



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ
เพื่อใช้เป็นข้อมูลทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา”

โดย รศ.ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์ และคณะ

มกราคม 2557

สัญญาเลขที่ RDG5550006

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การศึกษาสมมูลคาร์บอนและน้ำ
เพื่อใช้เป็นข้อมูลทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา”

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

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช., สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

การเกษตรและอุตสาหกรรมยางพาราของประเทศไทย สร้างรายได้เลี้ยงชีพให้ประชาชนไทยประมาณ 10% ของประชากร (มากกว่า 6 ล้านคน) มีมูลค่ารวมกันมากกว่าปีละ 450,000 ล้านบาท โดยด้านการเกษตรผลิตยางพาราธรรมชาติในปริมาณมากกว่า 3 ล้านตัน และส่งออกไปขายเป็นอันดับหนึ่งในตลาดโลก โดยในปี พ.ศ. 2553 มูลค่าการส่งออกยางพาราสูงถึง 296,380 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2553) และฝ่ายอุตสาหกรรมได้นำยางพาราบางส่วนไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่าสามารถสร้างรายได้และอาชีพได้อีกเป็นจำนวนมาก

ในปัจจุบันการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ (Carbon footprint) หรือ LCA (Life cycle assessment) ไม่ได้นำปริมาณคาร์บอนที่เกิดขึ้นระหว่างแปลงปลูกพืชเข้ามาคิดด้วย แต่จะคิดเฉพาะกระบวนการแปรรูปเท่านั้น ทำให้ข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางธรรมชาติที่นำเสนอมีสมมูลคาร์บอนเป็นบวกเพราะมีการปลดปล่อยคาร์บอนออกมาในกระบวนการผลิต ซึ่งไม่แตกต่างจากยางสังเคราะห์ ทำให้ประเทศไทยเสียโอกาสที่จะใช้ประโยชน์จากจุดเด่นของยางธรรมชาติซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีการตรึงคาร์บอนไว้ในกระบวนการสร้างในระดับสวนยางพารา จึงเป็นผลดีต่อสภาพแวดล้อมเป็นอย่างยิ่ง การศึกษาสมมูลคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพาราเพื่อคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีความสำคัญมากที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางพาราธรรมชาติมีคาร์บอนฟุตพริ้นต์และ LCA ที่เป็นประโยชน์ต่อสภาพแวดล้อมมาก เพราะจะมีการตรึงคาร์บอนสุทธิในปริมาณมาก และเป็นข้อได้เปรียบในการแข่งขันของผลิตภัณฑ์ยางพาราธรรมชาติเป็นอย่างยิ่ง (เมื่อเทียบกับยางสังเคราะห์)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีความต้องการใช้ยางพาราเพิ่มขึ้นมากในโลก จึงทำให้มีการขยายพื้นที่ปลูกเพิ่มมากขึ้นในหลายประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จีน ลาว กัมพูชา พม่า เวียดนาม และอินเดีย ทำให้มีความเป็นห่วงว่าจะมีการทำลายป่า เพื่อนำพื้นที่มาปลูกยางพาราและจะส่งผลกระทบต่อวัฏจักรน้ำในภูมิภาค โดยมีนักวิจัยในระดับนานาชาติบางกลุ่มมีความคิดเห็นว่ายางพาราเป็นพืชที่ใช้น้ำมาก และการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินเพื่อขยายพื้นที่ปลูกยางพารานั้นอาจมีผลกระทบต่อน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ส่งผลกระทบต่อสร้างความเสียหายต่อสภาพแวดล้อมได้ ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อประเทศไทยจากข้อมูลการศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นต์โดยผู้อื่น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยเองต้องมีข้อมูลวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่ตรวจวัดจริงจากพื้นที่ปลูกสวนยางพาราภายในประเทศไทยเอง เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการตัดสินใจในระดับนโยบาย

นอกจากนี้ การศึกษาสมมูลคาร์บอนและน้ำของสวนยางพารา จะทำให้ทราบความสามารถในการสร้างชีวมวล ปริมาณการใช้น้ำของสวนยางพารา และทราบผลกระทบของปัจจัยสภาพแวดล้อมต่อการสร้างชีวมวลและการใช้น้ำของยาง ข้อมูลพื้นฐานนี้มีจำเป็นอย่างยิ่งต่อการประเมินผลกระทบของสภาวะโลกร้อนต่อยางพารา และยังช่วยให้การตัดสินใจเกี่ยวกับการเขตรกรรมตลอดจนการให้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถจัดการผลิตและจัดเขตพื้นที่ปลูกยางพาราได้ดีมากยิ่งขึ้น เป็นประโยชน์ทั้งในระดับเกษตรกรและระดับนโยบายของประเทศ

ชุดโครงการวิจัย “การศึกษาสมมูลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา” นี้ ถูกเสนอขึ้นเพื่อให้ประเทศไทยได้มีข้อมูลสมมูลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้คำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะการตรวจวัดสมมูลคาร์บอนและน้ำด้วยเทคนิค Eddy Covariance ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำการวัดการแลกเปลี่ยนของแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดยตรงในแปลงปลูก ซึ่งยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อนในแปลงยางพาราของประเทศไทย และเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำของระบบ โดยทำการศึกษาในยางพาราพันธุ์ RRIM600 ซึ่งปลูกมากที่สุดในประเทศไทย มีพื้นที่ศึกษา 2 แห่ง ได้แก่ (1) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา พื้นที่ประมาณ 50 ไร่ ต้นยางมีอายุ 19 ปี (ในปี 2556) และเปิดกรีดมาแล้ว 10 ปี และ (2) แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ พื้นที่ประมาณ 100 ไร่ ต้นยางมีอายุ 4 ปี (ในปี 2556)

การทำงานวิจัยในปีที่ 1 นี้ การบันทึกข้อมูลสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าคาร์บอนและวอเตอร์ฟุตปริ้นต์นั้นยังไม่ครบ 1 ปี หรือ 1 ฤดู เนื่องจากต้องใช้เวลาในช่วงเริ่มแรกของงานวิจัยในการสร้างหอคอย การจัดซื้อครุภัณฑ์ การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับบันทึกข้อมูล และการสอบเทียบค่าอุปกรณ์ทุกชนิดที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ยังทราบถึงการตอบสนองของสมดุลคาร์บอนของแปลงยางพาราต่อสภาพภูมิอากาศ ในช่วงระยะเวลาที่ดำเนินการเก็บข้อมูล

การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าคาร์บอนฟุตปริ้นต์ ข้อมูลผลผลิตคาร์บอนสุทธิ (NEP) ซึ่งคำนวณจากข้อมูลสมดุลคาร์บอนที่วัดได้จริงด้วยเทคนิค Eddy Covariance เป็นหนึ่งในข้อมูลการปล่อยแก๊สเรือนกระจกช่วงต้นน้ำ (Upstream emissions) ซึ่งยังไม่มีเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตปริ้นต์ของผลิตภัณฑ์เนื่องจากไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะสามารถนำมาคำนวณได้ แต่ในปัจจุบันซึ่งการพัฒนาของเทคโนโลยีและเทคนิคต่างๆ ทำให้เราสามารถตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของพื้นที่ปลูกพืชได้ และจากข้อมูลที่ได้จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของคาร์บอนที่ถูกกักเก็บไว้ในพื้นที่ปลูกยางนั้นมีค่าสูงกว่าร้อยละ 90 ดังนั้น ถ้าสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณคาร์บอนฟุตปริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการสร้างข้อได้เปรียบในการแข่งขันของผลิตภัณฑ์ยางพาราธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ ซึ่งในปัจจุบันปรากฏว่ามีการรายงานว่ายางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บางกลุ่มนั้นมีค่า Emission factor ที่ใกล้เคียงกัน (คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตปริ้นต์ของผลิตภัณฑ์, 2552)

การศึกษาสมดุลน้ำ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นต์ พบว่า ค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นต์ที่คำนวณได้จาก Site ที่ 2 ยางอายุน้อย (ผลผลิตมาจากการประเมิน) เท่ากับ $12.57 \text{ m}^3.\text{Kg yield}^{-1}$ และมีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานโดย Mekonnen และ Hoekstra (2011) ซึ่งประเมินค่าโดยใช้แบบจำลอง CROPWAT 8.0 ที่มีค่า $12.96 \text{ m}^3.\text{Kg yield}^{-1}$ ขณะที่ Site ที่ 1 ซึ่งยางพารามีอายุ 19 ปีและมีผลผลิตน้ำยางพาราที่เก็บได้จริง พร้อมกับค่าการใช้น้ำที่วัดได้ แต่กลับพบว่าค่าที่รายงานโดย Mekonnen and Hoekstra (2011) มีค่ามากกว่าถึง 63% ทั้งนี้จะมาจากสภาพแวดล้อมและตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองที่ Mekonnen and Hoekstra (2011) ใช้นั้นมีความแตกต่างจากสภาพแวดล้อมในความเป็นจริงใน Site ที่ทำการทดลอง นอกจากนี้ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) ที่ได้จากการวัดจริง และค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิง (ETo) จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจุลภูมิอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การใช้ น้ำของพืช (k_c) ตามวิธีการของ FAO Penman-Monteith พบว่า ความแตกต่างของค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงและจากการคำนวณสูงถึง 64% แสดงให้เห็นว่าการนำแบบจำลองมาใช้ในการประเมินวอเตอร์ฟุตปริ้นต์และค่าการคายระเหยน้ำนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องมีการปรับค่าตัวแปร ซึ่งได้แก่ ค่า k_c ที่เหมาะสมสำหรับการนำไป ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการ validate แบบจำลองว่าสามารถใช้งานได้ดีเพียงไรหลังการปรับแต่ง

การศึกษาอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำ จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมที่บันทึกได้นั้น พบว่า อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิจากทั้ง 2 Site มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เหมือนกัน แต่พบว่า การคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงจากทั้ง 2 Site มีความสัมพันธ์ในทาง

เดียวกับค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิและการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และ ปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้นั้นมีความแตกต่างกันระหว่าง Site ที่ศึกษา เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวิจัยในปีที่ 1 นั้นยังไม่มากพอ และข้อมูลมีความแปรปรวนสูงมาก อีกทั้งการบันทึกข้อมูลในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ณ แปลงศึกษาวิจัยเพียง 2 Site นี้ยังไม่เพียงพอต่อการนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการพยากรณ์สมดุลคาร์บอนและน้ำ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงความสามารถในการสร้างชีวมวล ความต้องการใช้น้ำของยางพารา และผลกระทบของสภาวะโลกร้อนต่อยางพารา ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะช่วยให้การตัดสินใจเกี่ยวกับการเกษตรกรรมมีประสิทธิภาพ สามารถจัดการการผลิตและจัดเขตพื้นที่ปลูกยางพาราได้ดีมากยิ่งขึ้น อันจะเป็นประโยชน์ทั้งในระดับเกษตรกรและระดับนโยบายต่อไป

ดังนั้น การดำเนินงานวิจัยจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินงานเป็นระยะเวลา 4 ปีเป็นอย่างน้อย เนื่องจากในการศึกษาสมดุลของคาร์บอนและน้ำนั้น ทีมวิจัยต้องการข้อมูล NEE จำนวนขั้นต่ำที่จะวิเคราะห์สถิติได้จำนวน 4 ชุดข้อมูล (จาก 4 ปีที่ศึกษา) ที่จะใช้ศึกษาปัจจัยกำหนดความแปรปรวนของความยาวนานของแต่ละช่วงของการเจริญของต้นยางใน 1 ฤดูปลูก ซึ่งจำเป็นต่อการนำไปใช้/พัฒนาแบบจำลองประเมินสมดุลคาร์บอนและน้ำของยางพารา ที่จะสามารถนำไปปรับใช้กับสวนยางพาราในสถานที่อื่น ๆ ของประเทศไทย และในช่วงระยะเวลาอื่น ๆ ต่อไป

ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลสมดุลคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพารา

Site	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา	แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ
ระยะเวลาในการบันทึกข้อมูล	11 เดือน (1 มิ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56)	6 เดือน (22 ต.ค. 55 – 30 เม.ย. 56)
NEE (Net Ecosystem Exchange, kg C ra ⁻¹)	-1,351.48	-414.21
GPP (Gross Primary Production, kg C ra ⁻¹)	4,112.07	609.70
R _e (Ecosystem Respiration, kg C ra ⁻¹)	2,760.59	195.49
R _s (Soil respiration, g C m ⁻²) ^{1/}	700	386
R _{tp} (Soil respiration from trenched plot, g C m ⁻²) ^{1/}	464	302
R _a (Autotrophic respiration, g C m ⁻²) ^{1/}	700- R _h	386- R _h
R _h (Heterotrophic respiration, g C m ⁻²) ^{1/}	464- R _d	302- R _d
R _d (Decomposing root-derived CO ₂ ef-flux, g C m ⁻²) ^{1/}	*ยังไม่สามารถคำนวณค่า R _d ได้ เนื่องจากข้อมูลยังไม่ครบปี*	
NEP (Net Ecosystem Production, kg C ra ⁻¹)	-1,351.48	-414.21
สถานะของระบบนิเวศยางพารา	Carbon sink	Carbon sink
ปริมาณคาร์บอนจากพื้นที่สวนยาง (kg C.ra ⁻¹)	-1,351.48	-334.11
ปริมาณคาร์บอนจากการเกษตรกรรม (kg C.ra ⁻¹)	9.02	13.23
ปริมาณคาร์บอนจากผลผลิตน้ำยาง (kg C.ra ⁻¹)	-129.11	- ^{2/}
ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (kg C.ra ⁻¹)	-1,471.57	-320.88

หมายเหตุ ^{1/} หมายถึง R_s สะสมในระยะเวลา 170 และ 146 วัน ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทราและแปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ตามลำดับ

^{2/} หมายถึง แปลงยางพาราของเกษตรกร จ. บึงกาฬ ยังไม่ได้เปิดกรีด

Carbon sink คือ ระบบนิเวศยางพาราทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งกักเก็บคาร์บอน (NEP < 0)

Carbon source คือ ระบบนิเวศยางพาราทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งปลดปล่อย (NEP > 0)

ตารางที่ 2 สรุปข้อมูลสมดุลน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา

Site	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา	แปลงเกษตรกร
ระยะเวลาในการบันทึกข้อมูล	11 เดือน (1 มิ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56)	6 เดือน (1 พ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56)
ETR (ค่าการคายระเหยน้ำ, mm)	799.82	271.86
ETo (ค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิงจากการคำนวณ, mm) ^{1/}	1,164.00	1,238.1
CWU (ค่าการใช้น้ำของยางพารา, m ³ rai ⁻¹)	1,279.69	377.51
ผลผลิต (kg rai ⁻¹)	160.97	30.04 ^{2/}
วอเตอร์ฟุตปริ้นต์ (m ³ . kg yield ⁻¹)	7.95	12.57

หมายเหตุ 1/ หมายถึง ค่าการคายระเหยน้ำที่คำนวณจากสมการ FAO Penman-Monteith
 2/ หมายถึง ข้อมูลที่ได้จากการประเมินจากเอกสารอ้างอิง

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยการศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา โดยมียัตถุประสงค์ที่จะการตรวจวัดสมดุลคาร์บอนและน้ำด้วยเทคนิค Eddy Covariance เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของระบบนิเวศยางพารา ซึ่งยังไม่เคยมีการศึกษามาก่อน และเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำของระบบนิเวศยางพารา

การวัดสมดุลคาร์บอนและน้ำของระบบนิเวศยางพารา พันธุ์ RRIM600 ดำเนินการศึกษาในพื้นที่ปลูกยางพารา 2 แห่ง ได้แก่ (1) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา พื้นที่ประมาณ 50 ไร่ ต้นยางมีอายุ 19 ปี (ในปี 2556) และเปิดกรีดมาแล้ว 10 ปี และ (2) แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ พื้นที่ประมาณ 100 ไร่ ต้นยางมีอายุ 4 ปี (ในปี 2556)

การศึกษาสมดุลคาร์บอนแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) การศึกษาสมดุลคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยางพาราเป็นการวัดสมดุลคาร์บอนด้วยเทคนิค Eddy Covariance (2) การศึกษาสมดุลคาร์บอนของการเกษตรกรรม ด้วยวิธี LCA และ (3) ปริมาณคาร์บอนที่สะสมอยู่ในผลผลิตน้ำยาง นอกจากการวัดสมดุลคาร์บอนแล้ว ในพื้นที่ศึกษาจะมีการวัดอัตราการหายใจของดิน และข้อมูลประกอบอื่นๆ ได้แก่ เส้นรอบวงโคนต้นยาง และชีวมวลของยางพาราที่ร่วงหล่นสู่พื้นของแปลงยางพารา เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการวิจัย พบว่า พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ช่วงระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 11 เดือน (1 มิ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56) มีปริมาณคาร์บอนที่สะสมในพื้นที่ปลูกยางพารา และผลผลิตน้ำยาง เท่ากับ 1,351.48 และ 129.11 kg C.ra⁻¹ และมีการปลดปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศเนื่องจากการเกษตรกรรมเท่ากับ 9.02 kg C.ra⁻¹ ดังนั้นในช่วงเวลาดังกล่าวคาร์บอนจะถูกเก็บกักไว้ในพื้นที่ปลูกยางและผลผลิตมีปริมาณเท่ากับ 1,471.57 kg C.ra⁻¹ สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ช่วงระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 6 เดือน (1 พ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56) มีปริมาณคาร์บอนที่สะสมในพื้นที่ปลูกยางพารา 334.11 kg C.ra⁻¹ และมีการปลดปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศเนื่องจากการเกษตรกรรมเท่ากับ 13.23 kg C.ra⁻¹ ดังนั้นในช่วงเวลาดังกล่าวคาร์บอนจะถูกเก็บกักไว้ในพื้นที่ปลูกยางมีปริมาณเท่ากับ 320.88 kg C.ra⁻¹ และเนื่องจากแปลงยางพารา Site ที่ 2 ยังมีอายุน้อยและยังไม่ได้เปิดกรีด ทำให้ยังไม่มีข้อมูลการสะสมของคาร์บอนในผลผลิตน้ำยาง จากข้อมูลปริมาณคาร์บอนที่ศึกษาใน 3 ส่วน ดังกล่าวข้างต้น จะพบว่าการสะสมคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยางนั้น Site ที่ 1 และ 2 นั้นมีปริมาณสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 90.73 และ 96.19 ตามลำดับ รองลงมาได้แก่ปริมาณคาร์บอนที่สะสมในเนื้อยาง คิดเป็นร้อยละ 8.67 สำหรับพื้นที่ Site ที่ 1 และการเกษตรกรรมต่างๆ มีการปลดปล่อยคาร์บอนออกมาในสัดส่วนที่น้อยที่สุด ต่อ 0.61 และ 3.81 สำหรับพื้นที่ Site ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

การวัดสมดุลน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา ดำเนินการควบคู่ไปกับการวัดอัตราการเคลื่อนของน้ำในลำต้นยาง (Sap flow) และปริมาณน้ำในดิน (Soil water content) เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ จากการวิจัย พบว่า พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ในช่วงเวลา 11 เดือน มีค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง (ETR) และค่าที่ได้จากการคำนวณ (ETo) เท่ากับ 799.82 และ 1,164.00 mm ค่าการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยางอายุนั้นมีค่าเท่ากับ 1,279.69 m³.ra⁻¹ ขณะที่ผลผลิตน้ำยาง มีค่าเท่ากับ 160.97 Kg ra⁻¹ ดังนั้นวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 จึงมีค่าเท่ากับ 7.96 m³.Kg yield⁻¹ และสำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ในช่วงระยะเวลา 6 เดือน มีค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง (ETR) และค่าที่ได้จากการคำนวณ (ETo) เท่ากับ 271.86 และ 1,238.1 mm ค่าการใช้น้ำของ

พื้นที่ปลูกยางอายุน้อยนี้มีค่าเท่ากับ $377.51 \text{ m}^3.\text{rai}^{-1}$ ขณะที่ผลผลิตน้ำยาง มีค่าเท่ากับ $30.04 \text{ Kg rai}^{-1}$ (เนื่องจากต้นยางยังไม่ได้เปิดกรีด ข้อมูลผลผลิตจึงประเมินจากข้อมูลอ้างอิง) ดังนั้นวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 2 จึงมีค่าเท่ากับ $12.57 \text{ m}^3.\text{Kg yield}^{-1}$

การศึกษาอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำ จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (Net Ecosystem Exchange, NEE) กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ และสภาพแวดล้อม สำหรับพื้นที่ศึกษาที่ 1 พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางผกผันกับค่า LAI, R_g และ RH แต่มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า VPD และไม่มีความสัมพันธ์กับค่า RH และสำหรับพื้นที่ศึกษาที่ 2 พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางผกผันกับค่า R_g , T_{air} และ VPD และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า RH

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง (Evapotranspiration, ETR) กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ และสภาพแวดล้อมของข้อมูลทั้งหมด สำหรับพื้นที่ศึกษาที่ 1 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า LAI และ R_g แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} , RH และ VPD และสำหรับพื้นที่ศึกษาที่ 2 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_g , T_{air} และ RH แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า VPD

Abstract

Study on carbon and water balance to estimate carbon footprint and water footprint of rubber plantation 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 which never been studied. 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 measured from 2 rubber plantation sites. (1) Chachoengsao Rubber Research Center, Chachoengsao province which the area was about 50 rais. A rubber tree was 19 years-old (in 2013) and has been tapped over 10 years. (2) Rubber plantation in Bueng Kan province. Area was about 100 rais. Rubber tree was 4 years-old (in 2013) and never been tapped.

Carbon balance measurement was separated into 3 parts, (1) carbon equivalent from rubber plantation that was measured by using Eddy Covariance technique, (2) carbon equivalent from cultural practice and addition by using LCA method and (3) carbon equivalent from rubber yield. Furthermore, soil respiration and other data e.g. girth and above ground biomass were observed. All of data were used to assess carbon footprint and analyzed effect of environmental factor on carbon flux. At Chachoengsao Rubber Research Center, data observation was done during June 1, 2012 to April 30, 2014 (Total 11 month). Carbon equivalent which were storage in rubber plantation and yield were 1,351.48 and 129.11 Kg C.ra⁻¹, respectively. Carbon equivalent which was emitted from cultural practice and addition was 9.02 Kg C.ra⁻¹. Total carbon equivalent from 3 parts represent that carbon about 1,471.57 Kg C.ra⁻¹ was stored. At Rubber plantation in Bueng Kan province, data observation was done during September 1, 2012 to April 30, 2014 (Total 6 month). Carbon equivalent which were storage in rubber plantation was 334.11 Kg C.ra⁻¹. Carbon equivalent which was emitted from cultural practice and addition was 13.23 Kg C.ra⁻¹. Total carbon equivalent from 3 parts represent that carbon about 320.88 Kg C.ra⁻¹ was stored. Carbon equivalent from Site 1 and 2 found that almost of carbon equivalent appeared in rubber plantation, 90.73 and 96.19%, respectively. Follow with carbon equivalent from yield (8.67%, Site 1) and cultural practice (0.61 and 3.81% for Site 1 and 2), respectively.

Water flux of rubber plantation was measured concurrent with Sap flow and Soil water content. Both data was used to assess water footprint and analyzed effect of environmental factor on water flux. At Chachoengsao Rubber Research Center, data observation was done during June 1, 2012 to April 30, 2014 (Total 11 month). The result shown that sum of evapotranspiration (ETR) and reference evapotranspiration rate (ET_o) were 799.82 and 1,164.00 mm, respectively. Crop water use (CWU) was 1,279 m³.rai⁻¹ and amount of latex was 160.97 Kg rai⁻¹. Water footprint of this plantation was 7.96 m³.Kg yield⁻¹. For rubber plantation at Bueng

Kan province, data observation was done during September 1, 2012 to April 30, 2014 (Total 6 month). Sum of ETR and (ET_o) were 271.86 and 1,238.1 mm, respectively. Crop water use (CWU) was 377.51 m³.rai⁻¹ and amount of latex was 30.04 Kg rai⁻¹ (rubber tree in this plantation are not tapped, yield was estimated by using data from reference). Water footprint of this plantation was 12.57 m³. Kg yield⁻¹.

Effect of environmental factors on carbon and water flux was studied by using correlation analysis. In Chachoengsao Rubber Research Center, the result showed that net ecosystem exchange (NEE) decrease with increasing of leaf area index (LAI), Global solar radiation (R_g) and RH. NEE increase with increasing of Vapor pressure deficit (VPD) and there are no relationship between NEE and air temperature (T_{air}). For rubber plantation in Bueng Kan province, NEE decrease with increasing of R_g, T_{air} and VPD. And NEE increase with increasing of RH.

In Chachoengsao Rubber Research Center, the result showed that Evapotranspiration (ETR) increased with increasing of LAI and R_g. And there are no relationship between ETR and value of T_{air}, RH and VPD. For rubber plantation in Bueng Kan province, ETR increased with increasing of R_g, T_{air} and RH. And there are no relationship between ETR and VPD.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และประสานงานด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์วิจัยยางมะเขือเทศ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย อันได้แก่ แปลงทดลองยางพารา อ. สนาบชัยเขต จ. ฉะเชิงเทรา และขอขอบคุณ คุณวิศิษฐ์ จิรวิวงศ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย อันได้แก่ แปลงปลูกยางพารา อ. ปากคาด จังหวัดบึงกาฬ สำหรับใช้ในการศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ

ขอบคุณนักวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยของโครงการทุกท่านที่ช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	จ
ภาคผนวก	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 แผนงานของโครงการ	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 การศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอนพุตปรีนธ์ที่เกิดจากกิจกรรมของต้น ยางพาราและดิน	6
2.1 ศึกษาสมมูลของคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพาราด้วยเทคนิค Eddy Covariance	6
2.1.1 ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ	6
2.1.2 สำรวจพื้นที่สวนยางพาราที่มีอายุน้อยและยังไม่เริ่มเปิดกรีด สำหรับเก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพารา ก่อนเปิดกรีด	11
2.1.3 การสร้างหอคอย และการติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่สวนยางพารา	12
2.1.4 ผลการศึกษาสมมูลคาร์บอนของสวนยางพารา	16
2.2 การวัดอัตราการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือผิวดิน (Soil respiration)	26
2.2.1 การดำเนินงานวิจัย	26
2.2.2 ผลการดำเนินงานวิจัย	33
2.3 ข้อมูลประกอบอื่น ๆ	39
2.3.1 การเปลี่ยนแปลงขนาดของลำต้น (Girth)	39
2.3.2 การศึกษาชีวมวลของยางพาราที่ร่วงหล่นสู่พื้น (Litter trap) ของ แปลงยางพารา	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การคำนวณค่า GPP, NEP และ NBP	47
2.5 ค่า Carbon equivalent ที่ใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาคาร์บอนฟุตพริ้นต์	51
บทที่ 3 การศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเขตกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น	53
3.1 การดำเนินโครงการ	53
3.2 พื้นที่ศึกษาข้อมูล	60
3.3 ผลการดำเนินงาน	61
3.4 สรุปผลการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์	70
บทที่ 4 การศึกษาสมมูลน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำอเวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา	74
4.1 ศึกษาสมมูลของน้ำของพื้นที่ปลูกยางพาราด้วยเทคนิค Eddy Covariance	74
4.2 ความแปรปรวนของสมมูลน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา	76
4.3 การคำนวณอเวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา	85
บทที่ 5 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมมูลคาร์บอนและน้ำของสวนยางพารา	86
5.1 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมมูลคาร์บอน	86
5.2 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมมูลน้ำ	94
5.3 อิทธิพลของค่า VPD ต่อค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c)	103
บทที่ 6 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	108
เอกสารอ้างอิง	113

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1-1	3
ตารางที่ 1-2	4
ตารางที่ 1-3	5
ตารางที่ 2-1	10
ตารางที่ 2-2	49
ตารางที่ 2-3	49
ตารางที่ 2-4	51
ตารางที่ 3-1	54
ตารางที่ 3-2	56
ตารางที่ 3-3	58
ตารางที่ 3-4	70
ตารางที่ 3-5	70
ตารางที่ 3-6	73
ตารางที่ 3-7	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 4-1	แสดงค่าผลผลิตน้ำยาง (yield, kg.Rai-1), ค่าการคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, mm) และค่าการใช้น้ำของยางพารา (Crop Water Use) ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556)	84
ตารางที่ 4-2	แสดงค่าผลผลิตน้ำยาง (yield, kg.Rai-1), ค่าการคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, mm) และค่าการใช้น้ำของยางพารา (Crop Water Use) ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)	84
ตารางที่ 4-3	แสดงค่าอัตราการดูดซับน้ำของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)	84
ตารางที่ 5-1	แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) กับดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ บึงกาฬ	89
ตารางที่ 5-2	แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง (ETR) กับดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ บึงกาฬ	96
ตารางที่ 5-3	แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (K_c) กับปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (VPD) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ	105
ตารางที่ 6-1	สรุปข้อมูลของพื้นที่ศึกษา	108
ตารางที่ 6-2	สรุปข้อมูลสมดุลคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพารา	110
ตารางที่ 6-3	สรุปข้อมูลสมดุลน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา	110
ตารางที่ 6-4	แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) กับดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ บึงกาฬ	112
ตารางที่ 6-5	แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง (ETR) กับดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ บึงกาฬ	112

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2-1	แปลงยางพารา Site ที่ 1 ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนาบชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา	7
รูปที่ 2-2	แปลงยางพารา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร อำเภอบางคาค จังหวัดบึงกาฬ	8
รูปที่ 2-3	ครุภัณฑ์ที่ดำเนินการซ่อมแซม ตรวจสอบความแม่นยำในการวัดค่าและเปลี่ยนใหม่ในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนาบชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา	9
รูปที่ 2-4	การสำรวจพื้นที่ปลูกยางพาราทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อใช้เป็นพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2	11
รูปที่ 2-5	หอคอย ความสูง 15 เมตร ใช้สำหรับติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภอบางคาค จังหวัดบึงกาฬ	12
รูปที่ 2-6	การติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภอบางคาค จังหวัดบึงกาฬ	13
รูปที่ 2-7	ชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร ณ อำเภอบางคาค จังหวัดบึงกาฬ	14
รูปที่ 2-8	การติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภอบางคาค จังหวัดบึงกาฬ	15
รูปที่ 2-9	การติดตั้งระบบ Solar panel บนหอคอย ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภอบางคาค จังหวัดบึงกาฬ	15
รูปที่ 2-10	ความเข้มแสงสะสม (Cumulative light, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{day}^{-1}$) และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (T_{air}) ของแปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)	18
รูปที่ 2-11	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยและปริมาณน้ำฝนรายวันของแปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)	19

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2-12	ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, R_g) และปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, R_n) รวมต่อวันที่แปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)	20
รูปที่ 2-13	อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (Net ecosystem exchange, NEE) ของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)	23
รูปที่ 2-14	ความแปรปรวน Flux ของคาร์บอน (NEE) ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air Temp.) ความชื้น (RH) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor Pressure Deficit, VPD) ในรอบวันและในแต่ละฤดู ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา	24
รูปที่ 2-15	แสดงความแปรปรวนอัตราการแลกเปลี่ยนของคาร์บอนสุทธิ (NEE) ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air Temp.) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor Pressure Deficit, VPD) ในรอบวันและในแต่ละฤดู ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ในวันที่ 11 เมษายน 2556	25
รูปที่ 2-16	Plot ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการหายใจของแปลงศึกษา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ (รูปล่าง)	27
รูปที่ 2-17	การติดตั้ง Collar ในพื้นที่ของ Control (Collar no. 1-8) และ Trench plot (Collar no. 2-7) (● = ต้นยางพารา)	28
รูปที่ 2-18	การกำหนดพื้นที่ในการขุดดินเพื่อทำ Trench plot และเก็บตัวอย่างราก และดิน	28
รูปที่ 2-19	การขุดดินเพื่อทำ Trench plot	29
รูปที่ 2-20	การติดตั้ง sensor วัดอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดิน (ภาพซ้าย) และ การหาขนาดรากที่อยู่ภายใน Trench plot (ภาพขวา)	29

