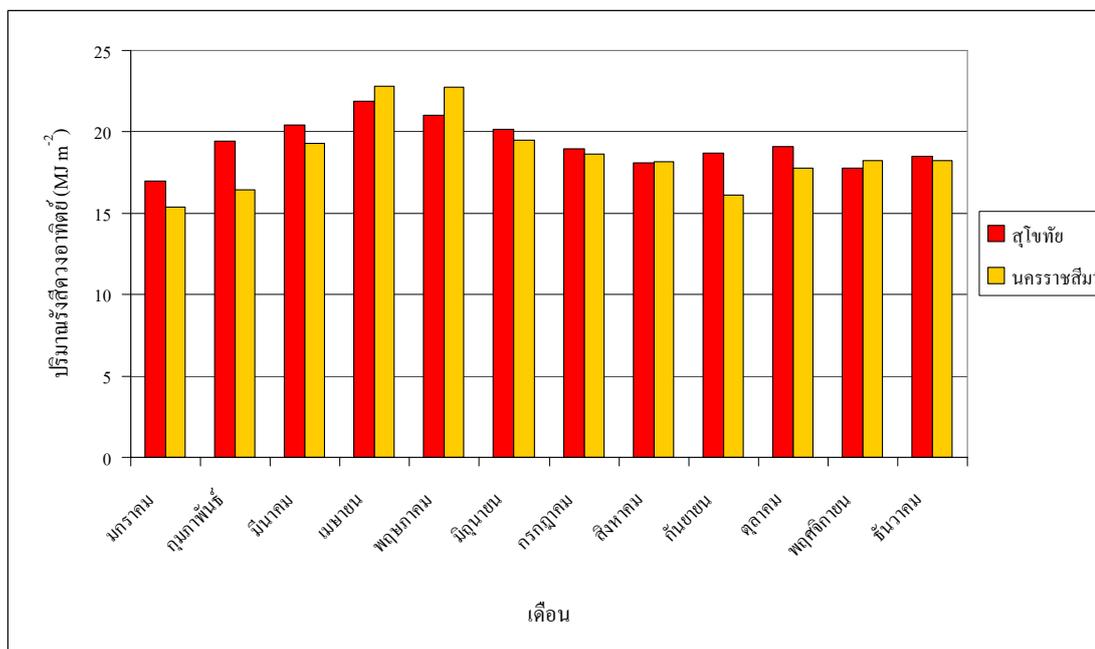
3. ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ (photosynthetically active radiation, PARa)

3.1 รังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation)

จากการศึกษา พบว่า ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีของจังหวัดสุโขทัย และ จังหวัดนครราชสีมา มีค่าเท่ากับ 19.3 และ 18.6 MJ m⁻² day⁻¹ ตามลำดับ ในเดือน เมษายน ปริมาณ รังสีดวงอาทิตย์มีปริมาณมาก โดยจังหวัดสุโขทัย มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 21.9 MJ m⁻² day⁻¹ และ จังหวัดนครราชสีมา มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 22.8 MJ m⁻² day⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งตรงกับการศึกษาของ กรมพัฒนา และส่งเสริมพลังงาน (2542) ได้รายงานไว้ว่า ในเดือน เมษายน มุมตกกระทบของรังสีดวง อาทิตย์เวลาเที่ยงวันเกือบตั้งฉากกับพื้นที่ทั่วประเทศ และในช่วงฤดูแล้งมีเมฆน้อย ท้องฟ้าค่อนข้าง แจ่มใส ดังนั้นรังสีดวงอาทิตย์มีค่าค่อนข้างสูงทั่วประเทศ ในเดือน มกราคม ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ของจังหวัดสุโขทัย และจังหวัดนครราชสีมา มีค่าต่ำสุดเฉลี่ยเท่ากับ 17.0 และ 15.4 MJ m⁻² day⁻¹ ตามลำดับ (ตารางที่ 10 และภาพที่ 18)

ตารางที่ 10 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ของแต่ละเดือน ในปี พ.ศ. 2548

				หน่วย: MJ m ⁻² day ⁻¹	
ปี พ.ศ.	ฤดูกาล	เดือน	สุโขทัย	นครราชสีมา	
2548	ฤดูแล้ง	มกราคม	17.0	15.4	
		กุมภาพันธ์	19.4	16.4	
		มีนาคม	20.5	19.3	
		เมษายน	21.9	22.8	
		เฉลี่ย	19.7	18.5	
		พฤษภาคม	21.0	22.8	
	ฤดูฝน	มิถุนายน	20.1	19.5	
		กรกฎาคม	19.0	18.6	
		สิงหาคม	18.1	18.2	
		กันยายน	18.7	16.1	
		ตุลาคม	19.1	17.8	
		เฉลี่ย	19.3	18.8	
	ฤดูแล้ง	พฤศจิกายน	17.7	18.2	
		ธันวาคม	18.5	18.2	
		เฉลี่ย	18.1	18.2	
		เฉลี่ยรวมตลอดฤดูกาล	19.3	18.6	



ภาพที่ 18 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ของจังหวัดสุโขทัย และจังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2548

จากภาพที่ 18 จะเห็นว่า ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ของจังหวัดสุโขทัย และจังหวัดนครราชสีมาปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงสุดอยู่ในเดือนเมษายน ถึง พฤษภาคม และมีค่าต่ำสุดอยู่ในเดือน มกราคม

3.2 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (absorbed photosynthetically active radiation, PARa)

3.2.1 พื้นที่นาข้าว

ในช่วงเริ่มการเพาะปลูก (เดือน สิงหาคม) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.15 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ เท่ากับ 18.10 MJ m^{-2} ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืช (PARi) มีค่าเท่ากับ 11.71 MJ m^{-2} และปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) มีค่าเท่ากับ 1.72 MJ m^{-2} ในช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน ตุลาคม) ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.75 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ เท่ากับ 19.10 MJ m^{-2} PARi มีค่าเท่ากับ 12.78 MJ m^{-2} และปริมาณ PARa มีค่าเท่ากับ 9.53 MJ m^{-2} ซึ่งมีค่าสูงสุด เนื่องจากพืชต้องการแสงแดดช่วยในการเจริญเติบโต จึงมีประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ และ

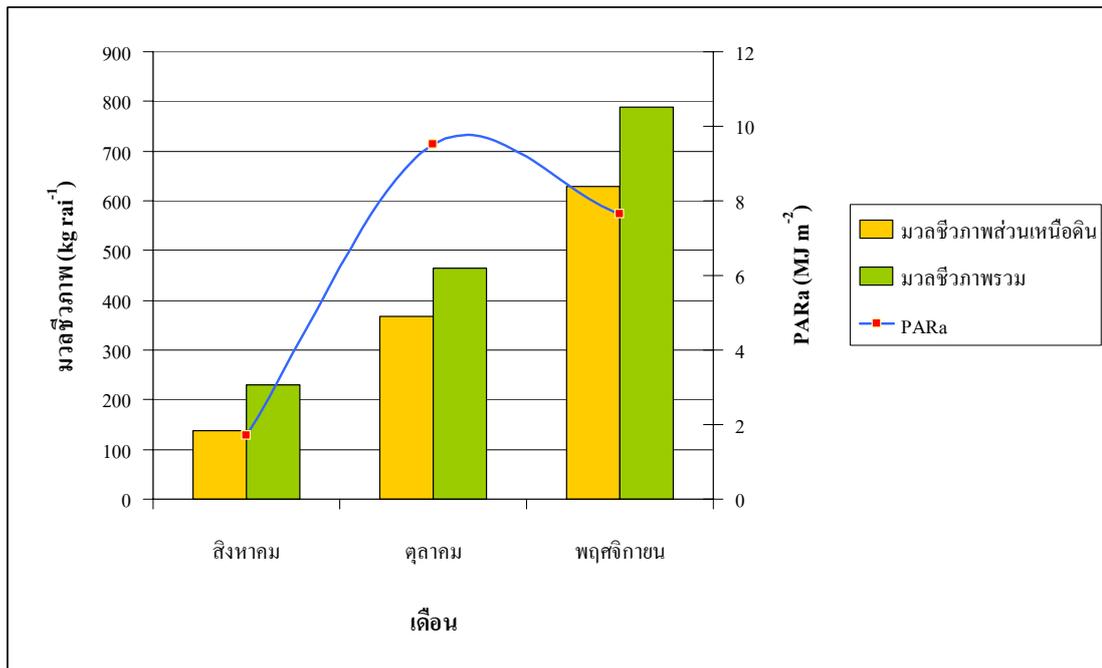
มีการนำรังสีแสงสังเคราะห์มาใช้ในปริมาณมาก และในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน พฤศจิกายน) ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.64 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 17.75 MJ m^{-2} ปริมาณ PAR_i มีค่าเท่ากับ 11.87 MJ m^{-2} และปริมาณ PAR_a มีค่าเท่ากับ 7.65 MJ m^{-2} นอกจากนี้ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนจะแปรผันตามประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ กล่าวคือ พืชในช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน ตุลาคม) มีประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์สูงสุด ทำให้ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนมีค่าสูงสุด และปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืชมีปริมาณสูงสุดในฤดูการเพาะปลูกด้วย (ตารางที่ 11 และ ภาพที่ 19 – 20)

จากผลการศึกษา PAR_i เฉลี่ยตลอดฤดูกาลเพาะปลูก (เดือน สิงหาคม ถึง พฤศจิกายน) มีค่าเท่ากับ 11.99 MJ m^{-2} ส่วนการศึกษาของรังสรรค์ (2538) วัดค่า PAR_i ของพื้นที่นาข้าว ในช่วงฤดูแล้ง (เดือน พฤษภาคม ถึง กันยายน) มีค่าเท่ากับ 6.05 MJ m^{-2} และในช่วงฤดูฝน (เดือน ตุลาคม ถึง มีนาคม) มีเท่ากับ 6.08 MJ m^{-2} ซึ่งค่าที่วัดได้มีความแตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของสภาพภูมิอากาศของภาคใต้ และภาคกลางตอนบน

