



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

สัญญาเลขที่ RDG5750105

โครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ
เพื่อใช้เป็นข้อมูลทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์
ของสวนยางพารา: ระยะที่ 3”

โดย รศ.ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์ และคณะ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
กรมวิชาการเกษตร

เมษายน 2559

สัญญาเลขที่ RDG5750105

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ
เพื่อใช้เป็นข้อมูลทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์
ของสวนยางพารา: ระยะที่ 3”

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. รศ.ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. ดร. ดวงรัตน์ ศตคุณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
3. ดร. เจษฎา ภัทรเลอพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
4. ดร. เชษฐ สาทริกิจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
5. ดร. ชมภูษ ฉายาเวช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
6. ผศ.ดร. ทิพา พาโคกหม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
7. น.ส. อรุมา ด้วงาม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
8. น.ส. ดอกแก้ว จุระ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
9. ผศ.ดร. หาญพล พึ่งรัมย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
10. ดร. ไพรัช อสุภรัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
11. ดร. กฤษดา สังข์สิงห์	กรมวิชาการเกษตร
12. ดร. พิสมัย จันทูมา	กรมวิชาการเกษตร

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช., สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

แผนงานวิจัย “การศึกษาสมมูลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา: ระยะที่ 3” มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดสมมูลการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างสวนยางพาราและบรรยากาศด้วยเทคนิค Eddy Covariance ร่วมกับการศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอนจากการเขตรกรรมและการเก็บเกี่ยว เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ และการตรวจวัดสมมูลการแลกเปลี่ยนน้ำระหว่างสวนยางพาราและบรรยากาศ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ในส่วนของ green water นอกจากนี้ ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสภาพแวดล้อมต่อสมมูลคาร์บอนและน้ำของระบบนิเวศยางพารา การดำเนินงานวิจัยนี้ ศึกษาในพื้นที่ปลูกยางพารา 2 แห่งทางภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ (1) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา พื้นที่ประมาณ 50 ไร่ เป็นยางอายุมาก เปิดกรีดมาแล้วมากกว่า 10 ปี และ (2) แปลงเกษตรกรจังหวัดบึงกาฬ พื้นที่ประมาณ 100 ไร่ เป็นยางอายุน้อย และยังไม่เปิดกรีด พื้นที่ศึกษาทั้ง 2 แห่งปลูกยางพาราพันธุ์เดียวกัน คือ พันธุ์ RRIM600

การศึกษาสมมูลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

ยางธรรมชาติ คือ green rubber เนื่องจากต้นยางพาราจะตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาไว้ในต้นและราก และเพิ่มคาร์บอนสะสมในดินจากการร่วงของใบ กิ่ง ต้น ผล และการสลายของราก จึงช่วยลดคาร์บอนในอากาศ ที่เป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลวิจัยเชิงปริมาณที่ชัดเจนในระดับสากล ดังนั้น นักวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาวิจัยปริมาณคาร์บอนที่สวนยางพาราตรึงได้ และคาร์บอนที่สูญเสียไปจากการเขตรกรรม

การศึกษาสมมูลคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยางพารา

การศึกษาสมมูลคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยางพารา เป็นการวัดสมมูลคาร์บอนด้วยเทคนิค Eddy Covariance ข้อมูลสมมูลคาร์บอนในปี 2556-2557 นั้น แสดงให้เห็นว่า ระบบนิเวศยางพารามีสถานะเป็น Carbon sink หรือ แหล่งกักเก็บคาร์บอน เนื่องจากต้นยางพารานั้นดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นชีวมวลสะสมอยู่ในระบบนิเวศยางพารานั้นเอง

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารานั้น จะพิจารณาใน 2 ลักษณะ คือ คาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อพื้นที่ และคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลผลิตยางพารา 1 กิโลกรัม คาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อพื้นที่ ของพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 Sites นั้น พบว่า พื้นที่ปลูกยาง Site ที่ 1 ซึ่งเป็นยางอายุมากและเปิดกรีดแล้ว ในปี 2556 และ 2557 มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์เท่ากับ $-4,485.16$ และ $-6,496.24 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ ตามลำดับ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมี่ค่าเท่ากับ $28.5 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ ต่อปี สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ซึ่งเป็นยางอายุน้อย และยังไม่เปิดกรีด มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์เท่ากับ $-1,842.39$ และ $-4,078.09 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ ตามลำดับ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมี่ค่าเท่ากับ $198.5 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ ต่อปี

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสด 1 กิโลกรัม ในส่วนของพื้นที่ปลูกยางพารา คำนวณได้เฉพาะพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 เนื่องจากให้ผลผลิตแล้ว ซึ่งในปี 2556 และ 2557 นั้น มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์เท่ากับ -23.31 และ $-21.46 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ผลผลิต ตามลำดับ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเขตร

กรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา มีค่าเท่ากับ 0.30 kg CO₂ . kg⁻¹ ผลผลิต

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยาง ไม่ว่าจะเป็นค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อพื้นที่ปลูกยาง หรือคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง มีค่าเป็นลบ (-) แสดงว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกเก็บเข้าสู่ระบบนิเวศยางพารา ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมีค่าเป็นบวก (+) ซึ่งแสดงว่ามีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ แต่ปริมาณที่ถูกปล่อยออกมานั้นน้อยกว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดกลืนโดยระบบนิเวศยางพารามากกว่าร้อยละห้าสำหรับยางอายุมาก แสดงให้เห็นว่า หากสามารถนำค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ในส่วนของการตั้งต้นยางมาผนวกในกระบวนการคิดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางพารา จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของยางธรรมชาติซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเหมาะสมกับการดำเนินธุรกิจที่เรียกว่า “Greening Economy” หรือ “ยุคเศรษฐกิจสีเขียว” ซึ่งเป็นการดำเนินธุรกิจที่ต้องใส่ใจถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของการเกษตรกรรมของพื้นที่ปลูกยางทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

การศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรมเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ปลูกยางในพื้นที่ปลูกยาง 2 จังหวัด คือ จังหวัดบึงกาฬ และอุดรธานี ด้วยหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม อาทิเช่น ขนาดของสวนยางพารา ลักษณะการถือครองที่ดิน และลักษณะทางสังคม เป็นต้น ทั้งนี้ ในการคำนวณ LCA นี้ ยังไม่ได้นำปริมาณคาร์บอนที่สวนยางเก็บไว้มารวมคำนวณด้วยแต่อย่างใด

จากการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสด 1 กิโลกรัม ในพื้นที่สวนยางพาราทั้งสวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ ของพื้นที่ศึกษา พบว่า ปริมาณการใช้ปุ๋ยต่อหน่วยเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ โดยขนาดของสวนยางพาราไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราแต่อย่างใด

ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลสมดุลคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา

	Site ที่ 1		Site ที่ 2	
ปี	2556	2557	2556	2557
อายุต้นยาง (ปี)	19	20	4	5
NEE (Net Ecosystem Exchange, kg CO ₂ ra ⁻¹)	-4,485.16	-6,496.24	-1,842.69	-4,078.09
สถานะของระบบนิเวศยางพารา ^{1/}	Carbon sink	Carbon sink	Carbon sink	Carbon sink
ผลผลิตน้ำยางต่อปี (kg.ra ⁻¹)	192.40	302.70	-	-
คาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อไร่ (kg CO ₂ .ra ⁻¹)				
พื้นที่ปลูกยาง	-4,485.16	-6,496.24	-1,842.69	-4,078.09
การเกษตรกรรม ^{1/}	28.50	28.50	198.49	198.49
คาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง 1 kg				
พื้นที่ปลูกยาง (kg CO ₂) ^{2/}	-23.31	-21.46	-	-
การเกษตรกรรม ^{1/}	0.30		0.46	

^{1/} คาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ดำเนินการศึกษาในปี 2555
^{2/} พื้นที่ปลูกยาง Site ที่ 2 เป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง

อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคาร์บอนฟุตพริ้นต์ คือ ปริมาณผลผลิตน้ำยางพาราสดต่อไร่ หากเกษตรกรสามารถเพิ่มผลผลิตได้มากขึ้น โดยที่ยังใช้ปุ๋ยในปริมาณเท่าเดิม หรือใช้ปุ๋ยลดลงแต่ยังคงผลผลิตจะสามารถลดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ได้ เนื่องจากในปัจจุบันเกษตรกรส่วนใหญ่ใช้ปุ๋ยมากเกินไปจนความจำเป็นและมากกว่าปริมาณธาตุอาหารที่พืชต้องการตามข้อแนะนำของสถาบันวิจัยยาง

การศึกษาสมมูลน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพืชเศรษฐกิจอื่นๆ หลายชนิด โดยมีความมากกว่าพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นๆ 2-100 เท่า ถึงแม้ว่าการประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราที่ปลูกในประเทศไทยจะมีค่าน้อยที่สุดในโลกก็ตาม และมีความน้อยกว่าค่า Global average ซึ่งมีค่าเท่ากับ $12,964 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$ (Mekonnen and Hoekstra, 2010) อนึ่งแม้ว่าในงานวิจัยของ UNESCO-IHE (2010) ได้ประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราไทยลงรายละเอียดแยกเป็นรายจังหวัดมากกว่า 70 จังหวัดก็ตาม แต่การประเมินเหล่านั้นยังไม่มี validation ซึ่งมีข้อจำกัดใช้ได้เฉพาะในเชิงเปรียบเทียบข้อมูลวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราที่ปลูกในพื้นที่ต่างๆ ระหว่างประเทศ หรือเชิงเปรียบเทียบกับพืชอื่นๆ ในขณะนี้ประเทศไทย ยังไม่มีค่าสมบูรณ์ (absolute value) ของวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพารา และยังไม่ข้อมูลจากการตรวจวัดจริง สำหรับใช้ในการ validate แบบจำลอง นักวิจัยจึงเสนอให้ตรวจวัดวอเตอร์ฟุตพริ้นต์โดยตรงจากอัตราการคายระเหยของน้ำจากสวนยางพาราสู่บรรยากาศที่ตรวจวัดโดยตรงด้วยเทคนิค Eddy covariance หารด้วยข้อมูลผลผลิตที่ได้ ตามวิธีการที่รายงานโดย Bhardwaj *et al.* (2010)

ตารางที่ 2 สรุปข้อมูลสมมูลน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา

	Site ที่ 1		Site ที่ 2	
ปี	2556	2557	2556	2557
อายุต้นยาง (ปี)	19	20	4	5
ETR (Evapotranspiration, mm)	932.83	1,059.80	653.46	848.22
ETo (Reference crop evapotranspiration, mm)	2,220.93	2,335.96	2,189.11	2,381.11
CWU (Crop water use, $\text{m}^3.\text{rai}^{-1}$)	1,492.53	1,695.68	1,045.53	1,357.16
E (Transpiration, mm)	570.61	781.38	250.20	316.18
WUE (Water use efficiency, $\text{kg C}.\text{m}^{-3}\text{H}_2\text{O}$)	0.82	1.04	0.48	0.82
ผลผลิตน้ำยางต่อปี ($\text{kg}.\text{rai}^{-1}$) ^{1/}	192.40	302.70	-	-
วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพื้นที่ปลูกยางพารา ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$)				
Green water	7.76	5.60	-	-
วอเตอร์ฟุตพริ้นท์จากการเขตกรรม ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$) ^{2/}				
Green water	0		0	
Blue water	0		0	
Gray water	2.23		2.17	

^{1/} พื้นที่ปลูกยาง Site ที่ 2 เป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลผลิตน้ำยาง

^{2/} วอเตอร์ฟุตพริ้นต์จากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งดำเนินการศึกษาในปี 2555

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา โดยมุ่งศึกษาความต้องการใช้น้ำของระบบนิเวศยางพารา เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา ส่วนของ Green water ข้อมูลสมมูลน้ำ อันได้แก่ ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และการใช้น้ำของยางพารา (CWU) ซึ่งวัดได้โดยใช้

เทคนิค Eddy Covariance ในปี 2556-2557 ทำให้ทราบว่า การคายระเหยน้ำของพื้นที่ปลูกยางพาราที่วัดได้นั้น มีค่าน้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) ซึ่งประเมินตามวิธีของ Penman-Monteith ความแตกต่างดังกล่าวมากกว่าร้อยละ 50 อีกทั้งค่า K_c ที่วัดได้นั้นยังมีค่าต่ำกว่าค่า K_c ที่ใช้ในการคำนวณตามวิธีการของ FAO (Allen et al., 2006) ซึ่งมีค่า K_c ในช่วง Initial Mid season และ End season เท่ากับ 0.95 1 และ 1 ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าความต้องการใช้น้ำของยางพาราที่วัดได้จริงนั้น น้อยกว่าความต้องการใช้น้ำที่เคยประเมินด้วยแบบจำลอง CropWat เป็นอย่างมาก โดยค่าการใช้น้ำของยางพาราที่ใช้ในการคำนวณหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยาง ในปี 2556 และ 2557 พบว่า พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (Green water) เท่ากับ 7.76 และ 5.60 m³ H₂O.kg ผลผลิต ตามลำดับ ค่าที่ปรากฏนั้น มีค่าน้อยกว่าที่รายงานโดย Mekonnen และ Hoekstra (2011) ซึ่งประเมินค่าโดยใช้แบบจำลอง CROPWAT 8.0 ที่รายงานการประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (Green water) เท่ากับ 12,964 m³.ton⁻¹ หรือ 12.96 m³.kg ผลผลิต สำหรับ Site ที่ 2 นั้นเป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด จึงยังไม่สามารถคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ได้ แต่ได้คำนวณค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยาง (Water use efficiency หรือ WUE, kg C.m⁻³ H₂O) เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสองพื้นที่ศึกษา พบว่า พื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 มีค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงกว่า Site ที่ 2 ส่วนค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเซดกรรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสีย สำหรับพื้นที่ Sites ที่ 1 และ 2 นั้น ปรากฏเฉพาะ Gray water ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.23 และ 2.17 m³ H₂O.kg ผลผลิต ตามลำดับ ซึ่งค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ดังกล่าวเป็นค่าที่ประเมินด้วยวิธีทาง LCA

อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำ

อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอน

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (Net Ecosystem Exchange, NEE) กับจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ ปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, R_n) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, R_g) ความเข้มแสง (Photosynthetically Active Radiation, PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air temperature, T_{air}) ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity, RH) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี และส่วนที่ 2 แบ่งเป็น 4 กลุ่มตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยางในรอบ 1 ปี ได้แก่ ระยะที่ 1 ไม่มีใบ ระยะที่ 2 แตกกิ่งใหม่ ระยะที่ 3 ใบเจริญเติบโตเต็มที่ และระยะที่ 4 ผลัดใบ

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบปี และการวิเคราะห์แยกตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยาง โดยภาพรวมแล้ว พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า PAR และ RH โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า PAR มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า R_n, T_{air} และ VPD ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า VPD มากที่สุด

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบปี และการวิเคราะห์แยกตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยาง ส่วนใหญ่ พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า PAR และ RH โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า RH มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า R_n, T_{air} และ VPD ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า VPD มากที่สุด

อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมมูลน้ำ

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างการคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, ETR) การใช้น้ำของพืช (Crop Water Use, CWU) และสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient, Kc) กับจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา ดังกล่าวข้างต้น การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบ่งเป็น 2 ส่วน เช่นเดียวกับการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของสมมูลคาร์บอน ส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบปี และส่วนที่ 2 แบ่งเป็น 4 กลุ่มตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยางในรอบปี

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบปี และการวิเคราะห์แยกตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยาง ส่วนใหญ่ พบว่า ค่า ETR และ CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD และ T_{air} โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , และ PAR ค่า ETR และ CWU มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า PAR มากที่สุด และค่า ETR และ CWU ไม่ปรากฏสหสัมพันธ์กับค่า RH นอกจากนี้ยังพบว่าในระยะที่ต้นยางไม่มีใบนั้น สหสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ETR และ Kc ค่อนข้างแตกต่างไปจากระยะการเจริญเติบโตอื่นๆ ส่วนค่า Kc นั้น พบว่ามีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD และ T_{air} โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า PAR และ RH ค่า Kc มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า RH มากที่สุด

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบปี และการวิเคราะห์แยกตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยาง โดยภาพรวมแล้ว พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า RH ยกเว้น ระยะที่ต้นไม่มีใบ และระยะที่ต้นยางสร้างใบใหม่ และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , และ VPD ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า R_n มากที่สุด ยกเว้นระยะที่ใบยางมีการขยายขนาดเต็มที่ และค่า ETR ไม่ปรากฏสหสัมพันธ์กับค่า T_{air} ส่วนค่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD และ T_{air} โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR และ RH ค่า CWU มีความสัมพันธ์ และสำหรับค่า Kc นั้น พบว่า มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_n , R_g , PAR, T_{air} และ VPD โดยความสัมพันธ์ที่ปรากฏนั้นมาก-น้อยต่างกันไปตามระยะในการเจริญเติบโตของต้นยาง ค่า Kc มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า RH ค่า Kc มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า RH มากที่สุด

ข้อเสนอแนะ การใช้ประโยชน์จากข้อมูล

1. คาร์บอนฟุตพริ้นต์:

ข้อมูลจากการศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอน จากการเกษตรกรรมและการเก็บเกี่ยว สามารถนำไปใช้คำนวณประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ได้

ทั้งนี้ ควรรายงานเพิ่มเติมข้อมูลสมมูลคาร์บอนที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance จากโครงการนี้ ซึ่งแสดงถึงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากที่ยางพาราธรรมชาติตรึงจากบรรยากาศและเก็บไว้ จะบ่งชี้ชัดว่า ยางพาราธรรมชาติ เป็น Green rubber ซึ่งจะช่วยเป็นประเด็นที่ประเทศไทยสามารถใช้เป็นข้อได้เปรียบในการแข่งขันกับยางสังเคราะห์ได้

2. วอเตอร์ฟุตพริ้นต์:

ข้อมูลจากการศึกษาองค์ประกอบของน้ำ จากการเขตกรรมและการเก็บเกี่ยว สามารถนำไปใช้คำนวณประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ แบบ Grey water footprint ได้

ในขณะที่ ข้อมูลสมมูลน้ำที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance จากโครงการนี้ สามารถนำไปใช้เป็นค่าประเมิน Green water footprint ได้

3. การใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน เพื่อ Calibration และ Validation:

ข้อมูลต่างๆ จากโครงการนี้ เช่น ค่าสมบูรณ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นในอากาศ และสมมูลคาร์บอนและน้ำ ที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance จากโครงการนี้ เป็นข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากการตรวจวัดจริง (ไม่ใช่จาก Simulation model) ที่สามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อการเทียบ Calibration และ Validation สำหรับการศึกษาวิจัยอื่น ๆ เช่น งานทางด้าน Remote sensing

บทคัดย่อ

แผนงานวิจัยการศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา: ระยะที่ 3 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดสมดุลคาร์บอนและน้ำด้วยเทคนิค Eddy Covariance เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของระบบนิเวศยางพารา และเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำของระบบนิเวศยางพารา การวัดสมดุลคาร์บอนและน้ำของระบบนิเวศยางพารานั้น ดำเนินการศึกษาในพื้นที่ปลูกยางพารา 2 แห่ง ได้แก่ (1) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา พื้นที่ประมาณ 50 ไร่ ต้นยางมีอายุ 20 ปี (ในปี 2557) และเปิดกรีดมาแล้ว 11 ปี และ (2) แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ พื้นที่ประมาณ 100 ไร่ ต้นยางมีอายุ 5 ปี (ในปี 2557) และยังไม่เปิดกรีด พื้นที่ศึกษาทั้ง 2 แห่งปลูกยางพาราพันธุ์เดียวกัน คือ พันธุ์ RRIM600

โครงการที่ 1 เป็นการศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยาง โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การศึกษาสมดุลคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพารา ด้วยเทคนิค Eddy Covariance เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา และ (2) การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม ด้วยวิธี LCA ของพื้นที่ปลูกยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งดำเนินการเก็บข้อมูลในพื้นที่จังหวัดบึงกาฬ และอุดรธานี นอกจากการวัดสมดุลคาร์บอนแล้ว ในพื้นที่ศึกษายังมีการวัดอัตราการหายใจของดิน และข้อมูลประกอบอื่นๆ ได้แก่ เส้นรอบวงโคนต้นยาง และชีวมวลของยางพาราที่ร่วงหล่นสู่พื้นของแปลงยางพารา เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการศึกษาสมดุลคาร์บอนในระบบนิเวศยางพารา ข้อมูลสมดุลคาร์บอนในปี 2556-2557 นั้น แสดงให้เห็นว่า ระบบนิเวศยางพารามีสถานะเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอน คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา คำนวณออกมาใน 2 ลักษณะ คือ คาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อพื้นที่ และคาร์บอนฟุตพริ้นต์ผลผลิตยางพารา ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อพื้นที่ของพื้นที่ปลูกยางในปี 2556 และ 2557 นั้น พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีค่าเท่ากับ $-4,485.16$ และ $-6,496.24 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ ตามลำดับ ขณะที่พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 มีค่าเท่ากับ $-1,842.39$ และ $-4,078.09 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียของพื้นที่ศึกษาในปี 2556 และ 2557 นั้นมีค่าเท่ากัน คือมีค่าเท่ากับ 28.5 และ $198.5 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ สำหรับ Site ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลผลิตถ่านน้ำยาง 1 kg นั้น ในส่วนของพื้นที่ปลูกยางพารา คำนวณได้เฉพาะพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 เนื่องจากยางพาราในพื้นที่ Site ที่ 2 ยังไม่เปิดกรีด ในปี 2556 และ 2557 คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางมีค่าเท่ากับ -23.31 และ $-21.46 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ผลผลิต ตามลำดับ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา มีค่าเท่ากับ $0.30 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ผลผลิต การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียของพื้นที่สวนยางพาราในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่า ปริมาณการใช้ปุ๋ยต่อหน่วย เป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ปัจจัยรองมา ได้แก่ ปริมาณผลผลิตน้ำยางพาราสดต่อไร่

โครงการที่ 2 การศึกษาสมดุลน้ำของสวนยางพารา เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา ในส่วนของ Green water จากการทดลอง พบว่า การคายระเหยน้ำของพื้นที่ปลูกยางพาราที่วัดได้นั้น มีค่าน้อยกว่าค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) ซึ่งประเมินตามวิธีของ Penman-Monteith ความแตกต่างดังกล่าวนี้มากกว่า 50% อีกทั้งค่า K_c ที่วัดได้นั้นยังมีค่าต่ำกว่าค่า K_c ที่ใช้ในการคำนวณตามวิธีการของ FAO ทำให้ทราบว่าการต้องการใช้น้ำของยางพาราที่วัดได้จริงนั้น น้อยกว่าความต้องการใช้น้ำที่ประเมินด้วยแบบจำลอง CropWat เป็นอย่างมาก ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยาง

(Green water) ในปี 2556 และ 2557 พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา มีค่าเท่ากับ 7.76 และ 5.60 $\text{m}^3 \text{H}_2\text{O.kg}$ ผลผลิต สำหรับ Site ที่ 2 นั้นเป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด จึงยังไม่สามารถคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ได้ แต่ได้คำนวณค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยาง (WUE, $\text{kg C.m}^{-3} \text{H}_2\text{O}$) เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสองพื้นที่ศึกษา พบว่า พื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 มีค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยางสูงกว่า Site ที่ 2 ส่วนค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมีค่าสำหรับพื้นที่ Sites ที่ 1 และ นั้น ปรากฏเฉพาะ Gray water ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.23 และ 2.17 $\text{m}^3 \text{H}_2\text{O.kg}$ ผลผลิต ตามลำดับ

การศึกษาอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอน โดยวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) กับจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ ปริมาณรังสีสุทธิ (R_n) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (R_g) ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (T_{air}) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (VPD) ผลการวิเคราะห์ของทั้ง 2 Site พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า PAR และ RH โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า PAR มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , T_{air} และ VPD ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า VPD มากที่สุด

การศึกษาอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนน้ำ โดยวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการคายระเหยของน้ำ (ETR) การใช้น้ำของพืช (CWU) และสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) กับจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา ดังกล่าวข้างต้น ผลการวิเคราะห์ของ Site ที่ 1 พบว่า ค่า ETR และ CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD และ T_{air} โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g และ PAR ค่า ETR และ CWU มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า PAR มากที่สุด และค่า ETR และ CWU ไม่ปรากฏสหสัมพันธ์กับค่า RH ส่วนค่า Kc นั้น พบว่า มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD และ T_{air} โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า PAR และ RH ค่า Kc มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า RH มากที่สุด การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ ของพื้นที่ Site ที่ 2 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า RH ยกเว้น ระยะที่ต้นไม่มีใบ และระยะที่ต้นยางสร้างใบใหม่ และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g และ VPD ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า R_n มากที่สุด และค่า ETR ไม่ปรากฏสหสัมพันธ์กับค่า T_{air} ส่วนค่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD และ T_{air} โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR และ RH และสำหรับค่า Kc นั้น พบว่า มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_n , R_g , PAR, T_{air} และ VPD และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า RH

คำสำคัญ: ยางพารา, เทคนิค Eddy covariance, สมดุลคาร์บอน, สมดุลน้ำ, คาร์บอนฟุตพริ้นต์ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์

Abstract

Research program, study on carbon and water balance to estimate carbon footprint and water footprint of rubber plantation: 3rd period, was propose to measure carbon and water flux with Eddy Covariance technique. Carbon and water flux data is the basic data that were used to assess carbon and water footprint of rubber ecosystem. In addition, these basic data were used to study effect of environmental factors on carbon and water balance of rubber ecosystem.

Carbon and water balance of rubber ecosystem (RRIM 600) were investigated at 2 rubber plantation sites. (1) Chachoengsao Rubber Research Center, Chachoengsao province. The plantation area was about 50 rais. The rubber trees were 20 years-old (in 2014) and had been tapped over 10 years. (2) Rubber plantation in Bueng Kan province. The plantation area was about 100 rais. Rubber trees were 5 years-old (in 2014) and never been tapped. Both observation sites were a monoclonal stand of rubber trees clone RRIM 600.

The 1st project, study on carbon balance to estimate carbon footprint of rubber plantation, was separated into 2 parts. (1) carbon balance measurement of rubber plantation by using Eddy Covariance technique and (2) carbon footprint from cultural practice and addition by using LCA method in north-east part of Thailand, Bueng Kan and Udon Thani province. Furthermore, soil respiration and other data e.g. girth and above ground biomass were observed and these dates were used to provide information of carbon balance in rubber ecosystem. Carbon balance of in 2013-2014 shown that rubber ecosystem was a carbon sink. Carbon footprint was estimated into 2 type, carbon footprint per area and carbon footprint per yield. Carbon footprint per area in 2013 and 2014, carbon footprint of Site 1 was -4,485.16 and -6,496.24 kg CO₂ rai⁻¹, respectively. While carbon footprint of Site 2 was -1,842.39 and -4,078.09 kg CO₂ rai⁻¹, respectively. For carbon footprint from cultural practice and addition in 2013-2014, in site 1 was 28.5 and site 2 was 198.5 kg CO₂ rai⁻¹. Carbon footprint per yield, only site 1 that was calculated due to young rubber plantation (site 2) has never been tapped. Carbon footprint of rubber plantation in 2013-2014 was -23.31 and -21.46 kg CO₂. Kg⁻¹yield, respectively. The carbon footprint caused by a cultural practice and addition was 0.30 kg CO₂. Kg⁻¹ yield. Limiting factors on carbon footprint from practice and addition in north-east area of Thailand. The result shown that the consumption of fertilizers per unit was main causes that affect the carbon footprint. the secondary factor was the yield per area.

The 2nd project, study on water balance to estimate water footprint of rubber plantation (green water). The result shown that the evapotranspiration (ETR) was lower than reference evapotranspiration rate (ET_o) which was estimated by using Penman-Monteith method. The different between 2 values was greater than 50%. In addition, K_c was lower than the K_c of rubber tree that has been reported by FAO. That mean actually water consumption of rubber plantation was clearly lower than the calculated value by CropWat model. Water

footprint of a rubber plantation (Green water) in 2013 and 2014, only site 1 that was calculated. Water footprint was 7.76 and 5.60 m³ H₂O kg⁻¹ yield, respectively.

The carbon footprint caused by a cultural practice and addition was 0.30 kg CO₂.Kg⁻¹ yield. Limiting factors on carbon footprint from practice and addition in north-east area of Thailand. The result shown that the consumption of fertilizers per unit was main causes that affect the carbon footprint. the secondary factor was the yield per area. Water used efficiency (WUE) of both rubber plantation was used to compare the two areas. The result showed that WUE of Site 1 was greater than Site 2. Water footprint caused by a cultural practice and addition appeared only gray water, it was 2.23 and 2.17 m₃ H₂O.kg⁻¹ yield for site 1 and 2, respectively.

Effect of environmental factors, net radiation (R_n), Global solar radiation (R_g), Photosynthetically active radiation (PAR), Air temperature (T_{air}), Humidity (RH) and Vapor pressure deficit (VPD), on Net ecosystem exchange (NEE) was determined by using correlation analysis. NEE was negative correlated with PAR and RH and positive correlated with R_n, R_g, T_{air} and VPD. NEE was strongest correlated with VPD.

Effect of environmental factors on parameter from water flux study, evapotranspiration (ETR), crop water use (CWU) and crop coefficient (Kc), was determined by using correlation analysis. NEE was significantly negative correlated with PAR and RH and positive correlated with R_n, R_g, T_{air} and VPD. The result between 2 sites was lightly different. In site 1, ETR and CWU was negative correlated with VPD and T_{air} and positive correlated with R_n, R_g and PAR. The both parameter were strongest correlated with VPD for negative correlation and PAR for positive correlation. The correlation between 2 parameters and RH did not appear. Kc was negative correlated with VPD and T_{air} and positive correlated with PAR and RH. This parameter was strongest correlated with VPD for negative correlation and RH for positive correlation. The correlation between 2 parameters and R_n and R_g did not appear. In site 2, ETR was negative correlated with RH (except no leaf and refoliation stage) and positive correlated with R_n, R_g and VPD. This parameter was strongest correlated with VPD for positive correlation. The correlation between ETR and T_{air} did not appear. CWU was negative correlated with VPD and T_{air} and positive correlated with R_n, R_g, PAR and RH. This parameter was strongest correlated with T_{air} for negative correlation. For Kc, the result shown that Kc was negative correlated with R_n, R_g, PAR, T_{air} and VPD and positive correlated with RH.

Keywords: Rubber, Eddy covariance technique, Carbon balance, Water balance, Carbon footprint and Water footprint

กิตติกรรมประกาศ

แผนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมดในเอกสารนี้ นักวิจัย ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ของสำนักประสานงานชุดโครงการยางพารา ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และประสานงานด้านต่างๆ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์วิจัยยางมะเขือเทศ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย อันได้แก่ แปลงทดลองยางพารา อ. สนาชัยเขต จ. มะเขือเทศ และขอขอบคุณ คุณวิศิษฐ์ จิรวิทย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย อันได้แก่ แปลงปลูกยางพารา อ. ปากคาด จังหวัดบึงกาฬ สำหรับใช้ในการศึกษาสมมูลคาร์บอนและน้ำ

ขอขอบคุณอาจารย์และนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยและหน่วยงานวิจัยภายใต้เครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการด้านยางพารา (HRPP) อันได้แก่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบัน CIRAD และสถาบันวิจัยยาง ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และห้องปฏิบัติการวิจัย การเสนอแนะและแนะนำทางวิชาการในด้านต่างๆ

และขอขอบคุณนักวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยของแผนงานวิจัยทุกท่านที่ช่วยให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ง
สารบัญภาพ	ช
ภาคผนวก	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 แผนงานของโครงการ	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 การศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากกิจกรรมของต้น ยางพาราและดิน	6
2.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	6
2.2 การดำเนินงานวิจัย	6
2.2.1 ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covari- ance ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และชุดอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ ในการเก็บข้อมูลวิจัย	9
2.2.2 การตรวจวัดและบันทึกข้อมูลจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยาง	9
2.2.3 การตรวจวัดและบันทึกสมดุคาร์บอน (Carbon flux) ของพื้นที่ ปลูกยาง	10
2.2.4 การตรวจวัดและบันทึกวัดอัตราการปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือผิวดิน (Soil respiration)	16
2.2.5 ข้อมูลประกอบอื่น ๆ	25
2.3 ผลการศึกษาสมดุคาร์บอนของสวนยางพารา	30
2.3.1 ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covari- ance ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และชุดอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ ในการเก็บข้อมูลวิจัย	30
2.3.2 ข้อมูลจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยาง	30
2.3.3 ข้อมูลสมดุคาร์บอน (Carbon flux) ของพื้นที่ปลูกยาง	36
2.3.4 ข้อมูลอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือผิวดิน (Soil respiration)	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5 ข้อมูลประกอบอื่น ๆ	50
2.3.6 ผลกระทบของจุลภูมิอากาศต่อค่า NEE (Net Ecosystem Exchange)	62
2.3.7 ผลกระทบของอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดินต่อค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือผิวดิน	65
2.3.8 คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยาง	66
2.4 สรุปผลการศึกษาสมดุลคาร์บอนของสวนยางพารา	68
บทที่ 3 การศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น	72
3.1 บทนำ	72
3.2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	74
3.3 การดำเนินโครงการ	80
3.4 ผลการดำเนินงาน	89
บทที่ 4 การศึกษาสมดุลน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา	100
4.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	100
4.2 การดำเนินงานวิจัย	100
4.2.1 ซ้อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และชุดอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวิจัย	101
4.2.2 การตรวจวัดและบันทึกข้อมูลจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยาง	101
4.2.3 การตรวจวัดและบันทึกสมดุลน้ำ (Water flux) ของพื้นที่ปลูกยาง	101
4.2.4 การเคลื่อนของน้ำในลำต้น (Sap flow) และการคายน้ำของต้นยาง (Transpiration)	104
4.2.5 ข้อมูลประกอบอื่น ๆ	106
4.3 ผลการศึกษาสมดุลน้ำของสวนยางพารา	108
4.3.1 ซ้อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และชุดอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวิจัย	108
4.3.2 ข้อมูลจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยาง	108
4.3.3 ข้อมูลสมดุลน้ำ (Water flux) ของพื้นที่ปลูกยาง	108

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.4 การเคลื่อนของน้ำในลำต้น (Sap flow) และการคายน้ำของต้นยาง (Transpiration)	113
4.3.5 ข้อมูลประกอบอื่น ๆ	114
4.3.6 ประสิทธิภาพการใช้น้ำ และวอเตอร์พัตปรินต์ของพื้นที่ปลูกยาง	121
4.3.7 ผลกระทบของจุลภูมิอากาศต่อค่า Kc, ETR และ CWU	123
4.4 สรุปผลการศึกษาสมมูลน้ำของสวนยางพารา	128
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	133
เอกสารอ้างอิง	139

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1-1	4
ตารางที่ 1-2	4
ตารางที่ 1-3	5
ตารางที่ 2-1	9
ตารางที่ 2-2	39
ตารางที่ 2-3	41
ตารางที่ 2-4	62
ตารางที่ 2-5	64
ตารางที่ 2-6	65
ตารางที่ 2-7	67
ตารางที่ 2-8	67

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-9	68
ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง (ยางแห้ง) 1 กิโลกรัมของ พื้นที่ปลูกยางพารา และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เกิดจากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูก ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา	
ตารางที่ 2-10	70
สรุปข้อมูลจุลภูมิอากาศ สมดุลของคาร์บอน และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ในปี 2556 ของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลง เกษตรกร จ. บึงกาฬ	
ตารางที่ 2-11	71
สรุปข้อมูลจุลภูมิอากาศ สมดุลของคาร์บอน และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ในปี 2557 ของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลง เกษตรกร จ. บึงกาฬ	
ตารางที่ 3-1	73
แผนงานของโครงการส่วนของการศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอน ฟุตพริ้นท์ที่เกิดจากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของ เสียที่เกิดขึ้น	
ตารางที่ 3-2	75
พื้นที่ปลูกยางพารา ปีเพาะปลูก 2554-2557	
ตารางที่ 3-3	78
พื้นที่ปลูกยางพารา ปีเพาะปลูก 2537-2557	
ตารางที่ 3-4	79
ข้อมูลด้านการเกษตรของจังหวัดอุดรธานี ปี 2555	
ตารางที่ 3-5	83
พื้นที่การปลูกยางพารา แยกรายอำเภอ จังหวัดบึงกาฬ	
ตารางที่ 3-6	83
พื้นที่การปลูกยางพารา แยกรายอำเภอ จังหวัดอุดรธานี	
ตารางที่ 3-7	84
จำนวนกลุ่มตัวอย่างเกษตรกรในแต่ละพื้นที่ ของจังหวัดบึงกาฬและ จังหวัดอุดรธานี	
ตารางที่ 3-8	86
ตัวอย่างการจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (Life cycle Inventory) ของผลิตภัณฑ์ใดๆ	
ตารางที่ 3-9	90
ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาด เล็ก จังหวัดบึงกาฬ	
ตารางที่ 3-10	91
ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาด กลาง จังหวัดบึงกาฬ	
ตารางที่ 3-11	91
ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาด ใหญ่ จังหวัดบึงกาฬ	
ตารางที่ 3-12	92
ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาด เล็ก จังหวัดอุดรธานี	
ตารางที่ 3-13	93
ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาด กลาง จังหวัดอุดรธานี	

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3-14	ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาดใหญ่ จังหวัดอุดรธานี	93
ตารางที่ 3-15	Emission Factor ที่ใช้ในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา	94
ตารางที่ 3-16	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราตลอดช่วงอายุต้นยางต่อไร่ สวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ ของจังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี	95
ตารางที่ 3-17	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสด 1 กิโลกรัม ของจังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี	96
ตารางที่ 3-18	ค่าการใช้ปุ๋ยของสวนยางพาราแต่ละพื้นที่เปรียบเทียบกับค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของแต่ละพื้นที่ จังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี	97
ตารางที่ 3-19	คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสดเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ	98
ตารางที่ 4-1	แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า NEE และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ	117
ตารางที่ 4-2	ประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยาง (Water use efficiency หรือ WUE, $\text{kg C} \cdot \text{m}^{-3} \text{H}_2\text{O}$) เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ	122
ตารางที่ 4-3	ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา (green water) และค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา	122
ตารางที่ 4-4	ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา (green water) และค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ	122
ตารางที่ 4-5	แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า Kc และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ	125
ตารางที่ 4-6	แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า ETR และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ	126

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4-7	127
แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า CWU และปัจจัยทาง สภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ	
ตารางที่ 4-8	131
สรุปข้อมูลจุลภูมิอากาศ สมดุลของน้ำ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ในปี 2556 ของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัย ยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึง กาฬ	
ตารางที่ 4-9	132
สรุปข้อมูลจุลภูมิอากาศ สมดุลของน้ำ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ในปี 2557 ของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัย ยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึง กาฬ	
ตารางที่ 5-1	133
สรุปข้อมูลของพื้นที่ศึกษา	
ตารางที่ 5-2	135
สรุปข้อมูลสมดุลคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพารา	
ตารางที่ 5-3	136
สรุปข้อมูลสมดุลน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา	

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2-1	แปลงยางพารา Site ที่ 1 ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนาบชัย เขต จังหวัดฉะเชิงเทรา	7
รูปที่ 2-2	แปลงยางพารา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร อำเภอบางคาค จังหวัด บึงกาฬ	8
รูปที่ 2-3	การติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภอบางคาค จังหวัดบึงกาฬ	10
รูปที่ 2-4	ชุดอุปกรณ์สำหรับการวัดสมดุลคาร์บอน (Carbon flux) ของพื้นที่ ปลูกยางด้วยเทคนิค Eddy Covariance	11
รูปที่ 2-5	System boundary ของโครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้ เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา”	14
รูปที่ 2-6	แสดงสมดุลของคาร์บอน (Carbon flus) ในระบบนิเวศยางพารา	14
รูปที่ 2-7	ขั้นตอนการคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (flux of CO ₂ และ H ₂ O) และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุต พริ้นต์	15
รูปที่ 2-8	Plot ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการหายใจของแปลงศึกษา ณ ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จังหวัดบึง กาฬ (รูปล่าง)	17
รูปที่ 2-9	การติดตั้ง Collar ในพื้นที่ของ Control (Collar no. 1-8) และ Trench plot (Collar no. 2-7) (● = ต้นยางพารา)	18
รูปที่ 2-10	การกำหนดพื้นที่ในการขุดดินเพื่อทำ Trench plot และเก็บตัวอย่าง ราก และดิน	18
รูปที่ 2-11	การขุดดินเพื่อทำ Trench plot	19
รูปที่ 2-12	การติดตั้ง sensor วัดอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดิน (ภาพซ้าย) และ การทายาฆ่ารากที่อยู่ภายใน Trench plot (ภาพขวา)	19
รูปที่ 2-13	การนำพลาสติกพันรอบพื้นผิวด้านข้างของ Trench plot เพื่อป้องกัน ไม่ให้รากเจริญเข้ามาใน Trench plot	20
รูปที่ 2-14	การทำรั้วกันรอบ เพื่อป้องกันไม่ให้มีการเดินเข้ามาในส่วนของ Trench plot	20
รูปที่ 2-15	Trench plot ที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว พร้อมกับชุดอุปกรณ์บันทึก อุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดินแบบอัตโนมัติ	21
รูปที่ 2-16	เครื่องวัดอัตราการหายใจของดิน (Soil CO ₂ Flux System) รุ่น LI- 8100® (LI-COR, Inc., Ltd., U.S.A.)	22
รูปที่ 2-17	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิดิน (T handle thermocouple) ซึ่งสามารถ เชื่อมต่อกับเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินได้	23

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2-18	อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำในดิน (Soil moisture sensor) รุ่น EC-5 (Decagon Devices, Inc. U.S.A.) ซึ่งอ่านค่าที่วัดได้โดยใช้ ProCheck (Decagon Devices, Inc. U.S.A.)	23
รูปที่ 2-19	การติดตั้งเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติขนาด 2 chamber ที่พัฒนาร่วมกับ National Institute for Environmental Studies ในสภาพแปลงจริงในประเทศไทย ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา	24
รูปที่ 2-20	ระบบควบคุมการสู่อากาศและ ระบบวัดการหายใจของดิน ที่ติดตั้งลงในกล่องกันกระแทก ของชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น สำหรับติดตั้ง ณ Site ที่ 2 แปลงปลูกยางของ เกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ	25
รูปที่ 2-21	การติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา	27
รูปที่ 2-22	แผนที่แสดงตำแหน่งที่ติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองย่อย ในแปลง ปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ (● ต้นยางพารา, ■ Litter trap) และภาพ แสดงการติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองย่อย ในแปลงปลูกยางพารา จังหวัดบึงกาฬ	28
รูปที่ 2-23	การวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของเรือนพุ่มของวัชพืชในสวนยางพารา	29
รูปที่ 2-24	ความเข้มแสงสะสม (Cumulative photosynthetically active radiation, PAR, $\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$) และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (Tair) ของแปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)	32
รูปที่ 2-25	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (Relative humidity (RH, %)) และปริมาณ น้ำฝนรวมรายวัน (Rainfall (Rain, mm)) ของแปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)	33
รูปที่ 2-26	ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, Rg) และปริมาณ รังสีสุทธิ (Net radiation, Rn) สะสมต่อวันของแปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)	35

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2-27	ค่า NEE (Net ecosystem exchange) สะสมต่อวัน (แสดงในกราฟ) และสะสมต่อปี (แสดงในตาราง) ของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)	37
รูปที่ 2-28	ค่า GPP (Gross primary production) R_{eco} (Ecosystem respiration) และ NEP (Net Ecosystem Production) สะสมต่อวัน (แสดงในกราฟ) และสะสมต่อปี (แสดงในตาราง หน่วย $kg. C\ ra^{-1}$) ของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)	38
รูปที่ 2-29	ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดิน ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}s^{-1}$) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)	45
รูปที่ 2-30	ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดิน ($g\ C\ m^{-2}day^{-1}$) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)	46
รูปที่ 2-31	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวดิน ($^{\circ}C$) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)	47
รูปที่ 2-32	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน (%) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)	48
รูปที่ 2-33	อัตราการปลดปล่อยของคาร์บอน ($g\ C\ m^{-2}day^{-1}$) (ภาพบน) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($g\ CO_2\ m^{-2}day^{-1}$) (ภาพล่าง) จากผิวดิน ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา	49
รูปที่ 2-34	การกระจายของขนาดรอบลำต้นยาง (Girth, mm.) ของต้นยางพาราในแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ (รูปล่าง)	51
รูปที่ 2-35	การเปลี่ยนแปลงของขนาดรอบลำต้นยาง (Girth, mm.) ของต้นยางพาราในแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ (รูปล่าง) (* ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในกราฟ แสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT)	52

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2-36	ความแปรปรวนของค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ของแปลงปลูกยางพารา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง) ซึ่งประเมินจากความสัมพันธ์กับค่า Specific leaf area และข้อมูลจาก Litter trap (● ข้อมูลปี 1, ● ข้อมูลปี 2 และ ● ข้อมูลปี 3)	53
รูปที่ 2-37	การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือน กุมภาพันธ์ 2557	54
รูปที่ 2-38	การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือน พฤษภาคม 2557	55
รูปที่ 2-39	การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือนกันยายน 2557	56
รูปที่ 2-40	การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือนมีนาคม 2558	57
รูปที่ 2-41	การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือนมิถุนายน 2558	58
รูปที่ 2-42	การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือนตุลาคม 2558	59
รูปที่ 2-43	แสดงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (P_{canopy} , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) อัตราการคายน้ำ (E_{weed} , $\text{mmol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) และอัตราการหายใจ (R_d , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) ของเรือนพุ่มวัชพืชที่เจริญเติบโตภายใต้เรือนพุ่มยางพารา ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อปี 2557	60
รูปที่ 2-44	แสดงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (P_{canopy} , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) อัตราการคายน้ำ (E_{weed} , $\text{mmol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) และอัตราการหายใจ (R_d , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) ของเรือนพุ่มวัชพืชที่เจริญเติบโตภายใต้เรือนพุ่มยางพารา ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อปี 2558	61
รูปที่ 3-1	แผนที่ภูมิประเทศและเขตการปกครอง จังหวัดอุดรธานี	76
รูปที่ 3-2	แผนที่แสดงพื้นที่กรณีศึกษาการปลูกยางพาราในจังหวัดบึงกาฬ	82

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3-3	แผนที่แสดงพื้นที่กรณีศึกษาการปลูกยางพาราในจังหวัดอุดรธานี	82
รูปที่ 3-4	ขั้นตอนโดยทั่วไปของการวิเคราะห์บัญชีรายการ	85
รูปที่ 3-5	ตัวอย่างการเก็บข้อมูลเพื่อจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมในรูปของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์	87
รูปที่ 3-6	แผนภาพแสดงวิธีการคิดค่าเฉลี่ยแบบแนวนอน	88
รูปที่ 3-7	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราตลอดช่วงอายุต้นยางต่อไร่ สวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ ของจังหวัดบึงกาฬ และจังหวัดอุดรธานี	95
รูปที่ 3-8	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสด 1 กิโลกรัม สวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ ของจังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี	96
รูปที่ 3-9	ปริมาณธาตุอาหารจากการใส่ปุ๋ยของสวนยางพาราช่วงอายุก่อนเปิดกรีด จังหวัดบึงกาฬและอุดรธานี เปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยตามคำแนะนำของสถาบันวิจัยยาง	97
รูปที่ 3-10	ปริมาณธาตุอาหารจากการใส่ปุ๋ยของสวนยางพาราช่วงอายุหลังเปิดกรีด จังหวัดบึงกาฬและอุดรธานี เปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยตามคำแนะนำของสถาบันวิจัยยาง	98
รูปที่ 4-1	System boundary ของโครงการ “การศึกษาสมดุลน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา”	103
รูปที่ 4-2	ขั้นตอนการคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (flux of CO ₂ และ H ₂ O) และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์	104
รูปที่ 4-3	การติดตั้งชุดอุปกรณ์ Sap flow บนต้นยางพารา	107
รูปที่ 4-4	องค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ Sap flow ที่ติดตั้ง ณ พื้นที่ศึกษา	107
รูปที่ 4-5	การติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดความชื้นและอุณหภูมิของดินที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวดิน	108
รูปที่ 4-6	การคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, ETR) และปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (Reference crop evapotranspiration, ET _o) สะสมต่อวันของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)	110

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-7	111
ปริมาณการใช้น้ำของพืช (Crop Water Use) ของแปลงปลูกยางพารา สะสมต่อวันของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)	
รูปที่ 4-8	111
การคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, ETR) และ การคายน้ำ ของพืช (Transpiration, E) ของแปลงปลูกยางพารา สะสมต่อวันของ แปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)	
รูปที่ 4-9	113
ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient; Kc) ของแปลง ปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)	
รูปที่ 4-10	115
ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Kc) ของยางพาราลอตฤดูปลูก ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2556 – 30 กันยายน 2558	
รูปที่ 4-11	116
ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Kc) ของยางพาราลอตฤดูปลูก ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2556 – 30 กันยายน 2558	
รูปที่ 4-12	119
ปริมาณน้ำในดิน (Soil Water Content, $m^3.m^{-3}$) อุณหภูมิดิน (Soil temperature, $^{\circ}C$) และปริมาณน้ำฝน (mm) ที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวดินของแปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา	
รูปที่ 4-13	120
ปริมาณน้ำในดิน (Soil Water Content, $m^3.m^{-3}$) อุณหภูมิดิน (Soil temperature, $^{\circ}C$) และปริมาณน้ำฝน (mm) ที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวดินของแปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ	

ภาคผนวก

	หน้า
ภาคผนวก ก ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ	145
ภาคผนวก ข ข้อมูลประกอบในการศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์	150
ภาคผนวก ค แบบสอบถามข้อมูลบัญชีรายการ	152
ภาคผนวก ง Verification Sheet	167
ภาคผนวก จ เอกสารอ้างอิงประกอบการวิจัย	180
ภาคผนวก ฉ บทความสำหรับการเผยแพร่	210
ภาคผนวก ช กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์	214

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ยางธรรมชาติ คือ **Green rubber** เนื่องจากต้นยางพาราจะตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาไว้ในต้นและราก และเพิ่มคาร์บอนสะสมในดินจากการร่วงของใบ กิ่ง ต้น ผล และการสลายของราก ซึ่งช่วยลดคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศอันเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลวิจัยที่ชัดเจนและน่าเชื่อถือได้ในระดับสากล ว่ายางธรรมชาติช่วยลดคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศได้มากเท่าใด (คาร์บอนฟุตพริ้นต์) ดังนั้น นักวิจัยจึงต้องศึกษาวิจัยปริมาณคาร์บอนที่สวนยางพาราตรึงได้ คาร์บอนที่สูญเสียไปจากการเกษตรกรรม และการเก็บเกี่ยว

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ (Carbon footprint) (Wright *et al.*, 2011)

“คาร์บอนฟุตพริ้นต์เป็นผลรวมของแก๊สเรือนกระจก (GHG) ที่ถูกปลดปล่อยออกมาโดยบุคคล องค์กร เหตุการณ์ หรือผลิตภัณฑ์ ทั้งทางตรงและทางอ้อม”

“การวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทนทั้งหมดที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากประชากร ระบบ หรือกิจกรรมที่กำหนดไว้ โดยพิจารณาแหล่งที่เกี่ยวข้องทั้งหมด (source, sink และ storage) ภายใต้ขอบเขตพื้นที่และเวลาของประชากร ระบบ หรือกิจกรรมที่น่าสนใจ”

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา คือ ปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่เกิดโดยตรงหรือโดยอ้อมจากสวนยางพารา โดยนำเสนอเป็น CO₂ equivalent มีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ

1. องค์ประกอบของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากกิจกรรมของต้นยางพาราและดิน (ประมาณ 90% ของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ทั้งหมด) โดยในองค์ประกอบนี้นักวิจัยเสนอเทคนิค Eddy Covariance ซึ่งเป็นเทคนิคที่ตรวจวัดการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างสวนยางพาราและบรรยากาศโดยตรงที่น่าเชื่อถือที่สุด
2. องค์ประกอบของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ (ประมาณ 3-5% ของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ทั้งหมด) และของเสียที่เกิดจากการปลูกยางพารา โดยวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลแบบ Gate to Gate ที่ใช้สำหรับจัดทำบัญชีข้อมูลสิ่งแวดล้อม และบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม โดยเฉลี่ยของการปลูกยางพาราและของเสียที่เกิดจากการปลูกยางพารา
3. คาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเก็บเกี่ยวยางพารา (ประมาณ 5-10% ของคาร์บอนฟุตพริ้นต์) โดยในองค์ประกอบนี้ นักวิจัยจะศึกษาด้วยวิธีการประเมินจากข้อมูลผลผลิต

นักวิจัยเสนอเทคนิค Eddy Covariance ซึ่งเป็นเทคนิคที่ตรวจวัดการแลกเปลี่ยนแก๊สคาร์บอน- ไดออกไซด์ระหว่างสวนยางพาราและบรรยากาศโดยตรงที่น่าเชื่อถือที่สุดในการศึกษาองค์ประกอบคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากกิจกรรมของต้นยางพาราและดิน และศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดจากการปลูกยางพารา โดยวิธีการประเมินจากการเกษตรกรรมมาตรฐานร่วมกับการสำรวจ (Hillier *et al.*, 2009) และศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอนฟุต-พริ้นต์ที่เกิดจากการเก็บเกี่ยวโดยใช้ข้อมูลผลผลิต

ในปัจจุบันการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ (Carbon footprint) หรือ LCA (Life cycle assessment) ของผลิตภัณฑ์ยังไม่ได้นำปริมาณคาร์บอนที่ต้นยางพาราตรึงจากอากาศ และเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของต้นและราก (ซึ่งส่วนหนึ่งกลายเป็นองค์ประกอบของดิน) เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณ แต่จะคิดเฉพาะคาร์บอนที่ปล่อยออกมาในกระบวนการแปรรูปเท่านั้น ทำให้ยางธรรมชาติมีสมดุลคาร์บอนเป็นบวกเพราะมีการปล่อยคาร์บอนออกมาในกระบวนการผลิต แทนที่จะเป็นลบมากๆ เมื่อรวมถึงคาร์บอนที่ตรึงไว้ในสวนยางพาราด้วย ทำให้เสียโอกาสที่จะใช้จุดเด่นของยางธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะเรื่องคาร์บอนฟุตพริ้นต์ให้เป็นประโยชน์ เพราะในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ หรือ LCA ของยางพาราธรรมชาติที่ประเมินได้มีการปล่อยคาร์บอนออกสู่บรรยากาศในปริมาณที่ใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์ ซึ่งทำให้อุตสาหกรรมยางพาราธรรมชาติของประเทศไทยยังไม่สามารถนำความจริงที่เป็นประโยชน์ในเรื่องคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางธรรมชาติไปเป็นจุดขายแข่งกับยางสังเคราะห์ได้

ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยจะต้องมีข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่ตรวจวัดจริงจากพื้นที่ปลูกเป็นของตนเอง เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการตัดสินใจในเชิงนโยบาย และเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันให้ยางธรรมชาติของประเทศไทย

อนึ่ง กระบวนการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ หรือ LCA นั้นยินยอมให้สามารถนำคาร์บอนที่เก็บสะสมไว้ในต้นยางพารามาคิดคำนวณฟุตพริ้นต์ได้ ถ้ามีข้อมูลและหลักฐานวิทยาศาสตร์อย่างเพียงพอ นักวิจัยจึงเสนอชุดโครงการนี้ เพื่อให้ประเทศไทยได้มีข้อมูลสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางพารา

นอกจากนี้ การศึกษาสมดุลของคาร์บอนของสวนยางพารา จะทำให้ทราบความสามารถในการสร้างชีวมวลของยางพารา และทราบผลกระทบของปัจจัยสภาพแวดล้อมต่อการสร้างชีวมวลอันเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการประเมินผลกระทบของสภาวะโลกร้อนต่อยางพารา และยังสามารถตัดสินใจเกี่ยวกับการเกษตรกรรมและการจัดการการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เป็นประโยชน์ทั้งในระดับเกษตรกรและระดับนโยบายของประเทศ

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (Water footprint) (Hoekstra et al., 2009)

“วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ คือ ปริมาณน้ำ (freshwater) ในการผลิตของผลิตภัณฑ์ โดยวัดปริมาณน้ำทั้งหมดที่เกี่ยวข้องอยู่ในห่วงโซ่อุปทาน”

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพืชเศรษฐกิจอื่น ๆ ทั้งหมดทุกชนิด โดยมีค่ามากกว่าพืชเศรษฐกิจชนิดอื่น ๆ 2-100 เท่า ถึงแม้ว่าการประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราที่ปลูกในประเทศไทยจะมีค่าน้อยที่สุดในโลกก็ตาม ($6,900 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$) (Mekonnen and Hoekstra, 2011) อนึ่งแม้ว่าในงานวิจัยของ UNESCO-IHE (Mekonnen and Hoekstra, 2010) ได้ประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราไทยลงรายละเอียดแยกเป็นรายจังหวัดมากกว่า 70 จังหวัด แต่การประเมินเหล่านั้นยังไม่มี การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) ซึ่งมีข้อจำกัดใช้ได้เฉพาะในเชิงเปรียบเทียบข้อมูลวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราที่ปลูกในพื้นที่ต่างๆ ระหว่างประเทศ หรือเชิงเปรียบเทียบกับพืชอื่นๆ ในขณะนี้ประเทศไทยจึงยังไม่มีค่าสมบูรณ์ (Absolute value) ของวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพารา และยังไม่มีการตรวจสอบความถูกต้อง (Validate) ของแบบจำลอง นักวิจัยจึงเสนอให้ตรวจวัดวอเตอร์ฟุต

รับได้โดยตรงจากอัตราการคายระเหยของน้ำจากสวนยางพาราสู่บรรยากาศที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance ตามที่รายงานโดย Bhardwaj *et al.* (2010) หาดด้วยข้อมูลผลผลิตที่ได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อตรวจวัดสมดุลคาร์บอนและน้ำด้วยเทคนิค Eddy covariance สำหรับใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ซึ่งยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำของสวนยางพารา

1.3 แผนงานของโครงการ

โครงการประกอบด้วย 2 โครงการย่อย ได้แก่

โครงการย่อยที่ 1 การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

โครงการย่อยที่ 2 การศึกษาสมดุลน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

แผนงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำเทคนิค Eddy covariance ไปใช้ตรวจวัดสมดุลคาร์บอนและน้ำของสวนยางพาราใน 2 พื้นที่ ซึ่งมีสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน และนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการตัดสินใจเชิงนโยบาย

พื้นที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 2 เขตพื้นที่ ซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกยางทางภาคตะวันออก และพื้นที่ใหม่ ได้แก่ (1) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีสวนยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 19 ปี (พ.ศ. 2556) และ (2) แปลงปลูกยางพาราของเกษตรกร จังหวัดนครบึงกาฬ อายุต้น 4 ปี (พ.ศ. 2556) ซึ่งเป็นพื้นที่ในเขตพื้นที่การปลูกสวนยางพาราระยะที่ 2 แปลงแสนไร่ และต่อเนื่องจากระยะที่ 2 หนึ่งล้านไร่ อนึ่งพื้นที่ศึกษา (2) เป็นการศึกษาในสวนยางพาราปลูกใหม่ การศึกษาใน 2 พื้นที่ เพื่อเปรียบเทียบสมดุลคาร์บอนและคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางที่มีอายุและสภาพแวดล้อมต่างกัน อนึ่งสวนยางในพื้นที่ (2) เป็นสถานที่ที่ยังไม่เปิดกรีด โดยจะมีการเปิดกรีดในปี 2557 หรือ 2558 จึงยังคำนวณคาร์บอนและวอเตอร์ฟุตพริ้นต์โดยตรงไม่ได้ในปีที่ทำการศึกษา แต่จะให้ข้อมูลการตรึงคาร์บอนและการใช้น้ำในช่วงเวลาก่อนที่สวนยางจะให้ผลผลิต ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ตลอดอายุปลูกได้

ตารางที่ 1-1 แผนของโครงการวิจัย

ระยะเวลา	กิจกรรม
6 เดือนที่ 1	1. การประชุมหารือ สรุปลักษณะการดำเนินงานตลอดแผนงานวิจัย ระยะเวลา 1 ปี 2. ติดตามความก้าวหน้าของการดำเนินงานของโครงการย่อยทุกเดือน และประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ทุก 2 เดือน 3. ประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย และจัดทำรายงานความก้าวหน้า
6 เดือนที่ 2	1. ติดตามความก้าวหน้าของการดำเนินงานของโครงการย่อยทุกเดือน และประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ทุก 2 เดือน 2. ประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย และจัดทำรายงานผลการวิจัย

ตารางที่ 1-2 แผนของโครงการย่อยที่ 1 การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราในระยะเวลา 1 ปี

ระยะเวลา	กิจกรรม
6 เดือนที่ 1	1. Eddy covariance 1.1 ดูแลรักษาและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 sites 1.2 เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพารา 2. Soil respiration 2.1 เก็บข้อมูล Soil CO₂ efflux ของสวนยางพาราทั้ง 2 sites ทุก 2 หรือ 4 (กรณีที่มีเครื่องมือเสียหาย) สัปดาห์ 2.2 พัฒนาชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติ 3. วัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของเรือนพุ่มพืชในสวนยางพารา ดำเนินการ ณ แปลงเกษตรกรจังหวัดบึงกาฬ 4. เก็บข้อมูลประกอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลด้าน Biometric และ Litter 5. การคำนวณค่า GPP และ NEP 6. คาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น
6 เดือนที่ 2	1. Eddy covariance 1.1 ดูแลรักษาและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 sites 1.2 เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพารา 2. Soil respiration 2.1 เก็บข้อมูล Soil CO₂ efflux ของสวนยางพาราทั้ง 2 sites ทุก 2 หรือ 4 (กรณีที่มีเครื่องมือเสียหาย) สัปดาห์ 2.2 พัฒนาชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติ 3. วัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของเรือนพุ่มพืชในสวนยางพารา ดำเนินการ ณ แปลงเกษตรกรจังหวัดบึงกาฬ 4. เก็บข้อมูลประกอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลด้าน Biometric และ Litter 5. การคำนวณค่า GPP และ NEP 6. คาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น 7. การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 sites

ตารางที่ 1-3 แผนของโครงการย่อยที่ 2 การศึกษาสมมูลน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ในระยะเวลา 1 ปี

ระยะเวลา	กิจกรรม
6 เดือนที่ 1	1. Eddy covariance 1.1 ดูแลรักษาและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 sites 1.2 เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของไอน้ำของสวนยางพารา 2. เก็บข้อมูลประกอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลจาก sap flow และ soil water content ผลผลิต 3. การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราทั้ง 2 sites
6 เดือนที่ 2	1. Eddy covariance 1.1 ดูแลรักษาและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 sites 1.2 เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของไอน้ำของสวนยางพารา 2. เก็บข้อมูลประกอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลจาก sap flow และ soil water content ผลผลิต 3. การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราทั้ง 2 sites

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ที่คำนวณได้ข้อมูล greenhouse gas flux rate ที่ตรวจวัดได้โดยตรงด้วยเทคนิค Eddy covariance และเป็นองค์ประกอบหลักของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ร่วมกับข้อมูลองค์ประกอบรองอื่น ๆ ของคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรมและผลผลิตจากการเก็บเกี่ยวจากโครงการย่อย
- 1.4.2 ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ที่คำนวณได้จากมูลพื้นฐาน water vapor flux rate ที่ตรวจวัดได้โดยตรงด้วยเทคนิค Eddy covariance ร่วมกับข้อมูลผลผลิตจากการเก็บเกี่ยวจากโครงการย่อย
- 1.4.3 สามารถกำหนดค่า parameter สำคัญในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (เช่น ค่า Ra:Rh, Kc) จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ตรวจวัดได้โดยตรงจากเทคนิค Eddy covariance เพื่อจะนำไปใช้ในการคาดการณ์คาร์บอนและวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ในพื้นที่อื่น ๆ ได้ต่อไป
- 1.4.4 ได้ข้อมูลพื้นฐานสำคัญเพียงชนิดเดียวที่สามารถจะใช้ validate แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณคาร์บอนและวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราได้
- 1.4.5 ทราบอิทธิพลของปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการที่กำหนดความแปรปรวนคาร์บอนและวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ได้

บทที่ 2

การศึกษาสมมูลคาร์บอน

เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

2.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ (Carbon footprint) หรือ LCA (Life cycle assessment) ของผลิตภัณฑ์ยังไม่ได้นำปริมาณคาร์บอนที่ต้นยางพาราตรึงจากอากาศ และเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของต้นและราก (ซึ่งส่วนหนึ่งกลายเป็นองค์ประกอบของดิน) เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณ แต่จะคิดเฉพาะคาร์บอนที่ปล่อยออกมาในกระบวนการแปรรูปเท่านั้น ทำให้ยางธรรมชาติมีสมมูลคาร์บอนเป็นบวกเพราะต้องปล่อยคาร์บอนออกมาในกระบวนการผลิต แทนที่จะเป็นลบมาๆ เมื่อรวมถึงคาร์บอนที่ตรึงไว้ในสวนยางพาราด้วย ทำให้เสียโอกาสที่จะใช้จุดเด่นของยางธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะเรื่องคาร์บอนฟุตพริ้นต์ให้เป็นประโยชน์ เพราะในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ หรือ LCA ในปัจจุบันไม่มีการนำคาร์บอนในส่วนของสวนยางพาราเข้ามาคิด ทำให้คาร์บอนฟุตพริ้นต์ หรือ LCA ของยางธรรมชาติที่ประเมินได้มีการปล่อยคาร์บอนออกสู่บรรยากาศในปริมาณที่ใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์ ซึ่งทำให้อุตสาหกรรมยางพาราธรรมชาติของประเทศไทยยังไม่สามารถนำความจริงที่เป็นประโยชน์ในเรื่องคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางธรรมชาติไปเป็นจุดขายแข่งกับยางสังเคราะห์ได้

ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยเองต้องมีข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่ตรวจวัดจริงจากพื้นที่ปลูกเป็นของตนเอง เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการตัดสินใจในเชิงนโยบาย และเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันให้ยางธรรมชาติของประเทศไทย

อนึ่ง กระบวนการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ หรือ LCA นั้นยินยอมให้สามารถนำคาร์บอนในต้นยางพาราเก็บไว้มาคิดคำนวณฟุตพริ้นต์ได้ ถ้ามีข้อมูลและหลักฐานวิทยาศาสตร์อย่างเพียงพอ นักวิจัยจึงเสนอชุดโครงการวิจัยนี้ เพื่อให้ประเทศไทยได้มีข้อมูลสมมูลคาร์บอนเพื่อใช้คำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ได้

นอกจากนี้ การศึกษาสมมูลของคาร์บอนของสวนยางพารา จะทำให้ทราบความสามารถในการสร้างชีวมวลของยางพารา และทราบผลกระทบของปัจจัยสภาพแวดล้อมต่อการสร้างชีวมวล เป็น ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการประเมินผลกระทบของสภาวะโลกร้อนต่อยางพารา และยังช่วยให้สามารถตัดสินใจเกี่ยวกับการการเกษตรกรรมและการจัดการการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เป็นประโยชน์ทั้งในระดับเกษตรกรและระดับนโยบายของประเทศ

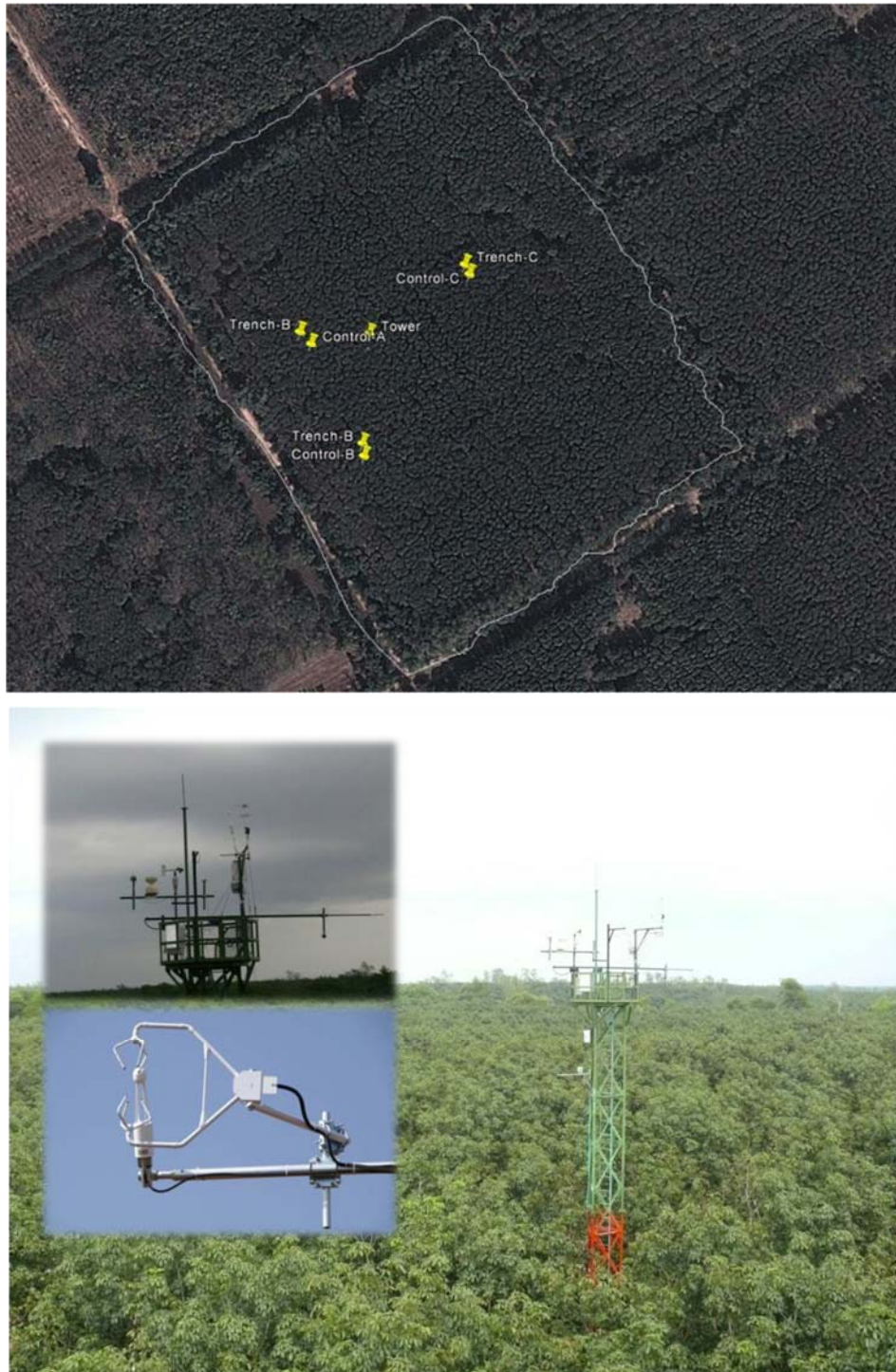
2.2 การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาสมมูลคาร์บอนของสวนยางพาราดำเนินการใน 2 พื้นที่ ได้แก่

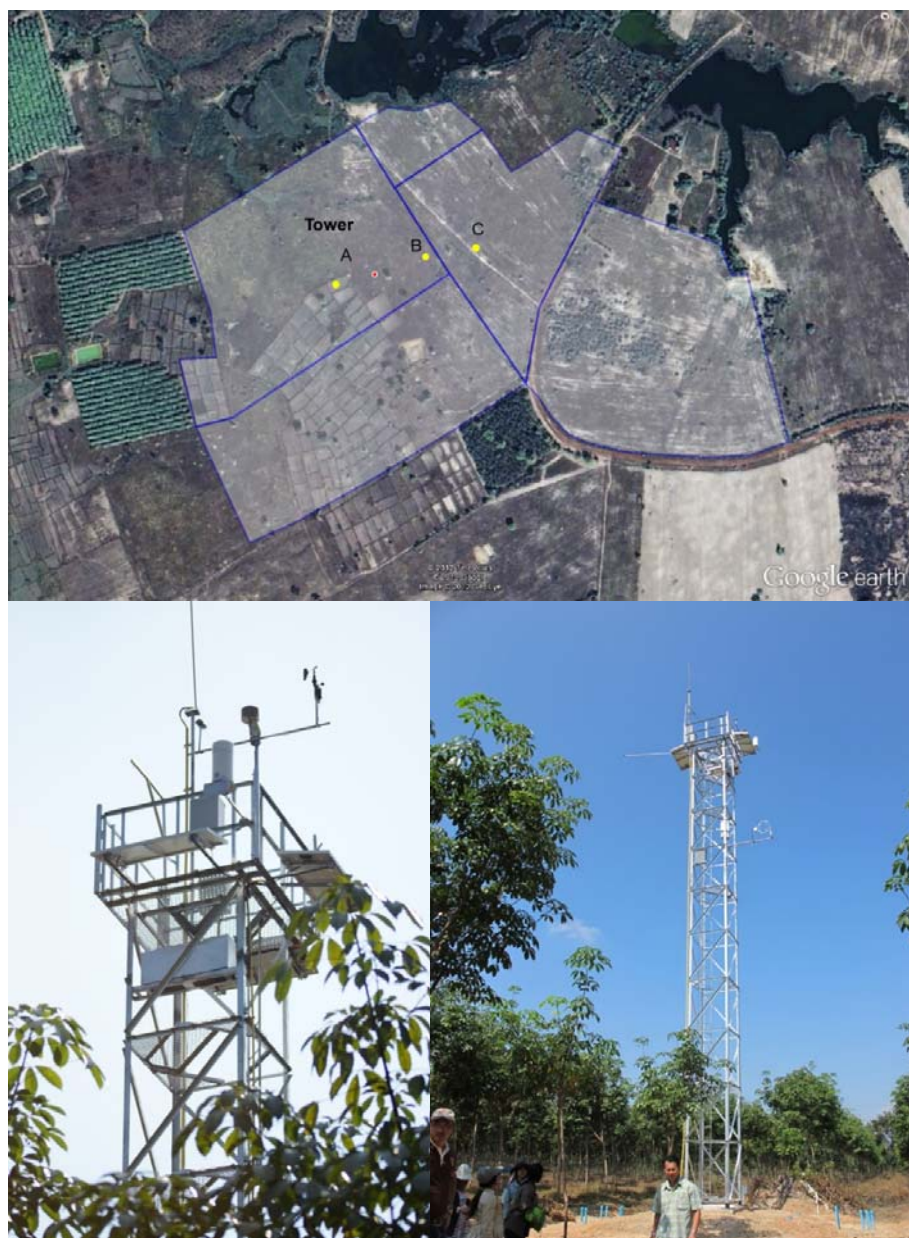
Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนาบชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา

แปลงยางอายุมาก ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา (ละติจูด $13^{\circ}34'21.97''N$ ลองจิจูด $101^{\circ}28'5.53''E$ ความสูงจากระดับน้ำทะเล 69 เมตร) ตั้งอยู่ที่อำเภอสนาบชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา แปลงทดลองตั้งอยู่กลางศูนย์วิจัย มีเนื้อที่ประมาณ 50 ไร่ เป็นพื้นที่ปลูกยางที่อาศัยน้ำฝน ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง

20 ปี (ปี พ.ศ. 2557) ระยะปลูก 2.5 x 7 เมตร และเปิดกรีดมาแล้ว 11 ปี ดินในพื้นที่ปลูกยางเป็นชุดดิน
กบินทร์บุรี ความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดอย่างพารา (รูปที่ 2-1)



รูปที่ 2-1 แปลงยางพารา Site ที่ 1 ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา



รูปที่ 2-2 แปลงยางพารา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ

Site ที่ 2 พื้นที่สวนยางของเกษตรกร อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ

สวนยางพาราของเกษตรกร ตั้งอยู่ที่อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ (ละติจูด $18^{\circ}13'22.77''N$ ลองจิจูด $103^{\circ}18'59.46''E$ ความสูงจากระดับน้ำทะเล 200 เมตร) มีเนื้อที่ประมาณ 100 ไร่ เป็นพื้นที่ปลูกยางโดยอาศัยน้ำฝน ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 5 ปี (ปี พ.ศ. 2557) ระยะปลูก 3×7 เมตร และเป็นต้นยางที่ยังไม่เปิดกรีด ดินในพื้นที่ปลูกยางเป็นชุดดินโพพพิสัย สวนยางพารานี้เป็นสวนยางพาราปลูกใหม่ อยู่ในเขตพื้นที่การปลูกสวนยางพารา ระยะที่ 3 แปลงไร่ และต่อเนื่องจากระยะที่ 2 หนึ่งล้านไร่ พื้นที่ที่มีความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดยางพารา (รูปที่ 2-2)

ตารางที่ 2-1 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของดินในพื้นที่ปลูกยาง ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา และแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ (จำนวนซ้ำ=6, * แสดงค่า standard deviation)

ตัวแปร	ความลึกจากผิวดิน (cm)	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา	แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ
pH	0-10	5.78 ± 0.53*	5.90 ± 0.59
	10-20	6.00 ± 0.59	5.47 ± 0.33
Organic carbon (%)	0-10	1.29 ± 0.15	0.26 ± 1.13
	10-20	1.07 ± 0.27	0.26 ± 0.94
Organic matter (%)	0-10	2.25 ± 0.26	1.13 ± 0.44
	10-20	1.86 ± 0.47	0.94 ± 0.28
Porosity (ร้อยละ)	0-10	32.00 ± 8	41.00 ± 10
	10-20	33.00 ± 1	38.00 ± 16
Bulk density (g cm ⁻³)	0-10	1.62 ± 0.16	1.41 ± 0.07
	10-20	1.66 ± 0.09	1.41 ± 0.05

2.2.1 ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และชุดอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวิจัย

ดำเนินการตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และสอบเทียบค่า (Calibrate) นั้น ชุดอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวิจัยของพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 site

2.2.2 การตรวจวัดและบันทึกข้อมูลจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยาง

ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศถูกติดตั้งที่ระดับความสูง 25 และ 15 เมตร บน tower ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 และ 2 (รูปที่ 2-3) ตามลำดับ โดยประกอบด้วย

- ความเร็วและทิศทางการลมเหนือพื้นที่ปลูกยาง โดยใช้เครื่องวัดความเร็วและทิศทางการลม แบบ 2 มิติ รุ่น 03002 บริษัท RM Young, USA
- วัดอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Temperature and Relative Humidity Probe) รุ่น HMP45C ของบริษัท Vaisala Inc., U.S.A.
- วัดปริมาณน้ำฝนต่อวันในพื้นที่ปลูกยางพารา ด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน Rain Gauges รุ่น TE525 TIPPING BUCKET Rain Gage ของบริษัท Campbell Scientific, U.S.A.
- วัดความเข้มแสงสะสมต่อวันในพื้นที่ปลูกยางพารา โดยใช้เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ (Quantum sensor) รุ่น LI-190SA ของบริษัท Licor, Inc., U.S.A
- วัดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, Rg) ที่แปลงปลูกยางพาราได้รับ ด้วยเครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation sensor) รุ่น LPO2 ของบริษัท Hukseflux, U.S.A.

- วัดปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, R_n) ที่แปลงปลูกยางพาราได้รับ ด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธิ รุ่น NR-Lite ของบริษัท Kipp & Zonen Inc., Netherlands

ความถี่ในการวัดค่าและการบันทึกค่าที่วัดได้ของชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศจะดำเนินการตามคำสั่งที่นักวิจัยโปรแกรมในเครื่องควบคุมและบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ รุ่น CR1000 คือ จะบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 20 Hz หรือ 20 ครั้งต่อวินาที ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง และมีการติดตั้งระบบการส่งข้อมูลผ่านทางสัญญาณโทรศัพท์ สำหรับตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ และใช้โปรแกรม LoggerNet ในการถ่ายโอนข้อมูล ข้อมูลที่ได้จะถูกเก็บไว้ในรูปของ ASCII file



รูปที่ 2-3 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ

2.2.3 การตรวจวัดและบันทึกสมดุลคาร์บอน (Carbon flux) ของพื้นที่ปลูกยาง

การวัดสมดุลคาร์บอน (Carbon flux) นั้นใช้เทคนิคที่เรียกว่า “Eddy Covariance” ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการวัด Flux ของก๊าซและตรวจติดตามการแพร่ของก๊าซจากพื้นที่ศึกษาที่มีความแม่นยำมากที่สุด เป็นการวัดค่าที่ศึกษาโดยตรง และใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

เทคนิค Eddy Covariance (Goulden *et al.*, 1996) เป็นเทคนิคในการตรวจวัดด้านอุตุนิยมในระดับจุลภูมิอากาศ (Micro-climate) เพื่อตรวจวัดความแปรปรวนของ Flux ในแนวตั้งของชั้นบรรยากาศ โดยวัดความแปรปรวนร่วมระหว่างความเข้มข้นของสิ่งที่สนใจ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และมีเทน เป็นต้น และความเร็วของลมในแนวตั้งภายในระบบที่ศึกษา ในการตรวจวัดต้องใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งที่ศึกษา (Sensitive) มีความถูกต้องและแม่นยำสูง (Accurate และ Precise) และทนทานต่อความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม เนื่องจากมีความแปรปรวนมาก

ของก๊าซที่ศึกษาในระบบ และการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏนั้นเกิดในปริมาณที่น้อยมาก อีกทั้งยังต้องการตรวจวัดค่าอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา

ชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance ประกอบด้วย

- เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม แบบ 3 มิติ (ความเร็วลมในทิศทาง x, y, z) (Three dimensional sonic anemometer) รุ่น CSAT3 ของบริษัท Campbell Scientific
- เครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ระบบเปิด (Open path infrared gas analyzer) รุ่น LI-7500 ของบริษัท Li-COR Inc.