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2-21	การนำพลาสติกพันรอบพื้นผิวด้านข้างของ Trench plot เพื่อป้องกันไม่ให้รากเจริญเข้ามาใน Trench plot	30
รูปที่ 2-22	การทำรั้วกันรอบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเดินเข้ามาในส่วนของ Trench plot	30
รูปที่ 2-23	Trench plot ที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว พร้อมกับชุดอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดินแบบอัตโนมัติ	31
รูปที่ 2-24	เครื่องวัดอัตราการหายใจของดิน (Soil CO ₂ Flux System) รุ่น LI-8100 [®] (LI-COR, Inc., Ltd., U.S.A.)	32
รูปที่ 2-25	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิดิน (T handle thermocouple) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินได้	32
รูปที่ 2-26	อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำในดิน (Soil moisture sensor) รุ่น EC-5 (Decagon Devices, Inc.m U.S.A.) ซึ่งอ่านค่าที่วัดได้โดยใช้ ProCheck (Decagon Devices, Inc.m U.S.A.)	33
รูปที่ 2-27	ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดินต่อวัน (g C m ⁻² d ⁻¹) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)	35
รูปที่ 2-28	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดิน (°C) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)	36
รูปที่ 2-29	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน (%) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)	37
รูปที่ 2-30	ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น โดยประกอบด้วย ระบบควบคุมการทำงานของชุดอุปกรณ์และการไหลเวียนของอากาศภายในระบบ (รูปบน) และ Chamber สำหรับวัดอัตราการหายใจของดิน (รูปล่าง)	38
รูปที่ 2-31	Multi-channel automated chamber systems ซึ่งติดตั้งในพื้นที่ศึกษา (รูปซ้าย) และตัวอย่างของ Portable automated chamber system (รูปขวา) ที่พัฒนาขึ้นโดย Dr. Naishen Liang (Liang, 2010)	39
รูปที่ 2-32	การกระจายของขนาด Girth (mm.) ของต้นยางพาราในแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา	40
รูปที่ 2-33	การกระจายของขนาด Girth (mm.) ของต้นยางพาราในแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ	41

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2-34	การติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา	43
รูปที่ 2-35	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งของใบและพื้นที่ใบ ที่สุ่มเก็บตัวอย่าง ใบจากแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จำนวน 200 ตัวอย่าง จากตัวอย่างใบ สามารถคำนวณ Specific Leaf Area จาก สมการที่ 8 ได้ $126.69 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ (ภาพบน) และจากแปลงยางพารา จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งเก็บตัวอย่างใบเป็นชุดๆ ละ 5 10 20 80 160 และ 320 ใบ จำนวน 4 ซ้ำ สามารถคำนวณ Specific Leaf Area จาก สมการที่ 8 ได้ $137.66 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ (ภาพล่าง)	44
รูปที่ 2-36	แผนที่แสดงตำแหน่งที่สุ่มติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองย่อย ใน แปลงปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ (● ต้นยางพารา, ■ Litter trap)	45
รูปที่ 2-37	ภาพแสดงการติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองย่อย ในแปลงปลูก ยางพาราจังหวัดบึงกาฬ	45
รูปที่ 2-38	ความแปรปรวนของค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ของแปลงปลูกยางพารา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง) ซึ่งประเมินจากความสัมพันธ์กับค่า Specific leaf area (SLA) และข้อมูลจาก Litter trap	46
รูปที่ 2-39	ค่าสะสมรายเดือนของผลผลิตคาร์บอนสุทธิ (NEP, Net Ecosystem Production), อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP, Gross primary production) และ การหายใจทั้งหมดของระบบนิเวศ (R_e , Ecosystem respiration) ของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)	50
รูปที่ 2-40	แสดงสัดส่วนของค่า Carbon equivalent ของข้อมูลการปล่อยแก๊ส เรือนกระจกของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (ข้อมูล 11 เดือน ตั้งแต่ 1 มิ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (6 เดือน ตั้งแต่ 1 พ.ย. 55-30 เม.ย. 56)	52
รูปที่ 3-1	ขั้นตอนโดยทั่วไปของการวิเคราะห์บัญชีรายการ	55
รูปที่ 3-2	ตัวอย่างการเก็บข้อมูลเพื่อจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมในรูปแบบของ กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์	57
รูปที่ 3-3	แผนภาพแสดงวิธีการคิดค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก	59

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3-4	แปลงยางพารา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร ณ อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ	62
รูปที่ 3-5	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา จังหวัดบึงกาฬ	71
รูปที่ 3-6	ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา	72
รูปที่ 4-1	การคายระเหยของน้ำในแต่ละวัน (Evapotranspiration, ETR) ของแปลงปลูกยางพารา ซึ่งวัดได้ด้วยวิธี Eddy Covariance ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)	77
รูปที่ 4-2	ปริมาณการใช้น้ำของพืช (Crop Water Use) ของแปลงปลูกยางพารา ได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)	78
รูปที่ 4-3	การคายน้ำของพืช (Transpiration) ของแปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (26 มี.ค. 2556 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 มี.ค. 56 - 30 เม.ย. 56)	79
รูปที่ 4-4	ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient; Kc) แปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)	80
รูปที่ 4-5	ความชื้นของดิน (Soil Water Content) ที่ระดับต่างๆ ของแปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (22 พ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (19 ก.พ. 56 - 30 เม.ย. 56)	81
รูปที่ 4-6	แสดงความแปรปรวนการคายระเหยน้ำที่วัดได้ (ETR) การคายระเหยน้ำที่ได้จากการคำนวณ (ETo) ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air Temp.) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor Pressure Deficit, VPD) ในรอบวันและในแต่ละฤดู ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ในวันที่ 11 เมษายน 2556	82

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4-7	ความแปรปรวนของการคายระเหยน้ำที่วัดได้ (ETR) ค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิงจากการคำนวณ (ETo) ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air Temp.) ความชื้น (RH) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor Pressure Deficit, VPD) ในรอบวันและในแต่ละฤดู ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา	83
รูปที่ 5-1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) และดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง)	90
รูปที่ 5-2	การตอบสนองต่อแสง (PPFD, $\mu\text{mol Photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ของอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ในช่วงเวลาต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (O = ค่า NEE ที่วัดได้จริง และ — = ค่า NEE ที่ได้จากการประเมินด้วย Michaelis-Menten hyperbolic rectangular equation)	91
รูปที่ 5-3	การตอบสนองต่อแสง (PPFD, $\mu\text{mol Photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ของอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ในช่วงเวลาต่างๆ ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (O = ค่า NEE ที่วัดได้จริง และ — = ค่า NEE ที่ได้จากการประเมินด้วย Michaelis-Menten hyperbolic rectangular equation)	92
รูปที่ 5-4	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง)	93
รูปที่ 5-5	ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา	97
รูปที่ 5-6	ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และปริมาณแสงสะสมในรอบวัน (R_d) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง)	98
รูปที่ 5-7	ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และอุณหภูมิอากาศ (Tair) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง)	99
รูปที่ 5-8	ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง)	100

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 5-9	ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับ เพิ่มเติม (Vapor pressure deficit, VPD) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา	101
รูปที่ 5-10	ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับ เพิ่มเติม (Vapor pressure deficit, VPD) ณ Site ที่ 2 แปลงยาง เกษตรกร จ. บึงกาฬ	102
รูปที่ 5-11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (K_c) และปริมาณไอน้ำที่ อากาศรับเพิ่มเติม (Vapor pressure deficit, VPD) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา	106
รูปที่ 5-12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (K_c) และปริมาณไอน้ำที่ อากาศรับเพิ่มเติม (Vapor pressure deficit, VPD) ณ Site ที่ 2 แปลง ยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ	107

ภาคผนวก

	หน้า
ภาคผนวก ก ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ	116
ภาคผนวก ข ภาพ System boundary ที่รวม กิจกรรมที่ใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์	122
ภาคผนวก ค ข้อมูลประกอบในการศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ คาร์บอนฟุตพริ้นต์ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์	124
ภาคผนวก ง การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำของพื้นที่ปลูกยางพาราด้วยวิธี Eddy Covariance	126
ภาคผนวก จ สมมติฐานการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์	131
ภาคผนวก ฉ Verification Sheet แปลงปลูกยางพารา จังหวัดบึงกาฬ	135
ภาคผนวก ช Verification Sheet แปลงปลูกยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา	145
ภาคผนวก ซ ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor)	155
ภาคผนวก ฌ เอกสารอ้างอิงประกอบการวิจัย	157
ภาคผนวก ฎ ตอบข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิต่อร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการ	173

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ยางธรรมชาติ คือ **Green rubber** เนื่องจากต้นยางพาราจะตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาไว้ในต้นและราก และเพิ่มคาร์บอนสะสมในดินจากการร่วงของใบ กิ่ง ต้น ผล และการสลายของราก ซึ่งช่วยลดคาร์บอนในอากาศ ที่เป็นแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลวิจัยที่ชัดเจนและน่าเชื่อถือได้ในระดับสากล ว่ายางธรรมชาติช่วยลดคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศได้มากเท่าใด (คาร์บอนฟุตพริ้นต์) ดังนั้น นักวิจัยจึงต้องศึกษาวิจัยปริมาณคาร์บอนที่สวนยางพาราตรึงได้ คาร์บอนที่สูญเสียไปจากการขุดกรรม 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 Co-variance ซึ่งเป็นเทคนิคที่ตรวจวัดการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างสวนยางพาราและบรรยากาศโดยตรงที่น่าเชื่อถือที่สุด
2. องค์ประกอบของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการขุดกรรม 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 ซึ่งเป็นเทคนิคที่ตรวจวัดการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างสวนยางพาราและบรรยากาศโดยตรงที่น่าเชื่อถือที่สุดในการศึกษาองค์ประกอบคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากกิจกรรมของต้นยางพาราและดิน และจะศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการขุดกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดจากการปลูกยางพารา โดยวิธีการประเมินจากการขุดกรรมมาตรฐานร่วมกับการสำรวจ (Hillier *et al.*, 2009) และศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่เกิดจากการเก็บเกี่ยวโดยใช้ข้อมูลผลผลิต

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

ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยเองต้องมีข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นต์ที่ตรวจวัดจริงจากพื้นที่ปลูกเป็นของตนเอง เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการตัดสินใจในเชิงนโยบาย และเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันให้ยางธรรมชาติของประเทศไทย

อนึ่ง กระบวนการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ หรือ LCA นั้นยินยอมให้สามารถนำคาร์บอนที่เก็บสะสมไว้ในต้นยางพารามาคิดคำนวณฟุตพริ้นต์ได้ ถ้ามีข้อมูลและหลักฐานวิทยาศาสตร์อย่างเพียงพอ นักวิจัยจึงเสนอชุดโครงการนี้ เพื่อให้ประเทศไทยได้มีข้อมูลสมดุลคาร์บอนเพื่อใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางพารา

นอกจากนี้ การศึกษาสมดุลของคาร์บอนของสวนยางพารา จะทำให้ทราบความสามารถในการสร้างชีวมวลของยางพารา และทราบผลกระทบของปัจจัยสภาพแวดล้อมต่อการสร้างชีวมวล เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการประเมินผลกระทบของสภาวะโลกร้อนต่อยางพารา และยังช่วยให้สามารถตัดสินใจเกี่ยวกับการเขตกรรมและการจัดการการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เป็นประโยชน์ทั้งในระดับเกษตรกรและระดับนโยบายของประเทศ

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

“วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ คือ ปริมาณน้ำ (freshwater) ในการผลิตของผลิตภัณฑ์ โดยวัดปริมาณน้ำทั้งหมดที่เกี่ยวข้องอยู่ในห่วงโซ่อุปทาน”

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพืชเศรษฐกิจอื่น ๆ ทั้งหมดทุกชนิด โดยมีค่ามากกว่าพืชเศรษฐกิจชนิดอื่น ๆ 2-100 เท่า ถึงแม้ว่าการประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราที่ปลูกในประเทศไทยจะมีค่าน้อยที่สุดในโลกก็ตาม ($6,900 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$) (Mekonnen and Hoekstra, 2011) อนึ่งแม้ว่าในงานวิจัยของ UNESCO-IHE (2010) ได้ประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราไทยลงรายละเอียดแยกเป็นรายจังหวัดมากกว่า 70 จังหวัดก็ตาม แต่การประเมินเหล่านั้นยังไม่มี validation ซึ่งมีข้อจำกัดใช้ได้เฉพาะในเชิงเปรียบเทียบข้อมูลวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพาราที่ปลูกในพื้นที่ต่างๆ ระหว่างประเทศ หรือเชิงเปรียบเทียบกับพืชอื่น ๆ ในขณะนี้ประเทศไทยจึงยังไม่มีค่าสมบูรณ์ (absolute value) ของวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของยางพารา และยังไม่มีข้อมูลจากการตรวจวัดจริงสำหรับการ validate แบบจำลอง นักวิจัยจึงเสนอให้ตรวจวัดวอเตอร์ฟุตพริ้นต์โดยตรงจากอัตราการคายระเหยของน้ำจากสวนยางพาราสู่บรรยากาศที่ตรวจวัดโดยตรงด้วยเทคนิค Eddy covariance ตามที่รายงานโดย Bhardwaj *et al.* (2010) หารด้วยข้อมูลผลผลิตที่ได้

2. วัตถุประสงค์

จัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา จากการตรวจวัดอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำระหว่างสวนยางพาราและบรรยากาศด้วยเทคนิค Eddy covariance ร่วมกับการศึกษาองค์ประกอบของคาร์บอนและน้ำจากการเกษตรกรรมและการเก็บเกี่ยว

3. แผนงานของโครงการ

โครงการประกอบด้วย 2 โครงการย่อย ได้แก่

โครงการย่อยที่ 1 การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

โครงการย่อยที่ 2 การศึกษาสมดุลน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

แผนงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำเทคนิค Eddy correlation ไปใช้ตรวจวัดสมดุลคาร์บอนและน้ำของสวนยางพาราใน 2 พื้นที่ซึ่งมีสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน และนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการตัดสินใจเชิงนโยบาย

พื้นที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 2 เขตพื้นที่ ซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกยางดั้งเดิมทางตะวันออก และพื้นที่ใหม่ ได้แก่ (1) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีสวนยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 18 ปี (พ.ศ. 2555) และ (2) แปลงปลูกยางพาราของเกษตรกร จังหวัดนครพนม-บึงกาฬ-หนองคาย ซึ่งเป็นพื้นที่ในเขตพื้นที่การปลูกสวนยางพาราระยะที่ 2 แปรแผนไร่ และต่อเนื่องจากระยะที่ 2 หนึ่งล้านไร่ อนึ่ง พื้นที่ศึกษา (2) เป็นการศึกษาในสวนยางพาราปลูกใหม่ การศึกษาใน 2 พื้นที่ เพื่อเปรียบเทียบสมดุลคาร์บอนและคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางที่มีอายุและสภาพแวดล้อมต่างกัน อนึ่งสวนยางในพื้นที่ (2) เป็นสถานที่ที่ยังไม่เปิดกรีต โดยจะมีการเปิดกรีตในปี 2556 หรือ 2557 จึงยังคำนวณคาร์บอนและวอเตอร์ฟุตพริ้นต์โดยตรงไม่ได้ ในปีแรกที่ทำการศึกษา แต่จะให้ข้อมูลการตรึงคาร์บอนและการใช้น้ำในช่วงเวลาก่อนที่สวนยางจะให้ผลผลิต ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ตลอดอายุปลูกได้

ตารางที่ 1-1 แผนของโครงการวิจัย

ระยะเวลา	กิจกรรม
6 เดือนที่ 1	1. จัดซื้อครุภัณฑ์ในการดำเนินงานวิจัย 2. ติดตามความก้าวหน้าของการดำเนินงานของโครงการย่อยทุกเดือน และประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ทุก 2 เดือน
6 เดือนที่ 2	1. ติดตามความก้าวหน้าของการดำเนินงานของโครงการย่อยทุกเดือน และประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ทุก 2 เดือน 2. ประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย และจัดทำรายงานผลการวิจัย

ตารางที่ 1-2 แผนของโครงการย่อยที่ 1 การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอน
ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราในระยะเวลา 1 ปี

กิจกรรม
1. Eddy covariance 1.1 site ที่ 1: ยางอายุมาก 1.1.1 ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ 1.1.2 เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพารา 1.2 site ที่ 2: สวนยางที่มีอายุน้อย และยังไม่เริ่มเปิดกรีด 1.2.1 สำรวจพื้นที่สวนยางพาราที่มีอายุน้อยและยังไม่เริ่มเปิดกรีด สำหรับเก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพาราก่อนเปิดกรีด 1.2.2 ติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่สวนยางพารา 1.2.3 เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพารา 2. Soil respiration 2.1 site ที่ 1: ยางอายุมาก 2.1.1 สร้าง Trench Plot และ ติดตั้ง Soil collar 2.1.2 เก็บข้อมูล Soil CO₂ efflux ของสวนยางพาราอายุมาก 2.2 site ที่ 2: สวนยางที่มีอายุน้อย และยังไม่เริ่มเปิดกรีด 2.2.1 สร้าง Trench Plot และติดตั้ง Soil collar ในพื้นที่สวนยางพารา 2.2.2 เก็บข้อมูล Soil CO₂ efflux ของสวนยางพาราปลูกใหม่ และสวนยางพาราที่เริ่มเปิดกรีด 3. เก็บข้อมูลประกอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลด้าน Biometric และ Litter 4. การคำนวณค่า GPP, NEP และ NBP 5. คาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น 6. การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ 6.1 site ที่ 1: สวนยางพาราอายุมาก 6.2 site ที่ 2: สวนยางพาราอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด (ในกรณีที่ติดตั้งชุดอุปกรณ์และเก็บข้อมูลได้แล้ว โดยจะคำนวณจากค่าประเมินผลผลิตในอนาคตตลอดอายุเก็บเกี่ยว)

ตารางที่ 1-3 แผนของโครงการย่อยที่ 2 การศึกษาสมมูลน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ในระยะเวลา 1 ปี

กิจกรรม
1. Eddy covariance 1.1 site ที่ 1: ยางอายุมาก 1.1.1 ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ 1.1.2 เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของน้ำของสวนยางพารา 1.2 site ที่ 2: สวนยางที่มีอายุน้อย และยังไม่เริ่มเปิดกรีด 1.2.1 สำรวจพื้นที่สวนยางพาราอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด สำหรับเก็บข้อมูลการใช้น้ำของสวนยางพาราก่อนเปิดกรีด 1.2.2 ติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่สวนยางพารา 1.2.3 เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของวอเตอร์ของสวนยางพารา 2. เก็บข้อมูลประกอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลจาก sap flow และ soil water content ผลผลิต 3. การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา 3.1 site ที่ 1: สวนยางพาราอายุมาก 3.2 site ที่ 2: สวนยางพาราอายุน้อยที่ยังไม่เปิดกรีด (ในกรณีที่ติดตั้งชุดอุปกรณ์และเก็บข้อมูลได้แล้ว โดยจะคำนวณจากค่าประเมินผลผลิตในอนาคตตลอดอายุเก็บเกี่ยว)

4. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 4.1 คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ที่คำนวณได้ข้อมูล greenhouse gas flux rate ที่ตรวจวัดได้โดยตรงด้วยเทคนิค Eddy covariance และเป็นองค์ประกอบหลักของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ร่วมกับข้อมูลองค์ประกอบรองอื่น ๆ ของคาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรมและผลผลิตจากการเก็บเกี่ยวจากโครงการย่อย
- 4.2 ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ที่คำนวณได้จากมูลพื้นฐาน water vapor flux rate ที่ตรวจวัดได้โดยตรงด้วยเทคนิค Eddy covariance ร่วมกับข้อมูลผลผลิตจากการเก็บเกี่ยว จากโครงการย่อย
- 4.3 สามารถกำหนดค่า parameter สำคัญในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (เช่น ค่า R_a , R_h , K_c) จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ตรวจวัดได้โดยตรงจากเทคนิค Eddy covariance เพื่อจะนำไปใช้ในการคาดการณ์คาร์บอนและวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ในพื้นที่อื่น ๆ ได้ต่อไป
- 4.4 ได้ข้อมูลพื้นฐานสำคัญเพียงชนิดเดียวที่สามารถจะใช้ validate แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณคาร์บอนและวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราได้
- 4.5 ทราบประสิทธิภาพของปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการที่กำหนดความแปรปรวนคาร์บอน และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ได้

บทที่ 2

การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ของสวนยางพารา

2.1 ศึกษาสมดุลคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพาราด้วยเทคนิค Eddy Covariance

การศึกษาสมดุลคาร์บอนของสวนยางพาราดำเนินการใน 2 พื้นที่ ซึ่งมีสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน 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 19 ปี (ปี พ.ศ. 2556) ระยะปลูก 2.5×7 เมตร และเปิดกรีดมาแล้ว 10 ปี ดินในพื้นที่ปลูกยางเป็นชุดดินกบินทร์บุรี ความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดยางพารา (รูปที่ 2-1)

Site ที่ 2 พื้นที่สวนยางของเกษตรกร อำเภอบึงกาฬ จังหวัดบึงกาฬ

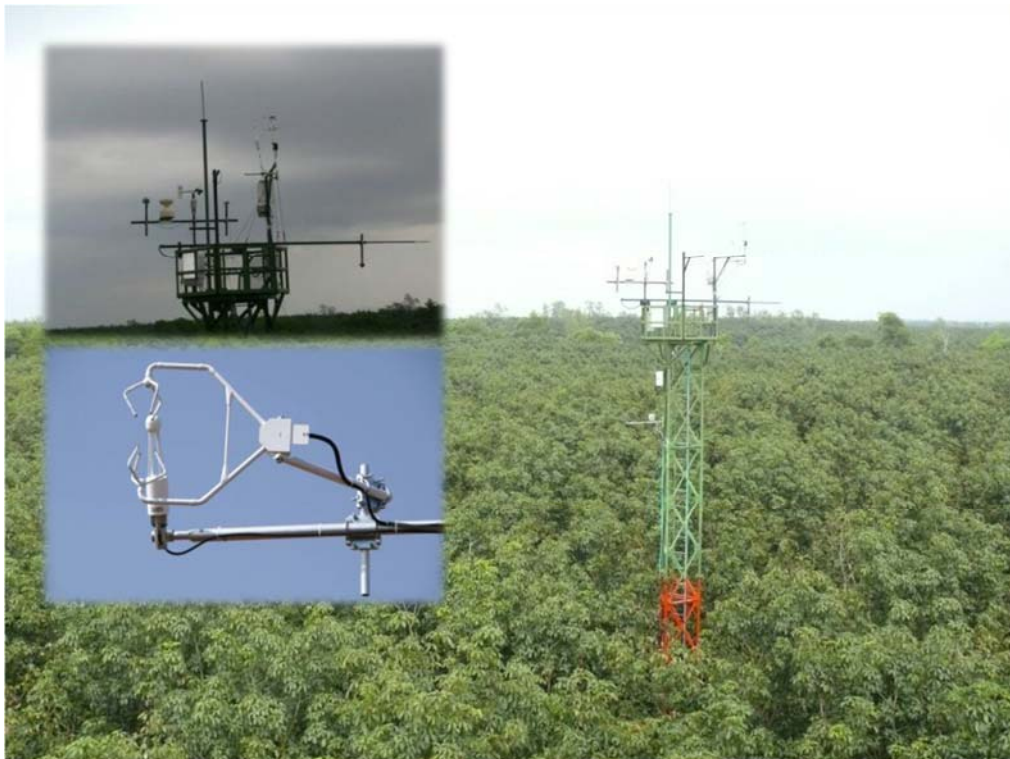
สวนยางพาราของเกษตรกร ตั้งอยู่ที่อำเภอบึงกาฬ จังหวัดบึงกาฬ (ละติจูด $18^{\circ}13'22.77''N$ ลองจิจูด $103^{\circ}18'59.46''E$ ความสูงจากระดับน้ำทะเล 200 เมตร) มีเนื้อที่ประมาณ 100 ไร่ เป็นพื้นที่ปลูกยางโดยอาศัยน้ำฝน ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 4 ปี (ปี พ.ศ. 2556) ระยะปลูก 3×7 เมตร และเป็นต้นยางที่ยังไม่เปิดกรีด ดินในพื้นที่ปลูกยางเป็นชุดดินโพธิ์ชัย สวนยางพารานี้เป็นสวนยางพาราปลูกใหม่ อยู่ในเขตพื้นที่การปลูกสวนยางพารา ระยะที่ 3 แปรแผนไร่ และต่อเนื่องจากระยะที่ 2 หนึ่งล้านไร่ พื้นที่ที่มีความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดยางพารา (รูปที่ 2-2)

ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาสมดุลคาร์บอนของสวนยางพารา มีดังนี้

2.1.1 ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ

การซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศนั้น ดำเนินการในแปลงศึกษา Site ที่ 1 ซึ่งมีการสร้างหอคอยสูง 25 เมตร และได้ติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดจุลภูมิอากาศเรียบร้อยแล้ว ที่ระดับความสูง 27 เมตร (รูปที่ 2-1) แต่เนื่องจากเครื่องวัดความเร็วและทิศทางลมถูกฟ้าผ่าจนเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ ทำให้ขาดข้อมูลสำคัญในการคำนวณสมดุลของคาร์บอน อีกทั้งเครื่องมือและ sensor ต่างๆ ต้องซ่อมแซมและตรวจสอบความแม่นยำในการตรวจวัดค่า โดยมีรายละเอียดการดำเนินงาน ดังนี้

- ส่งเครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม (Ultrasonic Anemometer) รุ่น 81000 ซ่อม ณ บริษัท R. M. Young, USA แต่ไม่สามารถซ่อมได้ ทำให้ทีมวิจัยต้องใช้ เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม (3D Sonic Anemometer) รุ่น CSAT3 บริษัท Campbell Scientific, USA ซึ่งเป็นเครื่องสำรองมาติดตั้งและใช้บันทึกข้อมูลแทน



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



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

- Calibrate เครื่องวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในอากาศ (Open-path CO₂ and H₂O analyzer, LI-7500) ที่ติดตั้งอยู่บน tower
- การปรับปรุงระบบ ground ของหอคอยที่ติดตั้งชุดอุปกรณ์ เพื่อป้องกันการเกิดฟ้าผ่าลงมายังชุดเครื่องมืออีก
- เปลี่ยน Net radiometer รุ่น NR-Lite ใหม่
- เปลี่ยน sensor วัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ (HMP45C, Vaisala) ใหม่



เครื่องวัดความเร็วและทิศทางการลมแบบ 3 มิติ (CSAT3)



เครื่องวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในอากาศ (LI-7500)



Net radiometer (NR-Lite)



sensor วัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ (HMP45C)

รูปที่ 2-3 ครุภัณฑ์ที่ดำเนินการซ่อมแซม ตรวจสอบความแม่นยำในการวัดค่า และเปลี่ยนใหม่ในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา

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

ตัวแปร	ความลึกจากผิวดิน (cm)	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา	แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ
pH	0-10	4.92 ± 0.056*	6.24 ± 0.240
	10-20	5.60 ± 0.292	6.56 ± 0.248
Organic carbon (%)	0-10	1.22 ± 0.240	0.50 ± 0.112
	10-20	0.74 ± 0.144	0.40 ± 0.064
Organic matter (%)	0-10	2.28 ± 0.416	0.87 ± 0.192
	10-20	1.28 ± 0.248	0.69 ± 0.112
Total carbon (%)	0-10	1.22 ± 0.256	0.49 ± 0.080
	10-20	0.76 ± 0.144	0.47 ± 0.072
Total nitrogen (%)	0-10	0.10 ± 0.016	0.04 ± 0.008
	10-20	0.07 ± 0.008	0.04 ± 0.001
Porosity	0-10	0.26 ± 0.040	0.48 ± 0.040
	10-20	0.21 ± 0.016	0.42 ± 0.024
Soil mean weight diameter (mm)	0-10	2.14 ± 0.544	0.67 ± 0.112
	10-20	1.75 ± 0.504	0.59 ± 0.120
Available water capacity (% vol)	0-10	1.82 ± 0.264	1.97 ± 0.248
	10-20	1.40 ± 0.244	1.91 ± 0.224
Sand (%)	0-10	45.62 ± 5.745	56.09 ± 10.214
	10-20	42.28 ± 6.927	66.00 ± 6.489
Silt (%)	0-10	22.29 ± 2.712	21.17 ± 7.227
	10-20	24.26 ± 2.008	18.16 ± 2.649
Clay (%)	0-10	20.99 ± 6.177	22.74 ± 9.528
	10-20	22.26 ± 5.705	15.84 ± 5.297
Textural class	0-10	Sandy Clay Loam	Sandy Clay Loam
	10-20	Clay Loam	Sandy Loam
Cation exchange capacity (cmol/kg)	0-10	7.88 ± 2.216	4.81 ± 1.152
	10-20	7.11 ± 1.456	4.92 ± 1.228
Exch. K (cmol/kg)	0-10	0.15 ± 0.048	0.08 ± 0.040
	10-20	0.12 ± 0.016	0.07 ± 0.024
Exch. Ca (cmol/kg)	0-10	0.55 ± 0.208	0.16 ± 0.040
	10-20	0.22 ± 0.144	0.21 ± 0.088
Exch. Mg (cmol/kg)	0-10	0.22 ± 0.088	0.09 ± 0.056
	10-20	0.20 ± 0.080	0.08 ± 0.048
Exch. Na (cmol/kg)	0-10	0.24 ± 0.284	0.21 ± 0.224
	10-20	0.11 ± 0.126	0.22 ± 0.184
Avail. P (mg/kg)	0-10	6.24 ± 2.064	2.16 ± 1.200
	10-20	2.77 ± 0.480	2.50 ± 1.144

2.1.2 การสำรวจพื้นที่สวนยางพาราที่มีอายุน้อย และยังไม่เปิดกรีด สำหรับเก็บข้อมูลอัตรา การเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพาราก่อนเปิดกรีด

ทีมวิจัยสำรวจพื้นที่สวนยางพาราของเกษตรกรทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 4 พื้นที่ ได้แก่ อำเภอบ้านม่วง จังหวัดสกลนคร อำเภอศรีสงคราม และอำเภอท่าอุเทน จังหวัดนครพนม และ อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ และตัดสินใจเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุดเป็น พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ได้แก่ สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ (ละติจูด $18^{\circ}12'22.77''N$ ลองจิจูด $102^{\circ}18'59.46''E$ ความสูงจากระดับน้ำทะเล 200 เมตร) มีเนื้อที่ประมาณ 100 ไร่ เป็นพื้นที่ปลูกยางโดยอาศัยน้ำฝน ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 4 ปี (ปี พ.ศ. 2556) ระยะปลูก 2×7 เมตร และเป็นต้นยางที่ยังไม่เปิดกรีด สวนยางพารานี้เป็นสวนยางพาราปลูกใหม่ อยู่ในเขตพื้นที่การปลูกสวนยางพารา ระยะที่ 2 แปรแผนไร่ และต่อเนื่องจากระยะที่ 2 หนึ่งล้านไร่ พื้นที่มีความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดยางพารา



รูปที่ 2-4 การสำรวจพื้นที่ปลูกยางพาราทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อใช้เป็นพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2

2.1.3 การสร้างหอคอย และการติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่สวนยางพารา

2.1.3.1 การสร้างหอคอย

ทีมวิจัยได้ดำเนินการสร้างหอคอย ความสูง 15 เมตร และระบบชุดล่อฟ้า สำหรับติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ได้แก่ สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ



รูปที่ 2-5 หอคอย ความสูง 15 เมตร ใช้สำหรับติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ

2.1.3.2 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance

ชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance (รูปที่ 2-6 และ 2-7) ถูกติดตั้งไว้ที่ความสูง 12 เมตร บนหอคอยของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 โดยประกอบด้วย

- (1) เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม แบบ 2 มิติ (ความเร็วลมในทิศทาง x, y, z) (Three dimensional sonic anemometer) รุ่น CSAT2 (Campbell Scientific Inc., USA)
- (2) เครื่องวัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในอากาศ ระบบเปิด (Open path infrared gas analyzer) รุ่น LI-7500 (Li-COR Inc., USA)
- (2) เครื่องควบคุมและบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ (Data logger) รุ่น CR2000 (Campbell Scientific Inc., USA)

ความถี่ในการวัดค่าและการบันทึกค่าที่วัดได้ของชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance จะเป็นไปตามคำสั่งที่นักวิจัยโปรแกรมในเครื่องควบคุมและบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ คือ จะบันทึกข้อมูล

ด้วยความถี่ 20 Hz หรือ 20 ครั้งต่อวินาที ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ข้อมูลที่วัดได้จะถูกบันทึกลงในการ์ดบันทึกข้อมูลขนาดความจุ 2 GB (Compact flash) ซึ่งติดตั้งอยู่ในเครื่องควบคุมและบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งระบบการส่งข้อมูลผ่านทางสัญญาณโทรศัพท์สำหรับตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์

2.1.3.3 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ

ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ (รูปที่ 2-8) ถูกติดตั้งไว้ที่ความสูง 15 เมตรบนหอคอยของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 โดยประกอบด้วย เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม แบบ 2 มิติ เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ และเครื่องวัดพลังงานแสง

ความถี่ในการวัดค่าและการบันทึกค่าที่วัดได้ของชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศจะดำเนินการตามคำสั่งที่นักวิจัยโปรแกรมในเครื่องควบคุมและบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ รุ่น CR1000 คือ จะบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 20 Hz หรือ 20 ครั้งต่อวินาที ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกับข้อมูลจากชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และการติดตั้งระบบการส่งข้อมูลผ่านทางสัญญาณโทรศัพท์สำหรับตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์