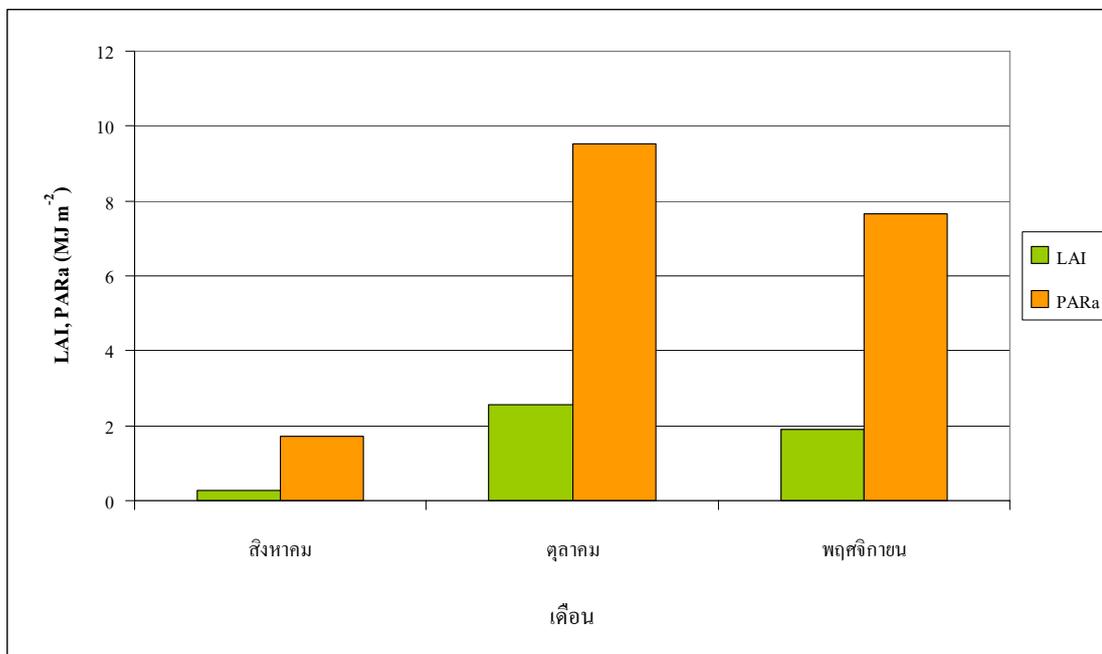
ดังนั้นในช่วงฤดูกาลเพาะปลูก (เดือน สิงหาคม ถึง เดือน พฤศจิกายน) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ตลอดฤดูการเพาะปลูก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.25 MJ m^{-2} ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืชตลอดฤดูการเพาะปลูก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.99 MJ m^{-2} คิดเป็นร้อยละ 62.29 ของรังสีดวงอาทิตย์ และปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนตลอดฤดูกาลเพาะปลูก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.41 MJ m^{-2} คิดเป็นร้อยละ 53.46 ของรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืช

ตารางที่ 11 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในพื้นที่นาข้าว จังหวัดสุโขทัย

เดือน	รังสีดวงอาทิตย์ (MJ m ⁻²)	ปริมาณรังสีแสง สังเคราะห์เหนือ เหนือแปลงพืช (MJ m ⁻²)	ปริมาณรังสีแสง สังเคราะห์ที่พืช ดูดกลืน (MJ m ⁻²)	ประสิทธิภาพ การดูดกลืนรังสี แสงสังเคราะห์ (ϵ_i)	มวลชีวภาพ ส่วนเหนือดิน (kg rai ⁻¹)	มวลชีวภาพรวม (kg rai ⁻¹)	ดัชนีพื้นที่ใบ (LAI)
สิงหาคม	18.13	11.71	1.72	0.15	138.67	229.33	0.28
ตุลาคม	19.10	12.78	9.53	0.75	368.00	464.00	2.56
พฤศจิกายน	17.75	11.87	7.65	0.64	629.33	789.33	1.89
เฉลี่ยตลอดฤดูกาลเพาะปลูก	19.25	11.99	6.41	0.51	378.67	494.22	1.58
ร้อยละของรังสีดวงอาทิตย์	100.00	62.29	-	-	-	-	-
ร้อยละของรังสีแสงสังเคราะห์ เหนือแปลงพืช	-	100.00	53.46	-	-	-	-



ภาพที่ 19 ความผันแปรระหว่างมวลชีวภาพกับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในพื้นที่นาข้าว



ภาพที่ 20 ความผันแปรระหว่างดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในพื้นที่นาข้าว

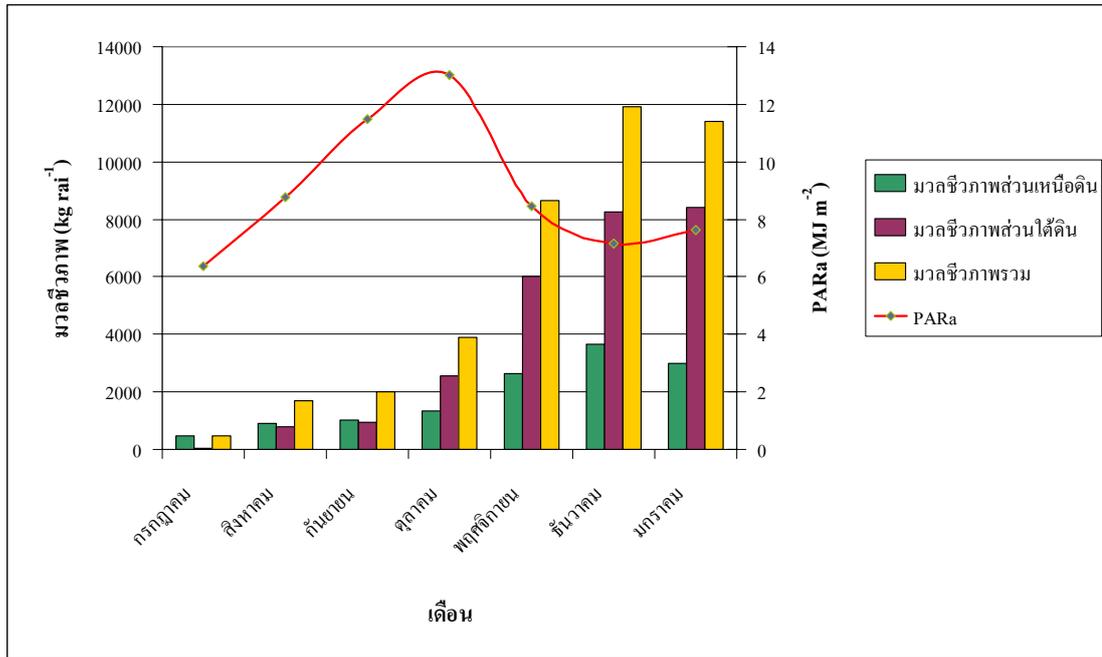
3.2.2 พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง

ในช่วงเริ่มการเพาะปลูก (เดือน กรกฎาคม ถึง สิงหาคม) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.54 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืช (PAR_i) มีค่าเท่ากับ 14.07 MJ m⁻² และปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PAR_a) มีค่าเท่ากับ 7.56 MJ m⁻² ซึ่งมีค่าต่ำ เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มการเพาะปลูกพืช ทำให้การดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์มีค่าต่ำ ในช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน กันยายน ถึง พฤศจิกายน) ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.78 ปริมาณ PAR_i มีค่าเท่ากับ 14.17 MJ m⁻² และปริมาณ PAR_a มีค่าเท่ากับ 10.99 MJ m⁻² ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ และปริมาณการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์มีค่าสูงสุด เนื่องจากเป็นช่วงที่เริ่มมีการสร้างส่วนต่างๆ ของพืชเพื่อการเจริญเติบโต โดยเฉพาะส่วนผลผลิตของพืช ทำให้การดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์มีค่ามาก และช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน ธันวาคม ถึง เดือน มกราคม) ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.54 ปริมาณ PAR_i มีค่าเท่ากับ 13.75 MJ m⁻² และปริมาณ PAR_a มีค่าเท่ากับ 7.40 MJ m⁻² ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืช เนื่องจากพืชมีอายุเพิ่มขึ้น การเจริญเติบโตเริ่มช้าลง ช่วงนี้ต้นมันสำปะหลังมีการทิ้งใบเป็นจำนวนมาก เพื่อลดการคายน้ำของพืชก่อนเข้าสู่ฤดูแล้ง ทำให้การดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์มีค่าลดลง

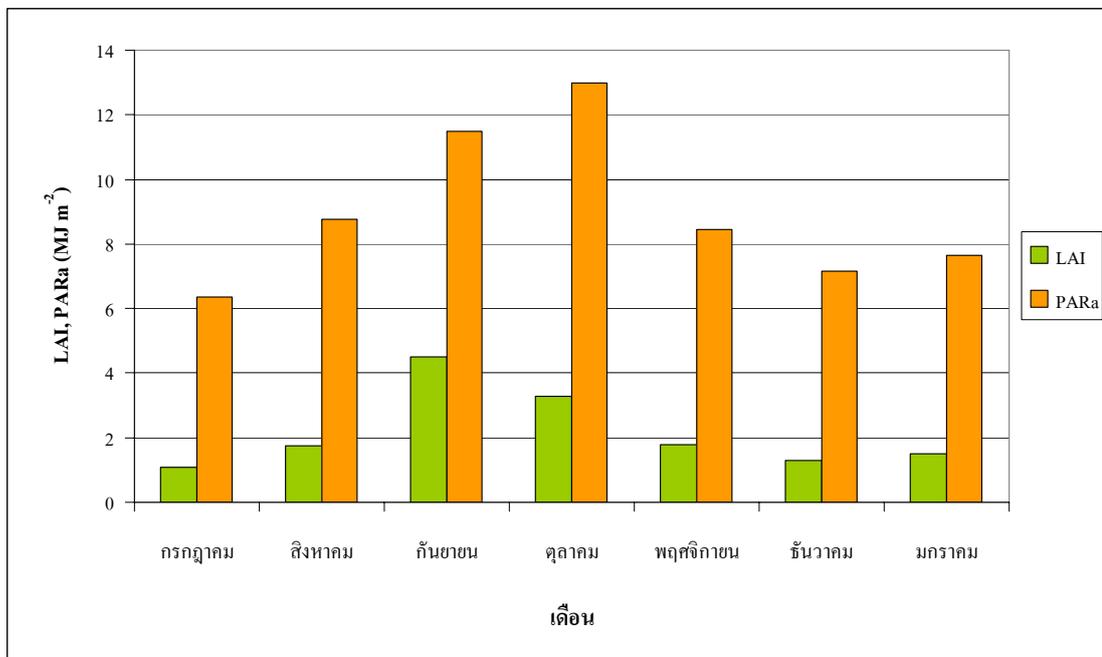
ดังนั้นในช่วงฤดูกาลเพาะปลูก (เดือน กรกฎาคม ถึง เดือน มกราคม) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ตลอดฤดูกาลเพาะปลูก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.51 MJ m⁻² และปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เหนือแปลงพืชตลอดฤดูกาลเพาะปลูก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.01 MJ m⁻² คิดเป็นร้อยละ 80.02 ของรังสีดวงอาทิตย์ ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนตลอดฤดูกาลเพาะปลูก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.98 MJ m⁻² คิดเป็นร้อยละ 64.11 ของรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืช ดังแสดงในตารางที่ 12 และ ภาพที่ 21 - 22)

ตารางที่ 12 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในไร่มันสำปะหลัง จังหวัดนครราชสีมา