(a) ชุดอุปกรณ์ Eddy covariance ที่ติดตั้งบน tower



(b) เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม แบบ 3 มิติ



(c) เครื่องวัดความเข้มข้นของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในอากาศ



(d) เครื่องควบคุมและบันทึกข้อมูล แบบอัตโนมัติ

รูปที่ 2-4 ชุดอุปกรณ์สำหรับการวัดสมดุลคาร์บอน (Carbon flux) ของพื้นที่ปลูกยางด้วยเทคนิค Eddy Covariance

ในการศึกษาวิจัย ชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance จะถูกติดตั้งไว้ที่ความสูง 27 และ 12 เมตร บน tower ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 (จังหวัดฉะเชิงเทรา) และ 2 (จังหวัดบึงกาฬ) ตามลำดับ ข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือจะถูกบันทึกลงในการบันทึกข้อมูลขนาดความจุ 2 GB (Compact flash) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ (Data logger) นักวิจัยจะเปลี่ยนการบันทึกข้อมูลจากเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติทุกๆ 2 สัปดาห์ การบันทึกข้อมูลของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติจะดำเนินการตามคำสั่งที่นักวิจัยโปรแกรมไว้ คือ จะบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 20 Hz หรือ 20 ครั้งต่อวินาที ตลอด 24 ชั่วโมง

การคำนวณค่า NEE (Net ecosystem exchange หรือ F_{CO_2}) ด้วยเทคนิค Eddy Covariance (Goulden et al., 1996) เป็นการคำนวณจาก Covariance ระหว่างความแปรปรวนความเร็วลมในแนวตั้ง (w') และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($[CO_2]$) ดังสมการที่ (1)

$$NEE = F_{CO_2} = \overline{\rho w' [CO_2]'} \quad (1)$$

โดยที่ ρ ได้แก่ ความหนาแน่นของอากาศเฉลี่ย (mean air density)

ขั้นตอนการคำนวณ NEE จะดำเนินการตามวิธีมาตรฐานของ EUROFLUX (Aubinet et al., 2000) ซึ่งข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความเร็วลมในแนวตั้งจะถูกนำมาคำนวณด้วยโปรแกรม EdiRe ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ฟรีที่สามารถดาวน์โหลดได้ที่จาก <http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/> นักวิจัยได้เขียนโปรแกรมคำนวณตามวิธีมาตรฐานดังขั้นตอนการคำนวณตามรายละเอียดของ รูปที่ 2-7 ค่า NEE เฉลี่ยทุกๆ 30 นาที จะถูกนำมาคำนวณหาค่าอื่นๆ ต่อไป ได้แก่ NEP (Net ecosystem production) NPP (Net primary production) GPP (Gross primary production) และ R_{eco} (Ecological respiration) ในลำดับต่อไป

การศึกษาสมดุลคาร์บอนในระบบนิเวศ เป็นการศึกษาการหมุนเวียนคาร์บอนโดยเริ่มจากคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศถูกพืชดูดซับ เพื่อนำไปใช้สังเคราะห์โปรโตพลาสซึม โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง สารอินทรีย์ของคาร์บอนจะถูกส่งผ่านไปยังสัตว์โดยการกิน การย่อย และนำไปใช้ในรูปแบบต่างๆ ในที่สุดทั้งพืชและสัตว์จะคืนคาร์บอนสู่บรรยากาศโดยการหายใจ และบางส่วนของคาร์บอนที่ยังคงประกอบเป็นเนื้อเยื่อของพืชและสัตว์จะมีการหมุนเวียนกลับสู่บรรยากาศใหม่หลังจากพืชและสัตว์ตาย และมีการย่อยสลายเกิดขึ้น ดังนั้นคาร์บอนจึงหมุนเวียนอยู่ในระบบนิเวศอย่างสมดุล อัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างชั้นบรรยากาศและระบบนิเวศ ซึ่งถูกตรวจวัดและประเมินเป็นค่า NEE หรือ Net ecosystem exchange และศักยภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบจะถูกประเมินด้วยค่า NEP หรือ Net Ecosystem Production ซึ่งเป็นการประเมินว่าระบบนิเวศนั้นๆ มีการดูดซับหรือปลดปล่อยคาร์บอน โดยระบบนิเวศที่มีการดูดซับคาร์บอนมากกว่าการปลดปล่อย จัดว่าเป็น Carbon sinks ($NEP > 0$) ในทางกลับกัน ถ้าระบบนิเวศที่มีการดูดซับคาร์บอนน้อยกว่าการปลดปล่อย จะถูกจัดว่าเป็น Carbon source ($NEP < 0$) ซึ่งสามารถประเมินได้ตามสมการของ Luyssaert et al. (2009) ดังนี้

$$NEP = NEE_{day} \quad (2)$$

NEP เท่ากับผลรวมของค่า NEE ในช่วงกลางวัน โดยค่า NEE ในช่วงเวลาดังกล่าวจะมีค่าเป็นลบ (-) ซึ่งแสดงว่า มีการเคลื่อนที่ Flux ของคาร์บอนจากบรรยากาศเข้าสู่ระบบนิเวศยางพารา หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ต้นยางพาราดูดซับคาร์บอนเข้าไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงนั่นเอง

$$R_{eco} = NEE_{night} \quad (3)$$

R_{eco} เท่ากับผลรวมของค่า NEE ในช่วงกลางคืน โดยค่า NEE ในช่วงเวลาดังกล่าวจะมีค่าเป็นบวก (+) ซึ่งแสดงว่า มีการเคลื่อนที่ Flux ของคาร์บอนจากระบบนิเวศยางพาราขึ้นสู่บรรยากาศ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ต้นยางพาราลดปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศโดยกระบวนการหายใจของต้นยางนั่นเอง

$$GPP = NEP + R_{eco} \quad (4)$$

เมื่อ NEP = ผลผลิตคาร์บอนสุทธิของระบบ (Net Ecosystem Production)
 NEE = อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (Net ecosystem exchange) ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จากวิธีการทาง Eddy Covariance method
 GPP = อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (Gross Primary Production) ซึ่งเป็นค่าแสดงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงทั้งหมดของพืช หรือเรียกว่าเป็น “อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงทั้งหมด” (total photosynthesis หรือ total assimilation)
 R_{eco} = การหายใจทั้งหมดของระบบนิเวศ (Ecological respiration, R_{eco}) โดยสามารถคำนวณได้จากค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (+NEE) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลากลางคืน

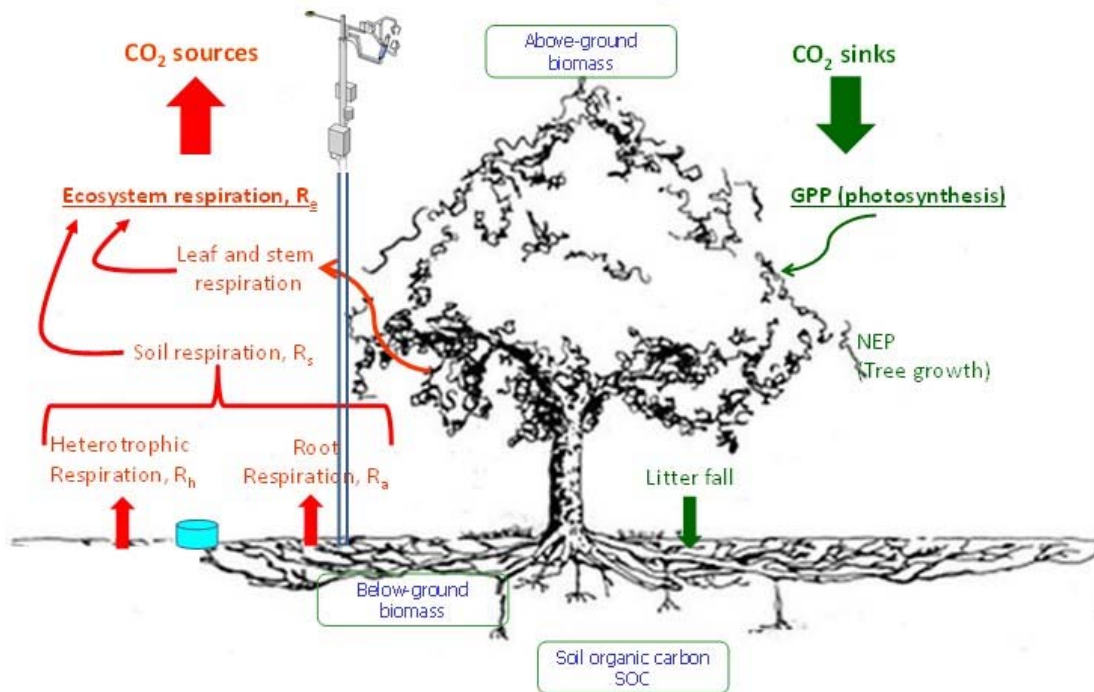
NBP (Net biome production) คือ ปริมาณคาร์บอนสะสมที่คงอยู่ในระบบนิเวศ ณ ช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากหักลบปริมาณคาร์บอนที่สูญเสียไปจากระบบนิเวศ โดยการหายใจทั้งหมดของระบบ และกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การเผาไหม้ และการเก็บเกี่ยว เป็นต้น (Kutscha *et al.*, 2010)

$$NBP = NEP - D \quad (5)$$

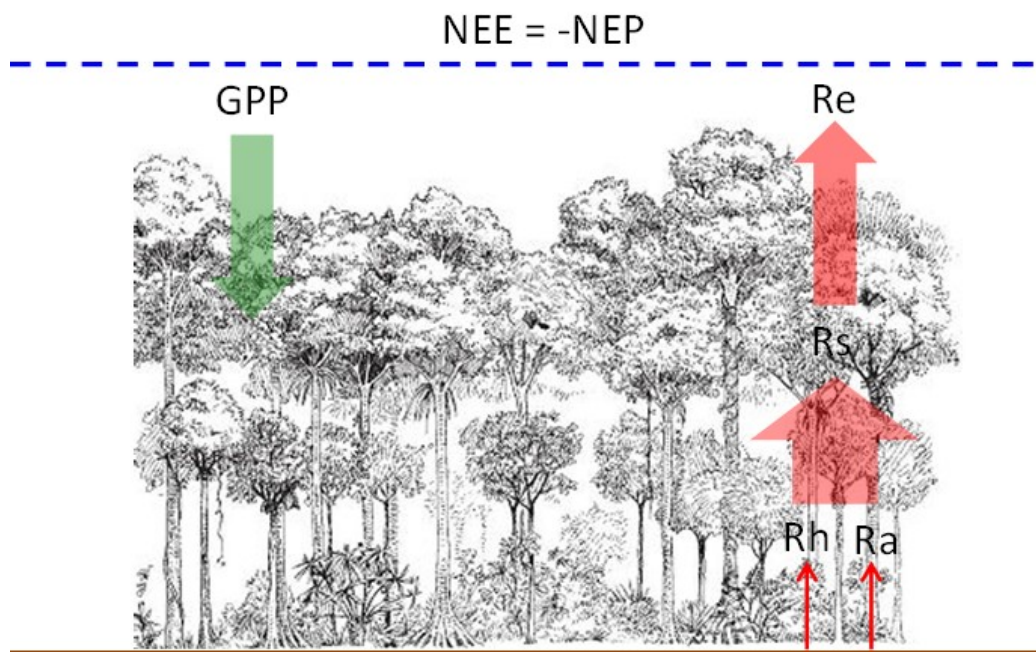
เมื่อ D = ปริมาณคาร์บอนที่สูญเสียไปเนื่องจากการเผาไหม้ (carbon lost by fires) และ การเก็บเกี่ยว (carbon removed by harvest)

ซึ่งในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ได้จัดทำข้อมูลเพียงระยะเวลาสั้น อีกทั้งช่วงระยะเวลาศึกษายังไม่ครอบคลุมการเจริญเติบโตของยางพาราในรอบปี จึงยังไม่สามารถคำนวณค่า Net biome production (NBP) ได้

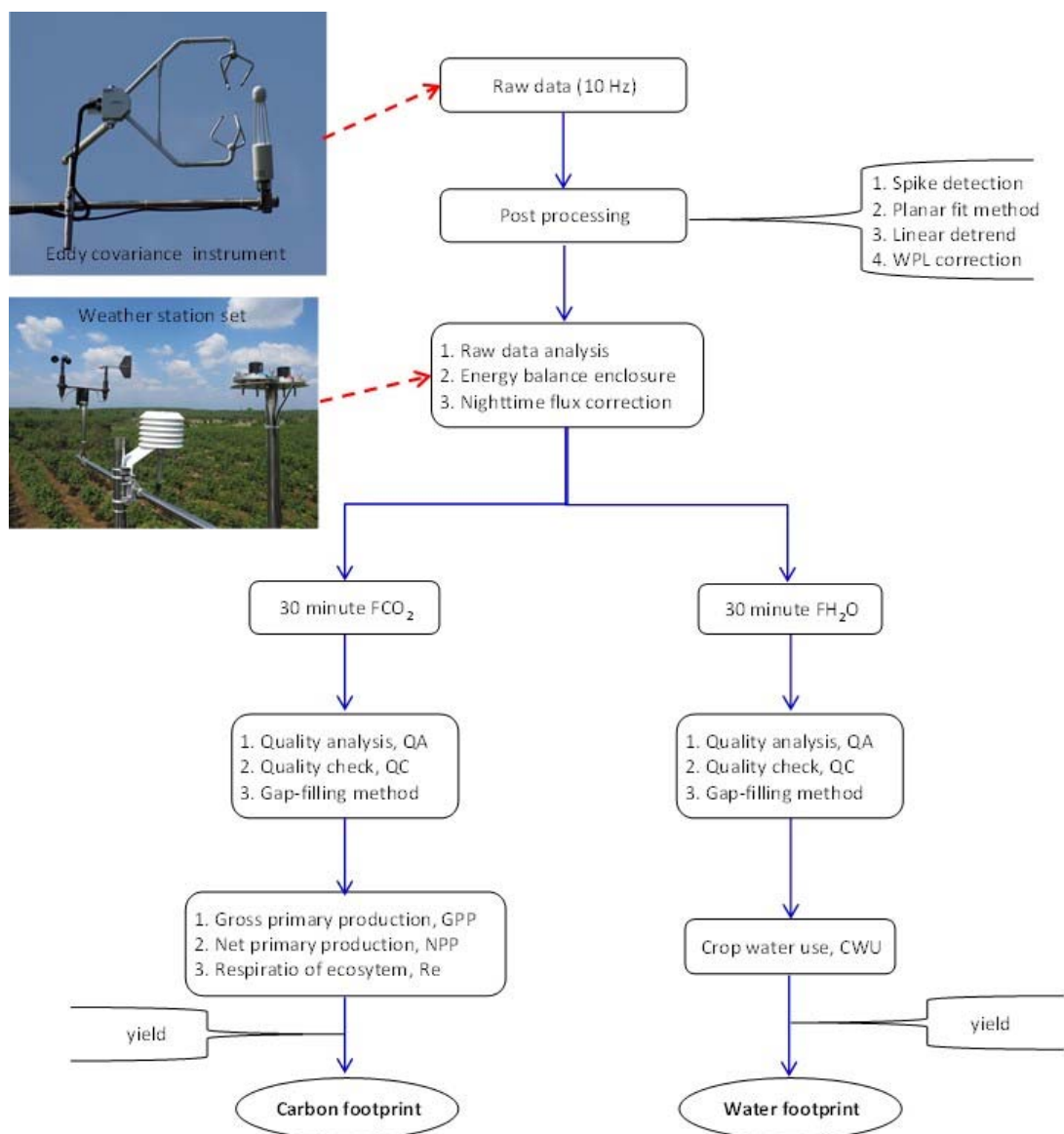
“Carbon footprint”



รูปที่ 2-5 System boundary ของโครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา”



รูปที่ 2-6 แสดงสมดุลของคาร์บอน (Carbon flus) ในระบบนิเวศยางพารา



รูปที่ 2-7 ขั้นตอนการคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (flux of CO₂ และ H₂O) และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

วิธีการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ เนื่องจากการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในปัจจุบันนั้น ยังไม่มีการรวมข้อมูลการแลกเปลี่ยนปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือพื้นที่ปลูกยางมาใช้ในการคำนวณ ดังนั้น นักวิจัยจึงคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ โดยอ้างอิงวิธีการมาจาก การวิเคราะห์ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ด้วยวิธี LCA คือ จะคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากพื้นที่ปลูกยางในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยหน่วยอ้างอิง (Reference Unit) คือ ยางก้อน 1 กิโลกรัม

$$CF = \frac{NEE}{Yield} \quad (6)$$

โดยที่ CF = Carbon footprint (kg CO₂ Equivalent)
NEE = Net ecosystem exchange (kg CO₂ ra⁻¹year⁻¹)
Yield = ผลผลิตเป็นยางกันถ้วย (kg ra⁻¹year⁻¹)

2.2.4 การตรวจวัดและบันทึกวัดอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือผิวดิน (Soil respiration)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากผิวดินเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อวัฏจักรคาร์บอนของโลก (Global carbon cycle) เนื่องจากดินมีคาร์บอนในสัดส่วนที่มากกว่าในบรรยากาศโลก นอกจากนี้ อัตราการหายใจของดิน (Soil respiration, R_s) ยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อสมดุลของคาร์บอนในระบบนิเวศ อัตราการหายใจของดิน ประกอบด้วย Autotrophic respiration (R_a) ซึ่งเกิดจากการหายใจของรากและจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บริเวณรากพืช (Mycorrhizae และ Rhizosphere bacteria) และ Heterotrophic respiration (R_h) (Jassal and Black, 2006) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายเศษซากพืชและอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์ทั้งบนดินและใต้ดิน R_a มีสารตั้งต้นที่ประกอบด้วย Root carbohydrate และ Root exudates ซึ่งใช้เวลาอยู่ในดินไม่นาน ในขณะที่ R_h ประกอบด้วยสารประกอบคาร์บอนที่สะสมอยู่ในดินเป็นเวลานาน ตั้งแต่ระยะเป็นเดือนจนถึงปี ตั้งแต่เศษซากพืชสดจนกลายเป็นอินทรีย์วัตถุในดิน องค์ประกอบทั้งหมดอาจได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมและลักษณะของพื้นที่ที่แตกต่างกัน และยังมีการตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ และอุณหภูมิโลกที่ต่างกัน ดังนั้นการประเมินสัดส่วนขององค์ประกอบดังกล่าวเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์และการจำลองอัตราการหายใจของดิน และการศึกษาการตอบสนองของอัตราการหายใจต่อสภาพภูมิอากาศและผลกระทบอื่นๆ จากสภาพแวดล้อมเพื่อที่จะทำบัญชีคาร์บอนในระบบนิเวศอย่างพาราและการตรวจติดตาม Carbon sequestration ในดิน ซึ่งการประเมิน Carbon sequestration ในระบบนิเวศ ก็คือ Net ecosystem production (NEP) ซึ่งสามารถประเมินได้จากความแตกต่างระหว่างการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลพืชและ R_h

(1) การกำหนดพื้นที่ในการเก็บข้อมูล

กำหนดพื้นที่สำหรับวัดอัตราการหายใจของดิน ในพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 แห่ง แต่ละพื้นที่แบ่งเป็น 3 Plots ได้แก่ Plot A, B และ C แต่ละ Plot ประกอบด้วย 2 Sub-plot ได้แก่ Control (วัดอัตราการหายใจของดิน, R_s) และ Trench (วัดอัตราการหายใจของดิน ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายเศษซากพืช และอินทรีย์วัตถุ โดยจุลินทรีย์ทั้งบนดินและใต้ดิน, R_h) พื้นที่ที่ใช้วัดอัตราการหายใจของดินมีขนาดกว้างเป็น 1 ใน 4 ของพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ถูกล้อมด้วยยางพารา 4 ต้น Collar ซึ่งทำจากท่อ PVC มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สูง 11 cm จะถูกติดตั้งในพื้นที่ดังกล่าวจำนวน 8 Collar (กระจายทั่วพื้นที่) ในแต่ละ Sub-plot นอกจากนี้ Sub-plot ที่เป็น Control และ Trench จะติดตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน (รูปที่ 2-8 และ 2-9)

(2) การทำ Trench plot

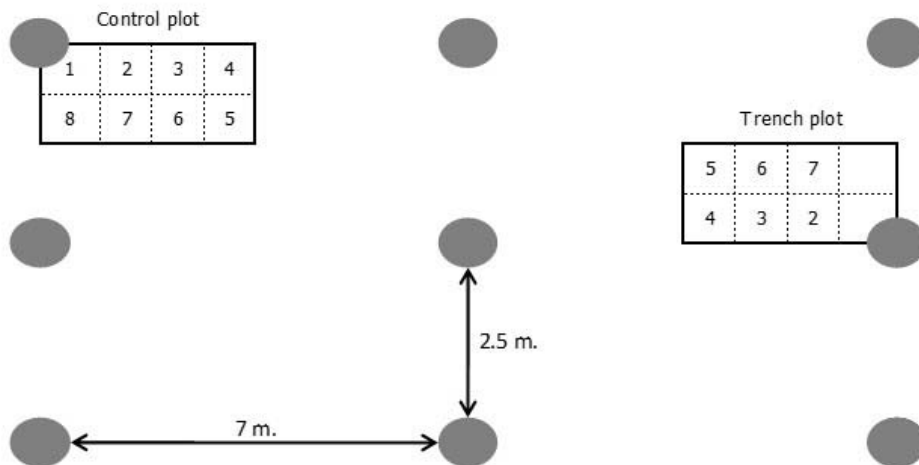
Trenching technique เป็นหนึ่งใน root exclusion method ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานและใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันสำหรับการแยก R_a และ R_h การทำ Trench plot ประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้

- การกำหนดพื้นที่ในการขุดดินรอบ Collar ทั้ง 8 อัน ความลึก 90 - 100 เซนติเมตร กว้าง 50 เซนติเมตร (รูปที่ 2-10)

- เมื่อขุดดินรอบ Trench plot เสร็จเรียบร้อยแล้ว ติดตั้ง sensor วัดอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดิน และทายาฆ่ารากใน plot เมื่อเร่งให้รากภายใน Trench plot ตายเร็วขึ้น (รูปที่ 2-11 และ 2-12)
- นำพลาสติกพันรอบ Trench plot เพื่อป้องกันไม่ให้รากเจริญเติบโตเข้าไปภายใน plot และนำดินใส่ลงไปในหลุมที่ขุดให้เต็มดังเดิม (รูปที่ 2-13 และ 2-14)
- ทำรั้วรอบพื้นที่ Trench plot และติดตั้งชุดอุปกรณ์บันทึกข้อมูลอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดินแบบอัตโนมัติ (รูปที่ 2-15)



รูปที่ 2-8 Plot ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการหายใจของแปลงศึกษา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ (รูปล่าง)



รูปที่ 2-9 การติดตั้ง Collar ในพื้นที่ของ Control (Collar no. 1-8) และ Trench plot (Collar no. 2-7)
(● = ต้นยางพารา)



รูปที่ 2-10 การกำหนดพื้นที่ในการขุดดินเพื่อทำ Trench plot และเก็บตัวอย่างราก และดิน



รูปที่ 2-11 การขุดดินเพื่อทำ Trench plot



รูปที่ 2-12 การติดตั้ง sensor วัดอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดิน (ภาพซ้าย) และ การหาซากที่อยู่ที่ภายใน Trench plot (ภาพขวา)



รูปที่ 2-13 การนำพลาสติกพันรอบพื้นผิวด้านข้างของ Trench plot เพื่อป้องกันไม่ให้รากเจริญเข้ามาใน Trench plot



รูปที่ 2-14 การทำรั้วกันรอบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเดินเข้ามาในส่วนของ Trench plot



รูปที่ 2-15 Trench plot ที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว พร้อมกับชุดอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดินแบบอัตโนมัติ

(3) การวัดอัตราการหายใจของดิน

วัดอัตราการหายใจของดิน หลังจากติดตั้ง collar แล้ว 1 สัปดาห์ ในพื้นที่ Plot A, B และ C (Control และ Trench plot) ด้วยเครื่องวัดอัตราการหายใจของดิน (Soil CO₂ Flux System) รุ่น LI-8100® (LI-COR, Inc., Ltd., U.S.A.) (รูปที่ 2-16) โดยวัดควบคู่ไปกับอุณหภูมิ (°C) และปริมาณน้ำในดิน (Soil water content, %) ที่ระดับความลึก 5 cm. จากผิวดินด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ (T handle thermocouple) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินได้ (รูปที่ 2-17) และ Soil moisture sensor รุ่น EC-5 (Decagon Devices, Inc. U.S.A.) ซึ่งอ่านค่าที่วัดได้โดยใช้ ProCheck (Decagon Devices, Inc. U.S.A.) (รูปที่ 2-18) วัดอัตราการหายใจของดินในพื้นที่ปลูกยางพารา ทุก 2 สัปดาห์

อัตราการหายใจของดินที่วัดได้ (Soil CO₂ efflux) มีหน่วยเป็น $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ จะถูกเปลี่ยนเป็น $\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ โดยคูณด้วย 1.0368 จากนั้นนำค่าที่วัดได้มาคำนวณอัตราการหายใจของดินสะสมในรอบ 1 ปี

$$\begin{array}{l} \text{soil CO}_2 \text{ efflux} \\ (\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) \end{array} \times 1.0368 = \begin{array}{l} \text{Soil C efflux} \\ (\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}) \end{array} \quad (7)$$



รูปที่ 2-16 เครื่องวัดอัตราการหายใจของดิน (Soil CO₂ Flux System) รุ่น LI-8100[®] (LI-COR, Inc., Ltd., U.S.A.)



รูปที่ 2-17 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิดิน (T handle thermocouple) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินได้



รูปที่ 2-18 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำในดิน (Soil moisture sensor) รุ่น EC-5 (Decagon Devices, Inc.m U.S.A.) ซึ่งอ่านค่าที่วัดได้โดยใช้ ProCheck (Decagon Devices, Inc. U.S.A.)

ค่า R_h (Heterotrophic respiration) และ R_a (Autotrophic respiration) สามารถคำนวณได้จากข้อมูล ออกมาได้เนื่องจากอัตราหายใจเฉลี่ยสะสมใน Control (R_{cp}) และ Trench (R_{tp}) plot ดังนี้

$$R_{cp} = R_a + R_h \quad (8)$$

$$R_{tp} = R_h + R_d \quad (9)$$

โดยที่ R_d ได้แก่ Decomposing root-derived CO_2 efflux ซึ่งต้องใช้ข้อมูลอัตราการย่อยสลายของรากยาง (Epron *et al.*, 1999 และ Ngao *et al.*, 2007)

(4) การทำเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติ

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา

ผู้วิจัย ได้นำเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติขนาด 2 chamber ที่พัฒนา ร่วมกับ National Institute for Environmental Studies มาติดตั้งทดสอบการทำงานในสภาพแปลงจริงในประเทศไทย ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยติดตั้งภายในตู้ป้องกันการรบกวนจากสัตว์ภายในแปลง และติดตั้งปั๊มลมขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถทำงานได้ต่อเนื่อง ผู้วิจัยได้ตั้งให้เครื่องทำงานอัตโนมัติโดยเก็บข้อมูลสลับกันระหว่าง 2 chamber ทุกๆ 3 นาที โดยเริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่วันที่ 30 พฤษภาคม 2558 ภาพการติดตั้งเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติ แสดงในรูปที่ 2-18

Site ที่ 2 แปลงปลูกยางของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

ผู้วิจัย ได้สร้างชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติขนาด 8 chamber ที่พัฒนาโดยใช้เครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติขนาด 2 chamber เป็นต้นแบบ เพื่อใช้สำหรับวัดอัตราการหายใจของดิน ณ แปลงปลูกยางของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ และมี Time scale เดียวกับข้อมูลสมมูลคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยาง (รูปที่ 2-19)



รูปที่ 2-19 การติดตั้งเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติขนาด 2 chamber ที่พัฒนาร่วมกับ National Institute for Environmental Studies ในสภาพแปลงจริงในประเทศไทย ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา



รูปที่ 2-20 ระบบควบคุมการสู่มอากาศและ ระบบวัดการหายใจของดิน ที่ติดตั้งในกล่องกันกระแทก ของชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น สำหรับติดตั้ง ณ Site ที่ 2 แปลงปลูกยางของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

2.2.5 ข้อมูลประกอบอื่น ๆ

(1) การเปลี่ยนแปลงเส้นรอบวงโคนต้นยาง (Girth)

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Girth โดยการวัด Girth ที่ความสูง 1.5 เมตร จากพื้นดิน (พิศมัย และคณะ, 2554) โดย Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นยางอายุนานนั้น ดำเนินการเก็บข้อมูลทุก 6 เดือน ขณะที่ Site ที่ 2 แปลงปลูกยางของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งเป็นยางอายุน้อยจะดำเนินการเก็บข้อมูลทุก 3 เดือน

(2) การประเมินดัชนีพื้นที่ใบของพื้นที่ปลูกยางพารา (Stand leaf area index) จากข้อมูลชีวมวลของยางพาราที่ร่วงหล่นสู่พื้น (Litter trap) ของแปลงยางพารา

ดัชนีพื้นที่ใบ หรือ Leaf area index (LAI) เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญทางด้านโครงสร้างพืช (Plant canopy structure) เนื่องจากมีอิทธิพลต่อปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่พืชได้รับ และการแลกเปลี่ยนแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และพลังงานระหว่างต้นพืชและบรรยากาศ ดังนั้นดัชนีพื้นที่ใบจึงเป็นตัวตัวแปรสำคัญในแบบจำลองที่มีการเชื่อมโยงระหว่างพืชและปัจจัยสภาพแวดล้อม

การประเมินดัชนีพื้นที่ใบโดยใช้ข้อมูล Litter trap เป็นวิธีการวัดดัชนีพื้นที่ใบโดยตรง (Direct method) ที่ไม่ทำลายต้นยางพารา (Non-destructive method) ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การเก็บตัวอย่างใบที่ตกลงมาใน Litter trap ที่ติดตั้งไว้ และการวัดพื้นที่ใบ โดยทีมวิจัยวัดพื้นที่ใบด้วยวิธี

Gravimetric method ซึ่งเป็นวิธีการที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งของใบ และค่า Specific leaf area (SLA)

การเก็บข้อมูลชีวมวลของยางพาราที่ร่วงหล่นสู่พื้นด้วยวิธีการใช้ตาข่ายดัก (Litter trap) ในรอบปี โดยการติดตั้ง Litter trap ซึ่งทำจากตาข่ายขนาดกว้าง 1 m. ยาว 1 m. ลึก 50 cm. ติดตั้งเหนือพื้นดิน 1 m. ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแปลง (Eriksson et al. 2005)

เก็บรวบรวมชิ้นส่วนยางพาราที่ร่วงหล่นลงใน Litter trap ทุก 2-4 สัปดาห์ ต่อเนื่องตลอดฤดูกาล ตั้งแต่ต้นยางพารามีการแตกใบใหม่ จนกระทั่งใบร่วงจนหมด ชิ้นส่วนของยางพาราที่เก็บจาก Litter trap จะถูกนำมาอบแห้งในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาแยกออกเป็นชิ้นส่วนประเภทต่างๆ (Law et al. 2001) น้ำหนักแห้งของพื้นที่ใบในรอบ 1 ปีจะถูกนำมาคำนวณหาค่าดัชนีพื้นที่ใบของพื้นที่ปลูกยางพาราที่มากที่สุดของแปลงปลูกยางที่เก็บข้อมูล Litter trap มา ส่วนความแปรปรวนของดัชนีพื้นที่ใบในรอบปีที่ศึกษานั้น จะถูกคำนวณย้อนกลับด้วยดัชนีพื้นที่ใบสูงสุดที่คำนวณได้ และน้ำหนักแห้งของตัวอย่างใบยางพาราที่บันทึกไว้ในแต่ละครั้ง

การหาค่า Specific Leaf Area (SLA, สัดส่วนของพื้นที่ใบต่อน้ำหนักใบ) โดยการสุ่มเก็บใบที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว จำนวน 10 ใบจากตำแหน่งต่างๆ ในเรือนพุ่มยางพารา และสุ่มเก็บตัวอย่างจากต้นยางพาราในตำแหน่งต่างๆ กันในแปลงปลูก จำนวน 20 ตำแหน่ง นำตัวอย่างใบทั้งหมดมาวัดพื้นที่ใบโดยใช้เทคนิคการสแกนด้วยสแกนเนอร์ และคำนวณหาพื้นที่ใบโดยนับจำนวนพิกเซลของใบในภาพและนำไปคูณกับอัตราส่วนของขนาดพิกเซลต่อขนาดจริง จากนั้นจึงนำไปอบแห้ง ในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำตัวอย่างใบที่ผ่านการอบแล้วไปชั่งน้ำหนักใบ (น้ำหนักแห้ง) และนำค่าที่ได้ไปคำนวณ SLA จากสมการ (Eriksson et al. 2005)

$$SLA = \frac{\sum A_i}{\sum W_i} \quad (10)$$

โดย SLA = Specific Leaf Area
A = พื้นที่ใบของใบที่ i
W = น้ำหนักแห้งของใบที่ i

การคำนวณค่าดัชนีพื้นที่ใบของแปลงปลูก โดยใช้ น้ำหนักแห้งของใบรวมทั้งปี ที่ได้จาก Litter trap มาคำนวณหาค่าดัชนีพื้นที่ใบจากความสัมพันธ์กับ SLA (Eriksson et al. 2005 และ Law et al. 2001) ที่ได้จากสมการที่ 10

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา

ผู้วิจัยติดตั้งตาข่ายดัก Litter trap บริเวณต่างๆ กันในแปลงทดลอง จำนวน 20 ตำแหน่ง โดยมีตำแหน่งที่ติดตั้งแบบต่างๆ ได้แก่ ติดตั้งระหว่างต้นในแถว ติดตั้งระหว่างแถว ในแนวต้น และติดตั้งระหว่างแถวระหว่างต้น ภาพการติดตั้งตาข่ายดักซากพืช แสดงใน รูปที่ 2-18

การหาค่า SLA ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ณ แปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา พบว่า เมื่อน้ำหนักใบเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ใบก็เพิ่มขึ้นตาม และสามารถใช้น้ำหนักแห้งประเมินพื้นที่ใบได้จากสมการที่ 11 โดยน้ำหนักแห้งสามารถใช้ประเมินพื้นที่ใบได้ที่มีความเชื่อมั่น 68%

$$A_i = 99.901W_i + 7.2309 \quad (11)$$

โดย A = พื้นที่ใบของใบที่ i
W = น้ำหนักแห้งของใบที่ i

Site ที่ 2 แปลงปลูกยางของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

ผู้วิจัยสุ่มติดตั้ง Litter trap บริเวณต่างๆ กันในแปลงทดลองย่อยทั้ง 3 แปลง จำนวน 9 ตำแหน่งต่อแปลงทดลองย่อย รวมทั้งหมด 27 ตำแหน่ง โดยมีตำแหน่งที่ติดตั้งแบบต่างๆ ได้แก่ ติดตั้งระหว่างต้นในแถว ติดตั้งระหว่างแถว ในแนวต้น และติดตั้งระหว่างแถว-ระหว่างต้น (รูปที่ 2-19)

การหาค่า SLA ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ณ แปลงปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ พบว่า เมื่อน้ำหนักใบเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ใบก็เพิ่มขึ้นตาม และสามารถใช้น้ำหนักแห้งประเมินพื้นที่ใบได้จากสมการที่ 12 โดยน้ำหนักแห้งสามารถใช้ประเมินพื้นที่ใบได้ที่ความเชื่อมั่น 98%

$$A_i = 137.66W_i + 0.6632 \quad (12)$$

โดย A = พื้นที่ใบของใบที่ i
W = น้ำหนักแห้งของใบที่ i



รูปที่ 2-21 การติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา



รูปที่ 2-22 แผนที่ตั้งแสดงตำแหน่งที่ติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองย่อย ในแปลงปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ (● ต้นยางพารา, ■ Litter trap) และภาพแสดงการติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองย่อย ในแปลงปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ

(3) การวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและอัตราการหายใจของวัชพืชในสวนยางพารา

การวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของเรือนพุ่มวัชพืช ดำเนินการในสวนยางพารา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ เนื่องจากเป็นแปลงยางอายุน้อย เรือนพุ่มยางยังไม่ชนกัน ทำให้วัชพืชสามารถเจริญเติบโตได้ ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของเรือนพุ่มวัชพืชที่ใช้เป็นระบบเปิด การดำเนินการทดลอง เริ่มจากการเลือกกลุ่มของวัชพืชที่เป็นตัวแทนของวัชพืชส่วนใหญ่ในแปลงปลูกยาง โดยติดตั้ง Chamber วัดใน 3 พื้นที่ ได้แก่ plot A, B, C พื้นที่ละ 3 Chambers วัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในช่วงเวลา 00.00 – 24.00 น. ตลอด 24 ชั่วโมง ใช้ท่อพีวีซีเป็นโครงของ Chamber และสร้าง Chamber ด้วยแผ่นพลาสติก PE ความหนา 1 มิลลิเมตร ขนาด 50 x 50 x 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ครอบวัชพืชที่ต้องการวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (ภาพที่ 2-23) ดูดอากาศจาก Buffer ขนาด 1.5 ลูกบาศก์เมตร เข้ามาใน Chamber เพื่อลดความผันผวนของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศก่อนเข้าสู่ Chamber วัดอัตราการไหลของอากาศเข้า Chamber โดยใช้เครื่องวัดความเร็วลม (air velocity transducer) รุ่น 8455-03 (TSI Inc, U.S.A) เสียบบท่อก๊าซเข้า โดยให้ sensor วัดความเร็วลมหันไปทางด้านลมเข้า ปรับความเร็วลมให้ Chamber ตั้งพอสมควร ดูดตัวอย่างอากาศเข้าและออกจาก Chamber เข้าเครื่องวัดอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂/H₂O Analysis) รุ่น LI-840 ทุก 10 วินาที วัดแสงโดยใช้หัววัดแสง รุ่น Li-189 (light quantum sensor) วัดความเข้มแสงในรอบวันที่ทำการทดลอง ซึ่งความเข้มแสงที่ได้จากการวัดหัววัดแสงที่อยู่ในระดับเดียวกับทรงพุ่ม เป็นความเข้มแสงในช่วงคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity and temperature probe) รุ่น Humitter 50 Y (Vaisala, Inc., U.S.A.) วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศออกจาก Chamber โดยวางเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ไว้บริเวณปากท่อก๊าซออกจาก Chamber นำข้อมูลที่ได้จากการวัดทั้งหมดไปคำนวณหาอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของเรือนพุ่มวัชพืช

การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ (Ue, $\mu\text{mol s}^{-1}$) ตามสมการ (Raymond, 2002)

$$U_e = \frac{v \times \frac{22}{7} \times r^2 \times 10^9}{22.4} \quad (13)$$

โดย V คือ ความเร็วลมภายในท่อนำอากาศเข้า Chamber (m s^{-1}) และ r คือ รัศมีของท่อนำอากาศเข้า Chamber (m)

คำนวณหาอัตราการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิ (A) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) หรืออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของเรือนฟุ่ม (P_{canopy}) ตลอด 24 ชั่วโมง ทุกๆ 10 วินาที ตามสมการ (นฤนาท, 2546)

$$P_{\text{canopy}} = \frac{U_e \times (C_e - C_c)}{100S} \quad (14)$$

โดย P_{canopy} คือ อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของเรือนฟุ่ม ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

U_e คือ อัตราการเคลื่อนที่ของอากาศที่ไหลเข้าสู่ chamber ($\mu\text{mol s}^{-1}$)

C_c คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหลเข้า Chamber ($\mu\text{mol CO}_2$ per mole air)

C_e คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไหลออก Chamber ($\mu\text{mol CO}_2$ per mole air)

S คือ พื้นที่ใบ (m^2)



รูปที่ 2-23 การวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของเรือนฟุ่มของวัชพืชในสวนยางพารา

(4) ผลผลิตยางพารา

แปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นแปลงยางอายุมากที่สามารถให้ผลผลิตน้ำยางได้ ระบบกริดที่ใช้เป็นระบบกริดครึ่งลำต้นวันเว้นวัน ($1/2 \text{ s d}/2$) โดยมีรอบฤดูกริดเริ่มตั้งแต่เดือน พฤษภาคม และสิ้นสุดในเดือนมกราคม ของทุกปี และจะพักต้นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์-เดือนเมษายน ผลผลิตที่ใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์นั้น เป็นผลผลิตยางก้อนถ้วยแห้ง (น้ำหนักที่แสดงเป็นผลผลิตกิโลกรัมต่อไร่ต่อปี และน้ำหนักยางก้อนนั้นได้หักความชื้นจากน้ำหนักที่ได้ 15% แล้ว)

2.3 ผลการศึกษาสมดุลคาร์บอนของสวนยางพารา

2.3.1 ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และชุดอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวิจัย

ดำเนินการตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และสอบเทียบค่า (Calibrate) นั้น ชุดอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวิจัยของพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 site ไปแล้ว 2 ครั้งในรอบปีการทดลองที่ผ่านมา

2.3.2 ข้อมูลจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยาง

ข้อมูลจุลภูมิอากาศต่างๆ ได้แก่ ความเข้มแสงสะสมต่อวัน อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำฝน ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation; R_g) และปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, R_n) ของพื้นที่ศึกษา 2 Site ได้แก่ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อำเภopakคาคัด จังหวัดบึงกาฬ เป็นข้อมูลตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558

(1) ความเข้มแสงสะสม

ความเข้มแสงสะสมต่อวันในพื้นที่ปลูกยางพารา พบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีความเข้มแสงสะสมอยู่ในช่วง $2.67 - 25.05 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ความเข้มแสงสะสมต่อวันในปี 2556 และ 2557 มีความเข้มแสงสะสมอยู่ในช่วง $2.67 - 24.32$ และ $6.67-25.05 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีความเข้มแสงสะสมเท่ากับ $5,418$ และ $5,725 \text{ mol m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ตามลำดับ ในปี 2556 ค่าความเข้มแสงสะสมต่อวันมีค่าต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 28 มกราคม 2556 และ 8 พฤษภาคม 2556 และในปี 2557 ค่าความเข้มแสงสะสมต่อวันมีค่าต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 28 กรกฎาคม 2557 และ 11 สิงหาคม 2557 สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลความเข้มแสงสะสม ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏความเข้มแสงสะสมอยู่ในช่วง $4.77 - 23.65 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และมีความเข้มแสงสะสมเท่ากับ $4,324 \text{ mol m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ (รูปที่ 2-24)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีความเข้มแสงสะสมอยู่ในช่วง $2.28 - 24.21 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ความเข้มแสงสะสมต่อวันในปี 2556 และ 2557 มีความเข้มแสงสะสมอยู่ในช่วง $2.28 - 24.21$ และ $3.20-23.60 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ มีความเข้มแสงสะสมเท่ากับ $5,625$ และ $5,656 \text{ mol m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ตามลำดับ ในปี 2556 ค่าความเข้มแสงสะสมมีค่าต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 3 มีนาคม 2556 และ 12 สิงหาคม 2556 และในปี 2557 ค่าความเข้มแสงสะสมมีค่าต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 19 กรกฎาคม 2557 และ 1 มิถุนายน 2557 สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลความเข้มแสงสะสม ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏความเข้มแสงสะสมอยู่ในช่วง $3.00 - 23.40 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และมีความเข้มแสงสะสมเท่ากับ $4,141 \text{ mol m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ (รูปที่ 2-24)

(2) อุณหภูมิอากาศ

อุณหภูมิเฉลี่ยต่อวัน จากการศึกษพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง $19.87 - 31.30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และสำหรับปี 2556 และ 2557 ปรากฏค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง $19.87 - 31.14$ และ $19.87-30.37 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และมีค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 27.18 และ 27.29°C

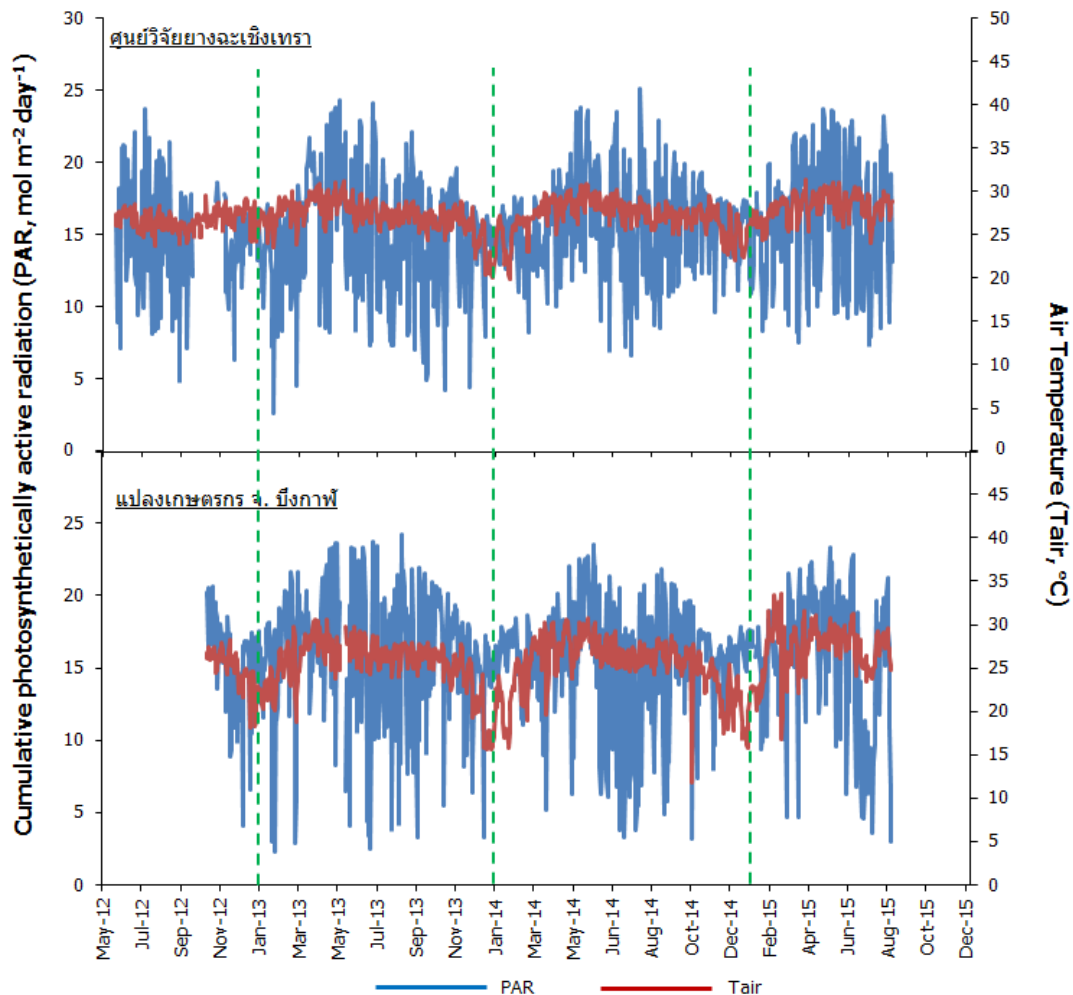
ตามลำดับ ในปี 2556 อุณหภูมิเฉลี่ยต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 18 ธันวาคม 2556 และ 15 พฤษภาคม 2556 ตามลำดับ และในปี 2557 อุณหภูมิเฉลี่ยต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 23 มกราคม 2557 และ 21 พฤษภาคม 2557 ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลอุณหภูมิอากาศตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 22.1 – 31.3°C และมีอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 27.86°C (รูปที่ 2-24)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 9.84 – 33.51°C และสำหรับปี 2556 และ 2557 ปรากฏค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 15.62 – 30.59 และ 11.84 - 30.78°C ตามลำดับ และมีค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 25.48 และ 25.54°C ตามลำดับ ในปี 2556 พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 21 ธันวาคม 2556 และ 3 เมษายน 2556 ตามลำดับ และในปี 2557 พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 30 ตุลาคม 2557 และ 23 พฤษภาคม 2557 ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 9.84 – 33.51°C และมีอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 26.17°C (รูปที่ 2-24)

(3) ความชื้นสัมพัทธ์

ค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวัน จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 24.1 – 99.8% และสำหรับปี 2556 และ 2557 ปรากฏค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 50.2 – 98.7 และ 49.4 - 96.6% ตามลำดับ และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 81.7 และ 81.5% ตามลำดับ ในปี 2556 ความชื้นสัมพัทธ์ต่อวันต่ำสุดปรากฏในวันที่ 18 มกราคม 2556 ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่อวันสูงสุดปรากฏในวันที่ 20 กันยายน 2556 และ 16 ตุลาคม 2556 และในปี 2557 ความชื้นสัมพัทธ์ต่อวันต่ำสุดปรากฏในวันที่ 25 มกราคม 2557 ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่อวันสูงสุดปรากฏในวันที่ 19 กรกฎาคม 2557 สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 24.1 – 99.8% และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 78.5% (รูปที่ 2-25)

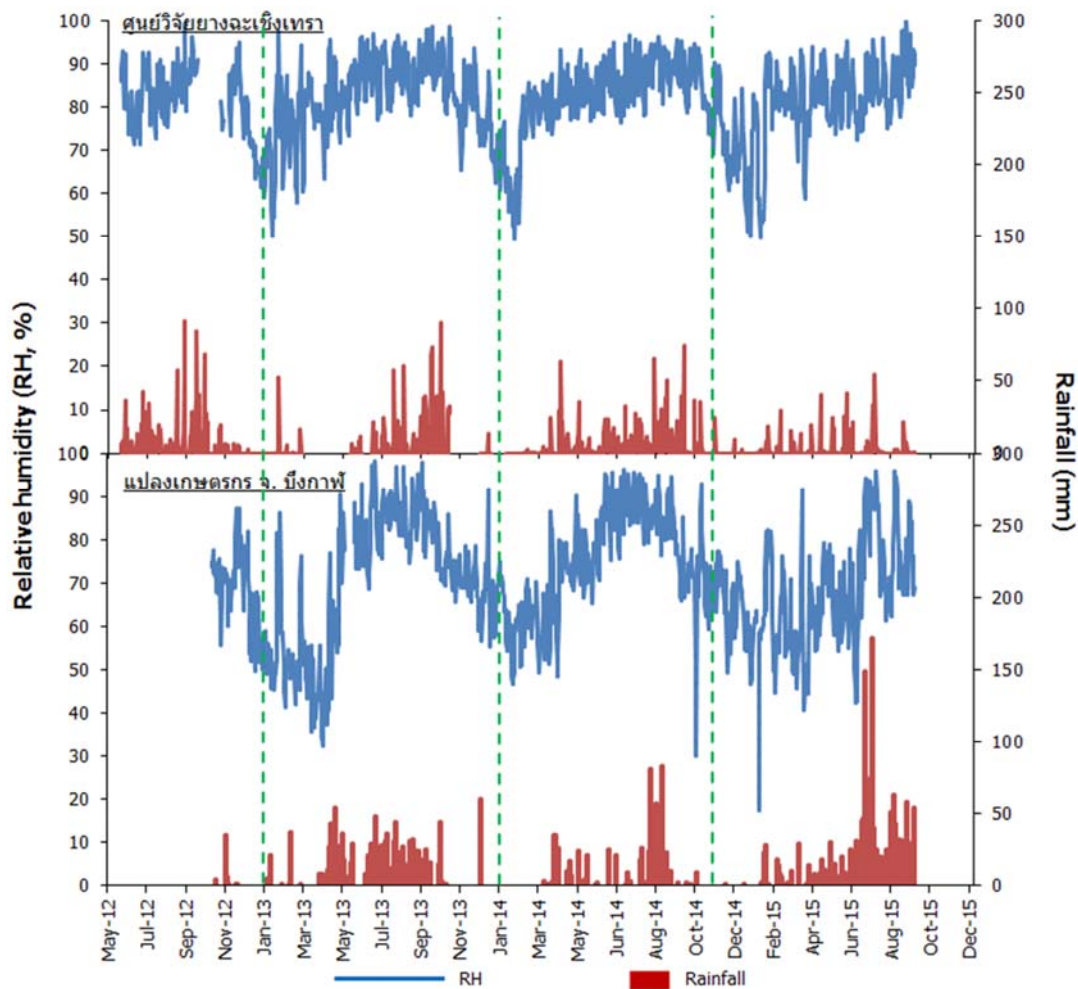
Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 17.6 – 98.40 % และสำหรับปี 2556 และ 2557 ปรากฏค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 27.4 – 98.4 และ 30.2 - 96.3% ตามลำดับ และค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อปีมีค่าเท่ากับ 69.2 และ 74.0% ตามลำดับ ในปี 2556 ความชื้นสัมพัทธ์ต่อวันต่ำสุดปรากฏในวันที่ 19 พฤษภาคม 2556 ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่อวันสูงสุดปรากฏในวันที่ 26 มิถุนายน 2556 ขณะที่ ในปี 2557 ความชื้นสัมพัทธ์ต่อวันต่ำสุดปรากฏในวันที่ 30 ตุลาคม 2557 ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่อวันสูงสุดปรากฏในวันที่ 12 กรกฎาคม 2557 สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 17.5 – 96.0% และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 66.2% (รูปที่ 2-25)



ข้อมูล	Site	2555	2556	2557	2558
PAR	1	2,488	5,418	5,725	4,324
	2	1,175	5,625	5,656	4,141
Tair	1	26.70	27.18	27.29	27.86
	2	25.42	25.48	25.54	26.17

หมายเหตุ เป็นข้อมูลความเข้มแสงสะสมต่อปี (PAR, mol m⁻² year⁻¹) และอุณหภูมิเฉลี่ยต่อปี (Tair, °C)

รูปที่ 2-24 ความเข้มแสงสะสม (Cumulative photosynthetically active radiation, PAR, mol m⁻² day⁻¹) และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (Tair, °C) ของแปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางยะเชิงเทรา จ. ยะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)



ข้อมูล	Site	2555	2556	2557	2558
RH	1	81.7	81.7	81.5	78.5
	2	70.1	69.2	74.0	66.2
Rain	1	1,250	1,215	1,282	585
	2	72	1,441	1,545	1,481

หมายเหตุ เป็นข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายปี (RH, %) และ ปริมาณฝนสะสมรายปี (Rain, mm)

รูปที่ 2-25 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (Relative humidity หรือ RH, %) และปริมาณน้ำฝนรวมรายวัน (Rainfall หรือ Rain, mm) ของแปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)

(4) ปริมาณน้ำฝน

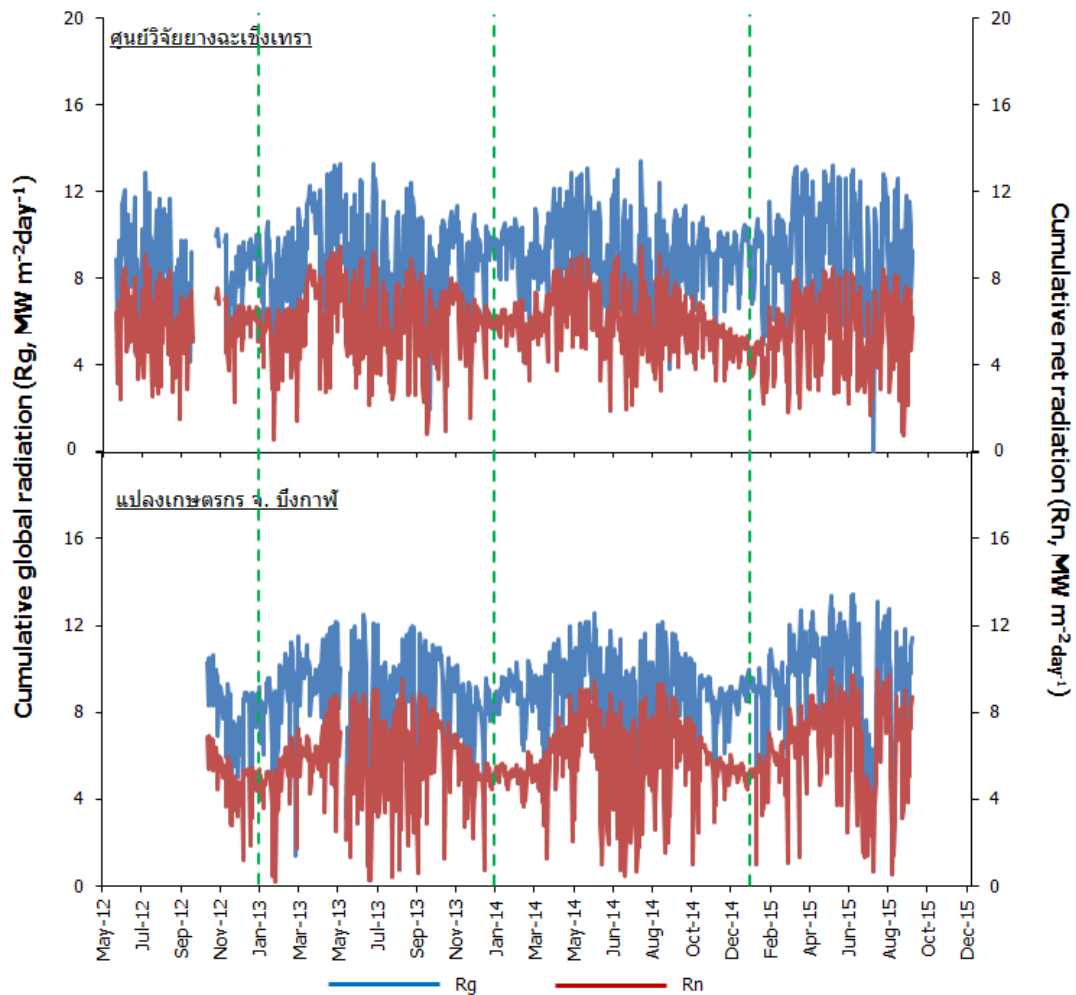
จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 และสำหรับปี 2556 และ 2557 ซึ่งมีข้อมูลครบทั้งปีนั้น ปรากฏว่ามีปริมาณน้ำฝนสะสมเท่ากับ 1,316 และ 1,282 mm ซึ่งในปี 2556 พบว่า มีปริมาณฝนสะสมต่ำสุดในเดือนเมษายนและพฤศจิกายน ขณะที่มียค่าสะสมสูงสุดในเดือนกันยายน และในปี 2557 พบว่า มีปริมาณฝนสะสมต่ำสุดในเดือนมกราคม และสูงสุดในเดือนกันยายน สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลปริมาณน้ำฝนตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏปริมาณฝนสะสม 585 mm (รูปที่ 2-25)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 และสำหรับปี 2556 และ 2557 ซึ่งมีข้อมูลครบทั้งปีนั้น ปรากฏว่ามีปริมาณน้ำฝนสะสมเท่ากับ 1,441 และ 1,568 mm ซึ่งในปี 2556 พบว่า มีปริมาณฝนสะสมต่ำสุดในเดือนพฤศจิกายน ขณะที่มียค่าสะสมสูงสุดในเดือนกรกฎาคม และในปี 2557 พบว่า มีปริมาณฝนสะสมต่ำสุดในเดือนกุมภาพันธ์ และสูงสุดในเดือนกรกฎาคม สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลปริมาณน้ำฝน ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏปริมาณฝนสะสม 1,481 mm (รูปที่ 2-25)

(5) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Rg)

ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวมต่อวัน จากการศึกษพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมอยู่ในช่วง $1.36 - 13.40 \text{ MW.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อวันในปี 2556 และ 2557 ซึ่งมีข้อมูลครบทั้งปีนั้น มีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อวันอยู่ในช่วง $1.36 - 13.29$ และ $3.72 - 13.40 \text{ MW.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อปีเท่ากับ 3,169 และ 3,314 MW.m^{-2} ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ในปี 2556 นั้น ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมมีค่าต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในเดือนมกราคม และพฤษภาคม ตามลำดับ ขณะที่ในปี 2557 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมมีค่าต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในเดือนกรกฎาคม และสิงหาคม ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวมตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อวันอยู่ในช่วง $2.65 - 13.18 \text{ MW m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และมีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ $2,477 \text{ MW.m}^{-2}$ (รูปที่ 2-26)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อวันอยู่ในช่วง $1.01 - 13.40 \text{ MW.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อวันในปี 2556 และ 2557 ซึ่งมีข้อมูลครบทั้งปีนั้น มีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อวันอยู่ในช่วง $1.01 - 12.49$ และ $1.70 - 12.60 \text{ MW.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อปีเท่ากับ 3,026 และ 3,142 MW.m^{-2} ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ในปี 2556 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมมีค่าต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในเดือนมกราคม และมิถุนายน ตามลำดับ ขณะที่ในปี 2557 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมมีค่าต่ำสุดปรากฏในเดือนกรกฎาคมและตุลาคม ส่วนปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมสูงสุดนั้น ปรากฏในเดือนมิถุนายน สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวม ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อวันอยู่ในช่วง $1.70 - 13.40 \text{ MW m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และมีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ $2,472 \text{ MW.m}^{-2}$ (รูปที่ 2-26)



ข้อมูล	Site	2555	2556	2557	2558
Rg	1	1,392	3,169	3,314	2,477
	2	603	3,026	3,142	2,472
Rn	1	981	2,163	2,209	1,479
	2	380	1,978	2,117	1,675

หมายเหตุ เป็นข้อมูลปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อปี (Global solar radiation หรือ R_g , $\text{MW m}^{-2}\text{year}^{-1}$) และปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อปี (Net radiation หรือ R_n , $\text{MW m}^{-2}\text{year}^{-1}$)

รูปที่ 2-26 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation หรือ R_g , $\text{MW m}^{-2}\text{day}^{-1}$) และปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation หรือ R_n , $\text{MW m}^{-2}\text{day}^{-1}$) สะสมต่อวันของแปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)

(5) ปริมาณรังสีสุทธิ (Rn)

ปริมาณรังสีสุทธิสะสม จากการศึกษพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่าปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อวันอยู่ในช่วง $0.54 - 9.47 \text{ MW.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ปริมาณรังสีสุทธิสะสมในปี 2556 และ 2557 ซึ่งมีข้อมูลครบทั้งปีนั้น มีปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อวันอยู่ในช่วง $0.54 - 9.47$ และ $1.93 - 9.46 \text{ MW.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ และในช่วงระยะเวลา 1 ปี มีค่าปริมาณรังสีสุทธิสะสมเท่ากับ $2,163$ และ $2,208 \text{ MW.m}^{-2}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ในปี 2556 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมมีค่าต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในเดือนมีนาคม และสิงหาคม ตามลำดับ ขณะที่ในปี 2557 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมมีค่าต่ำสุดปรากฏในเดือนกรกฎาคม ส่วนปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมสูงสุดนั้น ปรากฏในเดือนมิถุนายน สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลปริมาณรังสีสุทธิตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่าปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อวันอยู่ในช่วง $0.78 - 8.48 \text{ MW m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และมีปริมาณรังสีสุทธิสะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ $1,479 \text{ MW.m}^{-2}$ (รูปที่ 2-26)

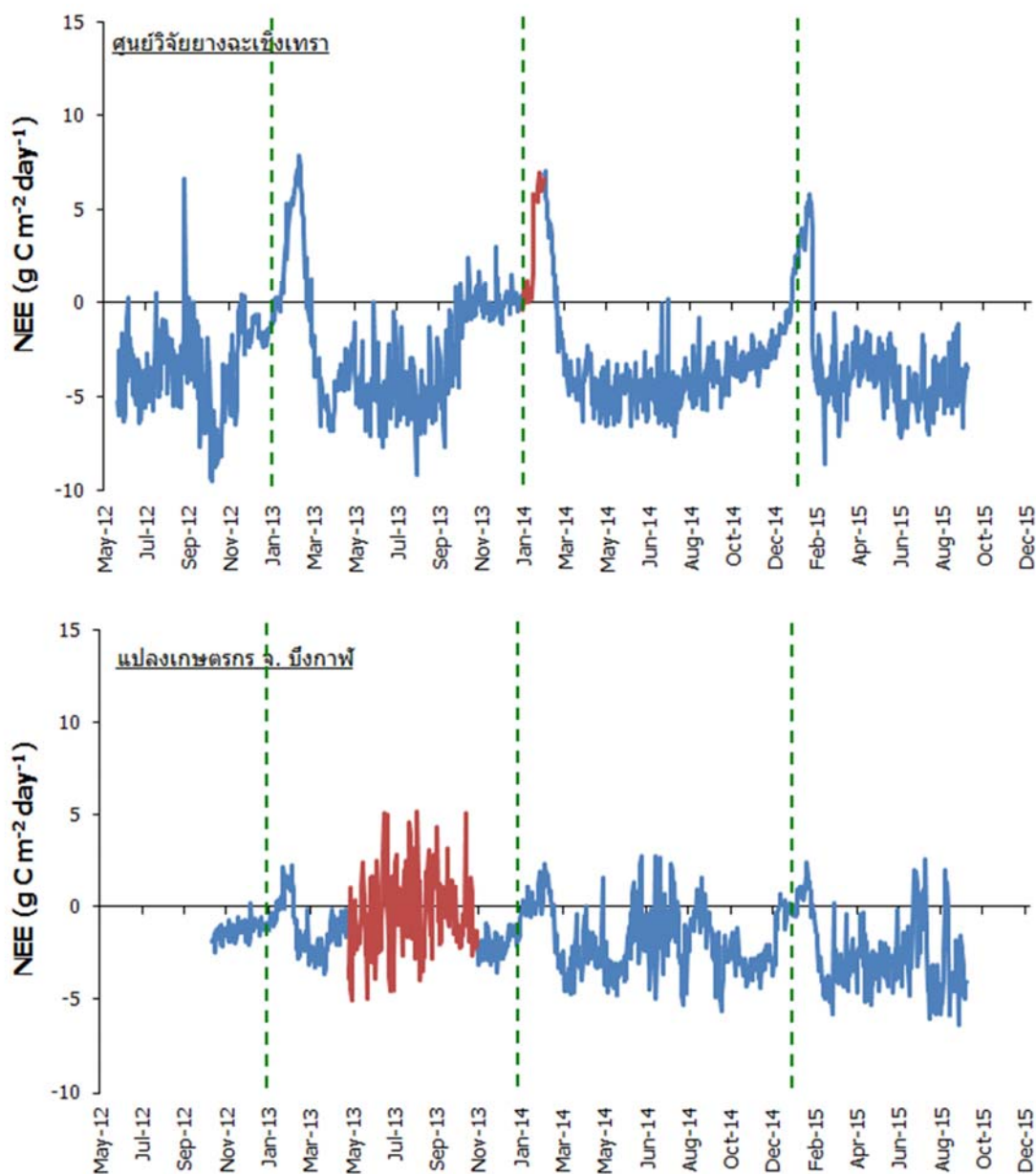
Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อวันอยู่ในช่วง $0.03 - 9.90 \text{ MW.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ปริมาณรังสีสุทธิในปี 2556 และ 2557 ซึ่งมีข้อมูลครบทั้งปีนั้น มีปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อวันอยู่ในช่วง $0.03 - 9.51$ และ $0.40 - 9.40 \text{ MW.m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ และในช่วงระยะเวลา 1 ปี มีค่าปริมาณรังสีสุทธิสะสมเท่ากับ $1,978$ และ $2,117 \text{ MW.m}^{-2}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ในปี 2556 ปริมาณรังสีสุทธิสะสมมีค่าต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในเดือนมีนาคม และสิงหาคม ตามลำดับ ส่วนปี 2557 ปริมาณรังสีสุทธิสะสมมีค่าต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในเดือนกรกฎาคม และมิถุนายน ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลปริมาณรังสีสุทธิตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่าปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อวันอยู่ในช่วง $0.50 - 9.90 \text{ MW m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และมีปริมาณรังสีสุทธิสะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ $1,675 \text{ MW.m}^{-2}$ (รูปที่ 2-26)

2.3.3 ข้อมูลสมดุลคาร์บอน (Carbon flux) ของพื้นที่ปลูกยาง

(1) NEE (Net Ecosystem Exchange)

NEE เป็นค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธี Eddy Covariance (Goulden et al., 1996) จากการศึกษพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึง 30 กันยายน 2558 มีค่า NEE สะสมต่อวัน อยู่ในช่วง -9.47 ถึง $7.85 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่ามีค่า NEE สะสมต่อวัน อยู่ในช่วง -9.15 ถึง 7.85 และ -7.05 ถึง $7.05 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า NEE สะสมในรอบ 1 ปี เท่ากับ $-1,224$ และ $-1,773 \text{ kg C ra}^{-2}$ ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูล NEE ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า NEE สะสมต่อวันอยู่ในช่วง -8.54 ถึง $5.83 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และมีปริมาณ NEE สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ $1,353 \text{ kg C ra}^{-2}$ (รูปที่ 2-27)

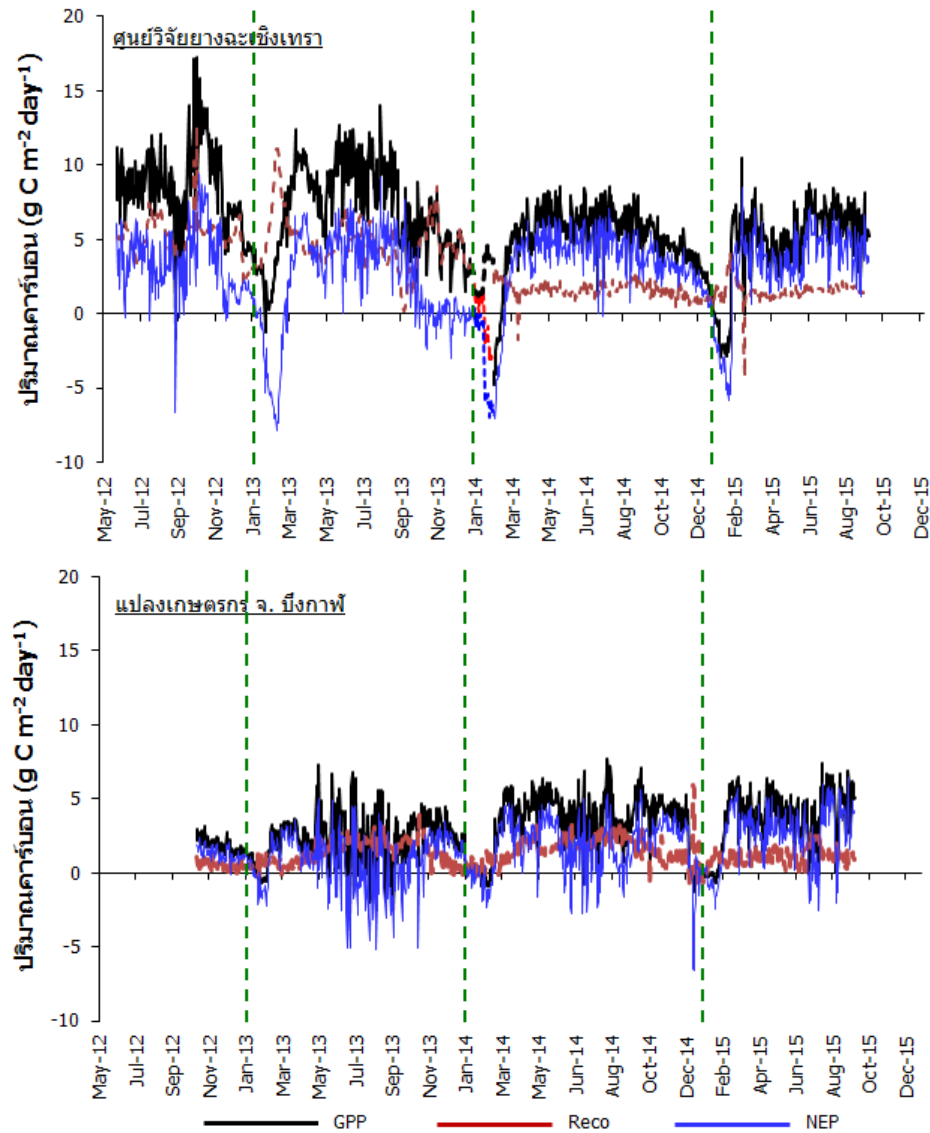
Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่า NEE สะสมต่อวัน อยู่ในช่วง -5.62 ถึง $2.76 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่ามีค่า NEE สะสมต่อวัน อยู่ในช่วง -5.01 ถึง 5.15 และ -5.62 ถึง $2.76 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า NEE สะสมในรอบ 1 ปี เท่ากับ -504 และ $-1,110 \text{ kg C ra}^{-2}$ ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูล NEE ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า NEE สะสมต่อวันอยู่ในช่วง -6.41 ถึง $6.64 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ และมีปริมาณ NEE สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ 980 kg C ra^{-2} (รูปที่ 2-27)



ข้อมูล	Site	2555	2556	2557	2558
NEE	1	-1,201	-1,223	-1,772	-1,353
	2	-156	-503	-1,112	-980

หมายเหตุ เป็นข้อมูล NEE สะสมต่อปี (Net ecosystem exchange, $\text{g C rai}^{-1} \text{year}^{-1}$)

รูปที่ 2-27 ค่า NEE (Net ecosystem exchange, $\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$) สะสมต่อวัน และสะสมต่อปี (แสดงในตาราง มีหน่วยเป็น $\text{g C rai}^{-2} \text{year}^{-1}$) ของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)



ข้อมูล	Site	2555	2556	2557	2558
GPP	1	2,963	3,979	2,771	2,015
	2	229	1,307	2,053	1,425
Reco	1	1,763	2,755	999	662
	2	73	804	941	446
NEP	1	1,201	1,223	1,772	1,353
	2	156	503	1,112	980

หมายเหตุ เป็นข้อมูล GPP สะสมต่อปี (g C m⁻² year⁻¹) Reco สะสมต่อปี (g C m⁻² year⁻¹) และ NEP สะสมต่อปี (g C m⁻² year⁻¹)

รูปที่ 2-28 ค่า GPP (Gross primary production, g C m⁻² day⁻¹) Reco (Ecosystem respiration, g C m⁻² day⁻¹) และ NEP (Net Ecosystem Production, g C m⁻² day⁻¹) สะสมต่อวันของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกรร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)

(2) GPP, R_{eco} และ NEP

การศึกษาสมดุลคาร์บอนของระบบนิเวศยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. การดำเนินงานวิจัย วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึง 30 กันยายน 2558 พบว่า ข้อมูล GPP (Gross Primary Production), R_{eco} (Ecological Respiration) และ NEP (Net Ecosystem Production) ซึ่งประเมินได้จาก ข้อมูล NEE นั้น มีค่าสะสมต่อวันอยู่ในช่วง -4.79 ถึง 17.24, 0.14 ถึง 12.63 และ -7.85 ถึง 9.47 $g\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับข้อมูลสมดุลคาร์บอนในปี 2556 มีค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมต่อวันอยู่ในช่วง ตั้งแต่ -1.23 ถึง 13.99, 0.14 ถึง 11.12 และ -7.85 ถึง 9.19 $g\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$ ตามลำดับ ค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมในรอบ 1 ปี มีค่าเท่ากับ 3,979.0 2,755.4 และ 1,223.6 $kg\ C.rai^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับปี 2557 พบว่า ค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมต่อวันอยู่ในช่วงตั้งแต่ -4.79 ถึง 8.60, 0.34 ถึง 4.55 และ -7.05 ถึง 7.05 $g\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$ ตามลำดับ ค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมในรอบ 1 ปี มีค่าเท่ากับ 2,778.6 1,006.8 และ 1,771.8 $kg\ C.rai^{-1}$ ตามลำดับ ในปี 2558 นั้น มีข้อมูลสมดุลคาร์บอนได้ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 โดยค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมต่อวันอยู่ในช่วงตั้งแต่ -2.88 ถึง 10.45, 0.24 ถึง 4.18 และ -5.83 ถึง 8.54 $g\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$ ตามลำดับ ค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมในรอบ 9 เดือน มีค่าเท่ากับ 2,028.7 675.9 และ 1,352.8 $kg\ C.rai^{-1}$ ตามลำดับ (รูปที่ 2-28 และตารางที่ 2-3)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึง วันที่ 30 กันยายน 2558 พบว่า ข้อมูล GPP, R_{eco} และ NEP มีค่าสะสมต่อวันอยู่ในช่วง -2.71 ถึง 7.66, 0.01 ถึง 5.95 และ -6.64 ถึง 6.41 $g\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับข้อมูลสมดุลคาร์บอนในปี 2556 มีค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมต่อวันอยู่ในช่วงตั้งแต่ -2.71 ถึง 7.34, 0.03 ถึง 3.91 และ -5.15 ถึง 5.01 $g\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$ ตามลำดับ ค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมในรอบ 1 ปี มีค่าเท่ากับ 1,306.8 804.3 และ 502.5 $kg\ C.rai^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับปี 2557 พบว่า ค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมต่อวันอยู่ในช่วงตั้งแต่ -0.88 ถึง 7.66, 0.08 ถึง 3.48 และ -2.76 ถึง 5.62 $g\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$ ตามลำดับ ค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมในรอบ 1 ปี มีค่าเท่ากับ 2,053.5 941.4 และ 1,112.1 $kg\ C.rai^{-1}$ ตามลำดับ ในปี 2558 นั้น มีข้อมูลสมดุลคาร์บอนได้ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 โดยค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมต่อวันอยู่ในช่วงตั้งแต่ -1.33 ถึง 7.44, 0.01 ถึง 5.95 และ -6.64 ถึง 6.41 $g\ C\ m^{-2}\ day^{-1}$ ตามลำดับ ค่า GPP, R_{eco} และ NEP สะสมในรอบ 9 เดือน มีค่าเท่ากับ 1,425.5 445.6 และ 979.9 $kg\ C.rai^{-1}$ ตามลำดับ (รูปที่ 2-28 และตารางที่ 2-3)

ตารางที่ 2-2 แสดงค่าสะสมของ GPP (Gross primary production) R_{eco} (Ecosystem respiration) และ NEP (Net Ecosystem Production) ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558)

ปี	เดือน	GPP ($kg\ C.rai^{-1}$)	R_e ($kg\ C.rai^{-1}$)	NEP ($kg\ C.rai^{-1}$)
2555	มิถุนายน	417.2	242.7	174.5
	กรกฎาคม	460.9	253.4	207.5
	สิงหาคม	431.5	281.4	150.1
	กันยายน	344.2	217.2	127.0
	ตุลาคม	611.7	300.4	311.4
	พฤศจิกายน	398.7	246.7	152.0
	ธันวาคม	298.9	220.4	78.5
	รวม	2,963.1	1,762.2	1,201.0

ปี	เดือน	GPP (kg C.raí ⁻¹)	R _e (kg C.raí ⁻¹)	NEP (kg C.raí ⁻¹)
2556	มกราคม	142.5	171.6	-29.1
	กุมภาพันธ์	154.3	372.7	-218.4
	มีนาคม	457.8	272.5	185.3
	เมษายน	413.2	201.3	211.9
	พฤษภาคม	440.0	219.9	220.1
	มิถุนายน	482.6	263.0	219.6
	กรกฎาคม	453.2	239.4	213.8
	สิงหาคม	477.3	209.9	267.4
	กันยายน	244.3	91.0	153.3
	ตุลาคม	301.5	297.6	3.9
	พฤศจิกายน	225.4	224.4	1.0
	ธันวาคม	186.9	192.1	-5.2
	รวม	3,979.0	2,755.4	1,223.6
2557	มกราคม ^{1/}	-29.1	129.8	-158.9
	กุมภาพันธ์	19.0	102.7	-83.7
	มีนาคม	285.9	74.0	211.9
	เมษายน	296.5	85.0	211.5
	พฤษภาคม	312.1	81.4	230.7
	มิถุนายน	307.0	71.4	235.6
	กรกฎาคม	305.9	77.5	228.4
	สิงหาคม	320.4	84.1	236.3
	กันยายน	291.1	103.0	188.1
	ตุลาคม	266.1	82.7	183.4
	พฤศจิกายน	217.8	63.7	154.1
	ธันวาคม	185.9	51.5	134.4
	รวม	2,778.6	1,006.8	1,771.8
2558	มกราคม	67.4	56.8	10.6
	กุมภาพันธ์	19.0	102.5	-83.5
	มีนาคม	290.2	78.9	211.3
	เมษายน	230.4	56.5	173.9
	พฤษภาคม	215.7	62.3	153.4
	มิถุนายน	280.9	71.9	209.0
	กรกฎาคม	320.1	82.4	237.7
	สิงหาคม	328.1	86.0	242.1
	กันยายน	276.9	78.6	198.3
	รวม	2,028.7	675.9	1,352.8
รวมทั้งสิ้น		11,749.4	6,200.3	5,549.2

^{1/} เดือนมกราคม 2557 ไม่สามารถดำเนินการเก็บข้อมูลได้ เนื่องจากเครื่องวัดปริมาณไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเสียหายต้องส่งซ่อมและปรับเทียบค่าใหม่ ณ บริษัท Licor Co. Ltd., USA ข้อมูลในเดือนนี้มาจากวิธีการประเมินโดยอาศัยความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม

ตารางที่ 2-3 แสดงค่าสะสมของ GPP (Gross primary production) R_{eco} (Ecosystem respiration) และ NEP (Net Ecosystem Production) ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกรร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)

ปี	เดือน	GPP (kg C.raí ⁻¹)	R_e (kg C.raí ⁻¹)	NEP (kg C.raí ⁻¹)
2555	ตุลาคม ^{1/}	54.6	18.4	36.2
	พฤศจิกายน	96.7	31.6	65.1
	ธันวาคม	77.5	23.2	54.3
	รวม	228.8	73.2	155.6
2556	มกราคม	35.7	25.9	9.8
	กุมภาพันธ์	56.3	30.5	25.8
	มีนาคม	143.8	22.9	120.9
	เมษายน	101.3	43.1	58.2
	พฤษภาคม ^{2/}	152.4	88.7	63.7
	มิถุนายน	121.3	99.5	21.8
	กรกฎาคม	90.7	106.0	-15.3
	สิงหาคม	105.7	104.5	1.2
	กันยายน	69.3	91.8	-22.5
	ตุลาคม	157.5	116.4	41.1
	พฤศจิกายน	159.3	50.9	108.4
	ธันวาคม	113.5	24.1	89.4
	รวม	1,306.8	804.3	502.5
2557	มกราคม	7.8	18.6	-10.8
	กุมภาพันธ์	50.2	30.3	19.9
	มีนาคม	221.2	58.2	163.0
	เมษายน	202.7	109.1	93.6
	พฤษภาคม	253.1	78.2	174.9
	มิถุนายน	162.0	115.1	46.9
	กรกฎาคม	170.4	94.8	75.6
	สิงหาคม	207.4	124.6	82.8
	กันยายน	142.6	115.5	27.1
	ตุลาคม	228.3	87.5	140.8
	พฤศจิกายน	211.2	59.9	151.3
	ธันวาคม	196.6	49.6	147.0
	รวม	2,053.5	941.4	1,112.1
2558	มกราคม ^{3/}	-4.9	25.2	-30.1
	กุมภาพันธ์	15.6	39.1	-23.5
	มีนาคม	242.4	48.6	193.8
	เมษายน	190.7	44.8	145.9
	พฤษภาคม	204.4	58.3	146.1
	มิถุนายน	183.0	38.8	144.2
	กรกฎาคม	139.5	75.8	63.7
	สิงหาคม	238.1	61.8	176.3
	กันยายน	216.7	53.2	163.5

ปี	เดือน	GPP (kg C.raí ⁻¹)	R _e (kg C.raí ⁻¹)	NEP (kg C.raí ⁻¹)
	รวม	1425.5	445.6	979.9
รวมทั้งสิ้น		5,014.5	2,264.5	2,750.1

- 1/ เก็บข้อมูลไม่ครบเดือน (18-31 ตุลาคม 2555)
- 2/ ช่วงเดือนพฤษภาคม 2556 – ตุลาคม 2556 ไม่สามารถดำเนินการเก็บข้อมูลได้ เนื่องจากเครื่องวัดปริมาณไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเสียหายต้องส่งซ่อมและปรับเทียบค่าใหม่ ข้อมูลในเดือนนี้มาจากวิธีการประเมินโดยอาศัยความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม
- 3/ ช่วงเดือนมกราคม 2558 – กุมภาพันธ์ 2558 ไม่สามารถดำเนินการเก็บข้อมูลได้ เนื่องจากเครื่องวัดความเร็วลมแบบสามมิติเสียหายต้องส่งซ่อมและปรับเทียบค่าใหม่ ณ บริษัท Campbell Scientific Co. Ltd., USA ข้อมูลในเดือนนี้มาจากวิธีการประเมินโดยอาศัยความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม

2.3.4 ข้อมูลอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือผิวดิน (Soil respiration)

(1) การวัดอัตราการหายใจของดินด้วยเครื่องชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบ Soil survey

อัตราการปลดปล่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากผิวดิน

อัตราการปลดปล่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากผิวดิน หรือ อัตราการหายใจของดิน (Soil respiration, R_s) ในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ตั้งแต่ วันที่ 3 ธันวาคม 2555 ถึง วันที่ 7 ตุลาคม 2558 ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดิน จาก Control และ Trench plot มีค่าตั้งแต่ 0.21 - 7.00 และ 0.19 - 6.95 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดิน เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่เป็น Control และ Trench plot ในช่วงฤดูฝนมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดินจาก Control plot มีค่าสูงกว่า Trench plot อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ขณะที่ในช่วงฤดูแล้ง ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดินจาก Control และ Trench plot มีค่าไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 2-29) ส่วนการเปลี่ยนแปลงในรอบปี พบว่า อัตราการหายใจของดินมีค่าสูงขึ้นในช่วงฤดูฝน และมีค่าลดลงในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดิน อัตราการหายใจของดินสะสมต่อปี ซึ่งประเมินด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation) พบว่าในปี 2556 และ 2557 มีค่าอัตราการหายใจของดินสะสมต่อปี (Control plot) เท่ากับ 9,917.8 และ 10,045.2 kg CO₂ raí⁻¹year⁻¹

อัตราการหายใจของดินในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ดำเนินการตั้งแต่ วันที่ 23 ธันวาคม 2555 ถึงวันที่ 15 พฤศจิกายน 2558 ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดิน จาก Control และ Trench plot มีค่าตั้งแต่ 0.47 - 6.97 และ 0.28 - 6.91 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดิน เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่เป็น Control และ Trench plot พบว่า ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดินจาก Control plot มีค่าค่อนข้างสูงกว่า Trench plot (รูปที่ 2-29) ส่วนการเปลี่ยนแปลงในรอบปี พบว่า อัตราการหายใจของดินมีค่าสูงขึ้นในช่วงฤดูฝน และมีค่าลดลงในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดิน อัตราการหายใจของดินสะสมต่อปี (Control plot) ในปี 2556 และ 2557 มีค่าเท่ากับ 5,125.7 และ 7,840.8 kg CO₂ raí⁻¹year⁻¹

อัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดิน

อัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดิน (Soil carbon efflux) ในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ตั้งแต่ วันที่ 3 ธันวาคม 2555 ถึงวันที่ 7 ตุลาคม 2558 ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดิน จาก Control และ Trench plot มีค่าตั้งแต่ 0.21 - 7.25 และ 0.20 - 7.20 $\text{g C m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดิน เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่เป็น Control และ Trench plot ในช่วงฤดูฝนมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดินจาก Control plot มีค่าสูงกว่า Trench plot อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ขณะที่ ในช่วงฤดูแล้ง ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดินจาก Control และ Trench plot มีค่าไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 2-30) ส่วนการเปลี่ยนแปลงในรอบปี พบว่า อัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดินมีค่าสูงขึ้นในช่วงฤดูฝน และมีค่าลดลงในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดิน อัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดินสะสมต่อปี พบว่าในปี 2556 และ 2557 มีค่าอัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดินสะสมต่อปี (Control plot) เท่ากับ 2,704.1 และ 2,739.6 $\text{kg C rai}^{-1}\text{year}^{-1}$

อัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดินในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ดำเนินการตั้งแต่ วันที่ 23 ธันวาคม 2555 ถึงวันที่ 15 พฤศจิกายน 2558 ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดิน จาก Control และ Trench plot มีค่าตั้งแต่ 0.49 - 7.23 และ 0.29 - 7.16 $\text{g C m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดิน เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่เป็น Control และ Trench plot พบว่า ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดินจาก Control plot มีค่าค่อนข้างสูงกว่า Trench plot (รูปที่ 2-30) ส่วนการเปลี่ยนแปลงในรอบปี พบว่า อัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดิน มีค่าสูงขึ้นในช่วงฤดูฝน และมีค่าลดลงในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดิน อัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดินสะสมต่อปี (Control plot) ในปี 2556 และ 2557 มีค่าเท่ากับ 1,397.9 และ 2,138.4 $\text{kg C rai}^{-1}\text{year}^{-1}$

อุณหภูมิดิน

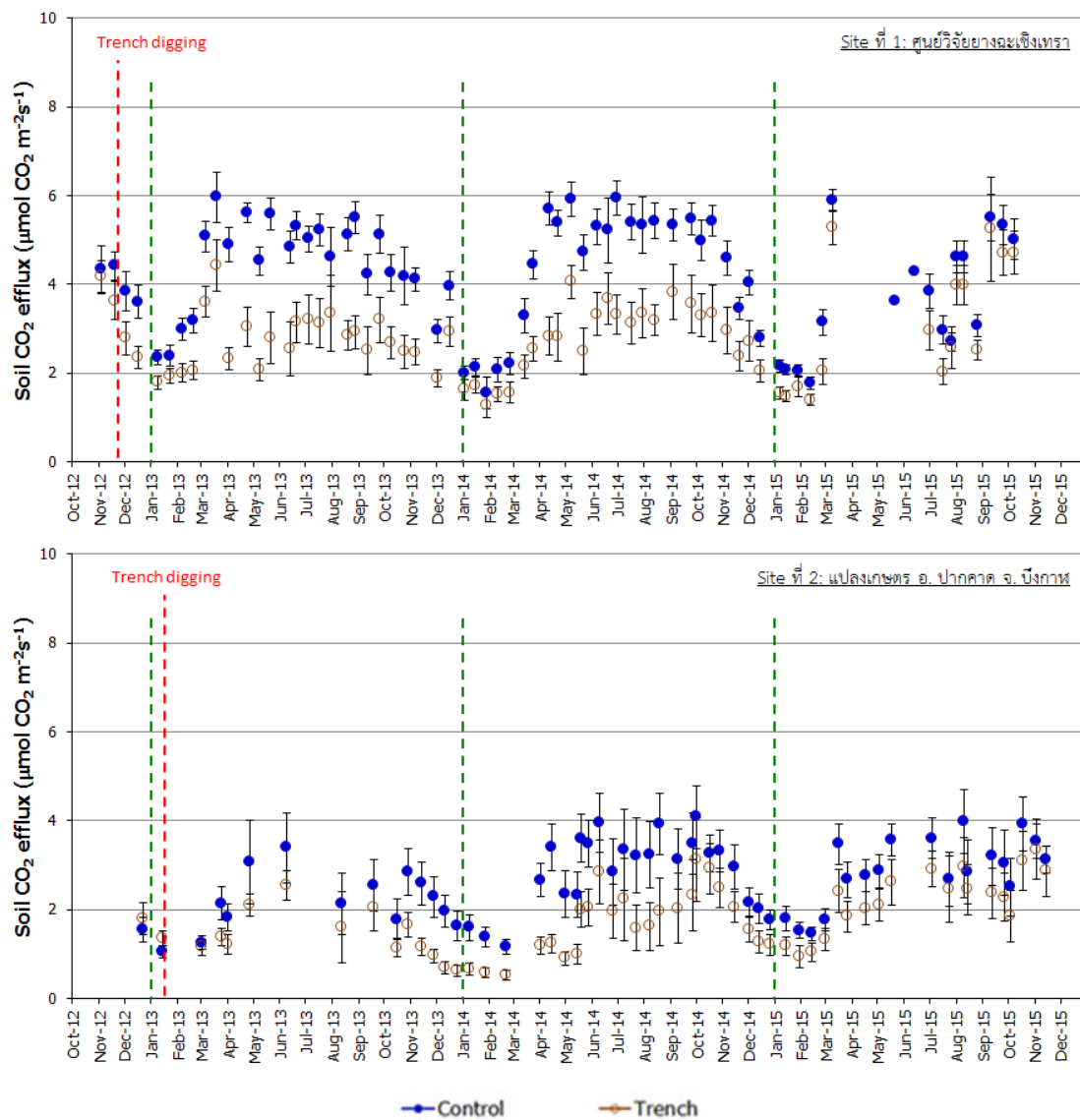
อุณหภูมิดิน ที่ระดับความลึก 5 cm จากผิวดิน ในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ณ ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา บันทึกตั้งแต่ วันที่ 3 ธันวาคม 2555 ถึงวันที่ 7 ตุลาคม 2558 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดิน จาก Control และ Trench plot มีค่าตั้งแต่ 20.8 – 30.5 และ 16.7 – 32.95 °C ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดิน เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่เป็น Control และ Trench plot ไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 2-31) ส่วนการเปลี่ยนแปลงในรอบปี พบว่า อุณหภูมิดินมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงฤดูฝน และมีค่าลดลงในช่วงฤดูแล้ง อุณหภูมิดินเฉลี่ย (Control plot) ในปี 2556 และ 2557 มีค่าเท่ากับ 26.78 และ 25.89 °C ตามลำดับ

อุณหภูมิดินในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ บันทึกตั้งแต่ วันที่ 23 ธันวาคม 2555 ถึงวันที่ 15 พฤศจิกายน 2558 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดินจาก Control และ Trench plot มีค่าตั้งแต่ 13.7 – 35.55 และ 14.80 – 45.5 °C ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดิน เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่เป็น Control และ Trench plot พบว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดินไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 2-31) ส่วนการเปลี่ยนแปลงในรอบปี พบว่า อุณหภูมิดิน มีค่าสูงขึ้นในช่วงฤดูฝน และมีค่าลดลงในช่วงฤดูแล้ง อุณหภูมิดินเฉลี่ย (Control plot) ในปี 2556 และ 2557 มีค่าเท่ากับ 27.68 และ 26.63 °C ตามลำดับ