2.1.3.4 การติดตั้งระบบ Solar panel

เนื่องจากไม่มีระบบไฟฟ้าในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 จังหวัดบึงกาฬ ดังนั้นทีมวิจัยต้องดำเนินการติดตั้งระบบ Solar panel เพื่อผลิตพลังงานสำหรับขับเคลื่อนการทำงานของชุดอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่บนหอคอย (รูปที่ 2-9)



รูปที่ 2-6 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ



(a) ชุดอุปกรณ์ Eddy covariance ที่ติดตั้งบนหอคอย



(b) เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม
แบบ 3 มิติ



(c) เครื่องวัดความเข้มข้นของแก๊ส
คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในอากาศ



(d) เครื่องควบคุมและบันทึกข้อมูล
แบบอัตโนมัติ

รูปที่ 2-7 ชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร ณ อำเภอปากคาด
จังหวัดบึงกาฬ



รูปที่ 2-8 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภopakคาคัด จังหวัดบึงกาฬ



รูปที่ 2-9 การติดตั้งระบบ Solar panel บนหอคอย ณ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 สวนยางพาราของเกษตรกร อำเภopakคาคัด จังหวัดบึงกาฬ

2.1.4 ผลการศึกษาสมดุลคาร์บอนของสวนยางพารา

2.1.4.1 ข้อมูลจุลภูมิอากาศ

ข้อมูลจุลภูมิอากาศต่างๆ ได้แก่ ความเข้มแสงสะสม อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำฝน ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation; R_g) และปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, R_n) ของพื้นที่ศึกษา 2 Site ได้แก่ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนาบชัย เขต จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2556 และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อำเภอบึงกาฬ จังหวัดบึงกาฬ เป็นข้อมูลตั้งแต่วันที่ 22 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2556

ความเข้มแสงสะสม

ความเข้มแสงสะสมต่อวันในพื้นที่ปลูกยางพารา วัดด้วยเครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ (Quantum sensor) รุ่น LI-190SA ของบริษัท Licor, Inc., U.S.A และคำนวณค่าเป็นความเข้มแสงสะสมต่อวัน จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีความเข้มแสงสะสมอยู่ในช่วง $2,967 - 26,341 \mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ความเข้มแสงสะสมต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 28 มกราคม 2556 และวันที่ 16 กรกฎาคม 2555 ตามลำดับ ความเข้มแสงสะสมเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ $16,348 \mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ (รูปที่ 2-10)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ มีความเข้มแสงสะสมต่อวันอยู่ในช่วง $2,532 - 24,044 \mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ความเข้มแสงสะสมต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ วันที่ 31 มกราคม 2556 และวันที่ 6 มีนาคม 2556 ตามลำดับ ความเข้มแสงสะสมต่อวันเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ $17,774 \mu\text{mol m}^{-2} \text{day}^{-1}$ (รูปที่ 2-10)

อุณหภูมิอากาศ

อุณหภูมิอากาศในพื้นที่ปลูกยางพารา วัดด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and Relative Humidity Probe) รุ่น HMP45C ของบริษัท Vaisala Inc., U.S.A. และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยต่อวัน จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง $23.5 - 30.9 ^\circ\text{C}$ อุณหภูมิเฉลี่ยต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 28 มกราคม 2556 และวันที่ 7 เมษายน 2556 ตามลำดับ อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ $27.1 ^\circ\text{C}$ (รูปที่ 2-10)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง $18.0 - 30.6 ^\circ\text{C}$ อุณหภูมิเฉลี่ยต่อวันต่ำสุดและสูงสุด ปรากฏในวันที่ 23 ธันวาคม 2555 และวันที่ 3 เมษายน 2556 ตามลำดับ อุณหภูมิอากาศในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ $25.3 ^\circ\text{C}$ (รูปที่ 2-10)

ความชื้นสัมพัทธ์

ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในพื้นที่ปลูกยางพารา วัดด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and Relative Humidity Probe) รุ่น HMP45C ของบริษัท Vaisala Inc., U.S.A. และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวัน จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง $50.2 - 99.2 \%$ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 18 มกราคม 2556 และวันที่ 6 กันยายน 2555 ตามลำดับ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ 79.4% (รูปที่ 2-11)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ มีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวันอยู่ในช่วง 32.7 – 87.4 % โดยพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 6 เมษายน 2556 และวันที่ 29 พฤศจิกายน 2555 ตามลำดับ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ 58.7% (รูปที่ 2-11)

ปริมาณน้ำฝน

ปริมาณน้ำฝนต่อวันในพื้นที่ปลูกยางพารา วัดด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน Rain Gauges รุ่น TE525 TIPPING BUCKET Rain Gage ของบริษัท Campbell Scientific, U.S.A. นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นปริมาณน้ำฝนรวมต่อวัน จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีปริมาณน้ำฝนรวมต่อวันอยู่ในช่วง 0 – 91.6 mm ปริมาณน้ำฝนต่อวันสูงสุดปรากฏในวันที่ 6 กันยายน 2555 ปริมาณน้ำฝนรวมในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ 1,216.4 mm (รูปที่ 2-11)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ มีปริมาณน้ำฝนรวมต่อวันอยู่ในช่วง 0-2.6 mm ปริมาณน้ำฝนต่อวันสูงสุดปรากฏในวันที่ 31 มกราคม 2556 ปริมาณน้ำฝนรวมในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ 0.1 mm (รูปที่ 2-11)

ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Rg)

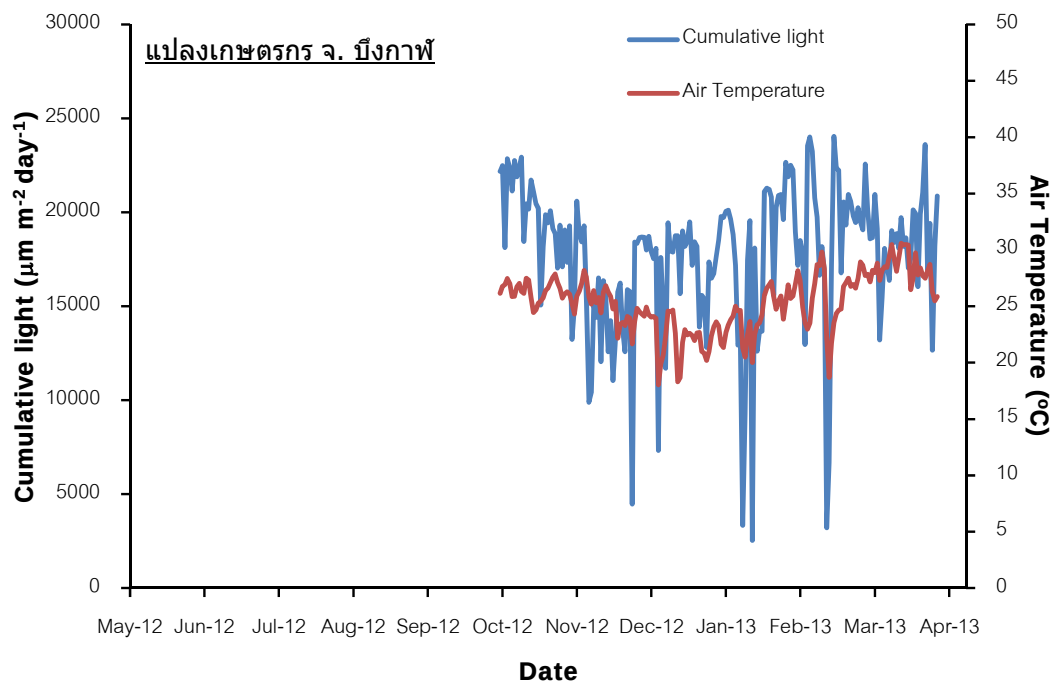
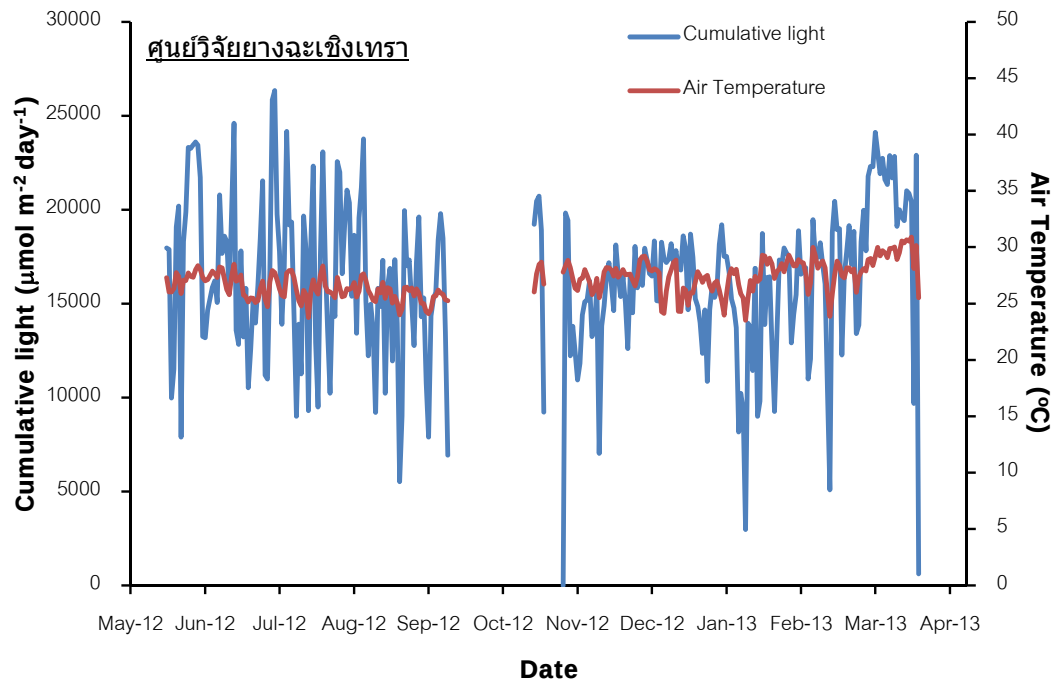
ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, Rg) ที่แปลงปลูกยางพารา ได้รับ วัดด้วยเครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ (Solar radiation sensor) รุ่น LPO2 ของบริษัท Hukseflux, U.S.A. นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวมต่อวัน จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวมต่อวัน อยู่ในช่วง 379 – 14,694 W m⁻² ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวมต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 26 กันยายน 2555 และวันที่ 18 มกราคม 2556 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวมต่อวันเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ 9,452 W m⁻² (รูปที่ 2-12)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ มีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวมต่อวัน อยู่ในช่วง 1,118 – 12,744 W m⁻² ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวมต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 6 มีนาคม 2556 และวันที่ 31 มกราคม 2556 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์รวมต่อวันเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ 9,414 W m⁻² (รูปที่ 2-12)

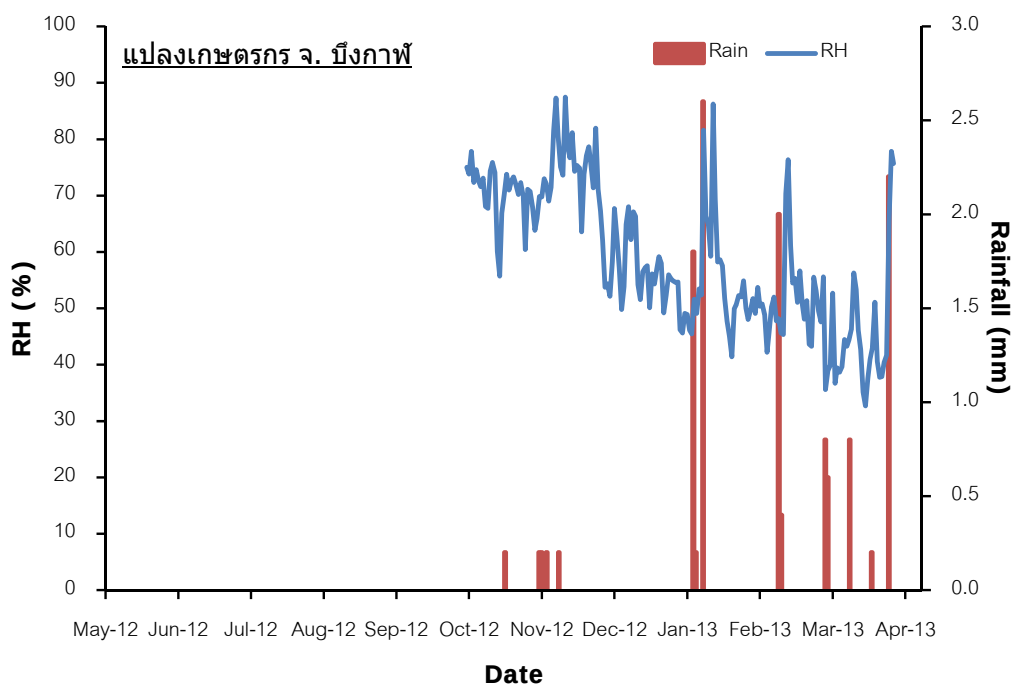
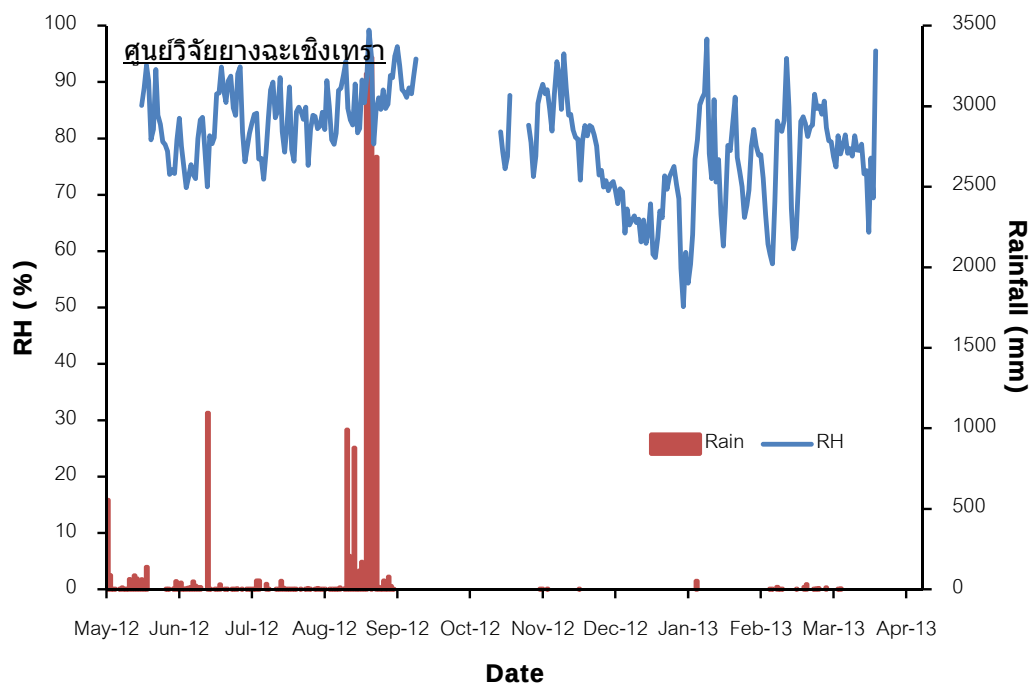
ปริมาณรังสีสุทธิ (Rn)

ปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, Rn) ที่แปลงปลูกยางพาราได้รับ วัดด้วยเครื่องวัดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธิ รุ่น NR-Lite ของบริษัท Kipp & Zonen Inc., Netherlands นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเป็นปริมาณรังสีสุทธิต่อวัน จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีปริมาณรังสีสุทธิต่อวันอยู่ในช่วง 125 - 10,092 W m⁻² ปริมาณรังสีสุทธิต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 10 เมษายน 2556 และวันที่ 16 กรกฎาคม 2555 ตามลำดับ ปริมาณรังสีสุทธิต่อวันเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ 6,436 W m⁻² (รูปที่ 2-12)

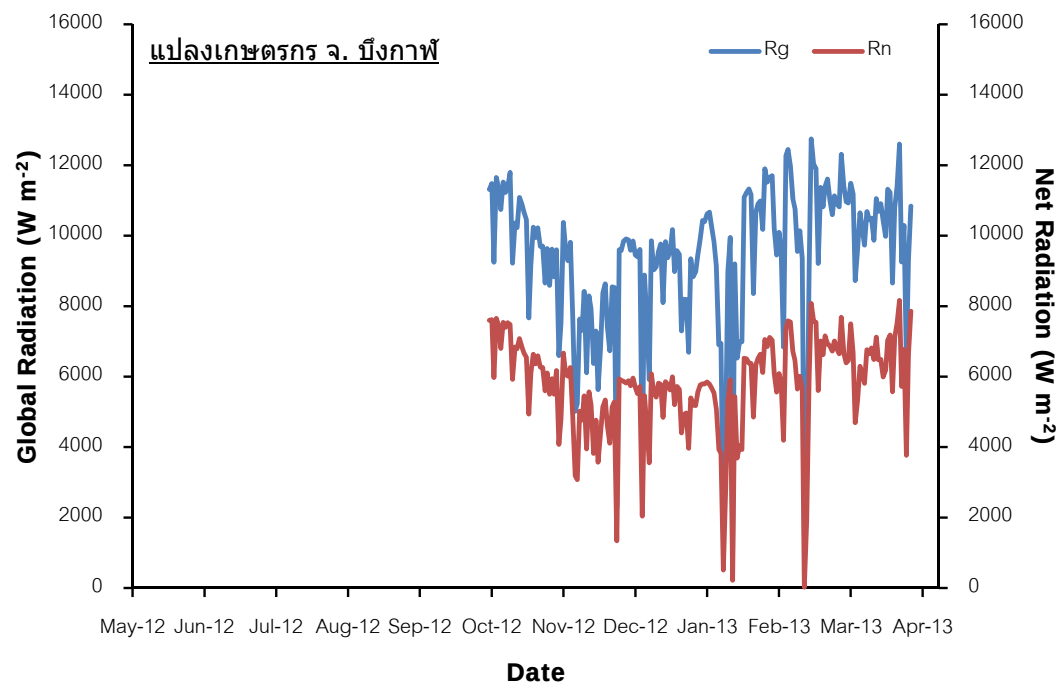
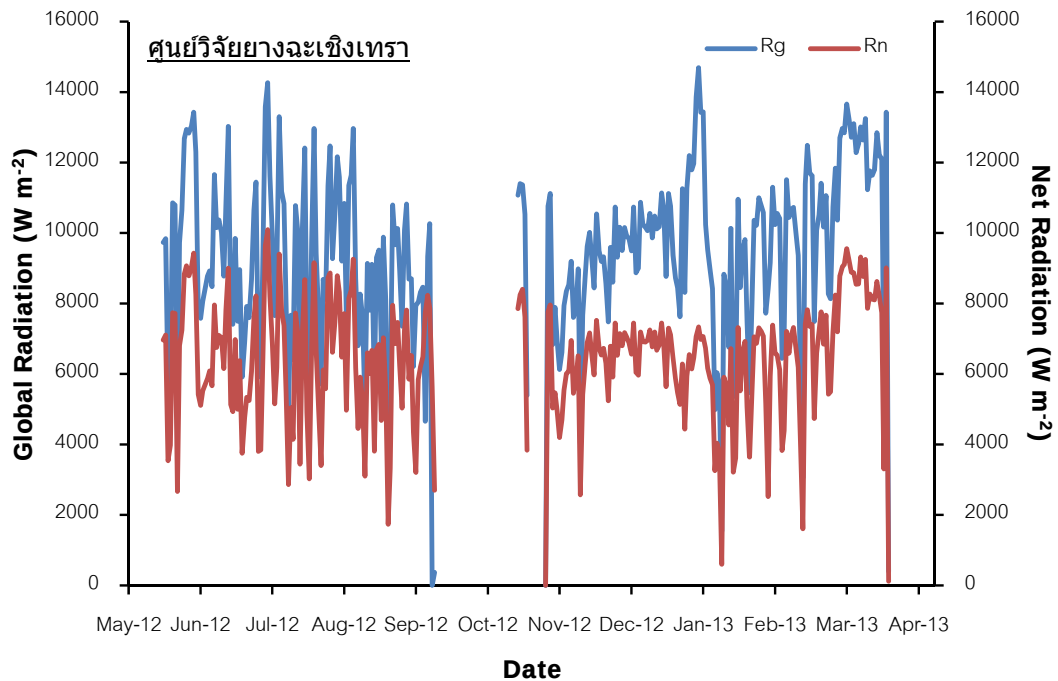
Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ได้รับปริมาณรังสีสุทธิต่อวันอยู่ในช่วง 29 - 8,169 W m⁻² ปริมาณรังสีสุทธิต่อวันต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 3 มีนาคม 2556 และวันที่ 13 เมษายน 2556 ตามลำดับ ปริมาณรังสีสุทธิต่อวันเฉลี่ยในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่าเท่ากับ 5,779 W m⁻² (รูปที่ 2-12)



รูปที่ 2-10 ความเข้มแสงสะสม (Cumulative light, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (Tair) ของแปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางชะเชิงเทรา จ. ชะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)



รูปที่ 2-11 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยและปริมาณน้ำฝนรายวันของแปลงปลูกยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)



รูปที่ 2-12 ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, R_g) และปริมาณรังสีสุทธิ (Net radiation, R_n) รวมต่อวันที่แปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางชะเชิงเทรา จ. ชะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)

2.1.4.2 ข้อมูล Flux ของคาร์บอน

ข้อมูล Flux ของคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยาง ได้แก่ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา อำเภอสนาบชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2556 และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร อำเภอบางคาค จังหวัดบึงกาฬ เป็นข้อมูลตั้งแต่วันที่ 22 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2556 ข้อมูล Flux ของคาร์บอนดังกล่าววัดโดยวิธี Eddy Covariance

อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE)

อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (Net ecosystem exchange, NEE) ของพื้นที่ปลูกยางพารา วัดด้วยเทคนิค Eddy Covariance (Goulden *et al.*, 1996) ค่าที่วัดได้ประกอบด้วย ความเร็วและทิศทางลม และความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณเป็นค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (Net ecosystem exchange, NEE) จากการศึกษาพบว่า Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) อยู่ในช่วง -0.946 ถึง $0.801 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 13 ตุลาคม 2555 และวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2556 ตามลำดับ (รูปที่ 2-13)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ มีค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) อยู่ในช่วง -0.359 ถึง $0.23 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 28 มีนาคม 2556 และวันที่ 9 มีนาคม 2556 ตามลำดับ (รูปที่ 2-13)

ความแปรปรวนของอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิในรอบวันและฤดูกาล

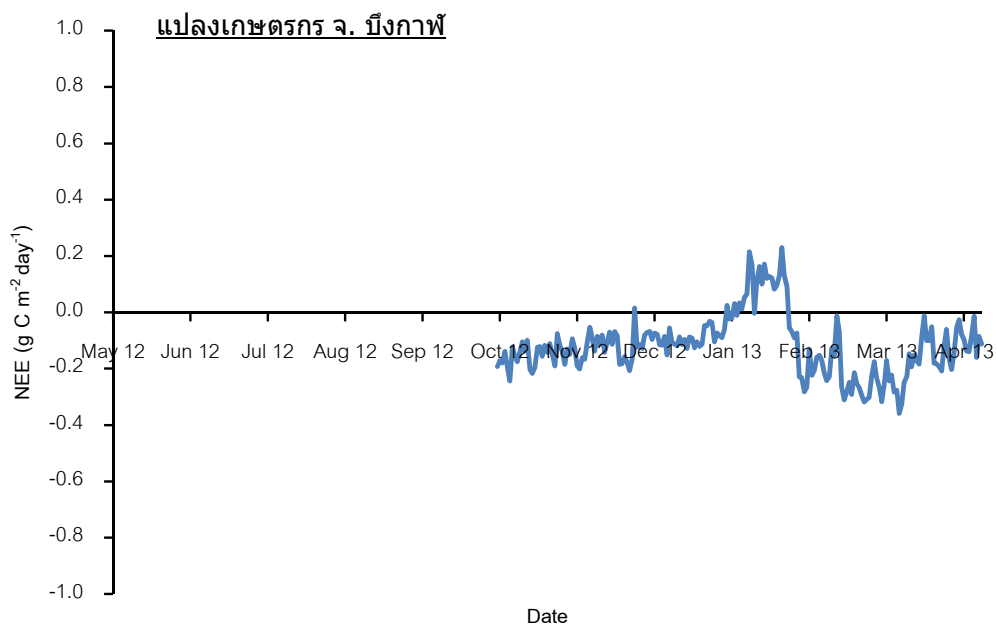
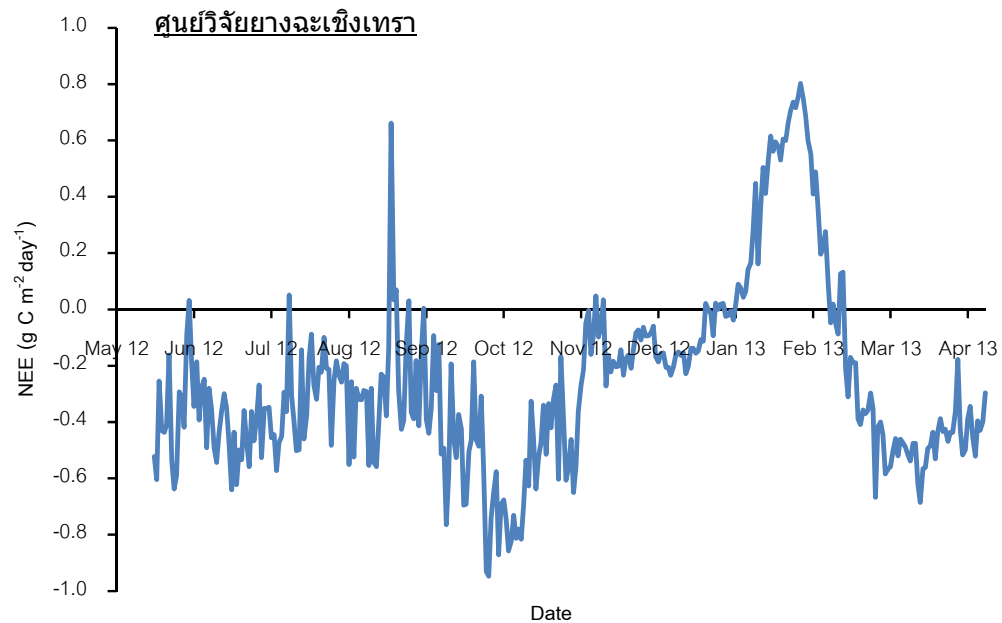
การแสดงความแปรปรวน Flux ของคาร์บอนในรอบวันและในแต่ละฤดู ทีมวิจัยนำเสนอข้อมูลจาก Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนาบชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2556 ซึ่งมีข้อมูลที่สมบูรณ์กว่า Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) ในรอบวัน พบว่า อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิมีค่าบวกในช่วงเวลากลางคืน (18.00-06.00 น.) เนื่องจากพืชปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศในเวลากลางคืน ซึ่งก็คือ การหายใจนั่นเอง อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิจะค่อยๆ ลดลงจนเป็นค่าติดลบ ณ เวลาประมาณ 06.30 น. ซึ่งเป็นเวลาที่เริ่มมีแสง อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธียังคงลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าต่ำที่สุดในช่วงเวลา 12.00 – 13.00 น. ซึ่งพืชมีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด โดยมีอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ เท่ากับ -0.50 , -0.56 , -0.60 , -0.40 , -0.01 และ $-0.63 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ในวันที่ 16 ก.ค. 55, 11 ส.ค. 55, 17 พ.ย. 55, 16 ธ.ค. 55, 14 ก.พ. 56 และ 26 พ.ค.56 ตามลำดับ หลังจากนั้นค่าจะติดลบลดลงจนกลับเป็นค่าบวกในเวลาประมาณ 18.00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธินั้นได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานแสงในรอบวัน (รูปที่ 2-14)

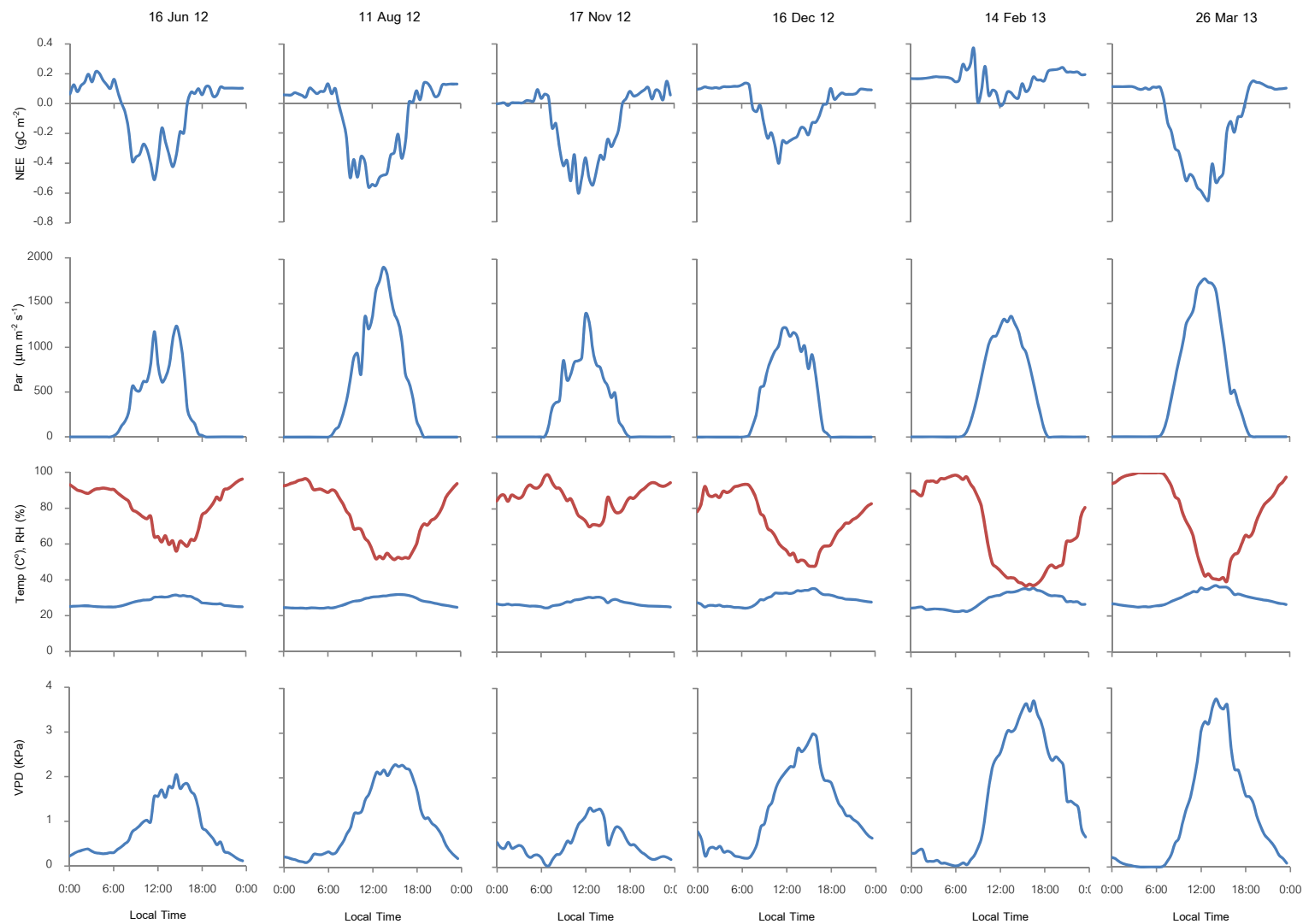
ความแปรปรวนของอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิของพื้นที่ศึกษา

ค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) ในรอบวันของระบบนิเวศยางพาราของทั้ง 2 site พบว่า มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรอบวันที่คล้ายคลึงกัน คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิมีค่าบวกในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งแสดงถึงการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนได-

ออกไซด์ออกสูงบรรยากาศของระบบนิเวศยาง และจะมีค่าติดลบในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งแสดงถึงการดูดกลืนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเข้าไปในต้นยางเพื่อใช้สำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสง ตัวอย่างข้อมูลในวันที่ 11 เม.ย. 56 พบว่า พื้นที่ศึกษาทั้ง 2 แห่งมีอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิรวมแตกต่างกัน คือ พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีค่าเท่ากับ $-0.44 \text{ g C m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ขณะที่พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ มีค่าเท่ากับ $-0.18 \text{ g C m}^{-2}\text{day}^{-1}$ ความแตกต่างดังกล่าวเป็นผลสืบเนื่องมาจากความแตกต่างของอายุต้นยาง ลักษณะภูมิประเทศ และลักษณะภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยาง ดังเห็นได้จากรูปที่ 2-16 พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีปริมาณแสงรวมเท่ากับ $12,886 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ มีค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศเท่ากับ 84.8% และ 27.4°C และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (VPD) เฉลี่ยเท่ากับ 0.6 kPa ขณะที่พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ มีปริมาณแสงรวมเท่ากับ $19,915 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ มีค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาศเท่ากับ 40.1% และ 28.4°C และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (VPD) เฉลี่ยเท่ากับ 2.5 kPa (รูปที่ 2-15)