เดือน	ปริมาณรังสี ดวงอาทิตย์ (MJ m ⁻²)	ปริมาณรังสีแสง สังเคราะห์เหนือ แปลงพืช (MJ m ⁻²)	ปริมาณ PARa (MJ m ⁻²)	ประสิทธิภาพ			ดัชนี พื้นที่ใบ (LAI)	
				การดูดกลืน รังสีแสง สังเคราะห์ (ϵ_i)	มวลชีวภาพ ส่วนเหนือดิน (kg rai ⁻¹)	มวลชีวภาพ ส่วนใต้ดิน (kg rai ⁻¹)		มวลชีวภาพ รวม (kg rai ⁻¹)
กรกฎาคม	18.63	13.96	6.37	0.46	452.48	31.57	484.05	1.09
สิงหาคม	18.19	14.19	8.76	0.62	901.76	784.64	1,686.40	1.75
เฉลี่ย	18.41	14.07	7.56	0.54	677.12	408.11	1,085.23	1.42
กันยายน	16.12	12.98	11.50	0.89	1,029.76	959.04	1,988.80	4.50
ตุลาคม	17.77	15.91	13.00	0.82	1,318.08	2,558.40	3,876.48	3.28
พฤศจิกายน	18.24	13.54	8.45	0.62	2,629.12	6,026.88	8,656.00	1.79
เฉลี่ย	17.38	14.17	10.99	0.78	1,658.99	3,181.44	4,840.43	3.19
ธันวาคม	18.25	13.91	7.16	0.51	3,639.68	8,259.84	11,899.52	1.30
มกราคม	15.42	13.59	7.64	0.56	2,982.40	8,402.56	11,384.96	1.49
เฉลี่ย	16.83	13.75	7.40	0.54	3,311.04	8,331.20	11,642.24	1.40
เฉลี่ยตลอดฤดูกาลเพาะปลูก	17.51	14.01	8.98	0.64	1,850.47	3,860.42	5,710.89	2.17
ร้อยละของรังสีดวงอาทิตย์	100.00	80.02	-	-	-	-	-	-
ร้อยละของรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืช	-	100.00	64.11	-	-	-	-	-



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพกับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในไร่มันสำปะหลัง



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในไร่มันสำปะหลัง

3.3 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ระหว่างพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง

จากการศึกษา พบว่า ในพื้นที่นาข้าวมีปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) แปรผันตามประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ และปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืช (PARi) กล่าวคือ ในช่วงเริ่มเพาะปลูก (เดือน สิงหาคม) ปริมาณ PARi มีค่าเท่ากับ 11.71 MJ m^{-2} แต่ประสิทธิภาพการดูดกลืนมีค่าเท่ากับ 0.15 ทำให้ปริมาณ PARa มีค่าเท่ากับ 1.72 MJ m^{-2} ซึ่งมีค่าน้อย ช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน กันยายน ถึง เดือน ตุลาคม) ประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 0.75 และปริมาณ PARa มีค่าเท่ากับ 9.53 MJ m^{-2} ซึ่งค่าที่ได้มีค่าสูง ประกอบกับปริมาณ PARi มีค่าเท่ากับ 12.78 MJ m^{-2} เป็นค่าที่สูงสุดในช่วงการเจริญเติบโต และช่วงนี้ยังเป็นระยะที่มีการสร้างส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ลำต้น ราก ผลผลิต ทำให้ปริมาณการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์มีค่าสูงตามไปด้วย และช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน พฤศจิกายน) ประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 0.64 และปริมาณ PARi มีค่าเท่ากับ 11.87 MJ m^{-2} ค่าที่ได้ลดลงจากช่วงกำลังเจริญเติบโต ทำให้ปริมาณ PARa มีค่าเท่ากับ 7.65 MJ m^{-2} ซึ่งลดลงจากช่วงกำลังเจริญเติบโต แต่ยังมีค่าที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากพืชมีการเจริญเติบโตช้าลง ส่วนของต้นข้าวบางส่วนมีการเปลี่ยนแปลง เช่น ใบของต้นข้าวเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เป็นต้น

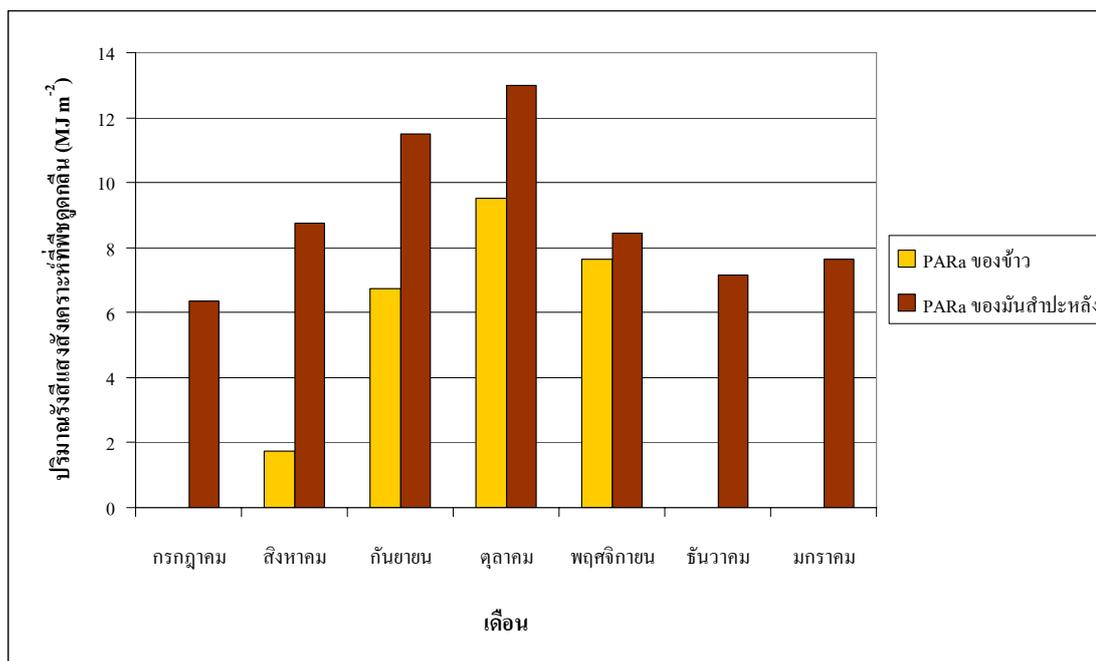
ส่วนไร่มันสำปะหลัง ในช่วงเริ่มเพาะปลูก (เดือน กรกฎาคม ถึง เดือน สิงหาคม) ปริมาณ PARi มีค่าเท่ากับ 14.07 MJ m^{-2} ประสิทธิภาพการดูดกลืน มีค่าเท่ากับ 0.54 ปริมาณ PARa มีค่าเท่ากับ 7.56 MJ m^{-2} ซึ่งค่าที่ได้ไม่สูงมากนัก ช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน กันยายน ถึง เดือน พฤศจิกายน) เป็นช่วงที่พืชมีการสร้างส่วนต่างๆ ของต้นพืช ซึ่งต้องอาศัยปัจจัยด้านต่างๆ ในการเจริญเติบโต แสงแดดก็เป็นปัจจัยหนึ่งในการเจริญเติบโต จึงมีค่าประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ และปริมาณ PARi มีค่าเท่ากับ 0.78 และ 14.14 MJ m^{-2} ตามลำดับ เป็นค่าที่สูงที่สุด ในช่วงการเจริญเติบโต ทำให้ปริมาณ PARa มีค่าเท่ากับ 10.99 MJ m^{-2} ซึ่งมีค่าสูง และในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน ธันวาคม ถึง เดือน มกราคม) พืชมีการเจริญเติบโตช้าลง และใบมีการหลุดร่วงเพื่อลดการคายระเหยน้ำในช่วงหน้าแล้ง ปริมาณ PARi มีค่าเท่ากับ 13.75 MJ m^{-2} ค่าที่ได้ลดลงจากช่วงกำลังเจริญเติบโต ทำให้ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ และปริมาณ PARa มีค่าเท่ากับ 0.54 และ 7.40 MJ m^{-2} ตามลำดับ (ตารางที่ 13 และภาพที่ 23)

ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ ปริมาณ PARi และปริมาณ PARa ของไร่มันสำปะหลังเฉลี่ยตลอดฤดูปลูกมีค่าสูงกว่าพื้นที่นาข้าว ซึ่งในช่วงกำลังเจริญเติบโต

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ (PARa) ของพื้นที่นาข้าว และ ไร่มันสำปะหลัง

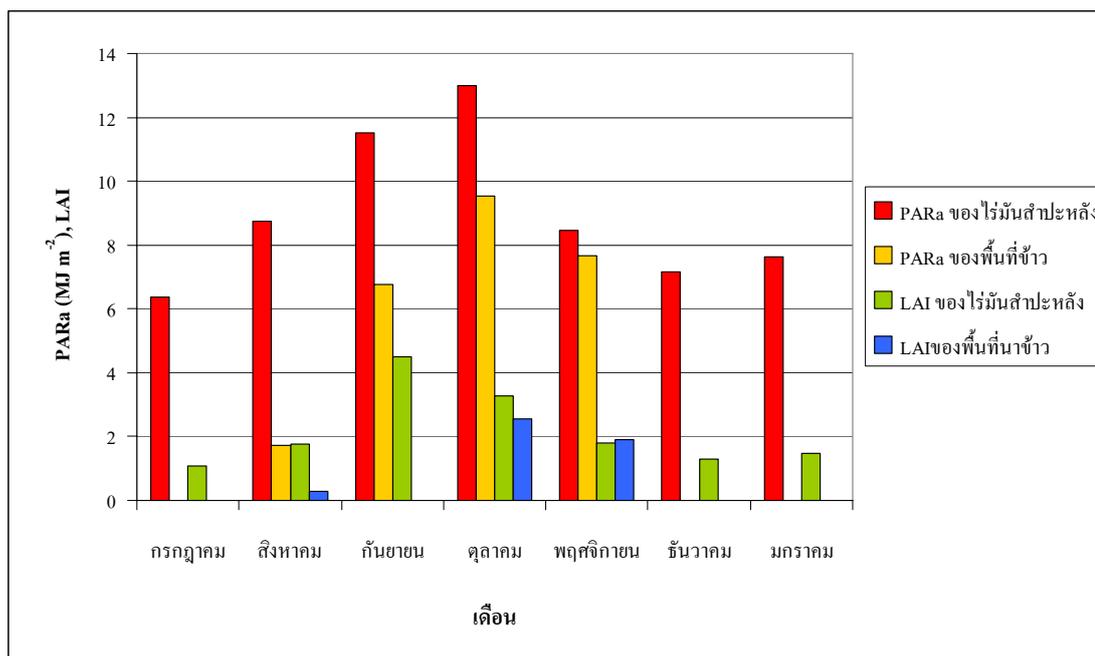
ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน	เดือน	PARa (MJ m ⁻²)	ประสิทธิภาพ		ดัชนีพื้นผิวใบ (LAI)	ประสิทธิภาพการใช้รังสีของพืช, RUE (g MJ ⁻¹)
			การดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i)	มวลชีวภาพรวม (kg rai ⁻¹)		
พื้นที่นาข้าว	ช่วงเริ่มเพาะปลูก					
	สิงหาคม	1.72	0.15	229.33	0.28	-
	ช่วงกำลังเจริญเติบโต					
	กันยายน	6.76	-	-	-	-
	ตุลาคม	9.53	0.75	464.00	2.56	-
	ช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว					
	พฤศจิกายน	7.65	0.64	789.33	1.89	-
	เฉลี่ยตลอดฤดูกาลปลูก	6.41	0.51	494.22	1.58	0.58-0.66
ไร่มันสำปะหลัง	ช่วงเริ่มเพาะปลูก					
	กรกฎาคม	6.37	0.46	484.05	1.09	-
	สิงหาคม	8.76	0.62	1,686.40	1.75	-
	เฉลี่ย	7.56	0.54	1,085.23	1.42	-
	ช่วงกำลังเจริญเติบโต					
	กันยายน	11.50	0.89	1,988.80	4.50	-
	ตุลาคม	13.00	0.82	3,876.48	3.28	-
	พฤศจิกายน	8.45	0.62	8,656.00	1.79	-
	เฉลี่ย	10.99	0.78	4,840.43	3.19	-
	ช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว					
	ธันวาคม	7.16	0.51	11,899.52	1.30	-
	มกราคม	7.64	0.56	11,384.96	1.49	-
	เฉลี่ย	7.40	0.54	11,642.24	1.40	-
เฉลี่ยตลอดฤดูกาลปลูก	8.98	0.64	5,710.89	2.17	1.09-4.42	