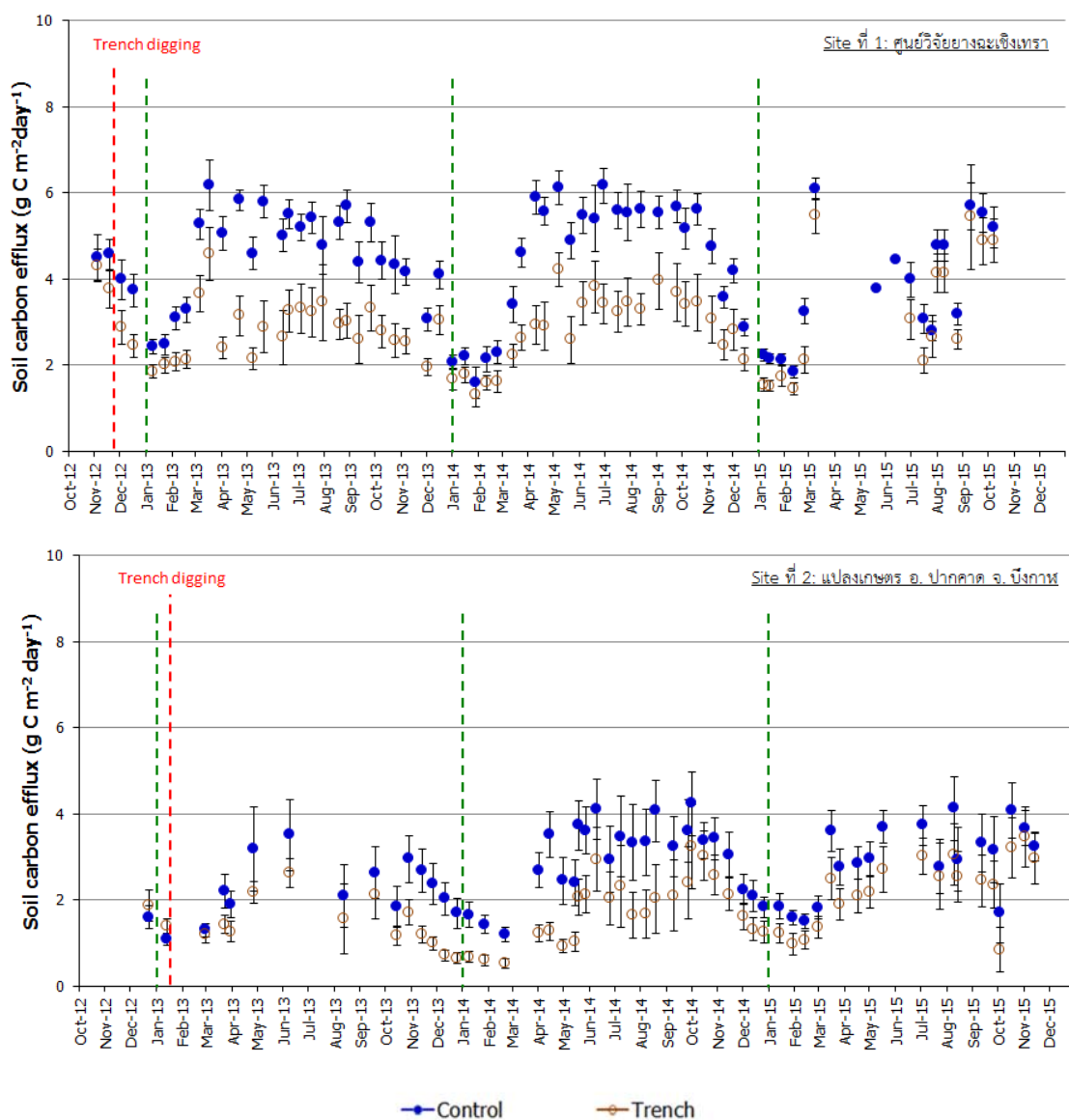
ปริมาณน้ำในดิน

ปริมาณน้ำในดิน ที่ระดับความลึก 5 cm จากผิวดิน ในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ณ ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา บันทึกตั้งแต่ วันที่ 3 ธันวาคม 2555 ถึงวันที่ 7 ตุลาคม 2558 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน จาก Control และ Trench plot มีค่าตั้งแต่ 0.45 – 60.05 และ 1.15 – 73.80% ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่เป็น Control และ Trench plot ส่วนใหญ่พบว่า Control plot มีค่ามากกว่า Trench plot ($P < 0.05$) (รูปที่ 2-32) ส่วนการเปลี่ยนแปลงในรอบปี พบว่า ปริมาณน้ำในดินมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงฤดูฝน และมีค่าลดลงในช่วงฤดูแล้ง ปริมาณน้ำในดิน (Control plot) ในปี 2556 และ 2557 มีค่าตั้งแต่ 1.72 – 40.75 และ 0.45 – 60.05% ตามลำดับ

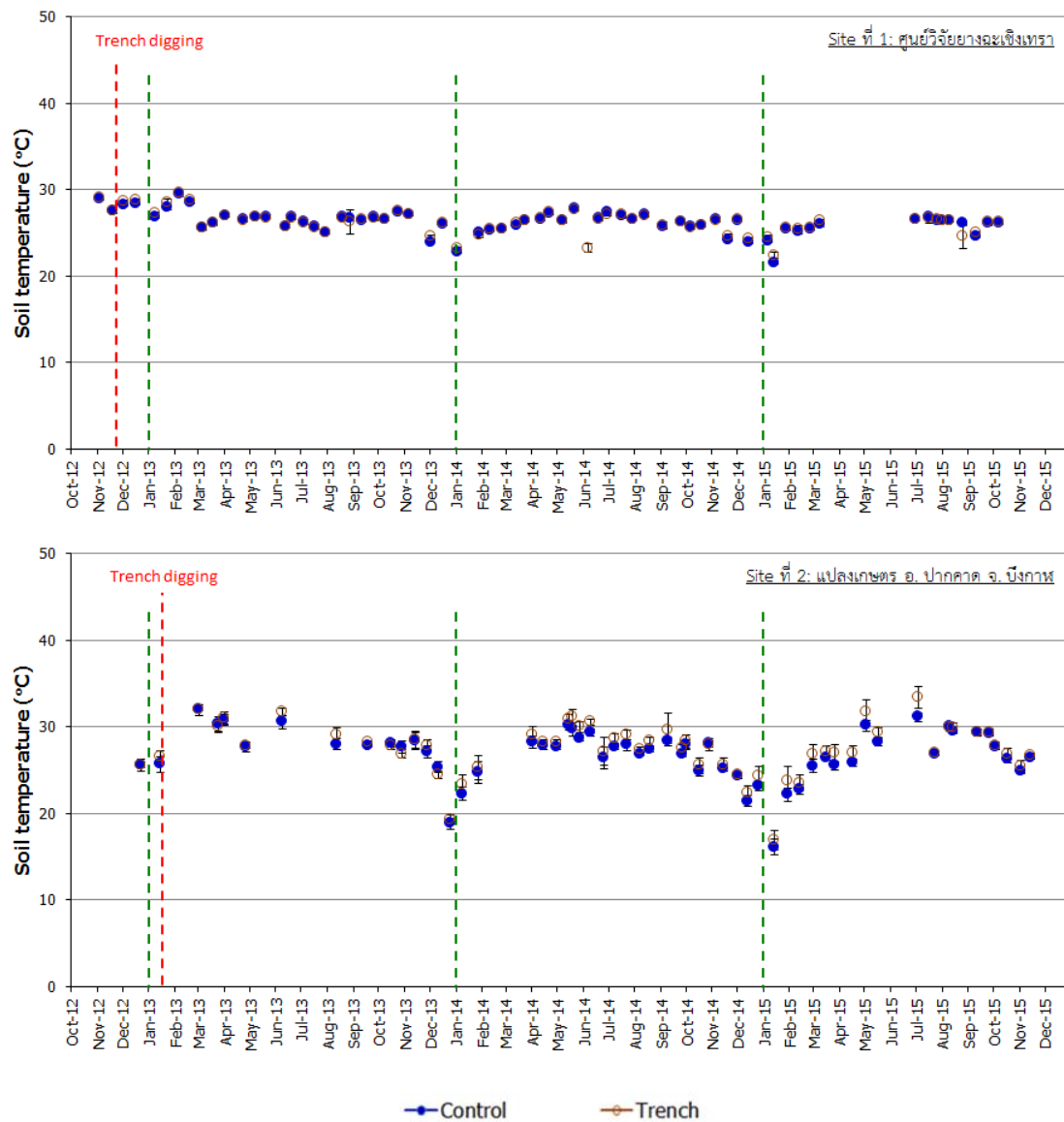
ปริมาณน้ำในดินในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ บันทึกตั้งแต่ วันที่ 23 ธันวาคม 2555 ถึงวันที่ 15 พฤศจิกายน 2558 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน จาก Control และ Trench plot มีค่าตั้งแต่ 0.10 – 35.40 และ 0.25 – 44.95% ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่เป็น Control และ Trench plot พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 2-32) ส่วนการเปลี่ยนแปลงในรอบปี พบว่า ปริมาณน้ำในดินมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงฤดูฝน และมีค่าลดลงในช่วงฤดูแล้ง ปริมาณน้ำในดิน (Control plot) ในปี 2556 และ 2557 มีค่าตั้งแต่ 0.10 – 35.40 และ 0.30 – 33.80% ตามลำดับ



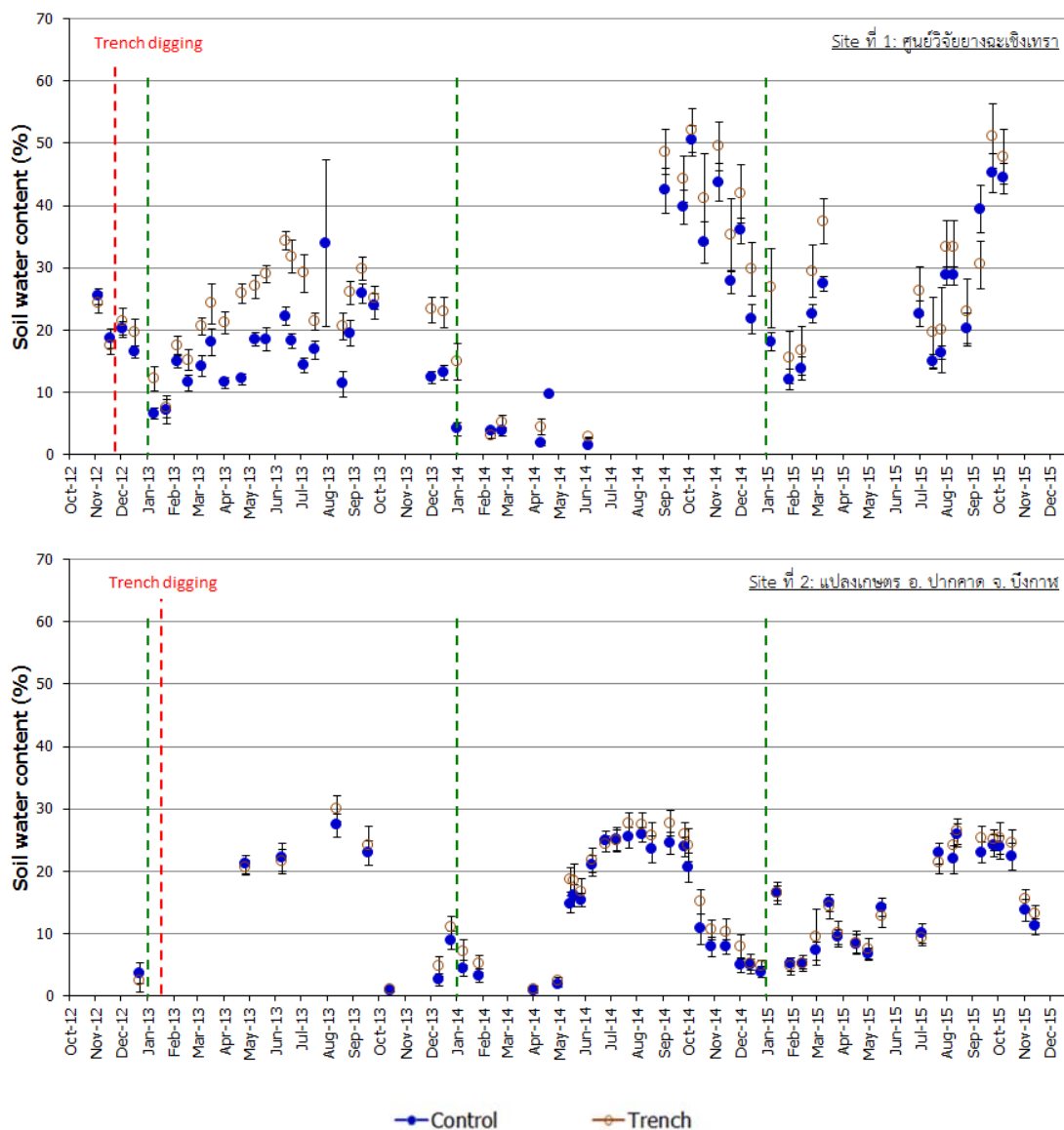
รูปที่ 2-29 ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดิน ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)



รูปที่ 2-30 ค่าเฉลี่ยอัตราการปลดปล่อยของคาร์บอนจากผิวดิน (g C m⁻² day⁻¹) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)



รูปที่ 2-31 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดิน (°C) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)



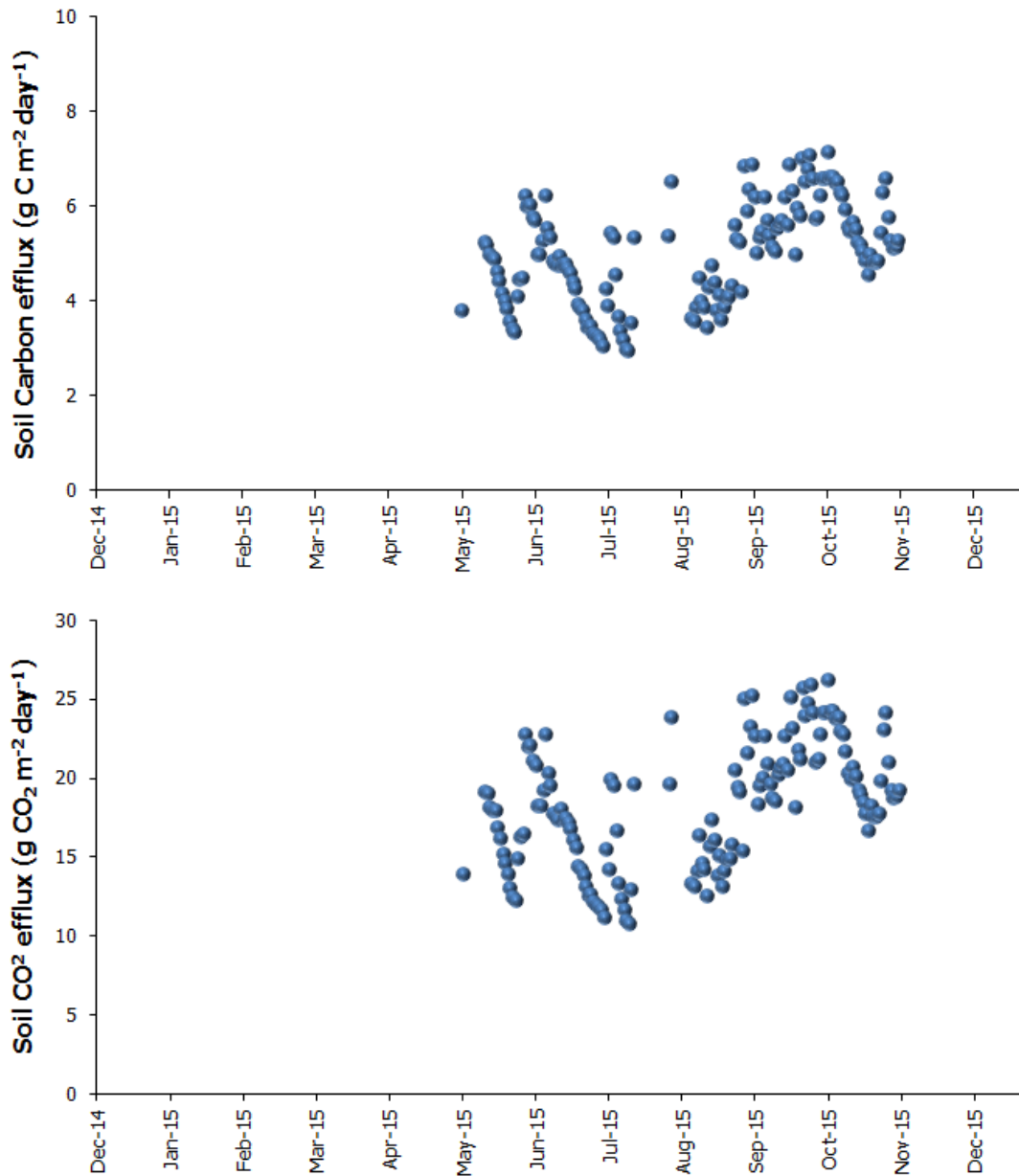
รูปที่ 2-32 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน (%) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)

(2) การวัดอัตราการหายใจของดินด้วยเครื่องชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติ

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา

ผู้วิจัย ได้นำเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติขนาด 2 chamber มาติดตั้งทดสอบการทำงานในสภาพแปลงจริง ตั้งแต่วันที่วันที่ 30 พฤษภาคม 2558 ถึง 10 พฤศจิกายน 2558 เมื่อนำข้อมูลการหายใจของดินที่วัดได้มาประมวลผล พบว่า อัตราการปลดปล่อยของคาร์บอน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากผิวดินมีค่าตั้งแต่ $2.92 - 7.11 \text{ g C m}^{-2}\text{day}^{-1}$ และ $10.69 - 26.07 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{day}^{-1}$ (รูปที่ 2-33) หลังจากติดตั้งเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติขนาด 2 chamber ได้ 3 เดือน

พบว่า บั้มลมหยุดทำงานเนื่องจากกระแสไฟฟ้าหลักในหม้อแปลงไม่สม่ำเสมอ หลังจากแก้ไขและเริ่มการทำงานของระบบใหม่ เครื่องวัดอัตราการหายใจของดินทำงานเป็นปรกติ แต่บั้มลมเกิดการเสียหายอีกครั้งในเดือนพฤศจิกายน เนื่องจากความชื้นสะสมในตัวมอเตอร์ ขณะนี้อยู่ระหว่างการส่งซ่อม



รูปที่ 2-33 อัตราการปลดปล่อยของคาร์บอน ($\text{g C m}^{-2}\text{day}^{-1}$) (ภาพบน) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{day}^{-1}$) (ภาพล่าง) จากผิวดิน ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา

Site ที่ 2 แปลงปลูกยางของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

ผู้วิจัย ได้สร้างชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติขนาด 8 chamber ที่พัฒนาโดยใช้เครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติขนาด 2 chamber เป็นต้นแบบ และได้ทดสอบการทำงานในห้องทดลองมาระยะหนึ่งแล้ว ปัจจุบัน ผู้วิจัยได้ติดตั้งระบบควบคุมการสูดอากาศ และระบบวัดการหายใจของดินลงในกล่องกันกระแทก เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในสภาพแปลงจริงได้อย่างปลอดภัย ขณะนี้อยู่ระหว่างการปรับปรุง กลไกการเปิด - ปิด Chamber ให้สามารถใช้งานในสภาพแปลงได้อย่างเหมาะสม จัดหาปั๊มลม และปรับปรุงระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้เหมาะสมต่อความต้องการใช้งานของเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติขนาด 8 chamber

2.3.5 ข้อมูลประกอบอื่น ๆ

(1) การเปลี่ยนแปลงเส้นรอบวงโคนต้นยาง (Girth)

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Girth โดยดำเนินการเก็บข้อมูลทุกๆ 6 เดือน โดยการวัด Girth ที่ความสูง 1.5 เมตร จากพื้นดิน (พิศมัย และคณะ, 2554)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา

ในแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ทีมวิจัยวัด Girth ของยางพาราทุกต้นในแปลงทดลองพื้นที่ 50 ไร่มาแล้ว จำนวน 7 ครั้ง ตั้งแต่ วันที่ 21 สิงหาคม 2555 ถึงวันที่ 28 มิถุนายน 2558 จากยางพารา 4 Plot ข้อมูล Girth ที่วัดได้ทั้ง 7 ครั้ง จากยางพาราจำนวน 2,689 2,682 2,687 2,678 2,670 2,672 และ 2,669 ต้น ตามลำดับ ข้อมูล Girth ที่วัดได้ทั้ง 7 ครั้ง มีการกระจายตัวแบบปกติ ค่าเฉลี่ยของ Girth ที่วัดได้ มีเฉลี่ยเท่ากับ 729 702 714 719 724 723 และ 728 mm. ค่าเฉลี่ยของ Girth ที่วัดเมื่อวันที่ 21 สิงหาคม 2555 มีค่าสูงสุด รองลงมาได้แก่ ค่าเฉลี่ยของ Girth ที่วัดเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม 2557 วันที่ 28 มกราคม 2558 และ 28 มิถุนายน 2558 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของ Girth เฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ส่วนค่าเฉลี่ยของ Girth ที่วัดเมื่อวันที่ 5 มกราคม 2557 วันที่ 11 กันยายน 2556 และ 31 มกราคม 2556 มีค่าน้อยลงตามลำดับ ($P < 0.05$) (รูปที่ 2-34 และ 2-35) ต้นยางในพื้นที่ดังกล่าว เป็นต้นยางที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว ดังนั้นการขยายขนาดของ Girth นั้นจึงขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น ในสภาพที่อากาศแห้งแล้ง ต้นยางจะมีการหาตัวของลำต้นและส่งผลให้ขนาดของ Girth ลดลง ทำให้ในแต่ละช่วงเวลาที่เก็บข้อมูล ซึ่งมีความแปรปรวนของสภาพอากาศที่แตกต่างกันไป บางครั้งปรากฏว่ามีค่า Girth เพิ่มขึ้น แต่ในบางครั้งก็ปรากฏค่า Girth ที่ลดลง

Site ที่ 2 แปลงปลูกยางของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

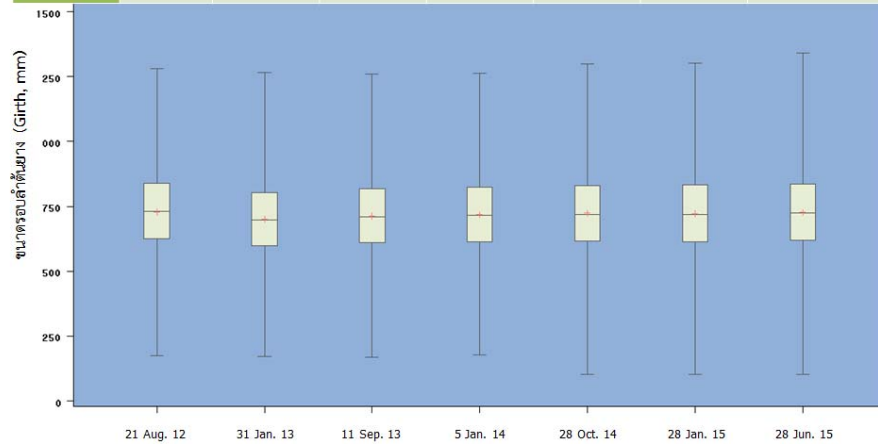
เนื่องจากต้นยางในแปลงเกษตรกรมีอายุน้อย และน่าจะมีอัตราการเจริญเติบโตของต้นมากกว่าต้นยางอายุมากที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ดังนั้นทีมวิจัยจึงเก็บข้อมูล Girth ที่มากกว่าที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา การทดลองปีที่ 1 ถึงปัจจุบัน ทีมวิจัยวัด Girth ของต้นยางพารา จำนวน 12 ครั้ง ได้แก่ วันที่ 16 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 13 ตุลาคม 2558 อีกทั้งแปลงปลูกยางพารา จังหวัดบึงกาฬนั้น มีพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่มาก ทำให้ไม่สามารถวัด Girth ของต้นยางได้ทุกต้น ดังนั้นทีมวิจัยจึงวัด Girth ของต้นยางพาราทุกต้นในแปลงทดลอง 3 Plot ได้แก่ A B และ C เพื่อเป็นตัวแทนของแปลงปลูกทั้งหมด

ข้อมูล Girth ที่วัดได้ทั้ง 12 ครั้ง จากยางพาราจำนวน 413 ต้น ข้อมูล Girth ที่วัดได้ทั้ง 12 ครั้ง มีการกระจายตัวแบบปกติ ค่าเฉลี่ยของ Girth ที่วัดได้ มีเฉลี่ยเท่ากับ 286 298 299 332 360 369 407 419 421 424 433 และ 458 mm. ค่าเฉลี่ยของ Girth ที่วัดเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม 2555 มีค่าน้อยที่สุด

ค่าเฉลี่ยของ Girth เพิ่มขึ้นตามลำดับ จนมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในวันที่ 31 ตุลาคม 2558 ($P < 0.05$) (รูปที่ 2-34 และ 2-35) แสดงให้เห็นว่าต้นยางพาราในแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ มีการเจริญเติบโตขึ้นตามลำดับ

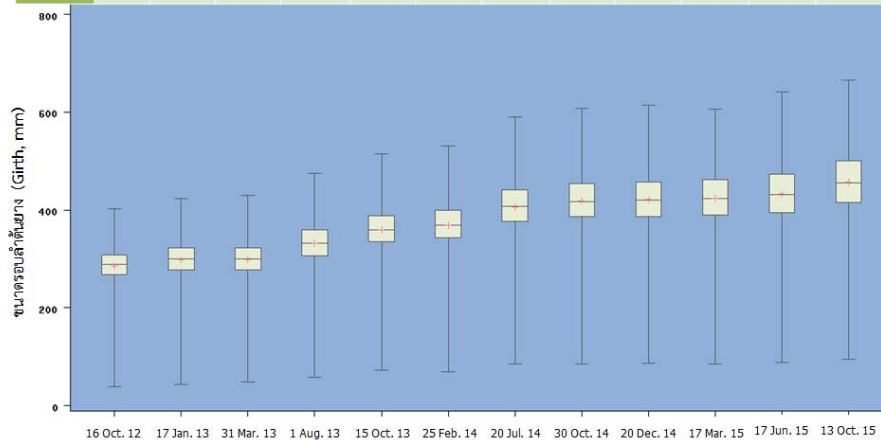
Box Plot for Girth Variation at Chachoengsao

Mean	729	702	714	719	724	723	728
Max.	1280	1267	1261	1262	1300	1302	1340
Min.	176	172	170	177	103	102	102
Std. Dev.	160	155	160	161	165	165	166
N	2689	2682	2687	2678	2670	2672	2669

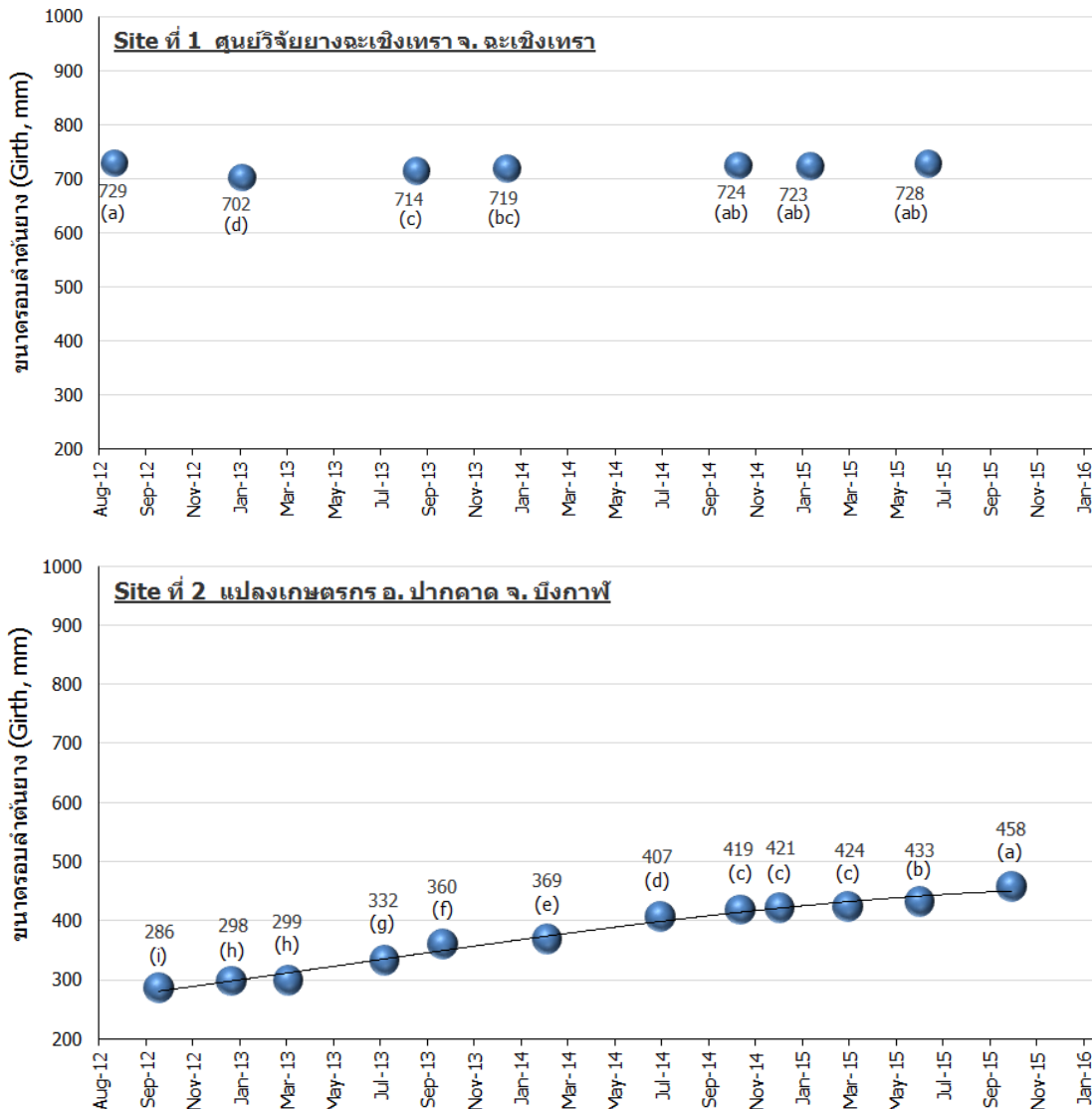


Box Plot for Girth Variation at Bueng Kan

Mean	286	298	299	332	360	369	407	419	421	424	433	458
Max.	402	424	430	475	515	531	590	608	615	606	642	665
Min.	38	43	48	58	72	69	85	85	87	85	88	95
Std. Dev.	44	46	48	51	54	59	59	59	62	64	68	71
N	413	413	413	413	413	413	412	411	412	412	411	411



รูปที่ 2-34 การกระจายของขนาดรอบลำต้นยาง (Girth, mm.) ของต้นยางพาราในแปลงทดลองยางพาราที่ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ (รูปล่าง)



รูปที่ 2-35 การเปลี่ยนแปลงของขนาดรอบลำต้นยาง (Girth, mm.) ของต้นยางพาราในแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ (รูปล่าง) (*ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในกราฟ แสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT)

- (2) การประเมินดัชนีพื้นที่ใบของพื้นที่ปลูกยางพารา (Stand leaf area index) จากข้อมูลชีวมวลของยางพาราที่ร่วงหล่นสู่พื้น (Litter trap) ของแปลงยางพารา

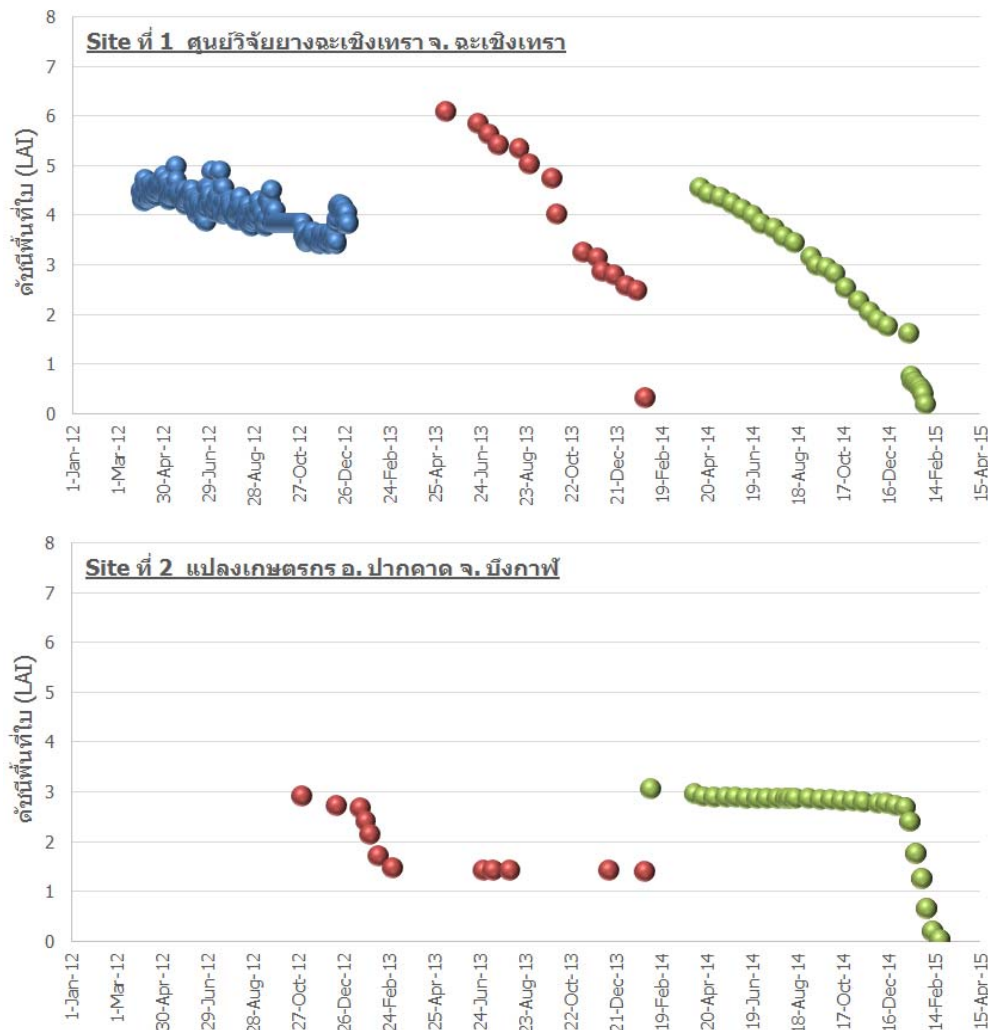
Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา

การประเมินดัชนีพื้นที่ใบของปี 2555 พบว่า ดัชนีพื้นที่ใบของพื้นที่ปลูกยางมีตั้งแต่ 3.42 – 4.89 โดยค่าดัชนีพื้นที่ใบมีค่าสูงสุดปรากฏในเดือนพฤษภาคม 2555 สำหรับปี 2556 พบว่า ดัชนีพื้นที่ใบของพื้นที่ปลูกยางมีตั้งแต่ 0.31 – 6.08 โดยค่าดัชนีพื้นที่ใบมีค่าสูงสุดและต่ำสุดปรากฏในเดือนพฤษภาคม 2556 และ มกราคม 2557 ตามลำดับ และในปี 2557 พบว่า ดัชนีพื้นที่ใบของพื้นที่ปลูกยางมีตั้งแต่ 0.19 – 4.56

โดยค่าดัชนีพื้นที่ใบมีค่าสูงสุดและต่ำสุดปรากฏในเดือนเมษายน 2557 และ กุมภาพันธ์ 2558 ตามลำดับ (รูปที่ 2-36, รูปบน)

Site ที่ 2 แปลงปลูกยางของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

การคำนวณค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ของแปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ปีที่ 2556 พบว่า ดัชนีพื้นที่ใบของพื้นที่ปลูกยางมีตั้งแต่ 1.41 – 2.92 โดยค่าดัชนีพื้นที่ใบมีค่าสูงสุดและต่ำสุดปรากฏในเดือนพฤศจิกายน 2555 และ มกราคม 2556 ตามลำดับ และในปี 2557 พบว่า ดัชนีพื้นที่ใบของพื้นที่ปลูกยางมีตั้งแต่ 0.03 – 3.07 โดยค่าดัชนีพื้นที่ใบมีค่าสูงสุดและต่ำสุดปรากฏในเดือนกุมภาพันธ์ 2557 และ กุมภาพันธ์ 2558 ตามลำดับ (รูปที่ 2-36, รูปล่าง)

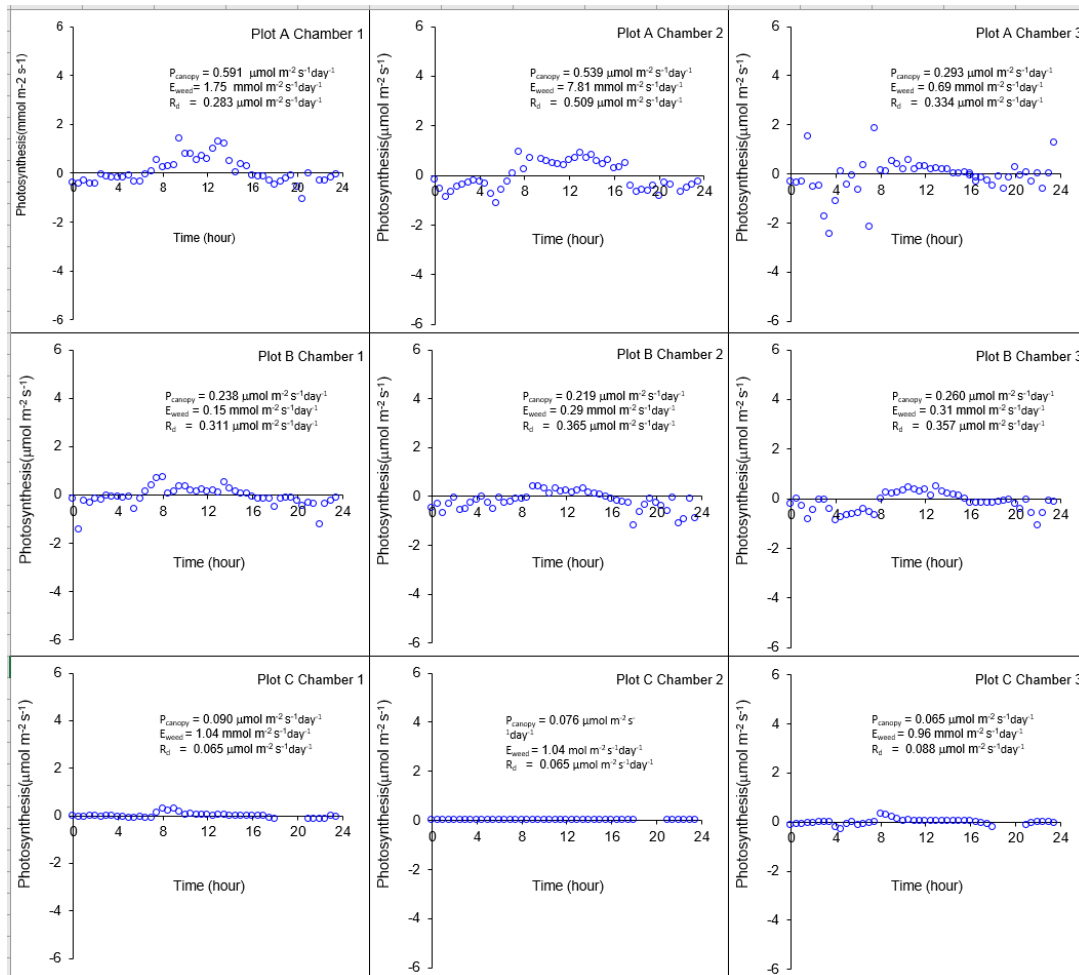


รูปที่ 2-36 ความแปรปรวนของค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ของแปลงปลูกยางพารา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง) ซึ่งประเมินจากความสัมพันธ์กับค่า Specific leaf area และข้อมูลจาก Litter trap (● ข้อมูลปี 1, ● ข้อมูลปี 2 และ ● ข้อมูลปี 3)

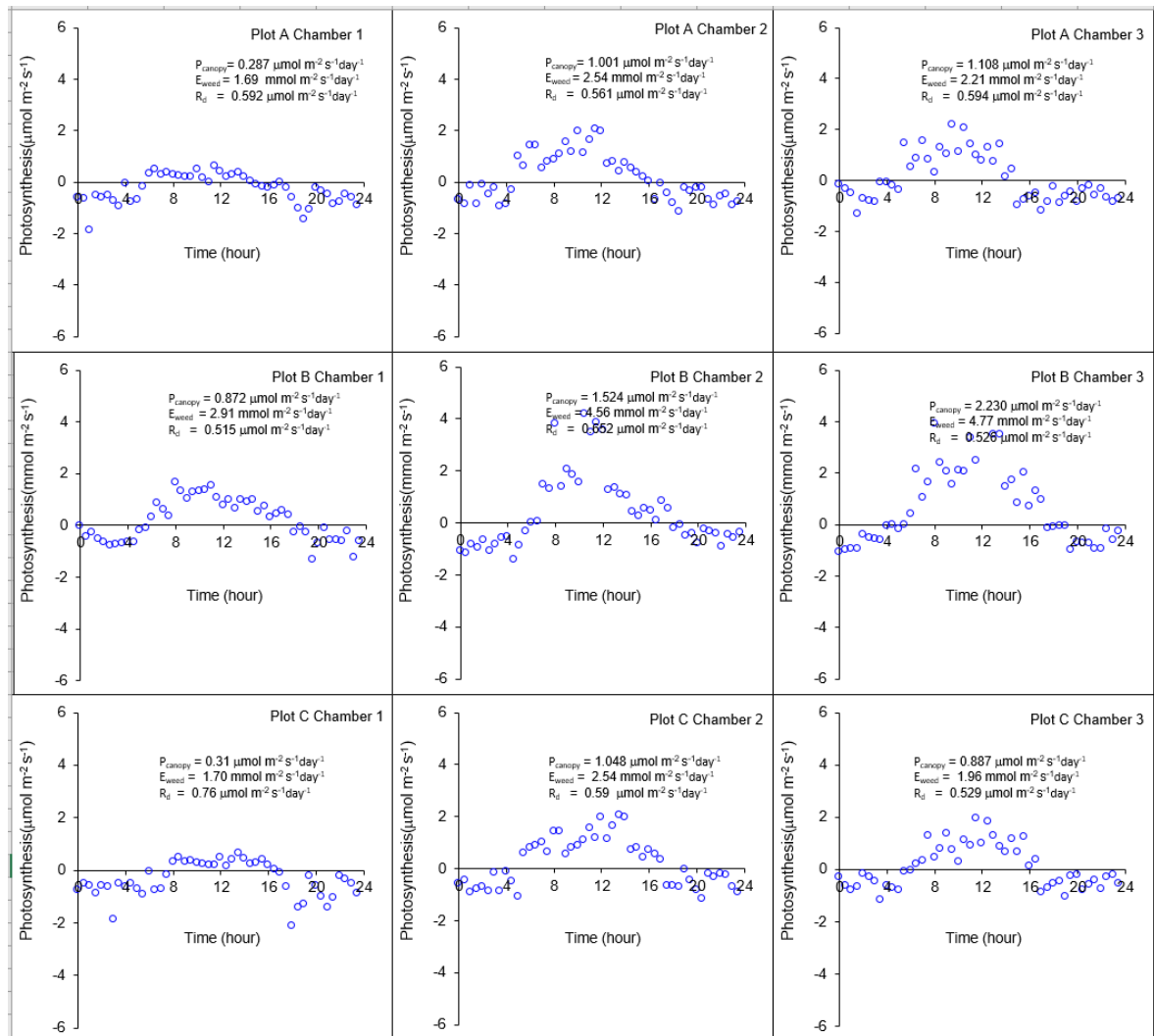
(3) การวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและอัตราการหายใจของวัชพืชในสวนยางพารา

การวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของเรือนพุ่มวัชพืช ดำเนินการในสวนยางพารา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ เนื่องจากเป็นแปลงยางอายุน้อย เรือนพุ่มยางยังไม่ชนกัน ทำให้วัชพืชสามารถเจริญเติบโตได้ นักวิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลมาแล้ว 6 ครั้ง ในปี 2557 (เดือนกุมภาพันธ์ พฤษภาคม และ กันยายน) และ 2558 (เดือนมีนาคม มิถุนายน และ ตุลาคม)

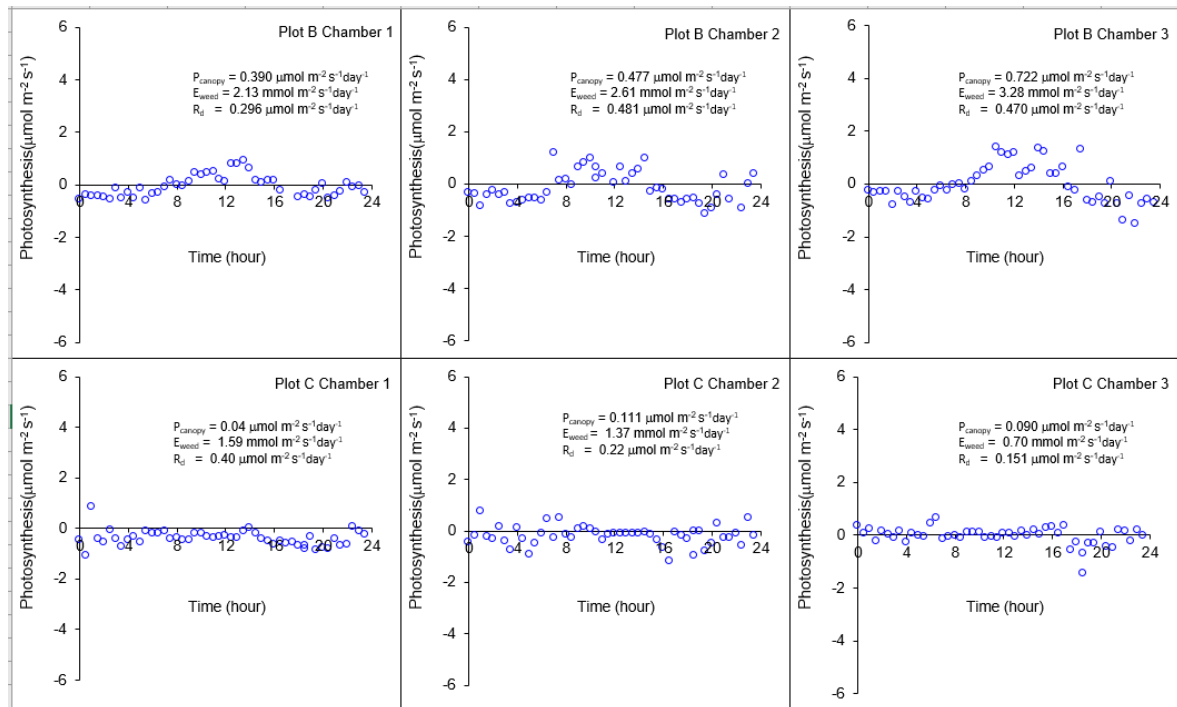
จากการทดลอง พบว่า ในปี 2557 มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการคายน้ำ และอัตราการหายใจของเรือนพุ่มวัชพืช อยู่ในช่วง $0.29 - 1.03 \mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$, $1.62 - 2.77 \text{ mmol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ และ $0.29 - 0.59 \mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ตามลำดับ (ภาพที่ 2-37 ถึง 2-39 และ 2-43) และในปี 2558 มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการคายน้ำ และอัตราการหายใจของเรือนพุ่มวัชพืช อยู่ในช่วง $0.49 - 1.06 \mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$, $2.20 - 2.67 \text{ mmol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ และ $0.42 - 0.67 \mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ตามลำดับ (ภาพที่ 2-40 ถึง 2-42 และ 2-44) และการเปลี่ยนแปลงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการคายน้ำ และอัตราการหายใจของเรือนพุ่มวัชพืช พบว่า ในช่วงฤดูฝนที่มีวัชพืชเจริญเติบโตขึ้น จะมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการคายน้ำ และอัตราการหายใจสูงกว่าช่วงฤดูแล้ง (ภาพที่ 2-43 และ 2-44)



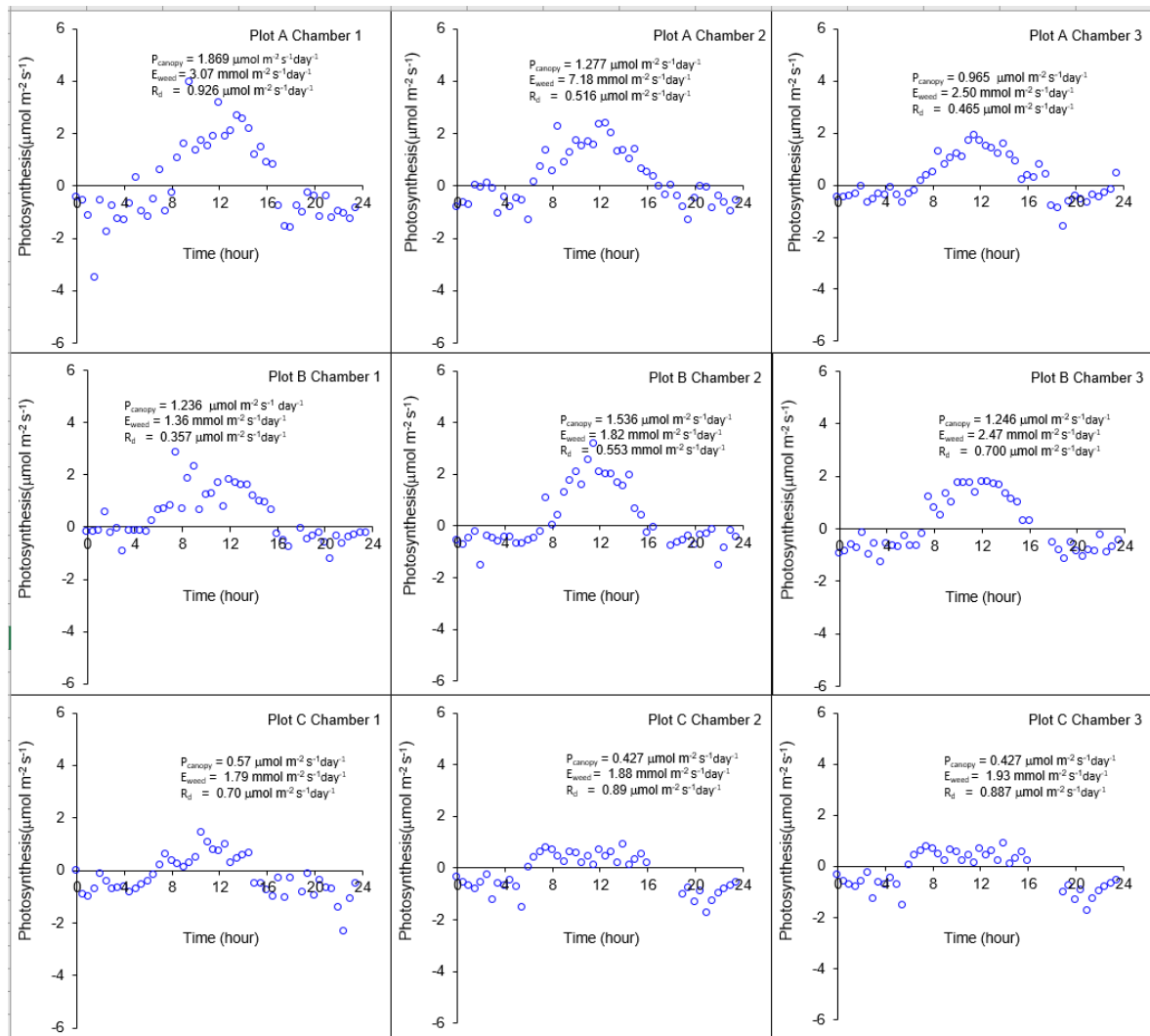
รูปที่ 2-37 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ 2557



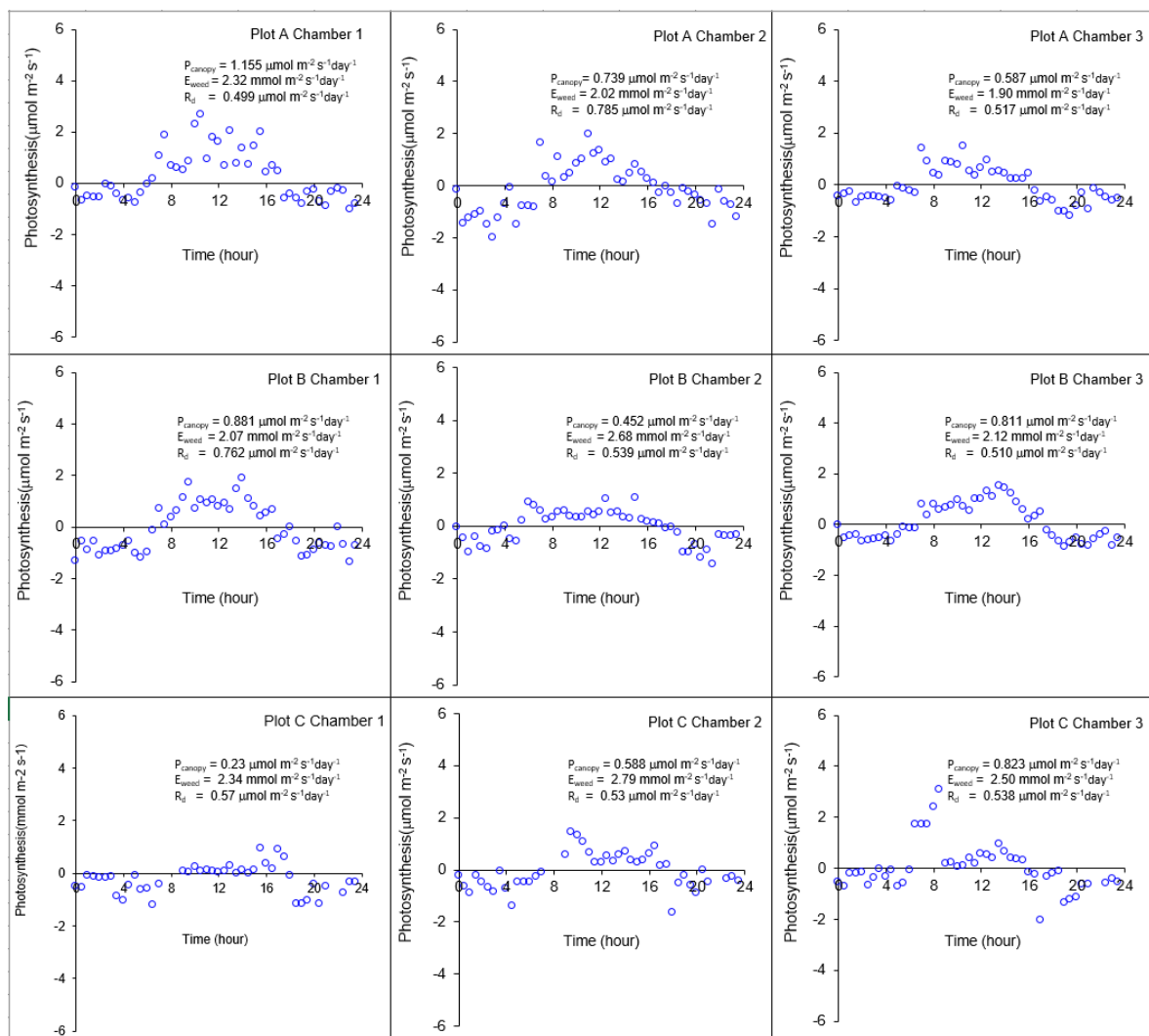
รูปที่ 2-38 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร
อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือนพฤษภาคม 2557



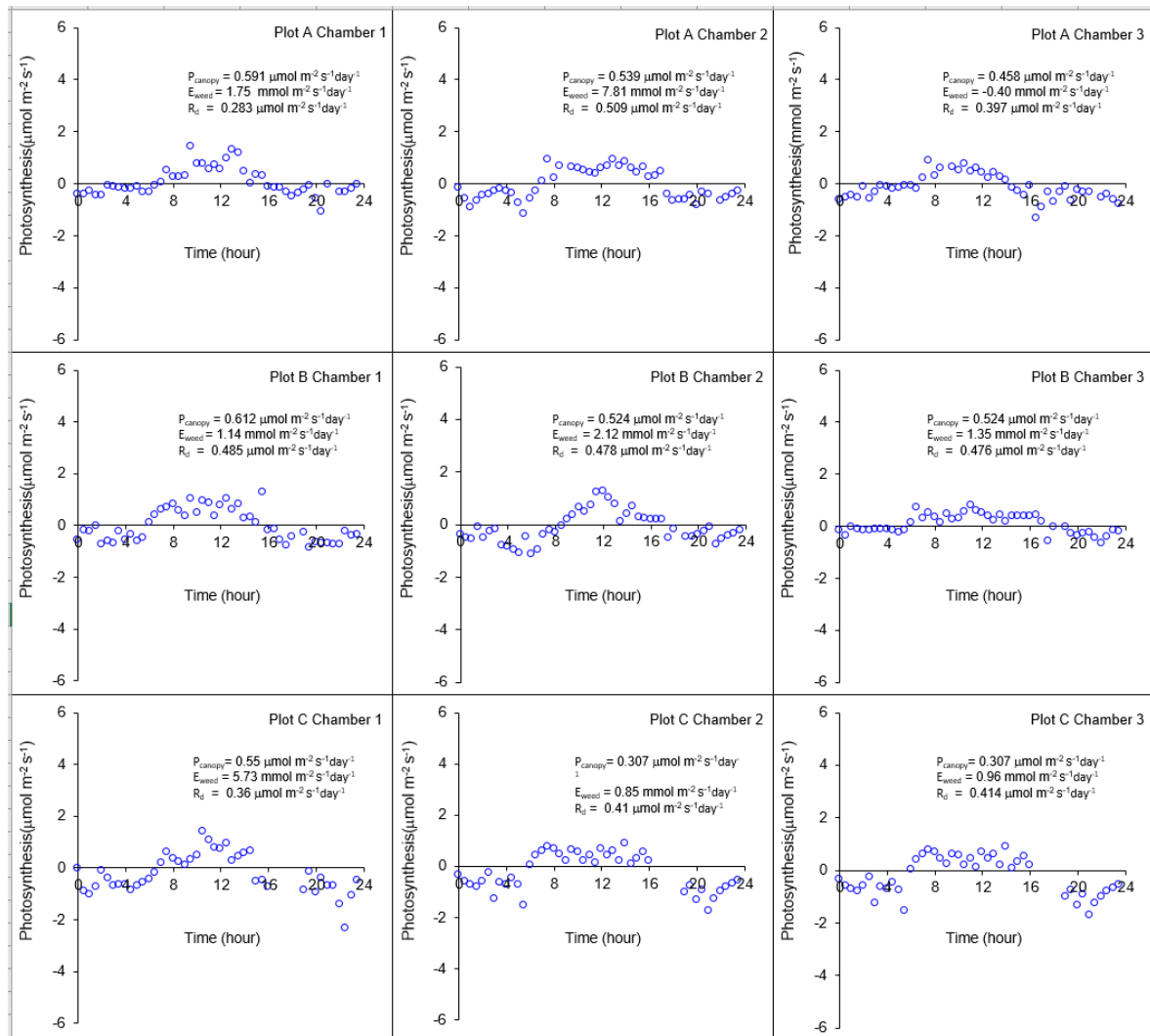
รูปที่ 2-39 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร
อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือนกันยายน 2557



รูปที่ 2-40 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร
อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือนมีนาคม 2558



รูปที่ 2-41 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร
อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือนมิถุนายน 2558



รูปที่ 2-42 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในรอบวันของวัชพืช ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร
อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อเดือนตุลาคม 2558

เดือนที่เก็บข้อมูล	ภาพพื้นที่ศึกษา	P_{canopy}	E_{weed}	R_d
กุมภาพันธ์ 2557		0.29	1.03	0.29
พฤษภาคม 2557		1.62	2.77	0.59
กันยายน 2557		0.30	1.95	0.34

รูปที่ 2-43 แสดงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (P_{canopy} , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) อัตราการคายน้ำ (E_{weed} , $\text{mmol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) และอัตราการหายใจ (R_d , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) ของเรือนพุ่มวัชพืชที่เจริญเติบโตภายใต้เรือนพุ่มยางพารา ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรจรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อปี 2557

เดือนที่เก็บข้อมูล	ภาพพื้นที่ศึกษา	P_{canopy}	E_{weed}	R_d
มีนาคม 2558		1.06	2.67	0.67
มิถุนายน 2558		0.70	2.31	0.49
ตุลาคม 2558		0.49	2.20	0.42

รูปที่ 2-44 แสดงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง (P_{canopy} , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) อัตราการคายน้ำ (E_{weed} , $\text{mmol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) และอัตราการหายใจ (R_d , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) ของเรือนพุ่มวัชพืชที่เจริญเติบโตภายใต้เรือนพุ่มยางพารา ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรจรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ เมื่อปี 2558

(4) ผลผลิตยางพารา

ผลผลิตยางพารานั้น สามารถเก็บได้เฉพาะที่แปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา โดยมีรอบฤดูกรีตเริ่มตั้งแต่เดือน พฤษภาคม และสิ้นสุดในเดือนมกราคม ของทุกปี และจะพักต้นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์-เดือนเมษายน น้ำหนักผลผลิตที่ได้ เป็นน้ำหนักของยางก้อนถ้วยแห้ง นำไปชั่งน้ำหนัก และหักความชื้นจากน้ำหนักที่ได้ 15% จึงได้น้ำหนักผลผลิต มีหน่วยเป็น kg rai^{-1} ผลผลิต สะสมในปี 2555 – 2558 มีปริมาณเท่ากับ 155.7 (ยังไม่ครบปี) 192.4 302.7 และ 157.0 (ยังไม่ครบปี) $\text{kg rai}^{-1}\text{year}^{-1}$ สำหรับผลผลิตยางพาราในปี 2556 และ 2557 ซึ่งมีการเก็บข้อมูลครบ 1 ปี พบว่า ในปี 2556 นั้น มีผลผลิตยางพาราต่ำกว่าปี 2557 เป็นอย่างมาก สาเหตุที่ทำให้ผลผลิตยางพาราต่ำกว่านั้นอาจเนื่องมาจากในปี 2556 พื้นที่ปลูกยางมีค่า NEP (Net Ecosystem Production) สะสมต่ำกว่าในปี 2557 เป็นอย่างมาก โดยในปี 2556 และ 2557 มีค่า NEP สะสม เท่ากับ 4,485.15 และ 6,496.25 $\text{kg CO}_2 \text{rai}^{-1}\text{year}^{-1}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 2-10 และ 2-11)

ตารางที่ 2-4 ผลผลิตยางพารา (kg rai^{-1}) ตั้งแต่ปี 2555 - 2558

เดือน	ปี			
	2555	2556	2557	2558
มกราคม	-	23.9	43.3	68.0
กุมภาพันธ์	-	-	-	-
มีนาคม	-	-	-	-
เมษายน	-	-	-	-
พฤษภาคม	16.8	21.5	10.8	21.5
มิถุนายน	12.2	12.7	17.8	15.4
กรกฎาคม	17.1	17.3	36.7	20.0
สิงหาคม	18.5	21.2	26.8	23.0
กันยายน	16.9	10.8	21.4	9.1
ตุลาคม	18.5	22.1	45.6	
พฤศจิกายน	15.8	21.8	40.9	
ธันวาคม	16.1	41.1	59.5	
ผลผลิตรวม	155.7	192.4	302.7	157.0

หมายเหตุ ผลผลิตยางพาราในปี 2555 และ 2558 เป็นข้อมูลที่ยังไม่ครบ 1 ปี

2.3.6 ผลกระทบของจุลภูมิอากาศต่อค่า NEE (Net Ecosystem Exchange)

ความแปรปรวนของสมดุลคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยางพารานั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของต้นยางพารา และสภาพจุลภูมิอากาศ จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า NEE (Net Ecosystem Exchange) กับจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ ปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, R_n) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, R_g) ความเข้มแสง (Photosynthetically Active Radiation, PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air temperature, T_{air}) ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity, RH) และ ปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี และส่วนที่ 2 แบ่งเป็น 4 กลุ่มตามระยะการ

เจริญเติบโตของต้นยางในรอบ 1 ปี ได้แก่ ระยะที่ 1 No leaf ระยะที่ 2 Refoliation ระยะที่ 3 Fully expanded leaf และระยะที่ 4 Defoliation

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า PAR และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า R_n , R_g , T_{air} , RH และ VPD ค่า NEE มีความสัมพันธ์กับค่า VPD มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.36 (ตารางที่ 2-5)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยางในรอบ 1 ปี พบว่า ในแต่ละระยะของการเจริญเติบโต ค่า NEE มีความสัมพันธ์กับจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยางในลักษณะที่คล้ายกัน คือ ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า PAR และ RH ขณะที่มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า R_n , R_g , T_{air} และ VPD แต่ในระยะที่ 3 (Fully expanded leaf) พบว่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางเดียว (Positive correlation) กับค่า RH และไม่ปรากฏความสัมพันธ์กับค่า R_n ค่า NEE มีความสัมพันธ์กับค่า VPD มากที่สุด ในเกือบทุกระยะของการเจริญเติบโต โดยในระยะที่ 2 – 4 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.17, 0.43 และ 0.29 ตามลำดับ ส่วนในระยะที่ 1 พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.52 (ตารางที่ 2-5)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกรร จ. บึงกาฬ

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า R_n , PAR, T_{air} และ RH และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า R_g และ VPD ค่า NEE มีความสัมพันธ์กับค่า RH มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.39 (ตารางที่ 2-5)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยางในรอบ 1 ปี พบว่า ในแต่ละระยะของการเจริญเติบโต ค่า NEE มีความสัมพันธ์กับจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยางในลักษณะที่คล้ายกัน คือ ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า PAR และ RH สำหรับค่าจุลภูมิอากาศอื่นๆ มีความสัมพันธ์กันค่า NEE แตกต่างกันไปในแต่ละระยะของการเจริญเติบโต โดยในระยะที่ 1 (No leaf) ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า VPD และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า R_n , R_g และ T_{air} ค่า NEE มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.28 ในระยะที่ 2 (Refoliation) ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า R_n และ R_g และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า T_{air} ค่า NEE มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.52 ในระยะที่ 3 (Fully expanded leaf) ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า R_n , R_g และ T_{air} และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า VPD ค่า NEE มีความสัมพันธ์กับค่า RH มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.52 และในระยะที่ 4 (Defoliation) ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า R_g , T_{air} และ VPD ค่า NEE มีความสัมพันธ์กับค่า RH มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.48 (ตารางที่ 2-5)

ตารางที่ 2-5 แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า NEE และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางอะเชิงเทรา จ.อะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี	NEE	R _n	R _g	PAR	T _{air}	RH	VPD
<u>Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางอะเชิงเทรา จ. อะเชิงเทรา</u>							
รวมทุกช่วงเวลา	r	0.05 **	0.11 **	-0.24 **	0.27 **	0.05 **	0.36 **
ระยะที่ 1 No leaf	r	0.46 **	0.52 **	-0.32 **	0.11 **	-0.12 **	0.46 **
ระยะที่ 2 Refoliation	r	0.08 **	0.11 **	-0.10 **	0.04 ns	-0.06 **	0.17 **
ระยะที่ 3 Fully expanded leaf	r	-0.02 ns	0.05 **	-0.30 **	0.35 **	0.11 **	0.43 **
ระยะที่ 4 Defoliation	r	0.04 **	0.09 **	-0.18 **	0.22 **	-0.08 **	0.29 **
<u>Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ</u>							
รวมทุกช่วงเวลา	r	-0.03 **	0.03 **	-0.28 **	-0.03 **	-0.39 **	0.29 **
ระยะที่ 1 No leaf	r	0.14 **	0.21 **	-0.22 **	0.28 **	-0.23 **	-0.09 *
ระยะที่ 2 Refoliation	r	-0.20 **	-0.22 **	-0.39 **	0.52 **	-0.48 **	-0.03 ns
ระยะที่ 3 Fully expanded leaf	r	-0.16 **	-0.13 **	-0.30 **	-0.06 **	-0.52 **	0.28 **
ระยะที่ 4 Defoliation	r	-0.03 ns	0.10 **	-0.37 **	0.39 **	-0.48 **	0.46 **

<u>หมายเหตุ</u>	คำย่อ	NEE หมายถึง	Net Ecosystem Exchange ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
		R _n หมายถึง	Net radiation (W m^{-2})
		R _g หมายถึง	Global solar radiation (W m^{-2})
		PAR หมายถึง	Photosynthetically active radiation ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
		T _{air} หมายถึง	Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)
		RH หมายถึง	Humidity (%)
		VPD หมายถึง	Vapor pressure deficit
		r หมายถึง	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
		** หมายถึง	$P < 0.01$
		* หมายถึง	$P < 0.05$
		ns หมายถึง	ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ

ตารางที่ 2-6 แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการหายใจของดิน (R_s , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อม ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี	R_s	T_{soil}	SWC
<u>Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา</u>			
ข้อมูลรวมทั้งหมด	r	0.31 **	0.37 **
ข้อมูลปี 2555	r	0.04 ns	0.12 ns
ข้อมูลปี 2556	r	-0.32 **	0.37 **
ข้อมูลปี 2557	r	0.63 **	0.49 **
ข้อมูลปี 2558	r	0.42 **	0.72 **
<u>Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ</u>			
ข้อมูลรวมทั้งหมด	r	0.25 **	0.22 **
ข้อมูลปี 2555	r	0.36 ns	0.26 ns
ข้อมูลปี 2556	r	0.08 ns	0.11 ns
ข้อมูลปี 2557	r	0.36 **	0.26 **
ข้อมูลปี 2558	r	0.38 **	0.21 **

หมายเหตุ คำย่อ R_s หมายถึง Soil respiration ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
 T_{soil} หมายถึง อุณหภูมิดิน ($^{\circ}\text{C}$) ที่ระดับความลึก 5 cm จากผิวดิน
 SWC หมายถึง ปริมาณน้ำในดิน (%) ที่ระดับความลึก 5 cm จากผิวดิน
 r หมายถึง สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
 ** หมายถึง $P < 0.01$
 * หมายถึง $P < 0.05$
 ns หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ

2.3.7 ผลกระทบของอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดินต่อค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือผิวดิน

ความแปรปรวนของอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือผิวดิน หรืออัตราการหายใจของดิน ในพื้นที่ปลูกยางพารานั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของต้นยางพารา และสภาพจุลภูมิอากาศ จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า อัตราการหายใจของดิน (R_s) กับ อุณหภูมิดิน (T_{soil}) และ

ปริมาณน้ำในดิน (SWC) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมทั้งหมด และส่วนที่ 2 แบ่งวิเคราะห์เป็นรายปี

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมทั้งหมด พบว่า ค่า R_s มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า T_{soil} และ SWC โดยมีความสัมพันธ์กับค่า SWC มากที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.37 (ตารางที่ 2-5)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็นปีที่บันทึกข้อมูล พบว่า ในปี 2555 ไม่พบสหสัมพันธ์ระหว่างค่า R_s กับค่า T_{soil} และ SWC ในปี 2556 พบว่า R_s มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า T_{soil} ขณะที่มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า SWC โดยมีความสัมพันธ์กับค่า SWC มากที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.37 สำหรับในปี 2557 และ 2558 พบว่า ค่า R_s มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า T_{soil} และ SWC โดยในปี 2557 นั้น ค่า R_s มีความสัมพันธ์กับค่า T_{soil} มากที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.63 และในปี 2558 พบว่า ค่า R_s มีความสัมพันธ์กับค่า SWC มากที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.72 (ตารางที่ 2-5)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมทั้งหมด พบว่า ค่า R_s มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า T_{soil} และ SWC โดยมีความสัมพันธ์กับค่า T_{soil} มากที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.25 (ตารางที่ 2-5)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็นปีที่บันทึกข้อมูล พบว่า ในปี 2555 และ 2556 ไม่พบสหสัมพันธ์ระหว่างค่า R_s กับค่า T_{soil} และ SWC สำหรับในปี 2557 และ 2558 พบว่า ค่า R_s มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า T_{soil} และ SWC โดย ค่า R_s มีความสัมพันธ์กับค่า T_{soil} มากที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.36 และ 0.38 ตามลำดับ (ตารางที่ 2-5)

2.3.8 คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยาง

ข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือพื้นที่ปลูกยางที่วัดได้จริงด้วยเทคนิค Eddy Covariance เป็นหนึ่งในข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกช่วงต้นน้ำ (Upstream emissions) ซึ่งยังไม่มี การนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะสามารถนำมาคำนวณได้ แต่ในปัจจุบันซึ่งการพัฒนาของเทคโนโลยีและเทคนิคต่างๆ ทำให้สามารถตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพื้นที่ปลูกพืชได้ ดังนั้นทีมนักวิจัยจึงศึกษาการปลดปล่อยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพื้นที่ปลูกยางดังกล่าว เพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลในการคำนวณหา คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์

การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ในปัจจุบันนั้น ยังไม่มีการรวมข้อมูลการแลกเปลี่ยนปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เหนือพื้นที่ปลูกยางมาใช้ในการคำนวณ ดังนั้น นักวิจัยจึงคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ โดยอ้างอิงวิธีการมาจากการวิเคราะห์ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ด้วยวิธี LCA คือ จะคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากพื้นที่ปลูกยางในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ (NEE หรือ Net ecosystem exchange, $\text{kg CO}_2 \text{rai}^{-1}\text{year}^{-1}$) เทียบเท่า โดยหน่วยอ้างอิง (Reference Unit) คือ ยางก้อน น้ำหนัก 1

กิโลกรัม จากการทดลองพบว่า ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อไร่ของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา ที่อายุ 19 และ 20 ปี มีค่าเท่ากับ -4,485.2 และ -6,496.2 kg CO₂ ra⁻¹ year⁻¹ ตามลำดับ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เกิดจากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา มีค่าเท่ากับ 28.5 kg CO₂ ra⁻¹ year⁻¹ ทั้งสองอายุ (ตารางที่ 2-7) สำหรับ Site ที่ 2 แปลงยางพาราของเกษตรกร จ. ฉะเชิงเทรา ที่อายุ 4 และ 5 ปี มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อไร่ของพื้นที่ปลูกยางพารา เท่ากับ -1,842.7 และ -4,078.1 kg CO₂ ra⁻¹ year⁻¹ ตามลำดับ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เกิดจากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา มีค่าสูงถึง 198.5 kg CO₂ ra⁻¹ year⁻¹ ทั้งสองอายุ (ตารางที่ 2-8)

สำหรับค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง (ยางแห้ง) 1 กิโลกรัม ของพื้นที่ปลูกยางพารา ที่อายุ 19 และ 20 ปี มีค่าเท่ากับ -23.31 และ -21.46 kg CO₂ . kg⁻¹ yield year⁻¹ ตามลำดับ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เกิดจากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา มีค่าเท่ากับ 0.30 kg CO₂.kg⁻¹ yield year⁻¹ (ตารางที่ 2-9)

ตารางที่ 2-7 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อไร่ของพื้นที่ปลูกยางพารา และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เกิดจากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (kg CO ₂ ra ⁻¹ year ⁻¹)	อายุยาง (ปี)	
	19	20
พื้นที่ปลูกยางพารา ^{1/}	-4,485.2	-6,496.2
การเขตกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ^{2/}	28.5	28.5

^{1/} ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เป็นลบ หมายถึง มีการดูดกลืนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศเข้าสู่ระบบที่ศึกษา

ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เป็นบวก หมายถึง มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ

^{2/} ข้อมูลจากการวิจัยในปี 2555 ซึ่งได้วิธีด้าน LCA

ตารางที่ 2-8 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อไร่ของพื้นที่ปลูกยางพารา และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เกิดจากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (kg CO ₂ ra ⁻¹ year ⁻¹)	อายุยาง (ปี)	
	4	5
พื้นที่ปลูกยางพารา ^{1/}	-1,842.7	-4,078.1
การเขตกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ^{2/}	198.5	198.5

^{1/} ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เป็นลบ หมายถึง มีการดูดกลืนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศเข้าสู่ระบบที่ศึกษา

ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เป็นบวก หมายถึง มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ

^{2/} ข้อมูลจากการวิจัยในปี 2555 ซึ่งได้วิธีด้าน LCA

ตารางที่ 2-9 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง (ยางแห้ง) 1 กิโลกรัมของพื้นที่ปลูกยางพารา และคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ (kg CO ₂ . kg ⁻¹ yield year ⁻¹)	อายุยาง (ปี)	
	19	20
พื้นที่ปลูกยางพารา ^{1/}	-23.31	-21.46
การเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ^{2/}	0.30 ^{3/}	

1/ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เป็นลบ หมายถึง มีการดูดกลืนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศเข้าสู่ระบบที่ศึกษา

ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เป็นบวก หมายถึง มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ

2/ ข้อมูลจากการวิจัยในปี 2555 ซึ่งได้วิธีด้าน LCA

3/ ข้อมูลจากการวิจัยในปี 2555 ซึ่งคำนวณตลอดช่วงอายุของการปลูก

2.4 สรุปผลการศึกษาสมดุลคาร์บอนของสวนยางพารา

การศึกษามูลค่าคาร์บอนของสวนยางพารา โดยมุ่งศึกษาอัตราการปล่อยปริมาณ CO₂ สุทธิของระบบนิเวศยางพารา เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา และคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา นอกจากนี้ องค์ประกอบอื่นๆ ที่ศึกษาเพิ่มเติมยังทำให้ทราบถึง Carbon sequestration ของระบบนิเวศยางพารา โดยประเมินออกมาเป็นปริมาณคาร์บอนที่สะสมในส่วนต่างๆ ของระบบนิเวศยางพารา

สำหรับการวิจัยในปีที่ 3 นี้ สามารถตรวจติดตามและบันทึกข้อมูลสมดุลคาร์บอนและจุลภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา ได้ครบ 2 ปี และพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. ปึงกาฬ ได้ครบ 1 ปี แต่สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 นั้น นักวิจัยได้ประเมินข้อมูลส่วนที่ขาดหายไป โดยอาศัยความสัมพันธ์กับข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นยางและข้อมูลจุลภูมิอากาศทำให้มีข้อมูลสมดุลคาร์บอนครบ 2 ปี ดังที่แสดงในตารางที่ 2-10 และ 2-11

ข้อมูลภูมิอากาศในปี 2556-2557 นั้น พบว่า ความเข้มแสงสะสมต่อปี ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อปี และปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อปีของพื้นที่มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์นั้น พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีค่าค่อนข้างสูงกว่าพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ขณะที่ปริมาณฝนสะสมต่อปีของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีค่าค่อนข้างน้อยกว่าพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2

ข้อมูลสมดุลคาร์บอนในปี 2556-2557 นั้น พบว่า ปริมาณการสะสมต่อปีของค่า NEE, GPP, R_{eco} และ NEP ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีค่าสูงกว่าพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 และอัตราการหายใจของดินสะสมต่อปีพบว่า พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีค่าสูงกว่าพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 (ตารางที่ 2-10 และ 2-11) ค่า NEE ที่วัดได้ในพื้นที่ศึกษาทั้งสองแห่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า NEE ของพื้นที่ปลูกยางพารา อายุ 4-5 ปี ในประเทศอินเดีย ซึ่งมีค่า NEE เท่ากับ -33.5 kg CO₂ ha⁻¹year⁻¹ หรือ -5,360 kg CO₂ rai⁻¹year⁻¹ (Annamalainathan *et al.*, 2011) และเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยืนต้นอื่นๆ เช่น ป่าไม้เขตร้อน ซึ่งมีค่า NEE อยู่ในช่วง -94 ถึง -590 g C.m⁻² year⁻¹ หรือ -551 ถึง -1,1531 kg CO₂ rai⁻¹year⁻¹ (Yan *et al.*, 2013; Loescher *et al.* 2003; Bonal *et al.*, 2008; Carswell *et al.*, 2002; Malhi *et al.*, 1999; Fan *et al.*, 1990 และ Saleska *et al.*, 2003) ซึ่งค่อนข้างมากกว่า (พื้นที่ที่มีการดูดกลืนปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า) พื้นที่ปลูกยางที่ศึกษาอยู่ ความแตกต่างที่

เกิดขึ้นนั้น และการที่ NEE ของปี 2557 ถึงสูงกว่าปีอื่นๆ มากนั้น อาจเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมของพื้นที่ปลูกนั้นแตกต่างกัน อายุพืชปลูก และความหนาแน่นของพืชปลูกในแต่ละแห่งที่ศึกษา

อัตราการหายใจของดินสะสม ในปี 2556-2557 พบว่า พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีค่าสูงกว่าพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 และอัตราการหายใจของดินมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่าอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดิน คือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดินมีอิทธิพลทำให้อัตราการหายใจของดินเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมือนกับงานวิจัยอื่นๆ (Bowden *et al.*, 1998 และ Zak *et al.*, 1999) แต่ยังไม่พบว่ามีรายงานวิจัยบางฉบับ รายงานว่า อัตราการหายใจของดินมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางผกผัน (Negative correlation) กับปริมาณน้ำในดิน คือ การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในดินมีอิทธิพลทำให้อัตราการหายใจของดินลดลง (Wood *et al.* 2013) สัดส่วนของ Rs ต่อ Re พบว่า ข้อมูลในปี 2556 Site ที่ 1 แปลงปลูกยางอายุน้อย จังหวัดฉะเชิงเทรา มีค่า Rs คิดเป็น 98.16% ของ Re ซึ่งค่อนข้างสูงกว่าค่าที่เคยมีการรายงานไว้ คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 30-80% (Davidson *et al.*, 2006) ขณะที่พบว่าข้อมูล Site ที่ 2 แปลงปลูกยางอายุน้อย ณ จังหวัดบึงกาฬ ในปี 2556 และข้อมูลในปี 2556 และ 2557 พบว่า ค่า Rs มีค่าสูงกว่า Re ซึ่งเคยมีรายงานไว้ (Zanotelli *et al.*, 2013) โดยสามารถมาจากการวัด Rs นั้น ใช้เครื่องวัดอัตราการหายใจแบบ Soil survey ตามระยะเวลาที่กำหนด และนำค่าที่ได้มาคำนวณด้วยวิธี interpolate เป็น Rs สะสมต่อปี ขณะที่ค่า Re นั้น เป็นการวัดค่าจริงตลอด 24 ชั่วโมง

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางพารา ศึกษาใน 2 ส่วน ได้แก่ คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา และคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา การศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพันธุ์ RRIM 600 ศึกษาในพื้นที่ 2 Sites ได้แก่ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ พบว่า พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา ยางพาราอายุ 19 และ 20 ปี มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อไร่เท่ากับ -4,485.2 และ -6,496.2 kg CO₂ rai⁻¹ year⁻¹ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมีค่าเท่ากับ 28.5 kg CO₂ rai⁻¹ year⁻¹ ทั้งสองอายุ สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ยางพาราอายุ 4 และ 5 ปี มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อไร่เท่ากับ -1,842.7 และ -4,078.1 kg CO₂ rai⁻¹ year⁻¹ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมีค่าเท่ากับ 198.5 kg CO₂ rai⁻¹ year⁻¹ ทั้งสองอายุ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อไร่ หรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยจากพื้นที่ปลูกยางสู่บรรยากาศในส่วนของการยางพารามีค่าเป็นลบ (-) แสดงว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดกลืนเข้าสู่ระบบนิเวศยางพารา และในพื้นที่ Site ที่ 1 ซึ่งยางมีอายุมากกว่านั้น มีการดูดกลืนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่ายางอายุน้อยในพื้นที่ Site ที่ 2 อีกทั้งยังแสดงว่าพื้นที่ปลูกยางพารามีส่วนช่วยในการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ แม้ว่าค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมีค่าเป็นบวก (+) ซึ่งแสดงว่ามีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ แต่ปริมาณที่ถูกปล่อยออกมานั้นน้อยกว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดกลืนโดยระบบนิเวศยางพารามากกว่าร้อยละร้อยเท่าสำหรับยางอายุมาก ส่วนค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง (ยางแห้ง) 1 kg ของพื้นที่ปลูกยางพารา คำนวณได้เฉพาะพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 เนื่องจากยางเปิดกรีดแล้ว โดยมีอายุ 19 และ 20 ปี ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง (ยางแห้ง) 1 kg มีค่าเท่ากับ -23.31 และ -21.46 kg CO₂ . kg⁻¹ yield year⁻¹ ตามลำดับ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา มีค่าเท่ากับ 0.30 kg CO₂.kg⁻¹yield year⁻¹ ซึ่งแสดงว่าในการผลิตน้ำยาง 1 kg นั้น ส่วนของต้นยางเองสามารถดูดกลืนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้า

สู่ระบบนิเวศยางพารามากถึง 23.31 และ 21.46 kg ขณะที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ โดยการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสีย เพียง 0.30 kg

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียของพื้นที่สวนยางพาราในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยศึกษาในจังหวัดบึงกาฬ และอุดรธานี พบว่า ปริมาณการใช้ปุ๋ยต่อหน่วยเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ อีกปัจจัยหนึ่ง ได้แก่ ปริมาณผลผลิตน้ำยางพาราสดต่อไร่

ตารางที่ 2-10 สรุปข้อมูลจุลภูมิอากาศ สมดุลของคาร์บอน และคาร์บอนฟุตพริ้นต์ในปี 2556 ของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ข้อมูลการศึกษา	Site ที่ 1	Site ที่ 2
ความเข้มแสงสะสมต่อปี ($\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	5,418.46	5,625.49
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	27.18	25.48
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)	81.73	69.17
ปริมาณฝนสะสม (mm)	1,215.00	1,441.00
ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อปี (R_s , $\text{MW m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)	3,169.22	3,026.16
ปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อปี (R_n , $\text{MW m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)	2,163.06	1,978.16
NEE สะสมต่อปี (Net ecosystem exchange)		
kg C $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$	-1,223.23	-502.55
kg CO_2 $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$	-4,485.16	-1,842.69
GPP สะสมต่อปี (Gross primary production)		
kg C $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$	3,978.71	1,306.78
kg CO_2 $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$	14,588.59	4,791.53
R_{eco} สะสมต่อปี (Ecosystem respiration)		
kg C $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$	2,755.48	804.23
kg CO_2 $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$	10,103.43	2,948.84
NEP สะสมต่อปี (Net Ecosystem Production)		
kg C $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$	1,223.23	502.55
kg CO_2 $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$	4,485.16	1,848.00
อัตราการหายใจของดินสะสมต่อปี		
kg C $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$	2,704.10	1,397.90
kg CO_2 $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$	9,917.80	5,125.70
ผลผลิตน้ำยางต่อปี (kg $\text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$)	192.4	-
คาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อไร่ของพื้นที่ปลูกยางพารา (kg $\text{CO}_2 \cdot \text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$)		
พื้นที่ปลูกยาง	-4,485.16	-1,842.69
การเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ^{1/}	28.50	198.49
คาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง (ยางแห้ง) 1 กิโลกรัม		
พื้นที่ปลูกยาง (kg CO_2) ^{2/}	-23.31	-
การเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ^{1/}	0.30	0.46

^{1/} ข้อมูลจากการวิจัยในปี 2555 ซึ่งคำนวณตลอดช่วงอายุของการปลูก

^{2/} พื้นที่ปลูกยาง Site ที่ 2 เป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง

ตารางที่ 2-11 สรุปข้อมูลจุลภูมิอากาศ สมดุลของคาร์บอน และคาร์บอนฟุตพริ้นต์ในปี 2557 ของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ข้อมูลการศึกษา	Site ที่ 1	Site ที่ 2
ความเข้มแสงสะสมต่อปี ($\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	5,725.01	5,656.13
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	27.29	25.54
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)	81.50	73.97
ปริมาณฝนสะสม (mm)	1,282.00	1,545.00
ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อปี (R_g , $\text{MW m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)	3,313.93	3,142.01
ปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อปี (R_n , $\text{MW m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)	2,208.50	2,117.03
NEE สะสมต่อปี (Net ecosystem exchange)		
$\text{kg C ra}^{-1} \text{ year}^{-1}$	-1,771.70	-1,112.21
$\text{kg CO}_2 \text{ ra}^{-1} \text{ year}^{-1}$	-6,496.24	-4,078.09
GPP สะสมต่อปี (Gross primary production)		
$\text{kg C ra}^{-1} \text{ year}^{-1}$	2,771.05	2,053.44
$\text{kg CO}_2 \text{ ra}^{-1} \text{ year}^{-1}$	10,160.53	7,529.29
R_{eco} สะสมต่อปี (Ecosystem respiration)		
$\text{kg C ra}^{-1} \text{ year}^{-1}$	999.35	941.24
$\text{kg CO}_2 \text{ ra}^{-1} \text{ year}^{-1}$	3,664.29	3,451.20
NEP สะสมต่อปี (Net Ecosystem Production)		
$\text{kg C ra}^{-1} \text{ year}^{-1}$	1,771.70	1,112.21
$\text{kg CO}_2 \text{ ra}^{-1} \text{ year}^{-1}$	6,496.24	4,071.47
อัตราการหายใจของดินสะสมต่อปี		
$\text{kg C ra}^{-1} \text{ year}^{-1}$	2,739.60	2,138.40
$\text{kg CO}_2 \text{ ra}^{-1} \text{ year}^{-1}$	10,045.20	7,840.80
คาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อไร่ของพื้นที่ปลูกยางพารา ($\text{kg CO}_2 \cdot \text{rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$)		
พื้นที่ปลูกยาง	-6,496.24	-4,078.09
การเขตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ^{1/}	28.50	198.49
คาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง (ยางแห้ง) 1 กิโลกรัม		
พื้นที่ปลูกยาง (kg CO_2) ^{2/}	-21.46	-
การเขตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ^{1/}	0.30	0.46

^{1/} ข้อมูลจากการวิจัยในปี 2555 ซึ่งคำนวณตลอดช่วงอายุของการปลูก

^{2/} พื้นที่ปลูกยาง Site ที่ 2 เป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง

บทที่ 3

การศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น

3.1 บทนำ

3.1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันน้ำยางพารามีพื้นที่ปลูกทั่วโลกทั้งในแหล่งกำเนิดเดิมในประเทศบราซิล และนอกถิ่นกำเนิด ในประเทศ ไลบีเรีย ไนจีเรีย อินเดีย จีน และในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย และไทย ซึ่งประเทศที่ผลิตยางพารามากเป็นอันดับ 1 คือ ประเทศไทย มีผลผลิตรวมคิดเป็นร้อยละ 30.2 ของผลผลิตยางพาราทั้งโลก รองลงมาคือประเทศอินโดนีเซีย และอันดับ 3 คือ ประเทศมาเลเซีย รวมผลผลิตยางพาราทั้ง 3 ประเทศ คิดเป็นร้อยละ 65.9 ของผลผลิตยางพาราทั้งโลก ยางพาราได้ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยในปี พ.ศ.2443 และรัฐบาลมีการส่งเสริมให้ปลูกในปี พ.ศ. 2503 จนมาถึงปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารา 18.76 ล้านไร่ โดยแบ่งเป็นภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลางและตะวันออก และภาคใต้ ร้อยละ 4.7, 18.84, 11.97 และ 64.50 ตามลำดับ ส่งออก 2.95 ล้านตัน ในปี 2554 ประเทศไทย เป็นผู้ใช้อย่างอันดับ 5 ของโลก ด้วยปริมาณ 486,745 ตัน หรือร้อยละ 13.6 ของปริมาณการผลิตยางในประเทศ การส่งออกยางธรรมชาติของไทย ส่งออกในรูปของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ยาง ไมยางพาราแปรรูปและผลิตภัณฑ์ไม้ทำรายได้ให้แก่ประเทศ คิดเป็นมูลค่า 678,942 ล้านบาท ผลผลิตเฉลี่ย 276 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี จะเห็นได้ว่าสวนยางพาราก่อให้เกิดมูลค่าการส่งออกสูงและกำลังขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับประเทศไทยมีความได้เปรียบในเรื่องวัตถุดิบมากกว่าประเทศคู่แข่ง เนื่องจากมีวัตถุดิบเพียงพอสำหรับใช้ภายในประเทศ อย่างไรก็ตาม ความได้เปรียบต่างๆ ก็มักจะถูกกีดกันทางการค้าจากประเทศผู้นำเข้าโดยอ้างว่ายางพาราของประเทศไทยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและไม่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค อีกทั้งประเทศไทยยังได้ลงนามรับรองพิธีสารเกียวโตเมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งกำหนดให้ทุกภาคีร่วมรับผิดชอบดำเนินการด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศตามขีดความสามารถและสถานการณ์ของแต่ละประเทศด้วยความสมัครใจ และมีสิทธิ์เข้าร่วมโครงการตามกลไกการพัฒนาที่สะอาด ในช่วงพันธกรณีแรก พ.ศ. 2551-2555

ด้วยเหตุนี้ การปรับตัวเพื่อให้อุตสาหกรรมยางพาราของประเทศยังคงศักยภาพการแข่งขันได้ การศึกษาและวิเคราะห์ฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตจึงเป็นกลไกที่สำคัญอย่างหนึ่งเพื่อช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิต รวมถึงการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการคาดการณ์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้งทางบวกและทางลบ เพื่อกำหนดมาตรการป้องกันและแก้ไขผลกระทบสิ่งแวดล้อมและใช้ในการประกอบการตัดสินใจพัฒนาอุตสาหกรรม ในงานศึกษาชิ้นนี้จะนำแนวคิดของการประเมินวัฏจักรชีวิต หรือ LCA (Life Cycle Assessment: LCA) มุ่งเน้นที่จะเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลการใช้ทรัพยากร วัตถุดิบ สารเคมี ตลอดจนพลังงานที่ใช้ของสวนยางพาราในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย 2 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดบึงกาฬ และจังหวัดอุดรธานี เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลและพัฒนาต่อยอดไปสู่ฐานข้อมูลของประเทศ อีกทั้งผลการศึกษายังช่วยให้สามารถตัดสินใจเกี่ยวกับการเกษตรกรรมและการจัดการการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เป็นประโยชน์ทั้งในระดับเกษตรกรและระดับนโยบายของประเทศ

3.1.2 วัตถุประสงค์

3.1.2.1 เพื่อศึกษาค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรมในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รวม 2 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดบึงกาฬ และจังหวัดอุดรธานี ด้วยหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

3.1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม อาทิเช่น ขนาดของสวนยางพารา ลักษณะการถือครองที่ดิน และลักษณะทางสังคม เป็นต้น ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รวม 2 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดบึงกาฬ และจังหวัดอุดรธานี

3.1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

3.1.3.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของสวนยางพาราในเขตพื้นที่จังหวัดบึงกาฬ และจังหวัดอุดรธานี เพื่อคัดเลือกพื้นที่ในการเก็บข้อมูลการเกษตรกรรม โดยเก็บข้อมูลการเกษตรกรรมในพื้นที่สวนยางพารา คิดเป็นร้อยละ 30 ของพื้นที่การปลูกยางพาราในจังหวัดนั้นๆ ซึ่งครอบคลุมสวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ เพื่อกำหนดคาร์บอนฟุตพริ้นต์และพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์สวนยางพารา อาทิเช่น ขนาดของสวนยางพารา ลักษณะการถือครองที่ดิน และลักษณะทางสังคม เป็นต้น

3.1.3.2 ออกแบบสอบถาม และติดต่อผู้เป็นเจ้าของและชาวสวนยางพาราในพื้นที่เพื่อเข้าสำรวจเบื้องต้น

3.1.3.3 จัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นข้อมูลในการประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ หมายถึง ปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและวัตถุดิบ พลังงานและสารอนุมูล และปริมาณมลสารทางอากาศ

3.1.3.4 ประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม

3.1.3.5 สรุปรายงานผลสัมฤทธิ์ตลอดโครงการ

3.1.4 แผนงานของโครงการ

ตารางที่ 3-1 แผนงานของโครงการส่วนของการศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น

กิจกรรม	ม.ค. 58	เม.ย. 58	พ.ค. 58	มิ.ย. 58	ก.ค. 58	ส.ค. 58	ก.ย. 58
1. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของสวนยางพาราในเขตพื้นที่จังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี และคัดเลือกพื้นที่ในการเก็บข้อมูลการเกษตรกรรม	X	X					
2. ออกแบบสอบถาม และเข้าสำรวจเบื้องต้น	X	X	X				
3. ดำเนินการเข้าสำรวจและเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (LCI)			X	X	X		
4. ประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น					X	X	
5. จัดทำสรุปรายงานผลสัมฤทธิ์ตลอดโครงการ						X	X

3.1.5 ตัวชี้วัดผลสำเร็จ

- 3.1.5.1 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา จังหวัดบึงกาฬ
- 3.1.5.2 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา จังหวัดอุดรธานี
- 3.1.5.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

3.2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

3.2.1 จังหวัดบึงกาฬ

ลักษณะทางภูมิศาสตร์: ขนาดและที่ตั้ง

จังหวัดบึงกาฬมีที่ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานคร 751 กิโลเมตร มีพื้นที่รวมทั้งจังหวัด 4,305.746 ตารางกิโลเมตร หรือ 2,690,625 ไร่ มีอาณาเขตติดต่อกับเขตการปกครองกับจังหวัดข้างเคียงและสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ดังนี้

ทิศเหนือ ติดต่อกับ แขวงบอลิคำไซ สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว โดยมี แม่น้ำโขงเป็นเส้นกั้นพรมแดน

ทิศใต้ ติดต่อกับ อำเภอดงหลวง อำเภอบ้านม่วง และอำเภออากาศอำนวย จังหวัดสกลนคร

ทิศตะวันออก ติดต่อกับ อำเภอบ้านแพง จังหวัดนครพนม

ทิศตะวันตก ติดต่อกับ อำเภอรัตนวาปี และอำเภอเฝ้าไร่ จังหวัดหนองคาย

ลักษณะภูมิประเทศ

ลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดบึงกาฬ โดยทั่วไปเป็นที่ราบสูง แยกได้เป็น 3 บริเวณ คือ

- (1) พื้นที่เป็นคลื่นลอนลาด กระจายอยู่ทุกอำเภอเป็นหย่อมๆ ซึ่งเป็นพื้นที่ทำนาส่วนใหญ่และปลูก พืชไร่ พืชสวน และป่าธรรมชาติ
- (2) พื้นที่เป็นคลื่นลอนชันและเป็นเขาเป็นป่าธรรมชาติ เช่น ป่าไม้เต็งรัง เบญจพรรณ พบในเขตอำเภอ บึงกาฬ เซกา บึงโขงหลง ศรีวิไล บุ่งคล้า และพรเจริญ
- (3) สภาพพื้นที่เป็นภูเขาที่มีความสูงชัน จากระดับน้ำทะเลตั้งแต่ 200 เมตร เป็นบริเวณเทือกเขาต่างๆ ในเขตอำเภอเมืองบึงกาฬ บุ่งคล้า เซกา และบึงโขงหลง

ลักษณะภูมิอากาศ

มีลักษณะอากาศจัดอยู่ในจำพวกฝนแล้งร้อนและแห้งแล้ง (อินทาคม – มกราคม) ในฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ อุณหภูมิจะเริ่มลดในเดือนพฤศจิกายนและต่ำสุดในช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนมกราคม ในช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคมเป็นฤดูเปลี่ยนมรสุมเหนือ อุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในเดือนมีนาคมและร้อนจัดในเดือนเมษายน ในฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (มิถุนายน – กรกฎาคม) อุณหภูมิโดยทั่วไปจะลดลงในเดือนตุลาคมเป็นฤดูเปลี่ยนมรสุมใต้ อุณหภูมิจะเริ่มลดลงจนอากาศหนาวเย็น

สภาพเศรษฐกิจและสังคม

ประชากรและอาชีพ: จังหวัดบึงกาฬมีประชากรจำนวน 411,798 คน แบ่งเป็นชายจำนวน 207,523 คน เป็นหญิงจำนวน 204,266 คน

เศรษฐกิจ: ข้อมูลผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัดบึงกาฬยังไม่ได้แยกออกจากจังหวัดหนองคาย ซึ่งจังหวัดหนองคายเดิมมีทั้งหมด 17 อำเภอ ประชากรทั้งสิ้น 974,795 คน มีผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัด เท่ากับ 42,888 ล้านบาท มีรายได้เฉลี่ยต่อหัวประชากรเท่ากับ 43,997 บาทต่อคนต่อปี เป็นอันดับที่ 5 จากทั้งหมด 19 จังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สาขาการผลิตที่สำคัญได้แก่ สาขาเกษตรกรรม ค้าส่งค้าปลีก การศึกษา และสาขาอุตสาหกรรม ตามลำดับ สินค้าเกษตรที่สำคัญ ได้แก่ ยางพารา และข้าว

สำนักงานคลังจังหวัดบึงกาฬได้จัดทำประมาณการผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัดบึงกาฬจากข้อมูลผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัดหนองคาย ปี พ.ศ. 2553 โดยใช้การวิเคราะห์หาสัดส่วนจากจำนวนประชากรพบว่า เมื่อแบ่งจังหวัดออกมาเป็นจังหวัดบึงกาฬ จังหวัดบึงกาฬจะมีประชากรเท่ากับ 403,542 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 41.39 ของจังหวัดหนองคายเดิม จากสมมติฐานนี้พบว่า ผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัดบึงกาฬมีประมาณ 17,751.34 ล้านบาท เป็นอันดับที่ 18 จากทั้งหมด 20 อันดับในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ¹

การปกครอง: จังหวัดบึงกาฬแบ่งการปกครองออกเป็น 8 อำเภอ 43 ตำบล 615 หมู่บ้าน 17 เทศบาลตำบล 42 องค์การบริหารส่วนตำบล และ 1 องค์การบริหารส่วนจังหวัด

สำหรับสาขาการผลิตของจังหวัดบึงกาฬนั้นไม่แตกต่างจากจังหวัดหนองคาย โดยสาขาเกษตรกรรมเป็นสาขาการผลิตที่สำคัญ มีสัดส่วนร้อยละ 27.49 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมทั้งจังหวัดทั้งหมดปี พ.ศ. 2555 วิสัยทัศน์เพื่อการพัฒนาของจังหวัดบึงกาฬ คือ “ศูนย์กลางยางพาราของภาคอีสาน สะพานการค้า การท่องเที่ยว บ้านเมืองน่าอยู่ สู่ประชาคมอาเซียน” ผลิตภัณฑ์ที่มีศักยภาพของจังหวัด ได้แก่ ยางพารา โดยจังหวัดบึงกาฬมีพื้นที่ปลูกยางพารามากเป็นอันดับที่ 9 ของประเทศ และมากเป็นอันดับที่ 1 ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ² พื้นที่ปลูกยางพารา ปีเพาะปลูก 2554-2557 แสดงดังตารางที่ 3-2 และสามารถแบ่งพื้นที่การปลูกยางพาราตามอำเภอ ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-2 พื้นที่ปลูกยางพารา ปีเพาะปลูก 2554-2557

ปีเพาะปลูก	เนื้อที่ยืนต้น (ไร่)	เนื้อที่กรีดได้ (ไร่)	ผลผลิตรวม (ตัน)	ผลผลิตเฉลี่ย (กก./ไร่)
2554	626,829	299,570	75,791	253
2555	725,717	411,778	93,885	228
2556	733,136	499,400	107,870	216
2557	-	499,400	112,365	225

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (10 สิงหาคม 2557)

¹ บรรยายสรุปจังหวัดบึงกาฬ, กลุ่มงานข้อมูลสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานจังหวัดบึงกาฬ

² รายงานวิเคราะห์สถานการณ์การจัดทำข้อมูลเชิงพื้นที่ จังหวัดบึงกาฬ (2556), สำนักงานสถิติจังหวัดบึงกาฬ

3.2.2 จังหวัดอุดรธานี

ลักษณะทางภูมิศาสตร์: ขนาดและที่ตั้ง

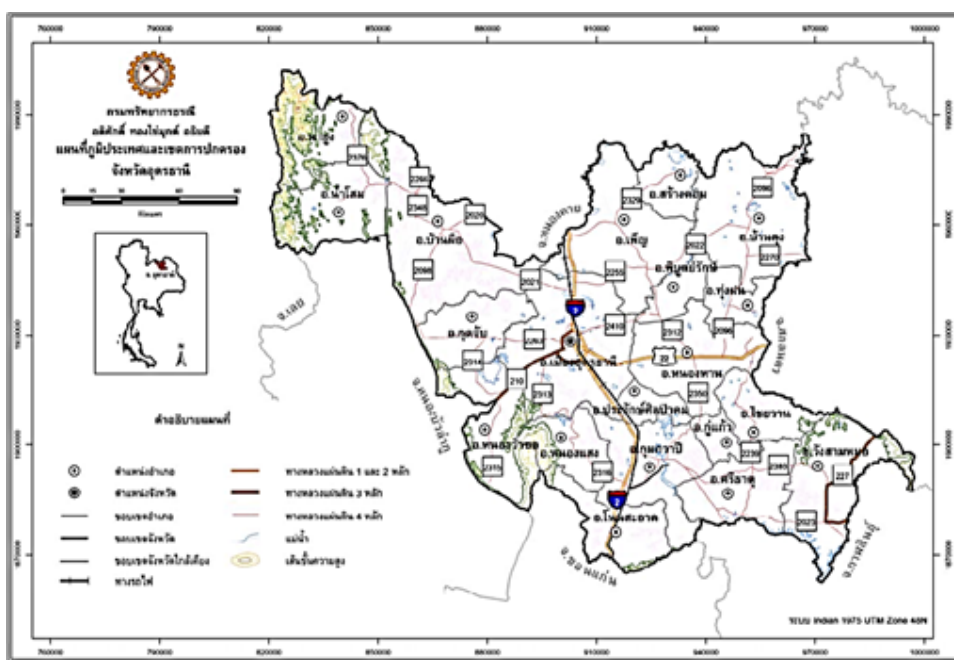
จังหวัดอุดรธานี ตั้งอยู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย บริเวณเส้นรุ้งที่ 17 องศาเหนือ เส้นแวงที่ 103 องศาตะวันออก อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครประมาณ 564 กิโลเมตร มีพื้นที่ประมาณ 11,730.302 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 7,331,438.75 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 2.29 ของพื้นที่ทั้งประเทศ เป็นจังหวัดที่มีพื้นที่มากเป็นอันดับที่ 4 ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีอาณาเขตติดต่อกับจังหวัดใกล้เคียง ดังนี้ (รูปที่ 3-1)

ทิศเหนือ ติดต่อกับ จังหวัดหนองคาย

ทิศใต้ ติดต่อกับ จังหวัดขอนแก่น และจังหวัดกาฬสินธุ์

ทิศตะวันออก ติดต่อกับ จังหวัดสกลนคร และจังหวัดกาฬสินธุ์

ทิศตะวันตก ติดต่อกับ จังหวัดหนองบัวลำภู และจังหวัดเลย



รูปที่ 3-1 แผนที่ภูมิประเทศและเขตการปกครอง จังหวัดอุดรธานี

ที่มา : กรมทรัพยากรธรณี, (2552)

ลักษณะภูมิประเทศ

ลักษณะภูมิประเทศของจังหวัดอุดรธานีทั่วไปประกอบด้วยภูเขา ที่สูง ที่ราบลุ่ม และพื้นที่ลูกคลื่นลอนตื้น แบ่งออกได้เป็น 2 บริเวณ คือ

(1) บริเวณที่สูงทางทิศตะวันตกและทิศใต้ สภาพภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ภูเขา บางส่วนเป็นพื้นที่ลูกคลื่นลอนตื้นหรือลอนลึก มีความสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 200 เมตร ครอบคลุมพื้นที่ในอำเภอน้ำโสม หนองวัวซอ โนนสะอาด ศรีธาตุ วังสามหมอ และด้านตะวันตกของอำเภอกุดจับ และบ้านผือ มี

เทือกเขาสูงสลับเนินเตี้ย บางส่วนเป็นพื้นที่ลูกคลื่นลอนตื้นสลับพื้นที่นา มีที่ราบลุ่มอยู่บริเวณริมแม่น้ำ เช่น ลำน้ำโม่ง ลำปาว เป็นต้น

(2) บริเวณพื้นที่ลูกคลื่นทางตะวันออกเฉียงเหนือ และทิศตะวันออก สภาพภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ลูกคลื่นลอนตื้น มีที่ดอนสลับที่นา บางส่วนเป็นเนินเขาเตี้ยๆ มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง เฉลี่ยน้อยกว่า 200 เมตร สภาพภูมิประเทศนี้ครอบคลุมพื้นที่อำเภอเมือง บ้านผือ กุมภวาปี หนองแสง เพ็ญ พุน้อย สร้างคอม บ้านดุง มีที่ราบลุ่มเป็นบริเวณใหญ่ในเขตอำเภอเมืองและอำเภอกุมภวาปี ซึ่งเป็นต้นกำเนิดลำน้ำปาว พื้นที่ลูกคลื่นดังกล่าวจะมีพื้นที่สูง ซึ่งเป็นป่าสงวนเดิมทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือทางอำเภอบ้านดุง นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ราบลุ่มบริเวณแม่น้ำต่างๆ เช่น ห้วยน้ำสวย ห้วยหลวง ลำน้ำเพ็ญ ห้วยโงนใหญ่ และแม่น้ำสงคราม

ลักษณะภูมิอากาศ

จังหวัดอุดรธานีแบ่งออกเป็น 3 ฤดู ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว อากาศร้อนอบอ้าวในฤดูร้อน และหนาวเย็นมากในฤดูหนาว เดือนที่มีอากาศร้อนอบอ้าวมากที่สุด คือ เดือนเมษายน และหนาวเย็นที่สุดในเดือนมกราคม อุณหภูมิต่ำสุดรายปี 9.8 องศาเซลเซียส สูงสุดรายปี 42.5 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 11,423.1 มิลลิเมตรต่อปี ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 70%³

สภาพเศรษฐกิจและสังคม

ประชากรและอาชีพ: จังหวัดอุดรธานีมีจำนวนประชากรทั้งสิ้น 1,557,298 คน เป็นชาย 777,179 คน หญิง 780,119 คน ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ได้แก่ ข้าวนาปี มันสำปะหลัง ข้าวโพด อ้อย และยางพารา เป็นต้น

เศรษฐกิจ: ผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัด ณ ราคาประจำปี ของจังหวัดอุดรธานี ปี 2555 มีมูลค่า 114,504 ล้านบาท ประกอบด้วย ภาคเกษตรมีมูลค่า 18,961 ล้านบาท และนอกภาคเกษตรมีมูลค่า 95,543 ล้านบาท⁴

การปกครอง: การเมืองการปกครองแบ่งออกเป็น 20 อำเภอ 156 ตำบล 1,880 หมู่บ้าน (ในเขตเทศบาลและนอกเขตเทศบาล) การปกครองส่วนท้องถิ่น ประกอบด้วย 1 องค์การบริหารส่วนจังหวัด เทศบาลนคร 1 แห่ง เทศบาลเมือง 3 แห่ง เทศบาลตำบล 49 แห่ง และองค์การบริหารส่วนตำบล 127 แห่ง⁵

จังหวัดอุดรธานี มีพื้นที่เกษตรกรรม 4,598,142 ไร่ จากพื้นที่ทั้งจังหวัด 7,155,680 ไร่ มีครัวเรือนเกษตร จำนวน 225,229 ครัวเรือน สำหรับยางพารา เป็นพืชเศรษฐกิจของจังหวัดอุดรธานี ซึ่งพื้นที่การปลูกกระจายตัวอยู่ทั้งใน 20 อำเภอ โดยอำเภอที่มีการปลูกยางพารามากที่สุด คือ อำเภอนายูง คิดเป็นร้อยละ 23.67 ของพื้นที่ปลูกยางพาราทั้งหมด ของจังหวัด รองลงมา คือ อำเภอน้ำโสม และอำเภอวังสามหมอ คิดเป็นร้อยละ 17.95 และ 11.61 ตามลำดับ ยางพาราของจังหวัดอุดรธานีมีผลผลิตเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่กรีดยางที่เปิดกรีดใหม่เพิ่มขึ้นมาก ประกอบกับสภาพอากาศเอื้ออำนวย มีปริมาณน้ำฝนที่พอเหมาะ ทำให้ต้นยางส่วนใหญ่มีปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้น สามารถให้น้ำยางได้มากขึ้น โดยข้อมูลพื้นที่ปลูกยางพารา ปีเพาะปลูก 2537-2557 แสดงดังตารางที่ 3-3 และข้อมูลด้านการเกษตรของจังหวัด แสดงดังตารางที่ 3-4

3 กรมทรัพยากรธรณี, (2552). การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณี จังหวัดอุดรธานี. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

4 สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร เขต 3 (2556), ภาวะเศรษฐกิจการเกษตร ปี 2556 และแนวโน้มปี 2557 จังหวัดอุดรธานี.

5 สำนักงานสถิติจังหวัดอุดรธานี (11 กุมภาพันธ์ 2554)

ตารางที่ 3-3 พื้นที่ปลูกยางพารา ปีเพาะปลูก 2537-2557 ของจังหวัดอุดรธานี

ปีเพาะปลูก	เนื้อที่ยืนต้น (ไร่)	เนื้อที่กรีด (ไร่)	ผลผลิตรวม (ตัน)	ผลผลิตเฉลี่ย (ก.ก./ไร่)
2537	26,140	1,550	147	95
2538	28,770	1,653	269	163
2539	29,320	9,080	1,571	173
2540	33,977	15,188	2,749	181
2541	35,844	18,713	3,350	179
2542	36,709	26,140	5,071	194
2543	37,424	28,770	6,473	225
2544	47,935	29,320	6,861	234
2545	50,987	33,977	8,222	242
2546	53,034	35,844	10,216	285
2547	60,879	36,709	10,903	297
2548	79,884	37,424	10,329	276
2549	101,986	47,935	13,470	281
2550	219,270	50,942	14,468	284
2551	295,000	52,000	14,880	286
2552	315,049	53,781	17,156	319
2553	325,866	71,613	19,871	277
2554	332,383	93,097	24,671	265
2555	311,240	209,785	38,181	182
2556	329,590	286,368	48,109	168
2557	-	307,684	52,614	171

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557

ตารางที่ 3-4 ข้อมูลด้านการเกษตรของจังหวัดอุดรธานี ปี 2555

ลำดับ	อำเภอ	พื้นที่ ทั้งหมด (ไร่)	พื้นที่ถือครองทำการเกษตร (ไร่)										จำนวนครัวเรือน(ครัวเรือน)	
			ที่นา	ที่ไร่	ไม้ผล	ไม้ยืนต้น	พืชผัก	ไม้ดอก/ ไม้ประดับ	ยางพารา	ปาล์ม น้ำมัน	พืชน้ำ อื่นๆ	รวม	ทั้งหมด	เกษตรกร
1	เมือง	735,490	302,964	61,610	4,057	16,647	4,546	418	5,395	149	60,467	456,253	127,925	28,042
2	บ้านดุง	577,355	330,730	33,823	4,175	18,221	1,912	92	34,993	1,528	30,215	455,689	35,042	23,111
3	บ้านผือ	619,510	213,287	127,502	17,788	10,385	1,067	35	43,254	2,957	30,869	447,144	24,219	18,293
4	กุมภวาปี	452,208	158,019	109,873	2,110	6,174	578	10	5,712	97	54,530	337,103	28,863	17,394
5	หนองหาน	442,574	204,553	24,705	1,644	6,654	377	22	4,031	641	17,109	259,736	27,918	14,877
6	เพ็ญ	563,421	313,463	12,500	2,128	7,042	925	46	10,635	289	9,191	356,219	26,048	19,844
7	ศรีธาตุ	305,005	73,093	77,051	2,798	1,786	1,090	3	3,884	1,070	5,010	165,785	10,781	9,504
8	น้ำโสม	464,447	71,238	144,314	5,798	3,823	771	5	68,400	509	8,893	303,751	16,447	10,455
9	หนองวัวซอ	437,977	74,260	50,572	6,387	1,859	1,156	44	18,398	336	14,135	167,147	12,775	7,880
10	กุดจับ	445,077	106,420	39,568	1,323	10,794	560	16	20,297	514	25,136	204,628	14,340	10,904
11	โนนสะอาด	273,565	56,907	99,491	593	3,614	726	26	5,753	279	4,526	171,915	12,089	9,274
12	สร้างคอม	147,704	104,823	1,198	2,120	3,724	867	10	2,656	47	12,884	128,329	7,622	5,066
13	วังสามหมอ	462,945	72,975	150,510	1,103	6,809	434	2	44,229	473	6,722	283,257	14,213	11,198
14	ทุ่งฝน	148,669	95,510	4,956	219	6,536	765		1,929		18,899	128,814	8,242	6,001
15	ไชยวาน	203,847	76,279	81,723	1,265	1,374	223	2	3,677	107	30,053	194,703	8,898	7,142
16	หนองแสง	227,383	28,742	112,330	1,995	14,555	534	20	10,183	60	1,184	169,603	6,835	6,180
17	นาแก	327,595	17,794	52,082	2,419	2,483	242	5	90,190	170	3,583	168,968	8,441	7,737
18	พิบูลย์รักษ์	116,484	53,968	3,136	438	4,186	51	10	950	120	6,259	69,118	6,910	3,875
19	กุฉีาร	113,256	42,422	17,627	1,034	6,149	55		5,459	44	1,887	74,677	5,731	4,503
20	ประจักษ์ ำ	91,168	49,399	2,069	357	672	127	2	1,014	5	1,658	55,303	5,899	3,949
	รวม	7,155,680	2,446,846	1,206,640	59,751	133,487	17,006	768	381,039	9,395	343,210	4,598,142	409,238	225,229

ที่มา: สำนักงานเกษตรจังหวัดอุดรธานี, 2555

3.3 การดำเนินโครงการ

3.3.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต

เป้าหมาย

เพื่อให้ได้ข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการการได้มาซึ่งน้ำยางพาราสดเพื่อวิเคราะห์ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ซึ่งจะต้องจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของสารขาเข้า (Input) และสารขาออก (Output) โดยเฉลี่ยแยกแต่ละกระบวนการผลิต (Inventory Data by Process) ของกระบวนการการได้มาซึ่งน้ำยางพาราสด

ขอบเขต

- ขอบเขตการศึกษา

โครงการนี้ได้มีเป้าหมายเพื่อที่จะคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการการได้มาซึ่งน้ำยางพาราสด โดยคำนวณออกมาในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม

ข้อมูลปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและวัตถุดิบ

ทรัพยากรธรรมชาติและวัตถุดิบที่ใช้ หมายถึง ทรัพยากรและวัตถุดิบทั้งหมดที่ต้องการสำหรับแต่ละกระบวนการย่อยที่อยู่ในขอบเขตที่ต้องการศึกษา ซึ่งปริมาณของทรัพยากรและวัตถุดิบที่ใช้จะระบุในรูปของน้ำหนักต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ได้

ข้อมูลปริมาณการใช้พลังงานและสาธารณูปโภค

ข้อมูลพลังงานและสาธารณูปโภคที่ใช้ในกระบวนการการได้มาซึ่งน้ำยางพาราสดหมายถึงพลังงานและสาธารณูปโภคที่ต้องการสำหรับแต่ละกระบวนการย่อยที่อยู่ในขอบเขตของระบบที่ศึกษาซึ่งอาจอยู่ในรูปของไฟฟ้า ไอน้ำ และหรือเชื้อเพลิงต่างๆ ซึ่งปริมาณพลังงานจะรายงานในรูปของมวล (กิโลกรัม หรือตัน) หรือปริมาตร (ลิตร หรือ ลูกบาศก์เมตร) ตามชนิดของตัวพาพลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ได้ กรณีจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนหน่วยจากหน่วยพลังงานเป็นหน่วยมวลหรือปริมาตรซึ่งจำเป็นต้องใช้ค่าความร้อน จะใช้ค่าความร้อนซึ่งอ้างอิงจากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงซึ่งกำหนดโดยกรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

ข้อมูลปริมาณมลสารทางอากาศ

ข้อมูลปริมาณมลสารทางอากาศที่เกิดจากกระบวนการการได้มาซึ่งน้ำยางพาราสด มลสารทางอากาศที่เกิดจากระบบสนับสนุนต่างๆ เช่น ระบบผลิตพลังงาน และมลสารทางอากาศที่เกิดจากกระบวนการกำจัดของเสีย (ถ้ามี) โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาให้เป็นไปตามที่กำหนดในประกาศ ข้อกำหนดมาตรฐานและกฎหมายอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกำหนดโดยหน่วยงานที่มีหน้าที่ดูแล ซึ่งปริมาณมลสารทางอากาศที่ปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศจะระบุในรูปของน้ำหนักต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ได้

ข้อมูลปริมาณมลสารทางน้ำ

ข้อมูลปริมาณมลสารทางน้ำที่เกิดจากกระบวนการการได้มาซึ่งน้ำยางพาราสด ได้แก่ BOD, COD, Total P, Total N และ SS และปริมาณมลสารทางน้ำที่เกิดจากกระบวนการกำจัดของเสีย (ถ้ามี) โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาให้เป็นไปตามที่กำหนดในประกาศ ข้อกำหนดมาตรฐานและกฎหมายอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกำหนดโดยหน่วยงานที่มีหน้าที่ในการกำกับดูแล ซึ่งปริมาณมลสารทางน้ำที่ระบายออกจากระบบการผลิตจะระบุในรูปของน้ำหนักต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ที่ได้

- หน่วยอ้างอิง (Reference Unit)

หน่วยอ้างอิง (Reference Unit) เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องทำการกำหนดขึ้นในทุกๆ การประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อใช้เป็นพื้นฐานสำหรับกำหนดการวัดหรือเก็บข้อมูลของสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบที่ทำการศึกษา รวมทั้งมีส่วนสำคัญในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์ด้วยสำหรับหน่วยอ้างอิง (Reference Unit) ของกระบวนการการได้มาซึ่งน้ำยางพาราสด สำหรับการศึกษา *กำหนดหน่วยการศึกษา คือ น้ำยางพาราสด 1 กิโลกรัม*

การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

ในการศึกษานี้ ได้แบ่งกลุ่มการศึกษาในแต่ละพื้นที่ออกเป็น 3 ขนาด ตามนิยาม พ.ร.บ.กองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง พ.ศ.2503⁶ ได้แก่

- สวนขนาดใหญ่ (L) สวนยางพาราที่มีพื้นที่ตั้งแต่ 250 ไร่ ขึ้นไป
- สวนขนาดกลาง (M) สวนยางพาราที่มีพื้นที่ตั้งแต่ 50 ไร่ ขึ้นไป แต่น้อยกว่า 250 ไร่
- สวนขนาดเล็ก (S) สวนยางพาราที่มีพื้นที่น้อยกว่า 50 ไร่

โดยกำหนดให้แต่ละพื้นที่มีอัตราสวนขนาดสวนยางพารา แบ่งออกเป็นสวนยางขนาดเล็ก 93.01%ของพื้นที่สวนยางทั้งหมด โดยมีขนาดของสวนยางเฉลี่ย 13 ไร่ สวนยางขนาดกลาง 6.71 %ของพื้นที่สวนยางทั้งหมด โดยมีขนาดโดยเฉลี่ย 60 ไร่ และสวนยางขนาดใหญ่ 0.28 % ของพื้นที่สวนยางทั้งหมด โดยมีขนาดเฉลี่ยของสวน 395 ไร่ (สถาบันวิจัยยาง, 2540)

ทั้งนี้ ในแต่ละพื้นที่จะเก็บข้อมูลการเกษตรกรรมในพื้นที่สวนยางพารา คิดเป็นร้อยละ 30 ของพื้นที่การปลูกยางพาราในจังหวัดนั้นๆ ซึ่งครอบคลุมสวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ โดยใช้วิธีการกำหนดขนาดตัวอย่างของ ทาโร ยามานะ⁷ ซึ่งกำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 90% ดังสมการต่อไปนี้

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2}$$

เมื่อ n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง (กลุ่มเกษตรกรตัวอย่าง : คน)

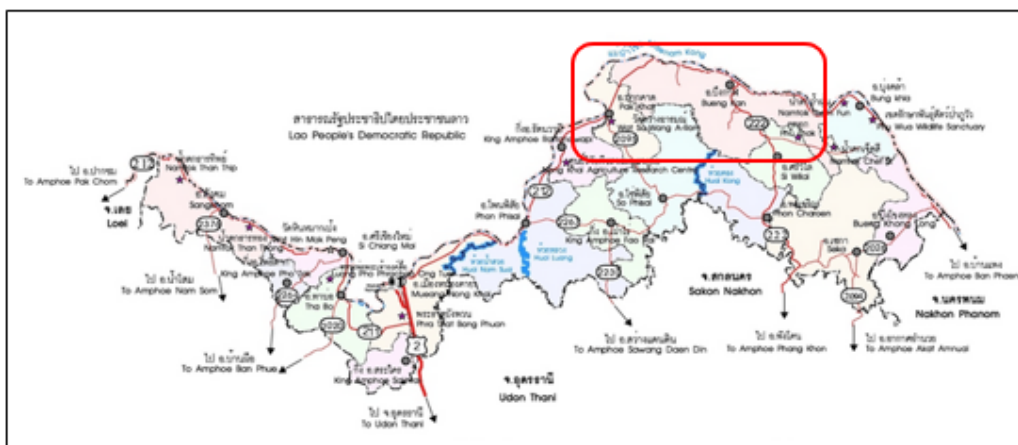
N = ขนาดของประชากร (จำนวนเกษตรกรในพื้นที่แต่ละขนาด: คน)

e = ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้

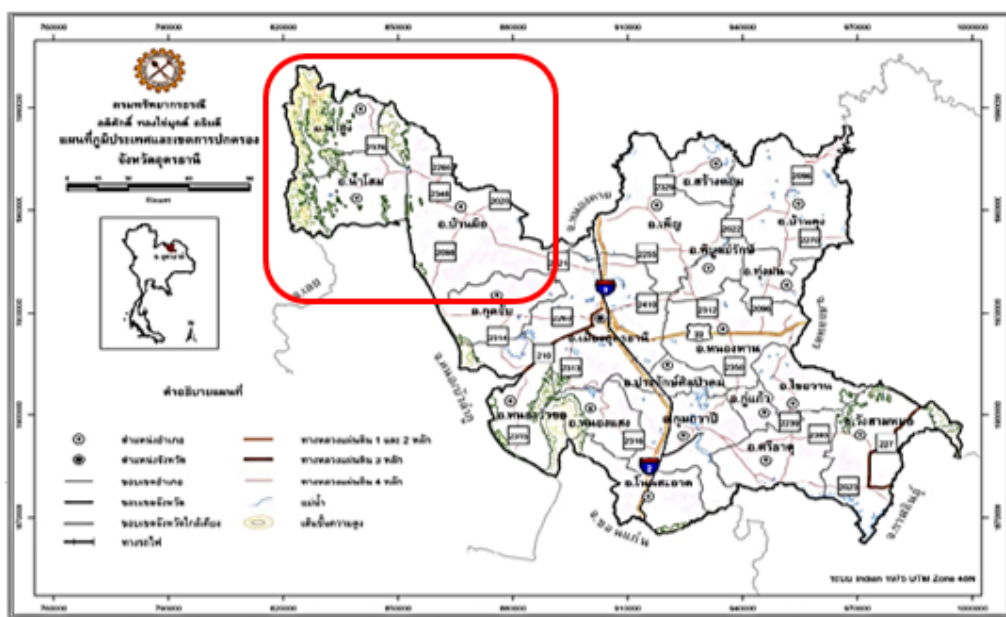
⁶ พระราชบัญญัติกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง, 2503.

⁷ Taro Yamane . Statistics : An Introductory Analysis. 1970 : 886.

สำหรับการเลือกพื้นที่ ในการศึกษาจะเลือกกลุ่มตัวอย่าง 2-3 พื้นที่ในแต่ละจังหวัด พิจารณาพื้นที่ที่มีการปลูกยางพารามาก และตั้งอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน โดยพื้นที่จังหวัดบึงกาฬที่เข้าเก็บตัวอย่าง ได้แก่ อำเภอเมือง และอำเภอบึงนาราง ดังรูปที่ 3-2 พื้นที่จังหวัดอุดรธานี ได้แก่ อำเภอนายูง อำเภอน้ำโสม และอำเภอบ้านผือ ดังรูปที่ 3-3 ซึ่งข้อมูลพื้นที่การปลูกยางพาราในจังหวัดบึงกาฬ และจังหวัดอุดรธานี โดยสำนักงานเกษตรจังหวัดบึงกาฬ และจังหวัดอุดรธานี แสดงดังตารางที่ 3-5 และตารางที่ 3-6 ตามลำดับ และจำนวนกลุ่มตัวอย่างในแต่ละพื้นที่ แสดงดังตารางที่ 3-7



รูปที่ 3-2 แผนที่แสดงพื้นที่กรณีศึกษาการปลูกยางพาราในจังหวัดบึงกาฬ
ที่มา : <http://www.vcharkarn.com>, 2558



รูปที่ 3-3 แผนที่แสดงพื้นที่กรณีศึกษาการปลูกยางพาราในจังหวัดอุดรธานี
ที่มา : กรมทรัพยากรธรณี, 2552

ตารางที่ 3-5 พื้นที่การปลูกยางพารา แยกรายอำเภอ จังหวัดบึงกาฬ

ลำดับ	อำเภอ	พื้นที่ปลูก (ไร่)			
		อายุ ปี 6-1	อายุ ปีขึ้นไป 6	รวม	ร้อยละ
1	เมือง	61,447	94,145	155,592	32.69
2	เซกา	35,944	51,410	87,354	18.36
3	โซ่พิสัย	35,554	23,151	58,705	12.34
4	บึงโขงหลง	9,567	12,231	21,798	4.58
5	บุงคล้า	5,716	7,393	13,109	2.75
6	ปากคาด	8,100	18,886	26,986	5.67
7	พรเจริญ	34,724	15,679	50,403	10.59
8	ศรีวิไล	20,956	41,019	61,957	13.02
รวม				475,904	100.00

ที่มา: โครงการจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ของยาพาราปี 2550 โดยการสำรวจข้อมูลระยะไกลและเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (2553), กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ตารางที่ 3-6 พื้นที่การปลูกยางพารา แยกรายอำเภอ จังหวัดอุดรธานี

ลำดับ	อำเภอ	พื้นที่ปลูก (ไร่)	ร้อยละ
1	นาเยือง	90,190	23.67
2	น้ำโสม	68,400	17.95
3	วังสามหมอ	44,229	11.61
4	บ้านผือ	43,254	11.35
5	บ้านดุง	34,993	9.18
6	กุดจับ	20,297	5.33
7	หนองวัวซอ	18,398	4.83
8	เพ็ญ	10,635	2.79
9	หนองแสง	10,183	2.67
10	โนนสะอาด	5,753	1.51
11	กุมภวาปี	5,712	1.50
12	กุँแก้ว	5,459	1.43
13	เมือง	5,395	1.42
14	หนองหาน	4,031	1.06
15	ศรีธาตุ	3,884	1.02
16	ไชยวาน	3,677	0.96
17	สร้างคอม	2,656	0.70
18	ทุ่งฝน	1,929	0.51
19	ประจักษ์ ๑	1,014	0.27
20	พิบูลย์รักษ์	950	0.25
รวม		381,039	100.00

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557

ตารางที่ 3-7 จำนวนกลุ่มตัวอย่างเกษตรกรในแต่ละพื้นที่ ของจังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี

ขนาดสวน	ขนาดเล็ก	ขนาดกลาง	ขนาดใหญ่	รวม
จังหวัดบึงกาฬ				
พื้นที่ (ไร่)	132,791.49	9,579.95	399.76	142,771.20
จำนวนเกษตรกร (คน)	2,656	64	2	2,722
จำนวนเกษตรกรตัวอย่าง (คน)	96	39	2	137
จังหวัดอุดรธานี				
พื้นที่ (ไร่)	106,321.31	7,670.32	320.07	114,311.70
จำนวนเกษตรกร (คน)	2,126	51	1	2,178
จำนวนเกษตรกรตัวอย่าง (คน)	96	34	1	131

3.3.2 การวิเคราะห์บัญชีรายการ

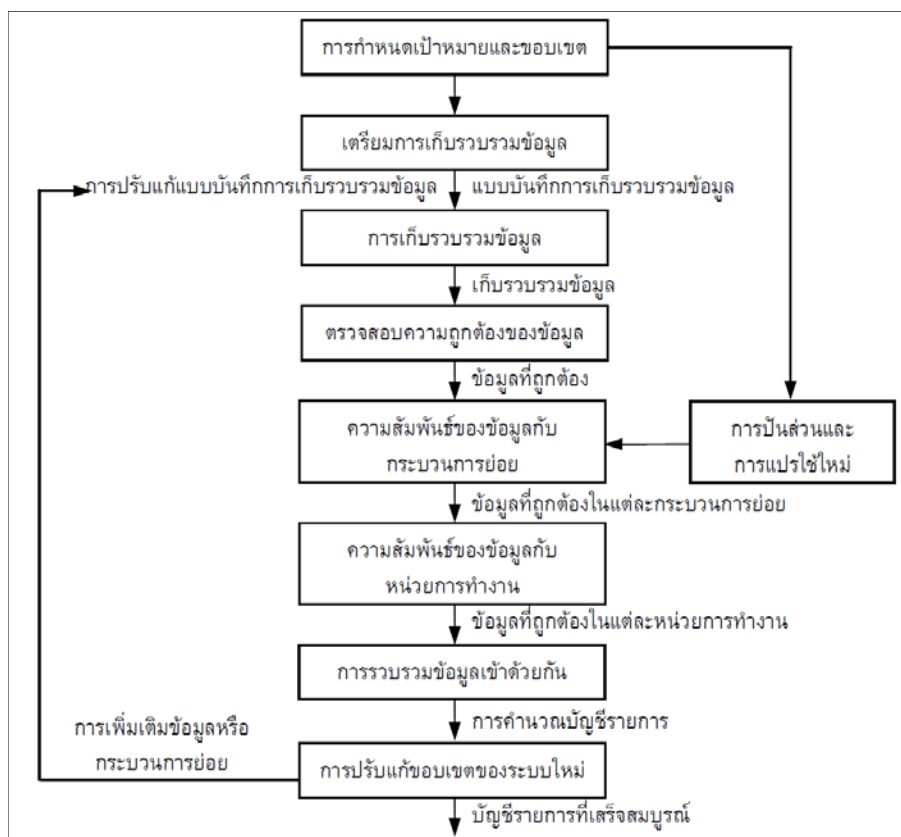
บัญชีรายการ คือ ข้อมูลบัญชีรายการ (Inventory data) ที่แสดงถึงปริมาณสารขาเข้า (Input) เช่น ทรัพยากร พลังงาน สารธาตุโภชนา และสารขาออก (Output) เช่น ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ร่วมมลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ กากของเสีย รวมถึงรายการด้านสิ่งแวดล้อมทั้งหมดของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา

การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory: LCI) เป็นการเก็บรวบรวมและคำนวณข้อมูลที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา รวมถึงการสร้างผังของระบบผลิตภัณฑ์ (Product System) การคำนวณหาปริมาณของสารขาเข้าและสารขาออกจากกระบวนการผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาถึงทรัพยากรและพลังงานที่ใช้ หรือการปล่อยของเสียออกสู่อากาศ น้ำ และดิน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะใช้ในการหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ต่อไป

การวิเคราะห์บัญชีรายการอาจต้องทำซ้ำไปมาในบางครั้ง เนื่องจากอาจมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติม การเปลี่ยนแปลงวิธีเก็บข้อมูล หรือการเพิ่มประเด็นปัญหาเพื่อให้สอดคล้องกับเป้าหมายของการศึกษาที่ได้ตั้งไว้ นอกจากนี้การเก็บข้อมูลในบัญชีรายการนั้นจะต้องทำให้สัมพันธ์กับทุกกระบวนการย่อยที่อยู่ในระบบ ซึ่งมีวิธีการเก็บข้อมูลแตกต่างกันขึ้นกับเป้าหมาย

กระบวนการหรือระบบที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตาม การรวบรวมข้อมูลนั้นยากที่จะทำให้ครบถ้วนสมบูรณ์ทั้งหมด เนื่องจากต้องใช้เวลาและงบประมาณมาก การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมนั้นควรพิจารณาในประเด็นต่างๆ ได้แก่ การเก็บรวบรวมข้อมูล การคำนวณ ความถูกต้องของข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลกับระบบย่อย การกำหนดขอบเขตของระบบให้เหมาะสมขึ้น (Refining system boundaries) และการปันส่วน (Allocation)

ขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการโดยทั่วไป แสดงดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 ขั้นตอนโดยทั่วไปของการวิเคราะห์บัญชีรายการ

ตัวอย่างการจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (Life cycle Inventory) ของผลิตภัณฑ์ใดๆ แสดงดังตารางที่ 3-8 และตัวอย่างการเก็บข้อมูลเพื่อจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมในรูปของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 3-5

การเก็บรวบรวมข้อมูล

บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมประกอบด้วยข้อมูลปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงาน รวมถึงการปลดปล่อยกากของเสีย มลสารทางอากาศ มลสารทางน้ำ ซึ่งในโครงการนี้จะทำการเก็บข้อมูลจากการผลิตจริงโดยใช้แบบสอบถามเป็นหลัก ซึ่งในกรณีที่ไม่สามารถให้ข้อมูลตามแบบสอบถามได้ คณะทำงานอาจทำการลงภาคสนามเพื่อสำรวจข้อมูลหรือใช้ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงต่างๆ

การเก็บรวบรวมข้อมูลเริ่มต้นจากการสำรวจข้อมูลในแหล่งข้อมูลอ้างอิงต่างๆ เพื่อศึกษารายการวัตถุดิบที่ใช้และกระบวนการในการผลิตผลิตภัณฑ์ และสร้างแผนผังกระบวนการผลิตขึ้นจากนั้นสร้างแบบสอบถามและส่งแบบสอบถามนั้นไปยังชาวสวนยาง นำแบบสอบถามกลับมาเพื่อวิเคราะห์ความครบถ้วนสมบูรณ์ ติดต่อผู้ให้ข้อมูลอีกครั้งเพื่อแก้ไขข้อมูลต่างๆ ให้สมบูรณ์ สอบถามถึงการบำบัดของเสีย สมมติฐานต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ เมื่อได้ข้อมูลของกระบวนการย่อยต่างๆ ก็จะนำมารวมเป็นข้อมูลชุดเดียว ซึ่งวิธีการรวมจะแตกต่างกันขึ้นกับความละเอียดของข้อมูลที่มีข้อมูลที่รวมเสร็จแล้วจะถูกส่งไปให้กับเจ้าของข้อมูลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้ง ซึ่งความยากง่ายในการเก็บรวบรวมข้อมูลเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการศึกษา และควรหลีกเลี่ยงการนับซ้ำ (Double Counting) รวมทั้งเมื่อกระบวนการย่อยมีสารขาเข้าเข้าไป

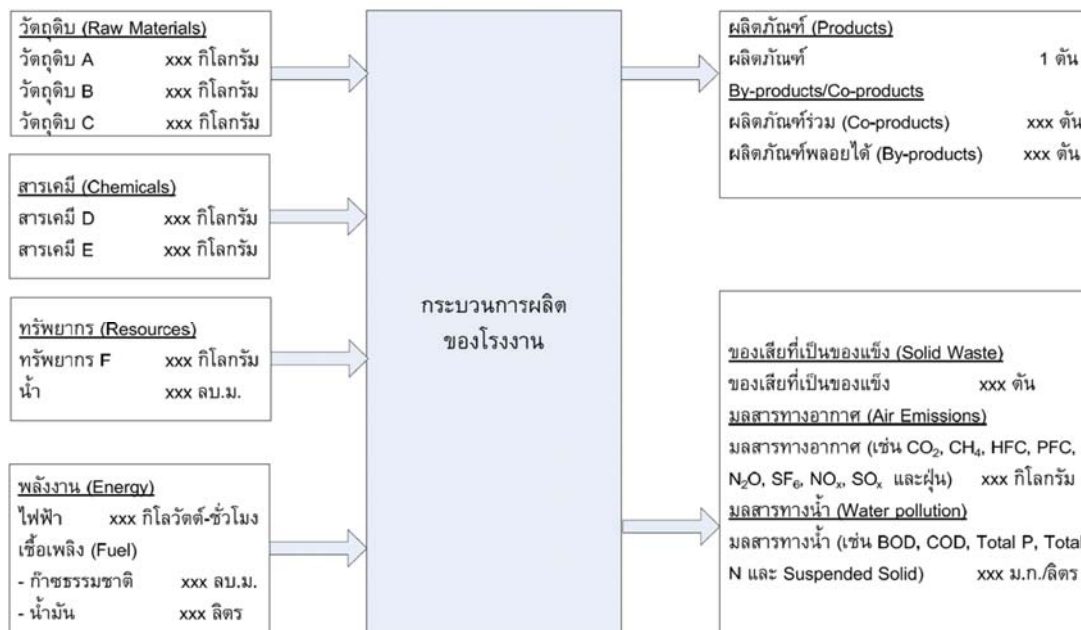
หลายชนิด (เช่น มีทางน้ำเข้าหลายที่เข้าไปในโรงบำบัดน้ำ) หรือสารออกหลายชนิด จะต้องมีการขึ้นตอนการปันส่วน (Allocation) มาเกี่ยวข้อง

ตารางที่ 3-8 ตัวอย่างการจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (Life cycle Inventory) ของผลิตภัณฑ์ใดๆ

สารขาเข้า	หน่วย	สารขาออก	หน่วย
วัตถุดิบ (Raw Material Resources)		ผลิตภัณฑ์	
- วัตถุดิบ - สารเคมี	ตัน/ปี ตัน/ปี	ผลิตภัณฑ์หลัก	ตัน/ปี
ทรัพยากรธรรมชาติ (Natural Resources)		ผลิตภัณฑ์ร่วม/ผลิตภัณฑ์พลอยได้	
- ก๊าซธรรมชาติ - ถ่านหิน - น้ำมัน - น้ำ	ล้านBTU/ปี ตัน/ปี ลิตร/ปี ลบ.ม./ปี	ผลิตภัณฑ์ร่วม/ผลิตภัณฑ์พลอยได้	ตัน/ปี
การใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy Use)		การปล่อยมลสารทางอากาศ (Air Emissions)	
ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต	kWh/ปี	- อัตราการไหลของอากาศ - มลสารทางอากาศ เช่น CO₂, CH₄, HFC, NOx, SOx และฝุ่น (Dust)	ลบ.ม./ชั่วโมง ppm
ระบบสนับสนุนอื่นๆ		การปล่อยมลสารทางน้ำ (Water Emissions)	
- ระบบผลิตน้ำปราศจากแร่ธาตุ - ระบบผลิตไอน้ำ	ลบ.ม./ชั่วโมง ตัน/ชั่วโมง	- อัตราการปล่อยน้ำเสีย - มลสารทางน้ำ เช่น BOD, COD, Total P, Total N และ Suspended Solids (SS)	ลบ.ม./ชั่วโมง mg/L
		การปล่อยมลสารทางดิน (Solid Emissions)	
		- ของเสียที่เป็นของแข็งจากกระบวนการผลิต - กากตะกอนบำบัดน้ำเสีย	ตัน/ปี ตัน/ปี

ที่มา : อนุกรมมาตรฐาน ISO 14041 .1998. อ้างใน สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2547. คู่มือการจัดทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์. ภายใต้โครงการ “การจัดทำฐานข้อมูลการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์และเหล็กกล้าเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อม”

อย่างไรก็ตาม อาจมีข้อมูลบางส่วนที่ไม่สามารถสืบหาได้โดยตรง คณะทำงานจะใช้แหล่งข้อมูลอื่นๆ อาทิเช่น ข้อมูลจากรายงานวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment Report; EIA Report) ข้อมูลจากเอกสารรายงานการวิจัย บทความวิชาการ วิทยานิพนธ์ และข้อมูลอ้างอิงจากต่างประเทศ การคำนวณทางวิศวกรรม ซึ่งขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีและองค์ประกอบทางเคมีของกระบวนการความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการนั้น เป็นต้น



รูปที่ 3-5 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลเพื่อจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมในรูปของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์

การตรวจสอบข้อมูล

เมื่อได้ข้อมูลจากแบบสอบถาม คณะทำงานจะทำการตรวจสอบข้อมูล โดยที่รายการที่ตรวจสอบประกอบด้วย

ตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูล

โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจากแหล่งอ้างอิงต่างๆ อาทิเช่น

- ข้อมูลจากรายงานวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment Report; EIA Report)
- ข้อมูลจากเอกสารรายงานการวิจัย บทความวิชาการ และวิทยานิพนธ์
- ข้อมูลอ้างอิงจากต่างประเทศ เป็นต้น

การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลจะใช้หลักการดุลมวลสาร และเทียบเคียงข้อมูลที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทเดียวกัน โดยมีหลักเกณฑ์คือดุลมวลสารขาเข้าและสารขาออกโดยมีความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ 10 ของปริมาณวัตถุดิบทั้งหมด

การปันส่วนและการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของปริมาณสารขาเข้าและสารขาออก (Inventory) รายผลิตภัณฑ์แยกแต่ละกระบวนการผลิต

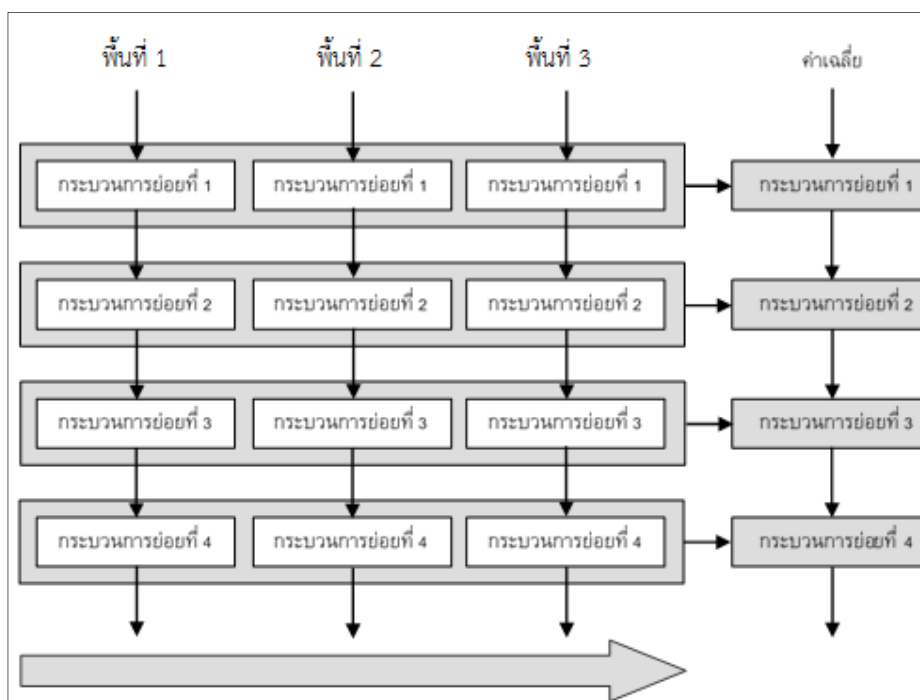
การจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม ซึ่งประกอบด้วยบัญชีรายการสารขาเข้าและบัญชีรายการสารขาออกสำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์ จะแสดงค่าเป็นข้อมูลต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ซึ่งได้จากการ ปันส่วน ซึ่งการปันส่วนสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น ปันส่วนโดยน้ำหนัก ปันส่วนโดยปริมาณพลังงาน ปันส่วนโดยมูลค่า

ผลิตภัณฑ์ฯ ในโครงการนี้จะทำการปันส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการใช้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เป็นหลักในการคำนวณ

ในการจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมสำหรับการเกษตรกรรมสวนยางพาราที่มีข้อมูลการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันจากหลายพื้นที่ซึ่งมีกระบวนการที่คล้ายคลึงกัน การคำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูลเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถเป็นตัวแทนของการผลิตน้ำยางพาราสดจะคิดค่าเฉลี่ยจากข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกแบบแนวนอน ซึ่งเป็นการคิดค่าเฉลี่ยตามกระบวนการผลิตย่อยของแต่ละพื้นที่ แสดงดังรูปที่ 3-6

3.3.3 แบบสอบถามข้อมูลบัญชีรายการ

แบบสอบถามข้อมูลบัญชีรายการของการศึกษานี้ ประกอบด้วยข้อมูล 6 ส่วน แสดงดังภาคผนวกพิจารณาครอบคลุมข้อมูลทั่วไป สรุปขั้นตอนการปลูกยางพารา การเพาะกล้ายางพารา การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่ การปลูกและการบำรุงรักษาก่อนกรีดยาง (ก่อนเปิดกรีด) และการบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนหมดน้ำยาง (หลังเปิดกรีด)



รูปที่ 3-6 แผนภาพแสดงวิธีการคิดค่าเฉลี่ยแบบแนวนอน

3.3.4 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อน หรือคาร์บอนฟุตพริ้นต์

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม เป็นขั้นตอนที่มีเป้าหมายเพื่อประเมินระดับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญในระบบผลิตภัณฑ์ที่พิจารณา โดยเป็นการแปรข้อมูลบัญชีรายการการใช้ทรัพยากรและการปลดปล่อยมลสาร (ค่าปริมาณของวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ตลอดจนของเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด) ให้อยู่ในรูปของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อน หรือ คาร์บอนฟุตพริ้นต์ด้วยหลักการ LCA ในการศึกษาจะแสดงผลในหน่วยสารอ้างอิงพื้นฐาน คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าในหน่วยกิโลกรัม (kg CO₂ equivalent) ซึ่งมีวิธีการดำเนินการ ดังนี้

- (1) ข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลหตุภูมิถูกแปลงให้อยู่ในรูปของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
- (2) แปลงค่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกให้อยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ โดยนำไปคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor) ของก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิด

3.3.5 แบบสอบถามข้อมูลบัญชีรายการ (ภาคผนวก ค)

3.4 ผลการดำเนินงาน

3.4.1 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory)

จากการเก็บข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของสวนยางพาราจากการเขตกรรม ซึ่งรวมถึงการใช้ปุ๋ย ยา และสารเคมี และของเสียที่เกิดขึ้น ในพื้นที่จังหวัดบึงกาฬ และจังหวัดอุดรธานี ครอบคลุมพื้นที่สวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ ดังนี้

● สวนขนาดเล็ก	จังหวัดบึงกาฬ	กลุ่มตัวอย่าง	96	แบบสอบถาม
● สวนขนาดกลาง	จังหวัดบึงกาฬ	กลุ่มตัวอย่าง	39	แบบสอบถาม
● สวนขนาดใหญ่	จังหวัดบึงกาฬ	กลุ่มตัวอย่าง	2	แบบสอบถาม
● สวนขนาดเล็ก	จังหวัดอุดรธานี	กลุ่มตัวอย่าง	96	แบบสอบถาม
● สวนขนาดกลาง	จังหวัดอุดรธานี	กลุ่มตัวอย่าง	34	แบบสอบถาม
● สวนขนาดใหญ่	จังหวัดอุดรธานี	กลุ่มตัวอย่าง	1	แบบสอบถาม

ทั้งนี้ ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของสวนแต่ละขนาดในแต่ละจังหวัดแสดงดังตารางที่ 3-9 ถึง 3-14 และค่า Emission Factor ที่ใช้ในการประเมิน แสดงดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-9 ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาดเล็ก จังหวัดบึงกาฬ

สารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย
การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่		
น้ำมันดีเซล	2.4115	กิโลกรัม
น้ำมันเครื่อง	0.0652	กิโลกรัม
ปุ๋ยซีโก้	6.9212	กิโลกรัม
ปุ๋ยคอก	0.5415	กิโลกรัม
ปุ๋ย 15-15-15	0.0903	กิโลกรัม
ปุ๋ย 0-3-0	17.2469	กิโลกรัม
Glyphosate	0.0508	กิโลกรัม
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง		
ต้นยาง	74	ต้น
ปุ๋ยยูเรีย	0.2924	กิโลกรัม
ปุ๋ยคอก	20.6627	กิโลกรัม
ปุ๋ย 16-16-8	3.4064	กิโลกรัม
ปุ๋ย 15-15-15	296.7899	กิโลกรัม
ปุ๋ย 16-16-16	8.0409	กิโลกรัม
ปุ๋ย 20-8-20	30.7505	กิโลกรัม
ปุ๋ย 16-9-16	0.0682	กิโลกรัม
ปุ๋ย 20-10-12	64.6199	กิโลกรัม
ปุ๋ย 18-4-5	13.5965	กิโลกรัม
Glyphosate	9.9065	กิโลกรัม
การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง		
ปุ๋ยคอก	183.6593	กิโลกรัม
ปุ๋ยหมักชีวภาพ	310.4101	กิโลกรัม
ปุ๋ยยูเรีย	182.9653	กิโลกรัม
ปุ๋ย 4-4-4	28.3912	กิโลกรัม
ปุ๋ย 15-15-15	117.8233	กิโลกรัม
ปุ๋ย 20-10-12	98.1073	กิโลกรัม
ปุ๋ย 16-16-16	26.8139	กิโลกรัม
ปุ๋ย 18-20-18	188.8013	กิโลกรัม
ปุ๋ย 20-8-20	159.3060	กิโลกรัม
ปุ๋ย 18-4-5	79.4953	กิโลกรัม
ปุ๋ย 21-4-21	829.6519	กิโลกรัม
ปุ๋ย 21-0-0	59.9354	กิโลกรัม
ปุ๋ย 15-20-20	18.7711	กิโลกรัม
ปุ๋ย 16-20-0	45.4259	กิโลกรัม
Glyphosate	0.2016	กิโลกรัม

สารขาออก	ปริมาณ	หน่วย
ผลิตภัณฑ์		
น้ำยางสด (น้ำหนักแห้ง)	5,689.10	กิโลกรัม

ตารางที่ 3-10 ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาดกลาง จังหวัดบึงกาฬ

สารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย
การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่		
น้ำมันดีเซล	3.7440	กิโลกรัม
น้ำมันเครื่อง	0.0706	กิโลกรัม
Glyphosate	0.0507	กิโลกรัม
ปุ๋ยคอก	7.3736	กิโลกรัม
ปุ๋ย 0-3-0	10.9116	กิโลกรัม
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง		
ต้นยาง	71	ต้น
ปุ๋ยคอก	130.1105	กิโลกรัม
ปุ๋ย 15-15-15	488.2490	กิโลกรัม
ปุ๋ย 20-10-12	38.4615	กิโลกรัม
Glyphosate	7.9397	กิโลกรัม
การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง		
ปุ๋ยคอก	583.4257	กิโลกรัม
ปุ๋ยยูเรีย	34.9224	กิโลกรัม
ปุ๋ย 15-15-15	435.6984	กิโลกรัม
ปุ๋ย 20-8-20	83.9886	กิโลกรัม
ปุ๋ย 21-4-21	1,241.1585	กิโลกรัม
ปุ๋ย 21-0-0	37.6940	กิโลกรัม
ปุ๋ย 46-0-0	179.6009	กิโลกรัม
ปุ๋ย 15-5-25	50.8869	กิโลกรัม
Glyphosate	1.2752	กิโลกรัม

สารขาออก	ปริมาณ	หน่วย
ผลิตภัณฑ์		
น้ำยางสด (นน.แห้ง)	6,058.71	กิโลกรัม

ตารางที่ 3-11 ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาดใหญ่ จังหวัดบึงกาฬ

สารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย
การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่		
น้ำมันดีเซล	5.0440	กิโลกรัม
น้ำมันเครื่อง	0.1060	กิโลกรัม
ปุ๋ยคอก	15.7143	กิโลกรัม
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง		
ต้นยางพารา	70	ต้น
ปุ๋ยคอก	1,428.5714	กิโลกรัม
ปุ๋ย 46-0-0	200.0000	กิโลกรัม
ปุ๋ย 18-46-0	185.7143	กิโลกรัม
ปุ๋ย 0-0-60	285.7143	กิโลกรัม
Glyphosate	25.1218	กิโลกรัม
การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง		
ปุ๋ยคอก	4,500.0000	กิโลกรัม
ปุ๋ย 46-0-0	900.0000	กิโลกรัม
ปุ๋ย 18-46-0	450.0000	กิโลกรัม
ปุ๋ย 0-0-60	900.0000	กิโลกรัม

สารขาออก	ปริมาณ	หน่วย
ผลิตภัณฑ์		
น้ำยางสด (นน.แห้ง)	7,776.00	กิโลกรัม

ตารางที่ 3-13 ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาดกลาง จังหวัดอุดรธานี

สารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย	สารขาออก	ปริมาณ	หน่วย
การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่			ผลิตภัณฑ์		
น้ำมันดีเซล	3.7440	กิโลกรัม	น้ำยางสด (นน.แห้ง)	6,215.09	กิโลกรัม
น้ำมันเครื่อง	0.0706	กิโลกรัม			
ปุ๋ยคอก	3.0409	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 0-3-0	10.2193	กิโลกรัม			
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง					
ต้นยางพารา	70	ต้น			
ปุ๋ยคอก	113.5597	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 15-15-15	558.2286	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 20-10-12	14.3505	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 16-16-16	0.6326	กิโลกรัม			
Glyphosate	13.6785	กิโลกรัม			
การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง					
ปุ๋ยคอก	143.3905	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 15-15-15	393.64	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 20-8-20	20.81	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 21-4-21	2,503.82	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 6-3-5	58.38	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 25-7-7	56.18	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 46-0-0	90.88	กิโลกรัม			

ตารางที่ 3-14 ข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมการปลูกยางพารา 1 ไร่ สวนขนาดใหญ่ จังหวัดอุดรธานี

สารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย	สารขาออก	ปริมาณ	หน่วย
การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่			ผลิตภัณฑ์		
น้ำมันดีเซล	5.0440	กิโลกรัม	น้ำยางสด (นน.แห้ง)	6,243.75	กิโลกรัม
น้ำมันเครื่อง	0.1060	กิโลกรัม			
ปุ๋ย 0-3-0	17.5000	กิโลกรัม			
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง					
ต้นยางพารา	76	ต้น			
ปุ๋ย 20-10-12	575.0000	กิโลกรัม			
Glyphosate	25.5600	กิโลกรัม			
การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง					
ปุ๋ย 30-5-18	2,706.0000	กิโลกรัม			

ตารางที่ 3-15 Emission Factor ที่ใช้ในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

รายการ	Emission Factor (kgCO ₂ e./kg)	แหล่งอ้างอิง
ปุ๋ยไนโตรเจน	2.7896	SimaPro 7.3.2: Ammonium sulphate, as N, at regional storehouse/RER U, Econvert 2.2
ปุ๋ยฟอสฟอรัส	1.6117	SimaPro 7.3.2: Diammonium phosphate, as P ₂ O ₅ at regional storehouse/RER U, Econvert 2.2
ปุ๋ยโพแทสเซียม	3.3780	SimaPro 7.3.2: Potassium chloride, as K ₂ O, at regional storehouse/RER U, Econvert 2.2
แมนโคเซบ	5.2669	SimaPro 7.3.2: Mancozeb, at regional storage/ RER U, Econvert 2.2
ไกลโฟเซต	16.0000	TGO Guidebook (เม.ย. 57): Glyphosate, Econvert 2.2
พาราควอต	3.2300	TGO Guidebook (เม.ย. 57): Paraquat, Econvert 2.2
น้ำมันเครื่อง	0.8319	TGO Guidebook (เม.ย. 57): Lubricating oil, at plant, Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a
น้ำมันดีเซล (การได้มา)	0.3282	TGO Guidebook (เม.ย. 57): น้ำมันดีเซล, Thai national database
น้ำมันดีเซล (การเผาไหม้)	2.7446	TGO Guidebook (เม.ย. 57): ดีเซล (ที่มีการเคลื่อนที่), IPCC

3.4.2 ผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

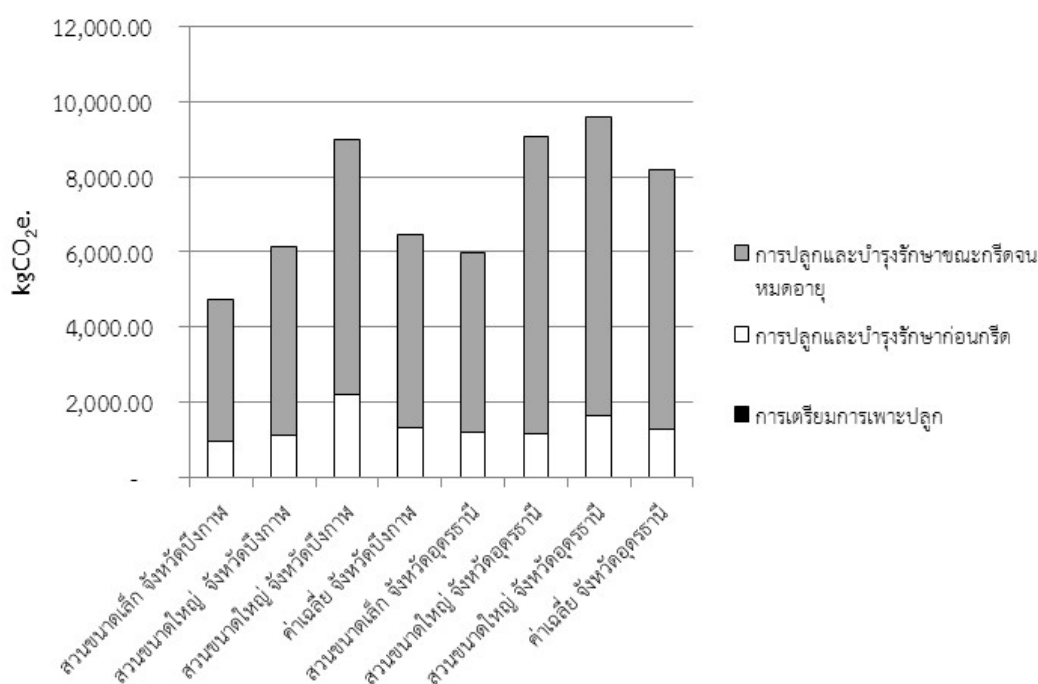
ผลการศึกษาค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราในเขตพื้นที่จังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี ในที่นี้จะนำเสนอ 2 รูปแบบ ได้แก่ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราตลอดช่วงอายุต้นยางต่อไร่ และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ต่อหน่วยหน้าที่ (Functional unit) หรือค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสด 1 กิโลกรัม โดยผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราตลอดช่วงอายุต้นยางต่อไร่ สวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ ของจังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี แสดงดังตารางที่ 3-16 และรูปที่ 3-7 (ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่มาจากการเตรียมการเพาะปลูกมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับการปลูกและบำรุงรักษาก่อนเปิดกรีด และการปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดจนหมดอายุ จึงทำให้ไม่เห็นกราฟในส่วนของการเตรียมการเพาะปลูก)

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ต่อหน่วยหน้าที่ (Functional unit) หรือค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสด 1 กิโลกรัม ของจังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี แสดงดังตารางที่ 3-17 และรูปที่ 3-8 (ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่มาจากการเตรียมการเพาะปลูกมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับการปลูกและบำรุงรักษาก่อนเปิดกรีด และการปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดจนหมดอายุ จึงทำให้ไม่เห็นกราฟในส่วนของการเตรียมการเพาะปลูก)

ตารางที่ 3-16 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของสวนยางพาราตลอดช่วงอายุต้นยางต่อไร่ สวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ ของจังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี

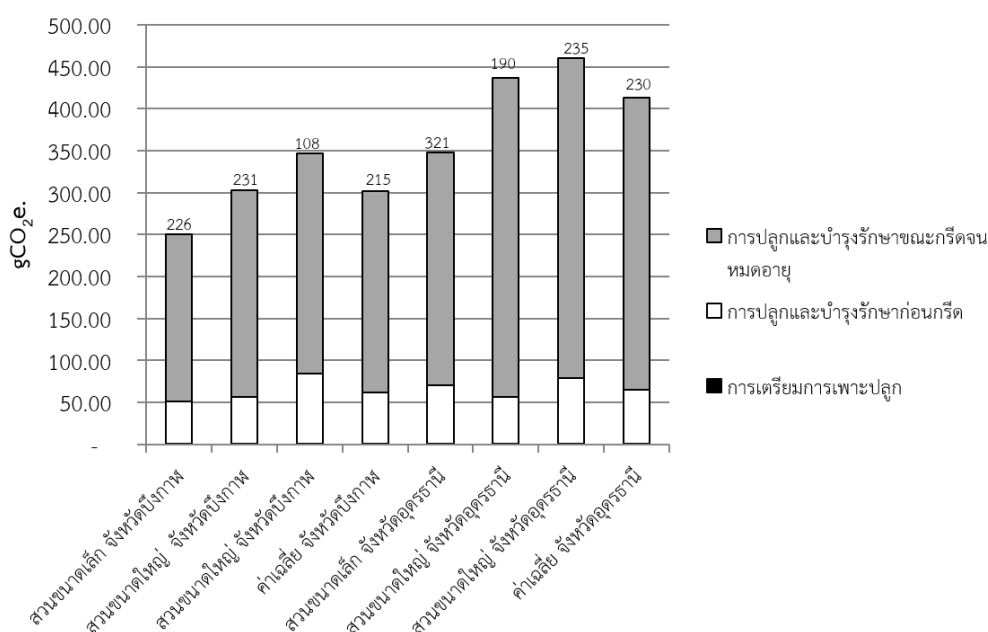
พื้นที่สวนยางพารา	kgCO ₂ e/ไร่
สวนยางพาราขนาดเล็ก (พื้นที่น้อยกว่า 50 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ	4,729.76
สวนยางพาราขนาดกลาง (พื้นที่มากกว่า 50 ไร่ แต่น้อยกว่า 250 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ	6,119.07
สวนยางพาราขนาดใหญ่ (พื้นที่มากกว่า 250 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ	8,968.05
ค่าเฉลี่ย สวนยางพารา จังหวัดบึงกาฬ	6,473.54
สวนยางพาราขนาดเล็ก (พื้นที่น้อยกว่า 50 ไร่) จังหวัดอุดรธานี	5,996.41
สวนยางพาราขนาดกลาง (พื้นที่มากกว่า 50 ไร่ แต่น้อยกว่า 250 ไร่) จังหวัดอุดรธานี	9,058.70
สวนยางพาราขนาดใหญ่ (พื้นที่มากกว่า 250 ไร่) จังหวัดอุดรธานี	9,584.29
ค่าเฉลี่ย สวนยางพารา จังหวัดอุดรธานี	8,166.03



รูปที่ 3-7 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของสวนยางพาราตลอดช่วงอายุต้นยางต่อไร่ สวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ ของจังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี

ตารางที่ 3-17 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสด 1 กิโลกรัม ของจังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี

พื้นที่สวนยางพารา	gCO ₂ e/kg น้ำยางสด
สวนยางพาราขนาดเล็ก (พื้นที่น้อยกว่า 50 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ	251
สวนยางพาราขนาดกลาง (พื้นที่มากกว่า 50 ไร่ แต่น้อยกว่า 250 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ	303
สวนยางพาราขนาดใหญ่ (พื้นที่มากกว่า 250 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ	346
ค่าเฉลี่ย สวนยางพารา จังหวัดบึงกาฬ	302
สวนยางพาราขนาดเล็ก (พื้นที่น้อยกว่า 50 ไร่) จังหวัดอุดรธานี	348
สวนยางพาราขนาดกลาง (พื้นที่มากกว่า 50 ไร่ แต่น้อยกว่า 250 ไร่) จังหวัดอุดรธานี	437
สวนยางพาราขนาดใหญ่ (พื้นที่มากกว่า 250 ไร่) จังหวัดอุดรธานี	461
ค่าเฉลี่ย สวนยางพารา จังหวัดอุดรธานี	413



รูปที่ 3-8 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสด 1 กิโลกรัม สวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ ของจังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี

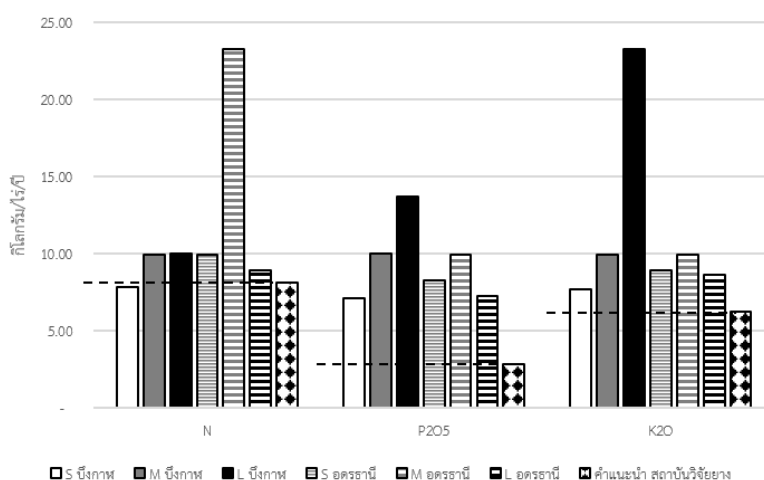
จากรูปที่ 3-8 พบว่าค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสด 1 กิโลกรัม ในจังหวัดบึงกาฬ สวนยางพาราขนาดใหญ่ มีค่ามากที่สุด รองลงมา สวนยางพาราขนาดกลาง และสวนยางพาราขนาดเล็ก ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกับค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสด 1 กิโลกรัม ในจังหวัดอุดรธานี ซึ่งสวนยางพาราขนาดใหญ่มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์มากที่สุด ตามด้วยสวนยางพาราขนาดกลาง และสวนยางพาราขนาดเล็ก ตามลำดับ

หากพิจารณาถึงผลกระทบหลักของการเขตรกรรม โดยส่วนมากเป็นผลมาจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน ปุ๋ยฟอสฟอรัส และปุ๋ยโพแทสเซียม ซึ่งพบว่าพื้นที่ที่มีการใช้ปุ๋ยมากจะมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ไปในแนวโน้มที่สูงเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ ค่าเฉลี่ยการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน ปุ๋ยฟอสฟอรัส และปุ๋ย

โพแทสเซียมของแต่ละพื้นที่ แสดงดังตารางที่ 3-18 นอกจากนี้ การใช้ปุ๋ยของเกษตรกรดังกล่าว หมายถึงรวมถึงการใช้ปุ๋ยเพื่อดูแลรักษาดินยางพาราก่อนเปิดกรีดย และหลังเปิดกรีดย จะมีค่ามากกว่าปริมาณธาตุอาหารที่จำเป็นของการปลูกต้นยางพารา สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตามคำแนะนำของสถาบันวิจัยยาง⁸ อีกด้วย แสดงดังรูปที่ 3-9 และ 3-10

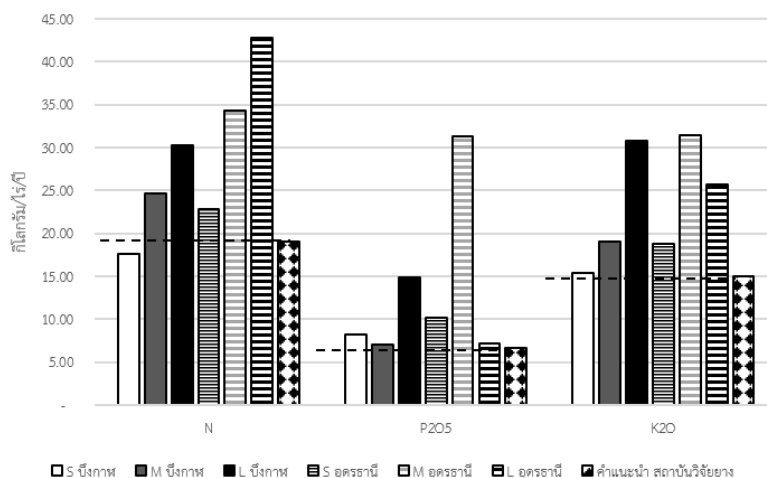
ตารางที่ 3-18 ค่าการใช้ปุ๋ยของสวนยางพาราแต่ละพื้นที่เปรียบเทียบกับค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแต่ละพื้นที่ จังหวัดบึงกาฬและจังหวัดอุดรธานี

พื้นที่สวนยางพารา	ปุ๋ย ไนโตรเจน	ปุ๋ย ฟอสฟอรัส	ปุ๋ย โพแทสเซียม	รวม	ลำดับ	คาร์บอนฟุตพริ้นท์	ลำดับ
	กิโลกรัม/กิโลกรัม น้ำยางสด					gCO2e/kg น้ำยางสด	
สวนยางพาราขนาดเล็ก (พื้นที่น้อยกว่า 50 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ	0.0211	0.0113	0.0188	0.0512	6	251	6
สวนยางพาราขนาดใหญ่ (พื้นที่มากกว่า 50 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ	0.0271	0.0106	0.0218	0.0595	5	303	5
สวนยางพาราขนาดใหญ่ (พื้นที่มากกว่า 250 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ	0.0270	0.0151	0.0298	0.0718	3	346	4
สวนยางพาราขนาดเล็ก (พื้นที่น้อยกว่า 50 ไร่) จังหวัดอุดรธานี	0.0303	0.0150	0.0248	0.0701	4	348	3
สวนยางพาราขนาดใหญ่ (พื้นที่มากกว่า 50 ไร่) จังหวัดอุดรธานี	0.0354	0.0325	0.0327	0.1006	1	437	2
สวนยางพาราขนาดใหญ่ (พื้นที่มากกว่า 250 ไร่) จังหวัดอุดรธานี	0.0445	0.0093	0.0267	0.0805	2	461	1



รูปที่ 3-9 ปริมาณธาตุอาหารจากการใส่ปุ๋ยของสวนยางพาราช่วงอายุก่อนเปิดกรีดย จังหวัดบึงกาฬ และอุดรธานี เปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยตามคำแนะนำของสถาบันวิจัยยาง

⁸ นุชนารถ กังพิศดาร .(2556). การพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการธาตุอาหารพืช สำหรับยางพาราเฉพาะพื้นที่. สถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร ,



รูปที่ 3-10 ปริมาณธาตุอาหารจากการใส่ปุ๋ยของสวนยางพาราช่วงอายุหลังเปิดกรีด จังหวัดบึงกาฬ และอุตรดิตถ์ เปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยตามคำแนะนำของสถาบันวิจัยยาง

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของน้ำยางสด เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ การศึกษา ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์จากสวนยางพาราในปัจจุบัน มักประเมินต่อน้ำยางสด ซึ่งเป็น ผลิตภัณฑ์หลักของการปลูกยางพารา นอกเหนือไปจากผลิตภัณฑ์พลอยได้ เช่น ไม้ยางพารา และปึก ไม้ เป็นต้น ดังนั้น ในการศึกษาจะเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ได้มีการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของ ผลิตภัณฑ์น้ำยางสด กำหนดหน่วยหน้าที่ (หน่วยประเมิน) 1 กิโลกรัม แสดงดังตารางที่ 3-19

ตารางที่ 3-19 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์น้ำยางสดเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

แหล่งข้อมูล		g CO ₂ eq./กิโลกรัม น้ำยางสด
ฐานข้อมูลต่างประเทศ	Ecoinvent 2.2, - ซอร์ฟแวร์ SimaPro Version 7.3.2	0.00
ฐานข้อมูลประเทศไทย	Thai national database, TGO (2557)	38.10
งานวิจัยในประเทศ	Jawjit. et al. (2010)	203.00
ค่าเฉลี่ย จังหวัดจันทบุรี	ภายใต้งานวิจัย ปี 2556	200.00
ค่าเฉลี่ย จังหวัดระยอง	ภายใต้งานวิจัย ปี 2556	221.00
ค่าเฉลี่ย จังหวัดบึงกาฬ	ภายใต้งานวิจัย ปี 2557	302.00
ค่าเฉลี่ย จังหวัดอุตรดิตถ์	ภายใต้งานวิจัย ปี 2557	413.00