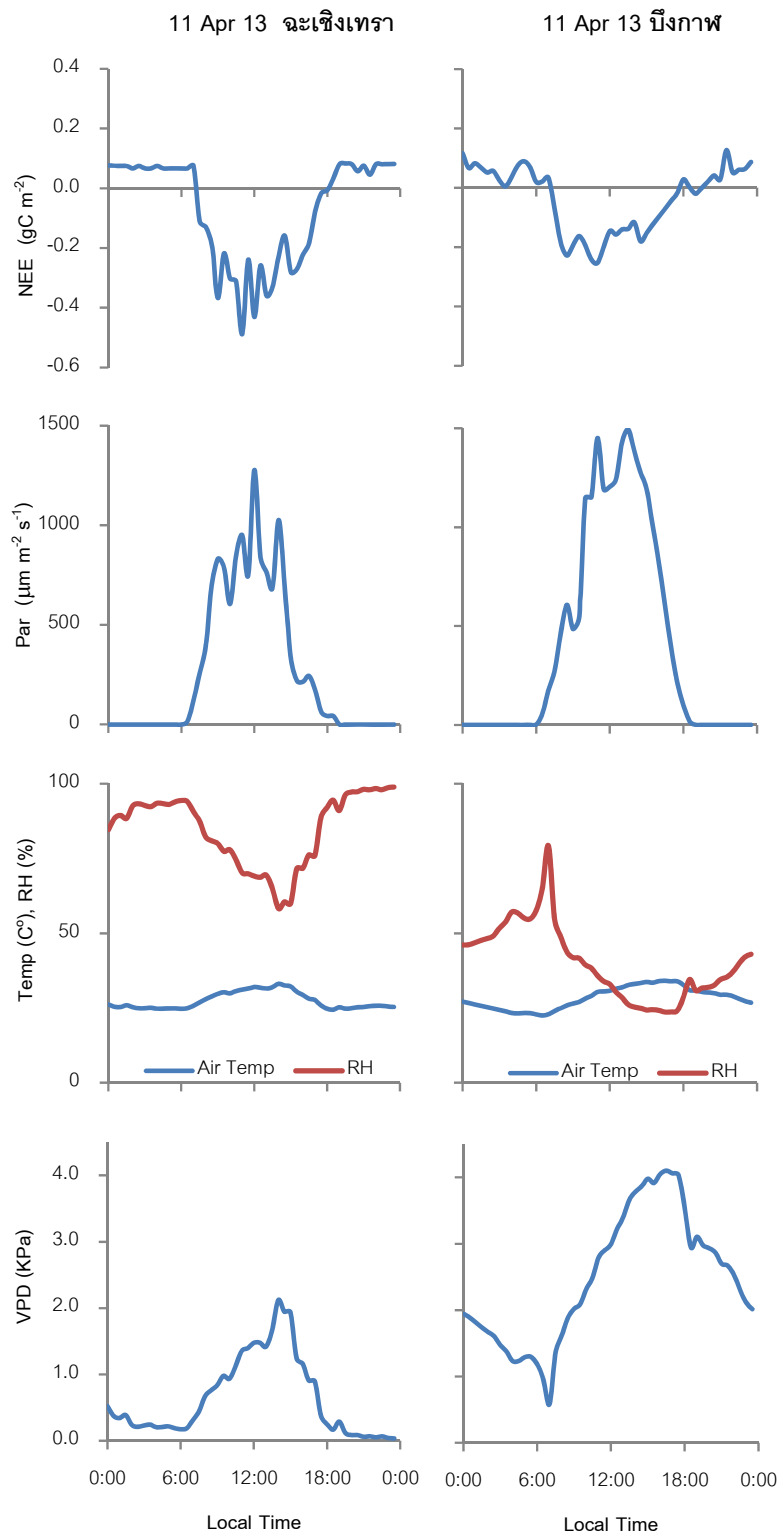


รูปที่ 2-13 อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (Net ecosystem exchange, NEE) ของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)



รูปที่ 2-14

ความแปรปรวน Flux ของคาร์บอน (NEE) ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air Temp.) ความชื้น (RH) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor Pressure Deficit, VPD) ในรอบวันและในแต่ละฤดู ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา



รูปที่ 2-15

แสดงความแปรปรวนอัตราการแลกเปลี่ยนของคาร์บอนสุทธิ (NEE) ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air Temp.) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor Pressure Deficit, VPD) ในรอบวัน และในแต่ละฤดู ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ในวันที่ 11 เมษายน 2556

2.2 การวัดอัตราการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือผิวดิน (Soil respiration)

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากผิวดิน เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อวัฏจักรคาร์บอนของโลก (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 และยังมี การตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ และอุณหภูมิโลกที่ต่างกัน ดังนั้น การประเมินสัดส่วนขององค์ประกอบดังกล่าวเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์และการจำลองอัตราการหายใจของดิน และการศึกษาการตอบสนองของอัตราการหายใจต่อสภาพภูมิอากาศและผลกระทบอื่นๆ จากสภาพแวดล้อม เพื่อที่จะทำบัญชีคาร์บอนในระบบนิเวศอย่างพาราและการตรวจติดตาม Carbon sequestration ในดิน ซึ่งการประเมิน Carbon sequestration ในระบบนิเวศ ก็คือ Net ecosystem production (NEP) ซึ่งสามารถประเมินได้จากความแตกต่างระหว่างการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลพืชและ R_h

2.2.1 การดำเนินงานวิจัย

การกำหนดพื้นที่ในการเก็บข้อมูล

กำหนดพื้นที่สำหรับวัดอัตราการหายใจของดิน ในพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 แห่ง แต่ละพื้นที่ แบ่งเป็น 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 2-16 และ 2-17)

การทำ Trench plot

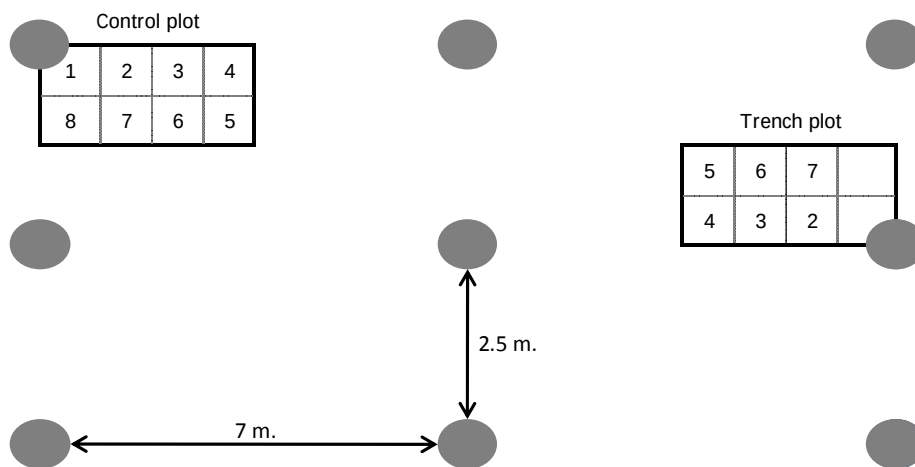
Trenching technique เป็นหนึ่งใน root exclusion method ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานและใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันสำหรับการแยก R_a และ R_h การทำ Trench plot ประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้

- การกำหนดพื้นที่ในการขุดดินรอบ Collar ทั้ง 8 อัน ความลึก 90-100 cm กว้าง 50 cm. (รูปที่ 2-18)
- เมื่อขุดดินรอบ Trench plot เสร็จเรียบร้อยแล้ว ติดตั้ง sensor วัดอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดิน และหยาฆ่ารากใน plot เมื่อเร่งให้รากภายใน Trench plot ตายเร็วขึ้น (รูปที่ 2-19 และ 2-20)

- นำพลาสติกพันรอบ Trench plot เพื่อป้องกันไม่ให้รากเจริญเติบโตเข้าไปภายใน plot และนำดินใส่ลงไปในหลุมที่ขุดให้เต็มดังเดิม (รูปที่ 2-21)
- ทำรั้วรอบพื้นที่ Trench plot และติดตั้งชุดอุปกรณ์บันทึกข้อมูลอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดินแบบอัตโนมัติ (รูปที่ 2-22 และ 2-23)



รูปที่ 2-16 Plot ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการหายใจของแปลงศึกษา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ (รูปล่าง)



รูปที่ 2-17 การติดตั้ง Collar ในพื้นที่ของ Control (Collar no. 1-8) และ Trench plot (Collar no. 2-7) (● = ต้นยางพารา)



รูปที่ 2-18 การกำหนดพื้นที่ในการขุดดินเพื่อทำ Trench plot และเก็บตัวอย่างราก และดิน



รูปที่ 2-19 การขุดดินเพื่อทำ Trench plot



รูปที่ 2-20 การติดตั้ง sensor วัดอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดิน (ภาพซ้าย) และ การทายาฆ่ารากที่อยู่ภายใน Trench plot (ภาพขวา)



รูปที่ 2-21 การนำพลาสติกพันรอบพื้นผิวด้านข้างของ Trench plot เพื่อป้องกันไม่ให้รากเจริญเข้ามาใน Trench plot



รูปที่ 2-22 การทำรั้วกันรอบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเดินเข้ามาในส่วนของ Trench plot



รูปที่ 2-23 Trench plot ที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว พร้อมกับชุดอุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิดินและปริมาณน้ำในดินแบบอัตโนมัติ

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 2-24) โดยวัดควบคู่ไปกับอุณหภูมิ (°C) และปริมาณน้ำในดิน (Soil water content, %) ที่ระดับความลึก 5 cm. จากผิวดินด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ (T handle thermocouple) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินได้ (รูปที่ 2-25) และ Soil moisture sensor รุ่น EC-5 (Decagon Devices, Inc. U.S.A.) ซึ่งอ่านค่าที่วัดได้โดยใช้ ProCheck (Decagon Devices, Inc. U.S.A.) (รูปที่ 2-26) วัดอัตราการหายใจของดินในพื้นที่ปลูกยางพารา ทุก 2 สัปดาห์ ในรอบ 1 ปี

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

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



รูปที่ 2-24 เครื่องวัดอัตราการหายใจของดิน (Soil CO₂ Flux System) รุ่น LI-8100[®] (LI-COR, Inc., Ltd., U.S.A.)



รูปที่ 2-25 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิดิน (T handle thermocouple) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินได้



รูปที่ 2-26 อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำในดิน (Soil moisture sensor) รุ่น EC-5 (Decagon Devices, Inc.m U.S.A.) ซึ่งอ่านค่าที่วัดได้โดยใช้ ProCheck (Decagon Devices, Inc.m U.S.A.)

2.2.2 ผลการดำเนินงานวิจัย

การกำหนดพื้นที่ในการเก็บข้อมูล

กำหนดพื้นที่สำหรับวัดอัตราการหายใจของดิน ในพื้นที่ศึกษาทั้ง 2 แห่ง คือ ที่ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา อ. สนาบชัยเขต จ. ฉะเชิงเทรา และแปลงเกษตรกร อ. ปากคาค จ. บึงกาฬ เสร็จเรียบร้อยแล้ว

การทำ Trench plot

Trench plot ติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้วในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ได้แก่ ที่ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา อ. สนาบชัยเขต จ. ฉะเชิงเทรา เมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน 2555

สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ได้แก่ แปลงเกษตรกร อ. ปากคาค จ. บึงกาฬ จะดำเนินการติดตั้ง Trench plot แล้วเสร็จในวันที่ 18 มกราคม 2555

การวัดอัตราการหายใจของดิน

วัดอัตราการหายใจของดินในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ตั้งแต่ วันที่ 4 พฤศจิกายน 2555 ถึงวันที่ 8 พฤษภาคม 2556 และวัดต่อเนื่องมาทุก 2 สัปดาห์ อัตราการหายใจของดินที่วัดได้มีค่าตั้งแต่ $1.12-9.25 \text{ g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดินเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่เป็น Control และ Trench plot 2 ครั้งแรกมีค่าไม่แตกต่างกัน (ยังไม่ได้ติดตั้ง Trench plot) และตั้งแต่การวัดครั้งที่ 3 เป็นต้นมา (หลังจากติดตั้ง Trench plot เสร็จเรียบร้อยแล้ว) อัตราการหายใจเฉลี่ยของ Control plot มีค่าสูงกว่า Trench plot อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) (รูปที่ 2-27) อุณหภูมิดินที่วัดได้มีค่าตั้งแต่ $25.10-30.50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิดินเฉลี่ยของ Control plot มีค่าไม่แตกต่างจาก Trench plot

(รูปที่ 2-28) สำหรับปริมาณน้ำในดินที่วัดมีค่าตั้งแต่ 1.3-35.8 % ปริมาณน้ำในดินเฉลี่ย เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot ที่วัด 2 ครั้งแรกมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ตั้งแต่การวัดครั้งที่ 3 เป็นต้นมา ปริมาณน้ำในดินเฉลี่ยของ Control plot มีค่าน้อยกว่า Trench plot อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในเกือบทุกครั้งที่ได้ข้อมูล (รูปที่ 2-29)

การคำนวณอัตราการหายใจสะสมเริ่มตั้งแต่วันที่ 19 พฤศจิกายน 2556 หลังจากทำ Trench plot ถึงวันที่ 8 พฤษภาคม 2556 รวมระยะเวลา 170 วัน พบว่า อัตราหายใจเฉลี่ยสะสมใน Control (R_{cp}) และ Trench (R_{tp}) plot มีค่าเท่ากับ 700 และ 464 g C m⁻² จากข้อมูลที่ได้รวบรวมจนถึงปัจจุบันยังไม่สามารถคำนวณค่า R_h (Heterotrophic respiration) และ R_a (Autotrophic respiration) ออกมาได้เนื่องจาก

$$R_h = R_{tp} - R_d \quad (2)$$

$$R_a = R_{cp} - R_h \quad (3)$$

โดยที่ R_d ได้แก่ Decomposing root-derived CO₂ efflux ซึ่งต้องใช้ข้อมูลอัตราการย่อยสลายของรากภายในการคำนวณ และขณะนี้ยังไม่ถึงกำหนดเวลาที่จะต้องเก็บตัวอย่างรากตามแผนการดำเนินงาน ทำให้ไม่สามารถคำนวณค่า R_h และ R_a ได้ แต่เมื่อได้ค่า R_d มาแล้ว จะสามารถคำนวณค่า R_h และ R_a ที่เวลา 170 วัน ได้ดังนี้

$$R_h = 464 - R_d \quad (4)$$

$$R_a = 700 - R_h \quad (5)$$

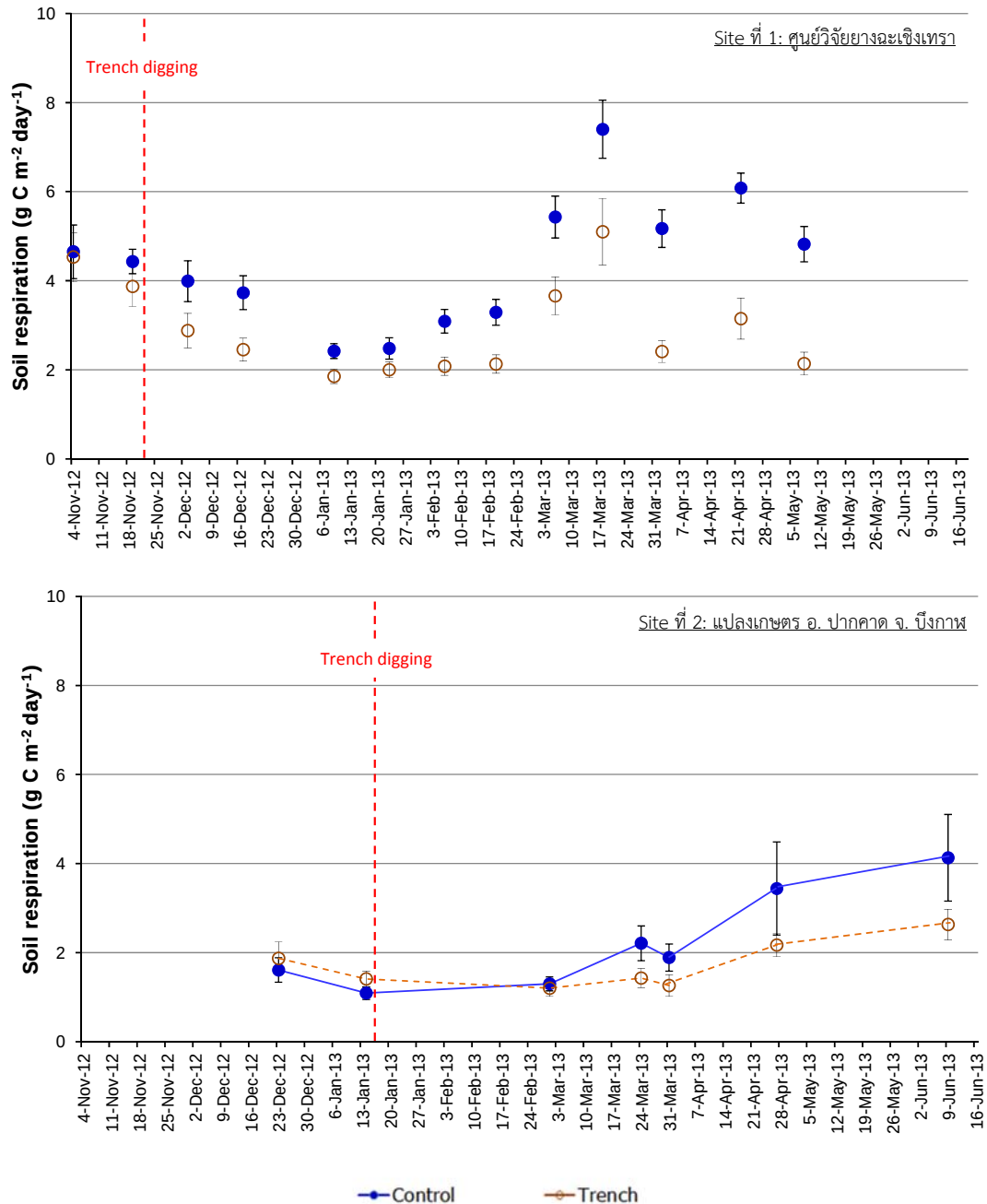
วัดอัตราการหายใจของดินในพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ณ แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด จ. บึงกาฬ จะเริ่มวัดครั้งแรกใน วันที่ 25 ธันวาคม 2555 ถึงวันที่ 9 มิถุนายน 2556 การวัดอัตราการหายใจของดินในพื้นที่นี้ไม่สามารถดำเนินการได้ตามแผนที่วางไว้ เนื่องจากเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินมีปัญหาทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ถูกต้อง ดังนั้นทีมวิจัยจึงส่งเครื่องมือชุดดังกล่าวกลับบริษัท LICOR สหรัฐอเมริกา และต้องนำเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินที่ประจำอยู่ ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ไปเป็นวัดอัตราการหายใจของดินที่บึงกาฬ เดือนละ 1 ครั้ง อัตราการหายใจของดินที่วัดได้มีค่าตั้งแต่ 0.52-8.74 g C m⁻²d⁻¹ ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดินเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ที่เป็น Control และ Trench plot ที่วัด 2 ครั้งแรกมีค่าไม่แตกต่างกัน (ยังไม่ได้ติดตั้ง Trench plot) หลังจากติดตั้ง Trench plot อัตราการหายใจเฉลี่ยของ Control plot มีค่าสูงกว่า Trench plot อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เกือบทุกครั้งที่ได้ค่า ยกเว้นค่าที่วัดในวันที่ 1 มีนาคม 2556 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 2-27) อุณหภูมิดินที่วัดได้มีค่าตั้งแต่ 22.5-35.55 °C อุณหภูมิดินเฉลี่ยของ Control plot มีค่าไม่แตกต่างจาก Trench plot (รูปที่ 2-28) สำหรับปริมาณน้ำในดินที่วัดมีค่าตั้งแต่ 0.8-35.0 % ปริมาณน้ำในดินเฉลี่ย เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot มีค่าไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 2-29)

การคำนวณอัตราการหายใจสะสมเริ่มตั้งแต่วันที่ 14 มกราคม 2556 หลังจากทำ Trench plot ถึงวันที่ 9 มิถุนายน 2556 รวมระยะเวลา 146 วัน พบว่า อัตราหายใจเฉลี่ยสะสมใน Control (R_{cp}) และ Trench (R_{tp}) plot มีค่าเท่ากับ 386 และ 302 g C m⁻² จากข้อมูลที่ได้รวบรวมจนถึงปัจจุบันยังไม่สามารถคำนวณค่า R_h (Heterotrophic respiration) และ R_a (Autotrophic respiration) ออกมาได้

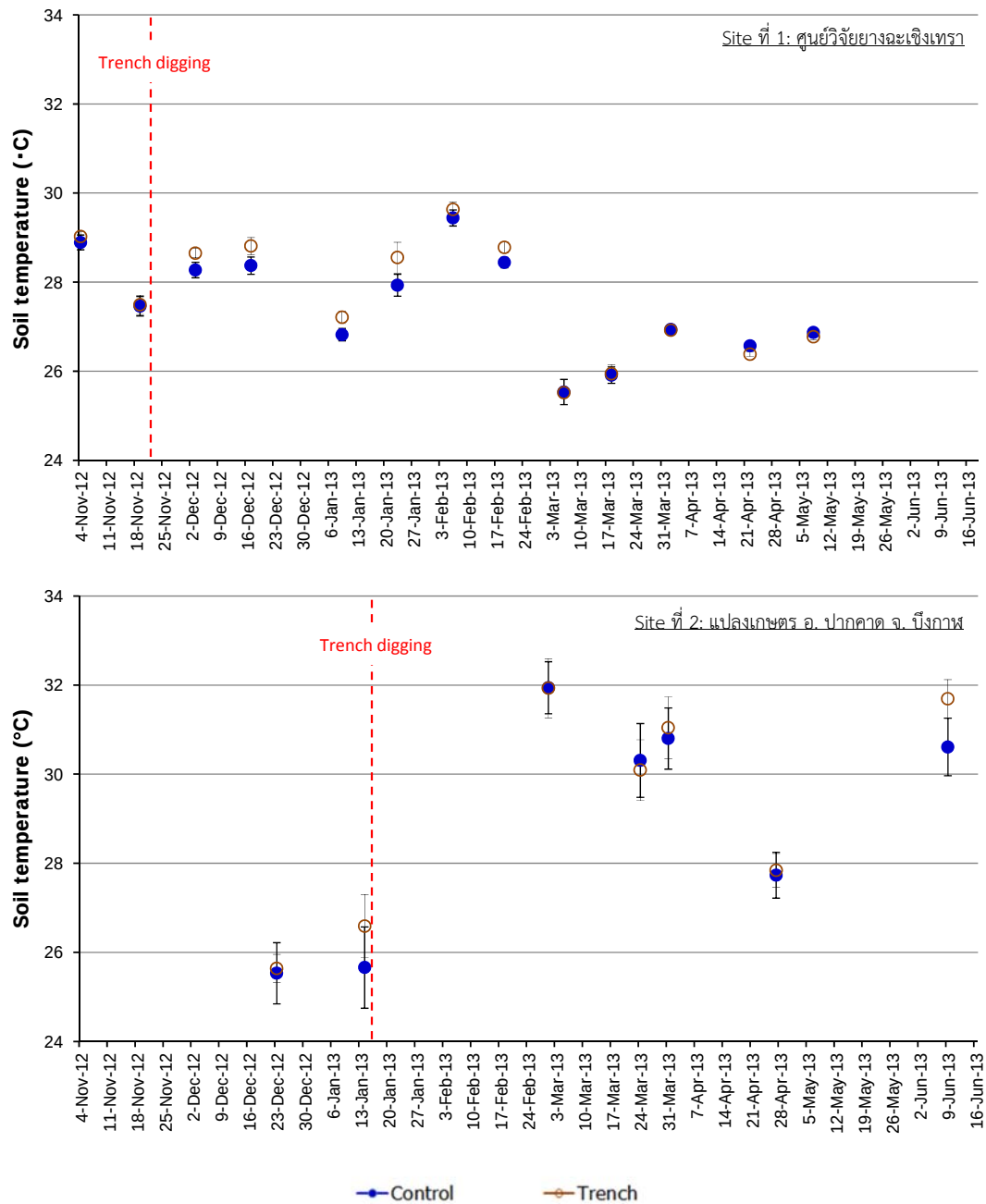
เช่นเดียวกับ Site ที่ 1 แต่เมื่อกำหนดค่า R_d มาแล้ว จะสามารถคำนวณค่า R_h และ R_a ที่เวลา 146 วัน ณ แปลงยาวพาราของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ได้ดังนี้

$$R_h = 302 - R_d \quad (6)$$

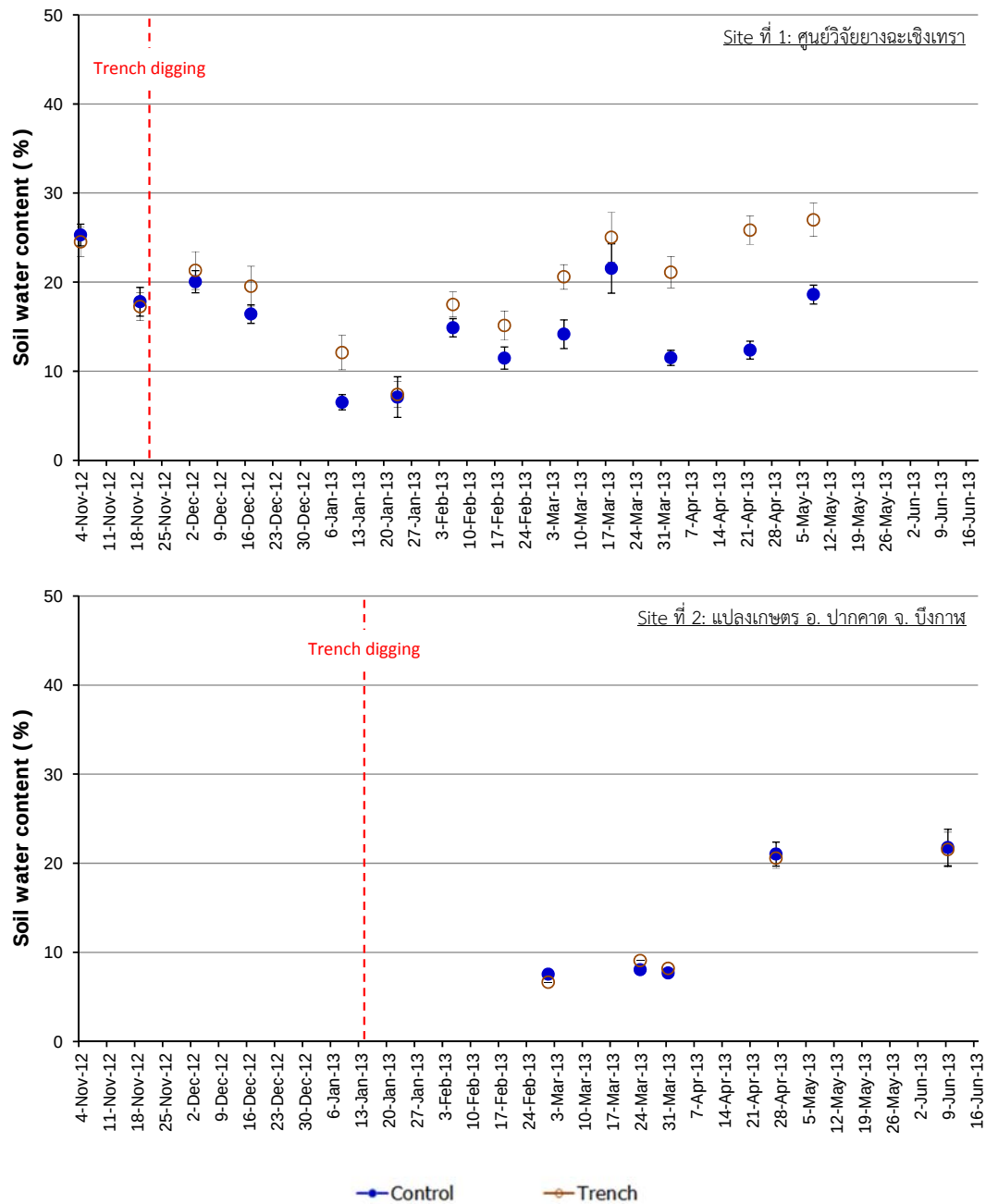
$$R_a = 386 - R_h \quad (7)$$



รูปที่ 2-27 ค่าเฉลี่ยอัตราการหายใจของดินต่อวัน (g C m⁻²d⁻¹) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)



รูปที่ 2-28 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดิน (°C) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)



รูปที่ 2-29 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำในดิน (%) เปรียบเทียบระหว่าง Control และ Trench plot (Vertical bars = confident interval ของค่าเฉลี่ย, ที่ความเชื่อมั่น 95 %)

การทำเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติ

การพัฒนาเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัตินั้นประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ 2 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) Control unit ซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของ Soil respiration chamber จำนวน 10 Chambers ระบบการไหลเวียนอากาศ และตรวจวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศที่สูดมาจากแต่ละ Chamber ด้วยเครื่องวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ รุ่น LI-840 (Licor, USA) (รูปที่ 2-30 รูปบน) และ (2) Soil respiration chamber (รูปที่ 2-30 รูปล่าง)

ส่วนของ Control Unit ที่มิววิจัยได้ดำเนินการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว และสร้าง Soil respiration chamber ต้นแบบ จำนวน 3 Chambers จากการทดลองเก็บข้อมูลในเบื้องต้น พบว่า Chamber ที่พัฒนาขึ้นยังประสบปัญหาความดันภายใน Chamber ที่มีค่าสูง และไม่สามารถวัดค่าได้ในช่วงฤดูแล้งที่มีอัตราการหายใจของดินที่ต่ำมาก อีกทั้ง เครื่องวัดอัตราการหายใจ รุ่น LI-8100 มีปัญหาต้องดำเนินการส่งเครื่องมือดังกล่าวกลับไปซ่อม ดังนั้นเครื่องวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ รุ่น LI-840 ต้องนำมาใช้วัดอัตราการหายใจของดินในรอบปีแทนเครื่องที่ส่งซ่อม ส่งผลให้การพัฒนาเครื่องวัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติต้องหยุดชะงักลง จนกว่าเครื่องมือที่ส่งซ่อมจะส่งคืนกลับมา



รูปที่ 2-30 ชุดอุปกรณ์วัดอัตราการหายใจของดินแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น โดยประกอบด้วย ระบบควบคุมการทำงานของชุดอุปกรณ์และการไหลเวียนของอากาศภายในระบบ (รูปบน) และ Chamber สำหรับวัดอัตราการหายใจของดิน (รูปล่าง)

นอกจากนี้ ทีมวิจัยเห็นว่าจะดำเนินการขอความร่วมมือทางวิชาการในการพัฒนาเครื่องวัดอัตราการหายใจแบบอัตโนมัติ จาก Dr. Naishen Liang นักวิจัยจาก National Institute for Environmental Studies ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นหนึ่งในนักวิจัยภายใต้เครือข่าย AsiaFlux และมีความรู้ความสามารถเป็นอย่างดีในการพัฒนาชุดอุปกรณ์ดังกล่าว



รูปที่ 2-31 Multi-channel automated chamber systems ซึ่งติดตั้งในพื้นที่ศึกษา (รูปซ้าย) และตัวอย่างของ Portable automated chamber system (รูปขวา) ที่พัฒนาขึ้นโดย Dr. Naishen Liang (Liang, 2010)

2.3 ข้อมูลประกอบอื่น ๆ

การติดตามการเจริญเติบโตและการสร้างชีวมวล ประกอบด้วย

2.3.1 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 ไร่ เมื่อวันที่ 21 สิงหาคม 2555 และ 31 มกราคม 2556 ข้อมูล Girth ที่วัดได้ทั้ง 2 ครั้ง จำนวน 2,689 และ 2,653 ต้น มีการกระจายตัวปกติ ค่าเฉลี่ยของ Girth ที่วัดได้ทั้ง 2 ครั้งมีค่าไม่แตกต่างกัน คือ มีเฉลี่ยเท่ากับ 728 และ 703 mm. สำหรับการวัดครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ค่า Girth สูงสุดที่วัดได้ในแต่ละครั้งมีค่าเท่ากับ 1280 และ 1267 mm. ตามลำดับ และค่า Girth ต่ำสุดที่วัดได้ในแต่ละครั้งมีค่าเท่ากับ 176 และ 87 mm. ตามลำดับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) จากการวัดทั้งสองครั้งมีค่าเท่ากับ 160 และ 156 mm. ตามลำดับ ค่า Girth ของต้นยางร้อยละ 50 มีค่าอยู่ในช่วง 625-838 และ 600-805 mm. สำหรับการวัดครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (รูปที่ 2-32)