และก่อนการเก็บเกี่ยวมีค่าประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ และปริมาณ PARa ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 23 เปรียบเทียบการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ระหว่างพื้นที่นาข้าว และ ไร่มันสำปะหลัง

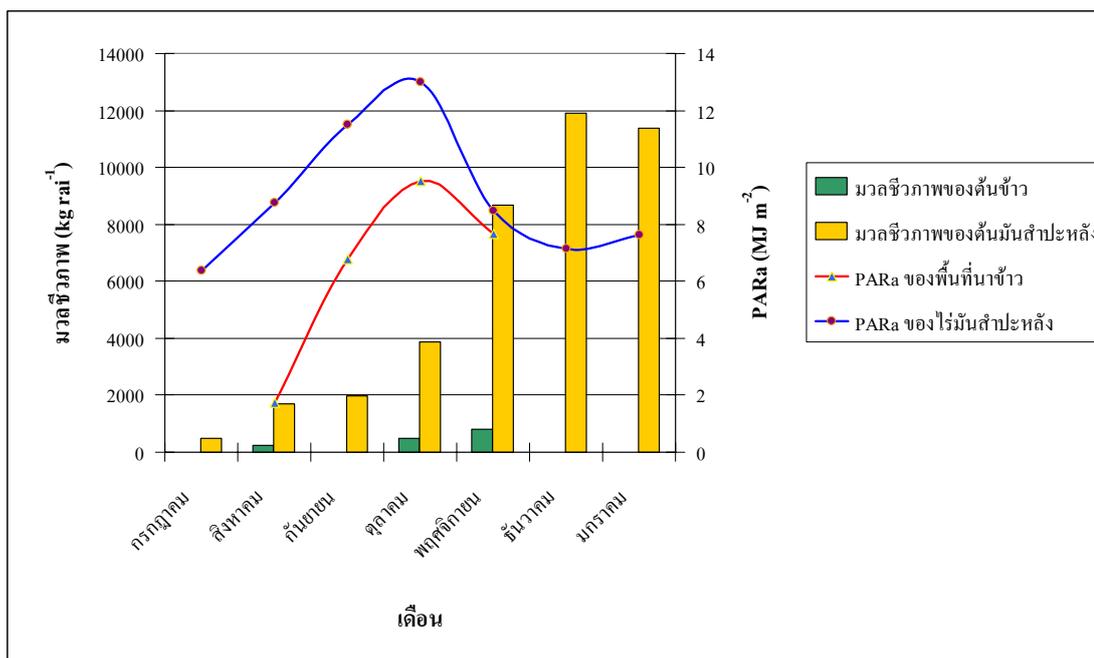
จากภาพที่ 23 จะเห็นได้ว่า ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนในเดือน กรกฎาคม และเดือน สิงหาคม ซึ่งเป็นช่วงเริ่มเพาะปลูก มีค่าต่ำ และมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของพืช เพราะในแต่ละช่วงการเจริญเติบโตของพืชปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนเพื่อใช้ในการสร้างมวลชีวภาพส่วนต่างๆ ของพืชไม่เท่ากัน ในเดือนตุลาคม ซึ่งอยู่ในช่วงกำลังเจริญเติบโต ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลังมีค่าสูงสุด เนื่องจากพืชมีการใช้รังสีแสงสังเคราะห์เพื่อการเจริญเติบโตในส่วนต่างๆ ของพืช โดยเฉพาะส่วนผลผลิต แต่ปริมาณการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ของพืชลดลงเรื่อยๆ ตามอายุของพืช และปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืช



ภาพที่ 24 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) กับดัชนีพื้นที่ผิวใบ

จากภาพที่ 24 พบว่า ดัชนีพื้นที่ผิวใบของพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลังมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลังมีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์สูงสุดใน เดือนตุลาคม ซึ่งอยู่ในช่วงกำลังเจริญเติบโตส่วนดัชนีพื้นที่ผิวใบของพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลังมีค่าสูงสุดในเดือน กันยายน ถึงเดือน ตุลาคม ซึ่งอยู่ในช่วงกำลังเจริญเติบโต เช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อเข้าสู่ช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน พฤศจิกายน) เนื่องจากใบของต้นข้าวเริ่มเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาล ทำให้การดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ของพืชมีค่าต่ำ ส่วนต้นมันสำปะหลังจะเริ่มมีการทิ้งใบ เพื่อลดการคายน้ำในช่วงฤดูแล้ง

จากภาพที่ 25 จะเห็นได้ว่า พื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลังมีปริมาณการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเริ่มลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน พฤศจิกายน) การสร้างมวลชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของพืช เนื่องจากพืชต้องการรังสีแสงสังเคราะห์ไปใช้สร้างส่วนต่างๆ ของพืช ในช่วงเดือน ตุลาคม และเดือน พฤศจิกายน ซึ่งอยู่ในช่วงกำลังเจริญเติบโตของพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลังจะมีค่ามวลชีวภาพ และปริมาณการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ของพืชสูงสุด



ภาพที่ 25 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) กับมวลชีวภาพ

4. ความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพ (biomass) และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (PARa)

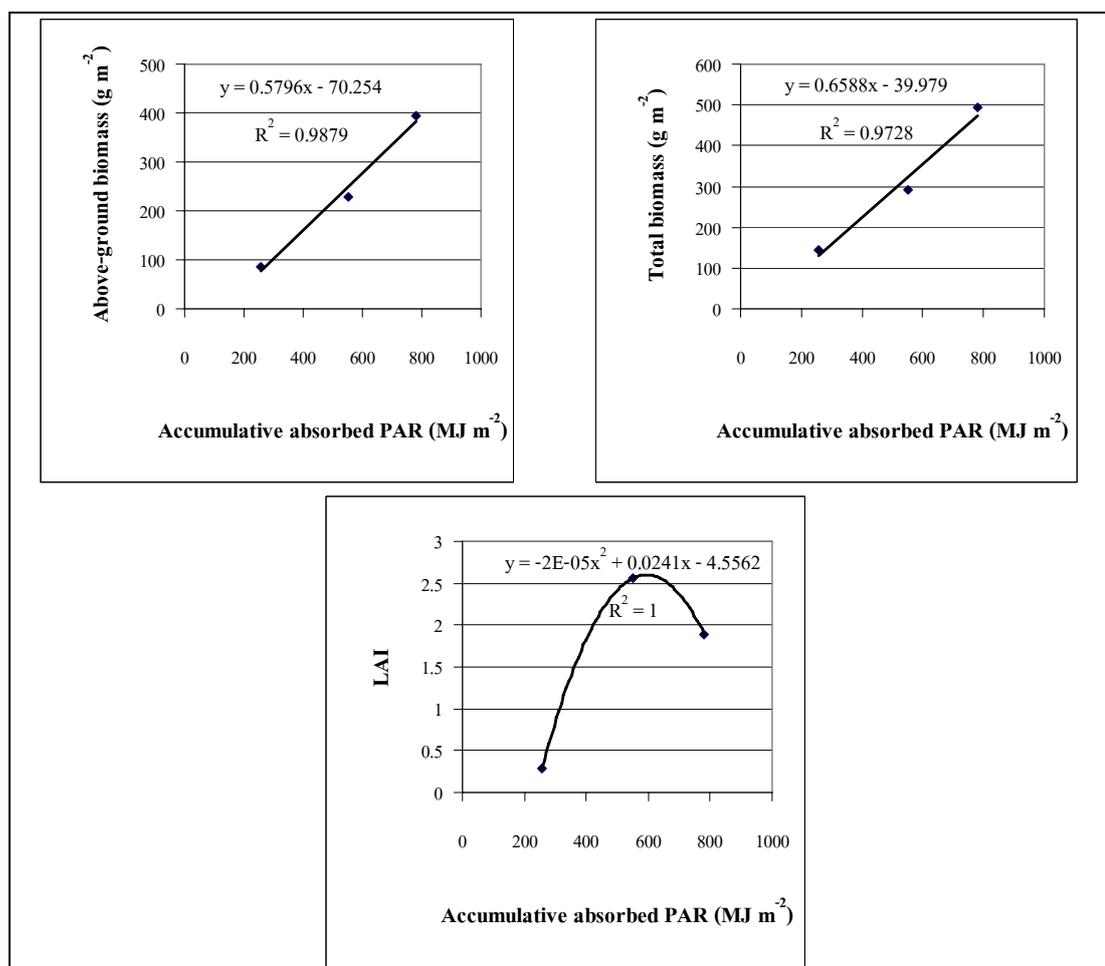
4.1 พื้นที่นาข้าว

จากการศึกษา พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นที่ผิวใบกับปริมาณรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนของพื้นที่นาข้าว (ตารางที่ 14 และภาพที่ 26) แสดงให้เห็นว่า พื้นที่นาข้าวปริมาณรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) ในรูปแบบโพลีโนเมียล ค่า R^2 เท่ากับ 1.00 เนื่องจากใบข้าวมีลักษณะเรียวยาว แบน และโค้ง ทำให้มีการทำมุมรับรังสีแสงสังเคราะห์ได้มาก ส่วนมวลชีวภาพของต้นข้าวมีความสัมพันธ์กันในรูปแบบเส้นตรง ซึ่งค่า R^2 มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน และมวลชีวภาพรวมมีค่าเท่ากับ 0.99 และ 0.97 ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการสร้างมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน คือ ลำต้น และรวงข้าวได้รับรังสีแสงสังเคราะห์โดยตรง และเปลี่ยนรังสีแสงสังเคราะห์ที่ดูดกลืนเป็นมวลชีวภาพ ทำให้มีความสัมพันธ์กับรังสีแสงสังเคราะห์มาก ความลาดชันสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.58 – 0.66 $g\ mJ^{-1}$ ซึ่งความลาดชันสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น แสดงถึงประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) ดังนั้น

PARa มีอิทธิพลต่อดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) การสร้างมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน และมวลชีวภาพรวม ในต้นข้าว

ตารางที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ของพื้นที่นาข้าว

ดัชนี	รูปแบบ	สมการ	R ²
มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน	เส้นตรง	$Y = 0.5796x + 70.254$	0.9879
มวลชีวภาพรวม	เส้นตรง	$Y = 0.6588x + 39.979$	0.9728
ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI)	โพลีโนเมียล	$Y = -(-2 \times 10^{-5})x^2 + 0.0241x - 4.5562$	1.00