จากตารางที่ 3-19 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของน้ำยางสดจังหวัดบึงกาฬ และจังหวัดอุตรดิตถ์ ภายใต้การศึกษานี้ มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำยางสดจังหวัดระยอง และจังหวัดจันทบุรี ภายใต้ งานวิจัยปี 2556 เนื่องจากปริมาณการใช้ปุ๋ยต่อหน่วยหน้าที่ของน้ำยางสดจังหวัดบึงกาฬ และจังหวัด อุตรดิตถ์มีค่าสูงกว่า จึงทำให้ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์สูงตามไปด้วย ค่าเฉลี่ยของน้ำยางสดจังหวัดจันทบุรี และจังหวัดระยอง ภายใต้การศึกษานี้ ยังมีความแตกต่างจากฐานข้อมูลทั้งของประเทศไทยและ ต่างประเทศ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการกำหนดขอบเขต วิธีการป็นส่วน และค่าการปล่อยก๊าซเรือน กระจกของบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน

3.4.3 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์น้ำยาสด 1 กิโลกรัม ในพื้นที่สวนยางพาราทั้งสวนขนาดเล็ก สวนขนาดกลาง และสวนขนาดใหญ่ ของจังหวัดบึงกาฬ และจังหวัดอุดรธานี พบว่า สวนยางพาราขนาดใหญ่ มีค่ามากที่สุด รองลงมา สวนยางพาราขนาดกลาง และสวนยางพาราขนาดเล็ก ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันทั้ง 2 จังหวัด โดยพบว่าปริมาณการใช้ปุ๋ยต่อหน่วยเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ อีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ คือ ปริมาณผลผลิตน้ำยาสดต่อไร่ หากเกษตรกรสามารถเพิ่มผลผลิตได้มากขึ้น โดยที่ยังใช้ปุ๋ยในปริมาณเท่าเดิม หรือใช้ปุ๋ยลดลงแต่ยังคงผลผลิตจะสามารถลดค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ได้ เนื่องจากในปัจจุบันเกษตรกรส่วนใหญ่ใช้ปุ๋ยมากเกินไปจนความจำเป็น โดยธาตุอาหารที่พืชต้องการตามข้อแนะนำของสถาบันวิจัยยาง สำหรับการปลูกยางพาราภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากจะเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังช่วยเพิ่มผลผลิตเฉลี่ยได้มากถึง ร้อยละ 26.01 ของผลผลิตก่อนการปรับปรุง คิดเป็นเงินที่ได้เพิ่มขึ้นจากผลผลิต 6,835 บาท/ไร่/ปี (คำนวณรายได้จากราคายางพารา 70 บาทต่อกิโลกรัม และคำนวณค่าปุ๋ยจากราคาปุ๋ยรายจังหวัด เดือนสิงหาคม พ.ศ.2554 ข้อมูลจากกรมการค้าภายใน) และยังเป็นลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

บทที่ 4

การศึกษาสมมูลน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำอเวอรพรีนซ์ของสวนยางพารา

4.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีความต้องการใช้ยางพาราเพิ่มขึ้นมากในโลก จึงทำให้มีการขยายพื้นที่ปลูกเพิ่มมากขึ้นในหลายประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จีน ลาว กัมพูชา พม่า เวียดนาม และอินเดีย ทำให้มีความเป็นห่วงว่าจะมีการทำลายป่า เพื่อนำพื้นที่มาปลูกยางพาราและจะมีผลกระทบต่อวัฏจักรน้ำในภูมิภาค โดยมีนักวิจัยในระดับนานาชาติบางกลุ่มมีความคิดเห็นว่ายางพาราเป็นพืชที่ใช้น้ำมาก และการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน เพื่อขยายพื้นที่ปลูกยางพารานั้นอาจมีผลกระทบต่อน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ส่งผลกระทบสร้างความเสียหายต่อสภาพแวดล้อมได้ ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อประเทศไทยจากข้อมูลการศึกษาอเวอรพรีนซ์โดยผู้อื่น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยเองต้องมีข้อมูลอเวอรพรีนซ์ที่ตรวจวัดจริงจากพื้นที่ปลูกสวนยางพาราภายในประเทศไทย เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการตัดสินใจในระดับนโยบาย

นอกจากนี้ การศึกษาสมมูลน้ำของสวนยางพารา จะทำให้ทราบปริมาณการใช้น้ำของสวนยางพารา และทราบผลกระทบของปัจจัยสภาพแวดล้อมต่อการใช้น้ำของยางพารา ข้อมูลพื้นฐานนี้มีจำเป็นอย่างยิ่งต่อการประเมินผลกระทบของสภาวะโลกร้อนต่อการใช้น้ำของยางพารา และยังสำคัญต่อการตัดสินใจการให้น้ำชลประทาน และการจัดการน้ำในสวนยางพาราอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพการผลิตของยางพาราได้ อีกทั้งยังเป็นข้อมูลสำคัญเชิงนโยบาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งนโยบายเรื่องน้ำชลประทานให้สวนยางพาราซึ่งจะมีผลตอบแทนการลงทุนที่สูงมาก ทั้งในด้านการเงินและสังคม

4.2 การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาศมมูลคาร์บอนของสวนยางพาราดำเนินการใน 2 พื้นที่ ได้แก่

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนาบชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา

แปลงยางอายุมาก ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา (ละติจูด $13^{\circ}34'21.97''N$ ลองจิจูด $101^{\circ}28'5.53''E$ ความสูงจากระดับน้ำทะเล 69 เมตร) ตั้งอยู่ที่อำเภอสนาบชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา แปลงทดลองตั้งอยู่กลางศูนย์วิจัย มีเนื้อที่ประมาณ 50 ไร่ เป็นพื้นที่ปลูกยางที่อาศัยน้ำฝน ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 20 ปี (ปี พ.ศ. 2557) ระยะปลูก 2.5×7 เมตร และเปิดกรีดมาแล้ว 11 ปี ดินในพื้นที่ปลูกยางเป็นชุดดินกบินทร์บุรี ความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดยางพารา (รูปที่ 2-1)

Site ที่ 2 พื้นที่สวนยางของเกษตรกร อำเภอบางบาล จังหวัดบึงกาฬ

สวนยางพาราของเกษตรกร ตั้งอยู่ที่อำเภอบางบาล จังหวัดบึงกาฬ (ละติจูด $18^{\circ}13'22.77''N$ ลองจิจูด $103^{\circ}18'59.46''E$ ความสูงจากระดับน้ำทะเล 200 เมตร) มีเนื้อที่ประมาณ 100 ไร่ เป็นพื้นที่ปลูกยางโดยอาศัยน้ำฝน ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 5 ปี (ปี พ.ศ. 2557) ระยะปลูก 3×7 เมตร และเป็นต้นยางที่ยังไม่เปิดกรีด ดินในพื้นที่ปลูกยางเป็นชุดดินโพธิ์ชัย สวนยางพารานี้เป็นสวนยางพาราปลูกใหม่ อยู่ในเขตพื้นที่การปลูกสวนยางพารา ระยะที่ 3 แปรแผนไร่ และต่อเนื่องจากระยะที่ 2 หนึ่งล้านไร่ พื้นที่ที่มีความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดยางพารา (รูปที่ 2-2)

4.2.1 ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และชุดอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวิจัย

ดำเนินการตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และสอบเทียบค่า (Calibrate) นั้น ชุดอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวิจัยของพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 site

4.2.2 การตรวจวัดและบันทึกข้อมูลจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยาง

ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศถูกติดตั้งที่ระดับความสูง 25 และ 15 เมตร บน tower ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 และ 2 (รูปที่ 2-3) ตามลำดับ โดยประกอบด้วย

- ความเร็วและทิศทางลมเหนือพื้นที่ปลูกยาง โดยใช้เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม แบบ 2 มิติ รุ่น 03002 บริษัท RM Young, USA
- วัดอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Temperature and Relative Humidity Probe) รุ่น HMP45C ของบริษัท Vaisala Inc., U.S.A.
- วัดปริมาณน้ำฝนต่อวันในพื้นที่ปลูกยางพารา ด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน Rain Gauges รุ่น TE525 TIPPING BUCKET Rain Gage ของบริษัท Campbell Scientific, U.S.A.
- วัดความเข้มแสงสะสมต่อวันในพื้นที่ปลูกยางพารา โดยใช้เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ (Quantum sensor) รุ่น LI-190SA ของบริษัท Licor, Inc., U.S.A
- วัดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, R_g) ที่แปลงปลูกยางพาราได้รับ ด้วยเครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation sensor) รุ่น LPO2 ของบริษัท Hukseflux, U.S.A.
- วัดปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, R_n) ที่แปลงปลูกยางพาราได้รับ ด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธิ รุ่น NR-Lite ของบริษัท Kipp & Zonen Inc., Netherlands

ความถี่ในการวัดค่าและการบันทึกค่าที่วัดได้ของชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศจะดำเนินการตามคำสั่งที่นักวิจัยโปรแกรมในเครื่องควบคุมและบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ รุ่น CR1000 คือ จะบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 20 Hz หรือ 20 ครั้งต่อวินาที ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง และมีการติดตั้งระบบการส่งข้อมูลผ่านทางสัญญาณโทรศัพท์ สำหรับตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ และใช้โปรแกรม LoggerNet ในการถ่ายโอนข้อมูล ข้อมูลที่ได้จะถูกเก็บไว้ในรูปของ ASCII file

4.2.3 การตรวจวัดและบันทึกสมมูลน้ำ (Water flux) ของพื้นที่ปลูกยาง

การศึกษาสมมูลน้ำหรืออัตราการแลกเปลี่ยนไอน้ำในระดับแปลงขนาดใหญ่ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยนำเทคนิคทางด้านจุลภูมิอากาศ ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม และปริมาณความชื้นชั้นของไอน้ำ เพื่อประเมินอัตราการแลกเปลี่ยนไอน้ำต่อพื้นที่และเวลา ในปัจจุบันความก้าวหน้าในการพัฒนาเครื่องมือวิทยาศาสตร์ทำให้นักวิทยาศาสตร์นำเทคนิคทางจุลภูมิอากาศมาใช้ประเมินอัตราการแลกเปลี่ยนไอน้ำอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการศึกษาประสิทธิภาพการใช้น้ำโดยพืชในระบบนิเวศต่างๆ ทั่วโลก

เทคนิค Eddy Covariance (Goulden *et al.*, 1996) เป็นเทคนิคในการตรวจวัดด้านอุตุนิยมในระดับจุลภูมิอากาศ (Micro-climate) ที่ดีที่สุดในปัจจุบันที่ใช้ในการวัดการแลกเปลี่ยนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และพลังงานโดยตรง ซึ่งจะติดตั้งเครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณไอน้ำ ระบบเปิด (Open path infrared gas analyzer) รุ่น LI-7500 ของบริษัท Li-COR Inc. และเครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม แบบ 3 มิติ (ความเร็วลมในทิศทาง x, y, z) (Three dimensional sonic anemometer) รุ่น CSAT3 ของบริษัท Campbell Scientific บน tower ที่มีความสูงเหนือทรงพุ่มพืชที่ศึกษา และทำให้การวัดอัตราการแลกเปลี่ยนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำนั้น ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ การใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งที่ศึกษา (Sensitive) มีความถูกต้องและแม่นยำสูง (Accurate และ Precise) และทนทานต่อความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม เนื่องจากมีความแปรปรวนมากของก๊าซที่ศึกษาในระบบ และการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏนั้นเกิดในปริมาณที่น้อยมาก อีกทั้งยังต้องการตรวจวัดค่าอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ทำให้สามารถตรวจวัดการคายน้ำและการคายระเหยของน้ำของระบบนิเวศทางพาราขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังทำให้ทราบถึงความอ่อนไหวของระบบนิเวศทางพาราต่อปัจจัยสภาพแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศได้ด้วย และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับปัจจัยด้านอื่นๆ ได้

ในการศึกษาวิจัย ชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance จะถูกติดตั้งไว้ที่ความสูง 27 และ 12 เมตร บน tower ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 (จังหวัดฉะเชิงเทรา) และ 2 (จังหวัดบึงกาฬ) ตามลำดับ ข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือจะถูกบันทึกลงในการ์ดบันทึกข้อมูลขนาดความจุ 2 GB (Compact flash) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ (Data logger) นักวิจัยจะเปลี่ยนการ์ดบันทึกข้อมูลจากเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติทุกๆ 2 สัปดาห์ การบันทึกข้อมูลของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติจะดำเนินการตามคำสั่งที่นักวิจัยโปรแกรมไว้ คือ จะบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 20 Hz หรือ 20 ครั้งต่อวินาที ตลอด 24 ชั่วโมง

การคำนวณการคายระเหยน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา โดยใช้เทคนิค Eddy Covariance สามารถคำนวณด้วยสมการ ดังนี้

$$ET = \frac{86,400LE}{L(T)} \quad (1)$$

$$L(T) = [2501 - 2.37T] \times 10^3 \quad (2)$$

โดยที่ ET = evapotranspiration (mm day⁻¹)

LE = the latent heat flux (W m⁻²)

L(T) = the latent heat of vaporization as a function of temperature

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (Water footprint) เป็นเครื่องชี้วัดปริมาณน้ำที่ใช้ไป (หรือรวมถึงปริมาณน้ำปล่อยออกมาจากระบบการผลิตพืช) คำนวณจากปริมาณน้ำที่พืชใช้ (m³ ha⁻¹) ต่อ ปริมาณผลผลิตของพืชนั้น (ton ha⁻¹) ผลงานวิจัยของ Bhardwaj *et al.* ที่ตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 2010 ได้คำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ด้วยผลการ

ตรวจวัดปริมาณการใช้น้ำด้วยวิธี Eddy Covariance จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่ใช้ ในหน่วย $\text{m}^3 \cdot \text{year}^{-1}$ ต่อปริมาณผลผลิต ในหน่วย ton year^{-1}

$$WF(\text{Yield}) = \frac{CWU}{\text{Yield}} \quad (3)$$

หรือ

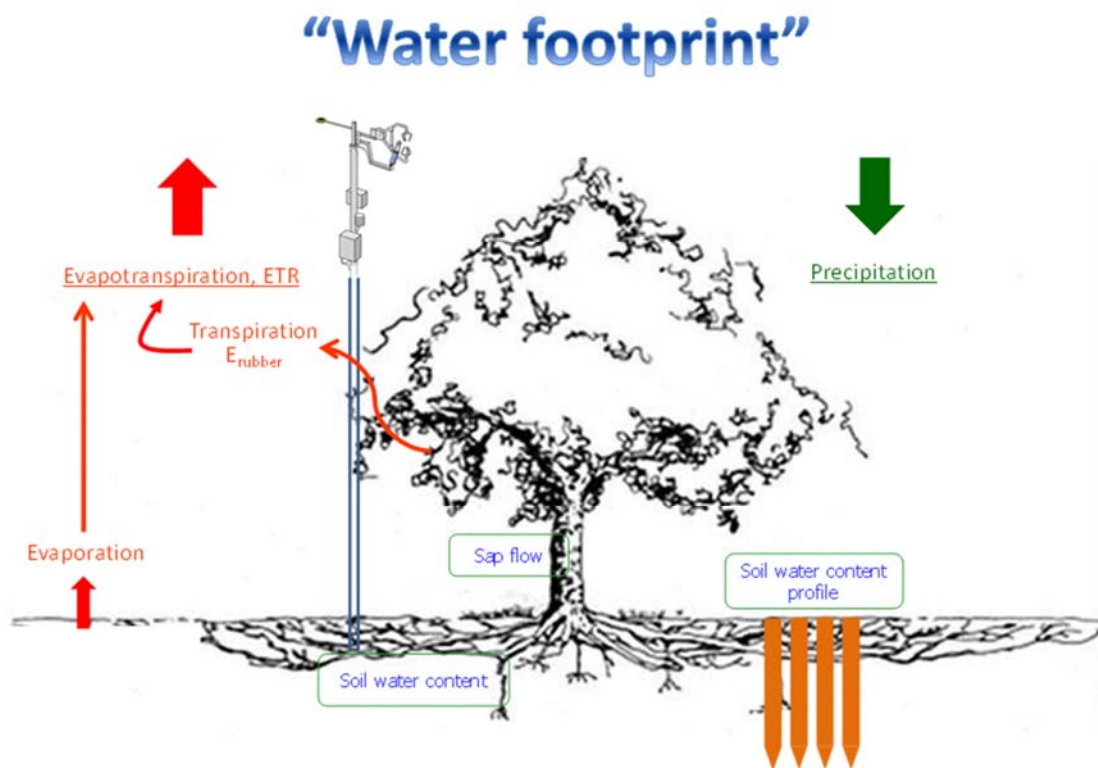
$$WF(\text{ANPP}) = \frac{CWU}{\text{ANPP}} \quad (4)$$

โดยที่ WF = water footprint

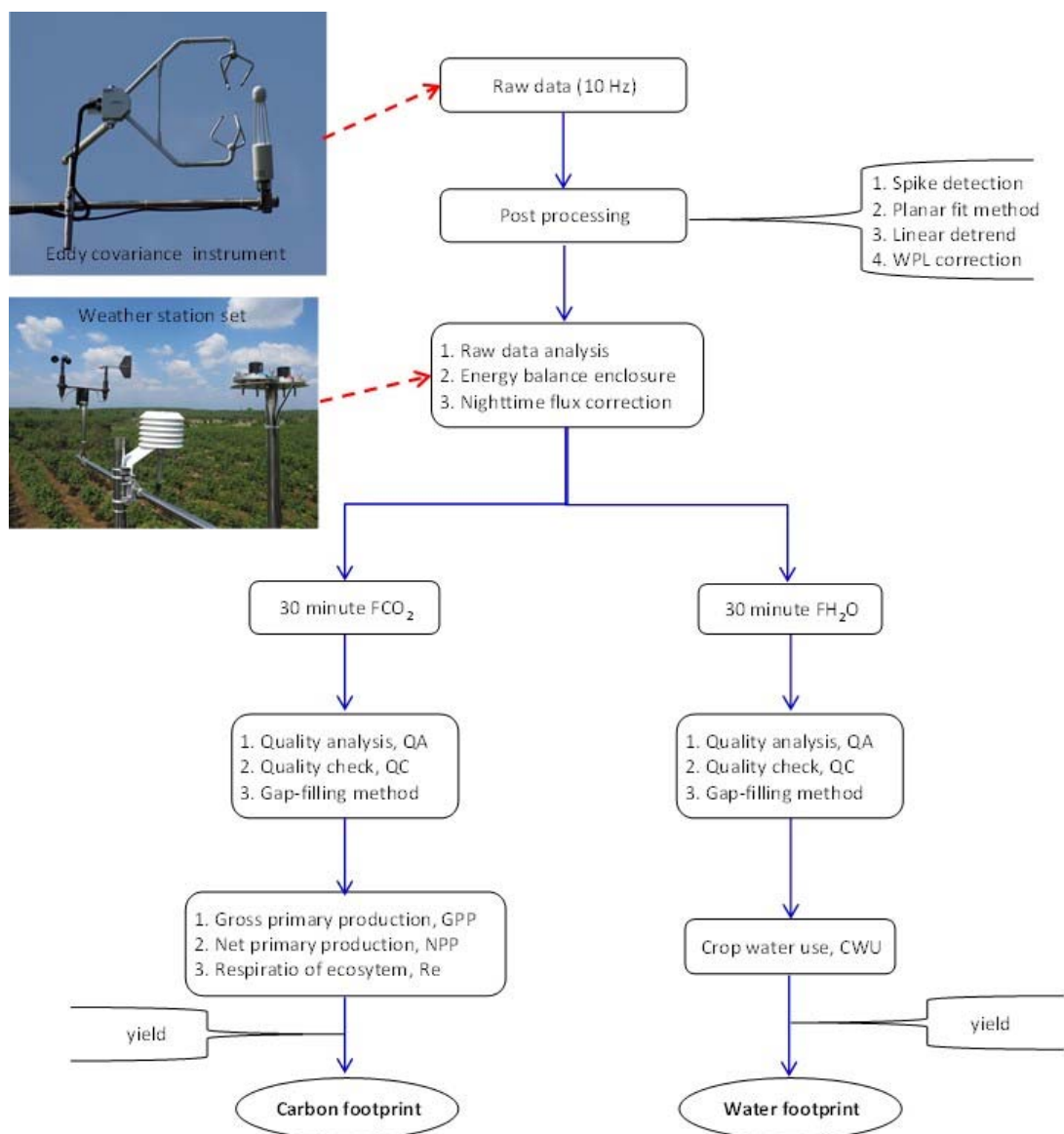
CWU = crop water use หรือ ปริมาณการใช้น้ำของพืช ซึ่งประเมินได้จากค่า ET โดยเทคนิค Eddy Covariance (W m^{-2})

Yield = ผลผลิตของพืชที่ศึกษา

ANPP = ปริมาณชีวมวลทั้งหมดของพืช



รูปที่ 4-1 System boundary ของโครงการ “การศึกษาสมดุลน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำอวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา”



รูปที่ 4-2 ขั้นตอนการคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (flux of CO₂ และ H₂O) และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์

4.2.4 การเคลื่อนของน้ำในลำต้น (Sap flow) และการคายน้ำของต้นยาง (Transpiration)

การคายน้ำของพืชเป็นกระบวนการสูญเสียน้ำภายในต้นพืชผ่านทางปากใบ (Taiz and Zeiger, 2006) การศึกษาการคายน้ำของพืชทำได้หลายวิธี เช่น การวัดค่า stomatal conductance (Motzer *et al.*, 2005) การประเมินจากการวัด sap flow (Hatton *et al.*, 1995; Granier *et al.*, 1987) หรือใช้วิธีการสมดุลน้ำ ในการวัดการระเหยน้ำ (ET_o) และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น Soil water budget, Sap flow, Eddy Covariance และ Catchment water balance (Wilson *et al.*, 2001).

วิธีการประเมินการคายน้ำจากการวัดการเคลื่อนของน้ำในลำต้น หรือ Sap flow ซึ่งสามารถวัดด้วยวิธีการ Heat dissipation method ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของ Granier (1985, 1987) ด้วยเครื่องวัด

อัตราการไหลของน้ำในลำต้น รุ่น SF32 Sap flow sensor ของบริษัท UP เป็นการคำนวณอัตราการไหลของน้ำ มีหน่วยวัดเป็น mm และเปลี่ยนหน่วยเป็นค่าการคายน้ำของพืช มีหน่วยเป็น mm.day⁻¹ ดังนั้นวิธีการนี้จึงสามารถใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในต้นที่เกี่ยวข้องกับการเจริญ และประสิทธิภาพการใช้น้ำในไม้ยืนต้นได้ดี (Smith and Allen 1996) นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ประเมินการคายน้ำในระดับแปลงได้อีกด้วย (Ford *et al.*, 2014)

การวัด Sap flow density ทำได้โดยวิธีการกระจายความร้อน (Heat dissipation method) ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ Granier (1987) การวัดการกระจายความร้อนทำได้โดยการติดตั้ง Thermo-couple probe ที่มีคุณลักษณะเหมือนกันจำนวน 2 probe เข้าไปในเนื้อเยื่อ sapwood โดย probe ทั้งสองจะถูกติดตั้งซ้อนกันในแนวตั้งห่างกันประมาณ 10 cm probe ที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งไม่มีลวดทำความร้อนจะวัดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านในขณะที่ probe ที่อยู่ด้านบนนั้น มีลวดทำความร้อนจะปล่อยความร้อนออกมาและวัดอุณหภูมิไปในขณะเดียวกัน ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากทั้ง 2 probe ขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลของน้ำใน sapwood โดยปกติในช่วงกลางวัน ซึ่งมีการไหลของน้ำมาก ค่าความแตกต่างอุณหภูมิจากทั้ง 2 probe จะมีค่าต่ำ แต่ในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งมีการไหลของน้ำน้อยมาก ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจะสูงได้ถึง 10 – 13°C ความแตกต่างของอุณหภูมิดังกล่าวจึงถูกใช้เป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการไหลของน้ำในลำต้นพืช (Granier, 1985)

Sap flow density (J_s) มีหน่วยเป็น $\text{liters.dm}^{-2} \text{h}^{-1}$ คำนวณได้จากสมการที่ 5

$$J_s = 312 \times 10^{-6} K^{1.231} \quad (5)$$

และ Sap flow index (K) คำนวณจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันของ Probe ทั้งสองดังสมการที่ 6

$$K = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_i}{\Delta T_i} \quad (6)$$

โดย ΔT_0 = daily maximum temperature difference

ΔT_i = current temperature difference ระหว่าง probe ทั้ง 2 ทั้ง 2 ค่ามีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

เมื่อนำค่า Sap flow density ในแต่ละช่วงเวลามาประเมิน ค่า Sap flow density ในรอบวัน ซึ่งมีหน่วยเป็น $\text{kg m}^{-2} \text{day}^{-1}$ จะสามารถนำมาคำนวณเป็น Tree transpiration (ET) ได้ แต่เนื่องจาก probe ที่ใช้นั้นไม่สามารถวัดการไหลของน้ำในท่อลำเลียงได้ทั้งหมดจากข้อจำกัดของความยาว probe Na-Ayutthaya *et al.* (2010) จึงได้ศึกษาและเสนอวิธีการแก้ไขความคลาดเคลื่อนในการคำนวณการไหลของน้ำระหว่างท่อลำเลียงด้านนอกและด้านในไว้ดังสมการที่ 7

$$E_T = \frac{0.874 \times 10^{-2} \times J_s \times \text{sapwood area}}{\text{tree space area}} \quad (7)$$

การตรวจวัดค่าการคายน้ำของพืช (Transpiration) ของพื้นที่ปลูกยางทั้ง 2 Site นั้นจะวัดด้วยวิธีการ Heat dissipation method ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของ Granier (1985, 1987) ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในลำต้น รุ่น SF32 Sap flow sensor ของบริษัท UP เป็นการคำนวณอัตราการไหลของน้ำ มีหน่วยวัดเป็น mm และเปลี่ยนหน่วยเป็นค่าการคายน้ำของพืช มีหน่วยเป็น mm.day⁻¹ พื้นที่ศึกษาแต่ละ Sites จะแบ่งเป็น 3 plot โดยในแต่ละ plot จะติดตั้งเครื่องมือบนต้นยาง จำนวน 3 ต้น ระบบที่ใช้งานดังกล่าวนี้เป็นระบบที่เก็บข้อมูลอัตโนมัติ โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ (Data logger) โดยมีการบันทึกข้อมูลเฉลี่ยทุก 10 นาทีต่อเนื่องกัน นักวิจัยจะนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยทุก 30 นาที ซึ่งข้อมูลชุดนี้จะถูกใช้เป็นข้อมูลประกอบในการศึกษาการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยางพาราในลำดับต่อไป (รูปที่ 4-3 และ 4-4)

4.2.5 ข้อมูลประกอบอื่น ๆ

(1) ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (Kc)

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (Kc) ของยางพาราที่อายุต่างๆ สามารถคำนวณได้จากการคำนวณการปริมาณการใช้น้ำของพื้นที่อ้างอิงด้วยสูตร FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) และค่าการคายระเหยหรือค่าการใช้น้ำจากแปลงยางพารา ซึ่งปริมาณการใช้น้ำของพื้นที่อ้างอิงสามารถคำนวณโดยมีสูตรดังนี้

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (8)$$

เมื่อตัวแปรต่างๆ คือ	ET _o	reference evapotranspiration (mm day ⁻¹)
	R _n	net radiation at the crop surface (MJ m ⁻² day ⁻¹)
	G	soil heat flux density (MJ m ⁻² day ⁻¹)
	T	mean daily air temperature at 2 m height (°C)
	u ₂	wind speed at 2 m height (m s ⁻¹)
	e _s	saturation vapor pressure (kPa)
	e _a	actual vapor pressure (kPa)
	e _s -e _a	saturation vapor pressure deficit (kPa)
	Δ	slope vapor pressure curve (kPa °C ⁻¹)
	γ	psychrometric constant (kPa °C ⁻¹)

$$Kc = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (9)$$

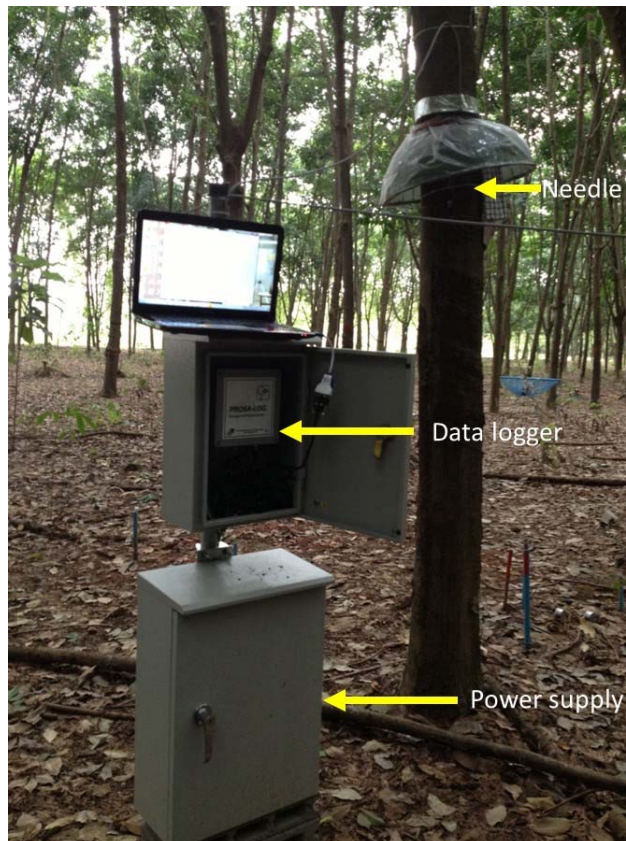
เมื่อตัวแปรต่างๆ คือ	ET _c	crop evapotranspiration (mm day ⁻¹)
	ET _o	reference evapotranspiration (mm day ⁻¹)

(2) ปริมาณน้ำในดินและอุณหภูมิของดิน

ติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดปริมาณน้ำในดิน รุ่น CS616 จากบริษัท Campbell Scientific ซึ่งเป็นระบบที่เก็บข้อมูลอัตโนมัติ โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) รุ่น CR10 จากบริษัท Campbell Scientific ติดตั้งที่ 5 ระดับความลึก คือ 10, 30, 50, 70, และ 90 เมตรจากผิวดิน และติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิดินด้วย Thermo-couples type T ที่ 7 ระดับความลึก คือ 2, 4, 6, 16, 32, 64, 100 เมตรจากผิวดิน เครื่องวัดต่างๆดังที่กล่าวมาจะถูกเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล และทำการบันทึกข้อมูลเก็บไว้ทุก 30 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง (รูปที่ 4-5)



รูปที่ 4-3 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ Sap flow บนต้นยางพารา



รูปที่ 4-4 องค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ Sap flow ที่ติดตั้ง ณ พื้นที่ศึกษา



รูปที่ 4-5 การติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดความชื้นและอุณหภูมิของดินที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวดิน

4.3 ผลการศึกษาสมมูลน้ำของสวนยางพารา

4.3.1 ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และชุดอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวิจัย

ดำเนินการตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ และสอบเทียบค่า (Calibrate) นั้น ชุดอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลวิจัยของพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 site ไปแล้ว 2 ครั้งในรอบปีการทดลองที่ผ่านมา

4.3.2 ข้อมูลจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยาง

แสดงในข้อมูลจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยาง บทที่ 2 หน้าที่ 30

4.3.3 ข้อมูลสมมูลน้ำ (Water flux) ของพื้นที่ปลูกยาง

(1) การคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, ETR)

ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) ของพื้นที่ปลูกยางพารา ซึ่งตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึง 30 กันยายน 2558 มีค่า ETR อยู่ในช่วง $0.20 - 6.70 \text{ mm.day}^{-1}$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่า มีค่า ETR อยู่ในช่วง $0.20 - 5.72$ และ $0.39 - 6.29 \text{ mm.day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า ETR สะสมในรอบ 1 ปี เท่ากับ 932.89 และ 1,059.80 mm ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า ETR อยู่ในช่วง $0.25 - 6.70 \text{ mm.day}^{-1}$ และมีปริมาณ ETR สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ 1,357.94 mm (รูปที่ 4-6)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึง วันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่า ETR อยู่ในช่วง $0.20 - 6.14 \text{ mm.day}^{-1}$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่า มีค่า ETR อยู่ในช่วง $0.20 - 3.11$ และ $0.26 - 6.14 \text{ mm.day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า ETR สะสมในรอบ 1 ปี เท่ากับ 653.46 และ 848.22 mm ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม -

30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า ETR อยู่ในช่วง $0.31 - 5.80 \text{ mm.day}^{-1}$ และมีปริมาณ ETR สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ 738.54 mm (รูปที่ 4-6)

(2) ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (Reference crop evapotranspiration, ETo)

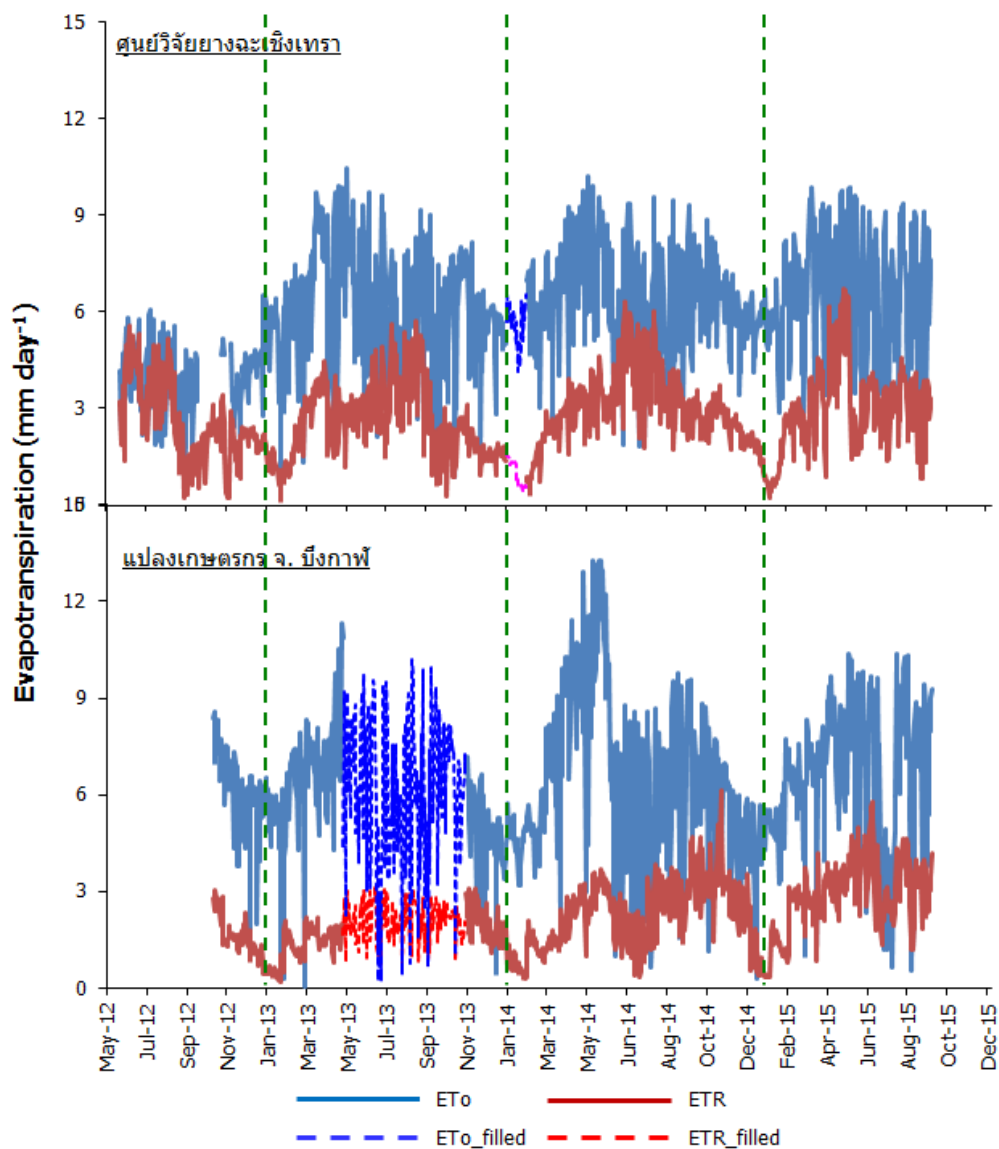
ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ETo) ของพื้นที่ปลูกยางพารา ซึ่งมาจากการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงด้วยสูตร FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึง 30 กันยายน 2558 มีค่า ERo อยู่ในช่วง $0.53 - 10.43 \text{ mm.day}^{-1}$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่า มีค่า ERo อยู่ในช่วง $0.53 - 10.43$ และ $1.81 - 10.19 \text{ mm.day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า ETo สะสมในรอบ 1 ปี เท่ากับ 2,220.93 และ 2,335.96 mm ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า ETo อยู่ในช่วง $1.17 - 9.85 \text{ mm.day}^{-1}$ และมีปริมาณ ETo สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ 1,749.98 mm (รูปที่ 4-6)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึง วันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่า ERo อยู่ในช่วง $0.04 - 13.28 \text{ mm.day}^{-1}$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่า มีค่า ERo อยู่ในช่วง $0.04 - 11.34$ และ $0.46 - 13.28 \text{ mm.day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า ETo สะสมในรอบ 1 ปี เท่ากับ 2,189.11 และ 2,381.49 mm ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า ETo อยู่ในช่วง $0.28 - 10.37 \text{ mm.day}^{-1}$ และมีปริมาณ ETo สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ 1,732.51 mm (รูปที่ 4-6)

(3) การใช้น้ำของยางพารา (Crop Water Use, CWU)

การใช้น้ำของยางพารา (Crop Water Use, CWU) ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึง 30 กันยายน 2558 มีค่า CWU อยู่ในช่วง $0.31 - 10.42 \text{ m}^3 \cdot \text{rai}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่า มีค่า CWU อยู่ในช่วง $0.32 - 9.15$ และ $0.63 - 10.06 \text{ m}^3 \cdot \text{rai}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า CWU สะสมในรอบ 1 ปี เท่ากับ 1,492.53 และ 1,695.68 $\text{m}^3 \cdot \text{rai}^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า CWU อยู่ในช่วง $0.41 - 10.72 \text{ m}^3 \cdot \text{rai}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ และมีปริมาณ CWU สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ 1,270.62 mm (รูปที่ 4-7)

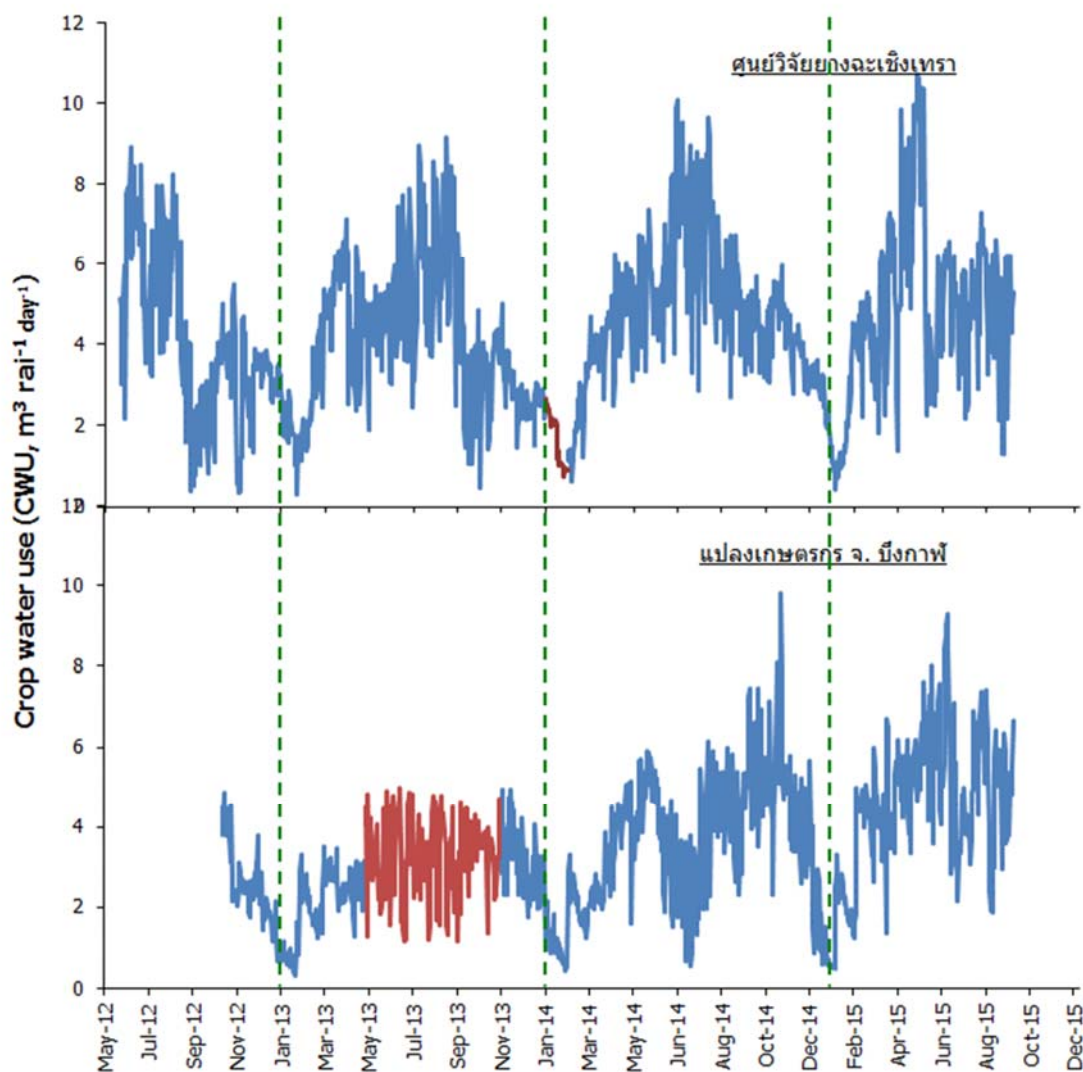
Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึง วันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่า CWU อยู่ในช่วง $0.32 - 9.83 \text{ m}^3 \cdot \text{rai}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่า มีค่า CWU อยู่ในช่วง $0.32 - 4.98$ และ $0.42 - 9.83 \text{ m}^3 \cdot \text{rai}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า CWU สะสมในรอบ 1 ปี เท่ากับ 1,045.53 และ 1,357.16 $\text{m}^3 \cdot \text{rai}^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า CWU อยู่ในช่วง $0.50 - 9.28 \text{ m}^3 \cdot \text{rai}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ และมีปริมาณ CWU สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ 1,181.67 mm (รูปที่ 4-7)



ข้อมูล	Site	2555	2556	2557	2558
ETo	1	661.88	2,220.93	2,335.96	1,749.98
	2	464.91	2,189.11	2,381.49	1,732.51
ETR	1	556.40	932.83	1,059.80	798.14
	2	121.11	653.46	848.22	738.54

หมายเหตุ เป็นข้อมูลการคายระเหยของน้ำ (ETR, mm) และปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ETo, mm) สะสมต่อปี

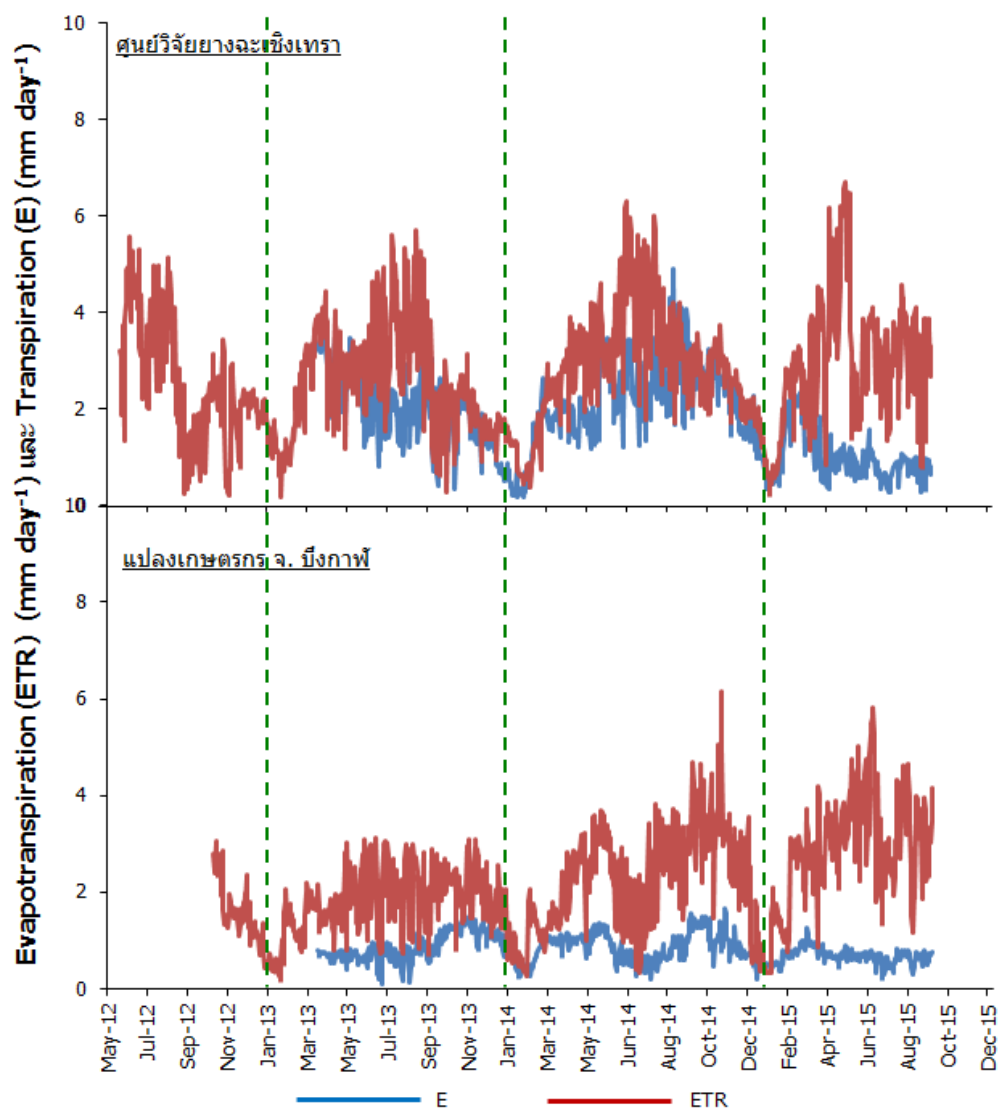
รูปที่ 4-6 การคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, ETR) และปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (Reference crop evapotranspiration, ETo) สะสมต่อวันของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)



ข้อมูล	Site	2555	2556	2557	2558
CWU	1	890.24	1,492.53	1,695.68	1,270.62
	2	193.78	1,045.53	1,357.16	1,181.67

หมายเหตุ เป็นข้อมูลปริมาณการใช้น้ำของพืช (Crop Water Use, $m^3.rai^{-1}$) สะสมต่อปี

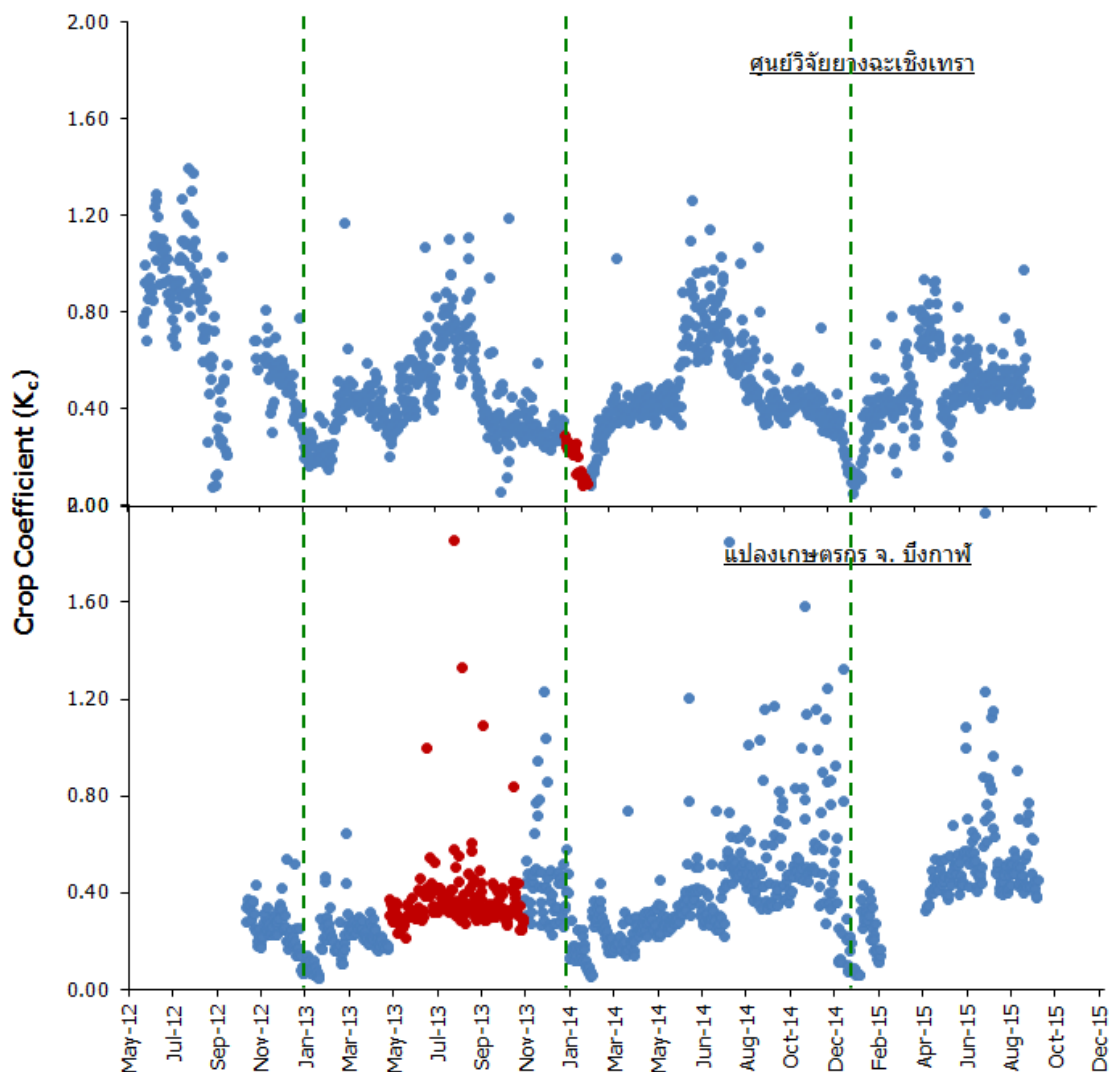
รูปที่ 4-7 ปริมาณการใช้น้ำของพืช (Crop Water Use) ของแปลงปลูกยางพาราสะสมต่อวันของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)



ข้อมูล	Site	2555	2556	2557	2558
ETR	1	556.40	932.83	1,059.80	798.14
	2	121.11	653.46	848.22	738.54
E	1	-	570.61	781.18	279.54
	2	-	250.20	316.18	180.50

หมายเหตุ เป็นข้อมูลการคายระเหยของน้ำ (ETR, mm) และ การคายน้ำของพืช (E, mm) สะสมต่อปี

รูปที่ 4-8 การคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, ETR) และ การคายน้ำของพืช (Transpiration, E) ของแปลงปลูกยางพารา สะสมต่อวันของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางยะเชิงเทรา จ. ยะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)



รูปที่ 4-9 ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient; K_c) ของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิถุนายน 2555 – 30 กันยายน 2558) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. ปึงกาฬ (18 ตุลาคม 2555 – 30 กันยายน 2558)

4.3.4 การเคลื่อนของน้ำในลำต้น (Sap flow) และการคายน้ำของต้นยาง (Transpiration)

การคายน้ำของต้นยางพารา (Transpiration, E) ซึ่งคำนวณจากอัตราการเคลื่อนของน้ำในลำต้น สำหรับ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึง 30 กันยายน 2558 มีค่า E อยู่ในช่วง $0.19 - 4.90 \text{ mm.day}^{-1}$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่า มีค่า E อยู่ในช่วง $0.35 - 3.72$ และ $0.19 - 4.90 \text{ mm.day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า E สะสมในรอบ 1 ปี เท่ากับ 570.61 และ 781.37 mm ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า E อยู่ในช่วง $0.27 - 2.36 \text{ mm.day}^{-1}$ และมีปริมาณ E สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ 279.54 mm (รูปที่ 4-8)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่า E อยู่ในช่วง $0.08 - 1.66 \text{ mm.day}^{-1}$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่า มีค่า E อยู่ในช่วง $0.08 - 1.51$ และ $0.18 - 1.66 \text{ mm.day}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่า E สะสมในรอบ 1 ปี เท่ากับ 250.20 และ 316.18 mm ตามลำดับ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า E อยู่ในช่วง $0.18 - 1.26 \text{ mm.day}^{-1}$ และมีปริมาณ ETo สะสมในช่วงเวลา 9 เดือน เท่ากับ 180.50 mm (รูปที่ 4-8)

4.3.5 ข้อมูลประกอบอื่น ๆ

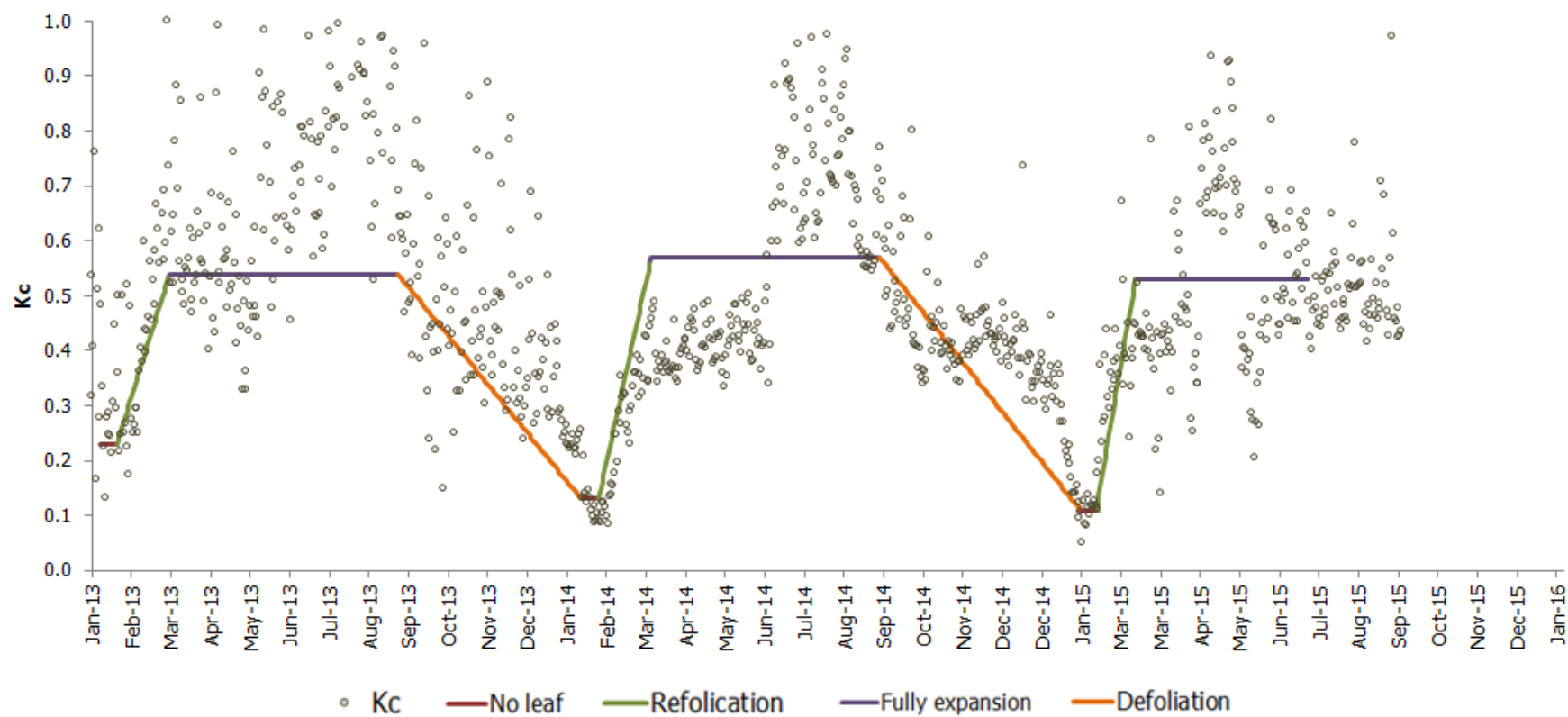
(1) สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Crop Coefficient, Kc)

สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Crop Coefficient, Kc) จากการทดลอง พบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึง 30 กันยายน 2558 มีค่า Kc อยู่ในช่วง $0.05 - 1.40$ ในปี 2556 และ 2557 พบว่า มีค่า Kc อยู่ในช่วง $0.06 - 1.19$ และ $0.08 - 1.26$ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า Kc อยู่ในช่วง $0.05 - 0.97$ (รูปที่ 4-9)

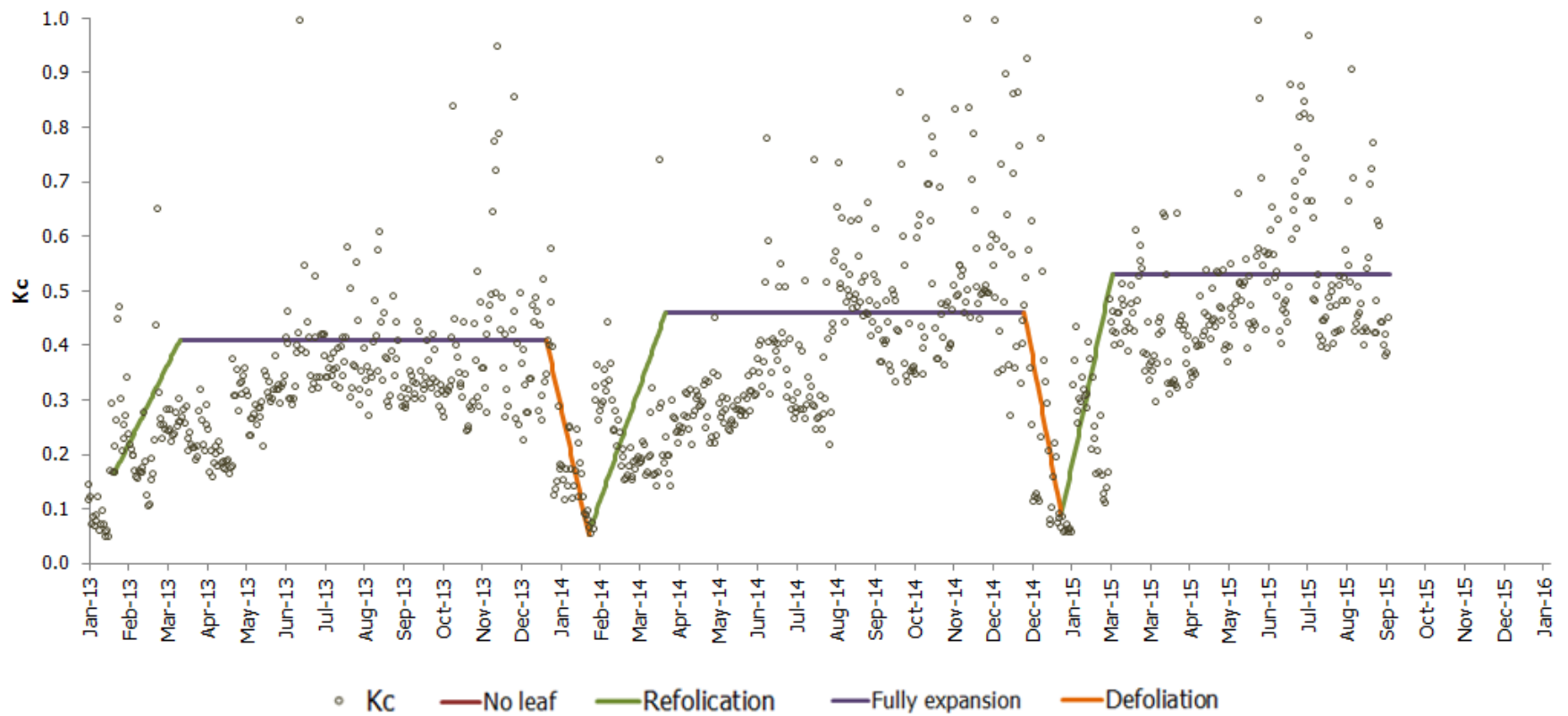
ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Kc) ของยางพาราตลอดฤดูปลูก ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นยางอายุมากที่แตกกรีดแล้ว ตั้งแต่วันที่ 31 มกราคม 2556 – 30 กันยายน 2558 ดังที่แสดงในรูปที่ 4-10 และตารางที่ 4-1 พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า Kc ในแต่ละช่วงเวลานั้น การแบ่งการเจริญเติบโตในแต่ละช่วง ซึ่งได้แก่ ระยะที่ต้นยางไม่มีใบ (No leaf หรือ Initial stage) ระยะที่ต้นยางแตกใบใหม่และมีการเจริญเติบโตของใบ (Refoliation หรือ Development stage) ระยะที่ใบที่เกิใหม่เริ่มเจริญเติบโตเต็มที่แล้ว (Fully expansion หรือ Mid-season stage) และ ระยะที่ใบทั้งใบ (Defoliation หรือ Late season stage) ระยะ initial stage หรือ ระยะที่ต้นยางไม่มีใบนั้น ปรากฏในช่วงฤดูแล้ง และเป็นช่วงเวลาที่สั้นที่สุดสำหรับรอบการเจริญเติบโตของต้นยาง จากการเฉลี่ยข้อมูลทั้ง 3 ปี ระยะ initial stage ของต้นยางใช้เวลาประมาณ 15 วัน (เดือนมกราคม) และมีค่า Kc เฉลี่ยเท่ากับ 0.16 ระยะ Development stage ซึ่งเป็นช่วงที่ยางพาราเริ่มแตกใบและเจริญเติบโตจนขยายขนาดเต็มที่นั้น ใช้เวลา 36 วัน (เดือนมกราคม ถึง มีนาคม) และมีค่า Kc เฉลี่ยเท่ากับ 0.32 ระยะ Mid-season stage หรือ ระยะที่ใบของต้นยางเจริญเติบโตเต็มที่ได้แล้ว ใช้เวลา 160 วัน (เดือนมีนาคม ถึง สิงหาคม) ซึ่งเป็นช่วงที่ยาวนานที่สุด และมีค่า Kc เฉลี่ยเท่ากับ 0.55 สำหรับระยะ Late-season stage อันได้แก่ ระยะที่ใบยางเริ่มร่วงจนร่วงหมดทั้งต้นนั้น จากข้อมูลเฉลี่ย 2 ปี เนื่องจากในปี 2558 ยังเก็บข้อมูลไม่ครบ พบว่า ระยะการเจริญเติบโตดังกล่าวใช้เวลา 150 วัน (เดือนสิงหาคม ถึง มกราคม) และมีค่า Kc เฉลี่ยเท่ากับ 0.44

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งบันทึกข้อมูลตั้งแต่ วันที่ 18 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558 มีค่า Kc อยู่ในช่วง $0.050 - 5.91$ 2556 และ 2557 พบว่า มีค่า Kc อยู่ในช่วง $0.05 - 3.99$ และ $0.05 - 2.50$ สำหรับในปี 2558 นั้น สามารถบันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 30 กันยายน 2558 ปรากฏค่า Kc อยู่ในช่วง $0.06 - 5.91$ (รูปที่ 4-9)

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Kc) ของยางพาราตลอดฤดูปลูก ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ซึ่งเป็นยางอายุน้อย และยังไม่แตกกรีด ตั้งแต่วันที่ 31 มกราคม 2556 – 30 กันยายน 2558 ดังที่แสดงในรูปที่ 4-11 และตารางที่ 4-1 จากการเฉลี่ยข้อมูลทั้ง 3 ปี พบว่า ระยะ initial stage ของต้นยางที่ปรากฏในต้นยางอายุมากนั้น ไม่พบในยางอายุน้อย เนื่องจากในช่วงฤดูแล้งนั้น ต้นยางยังไม่มีใบทั้งใบ ส่วนระยะ Development stage ซึ่งเป็นช่วงที่ยางพาราเริ่มแตกใบและเจริญเติบโตจนขยายขนาดเต็มที่



รูปที่ 4-10 ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Kc) ของยางพาราตลอดฤดูปลูก ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2556 – 30 กันยายน 2558



รูปที่ 4-11 ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Kc) ของยางพาราตลอดฤดูปลูก ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2556 – 30 กันยายน 2558

ตารางที่ 4-1 แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า NEE และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. ปึงกาฬ

ระยะของ การเจริญเติบโต	Site ที่ 1			Site ที่ 2		
	ช่วงเวลา	ระยะเวลา (วัน)	Kc เฉลี่ย	ช่วงเวลา	ระยะเวลา (วัน)	Kc เฉลี่ย
ปี 2556						
No leaf	16 ม.ค. 2556 – 29 ม.ค. 2556	15	0.23	ไม่ปรากฏช่วงเวลาที่ไม่มีใบ	-	-
Refoliation	30 ม.ค. 2556 – 9 มี.ค. 2556	39	0.34	29 ม.ค. 2556 – 19 มี.ค. 2556	50	0.24
Fully expanded	10 มี.ค. 2556 – 30 ส.ค. 2556	174	0.54	19 มี.ค. 2556 – 25 ธ.ค. 2556	281	0.41
Defoliation	30 ส.ค. 2556 – 15 ม.ค. 2557	148	0.45	26 ธ.ค. 2556 – 25 ม.ค. 2557	31	0.22
ปี 2557						
No leaf	16 ม.ค. 2557 – 29 ม.ค. 2557	15	0.13	ไม่ปรากฏช่วงเวลาที่ไม่มีใบ	-	-
Refoliation	30 ม.ค. 2557 – 10 มี.ค. 2557	39	0.27	26 ม.ค. 2557 – 25 มี.ค. 2557	59	0.23
Fully expanded	11 มี.ค. 2557 – 30 ส.ค. 2557	174	0.57	26 มี.ค. 2557 – 25 ธ.ค. 2557	275	0.46
Defoliation	31 ส.ค. 2557 – 28 ม.ค. 2558	151	0.42	26 ธ.ค. 2557 – 21 ม.ค. 2558	27	0.59
ปี 2558						
No leaf	29 ม.ค. 2558 – 11 ก.พ. 2558	14	0.11	ไม่ปรากฏช่วงเวลาที่ไม่มีใบ	-	-
Refoliation	12 ก.พ. 2558 – 12 มี.ค. 2558	30	0.36	22 ม.ค. 2558 – 1 มี.ค. 2558	40	0.21
Fully expanded	13 มี.ค. 2558 – 20 ก.ค. 2558	130	0.53	2 มี.ค. 2558 – (ข้อมูลยังไม่ครบ)		
Defoliation	21 ก.ค. 2558 – (ข้อมูลยังไม่ครบ)			(ข้อมูลยังไม่ครบ)		

นั้น ใช้เวลา 50 วัน (เดือนมกราคม ถึง มีนาคม) และมีค่า Kc เฉลี่ยเท่ากับ 0.23 ระยะ Mid-season stage หรือ ระยะที่ใบของต้นยางเจริญเติบโตเต็มที่ได้แล้ว จากข้อมูลเฉลี่ย 2 ปี เนื่องจากในปี 2558 ยังเก็บข้อมูลไม่ครบ พบว่า ระยะการเจริญเติบโตดังกล่าวใช้เวลา 275 วัน (เดือนมีนาคม ถึง ธันวาคม) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ยาวนานที่สุด และมีค่า Kc เฉลี่ยเท่ากับ 0.44 สำหรับระยะ Late-season stage อันได้แก่ ระยะที่ใบยางเริ่มร่วงจนร่วงหมดทั้งต้นนั้น ใช้เวลา 29 วัน (เดือนธันวาคม ถึง มกราคม) และมีค่า Kc เฉลี่ยเท่ากับ 0.41

(2) ปริมาณน้ำในดินและอุณหภูมิของดิน

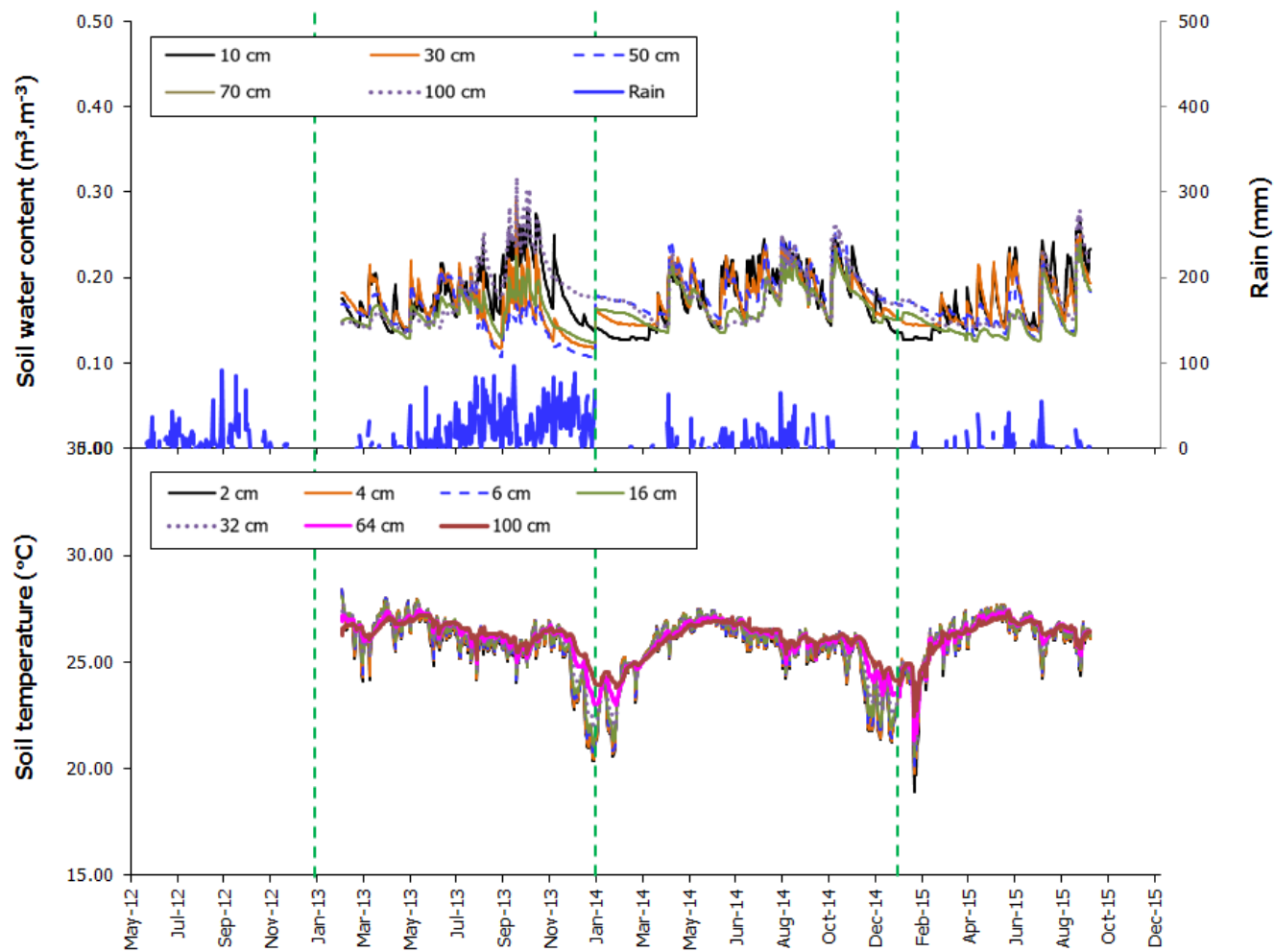
ปริมาณน้ำในดิน

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา จากการติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดปริมาณน้ำในดิน 5 ระดับ ได้แก่ ที่ระดับความลึก 10 30 50 70 และ 100 cm ถูกบันทึกตั้งแต่วันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2556 จนถึงวันที่ 30 กันยายน 2559 พบว่า ปริมาณน้ำในดินที่บันทึกได้ทั้งหมด ของแต่ละระดับความลึกจากผิวดิน มีค่าอยู่ในช่วง 0.127 - 0.289, 0.117 - 0.292, 0.106 - 0.252, 0.123 - 0.240 และ 0.134 - 0.317 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ตามลำดับ

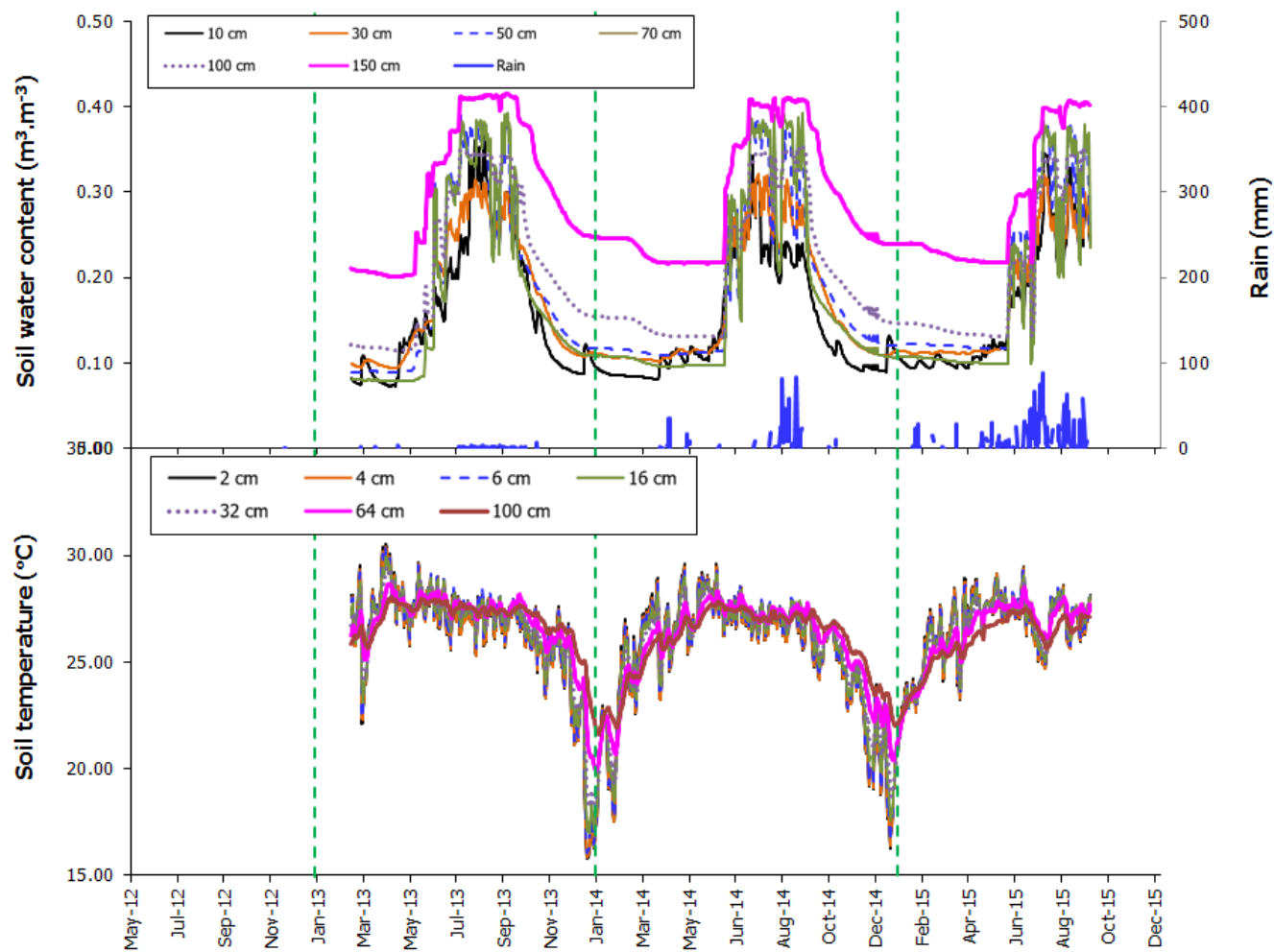
ปริมาณน้ำในดินในแต่ละระดับความลึกมีค่าสูงขึ้น ในช่วงเดือนกันยายน ถึง ต้นเดือนพฤศจิกายน ปริมาณน้ำในดินในแต่ละระดับความลึกมีค่าลดลง ในช่วงเดือนพฤศจิกายน และมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนธันวาคม ถึง มีนาคม การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน โดยภาพรวมแล้วค่อนข้างสอดคล้องกับปริมาณฝนที่ได้รับ นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำในดินสูงที่สุดในรอบปี ปริมาณน้ำในดินที่ระดับความลึก 100 cm จากผิวดินมีค่าสูงที่สุด เมื่อพิจารณาในแต่ละระดับความลึกพบว่า ที่ระดับความลึก 10 30 และ 100 cm ปริมาณน้ำในดินมีความแปรปรวนสูงและแตกต่างจากปริมาณน้ำในดินที่ระดับลึกลงไป ที่ระดับความลึก 50 และ 70 cm มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดินในรูปแบบใกล้เคียง เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำในดินในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2557 เปรียบเทียบกับช่วงเวลาเดียวกันในปี 2558 พบว่าในปี 2557 มีปริมาณน้ำในดินที่ระดับต่างๆ ใกล้เคียงกันกับในปี 2558 (รูปที่ 4-12)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ จากการติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดปริมาณน้ำในดิน 6 ระดับ ได้แก่ ที่ระดับความลึก 10 30 50 70 100 และ 150 cm ถูกบันทึกตั้งแต่วันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2556 จนถึงวันที่ 30 กันยายน 2559 พบว่า ปริมาณน้ำในดินที่บันทึกได้ทั้งหมด ของแต่ละระดับความลึกจากผิวดิน มีค่าอยู่ในช่วง 0.073 - 0.367, 0.094 - 0.321, 0.088 - 0.391, 0.079 - 0.393, 0.115 - 0.353 และ 0.201 - 0.416 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ตามลำดับ

ปริมาณน้ำในดินในแต่ละระดับความลึกมีค่าสูงขึ้น ในช่วงเดือนกรกฎาคม ถึง กันยายน ปริมาณน้ำในดินในแต่ละระดับความลึกมีค่าลดลง และมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนมกราคม ถึง มิถุนายน การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน โดยภาพรวมแล้วค่อนข้างสอดคล้องกับปริมาณฝนที่ได้รับ นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำในดินสูงที่สุดในรอบปี ปริมาณน้ำในดินที่ระดับความลึก 150 cm จากผิวดินมีค่าสูงที่สุดตลอดทั้งปี ในช่วงที่ปริมาณน้ำสูงที่สุดในรอบปี พบว่า ปริมาณน้ำในดินที่ระดับความลึก 10 -10 cm มีความแตกต่างกันไม่มากนัก ขณะที่ในช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำในดินต่ำสุดในรอบปีกับพบว่า ปริมาณน้ำในดินที่ระดับความลึก 100 และ 10 cm มีปริมาณน้ำในดินสูงที่สุดและต่ำที่สุด ตามลำดับ (ภาพที่ 4-13)



รูปที่ 4-12 ปริมาณน้ำในดิน (Soil Water Content, $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) อุณหภูมิดิน (Soil temperature, $^{\circ}\text{C}$) และปริมาณน้ำฝน (mm) ที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวดินของแปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางชะเชิงเทรา จ. ชะเชิงเทรา



รูปที่ 4-13 ปริมาณน้ำในดิน (Soil Water Content, $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) อุณหภูมิในดิน (Soil temperature, $^{\circ}\text{C}$) และปริมาณน้ำฝน (mm) ที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวดินของแปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

อุณหภูมิดิน

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา จากการติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิดิน 6 ระดับ ได้แก่ ที่ระดับความลึก 2 4 6 16 32 64 และ 100 cm ถูกบันทึกตั้งแต่วันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2556 จนถึงวันที่ 30 กันยายน 2559 พบว่า อุณหภูมิดินที่บันทึกได้ทั้งหมด ของแต่ละระดับความลึกจากผิวดิน มีค่าอยู่ในช่วง 18.88 – 28.37, 19.76 – 28.38, 20.08 – 28.06, 20.98 – 27.73, 21.33 – 27.47 และ 22.43 – 27.41 °C ตามลำดับ อุณหภูมิดินในแต่ละระดับความลึกมีค่าแตกต่างกันน้อย ในช่วงเดือนธันวาคม พบว่า อุณหภูมิดินในแต่ละระดับความลึกมีค่าลดลง และมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือน มกราคม ความแปรปรวนของอุณหภูมิดินในแต่ละระดับความลึกจากผิวดิน พบว่า อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 2 cm มีความแปรปรวนมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 4 6 16 32 64 และ 100 cm ตามลำดับ (รูปที่ 4-12)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ จากการติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิดิน 6 ระดับ ได้แก่ ที่ระดับความลึก 2 4 6 16 32 64 และ 100 cm ถูกบันทึกตั้งแต่วันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2556 จนถึงวันที่ 30 กันยายน 2559 พบว่า อุณหภูมิดินที่บันทึกได้ทั้งหมด ของแต่ละระดับความลึกจากผิวดิน มีค่าอยู่ในช่วง 15.77 – 30.51, 15.86 – 30.41, 16.07 – 30.34, 17.01 – 29.93, 19.94 – 28.66 และ 21.63 – 28.05 °C ตามลำดับ อุณหภูมิดินในแต่ละระดับความลึกมีค่าแตกต่างกันน้อย ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พบว่า อุณหภูมิดินในแต่ละระดับความลึกมีค่าลดลง และมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนธันวาคม ความแปรปรวนของอุณหภูมิดินในแต่ละระดับความลึกจากผิวดิน พบว่า อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 2 cm มีความแปรปรวนมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 4 6 16 32 64 และ 100 cm ตามลำดับ เช่นเดียวกับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 (รูปที่ 4-13)

(3) ผลผลิตยางพารา

ผลผลิตยางพารานั้น สามารถเก็บได้เฉพาะที่แปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา โดยมีรอบฤดูกรีตเริ่มตั้งแต่เดือน พฤษภาคม และสิ้นสุดในเดือนมกราคม ของทุกปี และจะพักต้นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์-เดือนเมษายน น้ำหนักผลผลิตที่ได้ เป็นน้ำหนักของยางก้อนถ้วยแห้งนำไปชั่งน้ำหนัก และหักความชื้นจากน้ำหนักที่ได้ 15% จึงได้น้ำหนักผลผลิต มีหน่วยเป็น kg rai⁻¹ ผลผลิตสะสมในปี 2555 – 2558 มีปริมาณเท่ากับ 155.7 (ยังไม่ครบปี) 192.4 302.7 และ 157.0 (ยังไม่ครบปี) kg rai⁻¹ (ตารางที่ 2-4)

สำหรับผลผลิตยางพาราในปี 2556 และ 2557 ซึ่งมีการเก็บข้อมูลครบ 1 ปี พบว่า ในปี 2556 นั้นมีผลผลิตยางพาราน้อยกว่าปี 2557 เป็นอย่างมาก สาเหตุที่ทำให้ผลผลิตยางพาราน้อยกว่านั้นอาจเนื่องมาจากในปี 2556 พื้นที่ปลูกยางมีค่า NEP (Net Ecosystem Production) สะสมต่ำกว่าในปี 2557 เป็นอย่างมาก โดยในปี 2556 และ 2557 มีค่า NEP สะสม เท่ากับ 4,485.15 และ 6,496.25 kg CO₂ rai⁻¹year⁻¹ ตามลำดับ (ตารางที่ 2-10 และ 2-11)

4.3.6 ประสิทธิภาพการใช้น้ำ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยาง

ประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยาง (Water use efficiency หรือ WUE, kg C . m⁻³ H₂O) ซึ่งประเมินจากปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกดูดกลืนจากบรรยากาศโดยพื้นที่ปลูกยาง (Net Ecosystem Production หรือ NEP) ต่อการใช้น้ำของยางพารา (Crop Water Use หรือ CWU) 1 m³ พบว่า พื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 ซึ่งเป็นยางอายุมาก และเปิดกรีดแล้วมีค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยางสูงกว่า

Site ที่ 2 ซึ่งเป็นยางอายุน้อย และยังไม่เปิดกรีด โดยในปี 2555-2558 พื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 มีค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำ เท่ากับ 1.35, 0.82, 1.04 และ 1.06 kg C.m⁻³ H₂O ตามลำดับ ขณะที่ Site ที่ 2 มีค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำ เท่ากับ 0.81, 0.48, 0.82 และ 0.83 kg C.m⁻³ H₂O ตามลำดับ (ตารางที่ 4-2)

ตารางที่ 4-2 ประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยาง (Water use efficiency หรือ WUE, kg C . m⁻³ H₂O) เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ปี	Site ที่ 1		Site ที่ 2	
	อายุต้นยาง (ปี)	WUE	อายุต้นยาง (ปี)	WUE
2555 ^{1/}	18	1.35	3	0.81
2556	19	0.82	4	0.48
2557	20	1.04	5	0.82
2558 ^{1/}	21	1.06	6	0.83

^{1/} ข้อมูลไม่ครบปี

ตารางที่ 4-3 ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา (green water) และค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (m ³ H ₂ O. kg ⁻¹ yield year ⁻¹)	พื้นที่ปลูกยางอายุ		การเกษตรกรรม ^{1/} (ตลอดอายุยาง)
	19 ปี	20 ปี	
Green water	7.76	5.60	0
Blue water	0	0	0
Gray water	0	0	2.23

^{1/} ข้อมูลจากการวิจัยในปี 2555 ซึ่งได้มาจากวิธีด้าน LCA

ตารางที่ 4-4 ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา (green water) และค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (m ³ H ₂ O. kg ⁻¹ yield year ⁻¹)	พื้นที่ปลูกยางอายุ		การเกษตรกรรม ^{1/} (ตลอดอายุยาง)
	4 ปี	5 ปี	
Green water	ยังไม่มีผลผลิต	ยังไม่มีผลผลิต	0
Blue water	0	0	0
Gray water	0	0	2.17

^{1/} ข้อมูลจากการวิจัยในปี 2555 ซึ่งได้มาจากวิธีด้าน LCA

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยาง ประเมินจากค่าการใช้น้ำของยางพารา (Crop Water Use หรือ CWU, m³ H₂O. ra⁻¹) ต่อการได้มาซึ่งผลผลิตน้ำยาง 1 kg. พื้นที่ปลูกยางพารา Site 1 ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา พบว่า ยางอายุ 19 และ 20 ปี มีวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ ส่วนของ green water เท่ากับ 7.76 และ 5.60 m³ H₂O. kg⁻¹ yield ขณะที่ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา ปรากฏเฉพาะส่วนของ Gray water ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.23 m³ H₂O. kg⁻¹ yield

(ตารางที่ 4-3) สำหรับ Site ที่ 2 แปลงยางพาราของเกษตรกร จ. ฉะเชิงเทรา ที่อายุ 4 และ 5 ปี ไม่สามารถคำนวณค่าอัตราการคายน้ำของพื้นที่ปลูกยางได้ เนื่องจากต้นยางยังไม่เปิดกรีด ขณะที่ค่าอัตราการคายน้ำที่เกิดจากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา ปรากฏเฉพาะส่วนของ Gray water ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2.17 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ yield}$ (ตารางที่ 4-4)