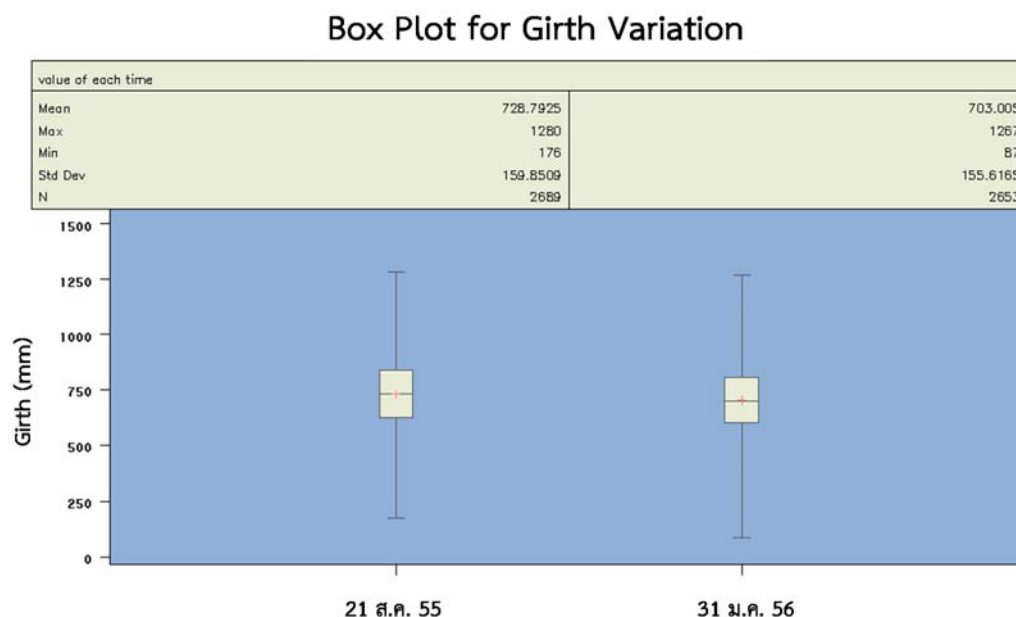
Site ที่ 2 แปลงปลูกยางของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

เนื่องจากต้นยางในแปลงเกษตรกรมีอายุน้อย และน่าจะมีอัตราการเจริญเติบโตของต้นมากกว่าต้นยางอายุมากที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ดังนั้นทีมวิจัยจึงเก็บข้อมูล Girth ถิ่นมากกว่าที่ศูนย์วิจัย

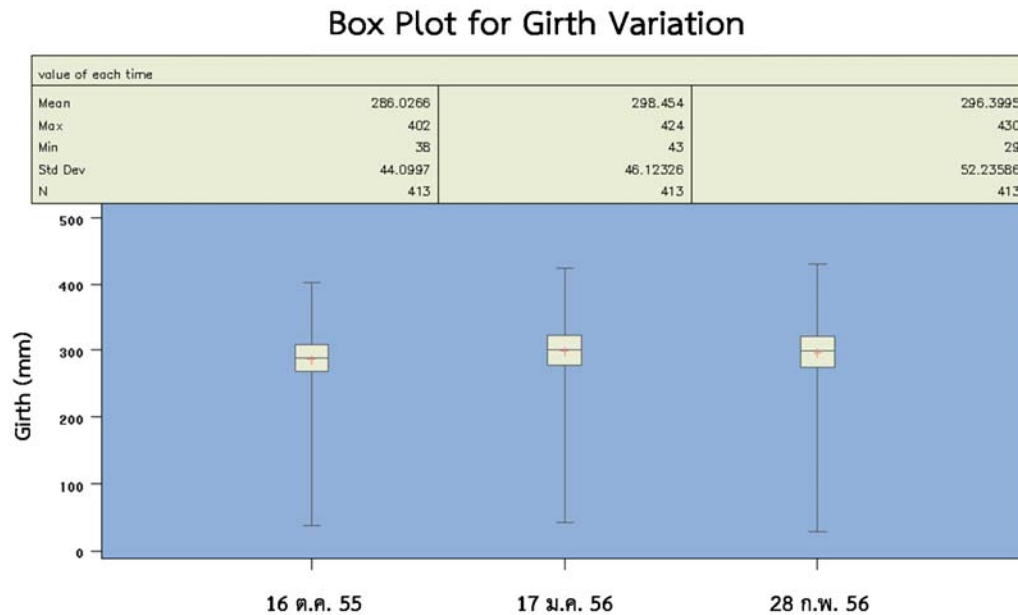
ยางฉะเชิงเทรา การทดลองปีที่ 1 ที่มวิจยวัด Girth ของต้นยางพารา จำนวน 3 ครั้ง ได้แก่ วันที่ 16 ตุลาคม 2555 วันที่ 17 มกราคม 2556 และวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2556 อีกทั้งแปลงปลูกยางพารา จังหวัด บึงกาฬนั้น มีพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่มาก ทำให้ไม่สามารถวัด Girth ของต้นยางได้ทุกต้น ดังนั้นที่มวิจยวัด Girth ของต้นยางพาราทุกต้นในแปลงทดลองย่อย 3 แปลง เพื่อเป็นตัวแทนของแปลงปลูกทั้งหมด

แปลงทดลองย่อยทั้ง 3 แปลงย่อย มีการปลูกยางทั้งหมด 420 ต้น สามารถวัด Girth ได้ จำนวน 413 ต้น และมีต้นที่ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากต้นตายจำนวน 7 ต้น จากการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ย ของ Girth ยางพาราที่วัด 3 ครั้ง มีค่าเท่ากับ 286, 298 และ 296 mm. ตามลำดับวันที่วัดค่า และพบว่า ค่า Girth ที่วัดเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม 2555 มีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดในวันที่ 17 มกราคม 2556 และ 28 กุมภาพันธ์ 2556 ($P=0.0003$) แสดงว่า ในช่วงระยะเวลา 3 เดือน (16 ต.ค. 55 ถึง 17 ม.ค. 56) Girth ของต้นยางพารามีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 12 mm.

ค่า Girth สูงสุดที่วัดครั้งที่ 1- 3 มีค่าเท่ากับ 402, 424 และ 430 mm. ตามลำดับ และมี ค่า Girth ต่ำสุด เท่ากับ 38, 43 และ 29 mm. ตามลำดับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) จากการวัดทั้ง 3 ครั้งมีค่าเท่ากับ 44, 46 และ 52 ม.ม. ตามลำดับ ค่า Girth ของต้นยางร้อยละ 50 มีค่า อยู่ในช่วง 268-308, 277-322 และ 275-321 mm. สำหรับการวัดครั้งที่ 1-3 ตามลำดับ (รูปที่ 2-33)



รูปที่ 2-32 การกระจายของขนาด Girth (mm.) ของต้นยางพาราในแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา



รูปที่ 2-33 การกระจายของขนาด Girth (mm.) ของต้นยางพาราในแปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

2.3.2 การศึกษาชีวมวลของยางพาราที่ร่วงหล่นสู่พื้น (Litter trap) ของแปลงยางพารา

ศึกษาชีวมวลของยางพาราที่ร่วงหล่นสู่พื้นด้วยวิธีการใช้ตาข่ายดัก (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) ได้แก่ ใบ, ก้านใบ, ดอก, ผล และกิ่ง นำชิ้นส่วนยางพาราดังกล่าวมาชั่งน้ำหนักแห้ง และบันทึกข้อมูล เพื่อใช้ประกอบการประเมินการสร้างชีวมวลส่วนเหนือดินในรอบปีของแปลงยางพาราต่อไป

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

$$SLA = \frac{\sum A_i}{\sum W_i} \quad (8)$$

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

การคำนวณค่าดัชนีพื้นที่ใบของแปลงปลูก โดยใช้น้ำหนักแห้งของใบรวมทั้งปี ที่ได้จาก Litter trap มาคำนวณหาค่าดัชนีพื้นที่ใบจากความสัมพันธ์กับ SLA (Eriksson *et al.* 2005 และ Law *et al.* 2001) ที่ได้จากสมการที่ 8

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา

ผู้วิจัยติดตั้งตาข่ายดัก Litter trap บริเวณต่างๆ กันในแปลงทดลอง จำนวน 20 ตำแหน่ง โดยมีตำแหน่งที่ติดตั้งแบบต่างๆ ได้แก่ ติดตั้งระหว่างต้นในแถว ติดตั้งระหว่างแถว ในแนวต้น และติดตั้งระหว่างแถว-ระหว่างต้น ภาพการติดตั้งตาข่ายดักซากพืช แสดงใน รูปที่ 2-34

การหาค่า SLA ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ณ แปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา พบว่า เมื่อน้ำหนักใบเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ใบก็เพิ่มขึ้นตาม และสามารถใช้น้ำหนักแห้งประเมินพื้นที่ใบได้จากสมการที่ 9 โดยน้ำหนักแห้งสามารถใช้ประเมินพื้นที่ใบได้ที่มีความเชื่อมั่น 68% (รูปที่ 2-35)

$$A_i = 99.901W_i + 7.2309 \quad (9)$$

โดย A = พื้นที่ใบของใบที่ i
 W = น้ำหนักแห้งของใบที่ i

การคำนวณค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ของแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน 2555-30 เมษายน 2556 มีค่า LAI อยู่ระหว่าง 0.3 – 6.0 โดยค่า LAI ต่ำสุดปรากฏในวันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2556 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา และค่า LAI สูงสุดปรากฏในวันที่ 22 กุมภาพันธ์ 2556 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยางพาราแตกใบใหม่และอยู่ระหว่างการเจริญเติบโตของใบชุดดังกล่าว (รูปที่ 2-38, รูปบน)

แปลงปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ

ผู้วิจัยร่วมติดตั้ง Litter trap บริเวณต่างๆ กันในแปลงทดลองย่อยทั้ง 3 แปลง จำนวน 9 ตำแหน่งต่อแปลงทดลองย่อย รวมทั้งหมด 27 ตำแหน่ง โดยมีตำแหน่งที่ติดตั้งแบบต่างๆ ได้แก่ ติดตั้งระหว่างต้นในแถว ติดตั้งระหว่างแถว ในแนวต้น และติดตั้งระหว่างแถว-ระหว่างต้น (รูปที่ 2-36 และ 2-37)

การหาค่า SLA ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ณ แปลงปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ พบว่าเมื่อน้ำหนักใบเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ใบก็เพิ่มขึ้นตาม และสามารถใช้น้ำหนักแห้งประเมินพื้นที่ใบได้จากสมการที่ 10 โดยน้ำหนักแห้งสามารถใช้ประเมินพื้นที่ใบได้ที่มีความเชื่อมั่น 98%

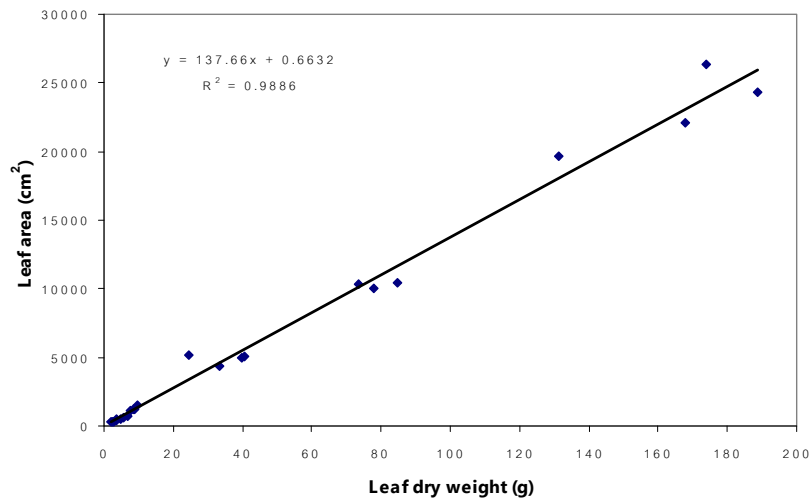
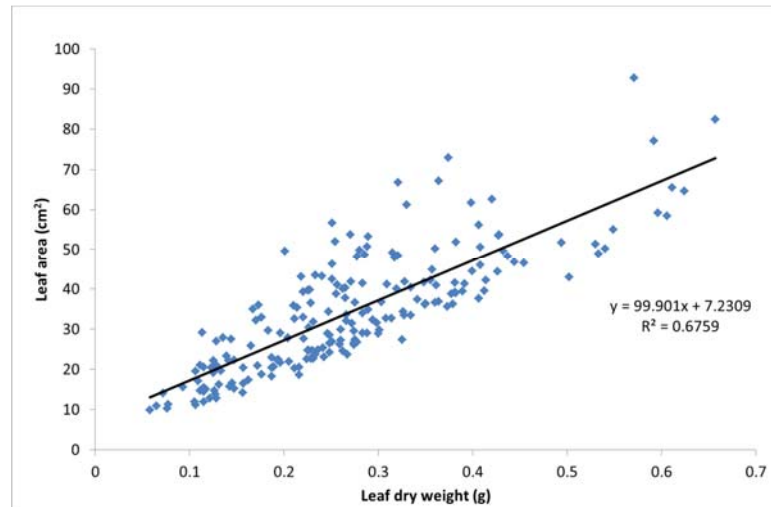
$$A_i = 137.66W_i + 0.6632 \quad (10)$$

โดย A = พื้นที่ใบของใบที่ i
W = น้ำหนักแห้งของใบที่ i

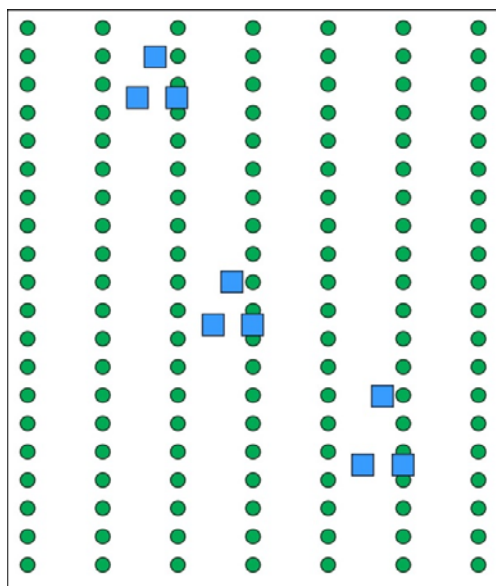
การคำนวณค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ของแปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ระหว่างวันที่ 18 ตุลาคม 2555-31 มกราคม 2556 มีค่า LAI อยู่ระหว่าง 0 – 1.2 โดยค่า LAI ต่ำสุดปรากฏในวันที่ 31 มกราคม 2556 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา และค่า LAI สูงสุดปรากฏในวันที่ 18 ตุลาคม 2555 ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่ยางจะทิ้งใบ (รูปที่ 2-38, รูปล่าง)



รูปที่ 2-34 การติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา



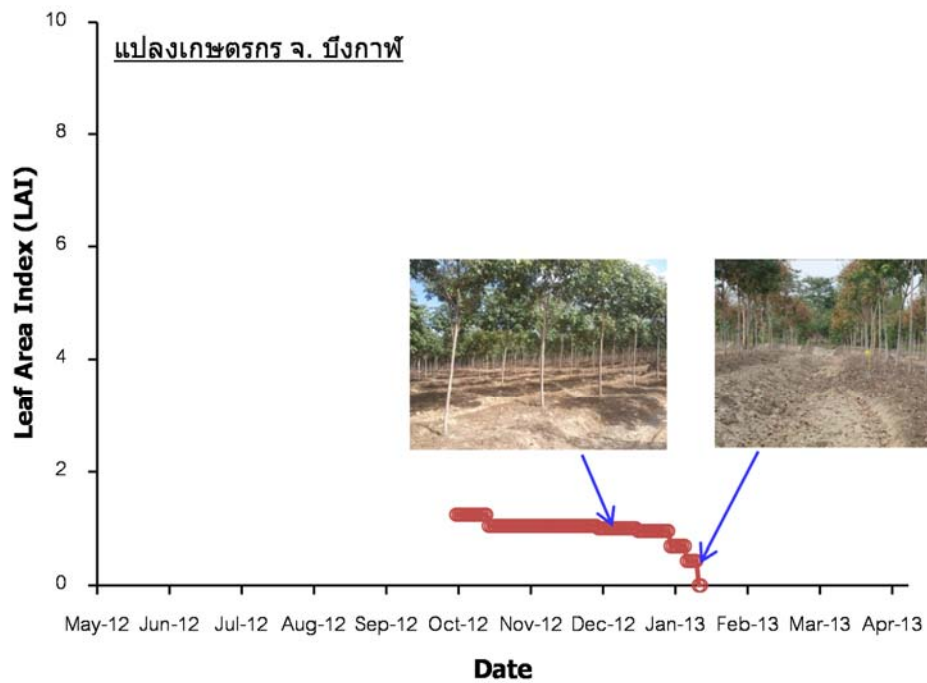
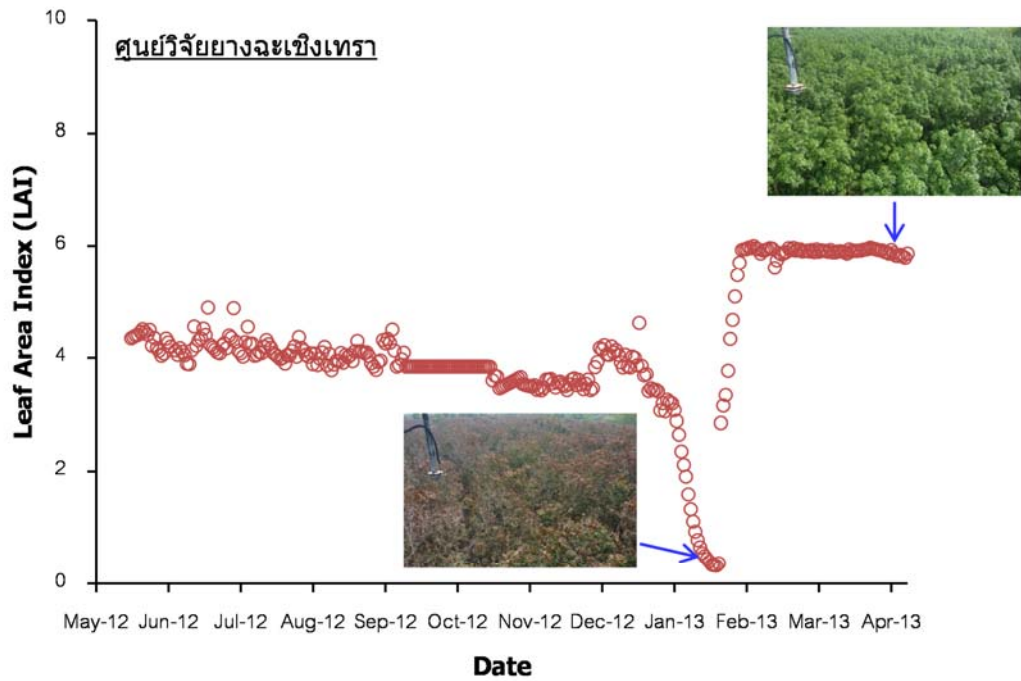
รูปที่ 2-35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งของใบและพื้นที่ใบ ที่สุ่มเก็บตัวอย่างใบจากแปลงทดลอง ยางพาราที่ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จำนวน 200 ตัวอย่าง จากตัวอย่างใบ สามารถคำนวณ Specific Leaf Area จากสมการที่ 8 ได้ $126.69 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (ภาพบน) และจากแปลงยางพารา จังหวัดบึงกาฬ ซึ่งเก็บตัวอย่างใบเป็นชุดๆ ละ 5 10 20 80 160 และ 320 ใบ จำนวน 4 ซ้ำ สามารถคำนวณ Specific Leaf Area จากสมการที่ 8 ได้ $137.66 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (ภาพล่าง)



รูปที่ 2-36 แผนที่แสดงตำแหน่งที่สุ่มติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองย่อย ในแปลงปลูกยางพารา จังหวัดบึงกาฬ (● ต้นยางพารา, ■ Litter trap)



รูปที่ 2-37 ภาพแสดงการติดตั้ง Litter trap ในแปลงทดลองย่อย ในแปลงปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ



รูปที่ 2-38 ความแปรปรวนของค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ของแปลงปลูกยางพารา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และแปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง) ซึ่งประเมินจากความสัมพันธ์กับค่า Specific leaf area และข้อมูลจาก Litter trap

2.4 การคำนวณค่า GPP, NEP และ NBP

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

$$NEP = NEE_{day} \quad (11)$$

NEP เท่ากับผลรวมของค่า NEE ในช่วงกลางวัน โดยค่า NEE ในช่วงเวลาดังกล่าวจะมีค่าเป็นลบ (-) ซึ่งแสดงว่ามีการเคลื่อนที่ Flux ของคาร์บอนจากบรรยากาศเข้าสู่ระบบนิเวศทางพารา หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ต้นยางพาราดูดซับคาร์บอนเข้าไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงนั่นเอง

$$R_e = NEE_{night} \quad (12)$$

R_e เท่ากับผลรวมของค่า NEE ในช่วงกลางคืน โดยค่า NEE ในช่วงเวลาดังกล่าวจะมีค่าเป็นบวก (+) ซึ่งแสดงว่ามีการเคลื่อนที่ Flux ของคาร์บอนจากระบบนิเวศทางพาราขึ้นสู่บรรยากาศ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ต้นยางพาราปลดปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศโดยกระบวนการหายใจของต้นยางนั่นเอง

$$GPP = NEP + R_e \quad (13)$$

- 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_e = การหายใจทั้งหมดของระบบนิเวศ (Ecological respiration, R_e) โดยสามารถคำนวณได้จากค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ ($+NEE$) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลากลางคืน

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

$$NBP = NEP - D \quad (14)$$

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

ซึ่งในการศึกษาทดลองครั้งนี้ ได้จัดทำข้อมูลเพียงระยะเวลานั้น อีกทั้งช่วงระยะเวลาศึกษายังไม่ครอบคลุมการเจริญเติบโตของยางพาราในรอบปี จึงยังไม่สามารถคำนวณค่า Net biome production (NBP) ได้

2.4.1 สมดุลคาร์บอนของระบบนิเวศยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา

จากการดำเนินงานวิจัย ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2555 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2556 สามารถสรุปผลรวมของผลผลิตคาร์บอนสุทธิของระบบ (NEP) อัตราการปลดปล่อยคาร์บอนจากการหายใจทั้งหมดของระบบนิเวศ (R_e) และอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) เป็นรายเดือน ได้ดังนี้ ในช่วงระยะเวลาที่เก็บข้อมูลวิจัย NEP มีค่าตั้งแต่ -223.98 ถึง 311.35 $\text{kg C.rai}^{-1}\text{month}^{-1}$ ในช่วงระยะเวลา 11 เดือน NEP มีค่าสะสมเท่ากับ 1,351.48 kg C.rai^{-1} โดยมี NEP สูงสุดและต่ำสุดในเดือน ตุลาคม 2555 และ กุมภาพันธ์ 2556 ตามลำดับ ส่วนในเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ 2556 ซึ่งพบว่า ค่า NEP มีค่าน้อยกว่า 0 แสดงว่าในช่วงเวลา 2 เดือนดังกล่าว ระบบนิเวศของยางพาราทำหน้าที่เป็น Carbon source ในขณะที่ช่วงเดือนอื่นๆ นั้น NEP มีค่ามากกว่า 0 ระบบนิเวศของยางพาราจึงทำหน้าที่เป็น Carbon sink สำหรับ R_e และ GPP มีค่าตั้งแต่ 158.99 ถึง 365.74 $\text{kg C.rai}^{-1}\text{month}^{-1}$ และ 139.16 ถึง 611.72 $\text{kg C.rai}^{-1}\text{month}^{-1}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 2-2)

จากรูปที่ 2-39 (รูปบน) จะเห็นได้ว่า NEP มีความแปรปรวนไปตามฤดูกาล และมีค่าผันแปรไปตาม ค่า GPP และ R_e ของระบบ โดยพบว่า ในช่วงเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ 2556 ซึ่งเป็นระยะทิ้งใบของยางพารา GPP หรืออัตราการสังเคราะห์แสงทั้งหมดของระบบนิเวศมีค่าต่ำที่สุดในรอบปี คือ 139.16 และ 141.16 $\text{kg C.rai}^{-1}\text{month}^{-1}$ ตามลำดับ และเมื่อยางพาราเริ่มสร้างใบใหม่ในช่วงเดือน มีนาคม 2556 GPP จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ใบ ในทางกลับกัน R_e จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อยางพาราทิ้งใบ คือ มีค่าเท่ากับ 365.74 $\text{kg C.rai}^{-1}\text{month}^{-1}$ ในเดือนกุมภาพันธ์ 2556 แต่เมื่อยางพาราแตกใบใหม่ R_e จะมีค่าลดลง

2.4.2 สมดุลคาร์บอนของระบบนิเวศยางพารา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

จากการดำเนินงานวิจัย ตั้งแต่วันที่ 22 ตุลาคม 2555 ถึง 30 เมษายน 2556 พบว่า ในช่วงระยะเวลาที่เก็บข้อมูลวิจัย NEP มีค่าตั้งแต่ 9.83 ถึง 120.90 $\text{kg C.rai}^{-1}\text{month}^{-1}$ ในช่วงระยะเวลาประมาณ 6.3 เดือน NEP มีค่าสะสมเท่ากับ 414.21 kg C.rai^{-1} และตลอดระยะเวลาที่เก็บข้อมูล พบว่า NEP มีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าในช่วงเวลาดังกล่าวระบบนิเวศของยางพาราทำหน้าที่เป็น Carbon sink สำหรับ R_e และ GPP มีค่าตั้งแต่ 18.36 ถึง 43.08 $\text{kg C.rai}^{-1}\text{month}^{-1}$ และ 35.71 ถึง 143.83 $\text{kg C.rai}^{-1}\text{month}^{-1}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 2-3)

จากรูปที่ 2-39 (รูปล่าง) จะเห็นได้ว่า NEP มีค่าผันแปรไปตาม ค่า GPP และ R_e ของระบบ โดยพบว่า ในช่วงเดือนมกราคม 2556 ซึ่งเป็นระยะทิ้งใบของยางพารา GPP หรืออัตราการสังเคราะห์แสงทั้งหมดของระบบนิเวศมีค่าต่ำที่สุดในรอบปี คือ 35.17 $\text{kg C.rai}^{-1}\text{month}^{-1}$ และเมื่อยางพาราเริ่มสร้างใบ

ใหม่ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2556 GPP จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วน R_e มีค่าสูงที่สุดในช่วงเดือนเมษายน 2556 คือ มีค่าเท่ากับ $43.08 \text{ kg C.rai}^{-1}\text{month}^{-1}$

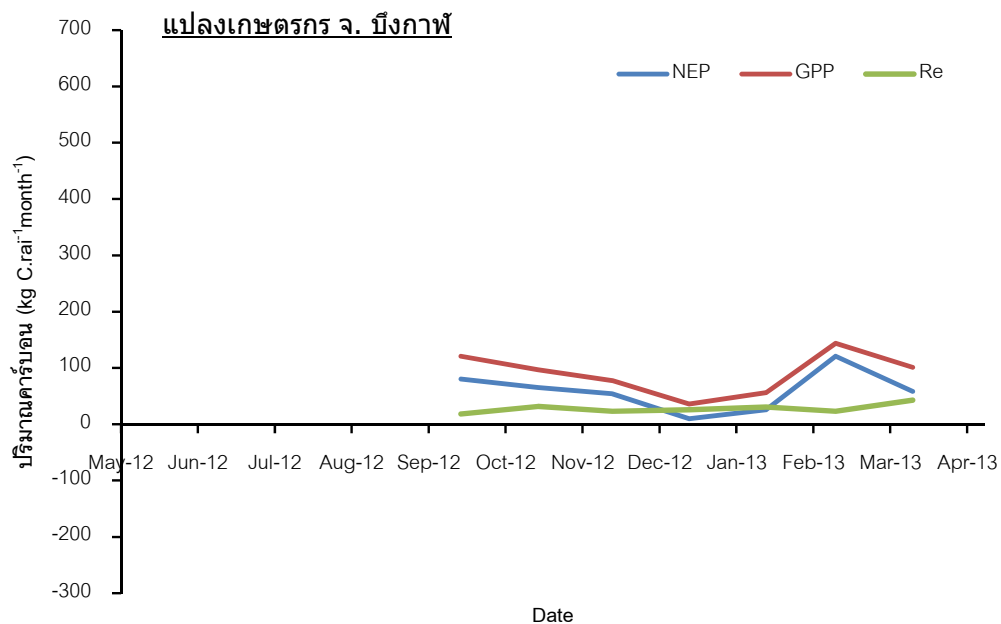
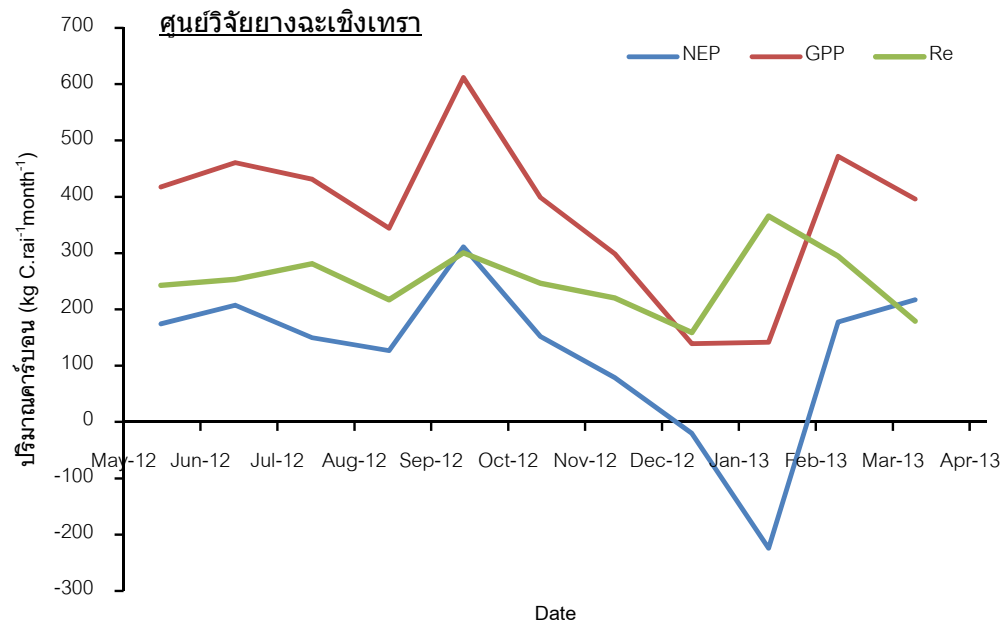
ตารางที่ 2-2 แสดงค่าผลผลิตคาร์บอนสุทธิของระบบ (NEP) การหายใจทั้งหมดของระบบนิเวศ (R_e) และอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556)

ปี	เดือน	NEP (kg C.rai^{-1})	R_e (kg C.rai^{-1})	GPP (kg C.rai^{-1})
2555	มิถุนายน	174.45	242.72	417.17
	กรกฎาคม	207.45	253.45	460.90
	สิงหาคม	150.06	281.41	431.47
	กันยายน	127.03	217.15	344.19
	ตุลาคม	311.35	300.36	611.72
	พฤศจิกายน	152.04	246.68	398.72
	ธันวาคม	78.53	220.38	298.91
2556	มกราคม	-19.82	158.99	139.16
	กุมภาพันธ์	-223.98	365.74	141.76
	มีนาคม	177.40	294.76	472.17
	เมษายน	216.97	178.95	395.90
	รวม	1,351.48	2,760.59	4,112.07

ตารางที่ 2-3 แสดงค่าผลผลิตคาร์บอนสุทธิของระบบ (NEP) การหายใจทั้งหมดของระบบนิเวศ (R_e) และอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)

ปี	เดือน	NEP (kg C.rai^{-1})	R_e (kg C.rai^{-1})	GPP (kg C.rai^{-1})
2555	ตุลาคม ^{1/}	80.10	18.36	98.46
	พฤศจิกายน	65.08	31.60	96.68
	ธันวาคม	54.29	23.17	77.46
2556	มกราคม	9.83	25.88	35.71
	กุมภาพันธ์	25.80	30.46	56.27
	มีนาคม	120.90	22.94	143.83
	เมษายน	58.21	43.08	101.29
	รวม	414.21	195.49	609.70