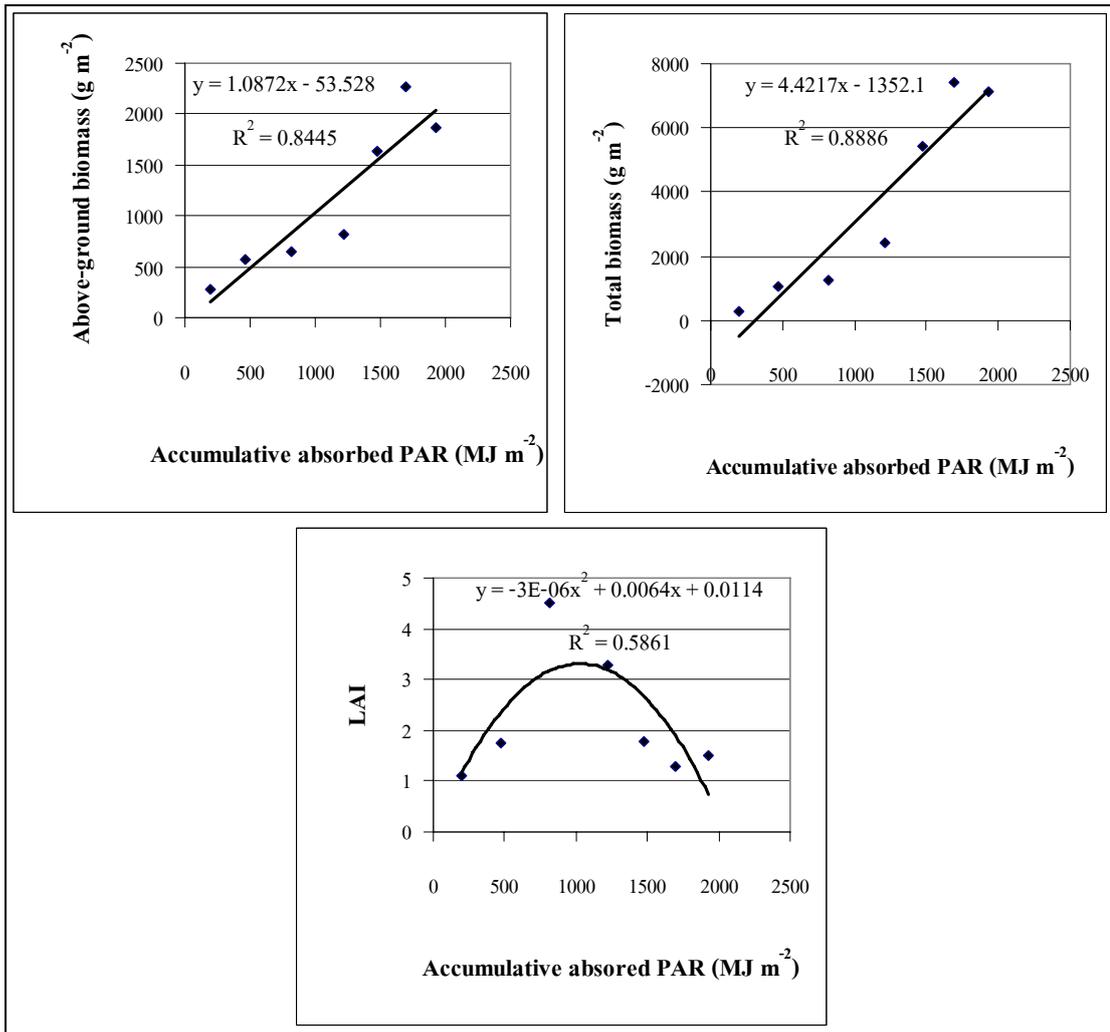
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในพื้นที่นาข้าว

4.2 พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง

จากการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นที่ผิวใบกับปริมาณรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนของไร่มันสำปะหลัง แสดงให้เห็นว่า ปริมาณรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) ในรูปแบบโพลิโนเมียล ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.59 ส่วนมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน และมวลชีวภาพรวมของต้นมันสำปะหลังมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง มีค่า R^2 เท่ากับ 0.84 และ 0.89 ตามลำดับ (ตารางที่ 15 และภาพที่ 27) เนื่องจากต้นมันสำปะหลังมีการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนเพื่อการสร้างมวลชีวภาพในส่วนต่างๆ ทำให้พืชมีการเจริญเติบโต ในช่วงหน้าแล้งต้นมันสำปะหลังมีการทิ้งใบเพื่อลดการคายระเหยน้ำ ซึ่งการลดจำนวนใบพืช และปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์เหนือแปลงพืชมีผลต่อดัชนีพื้นที่ผิวใบ ความลาดชันสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นมีค่าอยู่ในช่วง $1.09 - 4.42 \text{ g mJ}^{-1}$ ซึ่งความลาดชันสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น แสดงถึงประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ ดังนั้น PARa จึงมีอิทธิพลต่อดัชนีพื้นที่ผิวใบ และการสร้างมวลชีวภาพในต้นมันสำปะหลัง

ตารางที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ของไร่มันสำปะหลัง

ดัชนี	รูปแบบ	สมการ	R^2
มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน	เส้นตรง	$Y = 1.0872 x - 53.528$	0.8445
มวลชีวภาพรวม	เส้นตรง	$Y = 4.4217 x - 1352.1$	0.8886
ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI)	โพลิโนเมียล	$Y = (-3 \times 10^{-6}) x^2 + 0.0064 x - 0.0114$	0.5861



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพและดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) กับปริมาณรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในไร่น้ำตาลป่าหลัง

5. ประสิทธิภาพการใช้รังสี (radiation use efficiency, RUE) ในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง

5.1 พื้นที่นาข้าว

5.1.1 ประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE)

ผลการศึกษา พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพตลอดช่วงการเจริญเติบโตกับปริมาณสะสมรังสีแสงสังเคราะห์ที่ข้าวดูดกลืนมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรงในเชิงบวก ซึ่งมีค่า R^2 ของมวลชีวภาพรวมเท่ากับ 0.97 ส่วนมวลชีวภาพส่วนเหนือดินมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 โดยความลาดชันของรีเกรสชันเส้นตรงของมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน มีค่าเท่ากับ 0.58 และมวลชีวภาพรวม มีค่าเท่ากับ 0.66 ซึ่งความลาดชันของรีเกรสชันเส้นตรงแสดงถึงประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) ของต้นข้าว ดังนั้น RUE ของพื้นที่นาข้าวจึงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.58 – 0.66 $g MJ^{-1}$

5.1.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) ของพื้นที่นาข้าว

จากผลการศึกษา RUE ของต้นข้าว มีค่าอยู่ระหว่าง 0.58 – 0.66 $g MJ^{-1}$ ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของรังสรรค์ (2538) ที่ได้ศึกษาประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ของข้าวภายใต้แบบการทำนา และสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งทดสอบในแปลงนาเกษตรกร และแปลงทดลองที่มีการปลูกแบบหว่านน้ำตม และแบบปักดำที่จังหวัดพัทลุง โดยใช้ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ในช่วงฤดูนาปรัง ปี พ.ศ. 2536 และข้าวเหนียวในช่วงฤดูนาปี พ.ศ. 2536-2537 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพตลอดช่วงการเจริญเติบโตกับปริมาณสะสมรังสีแสงสังเคราะห์ที่ข้าวดูดกลืนมีลักษณะแบบรีเกรสชันเส้นตรงในเชิงบวก ค่า R^2 มากกว่า 0.85 ข้าวใบตั้งสุพรรณบุรี 90 มีค่าประสิทธิภาพการใช้รังสีมากกว่าข้าวใบราบพันธุ์เหนียว ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ข้าวพันธุ์ สุพรรณบุรี 90 ช่วงหลังหว่านข้าว มีค่าเท่ากับ 2.77 $g MJ^{-1}$ และหลังจากปักดำ 3.20 $g MJ^{-1}$ ส่วนข้าวเหนียวในช่วงหลังหว่านข้าว มีค่าเท่ากับ 2.13 $g MJ^{-1}$ และหลังจากปักดำ 2.67 $g MJ^{-1}$ (ตารางที่ 16)

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) ในพื้นที่นาข้าว

ชนิด/พันธุ์ข้าว	ช่วงเวลาเพาะปลูก	PARi (MJ m ⁻²)	RUE (g MJ ⁻¹)	แหล่งข้อมูลที่มา
ข้าวเหนียว	ฤดูแล้ง (พ.ค.-ก.ย.)	6.05	2.77 - 3.20	รังสรรค์ (2538)
	ฤดูฝน (ต.ค.-มี.ค.)	6.08		
ข้าวสุพรรณบุรี 90	ฤดูแล้ง (พ.ค.-ก.ย.)	6.05	2.13 - 2.67	
	ฤดูฝน (พ.ค.-ก.ย.)	6.08		
ข้าวข. 1	เริ่มเพาะปลูก (ส.ค.)	11.71	0.58 - 0.66	ผลจากการศึกษา ครั้งนี้
	กำลังเจริญเติบโต (ต.ค.)	12.78		
	ก่อนการเก็บเกี่ยว (พ.ย.)	11.87		

ดังนั้นประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ในต้นข้าวในการศึกษานี้
เปรียบเทียบกับการศึกษาของรังสรรค์ มีค่าการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ในต้นข้าวมากกว่า เนื่องจาก
พันธุ์ข้าวคนละชนิด ลักษณะการปลูก และสภาพภูมิอากาศในแต่ละจังหวัดแตกต่างกัน ทำให้
ประสิทธิภาพ และปริมาณการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ในต้นข้าวมีค่าแตกต่างกัน

5.2 ประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) ของไร่มันสำปะหลัง

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพตลอดช่วงการเจริญเติบโต
กับปริมาณสะสมรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) มีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง มีค่า R²
ของมวลชีวภาพรวมมีค่าเท่ากับ 0.89 ส่วนมวลชีวภาพส่วนเหนือดินมีค่า R² เท่ากับ 0.84 ความลาด
ชันของรีเกรสชันเส้นตรงของมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน มีค่าเท่ากับ 1.09 และมวลชีวภาพรวม มีค่า
เท่ากับ 4.42 ซึ่งความลาดชันของรีเกรสชันเส้นตรงแสดงถึง RUE ในต้นมันสำปะหลัง ดังนั้น RUE
ของไร่มันสำปะหลังมีค่าอยู่ระหว่าง 1.09 – 4.42 g MJ⁻¹

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Oka, M. *et al.* (1987) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
รังสีดวงอาทิตย์ของมันสำปะหลังในปี 1983 - 1986 โดยศึกษาที่จังหวัดระยอง พบว่า ค่า
ประสิทธิภาพการใช้พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ของมันสำปะหลังอยู่ในช่วง 0.44 – 0.79% ขึ้นอยู่กับ

ฤดูการเพาะปลูก โดยในช่วงฤดูแล้ง (เดือน มกราคม ถึง เดือน กุมภาพันธ์) และช่วงเริ่มฤดูฝน (เดือน มิถุนายน) มีค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ของมันสำปะหลังสูง

5.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE)