4.3.7 ผลกระทบของจุลภูมิอากาศต่อค่า Kc, ETR และ CWU

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient, Kc) การคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, ETR) และ ปริมาณการใช้น้ำของพืช (Crop Water Use, CWU) กับจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ ปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, Rn) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, R_g) ความเข้มแสง (Photosynthetically Active Radiation, PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air temperature, T_{air}) ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity, RH) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี และส่วนที่ 2 แบ่งเป็น 4 กลุ่มตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยางในรอบ 1 ปี ได้แก่ ระยะที่ 1 No leaf ระยะที่ 2 Refoliation ระยะที่ 3 Fully expanded leaf และระยะที่ 4 Defoliation

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า Kc มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า T_{air} และ VPD มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า R_n, R_g, PAR, และ RH ค่า Kc มีความสัมพันธ์กับค่า PAR มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.15 (ตารางที่ 4-5) ส่วนค่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} และ VPD และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n, R_g และ PAR และไม่มีความสัมพันธ์กับค่า RH ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_n มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.64 (ตารางที่ 4-6) และค่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} และ VPD และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n, R_g และ PAR และไม่มีความสัมพันธ์กับค่า RH ค่า CWU มีความสัมพันธ์กับค่า R_n มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.07 (ตารางที่ 4-7)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยางในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า Kc เมื่อพิจารณาระยะที่ 1 (No leaf) พบว่า ค่า Kc มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_n, R_g, PAR, T_{air} และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า RH ค่า Kc มีความสัมพันธ์กับค่า VPD มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ -0.38 สำหรับระยะที่ 2 (Refoliation) พบว่า ค่า Kc มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_n, R_g, T_{air} และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า RH แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า PAR ค่า Kc มีความสัมพันธ์กับค่า VPD มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ -0.46 ส่วนระยะที่ 3 พบว่า ค่า Kc มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n, R_g, PAR และ RH ค่า Kc มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ -0.70 และ ระยะที่ 4 (Defoliation) พบว่า Kc มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_n, R_g, T_{air} และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า PAR และ RH ค่า Kc มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} และ VPD มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ -0.56 (ตารางที่ 4-5 ถึง 4-7)

ค่า ETR เมื่อพิจารณาระยะที่ 1 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD ขณะที่มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g และ PAR แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} และ RH ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า PAR มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.40 สำหรับระยะที่ 2 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g และ PAR แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า RH ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.61 ส่วนระยะที่ 3 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} , RH และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g และ PAR ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.73 และ ระยะที่ 4 พบว่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g และ PAR แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า RH ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า PAR มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.69 (ตารางที่ 4-5 ถึง 4-7)

ค่า CWU เมื่อพิจารณาระยะที่ 1 พบว่า ค่า CWU มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_g แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า R_n , PAR, T_{air} , RH และ VPD ค่า CWU มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.23 สำหรับระยะที่ 2 พบว่า ค่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g และ PAR แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า RH ค่า CWU มีความสัมพันธ์กับค่า R_n , R_g และ PAR มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.52 ส่วนระยะที่ 3 พบว่า ค่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} , RH และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g และ PAR ค่า CWU มีความสัมพันธ์กับค่า PAR มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.78 และ ระยะที่ 4 พบว่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR และ RH ค่า CWU มีความสัมพันธ์กับค่า PAR มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.72 (ตารางที่ 4-5 และ 4-7)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า Kc มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า R_n , R_g , PAR, T_{air} และ VPD และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า RH ค่า Kc มีความสัมพันธ์กับค่า RH มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.43 (ตารางที่ 4-5) ส่วนค่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า RH และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR, T_{air} และ VPD ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_n มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.69 (ตารางที่ 4-6) และค่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR, T_{air} และ RH ค่า CWU มีความสัมพันธ์กับค่า PAR มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.72 (ตารางที่ 4-7)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยางในรอบ 1 ปี พบว่า ในแต่ละระยะของการเจริญเติบโต ค่า Kc มีความสัมพันธ์กับจุลภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยางในลักษณะที่คล้ายกันเป็นส่วนใหญ่ คือ ค่า Kc มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_n , R_g , PAR, T_{air} และ VPD แต่ในระยะที่ 4 นั้น มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_n , R_g , T_{air} และ VPD เท่านั้น ค่า Kc มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า RH แต่ในระยะที่ 4 พบว่า Kc มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกับค่า PAR เพิ่มขึ้นมาด้วย ระยะการเจริญเติบโตที่ 1 และ 2 นั้น พบว่า ค่า Kc มีความสัมพันธ์กับค่า R_n มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ -0.61 และ -0.50 ตามลำดับ ส่วนระยะที่ 3 พบว่า ค่า Kc มีความสัมพันธ์กับค่า RH

มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.49 และระยะที่ 4 นั้น พบว่า ค่า Kc มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ -0.51 (ตารางที่ 4-5 ถึง 4-7)

ตารางที่ 4-5 แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า Kc และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี	Kc	R _n	R _g	PAR	T _{air}	RH	VPD
Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา							
รวมทุกช่วงเวลา	r	0.02	0.03	0.15	-0.55	0.07	-0.56
		**	**	**	**	**	**
ระยะที่ 1 No leaf	r	-0.34	-0.32	-0.11	-0.33	0.14	-0.38
		**	**	**	**	**	**
ระยะที่ 2 Refoliation	r	-0.14	-0.09	-0.04	-0.45	0.2	-0.46
		**	**	ns	ns	**	**
ระยะที่ 3 Fully expanded leaf	r	0.10	0.11	0.23	-0.70	0.03	-0.67
		ns	**	**	**	ns	**
ระยะที่ 4 Defoliation	r	-0.08	-0.07	0.05	-0.56	0.15	-0.56
		**	**	**	**	**	**
Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ							
รวมทุกช่วงเวลา	r	-0.19	-0.23	-0.12	-0.15	0.43	-0.32
		**	**	**	**	**	**
ระยะที่ 1 No leaf	r	-0.61	-0.61	-0.53	-0.23	0.32	-0.20
		**	**	**	**	**	**
ระยะที่ 2 Refoliation	r	-0.50	-0.47	-0.37	-0.33	0.38	-0.21
		**	**	**	**	**	**
ระยะที่ 3 Fully expanded leaf	r	-0.27	-0.27	-0.19	-0.22	0.49	-0.36
		**	**	**	**	**	**
ระยะที่ 4 Defoliation	r	-0.07	-0.06	0.12	-0.51	0.40	-0.39
		**	**	**	**	**	**

หมายเหตุ	คำย่อ	Kc	หมายถึง	Crop Coefficient
		R _n	หมายถึง	Net radiation (W m ⁻²)
		R _g	หมายถึง	Global solar radiation (W m ⁻²)
		PAR	หมายถึง	Photosynthetically active radiation (μmol m ⁻² s ⁻¹)
		T _{air}	หมายถึง	Air temperature (°C)
		RH	หมายถึง	Humidity (%)
		VPD	หมายถึง	Vapor pressure deficit
		r	หมายถึง	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
		**	หมายถึง	P<0.01
		*	หมายถึง	P<0.05
		ns	หมายถึง	ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ

ตารางที่ 4-6 แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า ETR และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี	ETR	R _n	R _g	PAR	T _{air}	RH	VPD
<u>Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา</u>							
รวมทุกช่วงเวลา	r	0.64 **	0.63 **	0.59 **	-0.17 **	0.00 ns	-0.23 **
ระยะที่ 1 No leaf	r	0.19 **	0.12 **	0.40 **	-0.07 ns	0.02 ns	-0.29 **
ระยะที่ 2 Refoliation	r	0.60 **	0.61 **	0.60 **	-0.20 **	0.03 ns	-0.27 **
ระยะที่ 3 Fully expanded leaf	r	0.72 ns	0.73 **	0.61 **	-0.27 **	-0.03 **	-0.26 **
ระยะที่ 4 Defoliation	r	0.69 **	0.65 **	0.69 **	-0.25 **	0.02 ns	-0.33 **
<u>Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ</u>							
รวมทุกช่วงเวลา	r	0.69 **	0.64 **	0.56 **	0.18 **	-0.10 **	0.24 **
ระยะที่ 1 No leaf	r	0.14 **	0.04 *	0.12 **	-0.02 ns	0.18 **	-0.11 *
ระยะที่ 2 Refoliation	r	0.50 **	0.50 **	0.47 **	-0.01 ns	-0.04 ns	0.08 *
ระยะที่ 3 Fully expanded leaf	r	0.82 **	0.81 **	0.79 **	0.31 **	-0.16 **	0.29 **
ระยะที่ 4 Defoliation	r	0.76 **	0.80 **	0.58 **	0.01 ns	-0.26 **	0.35 **

หมายเหตุ	คำย่อ	ETR หมายถึง	Evapotranspiration (mm)
		R _n หมายถึง	Net radiation (W m ⁻²)
		R _g หมายถึง	Global solar radiation (W m ⁻²)
		PAR หมายถึง	Photosynthetically active radiation (μmol m ⁻² s ⁻¹)
		T _{air} หมายถึง	Air temperature (°C)
		RH หมายถึง	Humidity (%)
		VPD หมายถึง	Vapor pressure deficit
		r หมายถึง	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
		** หมายถึง	P<0.01
		* หมายถึง	P<0.05
		ns หมายถึง	ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ

ตารางที่ 4-7 แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า CWU และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี	CWU	R _n	R _g	PAR	T _{air}	RH	VPD
<u>Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา</u>							
รวมทุกช่วงเวลา	r	0.05 **	0.07 **	0.10 **	0.05 **	0.00 ns	-0.05 **
ระยะที่ 1 No leaf	r	0.08 ns	0.23 **	-0.07 ns	-0.04 ns	-0.02 ns	-0.02 ns
ระยะที่ 2 Refoliation	r	0.52 **	0.52 **	0.52 **	-0.13 **	0.01 ns	-0.16 **
ระยะที่ 3 Fully expanded leaf	r	0.65 **	0.61 **	0.78 **	-0.63 **	-0.03 ns	-0.67 **
ระยะที่ 4 Defoliation	r	0.71 **	0.67 **	0.77 **	-0.44 **	0.08 **	-0.51 **
<u>Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ</u>							
รวมทุกช่วงเวลา	r	0.68 **	0.60 **	0.72 **	0.18 **	0.22 **	-0.04 **
ระยะที่ 1 No leaf	r	0.20 **	0.11 **	0.17 **	-0.13 **	0.23 **	-0.09 *
ระยะที่ 2 Refoliation	r	0.56 **	0.57 **	0.60 **	-0.22 **	0.16 **	0.09 **
ระยะที่ 3 Fully expanded leaf	r	0.79 **	0.77 **	0.83 **	0.31 **	0.10 **	0.13 **
ระยะที่ 4 Defoliation	r	0.69 **	0.63 **	0.87 **	-0.48 **	0.33 **	-0.25 **

<u>หมายเหตุ</u>	คำย่อ	CWU หมายถึง	Crop water use (m ³ .rai ⁻¹)
		R _n หมายถึง	Net radiation (W m ⁻²)
		R _g หมายถึง	Global solar radiation (W m ⁻²)
		PAR หมายถึง	Photosynthetically active radiation (μmol m ⁻² s ⁻¹)
		T _{air} หมายถึง	Air temperature (°C)
		RH หมายถึง	Humidity (%)
		VPD หมายถึง	Vapor pressure deficit
		r หมายถึง	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
		** หมายถึง	P<0.01
		* หมายถึง	P<0.05
		ns หมายถึง	ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ

ค่า ETR เมื่อพิจารณาระยะที่ 1 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD ขณะที่มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR และ RH แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า RH มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.18 สำหรับระยะที่ 2 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR และ VPD แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} และ RH ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_n และ R_g มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.50 ส่วนระยะที่ 3 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า RH ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR, T_{air} และ VPD ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_n มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.82 และ ระยะที่ 4 พบว่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า RH ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR และ VPD แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.80 (ตารางที่ 4-5 ถึง 4-7)

ค่า CWU เมื่อพิจารณาระยะที่ 1 พบว่า ค่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR และ RH ค่า CWU มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.80 สำหรับระยะที่ 2 พบว่า ค่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR, RH และ VPD ค่า CWU มีความสัมพันธ์กับค่า PAR มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.60 ส่วนระยะที่ 3 พบว่า ค่า CWU มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR, T_{air} , RH และ VPD ค่า CWU มีความสัมพันธ์กับค่า PAR มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.83 และ ระยะที่ 4 พบว่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} และ VPD ขณะที่ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR และ RH แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} ค่า CWU มีความสัมพันธ์กับค่า PAR มากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.87 (ตารางที่ 4-5 ถึง 4-7)

4.4 สรุปผลการศึกษาสมมูลน้ำของสวนยางพารา

การศึกษสมมูลน้ำของสวนยางพารา โดยมุ่งศึกษาความต้องการใช้น้ำของระบบนิเวศยางพารา เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา ในส่วนของ Green water และ วอเตอร์ฟุตพริ้นต์จากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา และ ศึกษาอิทธิพลของสภาพจุลภูมิอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient, Kc) การคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, ETR) และ ปริมาณการใช้น้ำ (Crop Water Use, CWU) ของพื้นที่ปลูกยางพารา

สำหรับการวิจัยในปีที่ 3 นี้ สามารถตรวจติดตามและบันทึกข้อมูลสมมูลน้ำและจุลภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา ได้ครบ 2 ปี และพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ได้ครบ 1 ปี แต่สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 นั้น นักวิจัยได้ประเมินข้อมูลส่วนที่ขาดหายไป โดยอาศัยความสัมพันธ์กับข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นยางและข้อมูลจุลภูมิอากาศทำให้ข้อมูลสมมูลคาร์บอนครบ 2 ปี ดังที่แสดงในตารางที่ 4-8 และ 4-9

ข้อมูลภูมิอากาศในปี 2556-2557 นั้น พบว่า ความเข้มแสงสะสมต่อปี ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อปี และปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อปีของพื้นที่มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์นั้น พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีค่าค่อนข้างสูงกว่าพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ขณะที่ปริมาณฝนสะสมต่อปีของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีค่าค่อนข้างน้อยกว่าพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2

ข้อมูลสมมูลน้ำในปี 2556-2557 นั้น พบว่า ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) ของพื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 มีค่า ETR และ ET_o สูงกว่า Site ที่ 2 ยกเว้นค่า ET_o ในปี 2557 ซึ่งพบว่า Site ที่ 1 มีค่า ET_o ต่ำกว่า Site ที่ 2 เล็กน้อย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากค่า ET_o ที่ได้นั้น ประเมินตามวิธีของ Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) เป็นการประมาณค่าจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพความชื้นอากาศ ซึ่งพื้นที่ศึกษาทั้งสองมีความแตกต่างทางด้านจุลภูมิอากาศไม่มากนัก อีกทั้งปริมาณน้ำฝนที่ตก ณ Site ที่ 1 ยังคงน้อยกว่า Site ที่ 2 จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้ค่า ET_o ที่คำนวณจาก Site ที่ 1 มีค่าน้อยกว่า Site ที่ 2 นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า ETR ที่วัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance มีค่าต่ำกว่าค่า ET_o คิดเป็นร้อยละมากกว่า 50% ความแตกต่างที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นผลมาจาก ค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิงนั้นเป็นค่าการระเหยน้ำของพืชที่ได้มาจากการคำนวณ โดยใช้ตัวแปรทางด้านจุลภูมิอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop coefficient, K_c) ค่า K_c ที่ใช้ในการคำนวณตามวิธีการของ FAO Penman-Monteith เป็นค่าคงที่ตลอดฤดูกาลและพัฒนาขึ้นจากพื้นที่อื่นที่ไม่ใช่ประเทศไทย ดังนั้นค่าการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้จากสมการดังกล่าว จึงค่อนข้างแตกต่างไปจากค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงในพื้นที่ปลูก สำหรับค่าการใช้น้ำของยางพารา (Crop Water Use, CWU) พบว่า พื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 มีค่า CWU สูงกว่า Site ที่ 2 ทั้งในปี 2556 และ 2557

การคายน้ำของต้นยาง (Transpiration, E) พบว่า ในปี 2556-2557 นั้น ค่า E ของพื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 สูงกว่า Site ที่ 2 และสัดส่วนของค่าการคายน้ำของต้นยางต่อการคายระเหยน้ำของพื้นที่ปลูกยาง (E/ET_o) พบว่า พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีสัดส่วนค่าการคายน้ำของต้นยางต่อการคายระเหยน้ำของพื้นที่ปลูกยาง คิดเป็นร้อยละ 61.17 และ 73.73 ในปี 2556 และ 2557 ตามลำดับ ขณะที่พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 มีสัดส่วนค่าการคายน้ำของต้นยางต่อการคายระเหยน้ำของพื้นที่ปลูกยาง คิดเป็นร้อยละ 38.29 และ 34.54 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ในพื้นที่ปลูกยางอายุนั้น การใช้น้ำส่วนใหญ่เกิดจากความต้องการน้ำของต้นยาง ขณะที่ ในพื้นที่ปลูกยางอายุมากขึ้น ความต้องการใช้น้ำส่วนใหญ่ไม่ได้เกิดจากต้นยาง แต่อาจเกิดจากการระเหยน้ำจากพื้นที่ปลูกยางสู่บรรยากาศ เนื่องจากเรือนพุ่มของต้นยางนั้น ยังเจริญเติบโตไม่เต็มที่ และยังไม่คลุมพื้นที่ปลูกเช่นเดียวกับยางอายุมาก ทำให้พื้นดินใต้เรือนพุ่มยังได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมได้โดยตรง และอาจส่งผลให้มีการคายน้ำจากพื้นดินสูงกว่าในแปลงปลูกยางอายุมาก

สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Crop Coefficient, K_c) ตลอดฤดูปลูก ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา พบว่า ค่าเฉลี่ย K_c ในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต ของปี 2556, 2557 และ 2558 ในช่วง initial stage มีค่าอยู่ระหว่าง 0.11 – 0.23 ส่วน development stage ค่า K_c จะเพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตของใบจนใบขยายเต็มที่ ซึ่งเป็นระยะที่พืชเริ่มแตกใบใหม่ และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.27 – 0.36 สำหรับ mid-season stage มีค่าอยู่ระหว่าง 0.53 – 0.57 ในช่วงระยะนี้จะเห็นได้ว่า ค่า K_c มีความแปรปรวนค่อนข้างสูง เนื่องจากระหว่างที่ใบชุดแรกมีการเจริญเติบโตเต็มที่แล้ว ยังมีการเกิดใบชุดที่สองในช่วงเวลาดังกล่าวด้วย จึงทำให้ค่า K_c มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในเดือนกรกฎาคม ถึง สิงหาคม ของทุกปี และในช่วง late-season stage มีค่าอยู่ระหว่าง 0.42 – 0.45 ซึ่งเป็นช่วงที่ใบร่วงจะมีค่า K_c จะมีค่าลดลงและค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแสดงว่า ในช่วงที่พืชใบร่วงนั้น ไม่มีความต้องการการให้น้ำ (Allen *et al.*, 1998) แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช หรือ K_c ที่ใช้ในการคำนวณตามวิธีการของ FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) โดยมีค่าดังนี้ คือ ในช่วง initial stage ของยางพารา มีค่า 0.95 ช่วง mid-season stage และ late-season stage มีค่าเท่ากัน คือ 1.00 จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่า ค่า K_c ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าในทุกช่วงการเจริญเติบโตของต้นยางพารา เนื่องจากการหาค่า K_c ตามวิธีการของ FAO Penman-

Monteith จะหาจากสัดส่วนปริมาณการใช้น้ำของพืช (crop evapotranspiration) กับผลการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (Reference Evapotranspiration) ในสภาพแปลงที่กว้างเพียงพอที่จะทำให้การระเหยและการคายน้ำของพืชไม่ได้รับผลกระทบจากอิทธิพลภายนอก และมีการจัดการน้ำอย่างเพียงพอกับความต้องการของพืชตลอดเวลา นอกจากนี้ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง มีความผันแปรไปตามสภาพภูมิอากาศของแต่ละแห่งอีกด้วย โดยพบว่าถ้าอากาศยิ่งแห้ง ค่า Kc ที่ได้จะสูงขึ้น แต่ในสภาพธรรมชาติเมื่อเกิดสภาวะแล้งในบรรยากาศ พืชจะปิดปากใบ เพื่อลดการสูญเสีย (Bush *et al.*, 2008; Isarangkool Na Ayutthaya *et al.*, 2011) ดังนั้นการใช้วิธีการประเมินค่า Kc ตามวิธีการของ FAO Penman-Monteith จึงมีข้อจำกัด ทำให้ค่าการใช้น้ำของยางพาราที่ประเมินสูงเกินกว่าความเป็นจริง

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพารา ศึกษาใน 2 ส่วน ได้แก่ วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา การศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพันธุ์ RRIM 600 ศึกษาในพื้นที่ 2 Sites ได้แก่ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ พบว่า พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา ยางพาราอายุ 19 และ 20 ปี มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (Green water) เท่ากับ 7.76 และ 5.60 m³ H₂O. kg ผลผลิต ค่าที่ปรากฏนั้น มีค่าน้อยกว่าที่รายงานโดย Mekonnen และ Hoekstra (2011) ซึ่งประเมินค่าโดยใช้แบบจำลอง CROPWAT 8.0 ที่มีค่า 12.96 m³.Kg ผลผลิต โดยค่าที่รายงานนั้น มีค่ามากกว่าถึง 60% ทั้งนี้จะมาจากสภาพแวดล้อมและตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองที่ Mekonnen and Hoekstra (2011) ใช้นั้นมีความแตกต่างจากสภาพแวดล้อมในความเป็นจริงใน Site ที่ทำการทดลอง สำหรับ Site ที่ 2 นั้นเป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด จึงยังไม่สามารถคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ได้ แต่ได้คำนวณค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยาง (Water use efficiency หรือ WUE, kg C . m⁻³ H₂O) เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสองพื้นที่ศึกษา พบว่า พื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 ซึ่งเป็นยางอายุมาก และเปิดกรีดแล้วมีค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยางสูงกว่า Site ที่ 2 ซึ่งเป็นยางอายุน้อย และยังไม่เปิดกรีด ส่วนค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมีค่าสำหรับพื้นที่ทั้ง 2 Sites นั้น ปรากฏเฉพาะ Gray water ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.23 และ 2.17 m³ H₂O. kg ผลผลิต ตามลำดับ ซึ่งค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ดังกล่าวเป็นค่าที่ประเมินด้วยวิธีทาง LCA

ตารางที่ 4-8 สรุปข้อมูลจุลภูมิอากาศ สมดุลของน้ำ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ในปี 2556 ของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ข้อมูลการศึกษา	Site ที่ 1	Site ที่ 2
ความเข้มแสงสะสมต่อปี ($\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	5,418.46	5,625.49
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	27.18	25.48
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)	81.73	69.17
ปริมาณฝนสะสม (mm)	1,215.00	1,441.00
ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อปี (R_h , $\text{MW m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)	3,169.22	3,026.16
ปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อปี (R_n , $\text{MW m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)	2,163.06	1,978.16
การคายระเหยของน้ำสะสมต่อปี (ETR, mm. year^{-1})	932.83	653.46
ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงสะสมต่อปี (ET _o , mm. year^{-1})	2,220.93	2,189.11
ปริมาณการใช้น้ำของพืชสะสมต่อปี (CWU, $\text{m}^3 \text{ rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$)	1,492.53	1,045.53
การคายน้ำของต้นยางสะสมต่อปี (E, mm. year^{-1})	570.61	250.20
ผลผลิตน้ำยางต่อปี ($\text{kg rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$)	192.40	-
ประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยาง (WUE, $\text{kg C.m}^{-3} \text{ H}_2\text{O}$)	0.82	0.48
วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพื้นที่ปลูกยางพารา ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)		
Green water	7.76	-
วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการเกษตรกรรม ($\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ผลผลิต}$) ^{1/}		
Green water	0	0
Blue water	0	0
Gray water	2.23	2.17

^{1/} ข้อมูลจากการวิจัยในปี 2555 ซึ่งคำนวณตลอดช่วงอายุของการปลูก

^{2/} พื้นที่ปลูกยาง Site ที่ 2 เป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง

ตารางที่ 4-9 สรุปข้อมูลจุลภูมิอากาศ สมดุลน้ำ และและวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ในปี 2557 ของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ข้อมูลการศึกษา	Site ที่ 1	Site ที่ 2
ความเข้มแสงสะสมต่อปี ($\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	5,725.01	5,656.13
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	27.29	25.54
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)	81.50	73.97
ปริมาณฝนสะสม (mm)	1,282.00	1,545.00
ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สะสมต่อปี (R_g , $\text{MW m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)	3,313.93	3,142.01
ปริมาณรังสีสุทธิสะสมต่อปี (R_n , $\text{MW m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)	2,208.50	2,117.03
การคายระเหยของน้ำสะสมต่อปี (ETR, mm. year^{-1})	1,059.80	848.22
ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงสะสมต่อปี (ET _o , mm. year^{-1})	2,335.96	2,381.11
ปริมาณการใช้น้ำของพืชสะสมต่อปี (CWU, $\text{m}^3 \text{ rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$)	1,695.68	1,357.16
การคายน้ำของต้นยางสะสมต่อปี (E, mm. year^{-1})	781.38	316.18
ผลผลิตน้ำยางต่อปี ($\text{kg rai}^{-1} \text{ year}^{-1}$)	302.70	-
ประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยาง (WUE, $\text{kg C.m}^{-3} \text{ H}_2\text{O}$)	1.04	0.82
วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพื้นที่ปลูกยางพารา ($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$)		
Green water	5.60	-
วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการเกษตรกรรม ($\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ผลผลิต}$) ^{1/}		
Green water	0	0
Blue water	0	0
Gray water	2.23	2.17

^{1/} ข้อมูลจากการวิจัยในปี 2555 ซึ่งคำนวณตลอดช่วงอายุของการปลูก

^{2/} พื้นที่ปลูกยาง Site ที่ 2 เป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

5.1 พื้นที่ศึกษา

การดำเนินงานวิจัยในปีที่ 3 ส่วนใหญ่เป็นการตรวจวัดข้อมูลสมดุคาร์บอน และน้ำ และข้อมูลประกอบอื่นๆ ของพื้นที่ปลูกยางพารา 2 Site ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา (ยางอายุมาก และเปิดกรีดแล้ว) และบึงกาฬ (ยางอายุน้อย และยังไม่เปิดกรีด) ขณะนี้ดำเนินการเก็บข้อมูลมาได้ 2 ปี 9 เดือน

การเก็บข้อมูลวิจัยค่อนข้างเป็นไปตามแผนการดำเนินงานที่กำหนดไว้ แต่อาจมีข้อมูลสูญหายไปบ้างเนื่องจากความเสียหายของอุปกรณ์และครุภัณฑ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

ตารางที่ 5-1 สรุปข้อมูลของพื้นที่ศึกษา

Site	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา	แปลงเกษตรกร
ภาค	ตะวันออก	ตะวันออกเฉียงเหนือ
สถานที่	อ. สนาบชัยเขต จ. ฉะเชิงเทรา	อ.ปากคาด จ.บึงกาฬ
พื้นที่ (ไร่)	50 ไร่	100 ไร่
ละติจูด	13°34'21.97"N	18°13'22.77"N
ลองจิจูด	101°28'5.53"E	103°18'59.46"E
ความสูงจากระดับน้ำทะเล (m.)	69 m.	200 m.
การให้น้ำ	อาศัยน้ำฝน	อาศัยน้ำฝน
ชุดดิน	ชุดดินบึงนารางบุรี	ชุดดินโพธิ์ชัย
พันธุ์ยาง	RRIM 600	RRIM 600
ระยะปลูก	2.5 x 7 เมตร	3 x 7 เมตร
อายุต้น ในปี 2557	20 ปี	5 ปี
ระยะเวลาที่เปิดกรีด(ปี)	10 ปี	ยังไม่เปิดกรีด
ปีที่สร้างหอคาย/ความสูง	2549 / 25 m.	2555 / 15 m.
ติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดจุลภูมิอากาศ	2549	2555

5.2 การศึกษาสมดุคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

การศึกษาสมดุคาร์บอนแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การศึกษาสมดุคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยางพารา เป็นการวัดสมดุคาร์บอนด้วยเทคนิค Eddy Covariance (2) การศึกษาสมดุคาร์บอนของการเกษตรกรรมเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ปลูกยางด้วยวิธีด้าน LCA

ข้อมูลสมดุคาร์บอนในปี 2556-2557 นั้น แสดงให้เห็นว่า ระบบนิเวศยางพารามีสถานะเป็น Carbon sink หรือ แหล่งกักเก็บคาร์บอน เนื่องจากต้นยางพารานั้นดูดกลืนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นชีวมวลสะสมอยู่ในระบบนิเวศยางพารานั้นเอง

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 Sites นั้น พบว่า คาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อพื้นที่ปลูกยาง Site ที่ 1 ซึ่งเป็นยางอายุมากและเปิดกรีดแล้ว ในปี 2556 และ 2557 มีค่า

คาร์บอนฟุตพริ้นต์เท่ากับ $-4,485.16$ และ $-6,496.24 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมีค่าเท่ากับ $28.5 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ ทั้งสองปี สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ซึ่งเป็นยางอายุน้อย ยังไม่เปิดกรีด มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์เท่ากับ $-1,842.39$ และ $-4,078.09 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมีค่าเท่ากับ $198.5 \text{ kg CO}_2 \text{ rai}^{-1}$ ทั้งสองปี

ส่วนคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง 1 kg ของในส่วนของผู้ปลูกยางพารา คำนวณได้เฉพาะพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 เนื่องจากยางเปิดกรีดแล้ว โดยพบว่า ในปี 2556 และ 2557 มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์เท่ากับ -23.31 และ $-21.46 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ผลผลิต ตามลำดับ ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของผู้ปลูกยางพารา มีค่าเท่ากับ $0.30 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ผลผลิต

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยาง ไม่ว่าจะเป็นค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อพื้นที่ปลูกยาง หรือคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง มีค่าเป็นลบ (-) แสดงว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดกลืนเข้าสู่ระบบนิเวศยางพารา ขณะที่ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมีค่าเป็นบวก (+) ซึ่งแสดงว่ามีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ แต่ปริมาณที่ถูกปล่อยออกมานั้นน้อยกว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดกลืนโดยระบบนิเวศยางพารามากกว่าร้อยละห้าสำหรับยางอายุน้อย แสดงให้เห็นว่า หากสามารถนำค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ในส่วนของการดำเนินงานมาผนวกในกระบวนการคิดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางพารา จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของยางธรรมชาติซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเหมาะสมกับการดำเนินธุรกิจที่เรียกว่า “Greening Economy” หรือ “ยุคเศรษฐกิจสีเขียว” ซึ่งเป็นการดำเนินธุรกิจที่ต้องใส่ใจถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียของผู้ปลูกยางพาราในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยศึกษาในจังหวัดบึงกาฬ และอุดรธานี พบว่า ปริมาณการใช้ปุ๋ยต่อหน่วย เป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ปัจจัยรองมา ได้แก่ ปริมาณผลผลิตน้ำยางพาราสดต่อไร่

ข้อเสนอแนะ การใช้ประโยชน์จากข้อมูลสมดุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพื้นที่ปลูกยาง:

ข้อมูลจากการศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอน จากการเกษตรกรรมและการเก็บเกี่ยว สามารถนำไปใช้คำนวณประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ได้

ทั้งนี้ ควรรายงานเพิ่มเติมข้อมูลสมดุลคาร์บอนที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance จากโครงการนี้ ซึ่งแสดงถึงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากที่ยางพาราธรรมชาติตรึงจากบรรยากาศและเก็บไว้ จะบ่งชี้ชัดว่า ยางพาราธรรมชาติ เป็น Green rubber ซึ่งจะช่วยให้ประเทศไทยสามารถใช้เป็นข้อได้เปรียบในการแข่งขันกับยางสังเคราะห์ได้

ตารางที่ 5-2 สรุปข้อมูลสมดุลคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพารา

	Site ที่ 1		Site ที่ 2	
ปี	2556	2557	2556	2557
อายุต้นยาง (ปี)	19	20	4	5
NEE (Net Ecosystem Exchange, kg CO ₂ ra ⁻¹)	-4,485.16	-6,496.24	-1,842.69	-4,078.09
GPP (Gross Primary Production, kg CO ₂ ra ⁻¹)	14,588.59	10,160.53	4,791.53	7,529.29
R _{eco} (Ecosystem Respiration, kg CO ₂ ra ⁻¹)	10,103.43	3,664.29	2,948.84	3,451.20
R _s (Soil Respiration, kg CO ₂ ra ⁻¹)	9,917.80	10,045.20	5,125.70	7,840.80
NEP (Net Ecosystem Production, kg CO ₂ ra ⁻¹)	4,485.16	6,496.24	1,848.00	4,071.47
สถานะของระบบนิเวศยางพารา ^{1/}	Carbon sink	Carbon sink	Carbon sink	Carbon sink
ผลผลิตน้ำยางต่อปี (kg.rai ⁻¹)	192.40	-	302.70	-
คาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อไร่ (kg CO ₂ .rai ⁻¹)				
พื้นที่ปลูกยาง	-4,485.16	-6,496.24	-1,842.69	-4,078.09
การเขตกรรม ^{2/}	28.50	28.50	198.49	198.49
คาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง 1 kg				
พื้นที่ปลูกยาง (kg CO ₂) ^{3/}	-23.31	-21.46	-	-
การเขตกรรม ^{2/}	0.30		0.46	

^{1/} สถานะของระบบนิเวศยางพารา Carbon source คือ ระบบนิเวศยางพาราทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งกักเก็บคาร์บอน (NEP < 0)
Carbon sink คือ ระบบนิเวศยางพาราทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งกักเก็บคาร์บอน (NEP > 0)

^{2/} คาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งดำเนินการศึกษาในปี 2555

^{3/} พื้นที่ปลูกยาง Site ที่ 2 เป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง

5.3 การศึกษาสมดุลน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

การศึกษามูลค่าของสวนยางพารา โดยมุ่งศึกษาความต้องการใช้น้ำของระบบนิเวศยางพารา เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา ในส่วนของ Green water และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์จากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นของพื้นที่ปลูกยางพารา

ข้อมูลสมดุลน้ำ อันได้แก่ ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และการใช้น้ำของยางพารา (CWU) ซึ่งวัดได้โดยใช้เทคนิค Eddy Covariance ในปี 2556-2557 ทำให้ทราบว่า การคายระเหยน้ำของพื้นที่ปลูกยางพาราที่วัดได้นั้น มีค่าน้อยกว่าค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) ซึ่งประเมินตามวิธีของ Penman-Monteith คิดเป็นร้อยละมากกว่า 50% อีกทั้งค่า K_c ที่วัดได้นั้นยังมีค่าต่ำกว่าค่า K_c ที่ใช้ในการคำนวณตามวิธีการของ FAO ทำให้ทราบว่าความต้องการใช้น้ำของยางพาราที่วัดได้จริงนั้น น้อยกว่าความต้องการใช้น้ำที่ประเมินด้วยแบบจำลอง CropWat เป็นอย่างมาก สำหรับค่าการใช้น้ำของยางพาราถูกใช้ในการคำนวณหาตัววอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพันธุ์ RRIM 600 ศึกษาในพื้นที่ 2 Sites พบว่า ในปี 2556 และ 2557 พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา มีตัววอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (Green water) เท่ากับ 7.76 และ 5.60 m³ H₂O.kg ผลผลิต ค่าที่ปรากฏนั้น มีค่าน้อยกว่าที่รายงานโดย Mekonnen และ Hoekstra (2011) ซึ่งประเมินค่าโดยใช้แบบจำลอง CROPWAT 8.0 ที่มีค่า 12.96 m³.Kg ผลผลิต มากกว่าร้อยละ 60 สำหรับ Site ที่ 2 นั้นเป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด จึงยังไม่สามารถคำนวณค่าตัววอเตอร์ฟุตพริ้นต์ได้ แต่ได้คำนวณค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยาง (Water use efficiency หรือ WUE, kg C.m⁻³ H₂O) เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสองพื้นที่ศึกษา พบว่า พื้นที่ปลูก

ยางพารา Site ที่ 1 ซึ่งเป็นยางอายุมาก และเปิดกรีดแล้วมีค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยางสูงกว่า Site ที่ 2 ซึ่งเป็นยางอายุน้อย และยังไม่เปิดกรีด ส่วนค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียมีค่าสำหรับพื้นที่ Sites ที่ 1 และ นั้น ปรากฏเฉพาะ Gray water ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.23 และ 2.17 m³ H₂O.kg ผลผลิต ตามลำดับ ซึ่งค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ดังกล่าวเป็นค่าที่ประเมินด้วยวิธีทาง LCA

การคายน้ำของต้นยาง (Transpiration, E) พบว่า ในปี 2556-2557 นั้น ค่า E ของพื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 สูงกว่า Site ที่ 2 และสัดส่วนของค่าการคายน้ำของต้นยางต่อการคายระเหยน้ำของพื้นที่ปลูกยาง (E/ETR) ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีสัดส่วนค่าการคายน้ำของต้นยางต่อการคายระเหยน้ำของพื้นที่ปลูกยางสูงกว่า Site ที่ 2 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของอายุต้นยาง หรือการเพิ่มชีวมวลของต้นยาง อาจมีอิทธิพลทำให้การคายน้ำของต้นยางเพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ การใช้ประโยชน์จากข้อมูลสมมูลน้ำของพื้นที่ปลูกยาง:

ข้อมูลจากการศึกษาองค์ประกอบของน้ำ จากการเขตรกรรมและการเก็บเกี่ยว สามารถนำไปใช้คำนวณประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ แบบ Grey water footprint ได้

ในขณะที่ ข้อมูลสมมูลน้ำที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance จากโครงการนี้ สามารถนำไปใช้เป็นค่าประเมิน Green water footprint ได้

ตารางที่ 5-3 สรุปข้อมูลสมมูลน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา

	Site ที่ 1		Site ที่ 2	
ปี	2556	2557	2556	2557
อายุต้นยาง (ปี)	19	20	4	5
ETR (Evapotranspiration, mm)	932.83	1,059.80	653.46	848.22
ET _o (Reference crop evapotranspiration, mm)	2,220.93	2,335.96	2,189.11	2,381.11
CWU (Crop water use, m ³ .rai ⁻¹)	1,492.53	1,695.68	1,045.53	1,357.16
E (Transpiration, mm)	570.61	781.38	250.20	316.18
WUE (Water use efficiency, kg C.m ⁻³ H ₂ O)	0.82	1.04	0.48	0.82
ผลผลิตน้ำยางต่อปี (kg.rai ⁻¹) ^{1/}	192.40	302.70	-	-
วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา (m ³ . kg ⁻¹)				
Green water	7.76	5.60	-	-
วอเตอร์ฟุตพริ้นต์จากการเขตรกรรม (m ³ . kg ⁻¹) ^{2/}				
Green water	0		0	
Blue water	0		0	
Gray water	2.23		2.17	

^{1/} พื้นที่ปลูกยาง Site ที่ 2 เป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลิตภัณฑ์น้ำยาง

^{2/} คาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งดำเนินการศึกษาในปี 2555

5.4 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำ

อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอน

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (Net Ecosystem Exchange, NEE) กับจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ ปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, R_n) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, R_g) ความเข้มแสง (Photosynthetically Active Radiation, PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air temperature, T_{air}) ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity, RH) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี และส่วนที่ 2 แบ่งเป็น 4 กลุ่มตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยางในรอบ 1 ปี ได้แก่ ระยะที่ 1 No leaf ระยะที่ 2 Refoliation ระยะที่ 3 Fully expanded leaf และระยะที่ 4 Defoliation

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบปี และการวิเคราะห์แยกตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยาง โดยภาพรวมแล้ว พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า PAR และ RH โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า PAR มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า R_n , R_g , T_{air} และ VPD ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า VPD มากที่สุด

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบปี และการวิเคราะห์แยกตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยาง ส่วนใหญ่ พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า PAR และ RH โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า RH มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า R_n , R_g , T_{air} และ VPD ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า VPD มากที่สุด

อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลน้ำ

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างการคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, ETR) การใช้น้ำของพืช (Crop Water Use, CWU) และสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient, Kc) กับจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ ปริมาณรังสีสุทธิ (R_n) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (R_g) ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (T_{air}) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (VPD) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี และส่วนที่ 2 แบ่งเป็น 4 กลุ่มตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยางในรอบ 1 ปี ได้แก่ ระยะที่ 1 No leaf ระยะที่ 2 Refoliation ระยะที่ 3 Fully expanded leaf และระยะที่ 4 Defoliation

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบปี และการวิเคราะห์แยกตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยาง ส่วนใหญ่ พบว่า ค่า ETR และ CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD และ T_{air} โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า R_n , R_g , และ PAR ค่า ETR และ CWU มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า PAR มากที่สุด และค่า ETR และ CWU ไม่ปรากฏสหสัมพันธ์กับค่า RH นอกจากนี้ยังพบว่า ในระยะที่ต้นยางไม่มีใบนั้น สหสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ETR และ Kc ค่อนข้างแตกต่างไปจากระยะการเจริญเติบโตอื่นๆ ส่วนค่า Kc นั้น พบว่า มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD และ T_{air} โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า PAR และ RH ค่า Kc มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า RH มากที่สุด

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ การวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบปี และการวิเคราะห์แยกตามระยะการเจริญเติบโตของต้นยาง โดยภาพรวมแล้ว พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า RH ยกเว้น ระยะที่ต้นไม่มีใบ และระยะที่ต้นยางสร้างใบใหม่ และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , และ VPD ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า R_n มากที่สุด ยกเว้นระยะที่ใบยังมีการขยายขนาดเต็มที่ และค่า ETR ไม่ปรากฏสหสัมพันธ์กับค่า T_{air} ส่วนค่า CWU มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า VPD และ T_{air} โดยมีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า T_{air} มากที่สุด และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_n , R_g , PAR และ RH ค่า CWU มีความสัมพันธ์ และสำหรับค่า Kc นั้น พบว่า มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_n , R_g , PAR, T_{air} และ VPD โดยความสัมพันธ์ที่ปรากฏนั้นมาก-น้อยต่างกันไปตามระยะในการเจริญเติบโตของต้นยาง ค่า Kc มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า RH ค่า Kc มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับกับค่า RH มากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- กาญจนา ลุ่งกี. 2550. การศึกษาต้นทุนด้านพลังงานในการสร้างชีวภาพและองค์ประกอบทางชีวเคมีของ
น้ำยาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์. 2552. แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุต
พริ้นท์ของผลิตภัณฑ์. บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน). 71 หน้า.
- จำลอง จิตต์หาญ, บรรเลง จันทรวาวาม, จุมพล ผึ้งผดุง, ธนัท แอ้วสกุลทอง และ ธาณินท์ หิมมะ. 2550.
คู่มือการปลูก บำรุงรักษา และเก็บเกี่ยวผลผลิตยางพารา ฉบับปี 2550. องค์การอุตสาหกรรมป่า
ไม้. 81 หน้า.
- พิศมัย จันทูมา, วารุณี บุญนำ, เอนก กุณาละสิริ, ดารุณี โกศัยเสวี, ศุภมิตร ลิ้มปิชัย, เฉลิมพงษ์ ขาว
ช่วง, รัตติยา พวงแก้ว, นภาพรณ เลขะวิวัฒน์, ศจิรัตน์ แรมลี, กฤษดา สังข์สิงห์, อารักษ์
จันทูมา, สุรเดช ปัจฉิมกุล และพุดนา รุ่งระวี. 2554. การประเมินการเจริญเติบโตของต้นยางใน
เขตปลูกยางใหม่. ว.ยางพารา 32 (2): 17-35.
- สถาบันวิจัยยาง. 2542. ข้อมูลทางวิชาการยางพารา. กรมวิชาการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
110 หน้า.
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2557. TGO Guidebook ฉบับเดือนเมษายน
2557. แหล่งที่มา: [http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/
ts_5941718e7a.pdf](http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_5941718e7a.pdf)
- Allen, R.G., L.S. Pereir, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines
for computing crop water requirements. FAO.
- Annamalainathan, K., P.R. Satheesh and Jame Jacob. 2011. Ecosystem flux
measurements in tuber plantations. Nat. Rubber Research 24 (1): 28-370
- Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, Rannik U, Moncrieff J et al 2000. Estimates of the annual
net carbon and water exchange of European forests: the EUROFLUX
methodology, Adv.Ecol.Res. 30: 113-75.
- Bhardwaj, A.K., T. Zenone, P. Jasrotia. G.P. Robertson, J. Chen and S.K. Hamilron. 2010.
Water and energy footprints of bioenergy crop production on marginal lands.
Global Change Biology – Bioenergy 3(3): 208-222.
- Bonal D, A. Bosc, S. Ponton, J.Y. Goret, B. Burban, P. Gross, J.M. Bonnefond, J. Elber, B.
Longdoz, D. Epron, J.M. Guehl and A. Granier. 2008. Impact of severe dry season
on net ecosystem exchange in the Neotropical rainforest of French Guiana
Neotropical rainforest of French Guiana. Global Change Biology, 14, 1917-1933.
- Boone, R. D., K. J. Nadelhoffer, J. D. Canary, J. P. Kaye. 1998. Roots exert a strong
influence on the temperature sensitivity of soil respiration. Nature 396: 570–572.
- Bowden, R. D., K. J. Nadelhoffer, R. D. Boone, J. M. Melillo and J. B. Garrison. 1993.
Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to
total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. Canadian Journal of
Forest Research 23: 1402–1407.

- Bowden, R.D., K.M. Newkirk and G.M. Rullo. 1998. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil Biol. Biochem.* 30: 1591-1597.
- Bush, S.E., D.E. Pataki, K.R. Hultine, A.G. West, J.S. Sperry, and J.R. Ehleringer. 2008. Wood anatomy constrains stomatal response to atmospheric vapor pressure deficit in irrigated urban trees. *Oecologia* 156: 13-20.
- Carswell F.E., A.L. Costa, M. Palheta, Y. Malhi, P. Meir, J. de P.R. Costa, M. de L. Ruivo. L. do S.M. Leal, J.M.N. Costa, R.J. Clement and J. Grace. 2002. Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian rain forest. *J. Geophys. Res.* 107, D20, art.
- Davidson, E.A., A. D. Richardson, K. E. Savage and D. Y. Hollinger. 2006. A distinct seasonal pattern of the ratio of soil respiration to total ecosystem respiration in a spruce-dominated forest. *E. Global Change Biology* 12: 230-239.
- Epron, D., C. Marsden, A. Thongo M'Bou, L. Saint-André, R. d'Annunzio and Y. Nouvellon. 2009. Soil carbon dynamics following afforestation of a tropical savannah with Eucalyptus in Congo. *Plant Soil*.
- Epron, D., J. NGAO and A. GRANIER. 2004. Interannual variation of soil respiration in a beech forest ecosystem over a six-year study. *Ann. For. Sci.* 61: 499-505.
- Epron, D., L. Faarque, E. Lucot and P. M. Baadot. 1999. Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. *Ann.For.Sci.* 56: 221-226.
- Epron, D., L. Faarque, E. Lucot and P. M. Baadot. 1999. Soil CO₂ efflux in a beech forest: the contribution of root respiration. *Ann.For.Sci.* 56: 289-295.
- Epron, D., V. Le Dantec, E. Dufréne and A. Granier. 2001. Seasonal dynamics of soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beech forest. *Tree Physiology* 21: 145-152.
- Epron, D., Y. Nouvellon, O. Roupsard, W. Mouvondy, A. Mabilab, L. Saint-André, R. Joffred, C. Jourdan, J.M. Bonnefonde, P. Berbigiere and O. Hamelc. 2004. Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. *Forest Ecology and Management* 202: 149-160.
- Epron, D., Y. Nouvellon, P.S. Deleporte, G. Kazotti, A. Thongo M'Bou, W. Mouvondy, L. Saint-André, O. Roupsard, C. Jourdan, and O. Hamel. 2006. Soil carbon balance in a clonal Eucalyptus plantation in Congo: effects of logging on carbon inputs and soil CO₂ efflux. *Global Change Biology* 12: 1021-1031.
- Eriksson, H., L. Eklundh, K. Hall and A. Lindroth. 2005. Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*. 129, 27-37.

- Ewel, K. C., W.P. Cropper and H.L. Gholz. 1987. Soil CO₂ evolution in Florida slash pine plantations. II. Importance of root respiration. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 330–333.
- Fan, S.M., S.C. Wofsy, P.S. Bakwin, D.J. Jacob and D.R. Fitzjarrald. 1990. Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the Central Amazon forest. *J. of Geophys. Res.* 95: 16851-16864.
- Ford, A.C., E.M. Quigley, B.E. Lacy, A.J. Lembo, Y.A. Saito and L.R. Schiller, E.E. Soffer, B.M. Spiegel and P. Moayyedi. 2014. Efficacy of prebiotics, probiotics, and synbiotics in irritable bowel syndrome and chronic idiopathic constipation: systematic review and meta-analysis. *Am. J. Gastroenterol.* 109(10): 1547-61.
- Granier, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure des flux de sève dans le tronc des arbres. *Ann. For. Sci.* 42: 193-200.
- Granier, A. 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurement. *Tree Physiol.* 3: 309-320.
- Goulden, M.L., J.W. Munger, S.M. Fan, B.C. Daube, and S.C. Wofsy. 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: method and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biol.* 2: 169-182.
- Hatton, T.J., S.J. Moore and P.H. Reece. 1995. Estimating stand transpiration in a Eucalyptus populnea woodland with the heat pulse method: measurement errors and sampling strategies. *Tree Physiology* 15: 219-227.
- Hillier, J., C. Hawes, G. Squire, A. Hilton, S. Wale and P. Smith. 2009. The carbon footprints of food crop production. *Inter. J. of Agri. Sustain.* 7 (2): 107–118.
- Hoekstra, A. Y., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya and M.M. Mekonnen. 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan, London, UK
- Isarangkool Na Ayutthaya, S., F.C. Do, K. Pannangpetch, J. Junjittakarn, J.L. Maeght and A. Rocheteau and H. Cochard. 2010. Transient thermal dissipation method of xylem sap flow measurement: multi-species calibration and field evaluation. *Tree Physiol.* 30: 139-148.
- Isarangkool Na Ayutthaya, S., F.C. Do, K. Pannangpetch, J. Junjittakarn, J.-L. Maeght, A. Rocheteau, and H. Cochard. 2011. Water loss regulation in mature Hevea brasiliensis: effects of intermittent drought in the rainy season and hydraulic regulation. *Tree Physiol.* 31: 751-762.
- Jawjit, W., C. Kroeze, and S. Jawjit. 2010. Quantification of Greenhouse Gas Emissions from Primary Rubber Industries in Thailand. 17th Climate Change and Green Growth: Innovating for sustainability. Seoul, Korea.
- King, J. S., P. Hanson, E. Bernhardt, P. DeAngelis, R.J. Norby and K.S. Pregitzer. 2004. A multiyear synthesis of soil respiration responses to elevated atmospheric CO₂ from four forest FACE experiments. *Global Change Biology* 10: 1027–1042.

- Kucera, C. L. and R. Kirham. 1971. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology* 52: 912–915.
- Kutscha, W.L., M. Aubinet, N. Buchmann, P. Smith, B. Osborne, W. Eugster, M. Wattenbach, M. Schrumpff, E.D. Schulze, E. Tomelleri, E. Ceschi, C. Bernhofer, P. Beziat, A. Carra-ri, P. Di Tommasi, T. Grunwald, M. Jones, V. Magliulo, O. Marloel, C. Moureaux, A. Olioso, M.J. Sanzi, M. Saunders, H. Sogaard, W. Ziegler. 2010. The net biome production of full crop rotations in Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139: 336–345.
- Law, B.E., S. Van Tuyl, A. Cescatti and D. D. Baldocchi. 2001. Estimation of leaf area index in open-canopy ponderosa pine forests at different successional stages and management regimes in Oregon. *Agricultural and Forest Meteorology*. 108, 1–14.
- Loescher H.W., S.F. Oberbauer, H.L. Gholz and D.B. Clark. 2003. Environmental controls on net ecosystem-level carbon exchange and productivity in a Central American tropical wet forest. *Global Change Biology* (9): 396–412.
- Luo, Y. and X. Zhou. 2006. *Soil respiration and the environment*. Elsevier, Inc., London, UK.
- Luyssaert, S., M. Reichstein, E.-D. Schulze, I. A. Janssens, B. E. Law, D. Papale, D. Dragoni, M. L. Goulden, A. Granier, W. L. Kutsch, S. Linder, G. Matteucci, E. Moors, J. W. Munger, K. Pilegaard, M. Saunders and E. M. Falge. 2009. Toward a consistency cross-check of eddy covariance flux-based and biometric estimates of ecosystem carbon balance. *Global Biogeochem. Cycles*, 23, doi:10.1029/2008GB003377.
- Malhi, Y., D.D. Baldocchi and P.G. Jarvis. 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant Cell and Environment* 22: 715–740.
- Mekonnen, M.M. and A. Y. Hoekstra. 2010. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. UNESCO-IHE Institute for Water Education, The Netherlands. 35 pages. Source: <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report47-WaterFootprintCrops-Vol1.pdf>.
- Mekonnen, M.M. and A. Y. Hoekstra. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop product. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15:1577–1600.
- Michaelis, L. and M.L. Menten. 1913. Die Kinetik der Invertin Wirkung. *Biochemische Zeitschrift* 49, 333
- Ngao, J., B. Longdoz, A. Granier and D. Epron. 2007. Estimation of autotrophic and heterotrophic components of soil respiration by trenching is sensitive to corrections for root decomposition and changes in soil water content. *Plant Soil* 301:99–110.
- Ngao, J., D. Epron, C. Brechet and A. Grainier. 2005. Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO₂ efflux in a beech forest using ¹³C-depleted litter. *Global Change Biology* 11: 1768–1776.

- Pingintha, N., M. Y. Leclerc, J. P. Beasley, D. Durden, G. Zhang, C. Senthong, and D. Rowland. Hysteresis response of daytime net ecosystem exchange during drought. *Biogeosciences* 7: 1159–1170.
- Pré Consultants. 2015. Simapro Version 7.3.2. Source: <https://www.pre-sustainability.com/simapro>.
- Rachhpal, S. J. and T. A. Black. 2006. Estimating heterotrophic and autotrophic soil respiration using small-area trenched plot technique: Theory and practice. *Agricultural and Forest Meteorology* 140: 193–202.
- Raymond, J., O. Zhaxybayeva, S. Gerdes, J.P. Gogarten and R.E. Blankenship. 2002. Whole genome analysis of photosynthetic prokaryotes. *Science* 298: 1616–1620.
- Rustad, L. E., J.L. Campbell, G.M. Marion, R.J. Norby, M.J. Mitchell, A.E. Hartley, J.H.C. Cornelissen and J. Gurevitch. 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126: 543–562.
- Saleska, S.R., S.D. Miller, D.M. Matross, M.L. Goulden, S.C. Wofsy, H.R. da Rocha, P.B.R. de Camargo, P. Crill, B.C. Daube, H.C. de Freitas, L. Huttyra, M. Keller, V. Kirchhoff, M. Menton, J.W. Munger, E.H. Pyle, A.H. Rice. 2003. Carbon in Amazon forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. *Science* 302: 1554–1557.
- Smith, D.M. and S.J. Allen. 1996. Measurement of sap flow in plant stems. *J. Exp. Bot.* 47: 1833–1844.
- Wilson, K.B., P.J. Hanson, P.J. Mulholland, D.D. Baldocchi, and S.D. Wullschlegel. 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agric For. Meteorol.* 106: 153–168.
- Wright, L., S. Kemp and I Williams. 2011. Carbon footprinting: towards a universally accepted definition. *Carbon Manage.* 2 (1): 61-72.
- Wood, Tana E., Motteo Detto and Whendee L. Silver. 2013. Sensitivity of Soil respiration to variability in soil moisture and temperature in a humid tropical forest. *Plos One* 8 (12): 1-7.
- Wright, L., S. Kemp and I Williams. 2011. Carbon footprinting: towards a universally accepted definition. *Carbon Manage.* 2 (1): 61-72.
- Yan, J., Y. Zhang, G. Yu, L. Zhang, K. Li, Z. Tan and L. Sha. 2013. Seasonal and inter-annual variations in net ecosystem exchange of two old-growth forests in southern China. *Agri. Forest Met.* 182: 257-265.
- Zak DR, W.E. Holmes, N.W. MacDonald and K.S. Pregitzer. 1999. Soil temperature, matric potential and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 575-584.

- Zanotelli, D., L. Montagnani, G. Manca and M. Tagliavini. 2013. Net primary productivity, allocation pattern and carbon use efficiency in an apple orchard assessed by integrating eddy covariance, biometric and continuous soil chamber measurements. *Biogeosciences* 10: 3089–3108.
- Zhang, P., S. Chen, W. Zhang, H. Miao, J. Chen, X. Han and G. Lin. 2012. Biophysical regulations of NEE light response in a steppe and a cropland in Inner Mongolia. *Plant Eco.* 5 (2): 238–248.

ภาคผนวก ก

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผน และกิจกรรม
ที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

**ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผน และ
กิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครง**

ตารางผนวกที่ 1 แผนของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. ทราบความก้าวหน้าและปัญหาของการดำเนินงานของโครงการย่อยอย่างต่อเนื่อง และสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้โดยไม่กระทบต่อแผนการดำเนินงาน	1. ติดตามความก้าวหน้าของการดำเนินงานของโครงการย่อยทุกเดือน และประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ทุก 2 เดือน	1. ติดตามความก้าวหน้าของการดำเนินงานของโครงการย่อยทุกเดือน และประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ทุก 2 เดือน กรณีที่มีปัญหาเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย ทีมวิจัยมีการหารือบ่อยครั้งขึ้น และมากกว่าที่วางแผนไว้	1. การติดตามความก้าวหน้าของการและการประชุมหารืออย่างต่อเนื่องทำให้ทีมวิจัยแก้ปัญหาได้ทันเวลา แม้ว่าในบางกรณีจะไม่สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้เลยก็ตาม
2. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย และจัดทำรายงานผลการวิจัย	2. ประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย และจัดทำรายงานผลการวิจัย	2. ประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย และจัดทำรายงานผลการวิจัย	2. สามารถจัดทำรายงานผลการวิจัยได้แล้วเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนด

ตารางผนวกที่ 2 แผนของโครงการย่อยที่ 1 การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. เพื่อประเมินค่า NPP	1. Eddy covariance - ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของ Site ที่ 1 และ 2 - เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพารา	1. Eddy covariance - ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของ Site ที่ 1 และ 2 - เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพารา แต่ไม่ครบ 1 ปี	1. การดำเนินการส่วนใหญ่เป็นไปตามแผนที่กำหนด และขณะนี้การดำเนินงานวิจัยยังไม่ครบ 1 ปี หรือ 1 ฤดูกาลได้ แต่ทีมวิจัยคาดว่าจะสามารถคำนวณค่า NPP ได้ในการวิจัยของปีที่ 2 เนื่องจากตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณมีข้อมูลครบ 1 ปี
2. เพื่อประเมินค่า R_a และ R_h	2. Soil respiration - เก็บข้อมูล Soil CO ₂ efflux ของสวนยางพาราทั้ง 2 sites ทุก 2 หรือ 4 (กรณีที่มีเครื่องมือเสียหาย) สัปดาห์ - พัฒนาชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติ	2. Soil respiration - เก็บข้อมูล Soil CO ₂ efflux ของสวนยางพารา ครบ 1 ปี - นำชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติ ชุดที่ 1 ไปติดตั้ง ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และพัฒนาชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติ ชุดที่ 2 เพื่อใช้ติดตั้งใน Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ	2. Soil respiration - ข้อมูลวิจัย Rs ครบ 1 ปี หรือ 1 ฤดูกาล และสามารถคำนวณค่า R_a และ R_h ได้ - เพื่อให้สามารถได้ค่าอัตราการหายใจของดินที่มี Time scale เดียวกับข้อมูลสมดุลคาร์บอน
3. เพื่อทราบสมดุลคาร์บอนของวัชพืชในสวนยางพารา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของสมดุลคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพารา	3. วัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของเรือนพุ่มวัชพืชในสวนยางพารา ดำเนินการ ณ แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ	3. วัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของเรือนพุ่มวัชพืชในสวนยางพารา ณ แปลง	3. ข้อมูลสมดุลคาร์บอนของวัชพืชในสวนยาง

		เกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ จำนวน 3 ครั้งในรอบ 1 ปี	
วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
4. ข้อมูลประกอบในการคำนวณและประเมินความแปรปรวนของคาร์บอนฟุตพริ้นต์	4. เก็บข้อมูลประกอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลด้าน Biometric และ Litter	4. ดำเนินการเก็บข้อมูล Girht ทุก 6 เดือน และ Litter trap ทุก 2 สัปดาห์	4. ข้อมูลที่ได้จะถูกใช้ในการประเมินการเจริญเติบโตของต้นยางพารา และดัชนีพื้นที่ใบของสวนยางพารา
5. ข้อมูลประกอบในการคำนวณและประเมินความแปรปรวนของคาร์บอน	5. การคำนวณค่า GPP และ NEP	5. ทีมวิจัยสามารถคำนวณค่า GPP และ NEP ได้จากข้อมูลที่วัดได้จริง	5. ทีมวิจัยสามารถคำนวณค่า GPP และ NEP ได้ครบ 2 ปี เฉพาะพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 และ 1 ปี สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2
6. ข้อมูลประกอบในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา	6. คาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเขตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น	6. สามารถประเมินปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมดุลคาร์บอนจากการเขตรกรรมของพื้นที่ศึกษาด้วยวิธี LCA ในพื้นที่ปลูกยางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จำนวน 2 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดบึงกาฬ และอุดรธานี	6. ทราบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมดุลคาร์บอนจากการเขตรกรรมของพื้นที่ศึกษาด้วยวิธี LCA ในพื้นที่ปลูกยางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
7. คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา	7. การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์	7. คำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1	7. คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ Site ที่ 1 ประเมินจากข้อมูลสมดุลคาร์บอนที่วัดได้จากพื้นที่ปลูกยางพาราของเครื่องมือ

ตารางผนวกที่ 3 แผนของโครงการย่อยที่ 2 การศึกษาสมดุลน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. ค่าการคายระเหยน้ำของสวนยางพารา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวอเตอร์ฟุตพริ้นต์	1. Eddy covariance - ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของ Site ที่ 1 และ 2 - เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของน้ำของสวนยางพารา	1. Eddy covariance - ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของ Site ที่ 1 และ 2 - เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของน้ำของสวนยางพารา	1. ค่าการคายระเหยน้ำของสวนยางพารา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ ครบ 2 ปี หรือ 2 ฤดูกาล
2. ข้อมูลประกอบในการคำนวณและประเมินความแปรปรวนของวอเตอร์ฟุตพริ้นต์	2. เก็บข้อมูลประกอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลจาก sap flow และ soil water content ผลผลิต	2. การเก็บข้อมูลประกอบอื่นๆ - Sap flow ที่ติดตั้ง เสื่อมสภาพ เนื่องจากอายุการใช้งาน ทำให้ต้องซื้อ Sensor มาติดตั้งใหม่ และมีข้อมูลบางส่วนที่ขาดหายไป - Soil temperature profile และ Soil water content - ผลผลิตมีข้อมูลจริงจากพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 เท่านั้น	2. การเก็บข้อมูลประกอบอื่นๆ - การติดตั้ง Sap flow ทำให้ได้ค่าการคายน้ำของต้นยางพารา - ข้อมูล Soil temperature profile และ Soil water content มี 5 ระดับจากผิวดิน - ผลผลิตมีข้อมูลจริงจากพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 เท่านั้น ส่วน Site ที่ 2 ยังไม่มีข้อมูล
3. การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราอายุ	3. การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์	3. ข้อมูลสมดุลน้ำที่วัดได้จากพื้นที่ปลูกยางพาราครบ 1 ปี ใน Site ที่ 1	3. ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ Site ที่ 1 สำหรับพื้นที่ Site ที่ 2 ยังไม่มีข้อมูลผลผลิต แต่สามารถคำนวณค่า Water use efficiency ของพื้นที่ปลูกยางได้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลประกอบในการศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ
คาร์บอนฟุตพริ้นต์ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์

ตารางผนวกที่ 4 ข้อมูลประกอบในการศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ คาร์บอนฟุตพริ้นต์ และ วอเตอร์ฟุตพริ้นต์

ข้อมูลที่ศึกษา	ตัวย่อ	หน่วย	ความถี่ในการบันทึกค่า
1. Eddy covariance system			
CO ₂ concentration	[CO ₂]	μmol mol ⁻¹	30 นาที
CO ₂ flux	Fc	μmol m ⁻² s ⁻¹	30 นาที
Net ecosystem exchange	NEE	μmol m ⁻² s ⁻¹	30 นาที
H ₂ O concentration	[H ₂ O]	m mol m ⁻² s ⁻¹	30 นาที
Water vapor flux	E	m mol m ⁻² s ⁻¹	30 นาที
Evapotranspiration	ETR	mm	30 นาที
2. Weather station			
Net radiation	Rn	W.m ⁻²	30 นาที
Global radiation	Rg	W.m ⁻²	30 นาที
Photosynthetic active photon flux density	PPFD	μmol m ⁻² s ⁻¹	30 นาที
Air temperature	Ta	°C	30 นาที
Relative Humidity of the air	Rh	%	30 นาที
Precipitation	PPT	mm	30 นาที
Wind speed	WS	m.s ⁻¹	30 นาที
Wind direction	WD	Degree	30 นาที
Braometric pressure	Pa	kPa	30 นาที
Vapor pressure deficit	VPD	kPa	30 นาที
Vapor pressure	VP	kPa	30 นาที
Evapotranspiration by FAO Penman-Monteith equation	ETP	mm	30 นาที
3. Soil respiration system			
Soil respiration	Rs	μmol m ⁻² s ⁻¹	2 สัปดาห์
Heterotrophic respiration	Rh	μmol m ⁻² s ⁻¹	2 สัปดาห์
Autotrophic respiration	Ra	μmol m ⁻² s ⁻¹	2 สัปดาห์
4. Sapflow system			
Transpiration by plant	T	mm	30 นาที
5. ข้อมูลประกอบอื่นๆ			
Soil temperature	Ts	°C	30 นาที
Soil water content	SWC	m ³ m ⁻³	30 นาที
Leaf area index	LAI	m ² m ⁻²	2 สัปดาห์
Leaf litter trap	Litter trap	gram	2 สัปดาห์
Diameter of plant	Girth	meter	6 เดือน

ภาคผนวก ค

แบบสอบถามข้อมูลบัญชีรายการ

แบบสอบถามข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม
โครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา”

แบบสอบถามนี้เป็นแบบสอบถามรายละเอียดของ**กระบวนการปลูกต้นยางพารา** ที่ใช้ในโครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา” โดยประกอบด้วย 6 ส่วนดังนี้

- ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป
- ส่วนที่ 2 สรุปขั้นตอนการปลูกยางพารา
- ส่วนที่ 3 การเพาะกล้ายางพารา (ในกรณีที่มีแปลงเพาะกล้าเป็นของตนเอง)
- ส่วนที่ 4 การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่
- ส่วนที่ 5 การปลูกและการบำรุงรักษาก่อนกรีดยาง (ก่อนเปิดกรีด)
- ส่วนที่ 6 การบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนหมดน้ำยาง (หลังเปิดกรีด)

หมายเหตุ: ขั้วยาง คือ ยางที่ลอกเป็นเส้นมาจากหน้ายางที่แห้งติดต้นยางพารา หรือภาชนะรองน้ำยางสด หากสวนยางพาราไม่มีการเพาะกล้ายางพาราเป็นของตนเองไม่ต้องตอบแบบสอบถามในส่วนที่ 3 หากสวนยางพารามีอายุอยู่ในช่วงก่อนเปิดกรีดไม่ต้องตอบแบบสอบถามในส่วนที่ 6

ข้อมูลเบื้องต้น

ผู้ให้ข้อมูล ชื่อนามสกุล.....

เบอร์โทร.....E-mail.....

สถานะ [] เจ้าของสวน [] ผู้ดูแลสวน

เพศ [] ชาย [] หญิง อายุปี

ระดับการศึกษา [] ไม่เรียน [] ประถมศึกษา [] มัธยมศึกษา
 [] อนุปริญญา [] ปริญญาตรี [] สูงกว่าปริญญาตรี

อาชีพหลัก [] ทำสวนยาง [] อื่นๆ โปรดระบุ

รายได้ต่อเดือน [] น้อยกว่า 5,000 บาท [] 5,001 – 10,000 [] 10,001 – 15,000
 [] 15,000 – 30,000 [] มากกว่า 30,000

อาชีพเสริม.....

รายได้ต่อเดือน [] น้อยกว่า 5,000 บาท [] 5,001 – 10,000 [] 10,001 – 15,000
 [] 15,000 – 30,000 [] มากกว่า 30,000

ประสบการณ์การประกอบอาชีพชาวสวนยางพารา [] น้อยกว่า 5 ปี [] 5 – 10 ปี [] มากกว่า 10 ปี

ที่ตั้งสวนยางพารา บ้านเลขที่.....หมู่ที่.....บ้าน.....

ตำบล.....อำเภอ.....จังหวัด.....

วันที่ให้ข้อมูล.....

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป

1.1 จำนวนพื้นที่ที่ปลูกยางพารา.....ไร่
(ข้อมูลตั้งแต่เดือน.....ถึง.....ปี พ.ศ.....)

1.2 ข้อมูลต้นยางพารา ณ ปัจจุบัน
(กรณีที่มีต้นยางพาราหลายช่วงอายุ โปรดระบุรายละเอียด ดังตารางด้านล่าง)

แปลงที่	ปีที่เริ่มปลูก	ช่วงอายุ ปัจจุบัน	จำนวนพื้นที่ (ไร่)	ความหนาแน่นการปลูก (ต้น/ไร่)	ลักษณะ/ สิทธิการถือครอง
1					
2					
3					
4					
5					

1.3 การใช้ประโยชน์จากพื้นที่บริเวณนี้ในอดีต 20 ปีก่อน

1. ไม่ทราบ
2. เคย (โปรดระบุพืชชนิดที่เคยปลูก เช่น มันสำปะหลัง, ข้าวโพด, ผลไม้, ยูคาลิปตัส, ข้าว, ป่า เป็นต้น)

1.4 สภาพพื้นที่ที่ปลูก (เลือกจากหัวข้อต่อไปนี้)

1. ลาดเท
2. พื้นที่ราบ

1.5 ลักษณะดิน (เลือกจากหัวข้อต่อไปนี้)

1. ดินเหนียว
2. ดินร่วน
3. ดินทราย
4. อื่นๆ.....

1.6 สภาพภูมิอากาศ (เลือกจากหัวข้อต่อไปนี้)

1. ฝนตกชุก
2. ปานกลาง
3. แห้งแล้ง

1.7 แหล่งน้ำ (เลือกจากหัวข้อต่อไปนี้)

1. น้ำฝน
2. น้ำบาดาล
3. น้ำบ่อ
4. น้ำในแม่น้ำลำคลอง

1.8 แนวการเพาะปลูก

ระยะห่างระหว่างแถว เมตร

ระยะห่างระหว่างต้น เมตร

1.9 พันธุ์ยางที่ใช้ปลูก (เลือกจากหัวข้อต่อไปนี้)

1. RRIT 251 ปริมาณ ต้นต่อไร่
 2. RRIM 600 ปริมาณ ต้นต่อไร่
 3. อื่นๆ (โปรดระบุ) ปริมาณ ต้นต่อไร่
 4. อื่นๆ (โปรดระบุ) ปริมาณ ต้นต่อไร่
 5. อื่นๆ (โปรดระบุ) ปริมาณ ต้นต่อไร่
- (โปรดระบุสัดส่วนพันธุ์ยางที่ใช้ในการเพาะปลูก ในกรณีที่มีการใช้หลายพันธุ์)

1.10 วิธีการปลูก (เลือกจากหัวข้อต่อไปนี้)

1. ต่อดาและปักชำ
2. ปักชำ
3. อื่นๆ(โปรดระบุ).....

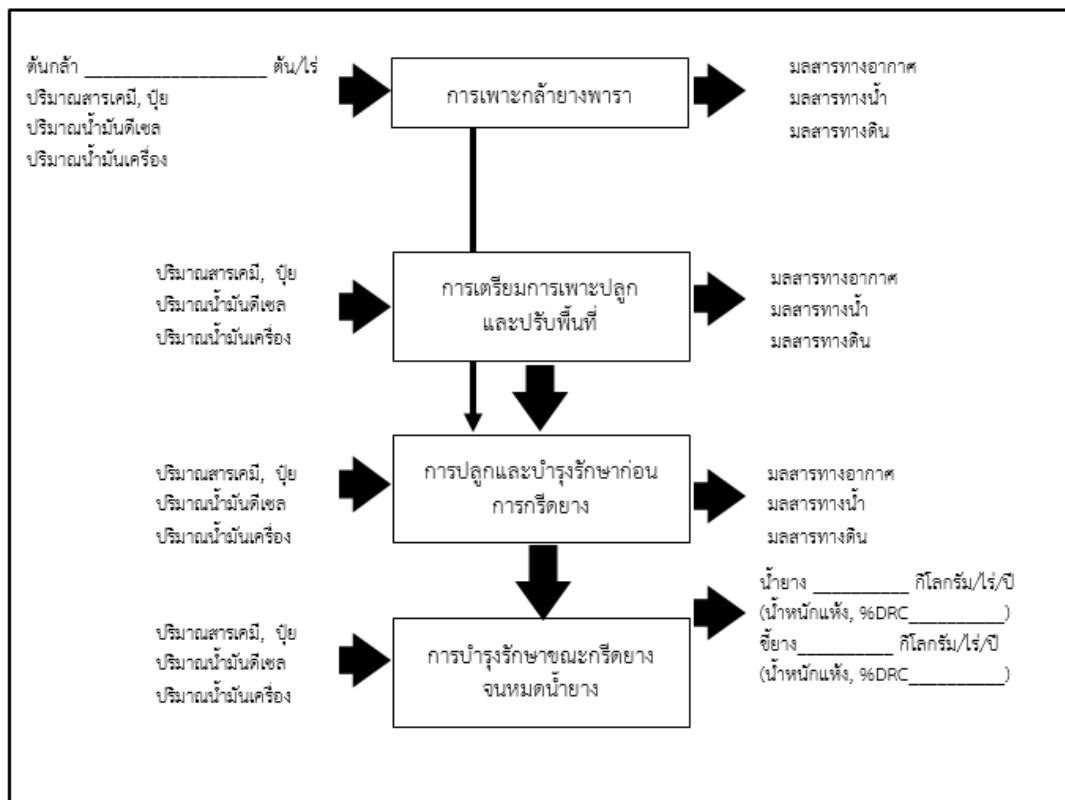
1.11 รูปแบบการปลูก

1. ปลูกแบบเชิงเดี่ยว
2. ปลูกร่วมกับพืชชนิดอื่น

1.12 กล้ายางพารามีการปลูกเองหรือไม่

1. ใช่ กรุณาตอบแบบสอบถามในส่วนที่ 3
2. ไม่ใช่ รับซื้อจากแปลงอื่น ใน อำเภอ จังหวัด.....
รูปแบบรถที่ใช้ในการขนส่ง.....
(ไม่ต้องตอบส่วนที่ 3 ให้เริ่มตอบในส่วนที่ 4)

ส่วนที่ 2 สรุปขั้นตอนการปลูกยางพารา



ส่วนที่ 3 การเพาะกล้ายางพารา (ในกรณีที่มีแปลงเพาะกล้าเป็นของตนเอง)

หมายเหตุ ขั้นตอนการเพาะกล้ายางพารามีรวมถึง การดูแลพันธุ์ยาง การเพาะกล้ายาง และการชำถุง
ในกรณีที่เพาะกล้าแบบอื่นๆ โปรดระบุและอธิบายเพิ่มเติม

3.1 กรณารอกข้อมูลต่อไปนี้

รายการ	หน่วย	ปริมาณ	แหล่งซื้อปัจจัย (อำเภอ และจังหวัด)	รูปแบบรถ ที่ใช้ในการขนส่ง
(1) จำนวนพื้นที่เพาะต้นกล้ายางพารา	ไร่			
(2) ปริมาณเมล็ดพันธุ์ยางพารา	กิโลกรัม/ไร่		อำเภอ _____ จังหวัด _____	อำเภอ _____ จังหวัด _____
(3) ถุงชำ (ระบุชนิดพลาสติก _____)	กิโลกรัม/ไร่		อำเภอ _____ จังหวัด _____	อำเภอ _____ จังหวัด _____

3.2 ปริมาณและชนิดของปุ๋ยที่ใช้

รายการ	ปุ๋ยอินทรีย์	ปุ๋ยเคมี
(1) มีการใช้ปุ๋ยหรือไม่	[] ใช้ [] ไม่ใช้	[] ใช้ [] ไม่ใช้
(2) ชนิดของปุ๋ย	(เช่น ปุ๋ยขี้ไก่, ปุ๋ยพืชสด เป็นต้น)	(เช่น ปุ๋ย 25-7-7, ปุ๋ยยูเรีย เป็นต้น)
2.1 _____	_____	_____
2.2 _____	_____	_____
2.3 _____	_____	_____
2.4 _____	_____	_____
(3) ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม/ไร่/ปี)		
3.1 _____	_____	_____
3.2 _____	_____	_____
3.3 _____	_____	_____
3.4 _____	_____	_____
(4) แหล่งซื้อปุ๋ย	อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____	อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____
(5) รูปแบบรถที่ใช้ขนส่ง	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____

3.6 ผลผลิต

- กรณีติดตามชำระ
ต้นกล้ายางพาราแบบชำถุง ต้น/ไร่
ต้นกล้ายางพาราแบบชำถุงไม่สมบูรณ์ (เสียหรือชำรุด) ต้น/ไร่
- กรณีอื่นๆ โปรดระบุ.....
ต้นกล้ายางพารา ต้น/ไร่
ต้นกล้ายางพาราไม่สมบูรณ์ (เสียหรือชำรุด) ต้น/ไร่

ส่วนที่ 4 การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่

ปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้
ปริมาณน้ำมันเครื่องที่ใช้
ปริมาณสารเคมีที่ใช้
ปริมาณปุ๋ย



การเตรียมการ
เพาะปลูกและการ
ปรับพื้นที่

กรุณกรอกข้อมูลต่อไปนี้

4.1 การเตรียมการก่อนปลูก

อันดับ	ชนิดเครื่องจักร (เช่น รถไถ เครื่องตัด เครื่องขุด)	กำลังม้า	ชนิดน้ำมัน	ปริมาณน้ำมันที่ใช้ (ลิตร/ไร่)	ปริมาณน้ำมันเครื่อง (ลิตร/ไร่)
1					
2					
3					
4					
5					

แหล่งซื้อเชื้อเพลิง ; อำเภอ..... จังหวัด

รูปแบบรถที่ใช้ขนส่ง ;

4.2 ปริมาณและชนิดของสารเคมีที่ใช้ก่อนปลูก (เช่น ไกลโฟเซต 48%, พาราควอต 100% เป็นต้น)

อันดับ	ชนิดของ สารเคมี (ชื่อการค้า)	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลิตร)	ปริมาณการใช้ (กิโลกรัม/ไร่/ปี)	ใช้ในช่วง อายุ	แหล่งซื้อสารเคมี (อำเภอ และจังหวัด)	รูปแบบรถ ที่ใช้ในการขนส่ง
1						
2						
3						

หมายเหตุ : การกรอกช่วงอายุ เช่น 1-3 ปี เป็นต้น

4.3 ปริมาณและชนิดของปุ๋ยที่ใช้ก่อนปลูก

รายการ	ปุ๋ยอินทรีย์	ปุ๋ยเคมี
(1) มีการใช้ปุ๋ยหรือไม่	[] ใช้ [] ไม่ใช้	[] ใช้ [] ไม่ใช้
(2) ชนิดของปุ๋ย	(เช่น ปุ๋ยขี้ไก่, ปุ๋ยคอก เป็นต้น)	(เช่น ปุ๋ย 15-15-15, ปุ๋ย DAP เป็นต้น)
2.1 _____	_____	_____
2.2 _____	_____	_____
2.3 _____	_____	_____
2.4 _____	_____	_____
(3) ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม/ไร่/ปี)		
3.1 _____	_____	_____
3.2 _____	_____	_____
3.3 _____	_____	_____
3.4 _____	_____	_____
(4) แหล่งซื้อปุ๋ย	อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____	อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____
(5) รูปแบบรถที่ใช้ขนส่ง	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____

ส่วนที่ 5 การปลูกและการบำรุงรักษาก่อนกรีดยาง (ก่อนเปิดกรีด)

ปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้
ปริมาณน้ำมันเครื่องที่ใช้
ปริมาณสารเคมีที่ใช้
ปริมาณปุ๋ย



การปลูกและ
บำรุงรักษาก่อน
การกรีดยาง

กรุณากรอกข้อมูลต่อไปนี้

5.1 ปริมาณและชนิดของปุ๋ยที่ใช้

รายการ	ปุ๋ยอินทรีย์	ปุ๋ยเคมี
(1) มีการใช้ปุ๋ยหรือไม่	[] ใช้ [] ไม่ใช้	[] ใช้ [] ไม่ใช้
(2) ช่วงอายุที่ใช้ (เช่น 0-3 ปี เป็นต้น ในกรณีที่แต่ละปีมีการใช้ปุ๋ยที่แตกต่างกัน โปรดระบุปริมาณปุ๋ยที่ใช้ในแต่ละปี)		
(3) ชนิดของปุ๋ย	(เช่น ปุ๋ยซีโก้, ปุ๋ยคอก เป็นต้น)	(เช่น ปุ๋ย 15-15-15, ปุ๋ย DAP เป็นต้น)
2.1 _____	_____	_____
2.2 _____	_____	_____
2.3 _____	_____	_____
2.4 _____	_____	_____
รายการ	ปุ๋ยอินทรีย์	ปุ๋ยเคมี
(4) ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม/ไร่/ปี)		
3.1 _____	_____	_____
3.2 _____	_____	_____
3.3 _____	_____	_____
3.4 _____	_____	_____
(5) แหล่งซื้อปุ๋ย	อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____	อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____
(6) รูปแบบรถที่ใช้ขนส่ง	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____
	_____	_____

5.2 ปริมาณและชนิดของยากำจัดวัชพืชที่ใช้

อันดับ	ชนิดของสารเคมี (ชื่อการค้า)	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลิตร)	ปริมาณการใช้ (ลิตร/ไร่/ปี)	ใช้ในช่วงอายุ	แหล่งซื้อสารเคมี (อำเภอ และ จังหวัด)	รูปแบบรถ ที่ใช้ในการขนส่ง
1						
2						
3						
4						

5.3 ปริมาณและชนิดของยากำจัดแมลงที่ใช้

อันดับ	ชนิดของสารเคมี (ชื่อการค้า)	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลิตร)	ปริมาณการใช้ (กิโลกรัม/ไร่/ปี)	ใช้ในช่วงอายุ	แหล่งซื้อสารเคมี (อำเภอ และ จังหวัด)	รูปแบบรถ ที่ใช้ในการขนส่ง
1						
2						
3						
4						

หมายเหตุ : การกรอกช่วงอายุ เช่น 1-3 ปี เป็นต้น

5.4 การใช้น้ำ (เลือกจากหัวข้อต่อไปนี้)

- มีการใช้น้ำหรือไม่ [] มี [] ไม่มี
- แหล่งน้ำที่ใช้ในการให้น้ำ [] น้ำผิวดิน [] น้ำบาดาล [] น้ำประปา
- รอบการให้น้ำ [] ทุกวัน [] ทุกๆ 2 วัน [] อื่นๆ
- วิธีการให้น้ำ [] ใช้แรงงานคนในการรดน้ำ
[] ปล่ยตามราง โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง
[] ใช้เครื่องสูบ (โปรตระบรูายละเอียดในตาราง)
[] ใช้เครื่องปั้มน้ำ (โปรตระบรูายละเอียดในตาราง)

อันดับ	ชนิดของเครื่องจักร	กำลังม้า	กรณีที่ 1 ใช้เชื้อเพลิงเป็นต้นกำลัง		กรณีที่ 2 ใช้ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง		น้ำมันเครื่อง (ลิตร/ไร่/ปี)
			ชนิดน้ำมัน	ปริมาณน้ำมัน (ลิตร/ไร่/ปี)	ไฟฟ้า(กิโลวัตต์)	จำนวนชั่วโมงที่ ใช้ต่อไร่ต่อปี	
1	เครื่องสูบ		[] เบนซิน [] ดีเซล				
2	เครื่องปั้มน้ำ						
3							
4							
5							

ส่วนที่ 6 การบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนหมดน้ำยาง (ก่อนเปิดกรีต)

ปริมาณน้ำมันดีเซลที่ใช้
ปริมาณสารเคมีที่ใช้



การบำรุงรักษาขณะกรีดยาง
จนหมดน้ำยาง



ปริมาณน้ำยางที่ได้

กรณารอกข้อมูลต่อไปนี้

6.1 การกรีดยางเริ่มกรีดยางตั้งแต่อายุ _____ ปี จนถึง _____ ปี

6.2 ขนาดรอบลำต้นที่เริ่มเปิดกรีดยาง _____ เซนติเมตร

6.3 ทำการกรีดยางทุก _____ วัน

6.4 ลักษณะการกรีดยาง (เลือกจากหัวข้อต่อไปนี้)

1. ล่างขึ้นบน

2. บนลงล่าง

3. อื่นๆ (โปรดระบุ) _____

6.5 ปริมาณและชนิดของปุ๋ยที่ใช้

รายการ	ปุ๋ยอินทรีย์	ปุ๋ยเคมี
(1) มีการใช้ปุ๋ยหรือไม่	[] ใช้ [] ไม่ใช้	[] ใช้ [] ไม่ใช้
(2) ช่วงอายุที่ใช้ (เช่น 6-25 ปี เป็นต้น ในกรณีที่แต่ละปี มีการใช้ปุ๋ยที่แตกต่างกัน โปรดระบุ ปริมาณปุ๋ยที่ใช้ในแต่ละปี)		
(3) ชนิดของปุ๋ย	(เช่น ปุ๋ยขี้ไก่, ปุ๋ยคอก เป็นต้น)	(เช่น ปุ๋ย 15-15-15, ปุ๋ย DAP เป็นต้น)
2.1 _____	_____	_____
2.2 _____	_____	_____
2.3 _____	_____	_____
2.4 _____	_____	_____
(4) ปริมาณที่ใช้ (กิโลกรัม/ไร่/ปี)		
3.1 _____	_____	_____
3.2 _____	_____	_____
3.3 _____	_____	_____
3.4 _____	_____	_____
(5) แหล่งซื้อปุ๋ย	อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____	อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____ อำเภอ _____ จังหวัด _____
(6) รูปแบบรถที่ใช้ขนส่ง	_____	_____

6.6 ปริมาณและชนิดของยากำจัดวัชพืชที่ใช้

อันดับ	ชนิดของสารเคมี (ชื่อการค้า)	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลิตร)	ปริมาณการใช้ (ลิตร/ไร่/ปี)	ใช้ในช่วงอายุ	แหล่งซื้อสารเคมี (อำเภอ และจังหวัด)	รูปแบบรถ ที่ใช้ในการขนส่ง
1						

2						
3						
4						

หมายเหตุ : การกรอกช่วงอายุ เช่น 1-3 ปี เป็นต้น

6.7 ปริมาณและชนิดของยากำจัดแมลงที่ใช้

อันดับ	ชนิดของสารเคมี (ชื่อการค้า)	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลิตร)	ปริมาณการใช้ (ลิตร/ไร่/ปี)	ใช้ในช่วงอายุ	แหล่งซื้อสารเคมี (อำเภอ และจังหวัด)	รูปแบบรถ ที่ใช้ในการขนส่ง
1						
2						
3						
4						
5						

6.8 สารเคมีเร่งน้ำยาง

อันดับ	ชนิดของสารเคมี (ชื่อการค้า)	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลิตร)	ปริมาณการใช้ (ลิตร/ไร่/ปี)	ใช้ในช่วงอายุ	แหล่งซื้อสารเคมี (อำเภอ และจังหวัด)	รูปแบบรถ ที่ใช้ในการขนส่ง
1						
2						
3						
4						
5						

6.9 การใช้น้ำ (เลือกจากหัวข้อต่อไป)

- มีการใช้น้ำหรือไม่ ☐ มี ☐ ไม่มี
- แหล่งน้ำที่ใช้ในการให้น้ำ ☐ น้ำผิวดิน ☐ น้ำบาดาล ☐ น้ำประปา
- รอบการให้น้ำ ☐ ทุกวัน ☐ ทุกๆ 2 วัน ☐ อื่นๆ
- วิธีการให้น้ำ ☐ ใช้แรงงานคนในการรดน้ำ
 ☐ ปล่อยตามราง โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง
 ☐ ใช้เครื่องสูบ (โปรตระกูลรายละเอียดในตาราง)
 ☐ ใช้เครื่องปั้มน้ำ (โปรตระกูลรายละเอียดในตาราง)

อันดับ	ชนิดของเครื่องจักร	กำลังม้า	กรณีที่ 1 ใช้เชื้อเพลิงเป็นต้นกำลัง		กรณีที่ 2 ใช้ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง		น้ำมันเครื่อง (ลิตร/ไร่/ปี)
			ชนิดน้ำมัน	ปริมาณน้ำมัน (ลิตร/ไร่/ปี)	ไฟฟ้า(กิโลวัตต์)	จำนวนชั่วโมงที่ ใช้ต่อไร่ต่อปี	
1	เครื่องสูบ		☐ เบนซิน				

			[] ดีเซล				
2	เครื่องปั้มน้ำ						
3							
4							
5							

6.10 ปริมาณน้ำยางที่ได้

น้ำยาง.....กิโลกรัม/ไร่/ปี (น้ำหนักแห้ง) ; DRC.....