^{1/} เก็บข้อมูลไม่ครบเดือน



รูปที่ 2-39 ค่าสะสมรายเดือนของผลผลิตคาร์บอนสุทธิ (NEP, Net Ecosystem Production), อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP, Gross primary production) และการหายใจทั้งหมดของระบบนิเวศ (Re, Ecosystem respiration) ของแปลงปลูกยางพารา ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556, 11 เดือน) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56, 6 เดือน)

2.5 ค่า Carbon equivalent ที่ใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาคาร์บอนฟุตพริ้นต์

ข้อมูลผลผลิตคาร์บอนสุทธิ (NEP) ซึ่งคำนวณจากข้อมูลสมดุลคาร์บอนที่วัดได้จริงด้วยเทคนิค Eddy Covariance เป็นหนึ่งในข้อมูลการปล่อยแก๊สเรือนกระจกช่วงต้นน้ำ (Upstream emissions) ซึ่งยังไม่มี การนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์เนื่องจากไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะ สามารถนำมาคำนวณได้ แต่ในปัจจุบันซึ่งการพัฒนาของเทคโนโลยีและเทคนิคต่างๆ ทำให้เราสามารถ ตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของพื้นที่ปลูกพืชได้ ดังนั้นทีมวิจัยจึงศึกษาการ ปลดปล่อยปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของพื้นที่ปลูกยางดังกล่าวเพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลในการ คำนวณหาคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์

จากข้อมูล Carbon equivalent ของพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ แสดงให้ เห็นว่ามีคาร์บอนที่ถูกเก็บไว้ในพื้นที่ปลูกยางสูงถึง 1,351.48 และ 334.11 kg C.ra⁻¹ คิดเป็นร้อยละ 90.73 และ 96.19 ตามลำดับ สำหรับปริมาณคาร์บอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาเนื่องมาจากการเกษตรกรรม นั้น คิดเป็นร้อยละ 9.02 และ 13.23 ตามลำดับ และปริมาณคาร์บอนในน้ำยาง ซึ่งมีการเก็บผลผลิต เฉพาะที่ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา มีปริมาณ Carbon equivalent สูงถึงร้อยละ 8.67 ซึ่งอาจถูกใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์นั้นๆ มีอายุใช้งานนาน เกิน 10 ปี (ตารางที่ 2-4 และรูปที่ 2-40)

ตารางที่ 2-4 แสดงค่า Carbon equivalent ของข้อมูลการปล่อยแก๊สเรือนกระจกของพื้นที่ปลูก ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ข้อมูล	ปริมาณคาร์บอนที่ถูกปลดปล่อยออกมา (kg C.ra ⁻¹)	
	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อายุต้นยาง 19 ปี ^{1/}	แปลงเกษตรกร จ.บึงกาฬ อายุต้นยาง 4 ปี ^{2/}
1. พื้นที่ปลูกยางพารา (ค่า NEP)	-1,351.48 ^{3/}	-334.11
2. การเกษตรกรรม ^{4/}	9.02	13.23
3. ผลผลิต	-129.11 ^{5/}	- ^{6/}
ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด	-1,471.57	-320.88

^{1/} ประเมินจากข้อมูล 11 เดือน (1 มิ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56)

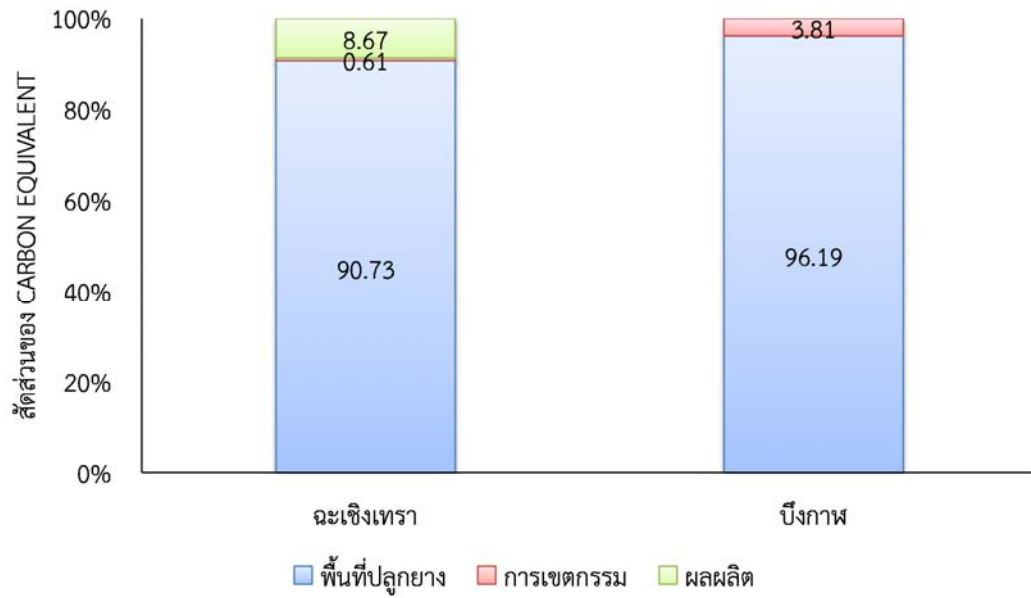
^{2/} ประเมินจากข้อมูล 6 เดือน (1 พ.ย. 55-30 เม.ย. 56)

^{3/} ปริมาณคาร์บอนที่ถูกปลดปล่อยออกมา (kg C.ra⁻¹) หมายความว่ามีการดูดกลืนคาร์บอนเข้าไปแทนที่จะ ปลดปล่อยออกมา

^{4/} ประเมินจากค่า Carbon dioxide equivalent ของข้อมูลเกษตรกรรม ณ ปีที่ศึกษา คิดจำนวนเดือนของข้อมูล เทียบเท่ากับข้อมูลปริมาณคาร์บอนสะสมของพื้นที่ปลูกยางพารา คือ 11 เดือน และ 6 เดือน ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ตามลำดับ

^{5/} ปริมาณผลผลิตน้ำยาง ตั้งแต่เดือน มิถุนายน 2555 – มกราคม 2556 ส่วนเดือนกุมภาพันธ์ – เมษายน 2556 ไม่มี การกรีดยาง รวมทั้งสิ้น 160.97 kg.ra⁻¹ และคำนวณเป็นปริมาณคาร์บอนที่สะสมในน้ำยางเท่ากับ 129.11 kg C.ra⁻¹ (กาญจนนา, 2550)

^{6/} แปลงปลูกยางอายุน้อย ยังไม่ได้เปิดกรีด



รูปที่ 2-40 แสดงสัดส่วนของค่า Carbon equivalent ของข้อมูลการปล่อยแก๊สเรือนกระจกของพื้นที่ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (ข้อมูล 11 เดือน ตั้งแต่ 1 มิ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. ปทุมธานี (6 เดือน ตั้งแต่ 1 พ.ย. 55-30 เม.ย. 56)

3.4 สรุปผลการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาข้อมูลองค์ประกอบร่องรอยของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราที่มาจากการเกษตรกรรม ซึ่งรวมถึงการใช้ปุ๋ย ยา และสารเคมี และของเสียที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราในเขตพื้นที่การศึกษาดังกล่าว แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของสวนยางพารา ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราตลอดช่วงอายุต้นยาง และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ณ ปีที่เก็บข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

จากการสำรวจข้อมูลจากเขตพื้นที่การศึกษิตตามสภาพพื้นที่จริงของสวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา มีข้อมูลสนับสนุนการเกษตรกรรมตลอดช่วงอายุต้นยางพารา ซึ่งแตกต่างจากสวนยางพารา จังหวัดบึงกาฬ ที่ยังขาดข้อมูลในส่วนของการเกษตรกรรมในช่วงปีที่ 4 ถึงปีที่ต้นยางหมดอายุ (ในที่นี่กำหนดอายุต้นยางพาราตลอดช่วงอายุ 25 ปี) ซึ่งครอบคลุมข้อมูลระยะการปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง และการปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุด้วย เหตุนี้ ทางทีมคณะทำงานจึงได้ใช้ข้อมูลจากสำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง (สกย.) จังหวัดบึงกาฬ เพื่อให้การคำนวณมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยข้อมูลอ้างอิงจากสำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง (สกย.) จังหวัดบึงกาฬ แสดงได้ดังภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1 โดยสรุปบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของสวนยางพารา จังหวัดบึงกาฬ และสวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทราได้ดังตารางที่ 3-4 และตารางที่ 3-5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3-4 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของสวนยางจังหวัดบึงกาฬ ตลอดช่วงอายุ 25 ปี

สารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย	สารขาออก	ปริมาณ	หน่วย
ต้นกล้า	77.0000	ต้น	น้ำยางพาราสด	8,880	กิโลกรัม
น้ำมันดีเซล	21.7195	กิโลกรัม	มลสารจากการใช้ปุ๋ย		
น้ำมันเครื่อง	1.0000	กิโลกรัม	N ₂ O	9.0937	กิโลกรัม
ปุ๋ยสูตรไนโตรเจน	578.6875	กิโลกรัม	มลสารจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง		
ปุ๋ยสูตรฟอสฟอรัส	155.5275	กิโลกรัม	CO ₂	70.4507	กิโลกรัม
ปุ๋ยสูตรโพแทสเซียม	354.5275	กิโลกรัม	CH ₄	0.0039	กิโลกรัม
ไกลโฟเซต 48%	12.7558	กิโลกรัม	N ₂ O	0.0272	กิโลกรัม
พาราควอต	18.6250	กิโลกรัม			

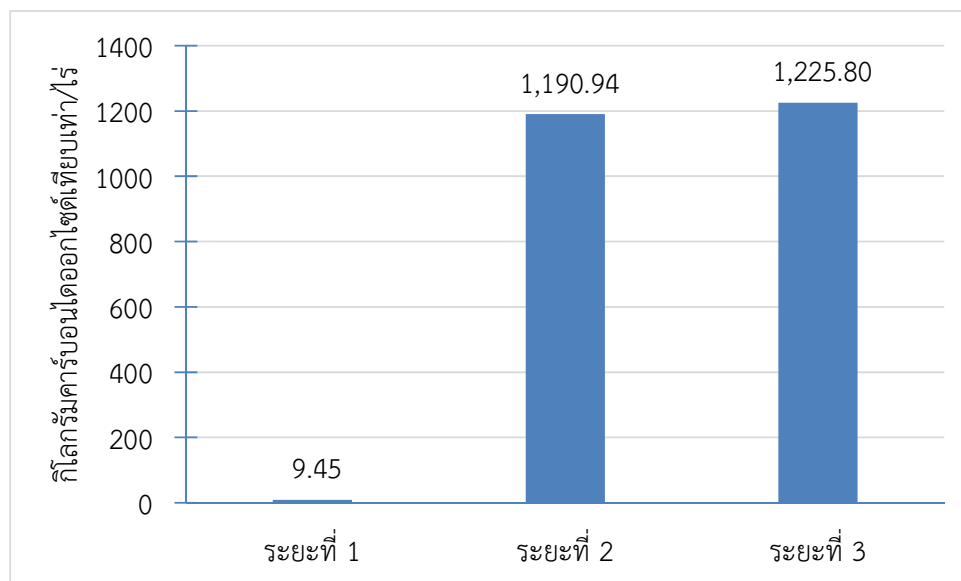
หมายเหตุ น้ำยางพารามี %DRC = 30

ตารางที่ 3-5 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของสวนยางจังหวัดฉะเชิงเทรา ตลอดช่วงอายุ 30 ปี

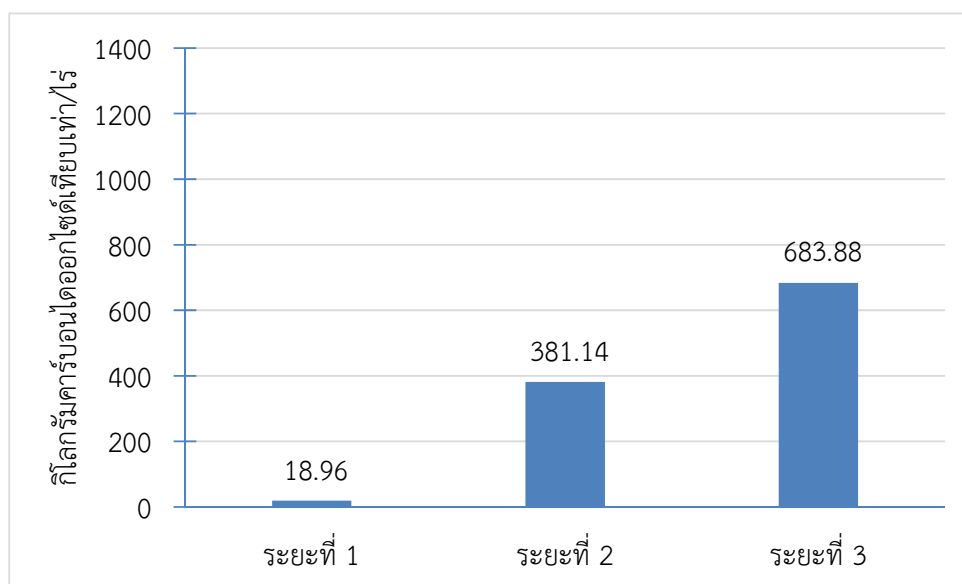
สารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย	สารขาออก	ปริมาณ	หน่วย
ต้นกล้า	73.0000	ต้น	น้ำยางพาราสด	11,193.3333	กิโลกรัม
น้ำมันดีเซล	3.3560	กิโลกรัม	มลสารจากการใช้ปุ๋ย		
น้ำมันเครื่อง	0.5235	กิโลกรัม	N ₂ O	6.2879	กิโลกรัม
ปุ๋ยสูตรไนโตรเจน	400.1400	กิโลกรัม	มลสารจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง		
ปุ๋ยสูตรฟอสฟอรัส	83.8000	กิโลกรัม	CO ₂	10.8857	กิโลกรัม
ปุ๋ยสูตรโพแทสเซียม	243.4500	กิโลกรัม	CH ₄	0.0006	กิโลกรัม
พาราควอตไดคลอไรด์ 27.6 %w/v	5.8320	กิโลกรัม	N ₂ O	0.0042	กิโลกรัม

หมายเหตุ น้ำยางพารามี %DRC = 32

สำหรับค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราตลอดช่วงอายุต้นยางในพื้นที่สวนยางพารา อำเภอบางบาล จังหวัดบึงกาฬ มีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ตลอดช่วงอายุ 25 ปี อยู่ที่ 2,426.19 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ โดยมาจากขั้นตอนการเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่ การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง และการปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุ ยาง 9.45 1,190.94 และ 1,225.80 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5-1 คิดเป็นค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์เฉลี่ย 97.05 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ต่อปี ซึ่งมีความมากกว่าค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ตลอดช่วงอายุ 30 ปีของสวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา ที่มีค่า 1,083.99 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ โดยมาจากขั้นตอนการเตรียมการเพาะปลูก และการปรับพื้นที่ การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง และการปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง 18.96 381.14 และ 683.88 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5-2 คิดเป็นค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์เฉลี่ย 36.13 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ต่อปี



รูปที่ 3-5 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา จังหวัดบึงกาฬ โดย
 ระยะที่ 1 คือ การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่
 ระยะที่ 2 คือ การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง
 ระยะที่ 3 คือ การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง



รูปที่ 3-6 ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา โดย
 ระยะที่ 1 คือ การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่
 ระยะที่ 2 คือ การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง
 ระยะที่ 3 คือ การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง

ในส่วนของค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ณ ปีที่เก็บข้อมูล ของสวนยางพารา อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ (ประเมินจากข้อมูลสวนยางพารา ณ อายุ 3 ปี) และสวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา (ประเมินจากข้อมูลสวนยางพารา ณ อายุ 18 ปี) มีค่าเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราเฉลี่ยตลอดช่วงอายุต้นยาง คือ สวนยางพารา จังหวัดบึงกาฬจะมีค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์เท่ากับ 39.29 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ต่อปี ซึ่งมีความมากกว่าค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทราที่ 32.14 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ต่อปี

ทั้งนี้ ค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อผลผลิตน้ำยางพาราสด (น้ำหนักแห้ง) 1 กิโลกรัมของสวนยางเขตจังหวัดบึงกาฬ มีค่าเท่ากับ 0.4553 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และสวนยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา มีค่าเท่ากับ 0.3026 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยผลกระทบของค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ทั้งสองพื้นที่มาจากการได้มาซึ่งปุ๋ยมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 81.02 และ 81.79 ของค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ทั้งหมด ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุหลักของค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์สวนยางพารา จังหวัดบึงกาฬ ที่มีค่ามากกว่าสวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา นั้น มาจากการใช้ทรัพยากร สารเคมี และปุ๋ยต่อหน่วยพื้นที่ในปริมาณที่มากกว่า แสดงถึงปัญหาของการผลิตน้ำยางพาราแห่งของทั้ง 2 พื้นที่ ตารางที่ 3-6 และตารางที่ 3-7 ตามลำดับ

หมายเหตุ การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ยังมิได้พิจารณาการปันส่วนให้กับ ไมยางพารา

ตารางที่ 3-6 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของน้ำยางแห้ง 1 กิโลกรัม จากสวนยางจังหวัดบึงกาฬ

สารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย	สารขาออก	ปริมาณ	หน่วย
ต้นกล้า	0.0145	ต้น	น้ำยางพาราแห้ง	1.0000	กิโลกรัม
น้ำมันดีเซล	0.0041	กิโลกรัม	มลสารจากการใช้ปุ๋ย		
น้ำมันเครื่อง	0.0002	กิโลกรัม	N ₂ O	0.0017	กิโลกรัม
ปุ๋ยสูตรไนโตรเจน	0.1086	กิโลกรัม	มลสารจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง		
ปุ๋ยสูตรฟอสฟอรัส	0.0292	กิโลกรัม	CO ₂	0.0132	กิโลกรัม
ปุ๋ยสูตรโพแทสเซียม	0.0665	กิโลกรัม	CH ₄	7.41E-07	กิโลกรัม
ไกลโฟเซต 48%	0.0024	กิโลกรัม	N ₂ O	5.10E-06	กิโลกรัม
พาราควอต	0.0035	กิโลกรัม			

ตารางที่ 3-7 บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของน้ำยางแห้ง 1 กิโลกรัม จากสวนยางจังหวัดฉะเชิงเทรา

สารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย	สารขาออก	ปริมาณ	หน่วย
ต้นกล้า	0.0204	ต้น	น้ำยางพาราแห้ง	1.0000	กิโลกรัม
น้ำมันดีเซล	0.0009	กิโลกรัม	มลสารจากการใช้ปุ๋ย		
น้ำมันเครื่อง	0.0001	กิโลกรัม	N ₂ O	0.0018	กิโลกรัม
ปุ๋ยสูตรไนโตรเจน	0.1117	กิโลกรัม	มลสารจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง		
ปุ๋ยสูตรฟอสฟอรัส	0.0234	กิโลกรัม	CO ₂	0.0030	กิโลกรัม
ปุ๋ยสูตรโพแทสเซียม	0.0680	กิโลกรัม	CH ₄	1.70E-07	กิโลกรัม
พาราควอตไดคลอไรด์ 27.6 %w/v	0.0016	กิโลกรัม	N ₂ O	1.17E-06	กิโลกรัม

สำหรับสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราของทั้งสองพื้นที่ดังกล่าว รวมถึง Verification sheet และค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor) ของการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ตามกลุ่มอุตสาหกรรมที่ใช้ในการศึกษา แสดงได้ดังภาคผนวก ก ภาคผนวก ข และภาคผนวก ค ตามลำดับ

บทที่ 4

การศึกษาสมมูลน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำอเวเตอร์พุตปริ้นต์ของสวนยางพารา

4.1 ศึกษาสมมูลน้ำของพื้นที่ปลูกยางพาราด้วยเทคนิค Eddy Covariance

การศึกษาสมมูลคาร์บอนของสวนยางพาราดำเนินการใน 2 พื้นที่ ซึ่งมีสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน ได้แก่

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา

แปลงยางอายุมาก ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา (ละติจูด $13^{\circ}34'21.97''N$ ลองจิจูด $101^{\circ}28'5.53''E$ ความสูงจากระดับน้ำทะเล 69 เมตร) ตั้งอยู่ที่อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา แปลงทดลองตั้งอยู่กลางศูนย์วิจัย มีเนื้อที่ประมาณ 50 ไร่ เป็นพื้นที่ปลูกยางที่อาศัยน้ำฝน ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 19 ปี (ปี พ.ศ. 2556) ระยะปลูก 2.5×7 เมตร และเปิดกรีดมาแล้ว 10 ปี ดินในพื้นที่ปลูกยางเป็นชุดดินกบินทร์บุรี ความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดยางพารา (รูปที่ 2-1)

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 4 ปี (ปี พ.ศ. 2556) ระยะปลูก 3×7 เมตร และเป็นต้นยางที่ยังไม่เปิดกรีด ดินในพื้นที่ปลูกยางเป็นชุดดินโพธิ์สัญ สวนยางพารานี้เป็นสวนยางพาราปลูกใหม่ อยู่ในเขตพื้นที่การปลูกสวนยางพารา ระยะที่ 3 แปรแผนไร่ และต่อเนื่องจากระยะที่ 2 หนึ่งล้านไร่ พื้นที่มีความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดยางพารา (รูปที่ 2-2)

4.1.1 การคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, ETR)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา มีอัตราการคายระเหยน้ำอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 5.6 mm.day^{-1} อัตราการคายระเหยน้ำต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 10 พฤศจิกายน 2556 และวันที่ 15 มิถุนายน 2555 ตามลำดับ (รูปที่ 4-1, รูปบน)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ อัตราการคายระเหยน้ำอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 3.04 mm.day^{-1} อัตราการคายระเหยน้ำต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในวันที่ 26 มกราคม 2556 และวันที่ 21 ตุลาคม 2555 ตามลำดับ (รูปที่ 4-1, รูปล่าง)

4.1.2 การใช้น้ำของยางพารา (Crop Water Use, CWU)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา การใช้น้ำของยางพารามีค่าอยู่ระหว่าง $0.03 - 0.89 \text{ mm.Rai}^{-1}\text{day}^{-1}$ ซึ่งมีลักษณะการผันแปรไปตามฤดูกาล และมีลักษณะการผันแปรที่คล้ายคลึงกับค่าการคายระเหยของน้ำ (ETR) คือ จะพบความต้องการการใช้น้ำของยางพาราน้อยที่สุดในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2556 และมีความต้องการน้ำสูงที่สุดในช่วงเดือนมิถุนายน 2555 (รูปที่ 4-2, รูปบน)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ พบว่า การใช้น้ำของยางพารามีค่าอยู่ระหว่าง $0.03 - 0.49 \text{ mm.Rai}^{-1}\text{day}^{-1}$ ซึ่งความต้องการการใช้น้ำของยางพาราน้อยที่สุดในช่วงเดือนมกราคม 2556 และยางพารามีการใช้น้ำมากที่สุดในช่วงเดือนตุลาคม 2555 (รูปที่ 4-2, รูปล่าง)

4.1.3 การเคลื่อนของน้ำในลำต้น (Sap flow)

การเคลื่อนของน้ำในลำต้น (Sap flow) วัดด้วยวิธีการ Heat dissipation method ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของ Granier (1985, 1987) ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในลำต้น รุ่น SF32 Sap flow sensor ของบริษัท UP เป็นการคำนวณอัตราการไหลของน้ำ มีหน่วยวัดเป็น mm และเปลี่ยนหน่วยเป็นค่าการคายน้ำของพืช มีหน่วยเป็น mm.day^{-1}

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่า การเคลื่อนของน้ำในลำต้นยางพารามีค่าอยู่ระหว่าง $0.81 - 1.97 \text{ mm.day}^{-1}$ โดยค่าการเคลื่อนของน้ำในลำต้นยางพาราลดต่ำสุดและสูงสุด ปรากฏในวันที่ 30 มีนาคม 2556 และ 16 เมษายน 2556 ตามลำดับ (รูปที่ 4-3, รูปบน)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ พบว่า ค่าการเคลื่อนของน้ำในลำต้นยางพารามีค่าอยู่ระหว่าง $0.52 - 0.79 \text{ mm.day}^{-1}$ โดยพบค่าการคายน้ำของยางพารามีค่าใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาบันทึก เป็นผลเนื่องมาจากระยะเวลาที่วัดเป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆ และเป็นช่วงฤดูแล้งทำให้การคายน้ำของยางพาราที่อายุน้อยมีค่าต่ำ (รูปที่ 4-3, รูปล่าง)

4.1.4 สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Crop Coefficient, K_c)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา มีค่าอยู่ระหว่าง $0.21 - 1.39$ ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพาราลดต่ำสุดและสูงสุดปรากฏในช่วงเดือนกรกฎาคม 2555 และกุมภาพันธ์ 2556 ตามลำดับ (รูปที่ 4-4, รูปบน)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (Crop Coefficient; K_c) ที่คำนวณได้ในแต่ละวันแสดงไว้ในรูปที่ 2-14 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของแปลงยางพารามีค่าอยู่ระหว่าง $0.05 - 0.65$ โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำจะมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนมกราคม 2556 และมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนมีนาคม 2556 (รูปที่ 4-4, รูปล่าง)

4.1.5 ปริมาณน้ำในดิน (Soil water content, SWC)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา ค่าปริมาณน้ำในดิน ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) วัดที่ระดับความจากผิวดิน 10, 30, 50, 70 และ 90 เซนติเมตร บันทึกข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 พฤศจิกายน 2555 ถึง 30 เมษายน 2556 โดยพบว่า ปริมาณน้ำในดิน มีค่าอยู่ระหว่าง $0.13 - 0.25 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ ชั้นดินที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร มีปริมาณน้ำในดินสูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ระดับความลึก 90, 70, 30 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ ปริมาณน้ำในดินเริ่มลดลงตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2555 ในทุกระดับความลึกที่วัดและค่อนข้างคงที่ระหว่างเดือนมกราคม 2556 ถึงเมษายน 2556 แต่ในช่วงเวลาดังกล่าวจะพบว่าปริมาณน้ำในดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากที่มีฝนตก ปริมาณน้ำในดินที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตรได้ผิวดินมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลจากที่ระดับความลึกดังกล่าวได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์มากที่สุด (รูปที่ 4-5, รูปบน)

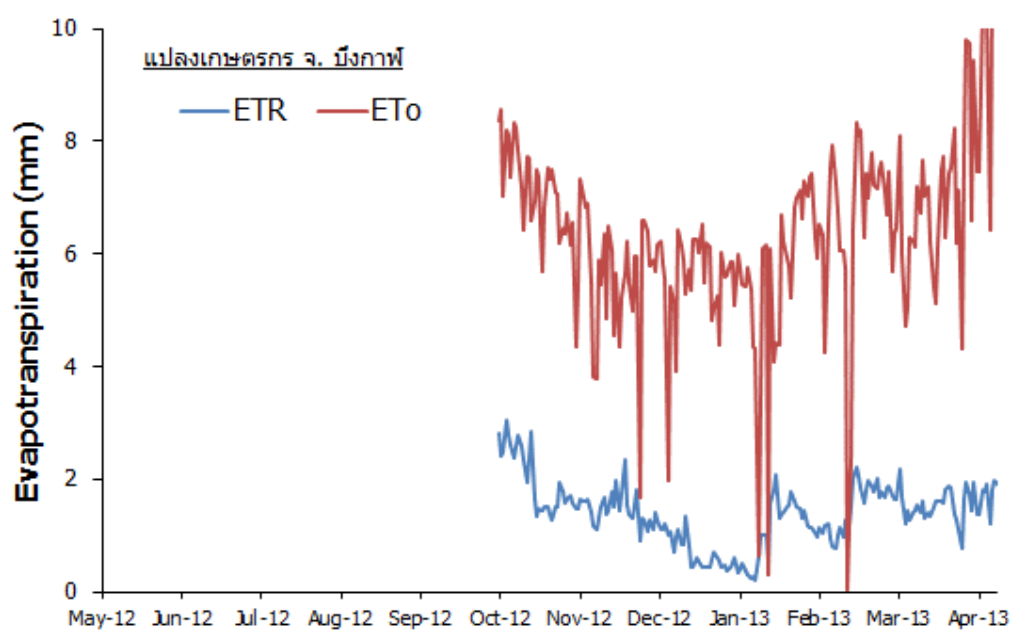
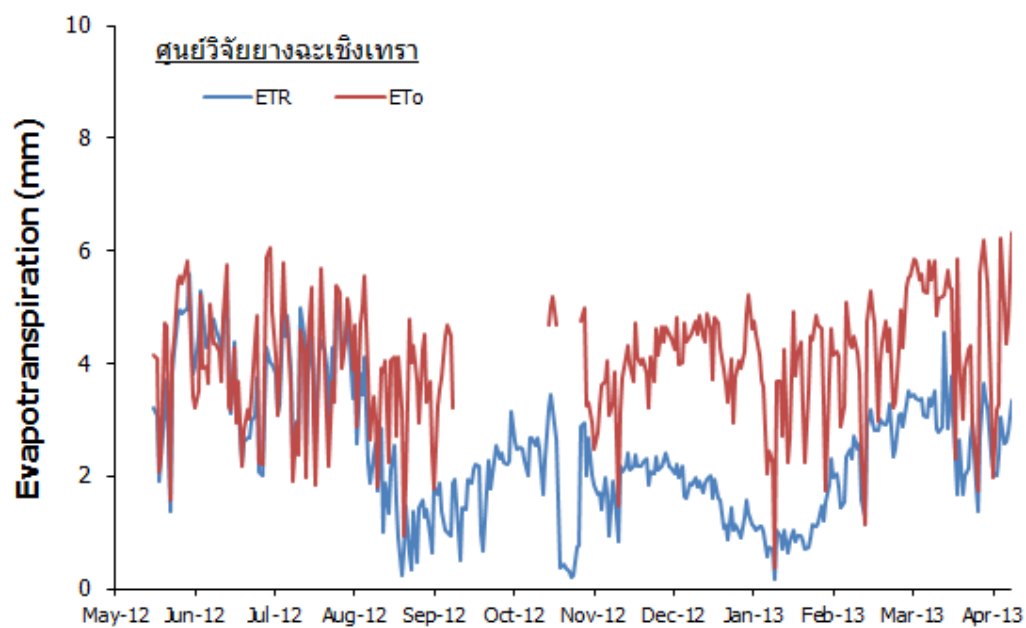
Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ปริมาณน้ำในดิน 5 ระดับถูกบันทึกตั้งแต่วันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2556 ถึง 30 เมษายน 2556 โดยพบว่า ปริมาณน้ำในดิน มีค่าอยู่ระหว่าง $0.07 - 0.103$

$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ เนื่องจากการบันทึกข้อมูลเพียงระยะสั้น ปริมาณน้ำในดินในแต่ละระดับความลึกมีค่าค่อนข้างคงที่ ชั้นดินที่ระดับความลึก 100 เซนติเมตร มีปริมาณน้ำในดินสูงที่สุด รองลงมาคือ ที่ระดับความลึก 30, 50, 70 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ ชั้นดินที่ระดับความลึก 10 และ 30 เซนติเมตร มีการตอบสนองต่อปริมาณน้ำฝนที่ได้รับ ส่วนชั้นดินที่ระดับความลึก 50, 70 และ 100 เซนติเมตร ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังได้รับปริมาณน้ำฝน (รูปที่ 4-4, รูปล่าง)

4.2 ความแปรปรวนของสมดุลน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา

การคายระเหยของน้ำ (ETR) การเคลื่อนของน้ำในลำต้น (Sap flow) และค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิงจากการคำนวณ (ETo) ในรอบวันของระบบนิเวศยางพาราของทั้ง 2 site มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรอบวันที่คล้ายคลึงกัน คือ ค่าต่ำในเวลากลางคืน แต่จะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นในช่วงเช้าตามการเพิ่มขึ้นของค่า VPD (Vapor pressure deficit) ETR, การเคลื่อนของน้ำในลำต้น และ ETo มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 13.00 – 14.00 น. หลังจากนั้น ETo จะมีค่าลดลงตามการลดลงของค่า VPD ในรอบวัน จากรูปที่ 4-7 พบว่า ETo หรือค่าการคายระเหยน้ำที่ได้จากการคำนวณ ของทั้ง 2 site สูงกว่าค่าการคายระเหยของน้ำ (ETR) ที่ได้จากการวัดจริงด้วยเทคนิค Eddy Covariance นอกจากนี้ยังพบว่า การเคลื่อนที่ของน้ำในลำต้น (Sap flow) ของต้นยางอายุมาก ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา มีค่าสูงกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในลำต้นของต้นยางอายุน้อย ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ โดยการเคลื่อนที่ของน้ำในลำต้นของต้นยางจาก 2 Sites มีค่าเท่ากับ 2.51 และ 1.38 ตามลำดับ (รูปที่ 4-6)