5.3.1 เปรียบเทียบ RUE ของพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง

จากการศึกษา พบว่า ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนมีความสัมพันธ์กับดัชนีพื้นที่ผิวใบของต้นข้าวสูงกว่าต้นมันสำปะหลัง เนื่องจากสรีรวิทยาของต้นมันสำปะหลังเมื่อถึงฤดูแล้งมีการหลุดร่วงของใบเป็นจำนวนมาก เพื่อลดการคายน้ำของพืช รวมทั้งลักษณะทรงพุ่มของพืชทั้งสองชนิดแตกต่างกัน ทำให้ค่า R^2 มีค่าแตกต่างกัน การสร้างมวลชีวภาพรวมกับการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนของมันสำปะหลังมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง มีค่า R^2 เท่ากับ 0.89 ส่วนต้นข้าว ความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างมวลชีวภาพรวมตลอดช่วงการเจริญเติบโตกับปริมาณสะสมรังสีแสงสังเคราะห์ที่ข้าวดูดกลืนมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรงในเชิงบวก ค่า R^2 เท่ากับ 0.97 ประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ คือ ไร่มันสำปะหลังมีประสิทธิภาพการใช้รังสีเท่ากับ 1.09 - 4.42 $g MJ^{-1}$ และพื้นที่นาข้าวมีประสิทธิภาพการใช้รังสีเท่ากับ 0.58 - 0.66 $g MJ^{-1}$ (ตารางที่ 17)

ตารางที่ 17 เปรียบเทียบการใช้รังสี (RUE) ในพื้นที่นาข้าว และไร่มันสำปะหลัง

ชนิด/พันธุ์พืช	ช่วงเวลาเพาะปลูก	PARa ($MJ m^{-2}$)	RUE ($g MJ^{-1}$)
ข้าว (กข. 1)	เริ่มเพาะปลูก (ส.ค.)	1.72	0.58 – 0.66
	กำลังเจริญเติบโต (ต.ค.)	9.53	
	ก่อนการเก็บเกี่ยว (พ.ย.)	7.65	
มันสำปะหลัง (เกษตรศาสตร์ 50)	เริ่มเพาะปลูก (ก.ค. - ส.ค.)	7.56	1.09 – 4.42
	กำลังเจริญเติบโต (ก.ย. – พ.ย.)	10.99	
	ก่อนการเก็บเกี่ยว (ธ.ค. – ม.ค.)	7.40	

5.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) ของพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน

การศึกษาประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) ได้มีผู้ศึกษาเอาไว้หลายท่าน ซึ่งได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งเปรียบเทียบโดยใช้พืช 6 ชนิด คือ มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี ถั่ว และเมล็ดต้นไม้อำพวกกะหล่ำปลี (mustard) พบว่า ข้าวฟ่างมีค่า RUE เท่ากับ 4.92 g MJ^{-1} ซึ่งมีค่า RUE สูงสุด และมันสำปะหลังมีค่า RUE เท่ากับ $0.58 - 0.66 \text{ g MJ}^{-1}$ ซึ่งมีค่า RUE ต่ำที่สุด (ตารางที่ 18)

ตารางที่ 18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) ในพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน

ชนิดพืช	RUE (g MJ^{-1})	แหล่งข้อมูลที่มา
มันสำปะหลัง	1.09-4.42	ผลการศึกษานี้
ข้าว	0.58-0.66	
ข้าวฟ่าง	4.96	Curt, M.D. <i>et al.</i> (1998)
ข้าวสาลี	1.81	Connel, M.G.O. <i>et al.</i> (2004)
ถั่ว	1.52	
เมล็ด mustard	1.92	

นอกจากนี้ยังมีการศึกษา RUE ของ Kiniry, J.R. *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษา RUE ของถั่วลิสงในพื้นที่ทำการเพาะปลูก 3 แห่ง ในมลรัฐ เท็กซัส พบว่า ถั่วลิสงมีค่า RUE อยู่ในช่วง $0.18 - 2.00 \text{ g MJ}^{-1}$ โดยทำการเพาะปลูกที่เมือง Stephenville มีค่า RUE เท่ากับ 1.98 g MJ^{-1} , เมือง Gustine มีค่า RUE เท่ากับ 1.92 g MJ^{-1} และเมือง Seminole มีค่า RUE เท่ากับ 2.02 g MJ^{-1}

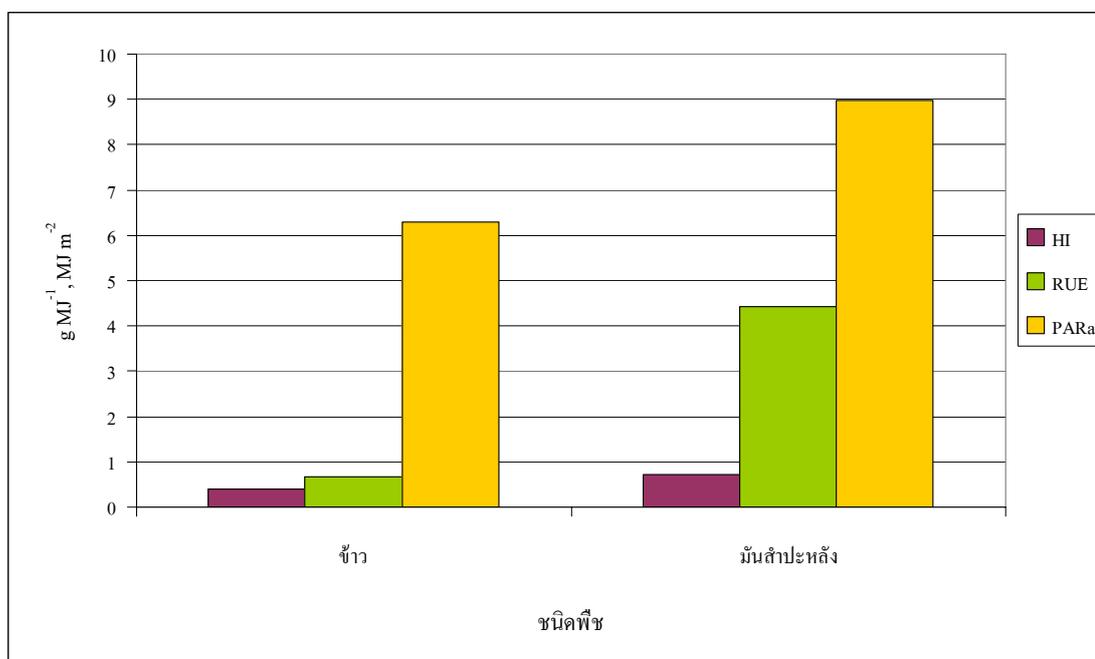
6. ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหาร (harvest index, HI)

จากการศึกษา ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหารของต้นข้าว และต้นมันสำปะหลัง ในช่วงระยะก่อนการเก็บเกี่ยว เนื่องจากเป็นระยะที่พืชมีการสร้างผลผลิต หรือมีผลผลิตเพื่อการเก็บเกี่ยว พบว่า ต้นข้าวในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน พฤศจิกายน) มีค่า HI เท่ากับ 0.40 โดยมีค่ามวล

ชีวภาพรวมส่วนได้ดิน เท่ากับ $629.33 \text{ kg rai}^{-1}$ และมวลชีวภาพรวมมีค่าเท่ากับ $789.33 \text{ kg rai}^{-1}$ ส่วนต้นมันสำปะหลังในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน ธันวาคมถึงมกราคม) มีค่า HI เท่ากับ 0.72 มวลชีวภาพรวมส่วนได้ดิน มีค่าเท่ากับ $8,331.20 \text{ kg rai}^{-1}$ และมวลชีวภาพรวม มีค่าเท่ากับ $11,642.24 \text{ kg rai}^{-1}$ จะเห็นได้ว่า ค่าประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหาร (HI) ของข้าว และมันสำปะหลัง เท่ากับ 0.40 และ 0.72 ตามลำดับ ซึ่ง HI ที่มีค่าสูงแสดงว่า พืชมีการสะสมอาหารไว้ในส่วนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้ ในการศึกษาครั้งนี้ คือ รวงข้าว และหัวมันสำปะหลัง (ตารางที่ 19 และ ภาพที่ 28)

ตารางที่ 19 ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหาร (HI) ประสิทธิภาพการใช้รังสี RUE) และ ปริมาณรังสีที่พืชดูดกลืน (PARa) ของข้าว และมันสำปะหลัง

ชนิดพืช	HI	RUE (g MJ^{-1})	PARa (MJ m^{-2})
ข้าว	0.40	0.66	6.30
มันสำปะหลัง	0.72	4.42	8.98



ภาพที่ 28 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหาร (HI) ประสิทธิภาพการใช้รังสี (RUE) และปริมาณรังสีที่พืชดูดกลืน (PARa) ของข้าว และมันสำปะหลัง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ในพื้นที่นาข้าว และไร่
มันสำปะหลัง โดยให้เป็นพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินแตกต่างกัน ซึ่งทำการศึกษาใน 3 ช่วง
ฤดูกาลเพาะปลูก คือ ระยะเวลาเริ่มเพาะปลูก ระยะเวลากำลังเจริญเติบโต และระยะก่อนการเก็บเกี่ยว ตั้งแต่
เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2548 ถึง มกราคม พ.ศ. 2549 เป็นระยะเวลา 1 ฤดูกาลเพาะปลูก สามารถ
สรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. สมดุลพลังงานพื้นที่นาข้าวในช่วงฤดูกาลเพาะปลูกการเก็บสะสมความร้อนในดินมีค่าน้อย แต่การเก็บสะสมความร้อนในน้ำมีค่ามาก ส่วนพื้นที่ไร่มันสำปะหลังฤดูฝนมีการเก็บสะสมความร้อนในดินน้อย ดังนั้นในช่วงฤดูกาลเพาะปลูกหรือฤดูฝนปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมาส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคายระเหยน้ำ เฝ้าผลาญอากาศ ส่วนที่เหลือที่ไปเก็บสะสมความร้อนในดินจึงมีปริมาณน้อย

1.1 พื้นที่นาข้าว พบว่า ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ทั้งหมด (R_s) มีค่าเท่ากับ $19.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ปริมาณรังสีสุทธิเฉลี่ย (net radiation; R_n) ตลอดปี $13.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ คิดเป็นร้อยละ 70.4 ของปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ โดยปริมาณรังสีสุทธิที่ใช้เพื่อการคายระเหยน้ำ (LE) การเฝ้าผลาญอากาศ (H) เก็บสะสมความร้อนไว้ในดิน (G_s) และเก็บสะสมความร้อนในน้ำ (G_w) คิดเป็นร้อยละ 72.3, 22.9, 3.1 และ 1.7 ตามลำดับ

1.2 ไร่มันสำปะหลัง พบว่า ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ทั้งหมด (R_s) มีค่าเท่ากับ $18.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ปริมาณรังสีสุทธิเฉลี่ย (net radiation; R_n) ตลอดปี $14.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ คิดเป็นร้อยละ 77.2 ของปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ โดยปริมาณรังสีสุทธิที่ใช้เพื่อการคายระเหยน้ำ (LE) การเฝ้าผลาญอากาศ (H) และเก็บสะสมความร้อนไว้ในดิน (G_s) คิดเป็นร้อยละ 68.7, 27.5 และ 3.8 ตามลำดับ

2. ประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ในพื้นที่นาข้าว และพื้นที่ไร่มันสำปะหลัง ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเดือนเมษายน และมีค่าต่ำสุดอยู่ในเดือน มกราคม ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ (PARa) ในแต่ละพื้นที่มีค่าแตกต่างกัน ดังนี้