ขี้ยาง.....กิโลกรัมปี/ไร่/ ; %DRC.....

6.11 ภาชนะที่ใช้รองรับน้ำยาง (เลือกจากหัวข้อต่อไปนี้)

[] น้ำยางสด

[] ยางก้อนถ้วย ,DRC%.....

[] ยางแผ่นดิบ

ภาคผนวก ง

Verification sheet

1. Verification Sheet ส่วนยางขนาดเล็ก จังหวัดบึงกาฬ

1	ชื่อฟาร์ม	รายละเอียดของผลิตภัณฑ์	รหัสฟาร์ม	Fr-01
	พื้นที่	สวนยางพาราขนาดเล็ก (พื้นที่น้อยกว่า 50 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ		
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำยางพาราสด		



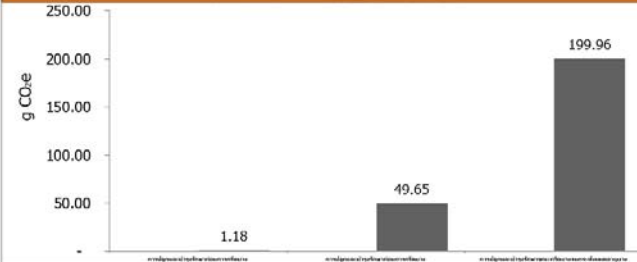
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Thai)	น้ำยางพาราสด
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Eng)	Fresh Latex
ชนิดของการประเมิน	B2B
หน่วยการหักงาน (Thai)	1 กิโลกรัม
หน่วยการหักงาน (Eng)	1 kg

การแสดงผลของหมายเหตุข้อมูลเพิ่มเติม



251 g CO₂e.

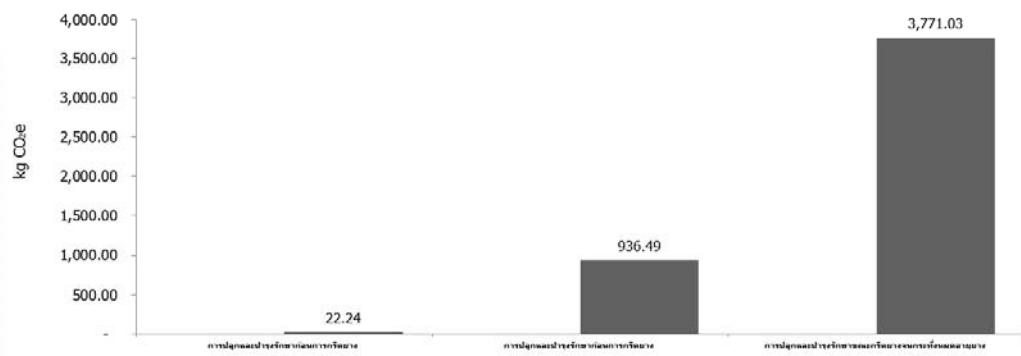
กราฟแท่งแสดงการปล่อย GHG และตะเภา



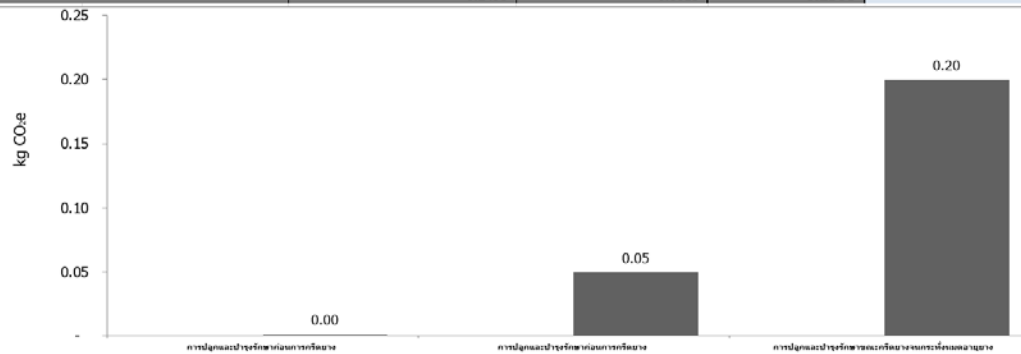
Category	GHG Emissions (g CO ₂ e)
การปล่อยจากกระบวนการผลิต	1.18
การปล่อยจากกระบวนการขนส่ง	49.65
การปล่อยจากกระบวนการใช้พลังงาน	199.96

5	ชื่อฟอร์ม	สรุปการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์	รหัสฟอร์ม	Fr-05
	พื้นที่	สวนยางพารา อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ		
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำยางพาราสด (นมแห้ง)		

ช่วงวัฏจักรชีวิต	การปล่อย GHG ของการได้มาและการใช้ ประโยชน์ วัสดุสิ้นเปลือง และทรัพยากร (kgCO ₂ eq./ไร่/ปี)	การปล่อย GHG ของการขนส่ง วัตถุดิบ พลังงาน และทรัพยากร (kgCO ₂ eq./ไร่/ปี)	ผลรวม(kgCO ₂ eq./ไร่/ปี)	สัดส่วน
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	21.6391	0.6053	22.2444	0.47
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	930.2051	6.2849	936.4900	19.80
การปลูกและบำรุงรักษาระยะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุ	3,750.5642	20.4655	3,771.0297	79.73
รวม	4,702.41	27.356	4,729.76	100.00



ช่วงวัฏจักรชีวิต	การปล่อย GHG ของการได้มาและการใช้ ประโยชน์ วัสดุสิ้นเปลือง และทรัพยากร (kgCO ₂ eq./FU)	การปล่อย GHG ของการขนส่ง วัตถุดิบ พลังงาน และทรัพยากร (kgCO ₂ eq./FU)	ผลรวม(kgCO ₂ eq./FU)	สัดส่วน
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	0.0011	0.0000	0.0012	0.47
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	0.0493	0.0003	0.0496	19.80
การปลูกและบำรุงรักษาระยะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุ	0.1988	0.0011	0.2000	79.73
รวม	0.2493	0.0015	0.2508	100.00



2. Verification Sheet ส่วนยางขนาดกลาง จังหวัดบึงกาฬ

1	ชื่อฟอร์ม	รายละเอียดของผลิตภัณฑ์	รหัสฟอร์ม	Fr-01
	พื้นที่	สวนยางพาราขนาดกลาง (พื้นที่มากกว่า 50 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ		
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำยางพาราสด		



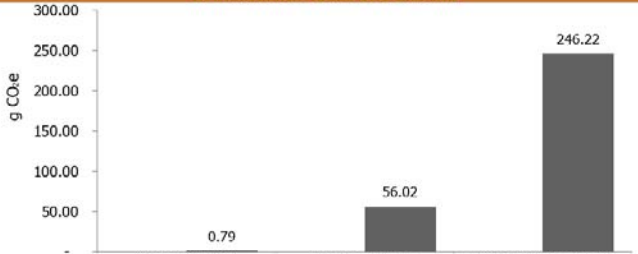
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Thai)	น้ำยางพาราสด
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Eng)	Fresh Latex
ขอบเขตของการประเมิน	B2B
หน่วยการจ้างงาน (Thai)	1 กิโลกรัม
หน่วยการจ้างงาน (Eng)	1 kg

การแสดงผลเครื่องหมายและข้อมูลเพิ่มเติม



303 g CO₂e.

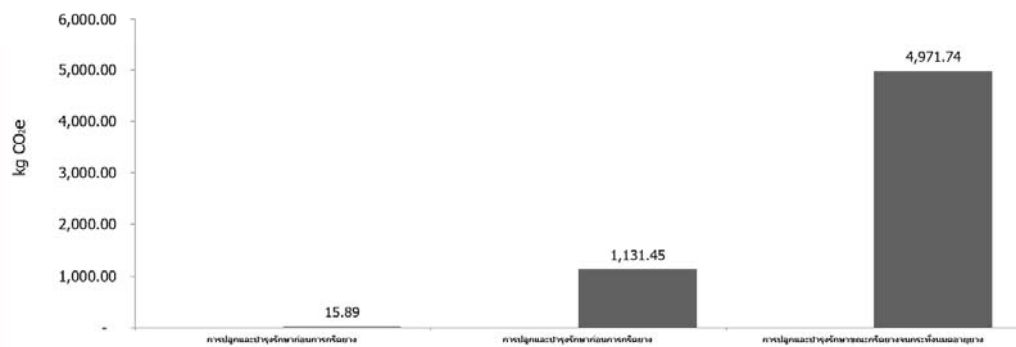
กราฟแท่งแสดงการปล่อย GHG แต่ละเฟส



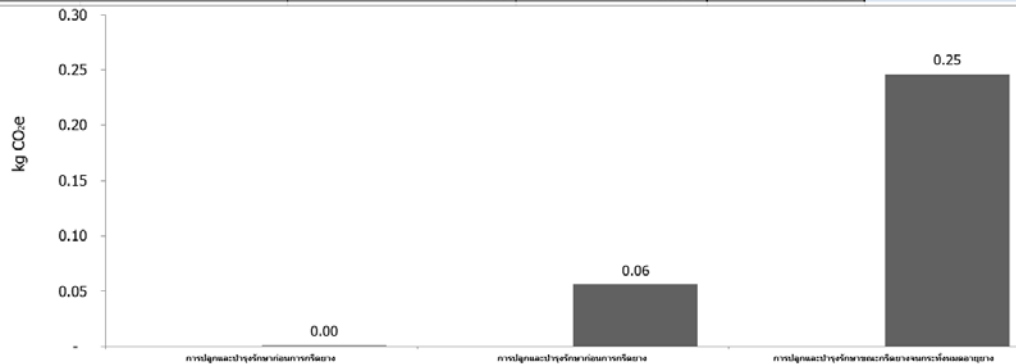
Phase	GHG Emissions (g CO ₂ e)
Phase 1	0.79
Phase 2	56.02
Phase 3	246.22

5	ชื่อฟอร์ม	สรุปการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์	รหัสฟอร์ม	Fr-05
	พื้นที่	สวนยางพารา อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ		
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำมันพาราสด (นบ.แห้ง)		

ช่วงวัฏจักรชีวิต	การปล่อย GHG ของการไถ่และการใช้ประโยชน์ ไร่ถั่วลิสง พืชพลังงาน และทรัพยากร (kgCO ₂ eq./ไร่/ปี)	การปล่อย GHG ของการขนส่ง ไร่ถั่วลิสง พืชพลังงาน และทรัพยากร (kgCO ₂ eq./ไร่/ปี)	ผลรวม(kgCO ₂ eq./ไร่/ปี)	สัดส่วน
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการไถ่	15.5463	0.3393	15.8856	0.26
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการไถ่	1,127.5268	3.9224	1,131.4492	18.49
การปลูกและบำรุงรักษาระยะไถ่จากจนกระทั่งจนแล้ว	4,948.5275	23.2100	4,971.7375	81.25
รวม	6,091.60	27.472	6,119.07	100.00



ช่วงวัฏจักรชีวิต	การปล่อย GHG ของการไถ่และการใช้ประโยชน์ ไร่ถั่วลิสง พืชพลังงาน และทรัพยากร (kgCO ₂ eq./FU)	การปล่อย GHG ของการขนส่ง ไร่ถั่วลิสง พืชพลังงาน และทรัพยากร (kgCO ₂ eq./FU)	ผลรวม(kgCO ₂ eq./FU)	สัดส่วน
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการไถ่	0.0008	0.0000	0.0008	0.26
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการไถ่	0.0558	0.0002	0.0560	18.49
การปลูกและบำรุงรักษาระยะไถ่จากจนกระทั่งจนแล้ว	0.2450	0.0012	0.2462	81.25
รวม	0.3016	0.0014	0.3030	100.00



3. Verification Sheet ส่วนยางขนาดใหญ่ จังหวัดบึงกาฬ

1	ชื่อฟาร์ม	รายละเอียดของผลิตภัณฑ์	รหัสฟาร์ม	Fr-01
	พื้นที่	สวนยางพาราขนาดกลาง (พื้นที่มากกว่า 50 ไร่) จังหวัดบึงกาฬ		
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำยางพาราสด		



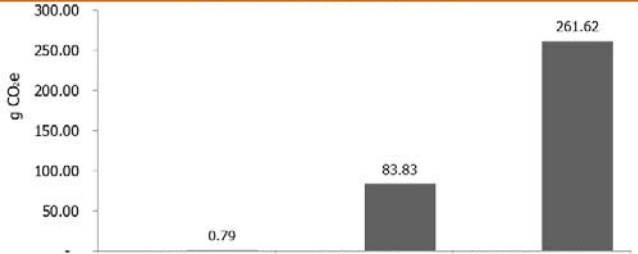
ชื่อผลิตภัณฑ์ และ-รุ่น (Thai)	น้ำยางพาราสด
ชื่อผลิตภัณฑ์ และ-รุ่น (Eng)	Fresh Latex
ชนิดของการประเมิน	B2B
หน่วยการคำนวณ (Thai)	1 กิโลกรัม
หน่วยการคำนวณ (Eng)	1 kg

การแสดงผลของเป้าหมายและข้อมูลเพิ่มเติม

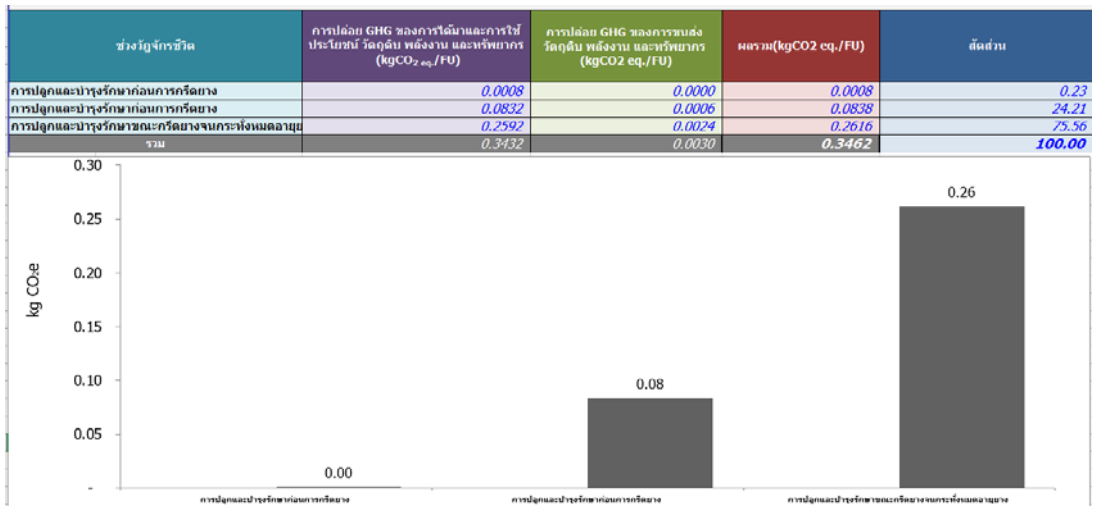
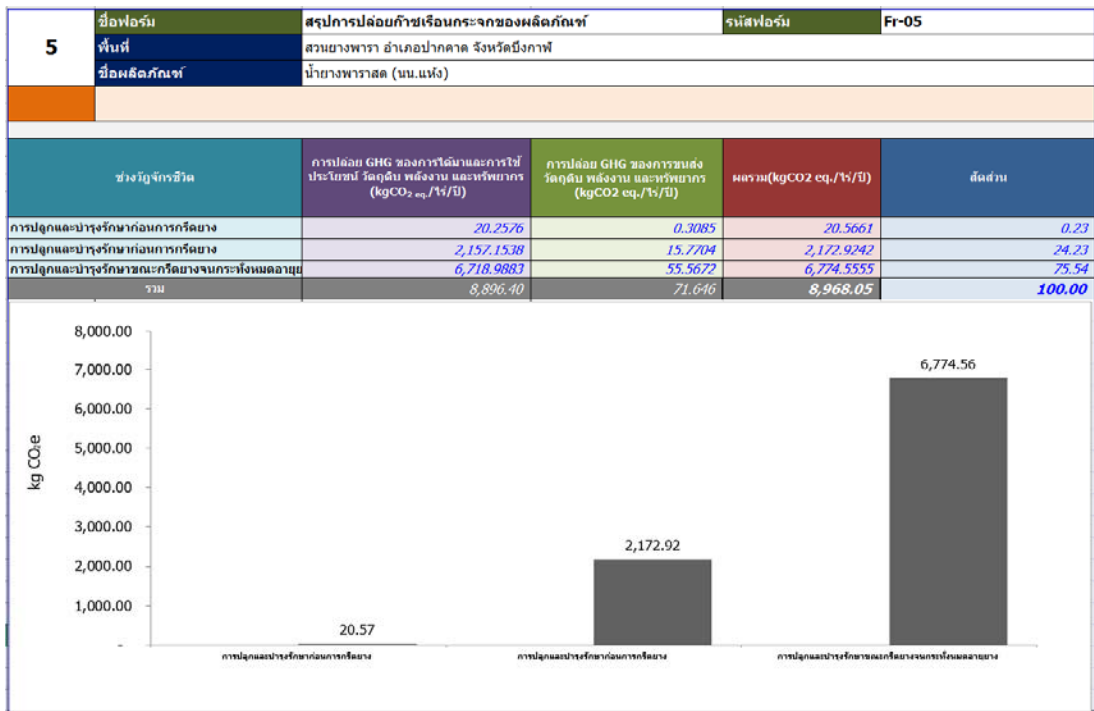


346 g CO₂e.

กราฟแท่งแสดงการปล่อย GHG แต่ละเฟส



Phase	GHG Emissions (g CO ₂ e)
Phase 1	0.79
Phase 2	83.83
Phase 3	261.62



4. Verification Sheet ส่วนยางขนาดเล็ก จังหวัดอุดรธานี

1	ชื่อฟอร์ม	รายละเอียดของผลิตภัณฑ์	รหัสฟอร์ม	Fr-01
	พื้นที่	สวนยางพาราขนาดเล็ก (พื้นที่น้อยกว่า 50 ไร่) จังหวัดอุดรธานี		
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำยางพาราสด		



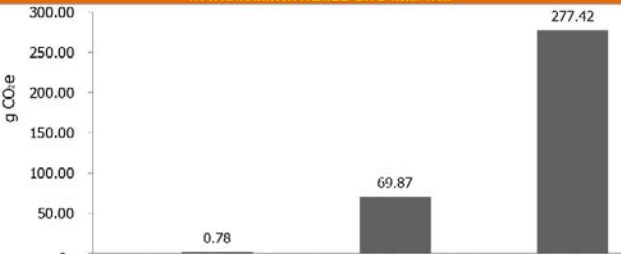
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Thai)	น้ำยางพาราสด
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Eng)	Fresh Latex
ขนาดของการประเมิน	B2B
หน่วยการคำนวณ (Thai)	1 กิโลกรัม
หน่วยการคำนวณ (Eng)	1 kg

การแสดงผลของข้อมูลและข้อมูลเพิ่มเติม

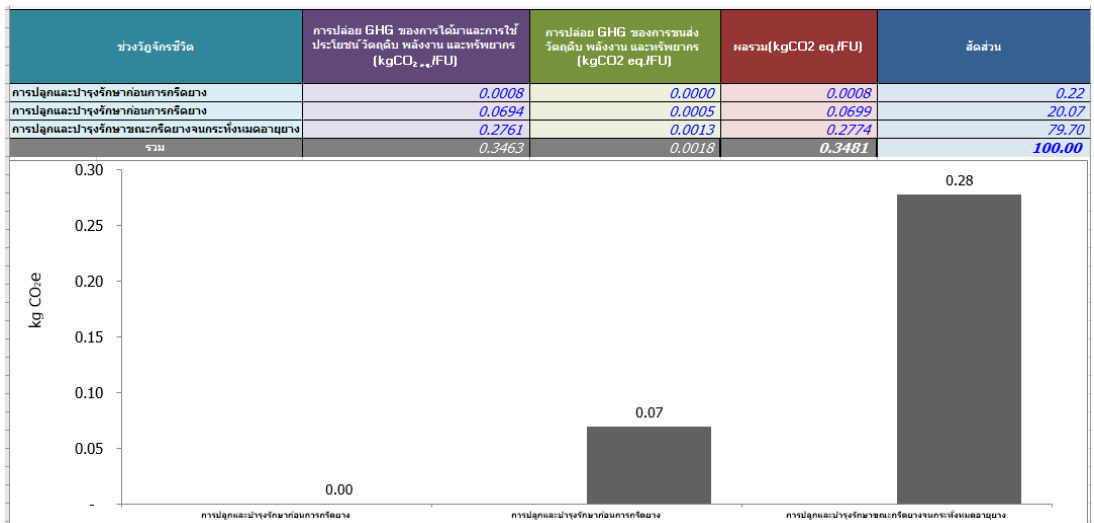
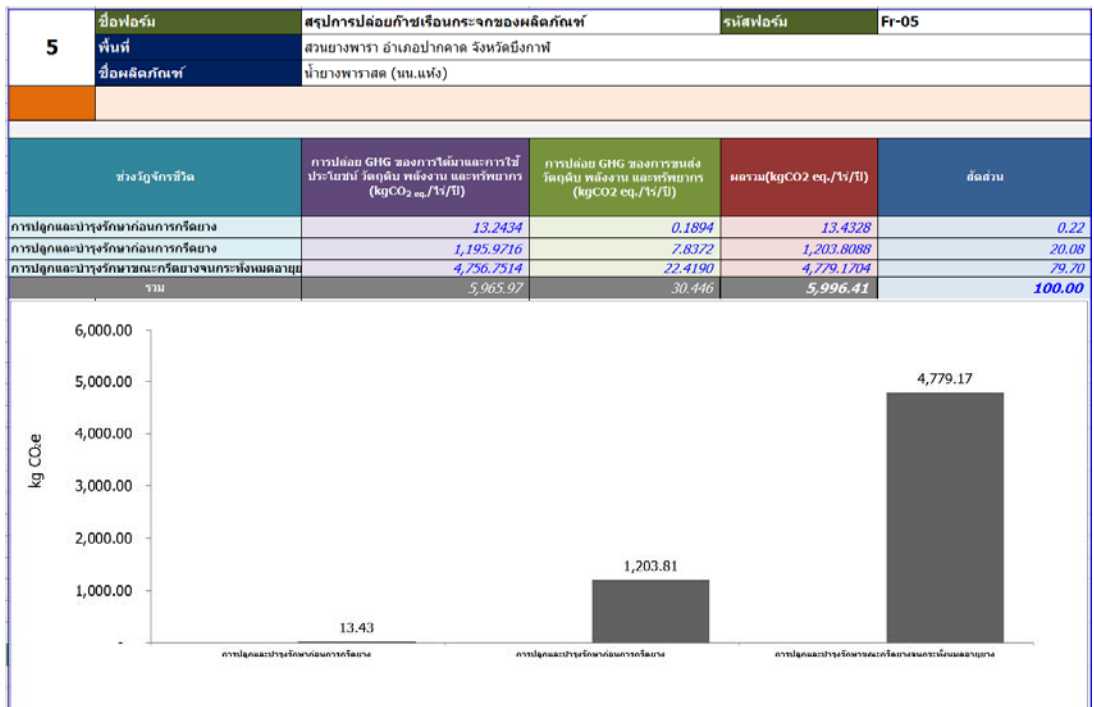


348 g CO₂e.

กราฟแท่งแสดงการปล่อย GHG แต่ละเฟส



Phase	GHG Emissions (g CO ₂ e)
Phase 1	0.78
Phase 2	69.87
Phase 3	277.42



5. Verification Sheet ส่วนยางขนาดกลาง จังหวัดอุดรธานี

1	ชื่อฟาร์ม	รายละเอียดของผลิตภัณฑ์	รหัสฟาร์ม	Fr-01
	พื้นที่	สวนยางพาราขนาดกลาง (พื้นที่มากกว่า 50 ไร่) จังหวัดอุดรธานี		
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำยางพาราสด		



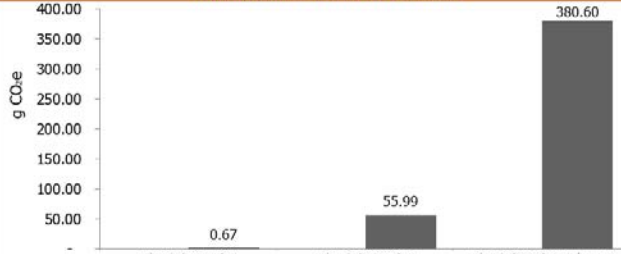
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Thai)	น้ำยางพาราสด
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Eng)	Fresh Latex
โซนเขตของการประเมิน	B2B
หน่วยการคำนวณ (Thai)	1 กิโลกรัม
หน่วยการคำนวณ (Eng)	1 kg

การแสดงผลเครื่องหมายและข้อมูลเพิ่มเติม

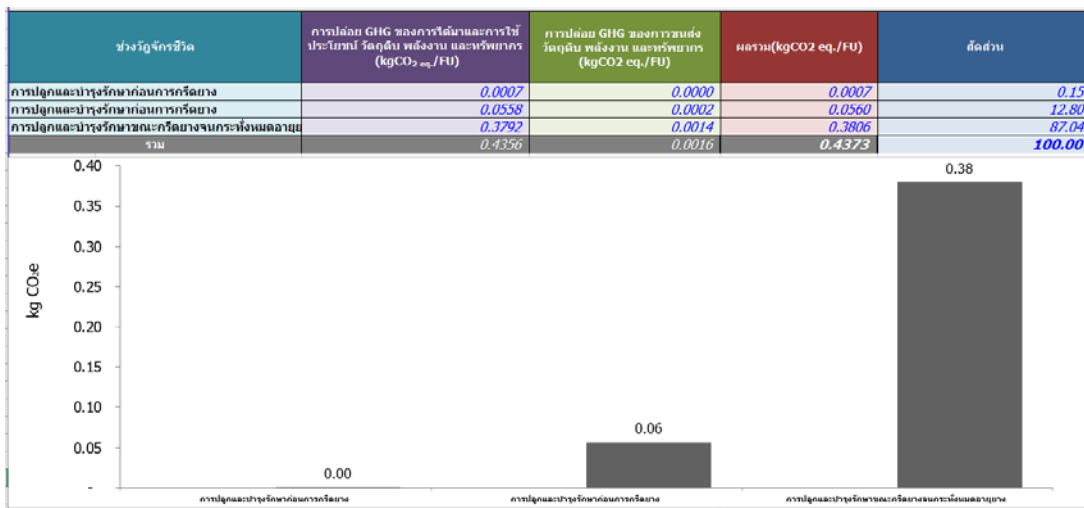
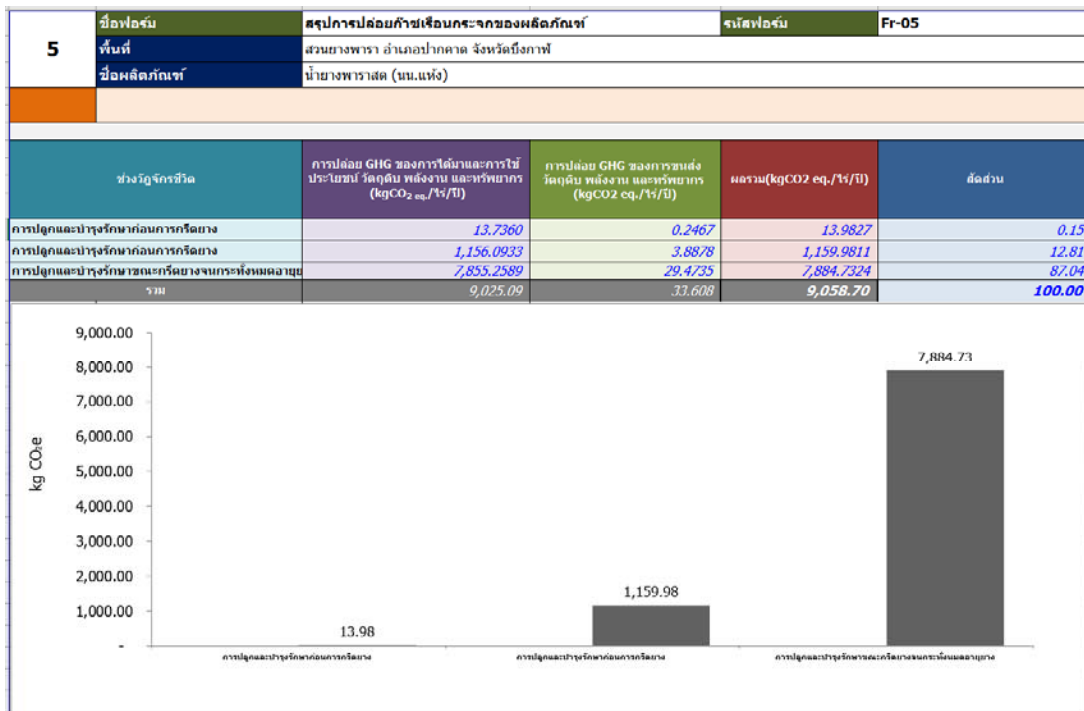


437 g CO₂e.

กราฟแท่งแสดงการปล่อย GHG แต่ละเฟส



Phase	GHG Emissions (g CO ₂ e)
Phase 1	0.67
Phase 2	55.99
Phase 3	380.60



4. Verification Sheet สวนยางขนาดใหญ่ จังหวัดอุดรธานี

1	ชื่อฟอร์ม	รายละเอียดของผลิตภัณฑ์	รหัสฟอร์ม	Fr-01
	พื้นที่	สวนยางพาราขนาดใหญ่ (พื้นที่มากกว่า 250 ไร่) จังหวัดอุดรธานี		
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำยางพาราสด		



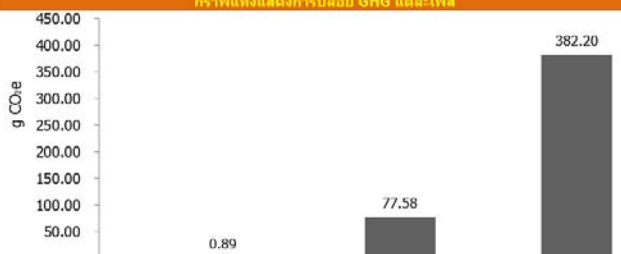
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Thai)	น้ำยางพาราสด
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Eng)	Fresh Latex
ขอบเขตของการประเมิน	B2B
หน่วยการรายงาน (Thai)	1 กิโลกรัม
หน่วยการรายงาน (Eng)	1 kg

การแสดงผลเครื่องหมายและข้อมูลเพิ่มเติม

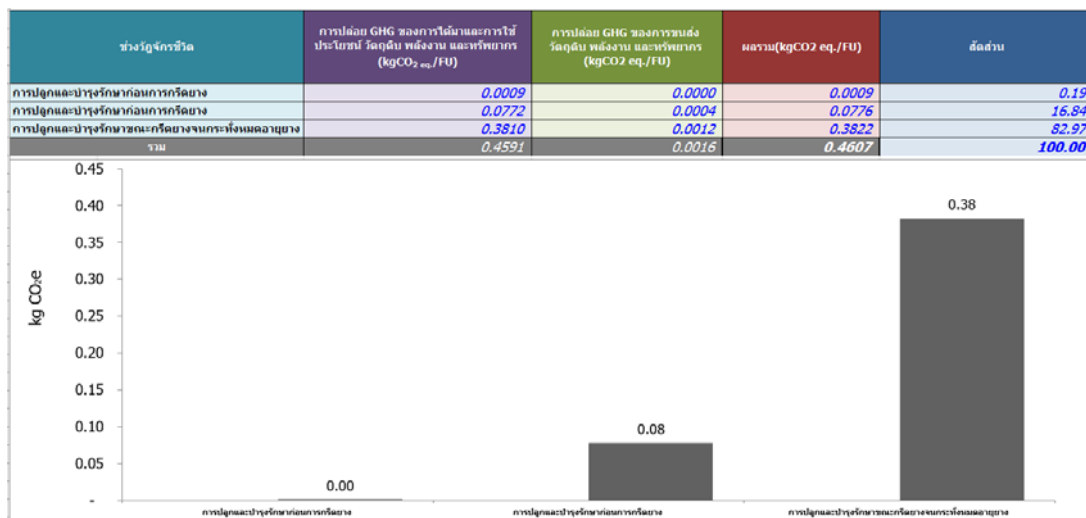
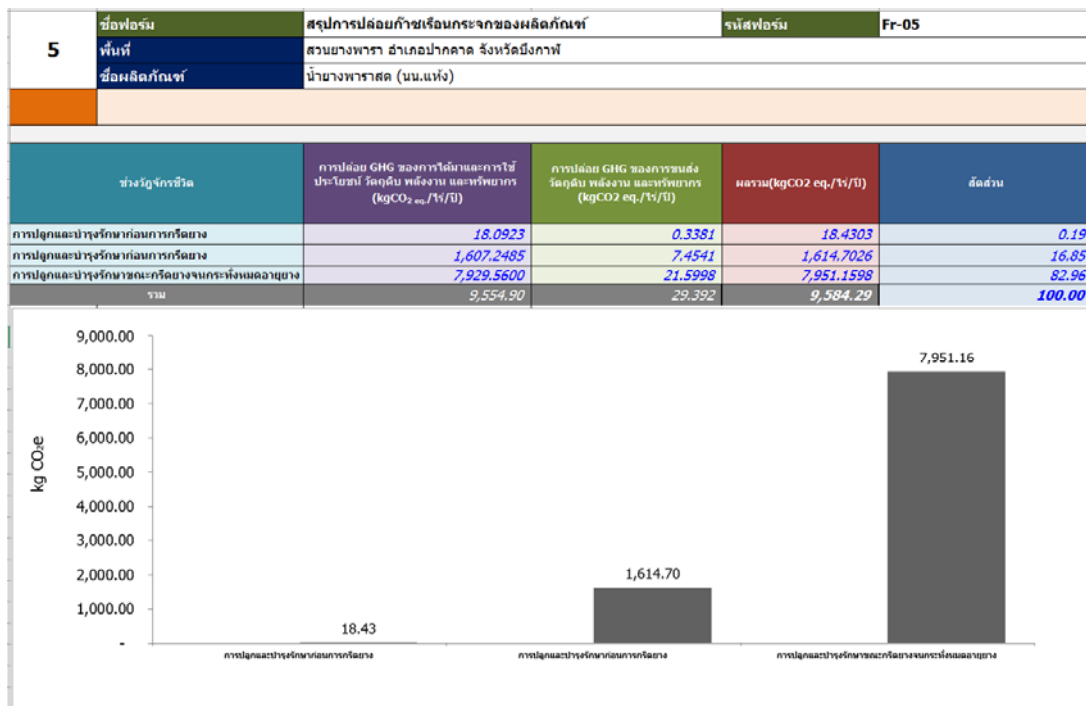


461 g CO₂e.

กราฟแท่งแสดงการปล่อย GHG แต่ละเฟส



Phase	GHG Emissions (g CO ₂ e)
การปลูกและบำรุงรักษาต้นยาง	0.89
การเก็บเกี่ยวและแปรรูปยาง	77.58
การขนส่งยางสดจากสวนยางไปยังโรงงาน	382.20



ภาคผนวก จ

เอกสารอ้างอิงประกอบการวิจัย



GCB Bioenergy (2011) 3, 208–222, doi: 10.1111/j.1757-1707.2010.01074.x

Water and energy footprints of bioenergy crop production on marginal lands

A. K. BHARDWAJ*†, T. ZENONE*‡, P. JASROTIA*†, G. P. ROBERTSON*†§, J. CHEN*‡ and S. K. HAMILTON*†¶

*Great Lakes Bioenergy Research Center, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA, †W.K. Kellogg Biological Station, Michigan State University, Hickory Corners, MI 49060, USA, ‡Department of Environmental Sciences, University of Toledo, Toledo, OH 43606, USA, §Department of Crop and Soil Sciences, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA, ¶Department of Zoology, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA

Abstract

Water and energy demands associated with bioenergy crop production on marginal lands are inextricably linked with land quality and land use history. To illustrate the effect of land marginality on bioenergy crop yield and associated water and energy footprints, we analyzed seven large-scale sites (9–21 ha) converted from either Conservation Reserve Program (CRP) or conventional agricultural land use to no-till soybean for biofuel production. Unmanaged CRP grassland at the same location was used as a reference site. Sites were rated using a land marginality index (LMI) based on land capability classes, slope, soil erodibility, soil hydraulic conductivity, and soil tolerance factors extracted from a soil survey (SSURGO) database. Principal components analysis was used to develop a soil quality index (SQI) for the study sites based on 12 soil physical and chemical properties. The water and energy footprints on these sites were estimated using eddy-covariance flux techniques. Aboveground net primary productivity was inversely related to LMI and positively related to SQI. Water and energy footprints increased with LMI and decreased with SQI. The water footprints for grain, biomass and energy production were higher on lands converted from agricultural land use compared with those converted from the CRP land. The sites which were previously in the CRP had higher SQI than those under agricultural land use, showing that land management affects water footprints through soil quality effects. The analysis of biophysical characteristics of the sites in relation to water and energy use suggests that crops and management systems similar to CRP grasslands may provide a potential strategy to grow biofuels that would minimize environmental degradation while improving the productivity of marginal lands.

Keywords: Eddy covariance flux, land capability, land marginality index, land use suitability, net primary productivity, soil erodibility, soil quality index

Received 9 July 2010; revised version received 25 September 2010 and accepted 29 September 2010

Introduction

Recently, marginal lands have been proposed as viable areas for growing biofuels using mixed prairie grasses (Tilman *et al.*, 2006), switchgrass (*Panicum virgatum*), Miscanthus (*Miscanthus giganteus*), and various other plant species that may be more tolerant of adverse conditions than conventional food crops. While production of biofuels, in general, has been questioned on

ecological (e.g. Chapin *et al.*, 2000; Searchinger *et al.*, 2008) as well as socioeconomic grounds (e.g. Pimentel & Patzek, 2005), there is general consensus that the ecological footprints of biofuels depend on the type of feedstock and the type of land. For example, Robertson *et al.* (2008, 2010) suggested that growing cellulosic biofuels on degraded lands or environmentally vulnerable crop lands could increase carbon sequestration and improve water quality. Searchinger *et al.* (2008) suggested that cellulosic biofuels would increase greenhouse gas emissions by 50% if grown on US corn lands, while Fargione *et al.* (2008) noted that growing them on degraded and abandoned lands might incur little or no carbon debt.

Correspondence: A. K. Bhardwaj, W.K. Kellogg Biological Station, 3700 E. Gull Lake Drive, Hickory Corners, MI 49060, USA, tel. +1 269 753 5350, fax +1 269 671 2104, e-mail: ajay@msu.edu

Marginal lands are considered unfit for prime agricultural use because of poor land quality characteristics (United Nations Statistical Division (UNSD), 1997). Although the concept of marginality encompasses biophysical and social dimensions, it commonly focuses on bio-physical aspects with the assumption that socio-economic marginality originates from bio-physical limitations. And while there is no single best indicator of land quality, a number of indicators have been used earlier such as soil productivity (or suitability) for crop growth, land capability classification (Hardie & Parks, 1997), and specific soil characteristics such as water-holding capacity (Lichtenberg, 1989; Wu and Brorsen, 1995).

Land quality primarily determines the allocation of land to agricultural use. For example, in the United States, lands enrolled in the Conservation Reserve Program (CRP) are typically of lower quality (either lower productivity or at higher risk of environmental degradation) compared with other lands in the same geographic area (Lubowski *et al.*, 2006). CRP is a cost-share and land rental program in the United States that converts highly erodible or otherwise environmentally sensitive crop land to noncrop vegetation.

Land quality is also not an absolute function but must be assessed in relation to the specific land use that one has in mind (Sombroek, 1997). Various land qualities in relation to crop growth, animal production, forest productivity, and input management levels are provided in a framework of land evaluation by FAO (1976). Among these, land qualities for crop productivity include characteristics such as moisture and nutrient availability, resistance to soil erosion, and soil workability for farming operations. Similarly, soil quality, which is a component of land quality, is defined in terms of the capacity of a soil to perform specific functions in relation to human needs or purposes, including maintaining environmental quality and sustaining plant and animal production (Lal, 1998).

Soil quality derives from a variety of particular physical, chemical, and biological properties that support crop growth (Mausbach & Seybold, 1998). Some properties are characterized by optimum levels, and deviation from these optima is associated with reduced soil quality. In addition to soil properties, other characteristics also play a critical role in determining land quality, including aspects of terrain and climate. On any particular parcel of land, some properties of soil and other resources may limit land quality while others do not. Two soil-based measures that are commonly used in the United States to assess the quality of land for agricultural purposes are the Land Capability Classification (USDA, 1973) and USDA's 'prime farmland' designation (Magleby, 2002). The Land Capability Classification system ranks land according to its suitability for crop production based on soil criteria, such as

depth and fertility, climate, wetness, and susceptibility to erosion (Heimlich, 1989), and the prime farm land has the best physical and chemical characteristics for crop growth including an adequate and dependable water supply.

In addition to land quality, policy has a large effect on the land use decisions and the resulting consequences for ecosystem goods and services (Robertson & Swinton, 2005). Land quality and land use have a direct relationship with environmental characteristics and processes, including the productivity of the land, species diversity, biogeochemistry, and the hydrologic cycle. If policies are not carefully designed and implemented, a particular land use may yield minimal gain in the ecosystem services of interest and may even diminish production of other services (Daily & Matson, 2008; Nelson *et al.*, 2008). For example, the type of land and the intensity of its use can have substantial impact on both the quantity and quality of water in a region. Together with nutrient cycling, water regulation and supply have been rated as some of the most valuable ecosystem services (Swinton *et al.*, 2007) with average global value as high as US\$ 2800 ha⁻¹ yr⁻¹ (Costanza *et al.*, 1997). Managing water on a watershed basis helps to address potential impacts of land use change including soil erosion and salinization due to poor land use practices, water flow and storage that may prevent or ameliorate floods and droughts, deterioration of water resources due to increased input of pollutants, and decline in water resources due to excessive use. The relationships between land use and water quality and quantity are also bidirectional. Land management activities have direct impacts on water resources, while water quality and quantity may also influence the selection of land use activities.

To maintain or enhance the ecosystem services associated with marginal lands, it is important to assess the environmental and economic viability of potential land use choices. Such an assessment would help maximize the ecosystem services with economic returns by removing the bottlenecks and developing better management strategies. The aim of the work presented here is to assess land marginality and soil quality impacts on water and energy footprints of soybean production for biodiesel on some newly converted marginal lands in southwest Michigan, and to evaluate the implications of this interaction for better management of land and water resources to maximize ecosystem services.

Materials and methods

Experimental approach

To assess land quality and management effects on the water and energy footprints of bioenergy crop production,

large-scale biofuel production experiments were started by converting two types of land uses (CRP grasslands and active agricultural lands) into soybean production for bioenergy. Over a 1 year period of land conversion and soybean production we measured the water and energy exchange, and its relation to land and soil quality characteristics.

Study site and layout

Our study sites were located in southwest Michigan, and constituted seven experimental units of 9–21 ha size

(Fig. 1). The data used for this study are from 2009 when all the sites except a reference no-management site were planted to no-till soybean. Before 2009, three of the sites (AG-S1, AG-S2, AG-S3) were in a corn–soybean rotation for > 10 years, while the other three (CRP-S1, CRP-S2, CRP-S3) were enrolled in the CRP of the United States Department of Agriculture (USDA) for the past 20 years. A reference site (CRP-REF) was also under CRP for 20 years and remained dominated by Smooth Brome (*Bromus inermis* Leyss) grass. The three sites converted from CRP lands (and CRP-REF) were maintained fol-

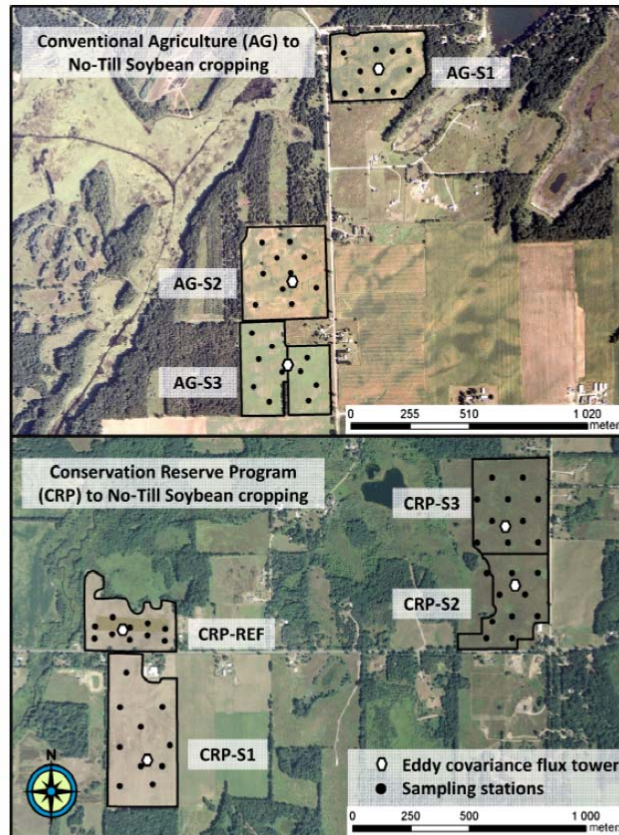


Fig. 1 Experimental layout of the sites and locations of eddy flux towers. AG-S1, -S2, and -S3 were converted from conventional agriculture to no-till soybean; CRP-S1, -S2, and -S3 were converted from Conservation Reserve Program (CRP) to no-till soybean; CRP-REF was the reference site with continued CRP land use.

Table 1 Selected characteristics of the soil map units representing the studied sites

Soil map unit	Soil	Slope (%)	K	Depth of surface soil (inches)	LCC	T	K_s ($\mu\text{m s}^{-1}$)
6C	Boyer loamy sand	6–12	0.17	9	III e	4	57.4
6D	Boyer loamy sand	12–18	0.17	9	IV e	4	57.4
6E	Boyer loamy sand	18–40	0.17	9	VII e	4	57.4
21	Houghton Muck	Flat		14	V e	3	21.7
22B	Kalamazoo loam	6–12	0.32	10	II e	4	9.0
22C	Kalamazoo loam	12–18	0.32	10	III e	4	9.0
22D	Kalamazoo loam	18–40	0.32	10	IV e	4	9.0
31B	Oshtemo sandy loam	0–6	0.24	9	III s	5	28.0
31C	Oshtemo sandy loam	6–12	0.24	9	III e	5	28.0
31D	Oshtemo sandy loam	12–18	0.24	9	IV e	5	28.0
31E	Oshtemo sandy loam	18–40	0.24	9	VII e	5	28.0

LCC, land capability class and sub class; K, soil erosion factor; T, erosion tolerance factor; K_s , saturated hydraulic conductivity (0–50 cm depth).

lowing CRP management criteria in Smooth Brome grass before conversion. Historically, all seven sites were in either row crops or pasture for at least the past 72 years (based on occasional aerial photos) and cultivated every year for the past 40 years (Michigan land use survey maps). Soils at the sites developed on glacial outwash and are Typic Hapludalfs of the Kalamazoo (fine-loamy), Oshtemo (coarse-loamy), and Boyer (loamy sand) series. Climate is temperate with cool, moist winters and warm, humid summers. The area receives approximately 900 mm of annual precipitation, with about half as snow. Average annual temperature is 9.7 °C. Selected characteristics of the SSURGO soil map units representing the sites are summarized in Table 1.

Site preparation and management

In May 2009, before planting soybean, all vegetation on the three converted CRP sites was killed using glyphosate (N-phosphonomethyl, Syngenta, Greensboro, NC, USA) with a nonionic surfactant (0.35 L ha^{-1}) and ammonium sulfate (1.5 kg ha^{-1}) for effectiveness. Herbicide was applied using a pull type sprayer (Demco Dethmers MFG Company, Boyden, IA, USA) equipped with a monitor sprayer control, SCS 4400 (Raven Manufacturers, Omaha, NE, USA). Soybean cultivar 92M91 with genetically engineered Glyphosate resistance was planted on day of year (DOY) 160 (CRP-S1, CRP-S2, CRP-S3) and 161–162 (AG-S1, AG-S2, AG-S3) using a no-till planter.

Eddy-covariance measurement of evapotranspiration (ET)

The turbulent exchange of CO_2 and H_2O between the vegetation canopy and atmosphere was measured

using eddy-covariance flux methods (Lee *et al.*, 2004). A 3-m high tower was located close to the center of each site. The footprint of each eddy covariance tower extended about 150–200 m radius in the upwind direction around the tower. The eddy-covariance system on each tower consisted of a LI-7500 open-path infrared gas analyzer (IRGA) (Li-Cor Biosciences, Lincoln, NE, USA), a CSAT3 three-dimensional sonic anemometer (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA), and a CR5000 data logger (Campbell Scientific Inc.). The LI-7500 was calibrated every 4 months using zero-grade nitrogen gas. A LI-610 dew-point generator (Li-Cor Biosciences) and (Scott Marrin Inc., Riverside, CA, USA) CO_2 standards were used for setting H_2O and CO_2 spans, respectively.

The 30-min mean flux of latent heat was computed as the covariance of vertical wind speed and water concentration, after correcting sonic temperatures for humidity and pressure (Schotanus *et al.*, 1983). The coordinate system was corrected using the formulation of Leuning (2004) in the planar fit coordinate system (Wilczak *et al.*, 2001), which was defined from the entire year's mean wind data using the EC-processor (<http://research.eeescience.utoledo.edu/lees/ECP/ECP.html>; Noormets *et al.*, 2008). Data quality was assessed using stationarity and stability criteria (Foken & Wichura, 1996). Thirty minute averages of latent heat was summed to a daily value after discarding latent heat fluxes > 800 and $< -250 \text{ W m}^{-2}$. Daily evapotranspiration (ET) in mm day^{-1} was derived by dividing the latent heat by the water vaporization constant.

The gross primary productivity (GPP) was determined by subtracting ecosystem respiration (R_e) from net ecosystem exchange (NEE). Daytime R_e were obtained from the nocturnal NEE-temperature rela-

tionship using the partitioning method described in Reichstein *et al.* (2005), which is a standardized flux partitioning technique used by the AmeriFlux and FLUXNET networks.

Soil water content on each of these sites was monitored using an *in situ* time domain reflectometry (TDR) sensor close to the eddy covariance tower. The TDR water sensor was installed vertically from the surface and was 30 cm long. The sensor determined soil water content every 30 min.

Soil sampling and analysis

Soil cores (1-m depth) were collected at 10 geo-referenced stations at each site before soybean planting using a hydraulic corer (Geoprobe Systems, Salina, KS, USA). The cores were divided into different depths (0–0.1, 0.1–0.25, 0.25–0.50, 0.50–1.0 m) and analyzed for various physical and chemical characteristics. The data for the 0–0.25 m layer were used for soil quality evaluation. In total, we collected 70 samples from seven experimental sites.

We used 12 soil characteristics important to crop production for development of a soil quality index (SQI). Bulk density (BD) (1) and soil texture (2) were measured by the core methods (Blake & Hartge, 1986) and Bouyoucos hydrometer method (Gee & Bauder, 1986), respectively. Soil aggregate stability (3) (soil stability ratio; SSR) was determined using the high energy moisture characteristics (HEMC) method (Collis-George & Figueroa, 1984; Pierson & Mulla, 1989; Levy & Miller, 1997; Levy & Mamedov, 2002). In the HEMC method, aggregates are wetted either slowly (20 mm h^{-1}) or rapidly (100 mm h^{-1}), and moisture characteristic curves at high energies (i.e., up to 500 mm H_2O tension) are measured. Details of this method are provided in Bhardwaj *et al.* (2007). Total soil carbon (4) and nitrogen (5) were determined by dry combustion of dried, ground soil samples using an automatic CN analyzer (Costech Analytical Technologies Inc., Valencia, CA, USA). Other chemical properties including pH (6), cation exchange capacity (CEC) (7), available Phosphorus (P) (8), exchangeable Potassium (K^+) (9), Calcium (Ca^{2+}) (10), and Magnesium (Mg^{2+}) (11), were analyzed at Michigan State University's Soil Testing Laboratory. Determination of P was by extraction using Bray-Kurtz P1 (weak acid) solution, while K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} were extracted using 1.0N neutral ammonium acetate. P concentrations were determined by colorimetry with a spectrophotometer (Olsen *et al.*, 1954), and K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} were determined by inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy. Soil pH and electrical conductivity (EC) (12) were measured in a 1:1 soil-to-water suspension with a pH and EC meter, respectively.

Soil quality assessment

The first step followed in the soil quality assessment and development of SQI is to define the primary soil function, which in this case is crop productivity, and then to select a minimum dataset (MDS) to represent this function. We used 12 soil parameters for development of the MDS. The data were reduced to MDS through a series of uni- and multivariate statistical methods. Nonparametric statistics (Kruskal–Wallis χ^2) were used to identify indicators with significant differences among sites. Only variables with significant differences among sites ($P < 0.05$) were chosen for the next step in MDS formation. A standardized principal components analysis (PCA) was performed for each statistically significant variable (Andrews & Carroll, 2001; Andrews *et al.*, 2002). Principal components (PCs) are linear combinations of variables that account for maximum variance for a data set; PCs receiving high Eigen values and variables with high factor loading best represent system attributes. Therefore, we examined only PCs with Eigen values ≥ 1.0 (Brejda *et al.*, 2000). Within each PC only highly weighted factors (i.e., those with absolute values within 10% of the highest weight) were retained for the MDS. To reduce redundancy and to rule out spurious groupings among the highly weighted variables within PCs, Pearson's correlation coefficients were used to determine the strength of the relationships among variables.

After determining the variables for the MDS, every observation of each MDS indicator was transformed for inclusion in the SQI. A linear scoring technique was followed because of its simplicity of design and because it relies on the observed knowledge of the system (Liebig *et al.*, 2001). Indicators were ranked in the ascending or descending order depending on whether a higher value was considered 'beneficial' or 'detrimental' to primary soil function. For 'higher is better' indicators such as C, each observation was divided by the highest observed value such that the highest observed value received a score of 1. For 'lower is better' indicators, such as BD, the lowest observed value (in the numerator) was divided by each observation (in the denominator) such that the lowest observed value received a score of 1. For those indicators, such as pH, where 'neither higher is better nor lower is better', observations were scored as 'higher is better' up to a threshold value and then scored as 'lower is better' above the threshold value (Liebig *et al.*, 2001).

Once transformed, the MDS variables for each observation were weighted using the PCA results. Each PC explained a certain amount (%) of the variation in the total data set. This percentage, divided by the total percentage of variation explained by all PCs with

eigenvectors >1.0 , provided the weighted factor for variables chosen under a given PC. The SQI was determined as:

$$SQI = \sum_{i=1}^n (W_i \times S_i), \quad (1)$$

where W is the PC weighting factor and S is the indicator score for variable i . In the model, higher index scores indicate better soil quality or greater performance of soil function.

Land marginality assessment

Land marginality was assessed by combining five dominant factors in land quality assessment from the standpoints of crop production as well as environmental quality. These factors were land capability class, soil erodibility, slope, hydraulic conductivity and soil tolerance. These constituted five primary land quality characteristics which determine how marginal a land area is for crop/biomass production, in regard to biophysical characteristics. These land characteristics were extracted from Soil Survey Geographic (SSURGO) database for Barry County, Michigan (Soil Survey Staff, 1990). These five characteristics were combined into a land marginality index (LMI) as follows:

$$LMI = \frac{(\text{Land capability factor}) + (\text{site slope factor}) + (\text{soil erodibility factor})}{(\text{Profile conductivity factor}) + (\text{soil tolerance factor})}. \quad (2)$$

The land capability factor (LCF) was calculated as:

$$LCF = \sum_{i=1}^n (C_i A_i), \quad (3)$$

where C is land capability class number for a soil map unit i and A is the area of the site under the soil map unit i .

The site slope factor (SSF) for the sites was calculated as:

$$SSF = \sum_{i=1}^n (S_i A_i), \quad (4)$$

where S is the average slope for a soil map unit i , and A is the area of the site under the soil map unit i .

The soil erodibility factor (SEF) for the sites was calculated as:

$$SEF = \sum_{i=1}^n (K_i A_i), \quad (5)$$

where K is the soil erosion factor for a soil map unit i , and A is the area of the site under the soil map unit i . Soil erosion is one of the most important factors that affects productivity by reducing infiltration, water holding capa-

city, soil biota and even soil depth (Pimentel *et al.*, 1995). The soil erosion factor indicates the susceptibility of a soil to sheet and rill erosion by water. It is one of six factors used in the universal soil loss equation (USLE) and the revised universal soil loss equation (RUSLE) to predict the average annual rate of soil loss by sheet and rill erosion (Renard *et al.*, 1991). Values of K range from 0.02 to 0.69. Other factors being equal, the higher the value for K , the more susceptible the soil is to sheet and rill erosion by water (<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/>).

The profile conductivity factor (PCF) for the sites was calculated as:

$$PCF = \sum_{i=1}^n (K_{si} A_i), \quad (6)$$

where K_s is the representative saturated hydraulic conductivity for a soil map unit i , and A is the area of the site under the soil map unit i .

The soil tolerance factor (STF) for the sites was calculated as:

$$STF = \sum_{i=1}^n (T_i A_i), \quad (7)$$

where T is the erosion tolerance factor for the soil map unit i , and A is the area of the site under the soil map unit i . The erosion tolerance factor T is an estimate of the

maximum average annual rate of soil erosion by wind and/or water that can occur without affecting crop productivity over a sustained period (Renard *et al.*, 1991). The rate is in tons per acre per year.

Finally, for inclusion in the LMI, each of these factors was normalized to the highest observed value at our study sites by dividing each observation by the highest observed value.

Net primary productivity and crop yields

Aboveground net primary production (ANPP) was estimated as the annual maximum plant biomass accumulation. Plant biomass was measured by quantifying the peak dry mass of plants per unit area in each treatment in late September. We sampled by clipping plants within a 1 m² area at 10 geo-referenced sampling stations at each site. The crop plants were further separated into grain and stover. The biomass was dried at 60 °C for at least 48 h and weighed. The peak grain plus stover biomass was used for footprint calculations. Crop yields were also determined by harvesting

soybeans on each site using a JD 9410 combine with a global positioning system (John Deere Inc., Moline, IL, USA). This area-weighted grain yield was used for determining the harvestable yield potential of the sites.

Water and energy footprints

Water and energy footprints of the soybean production for biofuels were calculated as follows. Water footprint is the volume of water used to produce a product, in our case either grain or total biomass (ANPP).

$$\text{Water footprint (grain)} = \frac{\text{Crop water use (m}^3\text{)}}{\text{Grain yield (Mg)}}, \quad (8)$$

$$\text{Water footprint (ANPP)} = \frac{\text{Crop water use (m}^3\text{)}}{\text{ANPP (Mg)}}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Water footprint (energy)} \\ = \frac{\text{Crop water use (m}^3\text{)}}{\text{Biodiesel energy produced (GJ)}}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Water use efficiency (grain)} \\ = \frac{\text{Grain yield (kg)}}{\text{Crop water use (m}^3\text{)}}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Water use efficiency (net photosynthesis)} \\ = \frac{\text{Gross primary productivity (kg)}}{\text{Crop water use (m}^3\text{)}}, \end{aligned} \quad (12)$$

where crop water use was determined from the total ET as estimated using eddy covariance fluxes.

The energy indices were computed as:

$$\text{Energy efficiency} = \frac{\text{Total energy output (kW h-out)}}{\text{Total energy input (kW h-in)}}, \quad (13)$$

$$\text{Energy productivity} = \frac{\text{Grain yield (kg)}}{\text{Total energy input (kW h)}}, \quad (14)$$

$$\text{Specific energy} = \frac{\text{Total energy input (kW h)}}{\text{Grain yield (kg)}}. \quad (15)$$

Total energy input included the use of fertilizer, seed, pesticide, and diesel for all operations. The total energy output included biodiesel energy produced. The total energy output was calculated from biodiesel yield from each site using bioenergy conversion factors recommended by the Oak Ridge National Laboratory (ORNL)

and available at: http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/energy_conv.html (accessed 21 April 2010).

Statistical analysis

The selection of MDS and the PCA for SQI development was performed using SPSS (1998). Yield and productivity were analyzed statistically using SAS Institute. (2004). All parameters were tested using a one-way analysis of variance (ANOVA) and separation of means was subjected to Tukey's honestly significant difference test (Steel & Torrie, 1960). Correlation analysis was conducted to identify relationships between the measured parameters. All tests were performed at the 0.05 significance level.

Results

During the period of this study the annual average air temperature was 8.5 °C and the precipitation was 920 mm, which tends to be evenly distributed throughout the year. The maximum daily photosynthetically active radiation was recorded during the summer season between 11:00 and 14:00 h, with an average value of 800 $\mu\text{moles m}^{-2}\text{s}^{-1}$. The meteorology of this period represented an average year.

SQI

There were significant differences in the soil physical and chemical properties of the studied sites (Table 2). On average, BD was 0.1–0.3 Mg m^{-3} higher at historically agricultural sites (AG) compared with sites which had been enrolled in the CRP. There were significant differences in soil pH among the sites. The SSR, an indicator of aggregate stability, was also higher in CRP compared with AG. CRP lands also were higher in available P, exchangeable K^+ , total carbon (C) and total nitrogen (N). Ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3^+\text{-N}$) contents were more than double in the CRP compared with AG. On the other hand, Ca^{2+} and Magnesium Mg^{2+} contents were higher in AG, possibly due to practice of adding lime which is prevalent in the region on agricultural lands and was also practiced on these AG.

The nonparametric test of soil properties of the sites revealed that out of 12 soil variables, 11 variables were significantly different among the sites at $P < 0.01$ (Table 2). For SQI development these 11 variables were selected for PCA. In the PCA of 11 variables, three PCs had Eigen values > 1 and explained 77% of the variance in the data (Table 3). Highly weighted variables (those within absolute 10% of the highest weight of factor loading in each PC) under PC1 included C, N, and

Table 2 Soil physical and chemical properties that were used for the minimum data set (MDS) selection process for the soil quality index (SQI) development

Treatment*	BD	SSR	pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	C	N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
AG-S1	1.55 ^{bc†}	0.54 ^{bcd}	6.04 ^{abc}	29.0 ^e	72.7 ^b	1.14 ^a	127.5 ^b	14.20 ^c	1.32 ^d	0.13 ^b	0.07 ^a
AG-S2	1.73 ^a	0.50 ^d	6.14 ^{abc}	35.2 ^{de}	95.7 ^b	1.22 ^a	179.7 ^a	13.70 ^c	1.34 ^d	0.11 ^b	0.05 ^a
AG-S3	1.61 ^{ab}	0.53 ^{cd}	5.80 ^{bc}	27.5 ^e	71.9 ^b	1.13 ^a	190.1 ^a	16.38 ^{bc}	1.62 ^{cd}	0.15 ^b	0.05 ^a
CRP-S1	1.41 ^{cd}	0.83 ^a	5.80 ^{abc}	85.0 ^{ab}	170.1 ^a	0.94 ^{ab}	69.4 ^c	30.94 ^a	2.79 ^a	0.64 ^a	0.10 ^a
CRP-S2	1.34 ^d	0.70 ^{abc}	6.28 ^a	56.5 ^{cd}	92.3 ^b	0.93 ^{ab}	57.8 ^c	26.39 ^a	2.27 ^{abc}	0.58 ^a	0.08 ^a
CRP-S3	1.42 ^{cd}	0.72 ^{ab}	5.72 ^c	63.4 ^{bc}	110.1 ^b	0.80 ^b	85.7 ^c	23.75 ^{ab}	2.02 ^{bcd}	0.50 ^a	0.10 ^a
CRP-REF	1.41 ^{cd}	0.65 ^{abcd}	6.15 ^{ab}	87.2 ^a	181.7 ^a	1.10 ^{ab}	89.4 ^{bc}	30.59 ^a	2.69 ^{ab}	0.50 ^a	0.09 ^a
P < α _‡	<0.0001	0.0013	0.0020	<0.0001	<0.0001	0.0002	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0012

*AG-S1, -S2, -S3, no-till agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

†For a soil property, treatments followed by same letters are not significantly different at $P < 0.01$.

‡α Level of significance of Kruskal–Wallis test.

BD, bulk density (Mg m^{-3}); SSR, soil stability ratio; P, available phosphorus (kg ha^{-1}); K⁺, exchangeable potassium (kg ha^{-1}); Ca²⁺, calcium (Mg ha^{-1}); Mg²⁺, magnesium (kg ha^{-1}); C, soil carbon (g kg^{-1}); N, soil nitrogen (g kg^{-1}); NH₄⁺-N, ammonium nitrogen (mg kg^{-1}); NO₃⁻-N, nitrate nitrogen (mg kg^{-1}).

Table 3 Results of principal components (PC) analysis of statistically significant soil quality indicators

Statistical parameter	PC1	PC2	PC3
Eigen value	5.80	1.546	1.14
% of variance	52.74	14.05	10.36
Cumulative percent	52.74	66.79	77.16
Soil parameter*	Factor loading/Eigen Vector		
SSR	0.663	-0.408	-0.048
pH	-0.027	0.176	0.890†
BD	-0.643	0.364	-0.108
C	0.869†	-0.277	-0.032
N	0.897†	-0.201	-0.055
P	0.776	-0.395	0.250
K ⁺	0.866†	0.230	-0.091
Ca	-0.073	0.951†	0.156
Mg	-0.380	0.786	0.002
NH ₄ ⁺ -N	0.733	-0.559	0.170
NO ₃ ⁻ -N	0.235	-0.514	0.539

*SSR, soil stability ratio; BD, bulk density (Mg m^{-3}); C, soil carbon (g kg^{-1}); N, soil nitrogen (g kg^{-1}); P, available phosphorus (kg ha^{-1}); K⁺, exchangeable potassium (kg ha^{-1}); Ca²⁺, calcium (kg ha^{-1}); Mg²⁺, magnesium (kg ha^{-1}); NH₄⁺-N, ammonium nitrogen (mg kg^{-1}); NO₃⁻-N, nitrate nitrogen (mg kg^{-1}).

†Factor loadings are considered highly weighted when within 10% of variation of the absolute values of the highest factor loading in each PC.

K⁺. Pearson's correlation coefficients for the highly weighted variables under different PCs were determined separately to reduce the redundancy among the variables. Ca²⁺ and pH showed highest weighted values in PC2 and PC3, respectively. The final MDS thus

included C, N, K⁺, Ca²⁺ and pH, indicating that the most significant differences in the soils of the sites were in their C content and nutrient availability.

These five variables were selected for developing the SQI. The selected MDS variables for each site were transformed using linear scoring functions. Among the selected soil characteristics, C, N, and K⁺ were considered as 'the higher the better'. For pH, neutral (7.0) was considered desirable and therefore it was also taken as 'the higher the better' because all values were <7.0. Therefore, for all of the selected soil properties, the parameter values for all sites were divided by the highest value, such that the site with highest value received a score of 1 and all other values were normalized to it. The coefficient of 'weighting factor' for the variables in PC1 (C, N, K⁺) was 0.684, and it was 0.182 for PC2 (Ca²⁺), and 0.132 for PC3 (pH). The SQI was highest for the CRP-REF and CRP-S1 sites, and all of the CRP sites had higher SQIs than the AG sites (Fig. 2). At all sites the soil available N made the highest contribution to SQI, followed by C and K⁺.

LMI

There were significant differences between historically agricultural (AG-S1, AG-S2, AG-S3) and conservation reserve (CRP-S1, CRP-S2, CRP-S3, CRP-REF) sites in the SEF, SSF, STF and LCF (Fig. 3). The SEF was higher in AG compared with CRP, while SSF was higher in the more topographically variable CRP landscapes. The LCF was highest for AG-S1 and lowest for CRP-REF site. The LMI, which combines these factors, was higher for AG (LMI = 1.3–1.5) compared with CRP sites (LMI = 0.8–1.2) (Fig. 4).

ET and consumptive water use

The cumulative ET during the growing season from soybean emergence to harvest is presented in Fig. 5.

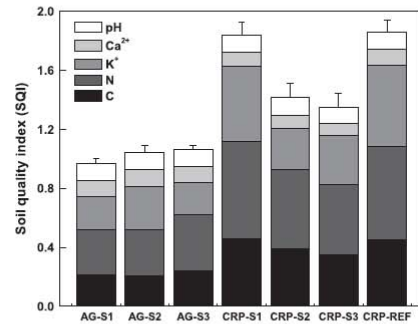


Fig. 2 Soil quality index (SQI) for the sites. Error bars indicate ± 1 SD. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

Prior to emergence of the crop (late May to early June), the ET gradually increased with available solar energy (data not presented). After emergence of crop canopy, ET began increasing rapidly (DOY = 190–260). There was a steady increase in ET for all sites, except AG-S2 and CRP-S2, from first trifoliate (V1) to initial seedling stage (V5). The peak ET ranged from 3 to 6 mm day⁻¹ for the soybean sites compared with CRP-REF where it peaked at ~ 4 mm day⁻¹. The ET values began declining from initial maturity (V6) to full maturity (V8) stage until harvesting at DOY 306.

The total water evapotranspired (crop water use) by the soybean crop varied considerably among the six fields planted in soybeans (Fig. 5). The site AG-S2 had the least consumptive water use followed by CRP-REF and CRP-S2. One of the most probable ways in which land marginality is associated with inferior crop growth and ET is lower soil water availability during the growing season. Measurements of soil water content show that the CRP sites (CRP-S1, CRP-S2 and CRP-S3) maintained higher soil water content than AG sites (AG-S1, AG-S2 and AG-S3) until the middle of the growing season (Fig. 6). On the other hand close to maturity the AG sites maintained higher soil water compared with CRP, until the end of the year. Main-

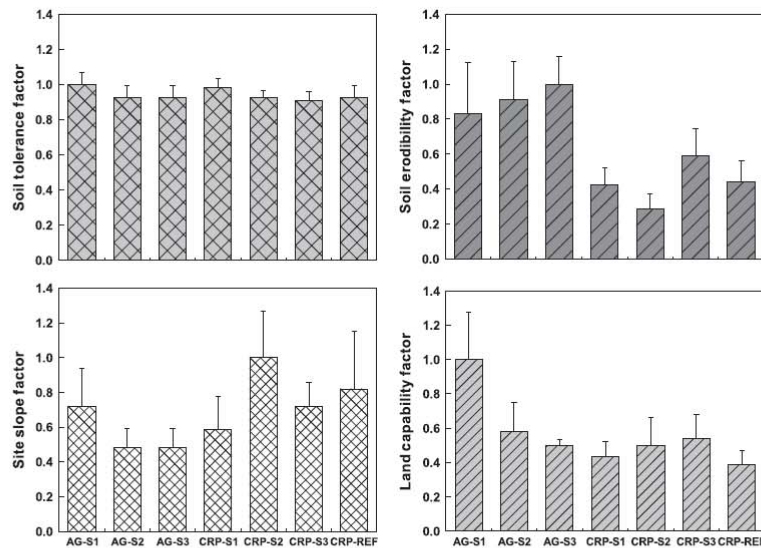


Fig. 3 Selected factors included in the land marginality index (LMI) developed for the sites. Error bars indicate ± 1 SD for soil map unit on a site. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

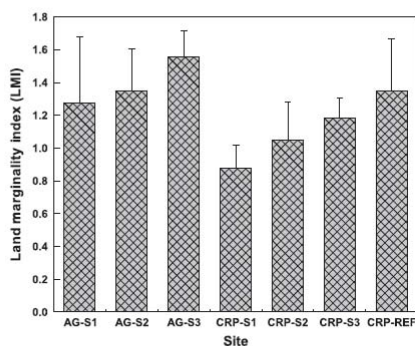


Fig. 4 Land Marginality Index (LMI) for the sites. Error bars indicate ± 1 SD for soil map unit on a site. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

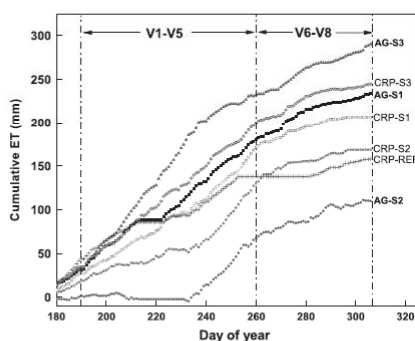


Fig. 5 Changes in cumulative evapotranspiration (ET) of soybeans over the growing period on the sites. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use. V1 = first trifoliate stage, V5 = initial seedling stage, V6 = initial maturity stage, V8 = full maturity stage.

taining higher soil water indicates suitable conditions for crop growth and less effect of drought periods on crop growth and productivity. Since there was only one soil water sensor per site, close to the flux tower, it serves only as a very general indication of land and soil quality effects.

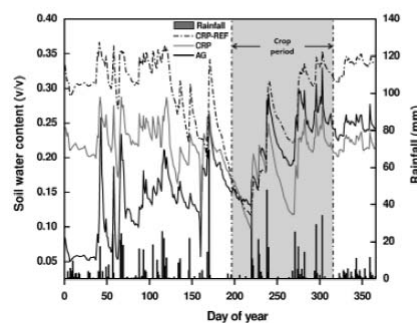


Fig. 6 Average daily soil water content for the sites based on samples taken from 0 to 0.25 m. AG-S, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

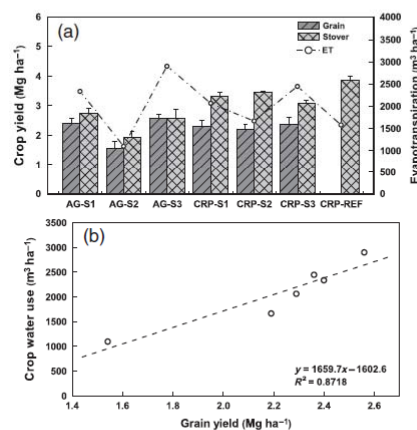


Fig. 7 Total crop water use and soybean biomass yields from the sites. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

Yield and productivity

The soybean ANPP was closely related to the crop water use (Fig. 7). Site AG-S3 had the highest grain yield followed by AG-S1 and CRP-S3. Site AG-S2 had the least grain yield as well as crop water use. Similar trends were not evident in the stover yield. The CRP sites (CRP-S1, -S2, -S3) had comparatively higher stover

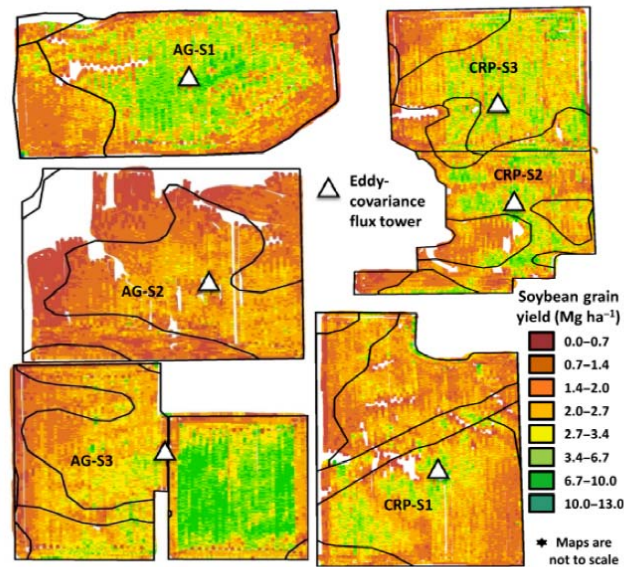


Fig. 8 Harvested soybean grain yield maps of the sites showing spatial variability of productivity. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use. The contoured lines within a site indicate the boundaries of SSURGO soil map units.

yields than the AG sites. The actual harvesting patterns and spatial distribution of grain yield on the sites provided a better indication of how marginality characteristics (land capability class, slope, soil erodibility, erosion tolerance and hydraulic conductivity) interacted with grain productivity (Fig. 8). For example, site AG-S1 had higher LMI than AG-S2, but the productivity on AG-S2 was very low compared with AG-S1. The AG-S2 site was largely affected by sheet and rill (turning into gullies) erosion which was well indicated by the site's erodibility and tolerance factors.

The three way analysis of the interactions of the LMI and SQI with ANPP indicated a direct relationship between ANPP and SQI, and an inverse relationship between ANPP and LMI (Fig. 9). To a lesser extent the relationship was also affected by the management history of the sites. The CRP sites had higher ANPP than the AG sites which was also indicative of the former's higher soil quality (Figs 2 and 4).

Water and energy footprints

The water footprints of the soybean crops were related directly with LMI and indirectly with SQI. As LMI

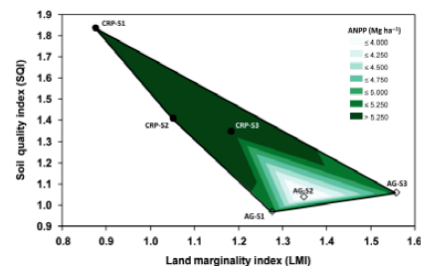


Fig. 9 Contour map of the interactions between aboveground net primary productivity (ANPP), soil quality index (SQI) and land marginality index (LMI). AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

increased the water footprint (of total biomass production) increased, while the footprints decreased with increased soil quality (Fig. 10). The water footprint also changed based on whether grain production (for bio-

diesel) or total biomass was considered as the end product. There were combined effects of LMI and SQI on the water use efficiency and energy efficiency (Table 4). Water use efficiencies based on net photosynthesis, grain yield and total biomass were highest in CRP-S2 and AG-S2 and lowest in AG-S3. There was very close agreement between the water use efficiency based on total biomass produced and the one

based on the GPP determined using eddy-covariance measurements.

The AG sites had larger water footprints compared with CRP sites considering crop water use per unit ANPP. The site CRP-S3 had the largest water footprint per unit energy output (from biodiesel; $172.3 \text{ m}^3 \text{GJ}^{-1}$) among CRP sites, and AG-S3 had largest ($157.6 \text{ m}^3 \text{GJ}^{-1}$) among AG sites (Table 4). The energy efficiency of all the sites for biofuel production was very low. The only site with energy efficiency higher than one (i.e., net positive energy yield) was AG-S3. The main reason for energy efficiency lower than one during the first year of conversion was because of the use of a large quantity of herbicide on these sites. This initial high-energy input will not be present in subsequent years (Table 4). Although there were no significant interactions between the energy productivity, and land and soil quality, in general the energy productivity of the CRP sites was lower than the AG sites, perhaps due to the same reason (Table 4).

Discussion

We found significant interactions between land quality indices (SQI and LMI) and water as well as energy footprints on the studied sites. The land under CRP had significantly higher land quality in terms of both soil physical (BD, SSR) and chemical (C, N, K^+) characteristics. Water and energy footprints, in general, increased with marginality characteristics. The total biomass produced (ANPP) and grain yield decreased with decreased land quality. Although the extent (but not direction) may vary regionally, marginal lands used to grow biofuels are likely to have bigger water and energy footprints (Fig. 10).

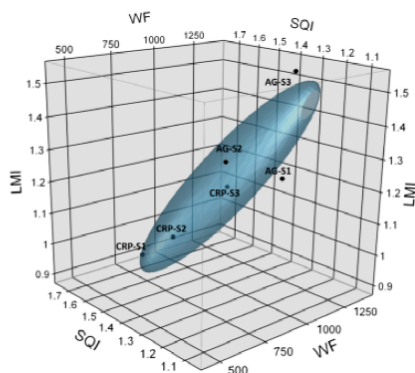


Fig. 10 Interrelationships of water footprints (WF; $\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$) with the soil quality index (SQI) and Land Marginality Index (LMI) on the studied sites. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

Table 4 Water and energy footprints of soybean crops on the study sites

Treatment*	Water use efficiency (net photosynthesis) (kg m^{-3})	Water use efficiency (grain; biomass) (kg m^{-3})	Water footprint (grain) ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$)	Water footprint (biomass) ($\text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$)	Water footprint (energy) ($\text{m}^3 \text{GJ}^{-1}$)†	Energy efficiency (kW h-out/ kW h-in)	Energy productivity (kg kW h^{-1})	Specific energy (kW h kg^{-1})
AG-S1	2.44	1.03 (2.20)	974	454	148	0.61 (8.97)	0.33 (4.91)	2.99 (0.20)
AG-S2	2.55	1.40 (3.15)	715	317	108	0.49 (6.41)	0.27 (3.51)	3.74 (0.29)
AG-S3	2.23	0.88 (1.76)	1134	567	172	1.29 (12.76)	0.71 (6.98)	1.42 (0.14)
CRP-S1	2.46	1.11 (2.72)	902	368	137	0.51 (9.19)	0.28 (5.02)	3.58 (0.20)
CRP-S2	2.60	1.31 (3.37)	761	297	116	0.36 (7.63)	0.20 (4.17)	5.08 (0.24)
CRP-S3	2.04	0.96 (2.44)	1037	452	158	0.57 (9.71)	0.31 (5.31)	3.20 (0.19)

Figures in parenthesis is the scenario calculated without use of herbicide, which was used in the first year to kill weeds/grasses on the site for planting of soybeans.

*AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

†Energy from biodiesel yield from soybeans.

Water and energy footprint assessment for marginal lands

Assessment of land quality and its effects on water and energy footprints helps identify the limitations of a land and its management implications. Although the total cropland acreage in United States has remained roughly constant for last 100 years, the less productive 'marginal' cropland has shifted in and out over time (Lubowski *et al.*, 2006). Production costs and economic returns are the likely drivers inducing farmers to shift marginal lands in and out of production. Less productive cropland is often more environmentally sensitive than protected land (Wiebe, 2003). Therefore, land use change to grow biofuel crops on marginal fallow or less productive agricultural lands may have undesirable environmental as well as economic consequences without proper consideration of the capabilities and limitations of the land.

Use of multivariate approaches to group and transform data, and incorporation of the appropriate metrics into the soil quality (SQI) and land marginality (LMI) indices, helped us interpret complex land quality characteristics. The SQI approach not only helped identify factors sensitive to management but also the interrelatedness of those factors. Among the numerous variables considered important from crop production as well as environmental standpoints, selection of the most significant ones based on total variance in the data, and their integration into a single index (LMI), helped interpret changes in production potential of the soils of these lands under different land use histories and degrees of marginality. This potential in turn indicated long-term effects (ca. 20 years in CRP vs. row crop production) on the environmental sustainability of land management practices. Assessment of soil quality using a single index (SQI) also helped to identify potential tradeoffs in soil conditions that might result from management choices, as well as to identify improved management practices with enhanced environmental benefits. For example, sites which were under CRP for the past several years maintained higher soil quality which was also evident in the aboveground productivity of these sites.

Land marginality relevance to biofuel induced land use change

Marginal lands have been proposed as viable areas for growing biofuels to avoid competition with food production on prime agricultural land; however, it is uncertain whether energy and water footprints of growing biofuels on marginal lands will be the same as on prime farm lands. The energy and water productivity of the marginal lands will determine how

much land will be needed in the vicinity of a bio-refinery to achieve targeted energy outputs. The two most important characteristics of marginal lands, low soil quality for crop production and environmental sensitivity, should figure prominently in debates about environmental sustainability.

Any bioenergy production initiative that will entail major land use change would also have significant environmental effects, although they will vary regionally. Our results demonstrate the benefits that are achieved in the soil quality of lands under CRP, and its direct implications for their productivity. If biofuel production systems with high yielding, nutrient-efficient perennial grasses and minimal management are developed and implemented on marginal lands such as the CRP fields under study here, environmental as well as economic benefits over time are more likely.

The fact that every marginal land is not the same in its susceptibility to degradation or in its economic viability is underrated in most of the regional and global assessments. In our study, the area-weighted harvestable grain yield was found to range from 40% to 100% of the prime agricultural land in the county based on the degree of marginality as well as management (Fig. 8). We deduced from this study that using the marginal land areas for conventional biofuel crop production may offset a significant amount of bioenergy demand in this region. But on marginal lands with low productivity, increasing bioenergy production would either require increasing productivity or increasing land area used for production. Although it is unclear whether more intensive management of these marginal lands for increased productivity is possible by intensified management without environmental impacts; our results indicate a good potential for cellulosic biofuel crop production. The sites which were previously under CRP supported perennial grasses with virtually no management. Therefore, the soils on these sites accumulated organic matter over time and were less exposed to erosion and oxidation processes. In contrast, sites with a recent agricultural history (AG) had been intensively managed and showed visible signs of sheet and rill erosion, to varying degrees. The higher soil quality in sites under CRP land use in past years indicated soil conservation advantages of the program. The fact that these benefits might have been achieved in last 20 years after converting the land from agriculture to CRP strengthens the argument that growing perennial grasses on marginal land can provide economic as well as ecological benefits in terms of enhanced ecosystem services. From the crop production point of view, these changes are not trivial, considering the two most significant constraints for crop production in the region are nutrient leaching losses and poor water holding

capacity, both of which tend to be exacerbated by coarser soil textures.

Conclusions

Landscape scale analysis and use of multivariate approaches to assess land quality complemented each other in developing conceptual understanding of how land use change on marginal lands may affect water and energy footprints. We offer the following conclusions from this study:

1. An indexing framework can be effectively applied to assess the land and soil quality, and is effective in evaluating the potential of marginal lands for biofuel production. It is important to precisely assess this realistic potential as well as its ecological soundness to inform policy as well as to devise management strategies to maximize ecosystem services.

2. The large differences in soil quality between historically agricultural and CRP sites revealed the potential benefits that can be achieved by growing perennial grasses with low input requirements in place of annual crops. The sites historically under CRP had better soil quality in terms of improved soil physical structure, carbon storage, and nutrient availability, strongly suggesting that crops such as high yielding perennial grasses with management systems similar to these may provide a potential strategy to produce bioenergy by improving the productivity as well as ecosystem services.

3. Marginal lands can be viable areas for growing biofuels; however, water and energy footprints of biofuel crops on marginal lands are likely to be higher than on prime farm lands. Decreases in water and energy footprints can be achieved through improvements in soil quality via management and crop choices. Therefore, proper evaluation of capabilities and limitations of the marginal lands and use of region-specific management strategies can make marginal lands an important asset for bioenergy production.

Acknowledgements

Support for this research was provided by the Department of Energy's (DOE) Great Lakes Bioenergy Research Center (GLBRC) (DOE Office of Science, BER DE-FC02-0764494), the NSF Long-Term Ecological Research Program, and the Michigan Agricultural Experiment Station.

References

Andrews SS, Carroll CR (2001) Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. *Ecological Applications*, **11**, 1573–1585.

Andrews SS, Mitchell JP, Mancinelli R *et al.* (2002) On farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agronomy Journal*, **94**, 12–23.