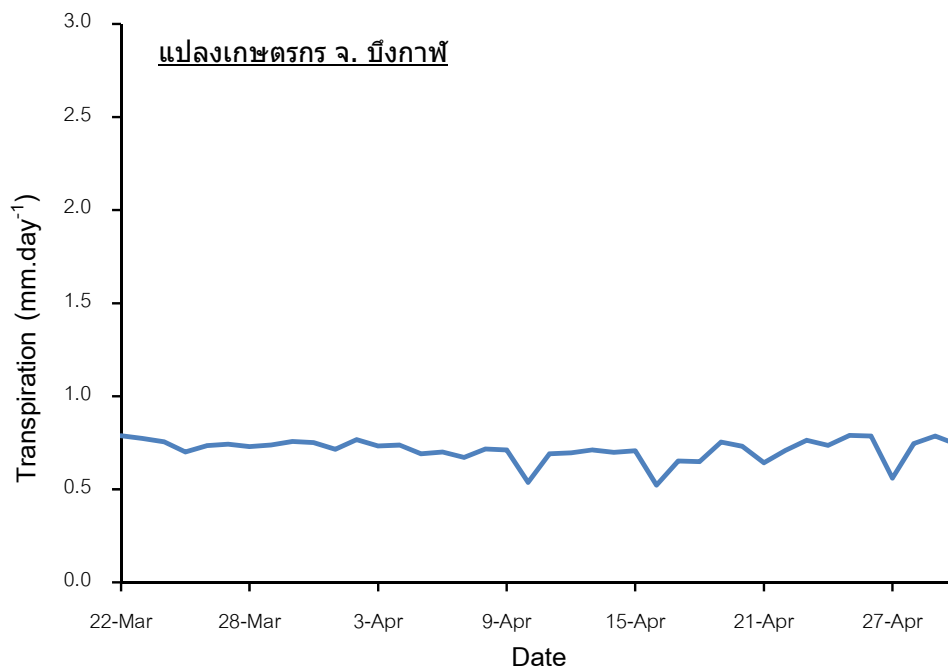
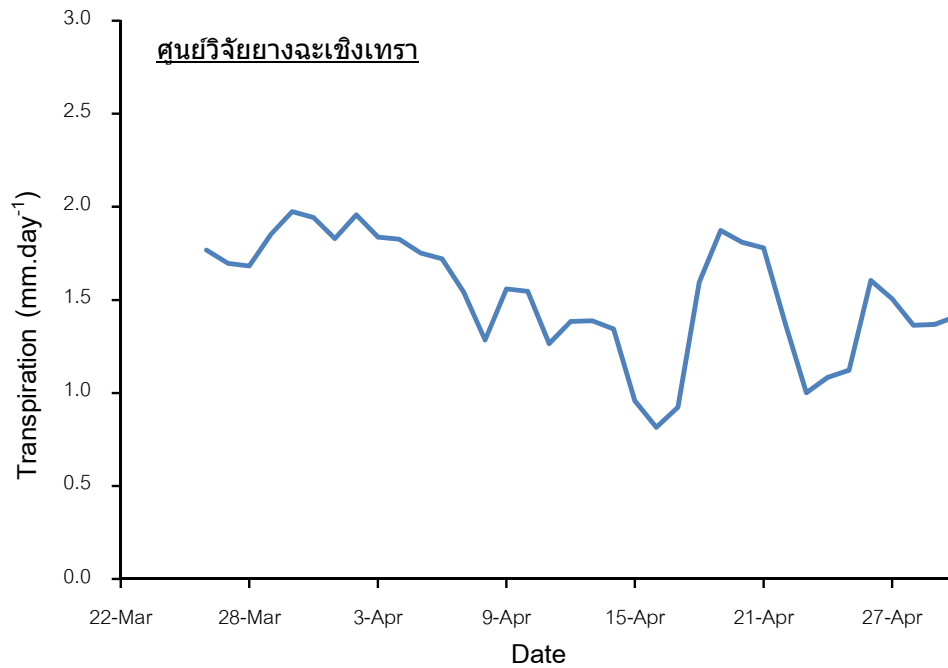
การคายระเหยของน้ำ (ETR) ในรอบวัน ณ ช่วงเวลาต่างๆ ในรอบปี อันได้แก่ ฤดูฝน (16 มิ.ย. 55 และ 11 ส.ค. 55) ฤดูแล้ง (17 พ.ย. 55 และ 16 ธ.ค. 55) ฤดูการทิ้งใบของยางพารา (14 ก.พ. 56) และ เริ่มสร้างใบใหม่ (26 มี.ค. 56) พบว่า ค่า ETR และ ETo สูงที่สุดในช่วงฤดูฝน (11 ส.ค. 55) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.377 และ 0.633 mm ตามลำดับ และมีค่าน้อยที่สุดในช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา (14 ก.พ. 56) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.08 และ 0.065 mm ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจะพบว่าค่า ETR หรือการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงด้วยเทคนิค Eddy Covariance มีค่าต่ำกว่าค่า ETo หรือค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิงจากการคำนวณตลอดทั้งปี ความแตกต่างของค่าคายระเหยของน้ำที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 17 – 64 % ความแตกต่างที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นผลมาจาก ค่า ETo เป็นค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิงจากการคำนวณ โดยใช้ตัวแปรทางด้านจุลภูมิอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop coefficient, K_c) ค่า K_c ที่ใช้ในการคำนวณตามวิธีการของ FAO Penman-Monteith เป็นค่าคงที่ตลอดฤดูกาลและพัฒนาขึ้นจากพื้นที่อื่นที่ไม่ใช่ประเทศไทย ดังนั้นค่าการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้จากสมการดังกล่าวจึงค่อนข้างแตกต่างไปจากค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงในพื้นที่ปลูก (ETR) และจากรูปที่ 4-7 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่า ETR และ ETo มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกับความเข้มแสง และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (VPD, Vapor pressure deficit) ในรอบวัน ซึ่งปรากฏค่าสูงสุดในช่วงประมาณ 12.00-13.00 น. และมีค่าน้อยที่สุดในช่วงเช้าและเย็น



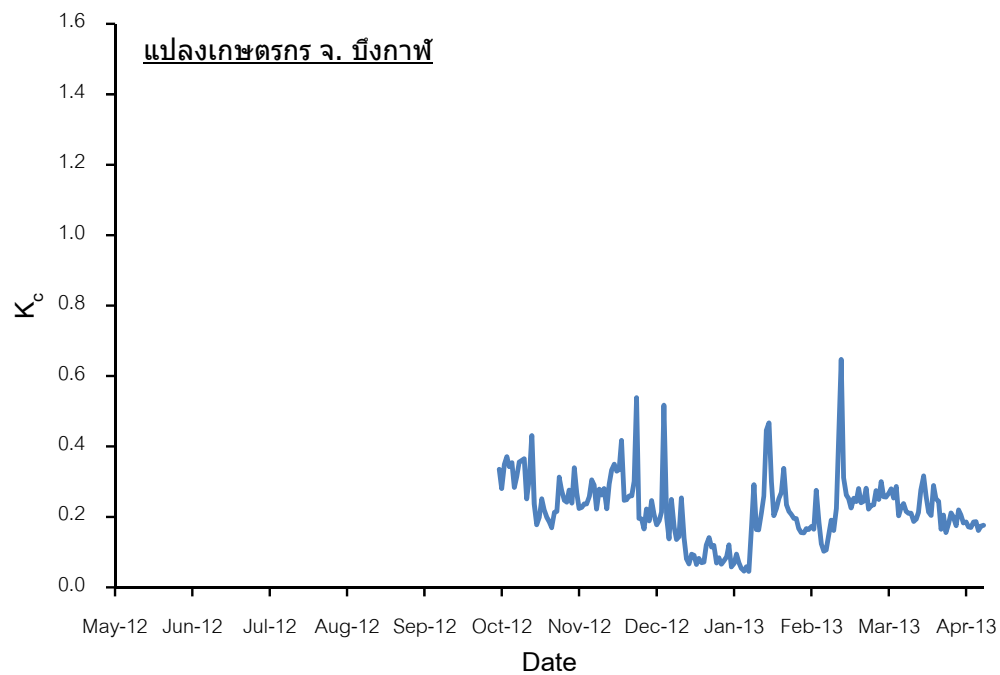
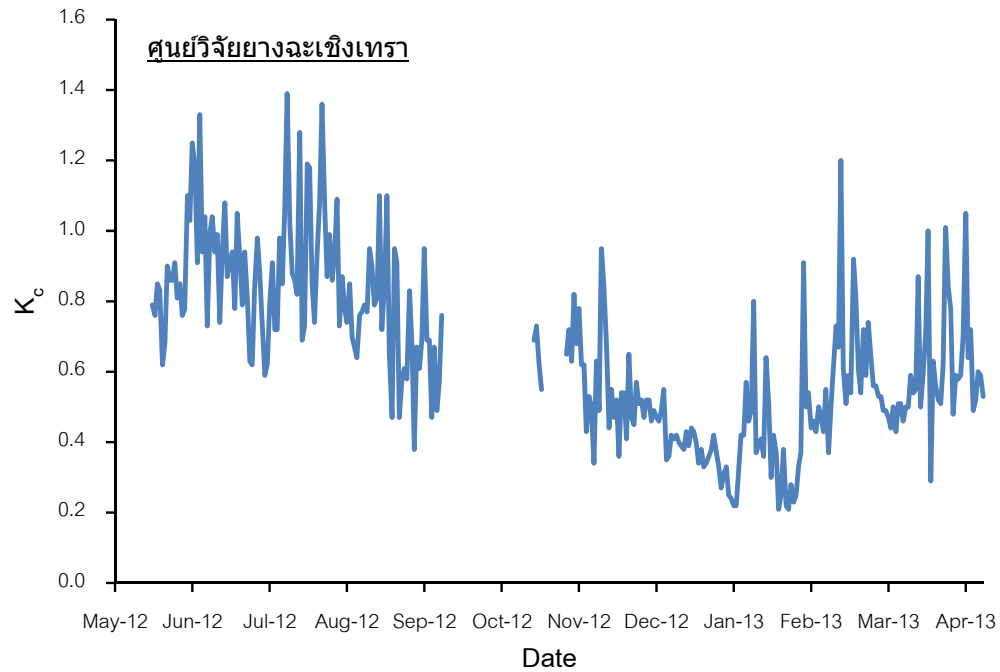
รูปที่ 4-1 การคายระเหยของน้ำในแต่ละวัน (Evapotranspiration, ETR) ของแปลงปลูกยางพารา ซึ่งวัดได้ด้วยวิธี Eddy Covariance ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)



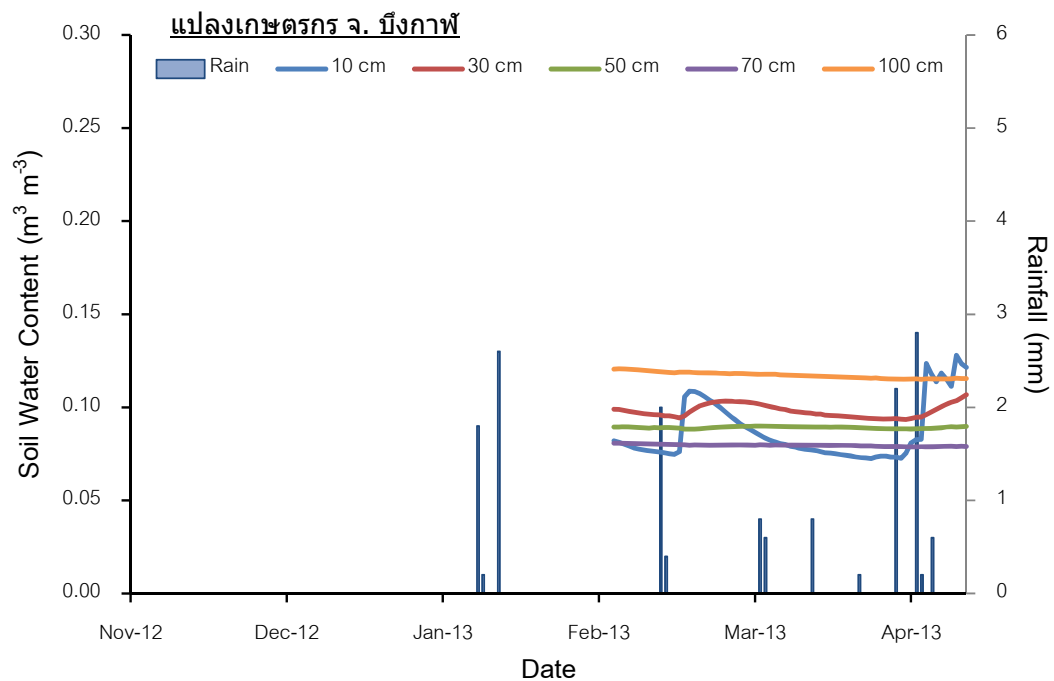
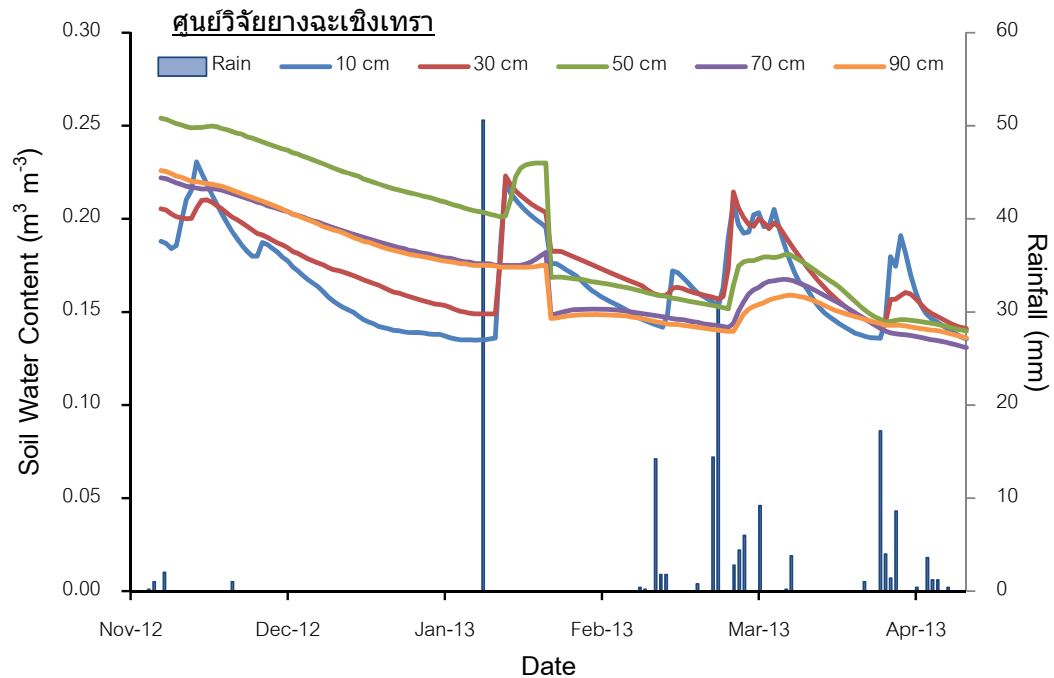
รูปที่ 4-2 ปริมาณการใช้น้ำของพืช (Crop Water Use) ของแปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)



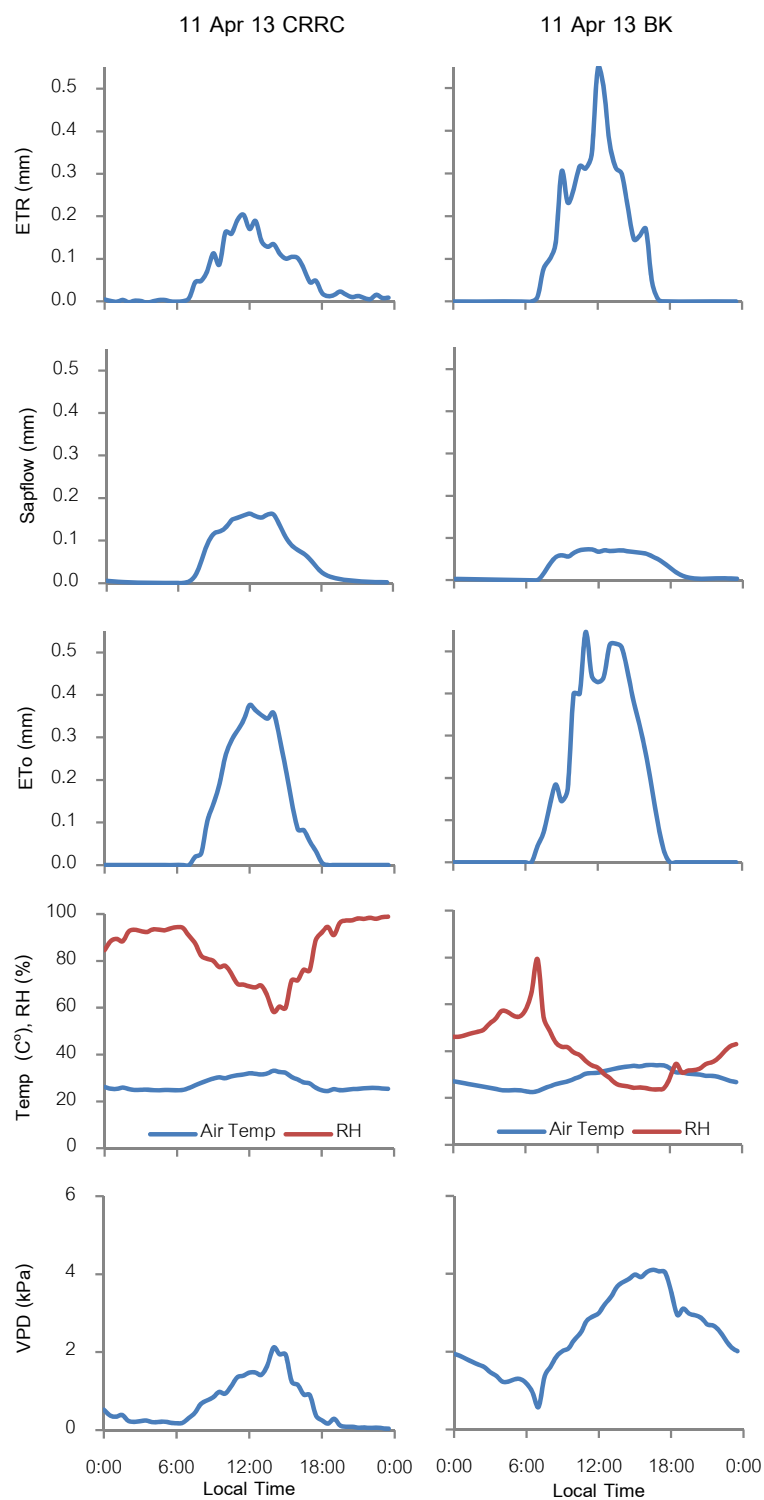
รูปที่ 4-3 การคายน้ำของพืช (Transpiration) ของแปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (26 มี.ค. 2556 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 มี.ค. 56 - 30 เม.ย. 56)



รูปที่ 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Crop Coefficient; K_c) แปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)

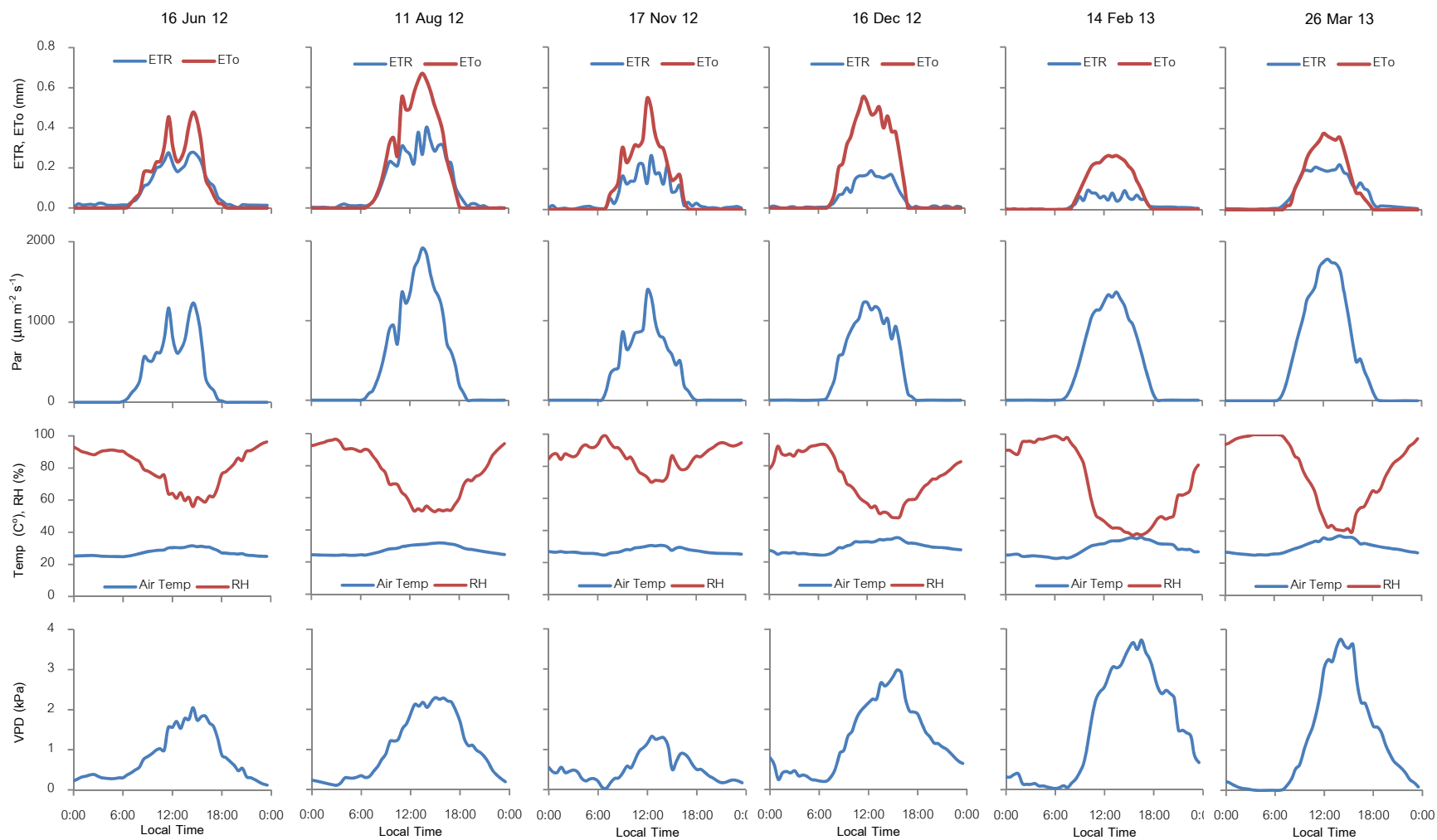


รูปที่ 4-5 ความชื้นของดิน (Soil Water Content) ที่ระดับต่างๆ ของแปลงปลูกยางพาราได้รับ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (22 พ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (19 ก.พ. 56 - 30 เม.ย. 56)



รูปที่ 4-6

แสดงความแปรปรวนการคายระเหยน้ำที่วัดได้ (ETR) ค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิงจากการคำนวณ (ETo) ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air Temp.) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor Pressure Deficit, VPD) ในรอบวันและในแต่ละฤดู ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ในวันที่ 11 เมษายน 2556



รูปที่ 4-7

ความแปรปรวนของการคายระเหยน้ำที่วัดได้ (ETR) ค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิงจากการคำนวณ (ETo) ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Air Temp.) ความชื้น (RH) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor Pressure Deficit, VPD) ในรอบวันและในแต่ละฤดู ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

ตารางที่ 4-1 แสดงค่าผลผลิตน้ำยาง (yield, kg. rai⁻¹), ค่าการคายระเหยของน้ำ (Evapotranspiration, mm) และค่าการใช้น้ำของยางพารา (Crop Water Use) ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (1 มิ.ย. 2555 – 30 เม.ย. 2556)

ปี	เดือน	Yield (kg.rai ⁻¹)	Evapotranspiration (mm)	Crop water Use (m ³ . rai ⁻¹)
2555	มิถุนายน	13.06	124.02	19.84
	กรกฎาคม	18.27	105.49	16.88
	สิงหาคม	19.83	105.17	16.83
	กันยายน	19.67	34.00	5.44
	ตุลาคม	20.21	68.48	10.96
	พฤศจิกายน	17.25	49.75	7.96
	ธันวาคม	26.34	64.54	10.33
2556	มกราคม	26.34	36.67	5.87
	กุมภาพันธ์*	-	39.83	6.37
	มีนาคม*	-	91.54	14.65
	เมษายน*	-	80.33	12.85
รวม		160.97	799.82	1,279.69

*ไม่มีการเปิดกรีดน้ำยางพารา

ตารางที่ 4-2 แสดงค่าผลผลิตน้ำยาง (yield, kg. rai⁻¹), ค่าการคายระเหยของน้ำ (Evapo - transpiration, mm) และค่าการใช้น้ำของยางพารา (Crop Water Use) ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (22 ต.ค. 55-30 เม.ย. 56)

ปี	เดือน	Yield (kg. rai ⁻¹)*2554	Evapotranspiration (mm)	Crop water Use (m ³ . rai ⁻¹)
2555	ตุลาคม	-	35.92	57.47
	พฤศจิกายน	-	45.15	72.24
	ธันวาคม	-	40.04	64.07
2556	มกราคม	-	15.79	25.26
	กุมภาพันธ์	-	36.39	58.23
	มีนาคม	-	51.14	81.83
	เมษายน	-	47.43	75.88
รวม		-	271.86	434.98

*ไม่มีการเปิดกรีดน้ำยางพารา

ตารางที่ 4-3 แสดงค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นต์ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (11 เดือน, 1 มิ.ย. 2555 - 30 เม.ย. 2556) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (6 เดือน, 1 พ.ย. 55 - 30 เม.ย. 56)

ข้อมูล	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อายุต้นยาง 19 ปี	แปลงเกษตรกร จ.บึงกาฬ อายุต้นยาง 4 ปี
ระยะเวลาการเก็บข้อมูล (เดือน)	11	6
การใช้น้ำของยางพารา (m ³ . rai ⁻¹)	1,279.69	377.51
ผลผลิต (Kg.rai ⁻¹)	160.97	30.04*
วอเตอร์ฟุตปริ้นต์ (m ³ . Kg yield ⁻¹)	7.95	12.57

* ค่าประเมินผลผลิตในระยะเวลา 6 เดือน

4.3 การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์

วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่คำนวณได้จากการทดลองนี้ คือ วอเตอร์ฟุตพริ้นต์สีเขียว (green water footprint) ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่อยู่ในรูปความชื้นดินที่ถูกใช้ไปในการผลิตน้ำยางในหน่วยลูกบาศก์เมตรต่อผลผลิตน้ำยาง 1 กิโลกรัม (Hoekstra *et al.*, 2011) ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้ไปในการผลิตน้ำยางของแปลงปลูกยางพาราได้จากผลรวมของค่าการคายระเหย (Evapotranspiration) ทั้งหมดที่วัดได้จริงจากแปลงปลูกในช่วงเวลาทำการทดลอง โดยคิดออกมาในรูปของปริมาณน้ำที่ใช้ไป (Crop water use) เป็นลูกบาศก์เมตร (ตารางที่ 4-1 และ 4-2) ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์สีเขียว (green water footprint) ที่คำนวณได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 4-3

4.3.1 Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา

ปริมาณการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยางพาราอายุมาก (จากการวัดจริงด้วยเทคนิค Eddy Covariance) ในระยะเวลา 11 เดือน ค่าเท่ากับ $1,279.69 \text{ m}^3 \cdot \text{rai}^{-1}$ สำหรับผลผลิตน้ำยางของพื้นที่ Site ที่ 1 มีค่าเท่ากับ $160.97 \text{ Kg rai}^{-1}$ ดังนั้นวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 จึงมีค่าเท่ากับ $7.95 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg yield}^{-1}$

4.3.2 Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

ปริมาณการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยางพาราอายุน้อย ในระยะเวลา 6 เดือน ค่าเท่ากับ $434.98 \text{ m}^3 \cdot \text{rai}^{-1}$ สำหรับผลผลิตน้ำยางของพื้นที่ Site ที่ 2 เนื่องจากต้นยางพารามีอายุ 4 ปี ยังไม่มีการเปิดกรีดและคาดว่าจะเปิดกรีดได้เมื่ออายุ 6 ปี จึงได้ประเมินผลผลิตโดยใช้ข้อมูลผลผลิตยางพาราพันธุ์ RRIM600 จากการวิจัยของสถาบันวิจัยยาง (จำลองและคณะ, 2550) ซึ่งเป็นข้อมูลผลผลิตภายหลังการเปิดกรีดระหว่าง 1-10 ปี กรีดด้วยวิธีเปิดหน้ากรีด $\frac{1}{2}$ ของลำต้นและกรีดวันเว้นวัน ทำนายผลผลิตก่อนเปิดกรีด 2 ปี โดยใช้สมการโพลิโนเมียลอันดับ 2 ($r^2=0.9612$) มีค่าเท่ากับ $60.08 \text{ Kg rai}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ คิดเป็นผลผลิตเทียบในระยะเวลา 6 เดือนเท่ากับ $30.04 \text{ Kg rai}^{-1}$ ดังนั้นวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 2 จึงมีค่าเท่ากับ $12.57 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg yield}^{-1}$

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์สีเขียว (green water footprint) ที่แตกต่างกันระหว่าง Site ที่ 1 และ 2 ซึ่งมีค่า 7.95 และ $12.57 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg yield}^{-1}$ ทั้งนี้เนื่องจากผลผลิตของ Site ที่ 2 นั้นมีค่าน้อย และการคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์มีผลผลิตเป็นตัวหาร ซึ่งหากผลผลิตแตกต่างกันมากย่อมทำให้ได้ค่าที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม Site ที่ 2 นั้นต้นยางมีอายุน้อยยังไม่เปิดกรีดปริมาณผลผลิตน้ำยางที่นำมาคำนวณเป็นค่าประเมินขึ้นจากสมการ ซึ่งในการให้ผลผลิตของยางพาราพบว่าในช่วงแรกของการเปิดกรีดปริมาณน้ำยางที่ได้มีปริมาณน้อยและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอายุ 6 ปีหลังเปิดกรีด ผลผลิตจะมีปริมาณสูงสุดในช่วง 6-10 ปี หลังกรีด หลังจากนั้นผลผลิตมีแนวโน้มลดลง จากข้อมูลนี้แสดงให้เห็นแนวโน้มที่ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์สีเขียวมีค่าน้อยลงเมื่อยางพารามีอายุมากขึ้น

ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์สีเขียว (green water footprint) ของ Site ที่ 2 ที่คำนวณได้จากการทดลองนี้ $12.57 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg yield}^{-1}$ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานโดย Mekonnen and Hoekstra (2011) ซึ่งประเมินโดยใช้แบบจำลอง CROPWAT 8.0 ที่มีค่า $12.96 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg yield}^{-1}$ ขณะที่ Site ที่ 1 ซึ่งยางพารามีอายุ 19 ปีและมีผลผลิตน้ำยางพาราที่เก็บได้จริง พร้อมกับค่าการใช้น้ำที่วัดได้ แต่กลับพบว่าค่าที่รายงานโดย Mekonnen and Hoekstra (2011) มีค่ามากกว่าถึง 63% ทั้งนี้จะมาจากสภาพแวดล้อมและตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองที่ Mekonnen and Hoekstra (2011) ใช้นั้นมีความแตกต่างจากสภาพแวดล้อมในความเป็นจริงใน Site ที่ทำการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการนำแบบจำลองมาใช้ในการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแต่งเพื่อได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะมีความสำคัญอย่างยิ่งในการ validate แบบจำลองว่าสามารถใช้งานได้ดีเพียงไรหลังการปรับแต่ง

บทที่ 5

อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำของสวนยางพารา

5.1 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอน

ความแปรปรวนของสมดุลคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยางพารานั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของต้นยางพารา และสภาพจุลภูมิอากาศ จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, R_g) 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 กลุ่มตามฤดูกาล ได้แก่ ฤดูฝน (1 มิ.ย. 55 – 30 ต.ค. 55 แต่ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ มีข้อมูลตั้งแต่วันที่ 15 ต.ค. 55 – 30 ต.ค. 55) ฤดูหนาว (1 พ.ย. 55 – 15 ม.ค. 56) ช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา (15 ม.ค. 2556 – 28 ก.พ. 2556) และฤดูร้อน (1 มี.ค. 56 – 30 เม.ย. 56)

5.1.1 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า LAI, R_g และ RH และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียว (Positive correlation) กับค่า VPD และ NEE มีความสัมพันธ์กับค่า LAI มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 38.5