2.1 พื้นที่นาข้าว ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ในเดือน เมษายนมีค่าสูงสุดเท่ากับ $21.9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และในเดือน มกราคมมีค่าต่ำสุดเฉลี่ยเท่ากับ $17.0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ซึ่งปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีมีค่าเท่ากับ $19.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ในช่วงเริ่มการเพาะปลูก (เดือน สิงหาคม) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.15 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) มีค่าเท่ากับ 1.72 MJ m^{-2} มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน มีค่าเท่ากับ $138.67 \text{ kg rai}^{-1}$ และมวลชีวภาพรวมของต้นข้าวมีค่าเท่ากับ $229.33 \text{ kg rai}^{-1}$ ช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน ตุลาคม) ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.75 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) มีค่าเท่ากับ 9.53 MJ m^{-2} มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน มีค่าเท่ากับ $368.00 \text{ kg rai}^{-1}$ และมวลชีวภาพรวมมีค่าเท่ากับ $408.00 \text{ kg rai}^{-1}$ และในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน พฤศจิกายน) ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.64 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) มีค่าเท่ากับ 7.65 MJ m^{-2} มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน มีค่าเท่ากับ $629.33 \text{ kg rai}^{-1}$ และมวลชีวภาพรวมมีค่าเท่ากับ $789.33 \text{ kg rai}^{-1}$

2.2 ไร่มันสำปะหลัง ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ในเดือน เมษายน และเดือน พฤษภาคม มีค่าสูงสุดเท่ากับ $22.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และในเดือน มกราคมมีค่าต่ำสุดเฉลี่ยเท่ากับ $15.4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ซึ่งปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีมีค่าเท่ากับ $18.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ในช่วงเริ่มการเพาะปลูก (เดือน กรกฎาคม ถึง สิงหาคม) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.54 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ (PARa) มีค่าเท่ากับ 7.56 MJ m^{-2} และมวลชีวภาพรวมมีค่าเท่ากับ $1,085.23 \text{ kg rai}^{-1}$ ช่วงกำลังเจริญเติบโต (เดือน กันยายน ถึง พฤศจิกายน) ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.78 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ (PARa) มีค่าเท่ากับ 10.99 MJ m^{-2} และมวลชีวภาพรวมมีค่าเท่ากับ $4,840.43 \text{ kg rai}^{-1}$ และในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว (เดือน ธันวาคม ถึง เดือน มกราคม) ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีแสงสังเคราะห์ (ϵ_i) มีค่าเท่ากับ 0.54 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) มีค่าเท่ากับ 7.40 MJ m^{-2} และมวลชีวภาพรวมมีค่าเท่ากับ $11,642.24 \text{ kg rai}^{-1}$

3. ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพ และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) กับปริมาณการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ ดังนี้

3.1 พื้นที่นาข้าว ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) และมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน กับปริมาณรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในข้าว พบว่า ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์กับ

มวลชีวภาพส่วนเหนือดิน และมวลชีวภาพรวมมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง มีค่า R^2 เท่ากับ 0.99 และ 0.97 ตามลำดับ ส่วนปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์กับดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) มีความสัมพันธ์กันแบบพหุนาม มีค่า R^2 เท่ากับ 1.00

3.2 ไร่มันสำปะหลัง ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) และมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน กับปริมาณรังสีสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน (PARa) ในมันสำปะหลัง พบว่า ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์กับมวลชีวภาพส่วนเหนือดิน และมวลชีวภาพรวมมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง มีค่า R^2 เท่ากับ 0.84 และ 0.89 ตามลำดับ ส่วนปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์กับดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) มีความสัมพันธ์กันแบบพหุนาม มีค่า R^2 เท่ากับ 0.59

4. ประสิทธิภาพการใช้รังสีของพืช (radiation use efficiency, RUE) พบว่า พื้นที่นาข้าวมีค่า RUE เท่ากับ 0.58 – 0.66 g MJ⁻¹ ส่วนไร่มันสำปะหลังมีค่า RUE เท่ากับ 1.09 – 4.42 g MJ⁻¹ ดังนั้นไร่สำปะหลังจึงมี RUE สูงกว่าพื้นที่นาข้าว

5. ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหาร (harvest index, HI) พบว่า ในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยวข้าว มีประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายสารอาหารเท่ากับ 0.40 ส่วนมันสำปะหลัง มีค่าเท่ากับ 0.72 ดังนั้นไร่มันสำปะหลังมีค่า HI สูงกว่าพื้นที่นาข้าว

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะที่ได้จากการศึกษา

1.1 จากการศึกษา พื้นที่นาข้าวปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธินอกฤดูปลูกมีค่าเท่ากับ 13.8 MJ m⁻² day⁻¹ ทำให้การคายระเหยน้ำ เฝ้าผลลาญอากาศ และการเก็บสะสมความร้อนในดินมีค่าสูงกว่าในช่วงฤดูปลูก เนื่องจากในช่วงฤดูปลูกเพาะปลูก ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธิ มีค่าเท่ากับ 12.0 MJ m⁻² day⁻¹ และมีพืชปกคลุม ส่วนไร่มันสำปะหลัง ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธิในฤดูฝน มีค่าเท่ากับ 14.6 MJ m⁻² day⁻¹ แต่ในฤดูแล้งมีค่าเท่ากับ 14.0 MJ m⁻² day⁻¹ ส่งผลให้ในช่วงฤดูฝนมีการระเหยน้ำสูง การเฝ้าผลลาญอากาศ และการเก็บสะสมความร้อนในดินลดลง เนื่องจาก ฤดูฝนปริมาณน้ำฝนมีมาก รังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องลงมาจึงถูกนำไปใช้ในการคายระเหยน้ำของพืช และ

อากาศ ดังนั้นการลดการสูญเสียในพื้นที่สามารถทำได้โดยการใช้ประโยชน์พื้นที่ในการเพาะปลูก ซึ่งพืชแต่ละชนิดจะช่วยลดการสูญเสียแตกต่างกัน นอกจากนี้ในพื้นที่ที่ไม่มีการใช้ประโยชน์ที่ดิน หรือพื้นที่โล่งควรมีการใช้ประโยชน์ที่ดินในด้านการเพาะปลูก หรือทำเป็นสาธารณประโยชน์ เช่น การทำสวนสาธารณะ เป็นต้น

1.2 ต้นข้าว และต้นมันสำปะหลังควรปลูกให้ขึ้นกระจายปกคลุมพื้นที่อย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ได้รับแสงมากที่สุด เนื่องจากในระยะแรกของการเจริญเติบโต พืชมีพื้นที่ใบน้อย (ต่อพื้นที่) พลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จึงสูญเสียไปกับการคายระเหยน้ำ และเผาผลาญอากาศ ทำให้มีผลกระทบต่อพืชในทางอ้อม เช่น อุณหภูมิบริเวณรอบต้นพืชสูงขึ้น ส่งผลให้การคายน้ำของพืชเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการส่งเสริมและแนะนำจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมส่งเสริมวิชาการเกษตร เป็นต้น เกี่ยวกับปัจจัยการเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช เช่น การใส่ปุ๋ยในโตรเจน การจัดระบบการปลูก การเพิ่มความหนาแน่น เป็นต้น เพื่อเร่งการสะสมพื้นที่ใบ ซึ่งมีผลให้เมื่อพืชมีพื้นที่ใบมากส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์เพิ่มขึ้น

1.3 ประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์มีความแตกต่างกันตามชนิดของพืช ลักษณะทรงพุ่มที่เกี่ยวกับการกระจายของรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งไร่มันสำปะหลังมีประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ (RUE) สูงกว่าพื้นที่นาข้าว (4.42 และ 0.66 g MJ^{-1} ตามลำดับ) และค่า HI ของมันสำปะหลังก็มีค่าสูงกว่าข้าว (0.72 และ 0.40 ตามลำดับ) เนื่องจากไร่มันสำปะหลังมีค่า LAI สูงกว่าพื้นที่นาข้าว ดังนั้นพื้นที่นาข้าวควรปลูกข้าวให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ใบ ทำให้ข้าวมีประสิทธิภาพการใช้รังสีเพิ่มขึ้น

1.4 จากการศึกษา พบว่า ในช่วงเพาะปลูก รังสีดวงอาทิตย์ถูกใช้ในการคายระเหยน้ำ และเผาผลาญอากาศมากกว่ากระบวนการอื่น แต่ช่วงที่ไม่มีมีการเพาะปลูกรังสีดวงอาทิตย์ถูกใช้ในการเผาผลาญอากาศมากกว่าการคายระเหยน้ำ จึงมีภาวะแห้งแล้ง ดังนั้นพื้นที่ที่มีการเพาะปลูกพืชมีการคายน้ำของพืช ทำให้มีปริมาณน้ำมากพอที่จะทำให้เกิดการคายระเหย จึงมีการเผาผลาญอากาศต่ำ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการจัดการลุ่มน้ำ และสิ่งแวดล้อม โดยการคัดเลือกชนิดพรรณพืช และปลูกพืชให้มีความหนาแน่น และเรือนยอดปกคลุมพื้นที่ให้เหมาะสม เพื่อช่วยลดการเผาผลาญอากาศ

1.5 รังสีดวงอาทิตย์ถูกใช้ในกระบวนการต่างๆ ทั้งทางด้านกายภาพ และชีวภาพ พลังงานที่ถูกใช้นี้มีอิทธิพลต่อการสูญเสียในระบบ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐาน

ในการวางแผน/แนวทางการใช้พลังงานรังสีดวงอาทิตย์ในพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน เพื่อให้มีการสูญเสียให้น้อยที่สุด เช่น การปลูกพืชมากขึ้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ใบพืช ทำให้มีการคายระเหย น้ำของพืชเพิ่มขึ้น จึงมีการเผาผลาญอากาศลดลง เป็นต้น ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการลุ่มน้ำ

2. ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป

2.1 การประเมินประสิทธิภาพการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน ควรมีการศึกษามากกว่า 1 ฤดูกาลหรือช่วงเวลาการเจริญเติบโตของพืช และเลือกตัวแทนการใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกันในพื้นที่ลุ่มน้ำ เพื่อเปรียบเทียบกับฤดูกาลหรือช่วงเวลาการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละปี

2.2 จากการศึกษาการใช้รังสีแสงสังเคราะห์ในพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน ควรมีการศึกษาปัจจัยด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องด้วย เช่น ปัจจัยเกี่ยวกับดิน ปัจจัยเกี่ยวกับลักษณะอากาศอื่น ๆ รูปแบบการเพาะปลูกพืช เป็นต้น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพล และความสำคัญต่อการใช้รังสีแสงสังเคราะห์

2.3 ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารอาหาร (Harvest Index) และธาตุอาหารในพืชชนิดต่างๆ เพื่อทราบประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารอาหารที่พืชได้รับไป ส่วนของพืชที่นำไปใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจ

2.4 ปริมาณรังสีแสงสังเคราะห์ที่พืชดูดกลืน เพื่อเปลี่ยนเป็นมวลชีวภาพในส่วนต่างๆ ของพืช ควรมีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องนำไปศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับพืชเศรษฐกิจชนิดอื่น ทำให้ทราบถึงการนำรังสีแสงสังเคราะห์ ไปใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งผลผลิตที่ได้จากพืชเศรษฐกิจในปริมาณ และคุณภาพที่สูง เนื่องจากในช่วงที่พืชกำลังเจริญเติบโตต้องการปัจจัยต่างๆ ในการเจริญเติบโตสูง

2.5 จากการศึกษา พบว่า ลักษณะหรือรูปแบบการเพาะปลูกช่วยลดการคายระเหยน้ำ ทำให้รักษาสมดุลพลังงานได้ดี ส่งผลให้ภูมิอากาศใกล้ผิวดินมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งควรมีการศึกษาในหลากหลายรูปแบบ และมีการพัฒนามาใช้ในพื้นที่การใช้ประโยชน์แบบแตกต่างกัน เช่น การวางแผนการใช้ที่ดินในการปลูกพืชแต่ละชนิด โดยเลือกชนิดพันธุ์พืชให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่ต่างๆ เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. 2542. แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียม สำหรับประเทศไทย. บริษัท จีรังซ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

เกษม จันทร์แก้ว, บุญปลูก นาประกอบ, ปรีชา กุรัตน, สามัคคี บุญชะวัฒน์ และพงษ์ศักดิ์ ลาภอุดม. 2517. ลักษณะอากาศใกล้ผิวดินของป่าดิบแล้งสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา. ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เกษม จันทร์แก้ว และณรงค์ มหรรณพ. 2526. ลักษณะอากาศบริเวณสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช, น.19. ใน ชูบ เข็มนาม, บรรณาธิการ. สรุปผลงานวิจัยสถานีสิ่งแวดล้อมสะแกราช. ม.ป.ท..

กฤษณพงศ์ กีรติกร, ไชยยศ จินดารัตนชลกิจ และพรประสิทธิ์ เขียวรัตน์. 2523. การวิเคราะห์ค่าการแผ่รังสีและข้อมูลอุณหภูมิมหาวิทยาลัย. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการครั้งที่ 2 เรื่อง พลังงานหมุนเวียนและการประยุกต์ 25 – 28 กุมภาพันธ์ 2523. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี, กรุงเทพฯ.

ชยันต์ บุญยรัช, สักวาฬ เฟิงพัด และวัฒน์พงษ์ รัชย์วิเชียร. 2536. ลักษณะทางสถิติของรังสีแสงอาทิตย์ของจังหวัดพิษณุโลก. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

ดร.ชณี เอมพันธุ์. 2531. หลักการใช้ที่ดินเบื้องต้น. ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นฤมล แก้วจำปา. 2546. การประเมินศักยภาพและโอกาสการเกิดฝน บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย โดยอาศัยค่าพลังงานแสงอาทิตย์สุทธิ และค่าดัชนีเสถียรอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพนธ์ ตั้งธรรม. 2525. ผลกระทบของวิวัฒนาการการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อลักษณะ และคุณภาพน้ำ
ในลุ่มน้ำแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่. คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

บุญเกียรติ แสงวัฒน์, จุฑาภรณ์ สุวรรณเพชร, โชคชัย รอดพร้อม, Bonn, F. และ P. Vineent. 2531.
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินบริเวณแหล่งต้นน้ำลำธาร จังหวัดเชียงใหม่. ใน
รายงานสัมมนาวิชาการเรื่อง ผลการศึกษาระยะแรกของโครงการแลนด์เซทภายใต้ความ
ช่วยเหลือ CIDA.

พงษ์ศักดิ์ สหุนาฟู. 2522. วิธีการวิเคราะห์ห้ลักษณะการเจริญเติบโตของพืช. ภาควิชาวนวัฒนวิทยา
คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พิมพ์พงศ์ หลุทัยพิพย์. 2547. การประเมินค่าการคายระเหยน้ำสูงสุด โดยใช้ข้อมูลการสำรวจ
ระยะไกลและข้อมูลอุณหภูมิมิเทียม บริเวณลุ่มน้ำมูล-ชี ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ
ประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2548. การจัดทำคู่มือมาตรฐานข้อมูลด้านภูมิอากาศและแสงอาทิตย์ สำหรับ
ใช้งานในงานด้านพลังงานทดแทน.

รัชชনীวรรณ ราชุละ. 2547. ความผันแปรของความชื้นในดิน บริเวณไร่มันสำปะหลัง อำเภอบรบือ
จังหวัดนครราชสีมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รังสรรค์ อากาศภะกุล. 2538 ก. ประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ของข้าวภายใต้แบบการทำ
นา และสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน. *สงขลานครินทร์* 17 (1): 23-33. อ้างถึง Monteith,
J.L. 1977. **Climate and efficiency of crop production in Britain.** Philos. Trans. R.
Soc. London, B. 281: 277-294.

รังสรรค์ อาภาศัพท์กุล. 2538 ก. ประสิทธิภาพการใช้รังสีดวงอาทิตย์ของข้าวภายใต้แบบการทำ
นา และสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน. *สงขลานครินทร์* 17 (1): 23-33. อ้างถึง Gosse, G.,
C. Varlet-Grancher, R. Bonhomme, M. Chartier, J.M. Allirand and G. Lemaire.
1986. **Production maximale de matiere seche et rayonnement solaire intercepte par
un couvert vegetal.** *Agronomie*, 6 : 47-56

_____. 2547. *อุตุนิยมวิทยาเบื้องต้น*. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วัชรนา แหวนวนงษ์. 2542. การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิวโลกในบริเวณ
ประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลดาวเทียม. *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท*. มหาวิทยาลัยศิลปากร.

วิชา นิยม. 2535. *อุทกวิทยาป่าไม้*. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ.

สถิตย์ วัชรกิตติ. 2521. *ระบบการแบ่งแยกประเภทการใช้ที่ดิน*. ภาควิชาการจัดการป่าไม้
คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เสริม จันทร์ฉาย. 2545. *คู่มือการวัดรังสีดวงอาทิตย์*. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย
ศิลปากร, นครปฐม.

สมบูรณ์ พรหมแสน. 2547. การพัฒนาแบบจำลองการคายระเหยน้ำโดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและค่า
การชักนำของปากใบพืชในพื้นที่ทำการเกษตรและสวนป่า. *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท*.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุธาสินี โพธิ์สุนทร. 2544. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการประเมินค่าการคาย
ระเหยน้ำสูงสุดแต่ละภูมิภาคโดยใช้รังสีดวงอาทิตย์. *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท*.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอ็จ สโรบล. 2535. *สรีรวิทยาของการผลิตพืชไร่*. ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตร มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เอิบ เขียวรัตน์รมย์. 2525. **หลักการใช้ที่ดิน**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Aoki, M. 2000. **Introduction to Micrometeorology**. Lecture Papers. July 2000. Kasetsart
University. Bangkok. (unpublished) 6p.

Anderson, M.C. 1971. Radiation and crop structure, pp. 422-423. In Z. Šesták, J. Čatský & P.G.
Jarvis, ed. **Plant Photosynthetic Production Manual of Methods**. Zuid-Nederlandsche
Drukkerij N.V., Netherlands.

Barry, R.G. and R.J. Chorley. 1971. **Atmosphere, Weather and Climate**. 2nd ed. Butler &
Tanner Ltd., London

Budyko, M.I. 1974. **Climate and life**. International geophysics series, vol. 18. Academic Press,
Inc., New York.

Connell, M.G.O., G.T.O.' Leary, D.M. Whitefield and D.J. Connor. 2004. Interception of
photosynthetically active radiation and radiation use efficiency of wheat, field pea and
mustard in a semi-arid environment. **Field Crops Research** 85 (2-3): 111-124.

Curt, M.D., J. Fernandez and M. Martinez. 1998. Productivity and radiation use efficiency of
sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv. Keller in central Spain. **Biomass and
Bioenergy** 14 (2): 169-178.

Exell, R.H.B. and K. Saricali. 1976. **The Availability of Solar Energy in Thailand**, Asian
Institute of Technology, Bangkok. 120 p.

Exell, R.H.B. 1977. **Calculation of longwave atmospheric radiation from air data for
Thailand**. Asian Institute of Technology, Bangkok.

- FAO. 1976. **A Frame Work for Land Evaluation**. FAO Soils Bulletin. No. 32. Rome, Italy.88p.
- Ferrester, F.H. 1957. **1001 questions answered about the weather**. Grosset Dunlap Publishers, New York 419 p.
- Jacovides, C.P., F.S. Timvios, G. Papaioannou, D.N. Asimakopoulos and C.M. Theofilou. 2004. Ratio of PAR to broadband solar radiation measured in Cyprus. **Agricultural and Forest Meteorology** 121: 135-140.
- Kiniry, J.R., C.E. Simpson, A.M. Schubert and J.D. Reed. 2005. Peanut leaf area index, light interception, radiation use efficiency, and harvest index at three sites in Texas. **Field Crops Research** 91 (2-3): 297-306.
- Kirk, J.T.O. 1994. **Light and photosynthesis in Aquatic ecosystems**. 2nd ed. Cambridge University Press, New York.
- Lambin, E.F. 1994. **Modelling Deforestation Processes: A Review**. Trees Tropical Ecosystem Environment Observation by Satellites Research Report No. 1 . European Commission Joint Research Center/European Space Agency, Brussels.
- Lee, R. 1926. **Forest Micrometeorology**. Columbia University Press, New York.
- Mahammad. I.K. 1976. **Atmospheric radiation and sky temperatures in Thailand**. Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Monteith, J.L. 1973. **Principles of Environmental Physics**. Edward Arrol Limited, London.
- Nieuwolt, S. 1977. **Tropical Climatology: An Introduction to the Climates of the Low Latitudes**. John Wiley & Sons, New York. 207 p.

- Oka, M., J. Limsila and S. Sinthuprama. 1987. Efficiency of Solar Energy Utilization, pp. 119-130. *In* M. Oka, J. Limsila, S. Sarakarn, S. Sinthuprama and C. Tiraporn, comps. **Eco-Physiological studies on cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in Thailand.** Department of Agriculture Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand.
- Papaioannou, G., G. Nikolidakis, D. Asimakopoulos and D. Retalis. 1996. Photosynthetically active radiation in Athens. **Agricultural and Forest Meteorology** 81: 287-298.
- Seller, W.D. 1965. **Physical Climatology.** University of Chicago Press, Chicago.
- Tsubo, M. and S. Walker. 2002. A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy. **Agricultural and Forest Meteorology** 110 (3): 203-215.
- Udo, S.O. and T.O. Aro. 1999. Global PAR related to global solar radiation for central Nigeria. **Agricultural and Forest Meteorology** 97: 21-31.
- Varlet-Grancher, C., Gosse, G., Chartier, M., Sinoquet, H., Bonhomme, R. and Allirand, J.M., 1989. **Mise au point: rayonnement solaire absorbe ou intercepte par un couvert vegetal.** *Agronomie*; 9:419-439 p.
- Wijk, W.R. Van. and D.W. Scholte Ubing. 1966. Radiation. Pp. 62-97. *In* Wijk, W.R. Van., eds. **Physics of Plant Environment.** North-Holland Publishing co., Amsterdam.