Bhardwaj AK, Goldstein D, Azenkot A, Levy GJ (2007) Irrigation with treated waste water under two different irrigation methods: effects on hydraulic conductivity of a clay soil. *Geoderma*, **140**, 199–206.

Blake GR, Hartge KH (1986) Bulk density. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1 (2nd Edition): Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph 9 (ed Klute A), pp. 364–367. ASA and SSSA, Madison, WI, USA.

Brejda JJ, Moorman TB, Karlen DL, Dao TH (2000) Identification of regional soil quality factors and indicators. I. Central and southern high plains. *Soil Science Society of America Journal*, **64**, 2115–2124.

Chapin FS, Zavaleta ES, Eviner VT *et al.* (2000) Consequences of changing biodiversity. *Nature*, **405**, 234–242.

Collis-George N, Figueroa BS (1984) The use of soil moisture characteristics to assess soil stability. *Australian Journal of Soil Research*, **22**, 349–356.

Costanza R, d'Arge R, Groot RD, Farber S *et al.* (1997) The value of world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**, 253–260.

Daily GC, Matson PA (2008) Ecosystem services: theory to implementation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, **105**, 9455–9456.

FAO (1976) *A Framework of Land Evaluation*. Soil Bulletin 32. Food and Agricultural Organisation, Rome.

Fargione J, Hill J, Tilman D, Polasky S, Hawthorne P (2008) Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, **319**, 1235–1238.

Foken T, Wichura B (1996) Tools for quality assessment of surface based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, **78**, 83–105.

Gee GW, Bauder JW (1986) Particle size analysis. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1 (2nd Edition): Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph 9 (ed Klute A), pp. 404–408. ASA and SSSA, Madison, WI, USA.

Hardie I, Parks P (1997) Land use with heterogeneous land quality: an application of an area base model. *American Journal of Agricultural Economics*, **79**, 299–310.

Heimlich R (1989) *Productivity and erodibility of U.S. cropland*. Agricultural Economics Report, vol. 604, 47 pp. Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, USA.

Lal R (1998) Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **17**, 319–464.

Lee XL, Massman W, Law B (2004) *Handbook of Micrometeorology*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.

Leuning R (2004) Measurements of trace gas fluxes in the atmosphere using eddy covariance. In: *Handbook of Micrometeorology. A Guide to Surface Flux Measurement and Analysis* (eds Lee X, Massman WJ, Law BE), pp. 119–132. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, USA.

Levy GJ, Mamedov AI (2002) Aggregate stability and seal formation. *Soil Science Society of America Journal*, **66**, 1603–1609.

Levy GJ, Miller WP (1997) Aggregate stabilities of some Southeastern U.S. soils. *Soil Science Society of America Journal*, **61**, 1176–1182.

- Lichtenberg E (1989) Land quality, irrigation development, and cropping patterns in the northern high plains. *American Journal of Agricultural Economics*, **71**, 187–194.
- Liebig MA, Varvel G, Doran JW (2001) A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. *Agronomy Journal*, **93**, 313–318.
- Lubowski R, Bucholtz S, Claassen R *et al.* (2006) Environmental effects of agricultural land-use change: the role of economics and policy. *Economic Research Report Number 25*. Economic Research Service, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- Magleby R (2002) Soil management and conservation. *Agricultural Resources and Environmental Indicators. Report No. AH722*, Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- Mausbach MJ, Seybold CA (1998) Assessment of soil quality. In: *Soil Quality and Agricultural Sustainability* (ed. Lal R), pp. 33–43. Ann Arbor Press, Ann Arbor, MI, USA.
- Nelson E, Polasky S, Lewis DJ *et al.* (2008) Efficiency of incentives to jointly increase carbon sequestration and species conservation on a landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, **105**, 9471–9476.
- Noormets A, McNulty S, DeForest D *et al.* (2008) Drought during canopy development has lasting effect on annual carbon balance in a deciduous temperate forest. *New Phytologist*, **179**, 818–828.
- Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS, Dean LA (1954) *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. U.S. Department of Agriculture Circular, 939.
- Pierson FB, Mulla DJ (1989) An improved method for measuring aggregate stability of a weakly aggregated loessial soil. *Soil Science Society of America Journal*, **53**, 1825–1831.
- Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P (1995) Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, **267**, 117–123.
- Pimentel D, Patzek TW (2005) Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Natural Resource Research*, **14**, 65–76.
- Reichstein M, Falge E, Baldocchi D *et al.* (2005) On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, **11**, 1424–1439.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA *et al.* (1991) RUSLE: revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, **46**, 30–33.
- Robertson GP, Hamilton SK, Parton WJ *et al.* (2010) The biogeochemistry of bioenergy landscapes: carbon, nitrogen, and water considerations. *Ecological Applications*, in press.
- Robertson GP, Swinton SM (2005) Reconciling agricultural productivity and environmental integrity: a grand challenge for agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **3**, 38–46.
- Robertson GP, Virginia DH, Otto CD *et al.* (2008) Sustainable biofuels redux. *Science*, **322**, 49–50.
- SAS Institute. (2004) *The SAS System for Windows. Release 9.1*. SAS Institute, Cary, NC, USA.
- Schotanus P, Nieuwstadt FTM, de Bruin HAR (1983) Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary Layer Meteorology*, **26**, 81–93.
- Searchinger TR, Heimlich RA, Houghton F *et al.* (2008) Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, **319**, 1238–1240.
- Soil Survey staff (1990) *Soil survey of Barry County, Michigan*. National Cooperative Soil Survey. United States Department of Agriculture, MI, USA.
- Sombroek WG (1997) Land resources evaluation and the role of land-related indicators. In: *Land Quality Indicators and their use in Sustainable Agriculture and Rural Development*. FAO Land and Water Bulletin-5, pp. 9–17. Food and Agricultural Organization of The United Nations, Rome, Italy.
- SPSS (1998) *SigmaPlot 5.0 Programming Guide*. SPSS, Chicago, IL.
- Steel RGD, Torrie JH (1960) *Principles and Procedures of Statistics*. McGraw, New York.
- Swinton SM, Lupi F, Robertson GP, Hamilton SK (2007) Ecosystem services and agriculture: cultivating agriculture ecosystems for diverse benefits. *Ecological Economics*, **64**, 245–252.
- Tilman D, Hill J, Lehman C (2006) Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science*, **314**, 1598–1600.
- United Nations Statistical Division (UNSD) (1997) Marginal land. *Glossary of Environmental Statistics, Studies in Methods, Series F, No. 67*. United Nations, New York.
- USDA (1973) Land capability classification. *Agricultural Handbook* 210. Available at: <http://soils.usda.gov/technical/handbook/> (accessed 29 March 2010).
- Wiebe K (2003) Linking land quality, agricultural productivity, and food security. *Agricultural Economic Report Number 823*, Economic Research Service, United States Department of Agriculture, Washington DC, USA.
- Wilczak JM, Oncley SP, Stage SA (2001) Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, **99**, 127–150.
- Wu J, Brorsen BW (1995) The impact of government programs and land characteristics on cropping patterns. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, **43**, 87–104.



available at www.sciencedirect.com



journal homepage: www.elsevier.com/locate/agrformet



Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil

A.H. de C. Teixeira^{a,*}, W.G.M. Bastiaanssen^{b,c}, M.S.B. Moura^a,
J.M. Soares^a, M.D. Ahmad^d, M.G. Bos^e

^a Embrapa Semi-Árido, PO Box 23, 56302-970 Petrolina, PE, Brazil

^b WaterWatch, General Foulkesweg 28, 6703 BS Wageningen, The Netherlands

^c Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Stevingweg 1, 2628 CN, Delft, The Netherlands

^d International Water Management Institute, P.O. Box 2075 Colombo, Sri Lanka

^e International Institute for Geo-information and Earth Observation, P.O. Box 6, 7500AA Enschede, The Netherlands

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 March 2007

Received in revised form

5 May 2008

Accepted 7 May 2008

Keywords:

Mango orchard

Energy balance

Water balance

Evapotranspiration

Irrigation performance

Crop water productivity

ABSTRACT

Crop water parameters, including actual evapotranspiration, transpiration, soil evaporation, crop coefficients, evaporative fractions, aerodynamic resistances, surface resistances and percolation fluxes were estimated in a commercial mango orchard during two growing seasons in Northeast Brazil. The actual evapotranspiration (E_a) was obtained by the eddy covariance (EC) technique, while for the reference evapotranspiration (E_0); the FAO Penman–Monteith equation was applied. The energy balance closure showed a gap of 12%. For water productivity analysis the E_a was then computed with the Bowen ratio determined from the eddy covariance fluxes. The mean accumulated E_a for the two seasons was 1419 mm year⁻¹, which corresponded to a daily average rate of 3.7 mm day⁻¹. The mean values of the crop coefficients based on evapotranspiration (K_c) and based on transpiration (K_{cb}) were 0.91 and 0.73, respectively. The single layer K_c was fitted with a degree days function. Twenty percent of evapotranspiration originated from direct soil evaporation. The evaporative fraction was 0.83 on average. The average relative water supply was 1.1, revealing that, in general, irrigation water supply was in good harmony with the crop water requirements. The resulting evapotranspiration deficit was 73–95 mm per season only. The mean aerodynamic resistance (r_a) was 37 s m⁻¹ and the bulk surface resistance (r_s) was 135 s m⁻¹. The mean unit yield was 45 tonne ha⁻¹ being equivalent to a crop water productivity of 3.2 kg m⁻³ when based on E_a with an economic counterpart of US\$ 3.27 m⁻³. The drawback of this highly productive use of water resources is an unavoidable percolation flux of approximately 300 mm per growing season that is detrimental to the downstream environment and water users.

© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Fruit crops in the semi-arid region of the São Francisco River basin in Brazil constitute an important activity for the

livelihoods of rural communities. Mango is important for export markets. Its fruit has the advantage of being juicy and relatively large in size, besides being a rich nutrient source. The global large mango players are India (50%), China (9%),

* Corresponding author. Tel.: +55 87 38621711; fax: +55 87 38621744.

E-mail addresses: heribert@cpatsa.embrapa.br (A.H. de C. Teixeira), W.Bastiaanssen@waterwatch.nl (W.G.M. Bastiaanssen), magna@cpatsa.embrapa.br (M.S.B. Moura), monteiro@cpatsa.embrapa.br (J.M. Soares), A.Mobin@CGIAR.ORG (M.D. Ahmad), bos@itc.nl (M.G. Bos).

0168-1923/\$ – see front matter © 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/j.agrformet.2008.05.004

Mexico (6%), Thailand (5%), Philippines (5%) and Pakistan (4%). Brazil has 2.5% of the world production, and after Mexico is the second largest mango producing country in the Americas.

Mango is a perennial crop with a high leaf area index and a relative deep rooting depth from 100 to 150 cm. The trees basically require a frost-free climate and grow most favourably in warm climates (25–35 °C), in almost any well-drained soil whether sandy, loam or clay. Experience indicates that the water use of fruit crops varies considerably; it is unknown how much variability exists from orchard to orchard. Differences in cultivation practices or the method used in calculating evapotranspiration are of fundamental importance for extrapolation of research results to other regions (Williams and Ayars, 2005).

The relationship between irrigation, evapotranspiration, yield and percolation is essential for applying and maintaining good water management practices. The agro-hydrological processes in a mango orchard are only rarely described in the international literature. Despite the economical and nutritious importance of its fruits, little research has been attributed to the crop water productivity (C_{WP}). The index C_{PW} can have a variety of definitions. The most common are: the fresh fruit productivity in terms of actual evapotranspiration or actual transpiration and in terms of the volume of applied irrigation water (Molden et al., 2003). It can also be expressed in terms of monetary value per unit of water (Bos et al., 2005).

E_a measurements by energy balance techniques in tropical fruits, vineyards and vegetables have been made in grapes (Heilman et al., 1996), mango orchard (Azevedo et al., 2003), garlic (Vilalobos et al., 2004), grapes (Yunusa and Walker, 2004), pecans (Sammis et al., 2004), citrus (Rana et al., 2005), peach (Paço et al., 2006), olives (Testi et al., 2006) and grapes (Teixeira et al., 2007).

Irrigation of mango orchards can be associated with environmental problems. Molle et al. (1999) reported that mango orchards in Thailand are receiving 20 pesticide treatments and 5 fertilizer applications per season. Despite growing attention in irrigated orchards to leaking root zones, in general during the last decades, knowledge on evapotranspiration-percolation relationships is nevertheless limited. Thus the environmental impact of non-consumed irrigation water requires more attention. This paper addresses E_a measurements which, in conjunction with soil moisture storage changes, and rainfall, allow the isolation of percolation fluxes (instead of deriving E_a from percolation estimates, we assess percolation from E_a estimates).

The general objective of this study was to find useful recommendations for a rational and strategic water management in irrigated mango orchards. The specific objectives of this study are

- The evaluation of the performance of the eddy covariance technique for measuring actual evapotranspiration for tropical fruits.
- Assessment of daily and seasonal mango evapotranspiration and related crop water parameters for two complete growing seasons having different rainfall regimes.
- Determination of the field scale water balance for irrigation performance and environmental analysis.

- Quantifying water productivity indicators at field scale that can be used in subsequent up scaling studies.

2. Materials and methods

2.1. Measurement site

This study was carried out from 2003 to 2005, in a mango orchard located in the semi-arid region of the São Francisco River basin, Northeast Brazil. This area in Pernambuco State has a mean total annual precipitation of 570 mm and a corresponding mean pan evaporation of 2700 mm at a mean air temperature of 26.5 °C. The orchard is located in Fruitfort farm, Petrolina, latitude 09°22'S, longitude 40°34'W, Pernambuco state, Brazil. The cv. is *Tommy Atkins*, 18 years old (in 2003), spaced in a regular square pattern at 10 m × 10 m, with an average height of 5.5 m, mean leaf area index (LAI) of 5.6 and daily micro-sprinkler irrigation of an area of 11.92 ha (see Fig. 1 for a location view), with one in-line micro sprinkler between two trees on the ground at a discharge rate of 44 L h⁻¹ which wetted 70% of the soil surface. The irrigation requirements were calculated based on reference evapotranspiration and crop coefficients adapted from published values for citrus, according to different crop stages. The orchard is bordered on all sides by other mango crops with similar height. The sensors were installed at the centre of the plot. There is no cover crop. The sandy soil is classified as Latosol Red-Yellow with low retention capacity. The groundwater depth is approximately 2.5 m, and the farm is located 5.5 km away from the São Francisco River.

A mango growth cycle extends from November to October. The fruit trees undergo vegetative growth between November and January, followed by branch development from January to May. The mango trees in the region flower typically in May to July, with fruit initiation in June and July. Fruit growth occurs in July and August. Fruit maturation typically occurs during August and September. The fruits are then picked during September and October. Healthy trees require little pruning. Besides irrigating the crop with a water depth of approximately 900 mm, farmers spray pesticides on a weekly basis for crop protection. Fertilizers are applied through the micro-sprinkler irrigation system. Mango trees require regular applications of nitrogen fertilizer to promote healthy growth flushes and flower production, and the NPK application depends on soil and leaf analysis. Heck et al. (2003) reported a fertilizer application in the same region of Pernambuco of 2.5 tonne ha⁻¹ of dolomite lime and 20 L per tree of goat manure.

The study comprised two growing seasons. The duration of the first period was 390 days, from 01 October 2003 (Day 274) to 24 October 2004 (Day 298). The measurements continued into a second period of 370 days, elapsing from 25 November 2004 (Day 299) to 29 November 2005 (Day 302).

2.2. Orchard energy balance

During the experiments, all components of the energy balance were acquired by both, the Bowen ratio and eddy covariance methods (Fig. 1), but only eddy covariance measurements were used for the partition of the heat fluxes in this paper.

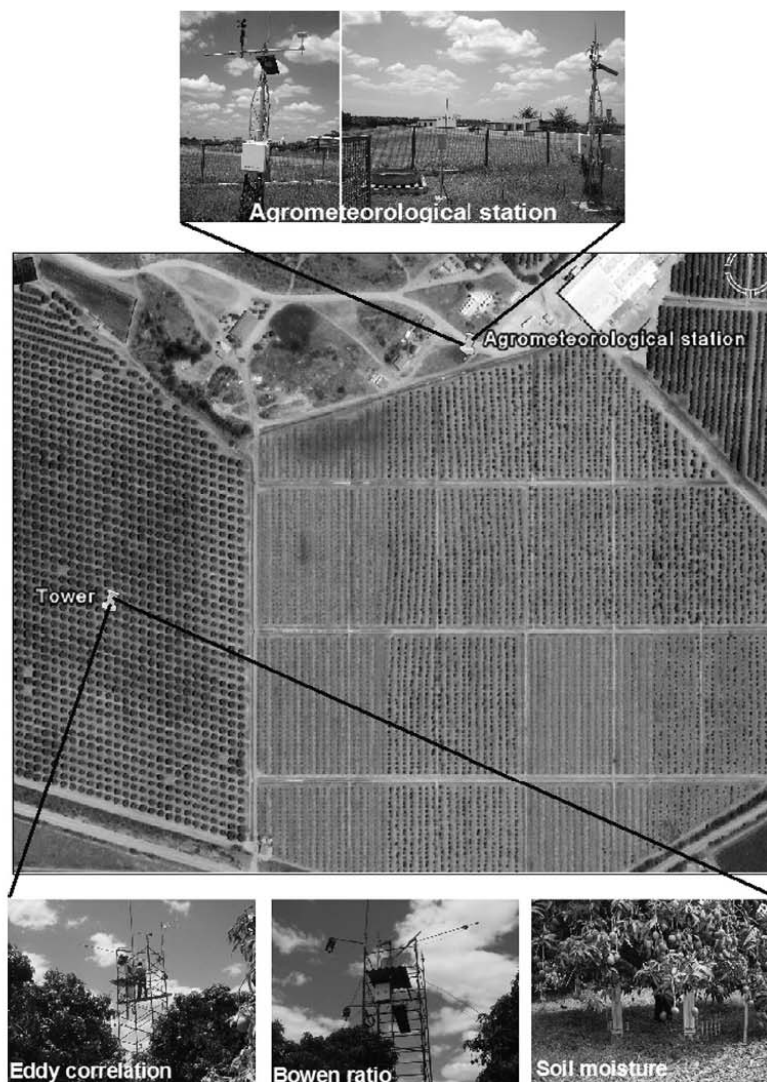


Fig. 1 – Location of the experimental mango flux site in the Low-Middle São Francisco river basin, Northeast Brazil.

The eddy covariance system determined the sensible (H) and latent heat fluxes (λE) using a three-axis sonic anemometer (Model CSAT3, Campbell Scientific, Logan, UT, USA) and a krypton hygrometer (Model KH20, Campbell Scientific,

Logan, UT, USA), respectively, connected to a datalogger (model CR10X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA). The sensors were installed at a height of 8.5 m (thus 3 m above the crown of the mango tree) with a horizontal separation of

0.15 m and with a sampling frequency of 16 Hz. Corrections to the λE due to sensible and latent flux (Webb et al., 1980), oxygen absorption (Tanner et al., 1993) and frequency losses (Moore, 1986) were applied using software developed by Van Dijk et al. (2004). The fluxes were computed for 30 min periods and later summed to give daily totals.

The net radiation (R_n) was acquired with one net radiometer (model NR-Lite, Kipp & Zonnen, Delft, The Netherlands) above a row of plants at a height of 7.5 m. Previous experiments with fruit crops have shown that no big differences arise by using one sensor or two above and between rows for determination of R_n at this height (Teixeira et al., 2007). The soil heat flux (G) was measured with two heat flux plates (model HFT3-L, REBS, Radiation and Energy Balance Systems, Seattle, WA, USA) at 2 cm soil depth and below the projected tree crown at 100 cm from the trunk. Flux plates were buried one at the west and the other at the east side a row of trees. The values of G were obtained as the average of the two measurements. R_n and G were measured at each 5 s interval and 10 min averages were stored on another datalogger (the same model used for eddy covariance measurements).

Missing data for λE from krypton hygrometer during the rainy periods were estimated by the relationship between $(H + \lambda E)$ and the available energy ($R_n + G$). After gap filling, the complete energy and water balances for entire growing seasons could be derived. The tower did not have problems of fetch in any direction, as the plot of 11.92 ha was inside a big farm with around 140 ha of mango orchards, southeast is the predominant wind direction.

Because of the lack of energy closure, a hybrid combination of radiation and flux measurements was deployed in this study. This combination method using eddy covariance measurements and the Bowen ratio of the fluxes ($\beta = H/\lambda E$), the latent heat flux (λE) was derived using the following equation:

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (1)$$

The actual evapotranspiration (E_a) was calculated transforming the λE into millimetres of water. The calculation of E_a at a daily time scale was obtained by summation of all 30 min values for 24 h periods.

2.3. Evapotranspiration and crop coefficients

The reference evapotranspiration (E_0) was calculated from Allen et al. (1998) using climatic data from an agro-meteorological station in the vicinity of the orchard (500 m). Half hourly measurements of average air temperature, relative humidity, wind speed, net radiation over grass and soil heat flux were used. The crop coefficient (K_c) was expressed as E_a/E_0 . The upper envelope of the K_c values was used to derive potential evapotranspiration (E_p). For the evaluation of actual transpiration (T_a) and soil evaporation (E_s), K_c was separated into two components: K_{cb} (basal coefficient) and K_e (soil evaporation component), respectively, using daily fluctuations of K_c . Minimum values of this last coefficient were used

to fit a curve for obtaining daily K_{cb} values, while K_e was considered as the difference between K_c and K_{cb} . Hence

$$T_a = K_{cb} E_0 \quad (2)$$

$$E_s = K_e E_0 \quad (3)$$

2.4. Additional measurements

The soil moisture was monitored weekly in the orchard with tensiometers at depths of 20, 40, 60, 80, 100 and 120 cm. These depths are considered to be inside the effective root zone for mango trees under local conditions. Suctions were converted into soil moisture by using measured soil water retention curves.

Microclimatic data of air temperature and relative humidity were used together with R_n , λE and G to estimate the bulk surface resistance to water vapour transport (r_s) applying the Penman-Monteith equation:

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G_0) + \rho_a c_p D / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a)} \quad (4)$$

where Δ (kPa °C⁻¹) is the slope of the saturated vapour pressure curve, ρ_a (kg m⁻³) is the air density, c_p (J kg⁻¹ K⁻¹) is the air specific heat at constant pressure, D (kPa) is the vapour pressure deficit and γ (kPa °C⁻¹) is the psychrometric constant. The value of r_s is obtained from model inversion of this equation using 30 min data. The 30 min data values of r_s were averaged.

The aerodynamic resistance (r_a (s m⁻¹)) was estimated using flux profile relationships. In this method the atmospheric surface layer similarity theory was used, applying the universal functions suggested by Businger et al. (1971) and the integrated stability functions of temperature (ψ_h) and momentum (ψ_m).

2.5. Soil water balance and storage change

The combined percolation and drainage term can be obtained from the remaining soil water balance terms as the difference between inputs (precipitation P , irrigation I and change in moisture storage, ΔW) and outputs (E_a). Since sub-surface drainage systems were absent, and flow to surface drains is negligible, the combined percolation/drainage flux can essentially be considered to represent deep percolation D_p :

$$D_p = P + I - E_a \pm \Delta W \quad (5)$$

The changes in soil water storage (ΔW) are positive when water is added to the root zone, otherwise it is negative:

$$\Delta W = W(t - 1) - W(t) \quad (6)$$

The water storage W in the root zone is derived from the layer-wise soil moisture values (θ_i). At moment t , the storage across the depth (δz_i) of the six sensors ($i = 1, \dots, 6$) can be computed as

$$W(t) = \delta z_1 \theta_1 + \delta z_2 \theta_2 + \delta z_3 \theta_3 + \delta z_4 \theta_4 + \delta z_5 \theta_5 + \delta z_6 \theta_6 \quad (7)$$

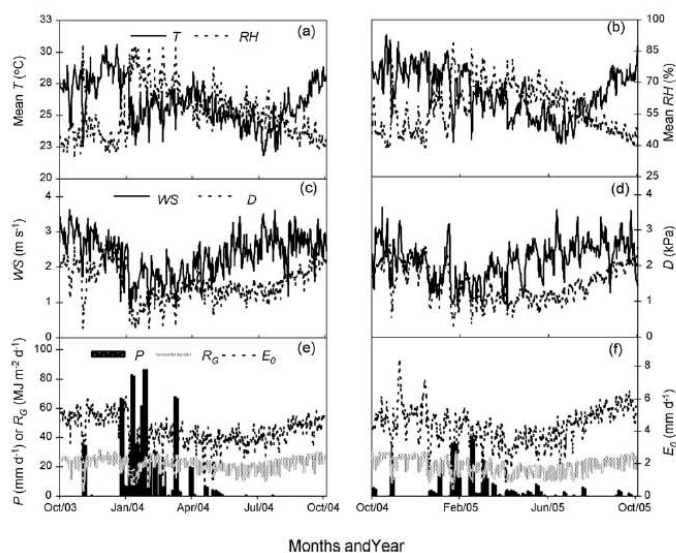


Fig. 2 – Daily values of weather variables during the study period from 2003 to 2005. (a and b) Mean air temperature (T) and relative humidity (RH); (c and d) wind speed (WS) and water vapor pressure deficit (D); (e and f) solar radiation (R_G), reference evapotranspiration (E_0) and precipitation (P).

2.6. Irrigation performance and crop water productivity

Following Bastiaanssen et al. (2001) the irrigation performance indicators applied in this study were the relative water supply (R_{WS}), crop water deficit (C_{WD}) and crop water productivity (C_{WP}) based on irrigation (I), actual evapotranspiration (E_a), actual transpiration (T_a) and actual crop yield (Y_a):

$$R_{WS} = \frac{V_i + P}{E_p} \quad (8)$$

$$C_{WD} = E_p - E_a \quad (9)$$

$$C_{WP} = \frac{Y_a}{V_{E_a, T_a, I}} \quad (10)$$

where P is the precipitation; V_i the water applied through irrigation; V_{E_a} and V_{T_a} are water fluxes by actual evapotranspiration and actual transpiration, respectively; and Y_a is the actual yield of fruits.

Increases in economic water productivity may indicate a shift towards higher valued crops, increase in yields or a saving in water input (Bos et al., 2005). As economic indicators, the indexes used were the standard gross value of production (fruits) over the irrigation supply ($CWP\$_I$) and over actual evapotranspiration or actual transpiration ($CWP\$_{E_a, T_a}$).

3. Results

3.1. Weather conditions and soil moisture

Fig. 2 shows the daily averaged weather variables during the two growing seasons studied. Air temperature (T) reached the maximum value in November and December with approximately 30°C , while the minimum values occurred during June (22°C). The relative humidity (RH) presented the inverse behaviour. The values for vapour pressure deficit (D), calculated for each half hour and averaged for 24 h – which expresses the inverse of RH – presented the same temporal behaviour as air temperature through the growing seasons. Wind speed (WS) at 3 m above a standardized grass field presented maximum values from July to November (3.6 m s^{-1}) and the minimum values from January to April (0.8 m s^{-1}). The wind speed over the rough mango trees were around 12% greater than over grass due to the height of the anemometer above the orchard. Values of global radiation (R_G) were as expected in the southern hemisphere: lower from April to July and higher from August to January, when they started to decline again. Reference evapotranspiration (E_0) followed the oscillation of R_G . Precipitation was concentrated between January and April. The year 2004 was unusually wet. The accumulated rainfall for the first growing season was 887 mm, for the second it was only 384 mm, while the longer term annual average is 570 mm.

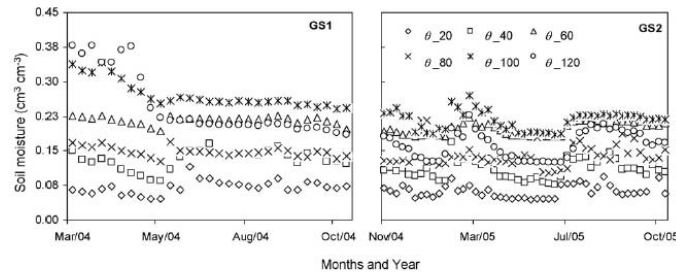


Fig. 3 – Soil water content (θ) at different depths ($i = 20$ cm, $i = 40$ cm, $i = 60$ cm, $i = 80$ cm, $i = 100$ cm, $i = 120$ cm) during the first (a) and second (b) growing seasons of mango orchard.

The values of layer-wise soil water content (θ) from 20 to 120 cm depth are presented in Fig. 3. The near-surface moisture content values were from 0.04 to 0.12 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ only, which creates a visually dry soil surface. Underneath the dry surface layer, the soil was wet with measured θ values peaking at 0.38 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. These levels can be interpreted as representing the soil porosity when the volumetric soil water content reaches its maximum in sandy soil. The highest moisture values occurred at the end of February in 2004 and are related to the preceding storm events. After this period, soil moisture was approximately constant throughout the seasons. The values at 120 cm were most often lower than at 60 and 100 cm, which reveal typical downward percolation conditions. The magnitude of the percolation needs to be investigated from the soil water balance. As the effective root zone of mango crop is 120 cm, it can be concluded from the θ values that the mango orchard was not stressed by water shortage during most of the days.

3.2. Energy balance closure

Despite eddy covariance being among the most advanced “in situ” measurement technologies that directly provide λE , it is widely known to have problems. The λE data quality from this system has been verified by studying the energy balance closure: fluxes ($\lambda E + H$) and available energy ($R_n - G$) were compared for the whole period of measurements (2003–2005) at a daily time scale (Fig. 4). Since the main objective of the research is irrigation management and water productivities, we are less interested in studying hourly energy balance closures, daily total values are sufficient. The energy balance ratio, i.e. the ratio of turbulent energy fluxes to available energy was 88%. The RMSE for 24 h values was 1.7 $\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$, evidence of the good quality of the dataset.

A closure error of 10–30% seems to occur frequently with eddy covariance-based latent heat flux estimates. A summary paper of 22 flux sites indicated a general lack of closure, with a mean imbalance in the order of 20% (Wilson et al., 2002). Available energy ($R_n - G$) systematically exceeding measured fluxes ($\lambda E + H$) were also published by Twine et al. (2000), Paço et al. (2006) and Testi et al. (2006).

The lack of energy balance closure can also be associated with measurement errors in R_n and G , but not completely explained by this uncertainty, because eddy covariance systems have their own sources of error (Twine et al., 2000). Further to systematic biases in the instrumentation, the general hypothesis is that lack of energy balance closure can be explained by sampling errors related to different footprints, neglected energy sinks, loss of low and/or high frequency contributions to the turbulent heat flux and advection of scalars (e.g. Paw et al., 2000).

To circumvent this common problem, several agro-meteorological studies have found a practical solution to force the closure of the surface energy balance. Simmons et al. (2007) also used the residual method to obtain E_a by measuring H with a sonic anemometer and the available energy in a flood-irrigated pecan orchard, while Chehbouni et al. (2006) used eddy covariance measurements and the ratio $H/\lambda E$ over irrigated wheat in the Yaqui Valley in northwest Mexico. It was decided to analyse the results combining the ratio $H/\lambda E$

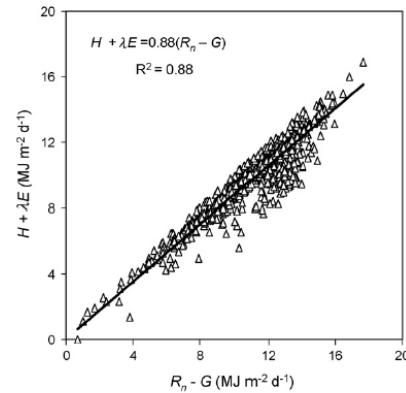


Fig. 4 – Relationship between latent heat (λE) plus sensible heat (H) fluxes and available energy ($R_n - G$) for the eddy covariance system.

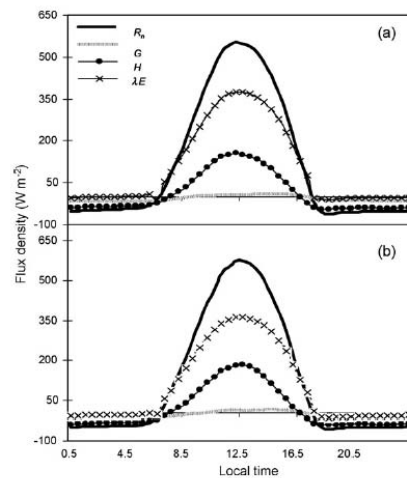


Fig. 5 – Diurnal averages for energy balance components during the growing seasons of 2003–2004 (a) and 2004–2005 (b) for mango orchard: net radiation (R_n); latent heat flux (λE); sensible heat flux (H) and soil heat flux (G).

with the measured available energy (e.g. Twine et al., 2000). Whilst the lack of energy balance closure underestimates λE , forcing the closure by this combination method we assume this underestimation to be corrected (e.g. Hoedjes et al., 2002).

The authors have a preference for the combination method because:

- it directly produces evaporative fraction, being a key expression for energy partitioning;
- it ensures a closed energy balance;
- it mainly utilizes highly advanced eddy covariance systems;
- it has a good consistency with the theoretically best λE measurements.

All the energy balance and E_a data discussed hereafter are based on the combination method with $H/\lambda E$ from eddy covariance measurements.

3.3. Partition into sensible and latent heat fluxes

Fig. 5a and b shows the diurnal trend in the fluxes of individual components of the energy balance for the mango orchard. The latent heat flux (λE) was always in excess of the sensible heat flux (H) during daylight hours. The H was – in turn – higher than the soil heat flux (G). At night the results from eddy covariance (EC) showed zero latent heat flux.

Daily averages of energy balances are given in Table 1. Unstable atmospheric conditions predominated above the orchard, with the sensible heat flux (H) accounting for 11% and 15% of R_n during the first and second growing seasons, respectively. The significant leaf area index of mango crop (LAI

~5 to 6) caused solar radiation to hardly penetrate through the canopy. As a consequence, the soil heat flux (G) at daily scale was small and negative with 24 h averaged values of 3% and 2% of R_n in the first and second growing seasons, respectively. Negative values for G could be the result of conditions with a large LAI in conjunction with frequent micro sprinkler irrigation that keeps the soil thermal conductivity high.

The largest part of R_n was used as latent heat flux (λE). λE represented on average 89% of R_n during the first growing season and 80% for the second one. The corresponding evaporative fractions ($E_f = \lambda E / (R_n - G)$) were 0.86 and 0.79. During an earlier mango energy balance study during 1998, the E_f was found to be 0.73 in August, 0.86 in September, 0.78 in October and 0.80 during November (Lopes et al., 2001), similar to our results.

The values of E_f remained rather constant during the growing seasons, which reflect a constant supply of irrigation water. An average E_f of 0.83 is according to Scott et al. (2003) equivalent to a degree of soil moisture saturation in the root zone of 67%, which at a maximum moisture value of $0.38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ suggests average soil moisture in the root zone of $0.25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. The latter can be confirmed from the soil moisture measurements (see Fig. 3). Testi et al. (2004) studied the partition of energy balance in a young olive orchard, under different soil water conditions. They also concluded that the amount of R_n used as λE and H depends on soil water content. The rainy period elapsed from January to April and after that, farmers refrain from irrigation, inducing a drop of evaporative fraction to a value around 0.70 during the branch development stages.

3.4. Evapotranspiration

Despite the first growing season having an above average rainfall; the difference in potential evapotranspiration (E_p) is mainly caused by cloud cover and solar radiation (R_G). Outside the short rainy season, R_G can be abundant. The E_p in the first growing season was with 1565 mm, more than for the second season (1441 mm). As a consequence of the higher potential evapotranspiration, and the wetter soil due to rainfall (the 80–120 cm depth layers are systematically wetter in the first growing season), actual ET in 2003–4 was 1492 mm and higher than the 1346 mm measured in 2004–05. The average ET_a over the two seasons was 1419 mm with an average daily value rate of 3.7 mm day^{-1} .

Fig. 6 shows the seasonal trend of daily values of actual evapotranspiration (E_a) in mango orchard. The values followed the atmospheric demand in both growing seasons, being higher from October (2003) to March (2004), and from August to November (2004) in the first season, while in the second season, the peak values were from January to April and from August to November, both in 2005. Maximum daily values of E_a for the first season were 6.3 mm day^{-1} . During the second season the maximum values were 5.1 mm day^{-1} . The minimum values were around 0.6 mm day^{-1} .

Azevedo et al. (2003) showed averaged daily values of mango orchard E_a of 4.4 mm day^{-1} for the crop stages from flowering to fruit maturation using both, Bowen ratio and soil water balance methods. It should be noted that the study of Azevedo reflects drip irrigation, while our study used micro

Table 1 – Daily averages of the energy balance components for mango orchard during the growing seasons of 2003–2004 (GS1) and 2004–2005 (GS2): net radiation (R_n), soil heat flux (G), latent heat (λE), sensible heat flux (H), and evaporative fraction (E_f)

DOY/year	R_n ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	G ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	λE ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	H ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	E_f (–)
GS1					
303/2003	9.66	–0.13	8.43	0.80	0.86
333/2003	10.84	–0.29	9.49	1.20	0.85
363/2003	10.64	–0.22	9.13	1.14	0.84
028/2004	9.73	–0.60	8.30	1.91	0.80
058/2004	12.18	–1.41	10.28	2.93	0.76
088/2004	11.69	–0.31	10.15	1.84	0.85
118/2004	11.96	0.00	10.46	1.25	0.87
148/2004	9.75	–0.20	8.45	1.29	0.85
178/2004	8.91	–0.37	8.09	0.74	0.87
208/2004	8.70	–0.33	8.01	0.76	0.89
238/2004	9.71	–0.28	8.49	1.04	0.85
268/2004	11.51	–0.33	11.19	–0.07	0.95
298/2004	12.21	–0.38	11.65	–0.24	0.93
Mean	10.58	–0.37	9.39	1.12	0.86
GS2					
326/2004	12.47	–0.25	10.61	0.71	0.83
354/2004	12.17	–0.15	10.17	1.19	0.83
016/2005	11.67	–0.02	8.71	2.20	0.75
044/2005	12.13	–0.30	9.37	2.57	0.75
072/2005	11.87	–0.38	9.10	2.59	0.74
100/2005	12.41	–0.44	9.43	2.90	0.73
128/2005	9.04	–0.29	8.11	1.19	0.87
156/2005	8.78	–0.07	7.85	0.83	0.89
184/2005	8.43	–0.07	7.67	0.66	0.90
212/2005	10.03	0.25	8.40	0.49	0.86
240/2005	10.62	–0.03	8.56	1.64	0.80
268/2005	12.04	–0.20	9.14	2.60	0.75
302/2005	12.35	–0.38	8.62	2.13	0.68
Mean	11.08	–0.18	8.90	1.67	0.79

DOY: day of the year. The values were taken at 30 and 28 days intervals for GS1 and GS2, respectively.

sprinklers. The mean crop heights are similar for both studies (around 5 m) and the trees were spaced $8.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ in the previous study, while in the present field, trees stand in a regular square pattern at $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$. The mango orchard LAI in the first study was approximately 12–15 while the larger spacing in our study yields values of 5.2, 6.0 and 5.6, being another reason for the lower E_a . Lopes et al. (2001) evaluating E_a using the Bowen ratio method for 6-year-old, drip-irrigated

mango trees, found values in the range of $3.1\text{--}6.2 \text{ mm day}^{-1}$ in Petrolina, Brazil. Annual mango E_a in South Africa was found by Mostert and Wantenaar (1994) to be 1197 mm. The winter E_a was 2.2 mm day^{-1} on average, while the summer E_a was with 4.4 mm day^{-1} exactly double. Molle et al. (1999) reported on an annual mango plot water consumption of 1630 mm in a raised bed system, including crop consumptive use and evaporation from ponding water.

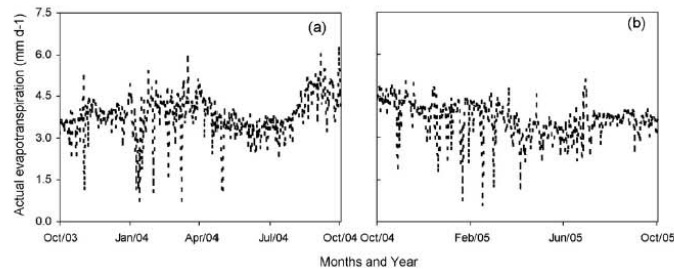


Fig. 6 – Daily variation for actual evapotranspiration, during the growing seasons of 2003–2004 (a) and 2004–2005 (b) for mango orchard, by the combination eddy covariance–Bowen ratio method.

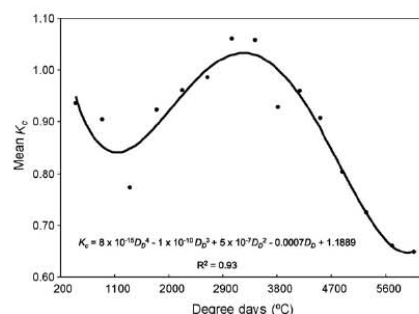


Fig. 7 – The seasonal variation of averaged daily crop coefficients (mean K_c), as a function of degree days, D_0 (basal $T = 10^\circ\text{C}$), during the growing season of 2004–2005 of mango orchard, by the combination method of eddy covariance measurements with Bowen ratio.

With regard to other orchards, the E_a results for mango were greater than for citrus (Paço et al., 2006) and lower than for peach (Rana et al., 2005). Rana et al. (2005) using eddy covariance measurement systems in a citrus orchard under Mediterranean conditions (Southern Italy) found values ranging from 3.0 to 8.0 mm day⁻¹. Paço et al. (2006) using the same method in a peach orchard in Portugal found E_a values ranging from 1.4 to 3.6 mm day⁻¹ in 1998 and from 2.1 to 3.3 mm day⁻¹ in 1999 with mean values of 2.5 and 2.6 mm day⁻¹, respectively. The eddy covariance system was also used by Sammis et al. (2004) to study water consumption of flood-irrigated pecans in USA; they found an averaged total E_a of 1420 mm for 2001 and 2002 that was similar to the total E_a of mango orchard in first growing season in the present study.

3.5. Crop coefficients

The 20-day interval averaged K_c data for the dry growing season (2004–2005) were fitted with a polynomial function expressed in degree days (basal $T = 10^\circ\text{C}$) rather than in calendar days, for incorporation of temperature effects on the

growing stages of mango trees (Fig. 7). The period before the pruning date was included because the farmers also applied large amounts of water during post-harvest periods, which must be included for the final water productivity analysis.

The values of E_a largely followed the E_0 . During the rainy periods at the start of the year, E_a rates exceeded E_0 , resulting in daily K_c values exceeding 1 (Fig. 8). Soil evaporation plays a role in these high K_c values, as can be seen by the high values of the crop coefficient based on soil evaporation (K_e). This effect was more pronounced in 2004, when unusually strong storms occurred. The highest daily values of K_c were from the end of January to end of March for both seasons reaching peak K_c values of 1.40. This time of both years (2004 and 2005) was the rainy period when the crop was at the branch development and flowering stages. The minimum values occurred when the crop was in a transition stage from previous post-harvest to vegetative growth, coinciding with periods without rain.

For both seasons, higher K_c values were found than by Azevedo et al. (2003) who reported K_c values around 0.71 during the crop stages studied. They also fitted a polynomial curve, but with K_c values as a function of the days after flowering (DAF). The higher K_c values in our study have the same reasons as mentioned for E_a , but in addition it should be noticed that they used a conventional agro-meteorological station in contrast with our automatic weather station data to calculate E_0 .

The maximum K_c values found for citrus by Rana et al. (2005) were around 1.20, a little lower than the results for mango orchard during our study, while Sammis et al. (2004) and Paço et al. (2006) found much lower values in the range of 0.20–1.10 for pecan and from 0.40 to 0.60 for peach orchards, respectively. The minimum K_c values for 20-day periods were considered to represent the basal coefficients (K_{cb}) and a curve was fitted (Fig. 8). The maximum daily values of K_{cb} were 0.85 and 0.75 for the first and second growing seasons, respectively. The minimum values for initial stages were 0.46 during the first season. During the second season, minimum initial K_{cb} values were 0.41. The basal crop coefficients during the harvest season were 0.67 and 0.36 for the first and second years, respectively. This trend was also observed in the K_c analysis. With the difference between K_c and K_{cb} the resulted K_e values showed that soil evaporation contributed about 20% to the total mango orchard E_a . With values of K_{cb} , K_e and E_0 , the actual transpiration (T_a) and soil evaporation (E_s) could be

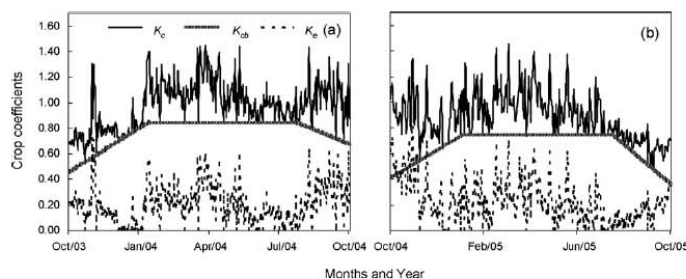


Fig. 8 – Seasonal variation of daily crop coefficients in mango orchard for the first (a) and second (b) growing seasons: crop coefficients based on evapotranspiration (K_c), transpiration (K_{cb}) and soil evaporation (K_e).

Table 2 – Summary of water-use variables for mango orchard during the growing seasons of 2003–2004 (GS1) and 2004–2005 (GS2): mean values of reference evapotranspiration (E_0), actual evapotranspiration (E_a); actual transpiration (T_a) and soil evaporation (E_s); crop factors based on evapotranspiration (K_c), transpiration (K_{cb}) and soil evaporation (K_e); aerodynamic (r_a) and surface (r_s) resistances

DOY/year	E_0 (mm day ⁻¹)	E_a (mm day ⁻¹)	T_a (mm day ⁻¹)	E_s (mm day ⁻¹)	K_c	K_{cb}	K_e	r_a (s m ⁻¹)	r_s (s m ⁻¹)
GS1									
303/2003	4.87	3.41	2.49	0.92	0.70	0.51	0.19	32	191
333/2003	4.70	3.87	2.90	0.97	0.82	0.62	0.21	34	160
363/2003	4.18	3.79	3.59	0.20	0.91	0.72	0.19	44	193
028/2004	3.67	3.40	2.99	0.41	0.93	0.82	0.10	38	116
058/2004	3.82	4.18	3.24	0.93	1.09	0.85	0.24	44	107
088/2004	3.78	4.08	3.21	0.86	1.08	0.85	0.23	35	112
118/2004	3.52	4.24	3.00	1.25	1.20	0.85	0.35	43	121
148/2004	3.34	3.43	2.84	0.59	1.03	0.85	0.18	41	119
178/2004	3.56	3.36	3.03	0.33	0.94	0.85	0.09	31	135
208/2004	3.41	3.29	2.90	0.39	0.96	0.85	0.11	30	121
238/2004	3.74	3.49	3.13	0.35	0.93	0.84	0.09	33	123
268/2004	4.27	4.57	3.32	1.25	1.07	0.78	0.29	34	122
298/2004	4.44	4.63	3.14	1.49	1.04	0.71	0.34	34	145
Mean	3.95	3.83	3.06	0.75	0.97	0.78	0.19	36	136
GS2									
326/2004	4.66	4.33	2.15	2.18	0.93	0.46	0.47	36	152
354/2004	5.02	4.17	2.82	1.35	0.83	0.56	0.27	36	155
016/2005	4.87	3.74	3.19	0.55	0.77	0.66	0.11	39	180
044/2005	4.14	3.78	3.06	0.72	0.91	0.74	0.17	42	149
072/2005	3.92	3.65	2.94	0.71	0.93	0.75	0.18	46	120
100/2005	3.74	3.81	2.81	1.00	1.02	0.75	0.27	46	111
128/2005	3.06	3.21	2.30	0.91	1.05	0.75	0.30	39	113
156/2005	3.42	3.20	2.56	0.63	0.94	0.75	0.19	37	120
184/2005	3.36	3.13	2.52	0.61	0.93	0.75	0.18	34	116
212/2005	3.88	3.46	2.91	0.55	0.89	0.75	0.14	33	108
240/2005	4.59	3.55	3.32	0.23	0.77	0.73	0.04	31	124
268/2005	5.30	3.73	3.16	0.57	0.70	0.60	0.10	32	140
302/2005	5.58	3.54	2.47	1.08	0.64	0.44	0.20	32	163
Mean	4.27	3.64	2.79	0.85	0.85	0.67	0.18	39	135

*DOY: day of the year. The values were taken at 30 and 28 days intervals for GS1 and GS2, respectively.

determined (see Table 2). T_a for both seasons followed the fluctuations in E_a .

3.6. Single layer crop resistances

A more in-depth physical explanation of mango E_a can be obtained if the aerodynamic (r_a) and bulk surface (r_s) resistances are derived. Fig. 9 shows the seasonal variation in r_a and r_s for the growing seasons of 2003–2004 (a) and 2004–2005 (b) calculated from λE measurements. The highest values of r_a coincided with the lowest values of r_s and they occurred during the rainy periods. The relatively low r_a values of approximately 35 s m⁻¹ can be directly ascribed to the tall trees with 5.5 m averaged height.

The seasonal behaviour of r_s followed the dryness of the lower part of the atmosphere with some peaks associated with high values of vapour pressure deficit (D) in both seasons. The value of r_s were on average 135 s m⁻¹, which explains that the mango E_a is lower than for grass as the reference crop (for which r_s is assumed to be 70 s m⁻¹). These relatively high r_s values can be ascribed to absence of a ground cover crop and the relatively dry air. Yet r_s can also vary with soil water content and soil hydraulic conductivity close to the roots.

The increase of r_s with high values of water vapour deficit (D) has been reported by Testi et al. (2006) in olive orchard in Spain. According to Rana et al. (2005), r_s is not a constant, they confirm that it varies depending on D , but also depends on the available energy to the crop. Alves and Pereira (2000) used the so-called climatic resistance that is directly proportional to D for lettuce crop, to explain variations in λE . If there is sufficient soil moisture to avoid water stress, conditions of high D together with low values of aerodynamic resistances (r_a) promote high rates of E_a , which make the values of r_s lower and this is the case of irrigated mango orchards growing in the semi-arid conditions of São Francisco River basin. The main reasons for differences in orchard water variables between our study and some others cited above can be attributed to different species, varieties, climate, soil type, irrigation systems and frequency of irrigation, cultural management, methods of determination of evapotranspiration and also the plant density that affect the soil cover.

3.7. Soil water balance

Irrigated soils in the central São Francisco River basin have experienced declines in productivity, which may be a

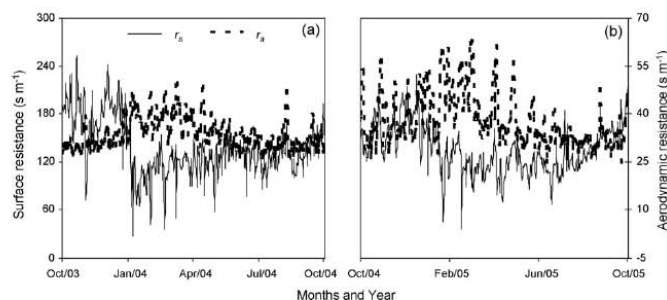


Fig. 9 – Seasonal trends of surface (r_s) and aerodynamic (r_a) resistances for the first (a) and the second (b) growing seasons of mango orchard.

reflection of changes in soil chemical properties due to management (Heck et al., 2003). The water flow in the unsaturated zone needs to be properly understood for assessing sustainability. The monthly soil water balance for the mango orchard is presented in Table 3, while the seasonal variation is presented in Fig. 10.

The percolation flow can be as high as 50 mm per week (or 200 mm month⁻¹) following periods of rain storms. This flow

can be regarded as happening at a depth of 140 cm below natural ground surface. The largest fluctuations in percolation are found during the rainy season (see Fig. 10b). The highly permeable soils have a great drainage capacity that ensures that soil moisture is not rising and that excessive moisture percolates downwards. This is in agreement with the general soil water requirements of mango orchard; hence it has been a good choice to cultivate this fruit crop in the soils and climate of Petrolina-PE. The latter is confirmed from the soil moisture changes. Table 3 shows that the changes across a month are 30 mm at maximum.

The soil water balance as defined in Eq. (5) could be computed only for the period in which soil moisture of the layers and E_a were measured. The percolation flows are rather conserved during the irrigation season and outside the rainy season. During dry periods, the measurements suggest that capillary rise provided extra water to the root zone. This last process can be established only if the 120 cm deep moisture layer is wetter than the 100 cm layer. This indeed sometimes occurred, especially after the end of the rainy period during the first growing season, when the time without irrigation during this period was longer than in the second season (see Figs. 3 and 10).

Seasonal percolation could be computed as being around 300 mm, considering the rate of 0.8 mm day⁻¹, from the data during the second growing season (Table 3), and a mean duration for the two seasons of 380 days. This is a substantial return flow of the irrigation system that to a large degree is manageable. Irrigation conservation could reduce the percolation. An example of stress induced soil water content is described in Nadler et al. (2006). The limited distance of 5.5 km from the river ensures that most return flow is drained to the São Francisco. The significant percolation flow transports the solutes down to the groundwater. Both groundwater quality and the soil health need to be controlled.

3.8. Irrigation performance and crop water productivity

Knowledge of the water balance allows the evaluation of irrigation performance and water productivity. Irrigation performance has been introduced to describe the hydrological

Table 3 – Monthly soil water balance of irrigated mango trees during the first (from 060/2004 to 298/2004) and second (from 298/2004 to 291/2005) growing seasons: rainfall (P); actual evapotranspiration (E_a), irrigation (I), change in soil water content (ΔW) and deep percolation (D_p) or capillary rise (CP)

DOY/year	P (mm)	E_a (mm)	I (mm)	ΔW (mm)	D_p or CP (mm)
GS1					
060/2004–091/2004	76.2	128.1	0.0	19.3	32.5
092/2004–121/2004	20.8	125.7	0.0	32.1	72.7
122/2004–152/2004	19.6	107.1	29.4	–28.9	29.2
153/2004–182/2004	0.0	97.8	104.4	–2.5	–9.1
183/2004–213/2004	0.3	102.2	112.7	–0.2	–11.0
214/2004–244/2004	0.5	114.7	122.9	–1.7	–10.3
245/2004–274/2004	0.0	141.4	118.2	8.1	15.2
275/2004–298/2004	0.0	108.9	121.0	4.9	–17.0
Total	117.4	925.9	608.6	31.1	102.2
GS2					
299/2004–335/2004	22.1	157.3	137.0	10.2	–12.0
336/2004–366/2004	0.0	125.7	104.8	11.0	9.9
001/2005–031/2005	31.5	116.2	127.5	12.7	–55.5
032/2005–059/2005	153.7	103.2	120.5	–24.8	–195.7
060/2005–090/2005	96.0	115.2	71.8	1.5	–54.2
091/2005–120/2005	23.9	110.7	0.0	9.7	77.0
121/2005–151/2005	24.9	92.9	0.0	0.7	67.2
152/2005–181/2005	15.2	94.8	80.5	4.6	–5.6
182/2005–212/2005	3.0	105.8	112.5	–28.3	–38.0
213/2005–243/2005	7.4	110.5	128.7	5.1	–30.6
244/2005–273/2005	0.0	111.3	117.2	2.7	–8.7
274/2005–291/2005	4.1	63.6	81.3	–3.5	–25.2
Total	381.8	1307.2	1081.8	1.6	–271.4

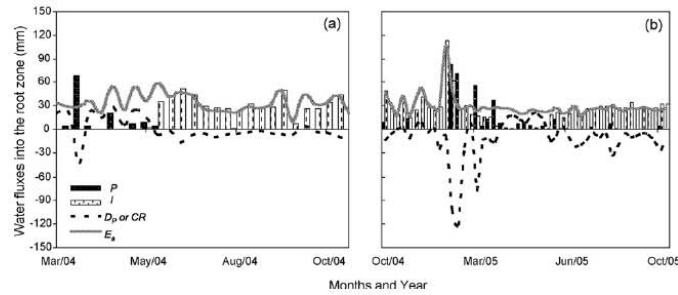


Fig. 10 – Soil water balance into the root zone for the first (a) and second (b) growing seasons in mango orchard: precipitation (P); irrigation (I); deep percolation (D_p); capillary rise (CR) and actual evapotranspiration (E_a).

behaviour of irrigation systems by means of simple understandable ratios, which involve agro-meteorological data, water delivered and water consumed (Bos et al., 2005).

The crop water productivity indicators are summarized in Tables 4 and 5 according to the crop stages and growing seasons. The water indicator R_{WS} found for the mango orchard showed the presence of a gap between crop water demands and supply for some crop stages, which was more pronounced during the first growing season. The main reason could be due to irrigation management during the rainy period. The farmer stopped the irrigation at crop stages between branch development and flowering which coincided with the rainy period for both seasons. The time without irrigation in the first season was longer than during the second. For the first season the values of R_{WS} were in the range from 0.41 to 1.45 and for second they were in the range from 0.86 to 1.21. The indicator C_{WD} showed some deficit during branch development-flowering stages, having totals of 73–95 mm for the first and second

growing seasons, respectively, evidence of a very low water shortage, that agrees with the finding of a constant wetted root zone.

The eddy covariance measurements yielded mean R_{WS} of 1.13 and 1.05 for the first and second growing seasons. In general R_{WS} greater than one could be taken as an advantage from the point of view of securing the crop water requirements as well as groundwater recharge. These numbers imply that approximately 10% more irrigation water was supplied than was necessary to meet the crop water requirements. This is according to best practice as some of the irrigation water will unavoidably leak away from the orchard. The optimum value for relative water supply would be 0.80, because C_{WP} increases with water stress. This case study showed that for the period vegetative growth-branch development of mango growing seasons, more water should be saved from reduced supplies, while care should be taken after the rainy period where more water should be given as the water quickly percolates away. A

Table 4 – Actual (E_a) and potential (E_p) evapotranspiration, crop water deficit (C_{WD}), rainfall (P), irrigation (I) and relative water supply (R_{WS}), during the phenological phases of the mango orchard

Phase	Period	E_a (mm)	E_p (mm)	C_{WD} (mm)	P (mm)	I (mm)	R_{WS}
GS1							
Previous post-harvest	1–31 October 2003	106	111	5	0	99	0.89
Vegetative growth	01–30 November 2003	116	121	4	36	95	1.08
Branch development	01 December 2003 to 30 April 2004	597	623	26	831	74	1.45
Flowering	01–31 May 2004	107	113	6	20	27	0.41
Fruit initiation	01–30 June 2004	98	109	11	0	104	0.96
Fruit growth	01–31 July 2004	102	110	8	0	113	1.02
Fruit maturation	01–31 August 2004	115	123	8	1	123	1.00
Harvest	01 September 2004 to 24 October 2004	250	254	4	0	239	0.94
Season	01 October 2003 to 24 October 2004	1492	1565	73	887	874	1.13
GS2							
Previous post-harvest	25 October 2004 to 31 December 2004	283	305	22	22	242	0.86
Vegetative growth	01–31 January 2005	116	136	20	32	127	1.17
Branch development	01 February 2005 to 31 May 2005	422	445	23	298	192	1.10
Flowering	01 June 2005 to 03 July 2005	104	110	6	15	90	0.96
Fruit initiation	04–24 July 2005	67	71	4	0	76	1.08
Fruit growth	25 July 2005 to 25 August 2005	118	125	7	7	129	1.09
Fruit maturation	26 August 2005 to 24 September 2005	112	118	7	0	116	0.98
Harvest	25 September 2005 to 29 October 2005	124	130	6	6	152	1.21
Season	01 November 2004 to October 2005	1346	1441	95	380	1126	1.05

Table 5 – Yield (kilograms of fruits) and crop water productivity (C_{WP}) based on cultivated land (L), irrigation (I), actual evapotranspiration (E_a) and actual transpiration (T_a) of mango orchard, together with economic values of these indices (\$)

GS	Yield (tonnes)	C_{WPI} (kg ha ⁻¹)	C_{WPI} (Kg m ⁻³)	C_{WPEa} (Kg m ⁻³)	C_{WPTa} (Kg m ⁻³)	$C_{WPI/L}$ (US\$ ha ⁻¹)	$C_{WPI/I}$ (US\$ m ⁻³)	$C_{WPEa/L}$ (US\$ m ⁻³)	$C_{WPTa/L}$ (US\$ m ⁻³)
GS1	496	41,593	4.8	2.8	3.6	42,425	4.9	2.9	3.7
GS2	577	48,405	4.3	3.6	5.4	49,373	4.4	3.7	5.5

reduction of irrigation water in April to July will also reduce the drainage effluents and prevent nutrients and chemical leaching away from the root zone. Table 4 shows that the second growing season had a very constant and ideal R_{WS} value around 1.0. The irrigation was less during the rainy season and much higher during the dry season from July to October. During the first growing season, irrigation management could have been much better: there was over-irrigation during branch development and under-irrigation during flowering. It is interesting to study the impact of water stress during flowering on the final fruit yield.

Mango yields vary with the cultivar and the age of the tree. A well-managed orchard may yield 200–300 fruits per tree. Old trees in Java are known to produce 1000–1500 fruits per tree. In Puerto Rico, mango yield varies among 29–67 tonne ha⁻¹ (Morton, 1987). The average mango yield in Florida is 30 tonne ha⁻¹. The statistical average mango yield in Petrolina during 1998 was 20.8 tonne ha⁻¹. The mango yields in our investigation (C_{WPI}) were 41.6 and 48.4 tonne ha⁻¹ for the first and second growing season, respectively. This difference between the two growing seasons can likely be ascribed to the water stress during flowering in the first growing season.

According to the growing seasons, the C_{WPI} values were 4.76 and 4.30 kg m⁻³ and the C_{WPTa} values were 2.79 and 3.60 kg m⁻³. When the crop water productivity was analyzed based on actual transpiration only following plant physiological mechanisms, C_{WPTa} values were 3.57 and 5.38 kg m⁻³. This type of bio-physical water productivities are generally higher than for arable crops (essentially C_{WPEa} from 0.5 to 1.5 kg m⁻³ for wheat and rice; see Zwart and Bastiaansen, 2004) but comparable to grapes (C_{WPTa} is 3.8 kg m⁻³; Teixeira et al., 2007) that both contain a high moisture content of the fresh product (approximately 75–80%).

The monetary component of crop water productivity (C_{WPI}) was also computed per unit irrigation ($C_{WPI/I}$), actual evapotranspiration ($C_{WPEa/L}$) and actual transpiration ($C_{WPTa/L}$). The $C_{WPI/I}$ was 4.86 and 4.39 US\$ m⁻³ for the first and second growing seasons, respectively. In relation to $C_{WPEa/L}$ the values were 2.85 and 3.68 US\$ m⁻³. For transpiration, the $C_{WPTa/L}$ was 3.65 and 5.50 US\$ m⁻³ (see Table 5).

An economic water productivity of 3–4 US\$ m⁻³ per unit of water depleted is almost a factor 20 more than for irrigated staple crops. The agricultural water usage in the semi-arid region of São Francisco river basin is thus highly productive, besides also providing jobs in the agri-business, which is a stimulus for rural development of the region.

4. Conclusions

Because of the importance of the water management in fruit crops, daily and seasonal water-use patterns of a large

commercial mango orchard were collected. The results presented in this paper are important for irrigation management, water allocation, water savings and environmental sustainability of irrigated mango orchards.

Despite the aerodynamically rough surface with the crowns of mango trees exceeding 5 m, the actual ET of the mango orchard is less than for grass as a reference crop ($k_c = 0.91$). The underlying reason is the presence of a relatively large bulk surface resistance (135 s m⁻¹) due to presence of older leaves, shadow in the crown, distance between trees for mechanical access and the absence of a ground cover crop.

In the commercial farm investigated, soil moisture, evaporative fraction, crop water deficit and relative water supply were kept at ideal levels, especially considering the values for the entire growing seasons. The drawback of a wet light textured soil is the capacity to percolate excessive water resources. The annual percolation flow was 300 mm, and this is a threat to groundwater contamination and soil salinity build up, if drainage is not given proper attention.

The bio-physical and economical water productivities of mango are very high. An economic water productivity of US\$ 2.90–3.70 m⁻³ is an order of magnitude better than for staple crops. Hence from a scarce water resources point of view, water allocation to irrigated mango orchards is desirable. Although this water usage is highly productive, the environmental consequences must be considered keeping irrigated horticulture in pace with sustainability requirements. The challenge is to find a balance between water productivity and environmental pollution.

Acknowledgements

The research herein was supported by CAPES (Ministry of Education, Brazil), Embrapa (Brazilian Agricultural Research Corporation) and International Water Management Institute (IWMI). The Department of Meteorology of Wageningen University and Research Centre (WUR) is acknowledged for screening of raw eddy covariance data.

REFERENCES

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 300 pp.
- Alves, I., Pereira, L.S., 2000. Modelling surface resistance from climatic variables. Agric. Water Manage. 42, 371–385.
- Azevedo, P.V., Silva, B.B., da Silva, V.P.R., 2003. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. Agric. Water Manage. 58, 241–254.

- Bastiaanssen, W.G.M., Brito, R.A.L., Bos, M.G., Souza, R.A., Cavalcanti, E.B., Bakker, M.M., 2001. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. *Irrig. Drain. Syst.* 15, 53–79.
- Bos, M.G., Burton, M.A., Molden, D.J., 2005. Performance indicators for irrigation and drainage. In: *Irrigation and Drainage Performance Assessment. Practical Guidelines*, CABI Publishing, pp. 26–61.
- Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., Bradley, E.F., 1971. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.* 28, 189–191.
- Chehbouni, A., Ezzahar, J., Watts, C., Rodriguez, J.-C., Garatuza-Payan, J., 2006. Estimating area-averaged surface fluxes over contrasted agricultural patchwork in a semi-arid region. In: Hill, J., Roder, A. (Eds.), *Advances in Remote Sensing and Geoinformation Processing for Land Degradation Assessment*. Taylor and Francis.
- Heck, R.J., Tiessen, H., Salcedo, I.H., Santos, M.C., 2003. Soil chemical changes under irrigated mango production in the central San Francisco River valley, Brazil. *J. Environ. Qual.* 32, 1414–1421.
- Heilman, J.L., McInnes, K.J., Gesh, R.W., Lascano, R.J., Savage, M.J., 1996. Effects of trellising on the energy balance of the vineyard. *Agric. For. Meteorol.* 81, 79–93.
- Hoedjes, J.C.B., Zuurbier, R.M., Watts, C.J., 2002. Large aperture scintillometer used over a homogeneous irrigated area, partly affected by regional advection. *Bound.-Lay. Meteorol.* 105, 99–117.
- Lopes, P.M.O., Silva, B.B.da., Azevedo, P.V.de, Silva, V.P.da.R., Teixeira, A.H.C., Soares, J.M., Sobrinho, J.E., 2001. Balanço de energia num pomar de mangueiras irrigado. *Rev. Bras. Agrometeorol.* 9, 1–8.
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R., Makin, I., 2003. A water-productivity framework for understanding and action CABI. In: Kijne, J.W., Barker, R., Molden, D. (Eds.), *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. Chapter 1. pp. 1–18.
- Molle, F., Sutthi, C., Keawkulaya, J., Korpraditskul, R., 1999. Water management in raised bed systems: a case study from the Chao Phraya delta, Thailand. *Agric. Water Manage.* 39, 1–17.
- Moore, C.J., 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Bound.-Lay. Meteorol.* 37, 17–35.
- Morton, J.F., 1987. In: Morton, J.F. (Ed.), *Fruits of warm climates*. Miami, Florida, pp. 221–239.
- Mostert, P.G., Wantenaar, L., 1994. Water needs and irrigation of mature mango trees. *S.A. Mango Growers' Assoc. Yearbook* 14, 21–23.
- Nadler, A., Raveh, E., Yermiyahu, U., Green, S., 2006. Stress induced water content variations in mango stem by time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 510–520.
- Paço, T.A., Ferreira, M.L., Conceição, N., 2006. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. *Agric. Water Manage.* 85 (3), 305–313.
- Paw, U.K.T., Baldocchi, D.D., Meyers, T.P., Wilson, K.B., 2000. Corrections of eddy covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Bound.-Lay. Meteorol.* 97, 487–511.
- Rana, G., Katerji, N., Lorenza, F.de., 2005. Measuring and modelling of evapotranspiration of irrigated citrus orchard under Mediterranean conditions. *Agric. For. Meteorol.* 128, 199–209.
- Sammis, T.W., Mexal, J.G., Miller, D., 2004. Evapotranspiration of flood-irrigated pecans. *Agric. Water Manage.* 69, 179–190.
- Scott, C.A., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D., 2003. Mapping root zone soil moisture using remotely sensed optical imagery. *ASCE J. Irrig. Drain. Eng.* 129, 326–335.
- Simmons, L.J., Wang, J., Sammis, T.W., Miller, D.R., 2007. An evaluation of two inexpensive energy-balance techniques for measuring water use in flood-irrigated pecans. *Agric. Water Manage.* 88, 181–191.
- Tanner, B.D., Swiatek, E., Greene, J.P., 1993. Density fluctuations and use of the krypton hygrometer in surface flux measurements. In: *Proceedings of the National Irrigation Drainage Engineering*. Park City, UT, 21–23 July 1993, ASCE, New York, NY.
- Teixeira, A.H., de, C., Bastiaanssen, W.G.M., Bassoi, L.H., 2007. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in Sao Francisco river basin Brazil. *Agric. Water Manage.* 94, 31–42.
- Testi, L., Villalobos, F.J., Orgaz, F., 2004. Evapotranspiration of a young olive orchard in southern Spain. *Agric. For. Meteorol.* 121, 1–18.
- Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F.J., 2006. Variations in bulk canopy conductance of an irrigated olive (*Olea europaea* L.) orchard. *Environ. Exp. Bot.* 55, 15–28.
- Twine, T.E., Kustas, W.P., Norman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J., Wesely, M.L., 2000. Correcting eddy-covariance flux estimates over grassland. *Agric. For. Meteorol.* 103, 279–300.
- Van Dijk, A., Moene, A.F., de Bruin, H.A.R., 2004. The principles of surface flux physics: theory, practice and description of the Ecpack library. Internal Report. Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 99 pp.
- Vilalobos, F.J., Testi, L., Rizzalli, R., Orgaz, F., 2004. Evapotranspiration and crop coefficients of irrigated garlic (*Allium sativum* L.) in a semi-arid climate. *Agric. Water Manage.* 64, 233–249.
- Webb, E.K., Pearman, G.L., Leuning, R., 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 106, 85–100.
- Williams, L.E., Ayars, J.E., 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agric. For. Meteorol.* 132, 201–211.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B.E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R., Verma, S., 2002. Energy balance closure at Fluxnet sites. *Agric. For. Meteorol.* 113, 223–243.
- Yunusa, I.A.M., Walker, R.R., Lu, P., 2004. Evapotranspiration components from energy balance, sapflow and microlysimetry techniques for an irrigated vineyard in inland Australia. *Agric. For. Meteorol.* 127, 93–107.
- Zwart, S.J., Bastiaanssen, W.G.M., 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agric. Water Manage.* 69, 115–153.

ภาคผนวก ฉ

บทความสำหรับการเผยแพร่

แบบฟอร์มสรุปผลงานวิจัยเพื่อเผยแพร่

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย) การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และ
วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา: ระยะที่ 3.....
(ภาษาอังกฤษ) Study on Carbon and Water Balance to Estimate Carbon Footprint
and Water Footprint of Rubber Plantation: 3rd period.....
โดย (ชื่อนักวิจัย) รองศาสตราจารย์ ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์.....
(หน่วยงานที่สังกัด) ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....

ประเด็นปัญหาก่อนการวิจัย

ยางธรรมชาติ คือ green rubber เนื่องจากต้นยางพาราจะตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาไว้ใน
ต้นและราก และเพิ่มคาร์บอนสะสมในดินจากการร่วงของใบ กิ่ง ต้น ผล และการสลายของราก จึงช่วยลด
คาร์บอนในอากาศ ที่เป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลวิจัยเชิงปริมาณที่ชัดเจนใน
ระดับสากล ดังนั้น นักวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาวิจัยปริมาณคาร์บอนที่สวนยางพาราตรึงได้ และ
คาร์บอนที่สูญเสียไปจากการเกษตรกรรม

สำหรับวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารานั้น พบว่า มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพืช
เศรษฐกิจอื่นๆ หลายชนิด โดยมีค่ามากกว่าพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นๆ 2-100 เท่า ถึงแม้ว่าการประเมินค่าวอ
เตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราที่ปลูกในประเทศไทยจะมีค่าน้อยที่สุดในโลกก็ตาม (ประมาณ $6,900 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$)
และมีค่าน้อยกว่าค่า Global average ซึ่งมีค่าเท่ากับ $12,964 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ (Mekonnen and Hoekstra,
2010) อนึ่งแม้ว่าในงานวิจัยของ UNESCO-IHE (2010) ได้ประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราไทยลง
รายละเอียดแยกเป็นรายจังหวัดมากกว่า 70 จังหวัดก็ตาม แต่การประเมินเหล่านั้นยังไม่มี validation ซึ่ง
มีข้อจำกัดใช้ได้เฉพาะในเชิงเปรียบเทียบข้อมูลวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราที่ปลูกในพื้นที่ต่างๆ ระหว่าง
ประเทศ หรือเชิงเปรียบเทียบกับพืชอื่นๆ ในขณะนี้ประเทศไทย ยังไม่มีค่าสมบูรณ์ (Absolute value)
ของวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพารา และยังไม่มีข้อมูลจากการตรวจวัดจริง สำหรับใช้ในการ validate
แบบจำลอง นักวิจัยจึงเสนอให้ตรวจวัดวอเตอร์ฟุตพริ้นต์โดยตรงจากอัตราการคายระเหยของน้ำจากสวน
ยางพาราสู่บรรยากาศที่ตรวจวัดโดยตรงด้วยเทคนิค Eddy covariance ทารด้วยข้อมูลผลผลิตที่ได้ ตาม
วิธีการที่รายงานโดย Bhardwaj *et al.* (2010)

การแก้ไขปัญหโดยใช้ผลงานวิจัย

การศึกษามูลค่าคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยางพารา เป็นการวัดสมดุลคาร์บอนด้วยเทคนิค Eddy
Covariance ข้อมูลสมดุลคาร์บอนในปี 2556-2557 นั้น แสดงให้เห็นว่า ระบบนิเวศยางพารามีสถานะ
เป็น Carbon sink หรือ แหล่งกักเก็บคาร์บอน เนื่องจากต้นยางพารานั้นดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดย
กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นชีวมวลสะสมอยู่ในระบบ
นิเวศยางพารานั้นเอง

ข้อมูลจากการศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอน จากการเกษตรกรรมและการเก็บเกี่ยว สามารถ
นำไปใช้คำนวณประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment:

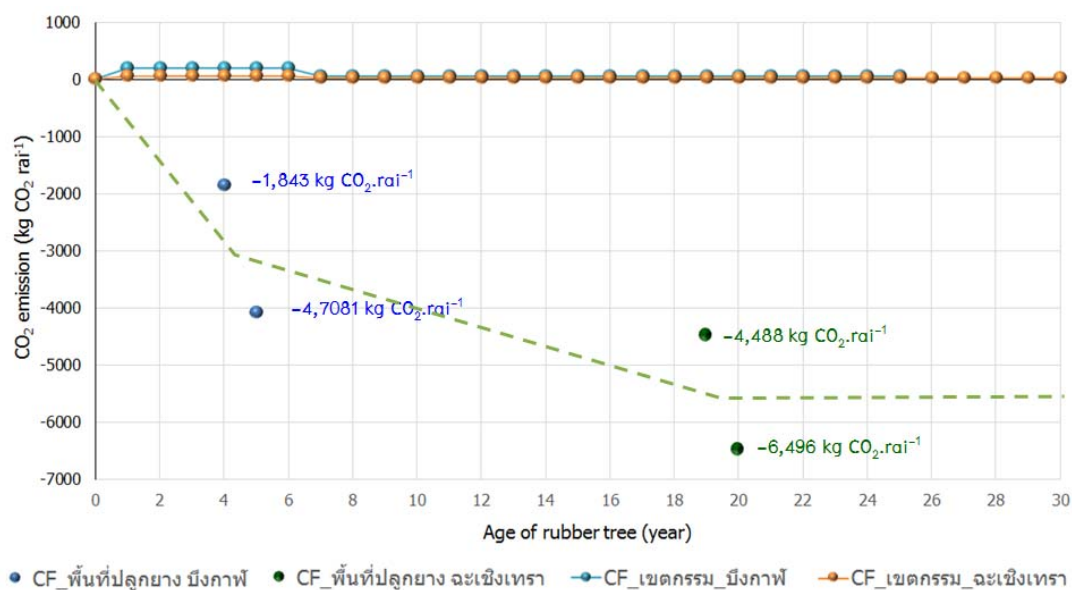
LCA) ได้ ทั้งนี้ ควรรายงานเพิ่มเติมข้อมูลสมดุลคาร์บอนที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance จากโครงการนี้ ซึ่งแสดงถึงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากที่ยางพาราธรรมชาติตรึงจากบรรยากาศและเก็บไว้ จะบ่งชี้ชัดว่า ยางพาราธรรมชาติ เป็น Green rubber ซึ่งจะช่วยให้ประเทศไทยสามารถใช้เป็นข้อได้เปรียบในการแข่งขันกับยางสังเคราะห์ได้

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา โดยมุ่งศึกษาความต้องการใช้น้ำของระบบนิเวศยางพารา เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพื้นที่ปลูกยางพารา ส่วนของ Green water ข้อมูลสมดุลน้ำ อันได้แก่ ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และการใช้น้ำของยางพารา (CWU) ซึ่งวัดได้โดยใช้เทคนิค Eddy Covariance ในปี 2556-2557 ทำให้ทราบว่า การคายระเหยน้ำของพื้นที่ปลูกยางพาราที่วัดได้นั้น มีค่าน้อยกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) ซึ่งประเมินตามวิธีของ Penman-Monteith ความแตกต่างดังกล่าวมากกว่าร้อยละ 50 อีกทั้งค่า K_c ที่วัดได้นั้นยังมีค่าต่ำกว่าค่า K_c ที่ใช้ในการคำนวณตามวิธีการของ FAO (Allen et al., 2006) ซึ่งมีค่า K_c ในช่วง Initial Mid season และ End season เท่ากับ 0.95 และ 1 ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าความต้องการใช้น้ำของยางพาราที่วัดได้จริงนั้น น้อยกว่าความต้องการใช้น้ำที่เคยประเมินด้วยแบบจำลอง CropWat เป็นอย่างมาก โดยค่าการใช้น้ำของยางพาราที่ใช้ในการคำนวณหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของพื้นที่ปลูกยาง ในปี 2556 และ 2557 พบว่า พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Green water) เท่ากับ 7.76 และ 5.60 m³ H₂O.kg ผลผลิต ตามลำดับ ค่าที่ปรากฏนั้น มีค่าน้อยกว่าที่รายงานโดย Mekonnen และ Hoekstra (2011) ซึ่งประเมินค่าโดยใช้แบบจำลอง CROPWAT 8.0 ที่รายงานการประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Green water) เท่ากับ 12,964 m³.ton⁻¹ หรือ 12.96 m³.kg ผลผลิต สำหรับ Site ที่ 2 นั้นเป็นยางอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด จึงยังไม่สามารถคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ได้ แต่ได้คำนวณค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยาง (Water use efficiency หรือ WUE, kg C.m⁻³ H₂O) เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสองพื้นที่ศึกษา พบว่าพื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 มีค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงกว่า Site ที่ 2 ส่วนค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่เกิดจากการใช้ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสีย สำหรับพื้นที่ Sites ที่ 1 และ 2 นั้น ปรากฏเฉพาะ Gray water ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.23 และ 2.17 m³ H₂O.kg ผลผลิต ตามลำดับ ซึ่งค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ดังกล่าวเป็นค่าที่ประเมินด้วยวิธีทาง LCA

ข้อมูลจากการศึกษาองค์ประกอบของน้ำ จากการเกษตรกรรมและการเก็บเกี่ยว สามารถนำไปใช้คำนวณประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ แบบ Grey water footprint ได้ ในขณะที่ ข้อมูลสมดุลน้ำที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance จากโครงการนี้ สามารถนำไปใช้เป็นค่าประเมิน Green water footprint ได้



รูปที่ 1 แปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ยางอายุมากและเปิดกรีดแล้ว ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา (ก) และ Site ที่ 2 ยางอายุน้อยและยังไม่เปิดกรีด ณ แปลงเกษตรกร อำเภopakคาคัด จังหวัดบึงกาฬ (ข)



รูปที่ 2 แสดงค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อไร่ เปรียบเทียบระหว่างค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยาง (CF_พื้นที่ปลูกยาง) Site ที่ 1 และ Site ที่ 2 กับและค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของการเขตกรรม ปุ๋ย ยา สารเคมีที่ใช้ และของเสีย (CF_เขตกรรม) ที่อายุต่างๆ ของต้นยางพารา

(ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปี....2557...)

ภาคผนวก ข

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

แบบฟอร์มการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

งานวิจัยเรื่อง การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และ
วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา: ระยะที่ 3

การนำไปใช้ประโยชน์

1. หน่วยงาน/บุคคลได้นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ทางด้านใด

(X) เชิงวิชาการ

การนำข้อมูลพื้นฐานที่ตรวจวัดได้ของแผนงานวิจัย อันได้แก่ ข้อมูลอัตราการคายน้ำ.....
ในการสอนเทียบค่าที่ได้จากการประเมินด้วยข้อมูล Remote Sensing.....

() เชิงสาธารณะ (มติดีการพัฒนาสังคม/ ชุมชน/ ท้องถิ่น)

() เชิงนโยบาย

() เชิงพาณิชย์

2. โปรดระบุถึงหลักฐานการนำไปใช้ประโยชน์ (พร้อมแนบหลักฐานประกอบ)

2.1 เอกสารขอความอนุเคราะห์ข้อมูล เลขที่ ศธ ๐๕๑๓.๑๐๘๐๖/๐๔๙๒ ลงวันที่ ๓๐ มีนาคม
๒๕๕๙ จากภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 เอกสารขอความอนุเคราะห์ข้อมูล เลขที่ ศธ ๐๕๑๓.๑๐๘๐๖/๐๔๙๓ ลงวันที่ ๓๐ มีนาคม
๒๕๕๙ จากภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หมายเหตุ ขณะนี้อยู่ระหว่างการดำเนินการปรึกษาหารือเกี่ยวกับการสนับสนุนข้อมูลที่ขอความ
อนุเคราะห์มาก

ผู้ให้ข้อมูล

(ลายเซ็นผู้ให้ผลประโยชน์จากผลการวิจัย)

ตำแหน่ง.....

วันที่ให้ข้อมูล.....



ที่ ศธ ๐๕๑๓.๑๐๘๐๖/๐๕๙๒

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
๕๐ ถนนงามวงศ์วาน จตุจักร
กรุงเทพมหานคร ๑๐๙๐๐

๓๐ มีนาคม ๒๕๕๙

เรื่อง ขอความอนุเคราะห์ข้อมูล

เรียน ดร.เจษฎา ภัทรเลาพงศ์ สาขาทรัพยากรเกษตรชีวภาพ ภาควิชาเกษตรและทรัพยากร
คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ
จังหวัดสกลนคร

อ้างถึง สัญญาเลขที่ ทส ๐๖๐๑/๔๐/๒๕๕๙ ลงวันที่ ๒๙ มกราคม ๒๕๕๙

ด้วยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้รับการ
การจ้างจากกรมทรัพยากรน้ำ ให้ดำเนินงาน “โครงการศึกษาความมั่นคงของลุ่มน้ำอย่างยั่งยืนทั้ง ๒๕ ลุ่มน้ำ” ซึ่งใน
การดำเนินโครงการดังกล่าว มีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูล actual evapotranspiration ของ Asia Flux ที่มีสถานี
ตรวจวัดที่ตั้งอยู่ในประเทศไทยจำนวน ๘ สถานี สำหรับนำมาใช้ในการสอบเทียบกับข้อมูล actual
evapotranspiration ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก remote sensing

ในการนี้ จึงขอความอนุเคราะห์ข้อมูล actual evapotranspiration แบบรายวันและรายเดือน
หรือหากไม่มีข้อมูล actual evapotranspiration ดังกล่าว ก็ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศแบบ
รายวันและรายเดือน ซึ่งประกอบด้วย (๑) Mean air temperature (๒) Minimum air temperature (๓)
Maximum air temperature (๔) Humidity (๕) Wind speed และ (๖) Sunshine duration สำหรับนำมาใช้
ในการคำนวณ actual evapotranspiration โดยมีช่วงระยะเวลาของข้อมูลที่จะใช้ในการสอบเทียบระหว่างปี ค.ศ.
๒๐๐๑-๒๐๑๓ และมีสถานีของ Asia Flux ที่จะขอความอนุเคราะห์ข้อมูลสถานี ๙๕ Rubber Flux จังหวัดบึงกาฬ
ทั้งนี้ ได้มอบหมายให้ นางสาวศิริกัญญา แสงสว่าง หมายเลขโทรศัพท์ ๐๘๑-๔๒๓-๓๓๑๒ ซึ่งเป็นนิสิตปริญญาเอก
ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเป็นผู้ช่วยวิจัยของโครงการนี้ เป็นผู้ติดต่อประสานงานเพื่อ
ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดให้ความอนุเคราะห์ และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบเกียรติ ฝ่องพุฒิ)

หัวหน้าโครงการฯ

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์ ๐-๒๗๔๗-๐๙๙๙ ต่อ ๑๙๐๓

โทรสาร ๐-๒๕๗๙-๑๕๖๗

ที่ ศบ ๐๕๓๓.๑๐๘๐๖/๐๔๔๓



มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
๕๐ ถนนงามวงศ์วาน จตุจักร
กรุงเทพมหานคร ๑๐๙๐๐

๓๐ มีนาคม ๒๕๕๙

เรื่อง ขอความอนุเคราะห์ข้อมูล

เรียน รศ.ดร.พูนพิภพ เกษมทรัพย์ ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อ้างถึง สัญญาเลขที่ ทส ๐๖๐๑/๔๐/๒๕๕๙ ลงวันที่ ๒๙ มกราคม ๒๕๕๙

ด้วยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้รับการจ้างจากกรมทรัพยากรน้ำ ให้ดำเนินงาน “โครงการศึกษาความมั่นคงของลุ่มน้ำอย่างยั่งยืนทั้ง ๒๕ ลุ่มน้ำ” ซึ่งในการดำเนินโครงการดังกล่าว มีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูล actual evapotranspiration ของ Asia Flux ที่มีสถานีตรวจวัดที่ตั้งอยู่ในประเทศไทยจำนวน ๘ สถานี สำหรับนำมาใช้ในการสอบเทียบข้อมูล actual evapotranspiration ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก remote sensing

ในการนี้ จึงขอความอนุเคราะห์ข้อมูล actual evapotranspiration แบบรายวันและรายเดือน หรือหากไม่มีข้อมูล actual evapotranspiration ดังกล่าว ก็ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลตัวแปรภูมิอากาศแบบรายวันและรายเดือน ซึ่งประกอบด้วย (๑) Mean air temperature (๒) Minimum air temperature (๓) Maximum air temperature (๔) Humidity (๕) Wind speed และ (๖) Sunshine duration สำหรับนำมาใช้ในการคำนวณ actual evapotranspiration โดยมีช่วงระยะเวลาของข้อมูลที่จะใช้ในการสอบเทียบระหว่างปี ค.ศ. ๒๐๐๑-๒๐๑๓ และมีสถานีของ Asia Flux ที่จะขอความอนุเคราะห์ข้อมูลสถานี 96 Rubber Flux จังหวัดฉะเชิงเทรา ทั้งนี้ ได้มอบหมายให้ นางสาวศิริกัญญา แสงสว่าง หมายเลขโทรศัพท์ ๐๘๑-๔๒๓-๓๓๑๒ ซึ่งเป็นนิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเป็นผู้ช่วยวิจัยของโครงการนี้ เป็นผู้ติดต่อประสานงานเพื่อขอความอนุเคราะห์ข้อมูลต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดให้ความอนุเคราะห์ และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ดร.พูนพิภพ เกษมทรัพย์ มอ.งพ.)

หัวหน้าโครงการฯ

ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทรศัพท์ ๐-๒๙๙๔๗-๐๔๔๔๔ ต่อ ๓๔๐๓

โทรสาร ๐-๒๕๗๙-๑๕๖๗