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามฤดูกาล พบว่า ในช่วงฤดูฝนและฤดูหนาว ไม่พบสหสัมพันธ์ระหว่างค่า NEE กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา แต่พบว่าเป็นช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า T_{air} และในช่วงฤดูร้อน พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า LAI, R_g และ T_{air} และ NEE มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 47.3 (ตารางที่ 5-1)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน กับค่า R_g , T_{air} และ VPD และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า RH และ NEE มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 44.3

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามฤดูกาล พบว่า ในช่วงฤดูฝนไม่พบสหสัมพันธ์ระหว่างค่า NEE กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา แต่พบว่าเป็นช่วงฤดูหนาว ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_g และ T_{air} ขณะที่ในช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_g , T_{air} และ VPD และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า RH และในช่วงฤดูร้อน พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่า R_g และ T_{air} ในแต่ละฤดู พบว่า NEE มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด (ตารางที่ 5-1)

5.1.2 อิทธิพลของดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ต่ออัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

อัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิมีค่าติดลบเพิ่มขึ้น (หมายถึง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดกลืนเข้ามาในต้นยางพาราเพิ่มมากขึ้น) เมื่อดัชนีพื้นที่ใบของยางพาราเพิ่มขึ้น ในลักษณะ negative regression การเปลี่ยนแปลงของอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิในช่วงเวลาที่ศึกษา มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีพื้นที่ใบร้อยละ 50.45 (รูปที่ 5-1, รูปบน)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

อัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิมีค่าติดลบเพิ่มขึ้น เมื่อดัชนีพื้นที่ใบของยางพาราเพิ่มขึ้น ในลักษณะ negative regression เช่นเดียวกับ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา การเปลี่ยนแปลงของอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิในช่วงเวลาที่ศึกษา มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีพื้นที่ใบร้อยละ 69.08 (รูปที่ 5-1, รูปล่าง)

5.1.3 การตอบสนองต่อแสงของอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) ในตอนกลางวัน มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจของพืช แสงซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช จึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) เป็นอย่างมาก ขณะที่สภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิอากาศ และความชื้นดินนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญรองลงมา จากรูปที่ 5-1 พบว่า อัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) ในระบบยางพาราจะถูกจำกัดโดยปริมาณแสง โดยเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น พื้นที่ปลูกยางพารามีการดูดกลืนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) มีค่าติดลบเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มแสง ($PPFD = \text{Photosynthetic Photon Flux Density, } \mu\text{mol Photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ที่ต้นยางได้รับ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ด้วยสมการของ Michaelis-Menten (Pingintha *et al.*, 2010 และ Zhang *et al.*, 2012)

$$NEE = \frac{\alpha \cdot PAR \cdot NEE_{sat}}{\alpha \cdot PAR + NEE_{sat}} - R_e \quad (15)$$

โดยที่ α ได้แก่ Apparent quantum efficiency ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{Photon}$) หรือ ความชันเริ่มต้นของกราฟการตอบสนองต่อแสงของค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ ส่วน NEE_{sat} ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) และ R_e ได้แก่ อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิสูงสุดที่ infinite light level และอัตราการหายใจของระบบนิเวศในช่วงกลางวันที่ประเมินได้จากเทคนิค Eddy Covariance ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

ค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิในตอนกลางวันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามปริมาณแสงที่เพิ่มสูงขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อปริมาณแสงมีค่ามากกว่า $1200 \mu\text{mol Photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ในช่วงวันที่ 20-30 มี.ค. 56 ซึ่งเป็นช่วงสร้างใบใหม่ของยางพารา พบว่า ระบบนิเวศยางพารามีค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิสูงสุด (NEE_{sat}) สูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ $-60.14 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, ส่วน α และ R_e มีค่าเท่ากับ -0.0399 และ $5.71 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ในช่วงเวลานี้ระบบนิเวศยางพารามีอัตราการหายใจใน

ช่วงเวลากลางวันต่ำที่สุด แต่ในช่วงวันที่ 11-20 ก.พ. 56 ซึ่งเป็นช่วงแล้งและยางพารามีการทิ้งใบ พบว่าระบบนิเวศยางพารามีค่าอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิสูงสุด (NEE_{sat}) ต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ $-15.57 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, ส่วน α และ R_e มีค่าเท่ากับ -0.0188 และ $10.34 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ในช่วงเวลานี้ระบบนิเวศยางพารามีอัตราการหายใจในช่วงเวลากลางวันสูงที่สุด การเปลี่ยนแปลงของ NEE ในช่วงเวลาดังกล่าวข้างต้น มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ต้นยางได้รับประมาณร้อยละ $37.64 - 92.13$ ($P < 0.0001$) (รูปที่ 5-2)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

อัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) ในระบบยางพาราจะถูกจำกัดโดยปริมาณแสง โดยเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น พื้นที่ปลูกยางพารามีการดูดกลืนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเพิ่มมากขึ้น ทำให้อัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) มีค่าติดลบเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มแสงข้างต้น โดยพบว่า อัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิในตอนกลางวันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามปริมาณแสงที่เพิ่มสูงขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อปริมาณแสงมีค่ามากกว่า $1200 \mu\text{mol Photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ในเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นช่วงสร้างใบใหม่ของยางพารา ระบบนิเวศยางพารามีค่าอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิสูงสุด (NEE_{sat}) สูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ $-20.42 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, ส่วน α และ R_e มีค่าเท่ากับ -0.017 และ $1.51 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ในช่วงเวลานี้ระบบนิเวศยางพารามีอัตราการหายใจในช่วงเวลากลางวันต่ำที่สุด แต่ในเดือนธันวาคม ซึ่งเป็นช่วงแล้งและยางพารามีการทิ้งใบ พบว่า ระบบนิเวศยางพารามีค่าอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิสูงสุด (NEE_{sat}) ต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ $-7.66 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, ส่วน α และ R_e มีค่าเท่ากับ -0.0159 และ $1.02 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ในช่วงเวลานี้ระบบนิเวศยางพารามีอัตราการหายใจในช่วงเวลากลางวันสูง การเปลี่ยนแปลงของ NEE ในช่วงเวลาดังกล่าวข้างต้น มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ต้นยางได้รับประมาณร้อยละ $53.35 - 77.40$ ($P < 0.0001$) (รูปที่ 5-3)

5.1.4 การตอบสนองต่อปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) ของอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

อัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้น (หมายถึง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยออกสู่ระบบนิเวศยางพาราเพิ่มมากขึ้น) เมื่อ VPD เพิ่มขึ้น ในลักษณะ positive regression การเปลี่ยนแปลงของอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิในช่วงเวลาที่ศึกษา มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีพื้นที่ใบร้อยละ 50.45 (รูปที่ 5-4, รูปบน)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

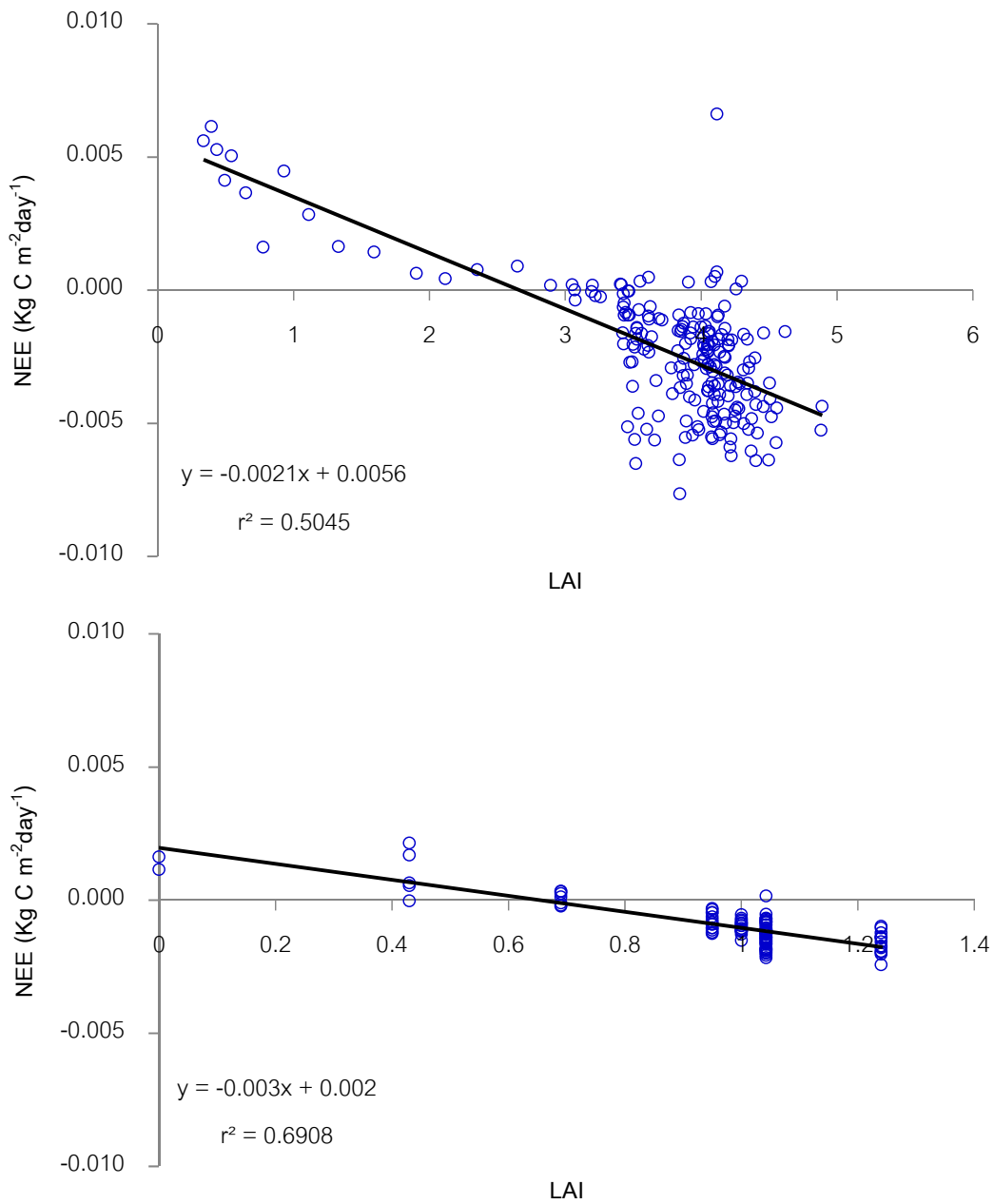
อัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิมีค่าติดลบเพิ่มขึ้น (หมายถึง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดกลืนเข้ามาในต้นยางพาราเพิ่มมากขึ้น) เมื่อ VPD เพิ่มขึ้น ในลักษณะ negative regression การเปลี่ยนแปลงของอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิในช่วงเวลาที่ศึกษา มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีพื้นที่ใบร้อยละ 8.6 (รูปที่ 5-4, รูปล่าง)

ตารางที่ 5-1 แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) กับดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ

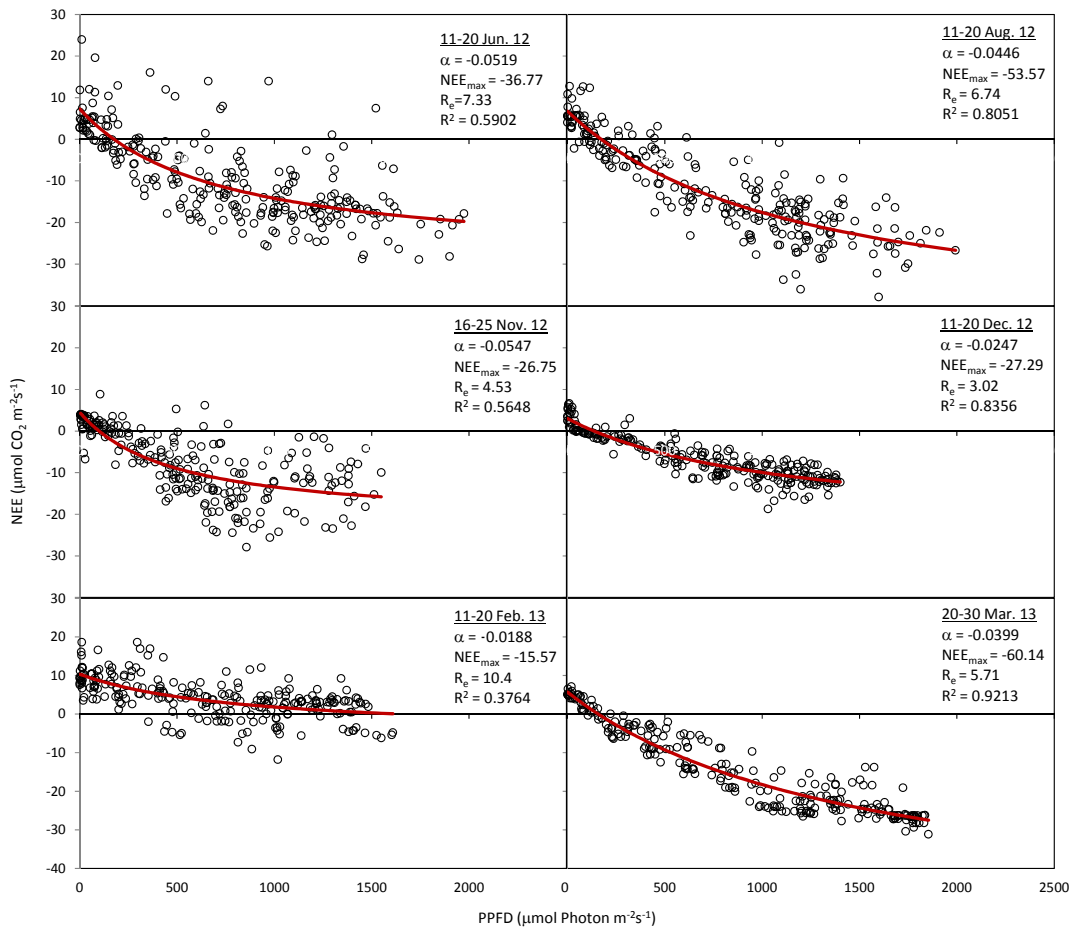
ช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี	NEE	LAI	R _g	T _{air}	RH	VPD
Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา						
รวมทุกช่วงเวลา	r	-0.385	-0.196	-0.047	-0.201	0.185
	P	<0.0001	0.0008	ns	0.0006	0.0016
ฤดูฝน (1 ก.ค. 55- 30 ต.ค. 55)	r	-0.068	-0.165	-0.109	0.139	-0.148
	P	ns	ns	ns	ns	ns
ฤดูหนาว (1 พ.ย. 55 – 15 ม.ค. 56)	r	-0.126	0.027	-0.04	-0.123	0.156
	P	ns	ns	ns	ns	ns
ช่วงทิ้งใบ (16 ม.ค. 56-28 ก.พ. 56)	r	0.033	-0.274	0.438	0.268	-0.11
	P	ns	ns	0.0029	ns	ns
ฤดูร้อน (1 มี.ค. 56-30 เม.ย. 56)	r	-0.427	-0.401	-0.473	0.062	-0.224
	P	0.0006	0.0014	0.001	ns	ns
Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ						
รวมทุกช่วงเวลา	r	-*	-0.443	-0.421	0.15	-0.302
	P		<0.001	<0.001	0.0431	<0.0001
ฤดูฝน (1 ต.ค. 55- 30 ต.ค. 55)	r	-	-0.21	0.249	-0.035	-0.068
	P		ns	ns	ns	ns
ฤดูหนาว (1 พ.ย. 55 – 15 ม.ค. 56)	r	-	-0.472	-0.33	-0.184	-0.007
	P		<0.0002	0.0034	ns	ns
ช่วงทิ้งใบ (16 ม.ค. 56-28 ก.พ. 56)	r	-	-0.489	-0.464	0.429	-0.482
	P		0.0008	0.0015	0.0037	0.0009
ฤดูร้อน (1 มี.ค. 56-30 เม.ย. 56)	r	-	-0.495	-0.048	0.173	-0.124
	P		0.0024	0.0003	ns	ns

หมายเหตุ คำย่อ NEE = อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (Net ecosystem exchange, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
LAI = ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf area index)
R_g = ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
T_{air} = อุณหภูมิอากาศ (Air temperature, °C)
RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity, %)
VPD = ปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit)
r = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
P = ความน่าจะเป็น
ns = ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ

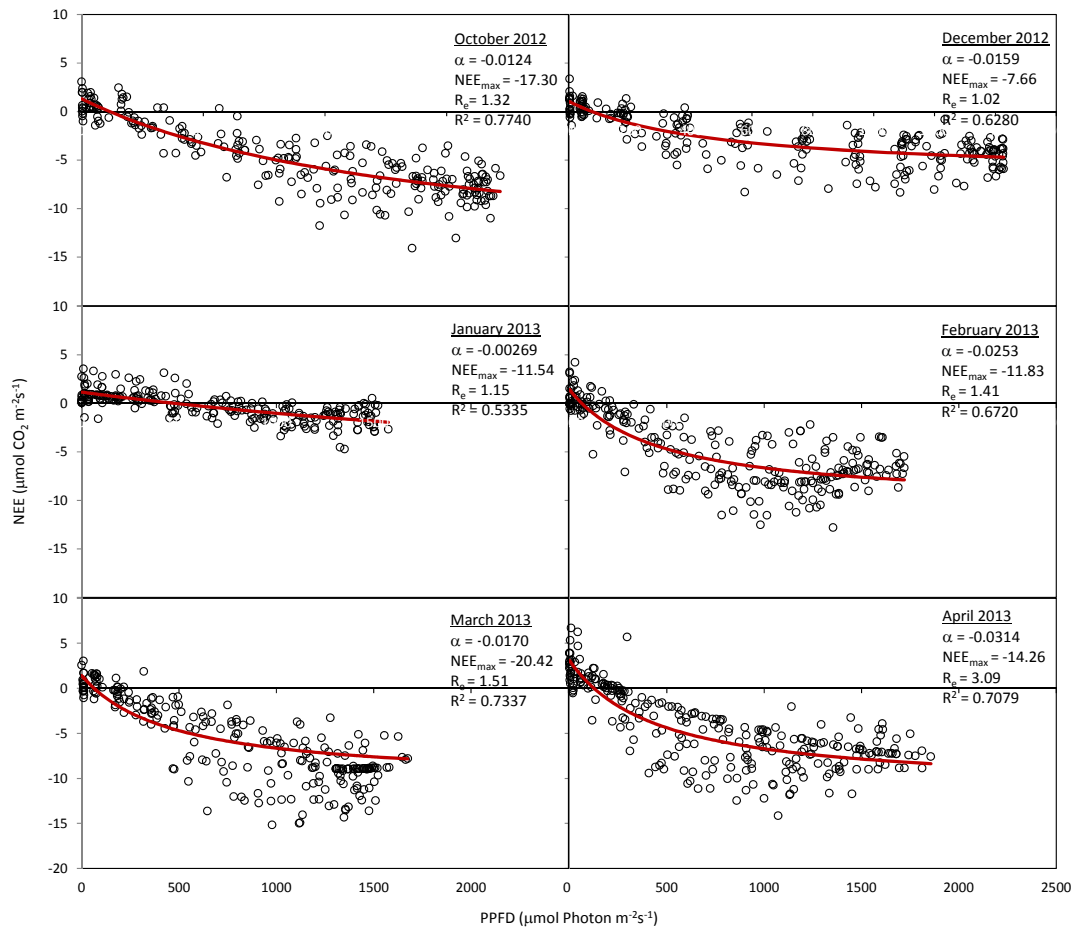
* หมายถึง ข้อมูลยังไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ



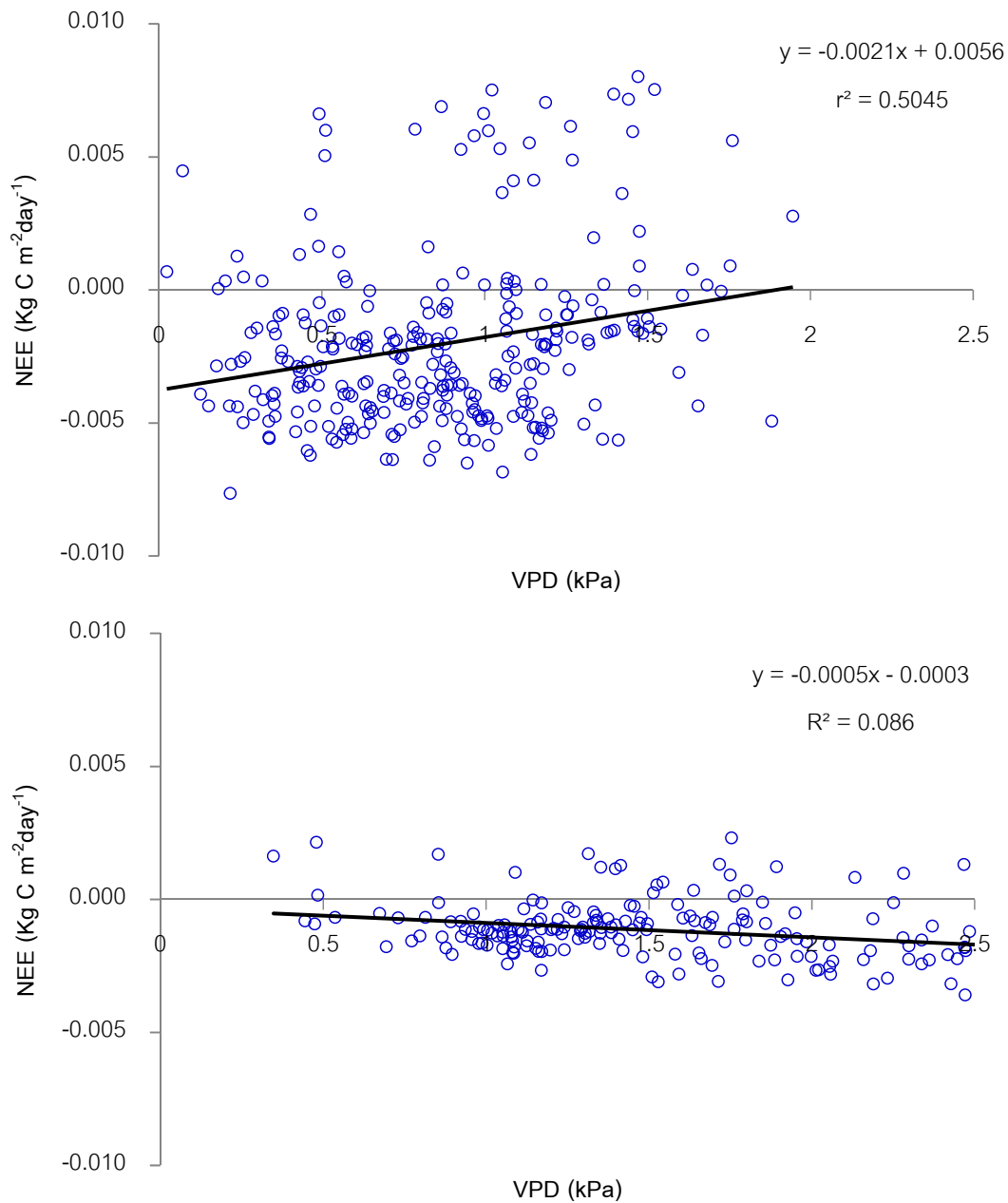
รูปที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) และดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง)



รูปที่ 5-2 การตอบสนองต่อแสง (PPFD, $\mu\text{mol Photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ของอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (O = ค่า NEE ที่วัดได้จริง และ — = ค่า NEE ที่ได้จากการประเมินด้วย Michaelis-Menten hyperbolic rectangular equation)



รูปที่ 5-3 การตอบสนองต่อแสง (PPFD, $\mu\text{mol Photon m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ของอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (O = ค่า NEE ที่วัดได้จริง และ — = ค่า NEE ที่ได้จากการประเมินด้วย Michaelis-Menten hyperbolic rectangular equation)



รูปที่ 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับ
 เพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.
 ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง)

5.2 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมตุลน้ำ

ความแปรปรวนของสมตุลน้ำในพื้นที่ปลูกยางพารานั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของต้นยางพารา และสภาพจุลภูมิอากาศ จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงด้วยเทคนิค Eddy Covariance (ETR) กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, R_g) 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 กลุ่มตามฤดูกาล ได้แก่ ฤดูฝน (1 มิ.ย. 55 – 30 ต.ค. 55 แต่ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ มีข้อมูลตั้งแต่วันที่ 15 ต.ค. 55 – 30 ต.ค. 55) ฤดูหนาว (1 พ.ย. 55 – 15 ม.ค. 56) ช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา (15 ม.ค. 2556 – 28 ก.พ. 2556) และฤดูร้อน (1 มี.ค. 56 – 30 เม.ย. 56)

5.2.1 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน (Positive correlation) กับค่า LAI และ R_g ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 45

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามฤดูกาล พบว่า ในช่วงฤดูฝน ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน (Positive correlation) กับค่า R_g และ VPD แต่มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า RH ในช่วงฤดูฝนนี้ ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 60.1 สำหรับในช่วงฤดูหนาว ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน (Positive correlation) กับค่า R_g และ T_{air} ซึ่ง ETR มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 37.9 ในช่วงที่ยางมีการทิ้งใบ ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน (Positive correlation) กับค่า LAI, R_g และ T_{air} ซึ่ง ETR มีความสัมพันธ์กับค่า LAI มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 77.8 และในช่วงฤดูร้อน ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน (Positive correlation) กับค่า LAI, R_g , T_{air} และ VPD แต่มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า RH ในช่วงฤดูร้อนนี้ ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_g มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 75.4 (ตารางที่ 5-2)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน (Positive correlation) กับค่า R_g , T_{air} และ RH ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 47

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามฤดูกาล พบว่า ในช่วงฤดูฝน ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน (Positive correlation) กับค่า VPD ซึ่งค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า VPD มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 71.9 สำหรับในช่วงฤดูหนาว ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน (Positive correlation) กับค่า T_{air} และ RH แต่มีความสัมพันธ์ในทางผกผัน (Negative

correlation) กับค่า VPD ในช่วงฤดูหนาวนี้ ค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} มากที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 64.9 ในช่วงที่ย่างมีการทิ้งใบ ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน (Positive correlation) กับค่า T_{air} ซึ่ง ETR มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air} ร้อยละ 30.9 และในช่วงฤดูร้อน ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกัน (Positive correlation) กับค่า R_g ซึ่งค่า ETR มีความสัมพันธ์กับค่า R_g ร้อยละ 54 (ตารางที่ 5-2)

5.2.2 อิทธิพลของดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ต่อค่าการคายระเหยน้ำ (ETR)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

ค่าการคายระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของดัชนีพื้นที่ใบของยางพารา การเปลี่ยนแปลงของอัตราแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิในช่วงเวลาการศึกษา มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีพื้นที่ใบร้อยละ 30.56 (รูปที่ 5-5)

5.2.3 การตอบสนองต่อแสงของค่าการคายระเหยน้ำ (ETR)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

ค่าการคายระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณแสงสะสมในรอบวัน (R_g , $W\ m^{-2}day^{-1}$) ในลักษณะของสมการ Polynomial การเปลี่ยนแปลงของค่าการคายระเหยน้ำในช่วงเวลาการศึกษา มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงสะสมในรอบวันร้อยละ 20.62 (รูปที่ 5-6, รูปบน)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ค่าการคายระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณแสงสะสมในรอบวัน (R_g , $W\ m^{-2}day^{-1}$) ในลักษณะของสมการ Polynomial เช่นเดียวกับ Site ที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของค่าการคายระเหยน้ำในช่วงเวลาการศึกษา มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงสะสมในรอบวันร้อยละ 14.15 (รูปที่ 5-6, รูปล่าง)

5.2.4 การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศ (T_{air} , $^{\circ}C$) ของค่าการคายระเหยน้ำ (ETR)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

ค่าการคายระเหยน้ำในช่วงเวลาการศึกษา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพาราที่ศึกษา (รูปที่ 5-7, รูปบน)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ค่าการคายระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศในลักษณะของสมการ Polynomial การเปลี่ยนแปลงของค่าการคายระเหยน้ำในช่วงเวลาการศึกษา มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศร้อยละ 24.91 (รูปที่ 5-7, รูปล่าง)

ตารางที่ 5-2 แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง (ETR) กับดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี	ETR	LAI	R _g	T _{air}	RH	VPD
Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา						
รวมทุกช่วงเวลา	r	0.348	0.45	0.063	0.005	0.036
	P	<0.0001	<0.0001	ns	ns	ns
ฤดูฝน (1 ก.ค. 55- 30 ต.ค. 55)	r	0.146	0.601	0.035	-0.391	0.418
	P	ns	<0.0001	ns	<0.0001	<0.0001
ฤดูหนาว (1 พ.ย. 55 – 15 ม.ค. 56)	r	0.236	0.305	0.379	0.03	0.042
	P	ns	0.012	0.0016	ns	ns
ช่วงทิ้งใบ (16 ม.ค. 56-28 ก.พ. 56)	r	0.778	0.533	0.459	-0.241	0.133
	P	<0.0001	0.0002	0.0017	ns	ns
ฤดูร้อน (1 มี.ค. 56-30 เม.ย. 56)	r	0.283	0.754	0.614	-0.446	0.526
	P	0.027	<0.0001	<0.0001	0.0003	<0.0001
Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ						
รวมทุกช่วงเวลา	r	-*	0.317	0.47	0.217	0.025
	P		<0.0001	<0.0001	0.0032	ns
ฤดูฝน (1 ต.ค. 55- 30 ต.ค. 55)	r	-	0.5	-0.007	-0.352	0.719
	P		ns	ns	ns	0.0057
ฤดูหนาว (1 พ.ย. 55 – 15 ม.ค. 56)	r	-	0.08	0.649	0.48	-0.228
	P		ns	<0.0001	<0.0001	0.0462
ช่วงทิ้งใบ (16 ม.ค. 56-28 ก.พ. 56)	r	-	0.154	0.309	-0.033	0.203
	P		ns	0.0413	ns	ns
ฤดูร้อน (1 มี.ค. 56-30 เม.ย. 56)	r	-	0.54	-0.203	0.066	-0.124
	P		<0.0001	ns	ns	ns

หมายเหตุ ค่าย่อ ETR = ค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้ด้วยเทคนิค Eddy Covariance (Evapotranspiration, mm.day⁻¹)

LAI = ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf area index)

R_g = ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

T_{air} = อุณหภูมิอากาศ (Air temperature, °C)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity, %)

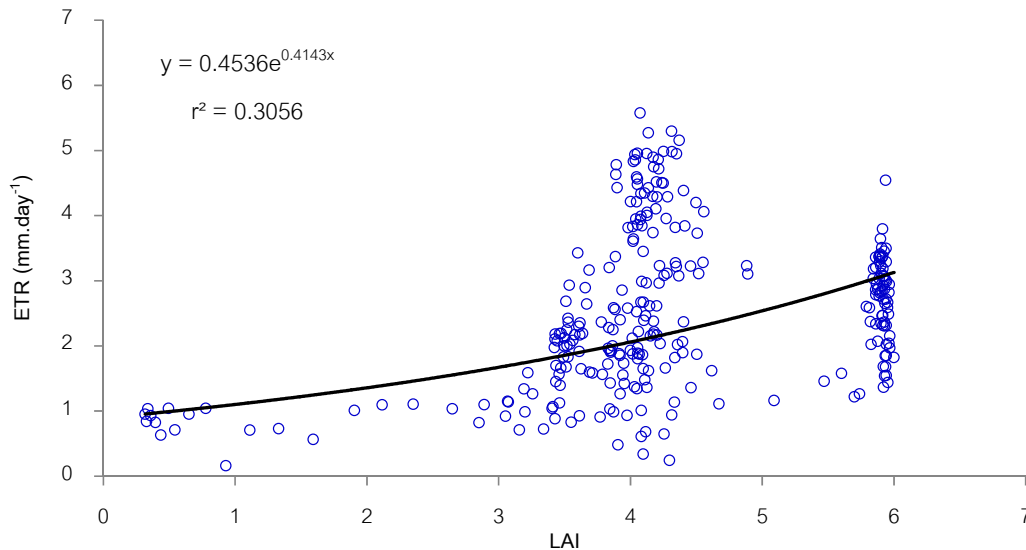
VPD = ปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit)

r = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

P = ความน่าจะเป็น

ns = ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ

* หมายถึง ข้อมูลยังไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ



รูปที่ 5-5 ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

5.2.4 การตอบสนองต่อความชื้นสัมพัทธ์ (RH, %) ของค่าการคายระเหยน้ำ (ETR)

ค่าการคายระเหยน้ำในช่วงเวลาที่ศึกษา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของระบบนิเวศยางพาราที่ศึกษา (รูปที่ 5-8, รูปบน)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ค่าการคายระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ในลักษณะของสมการ Polynomial การเปลี่ยนแปลงของค่าการคายระเหยน้ำในช่วงเวลาที่ศึกษา มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 24.91 (รูปที่ 5-8, รูปล่าง)

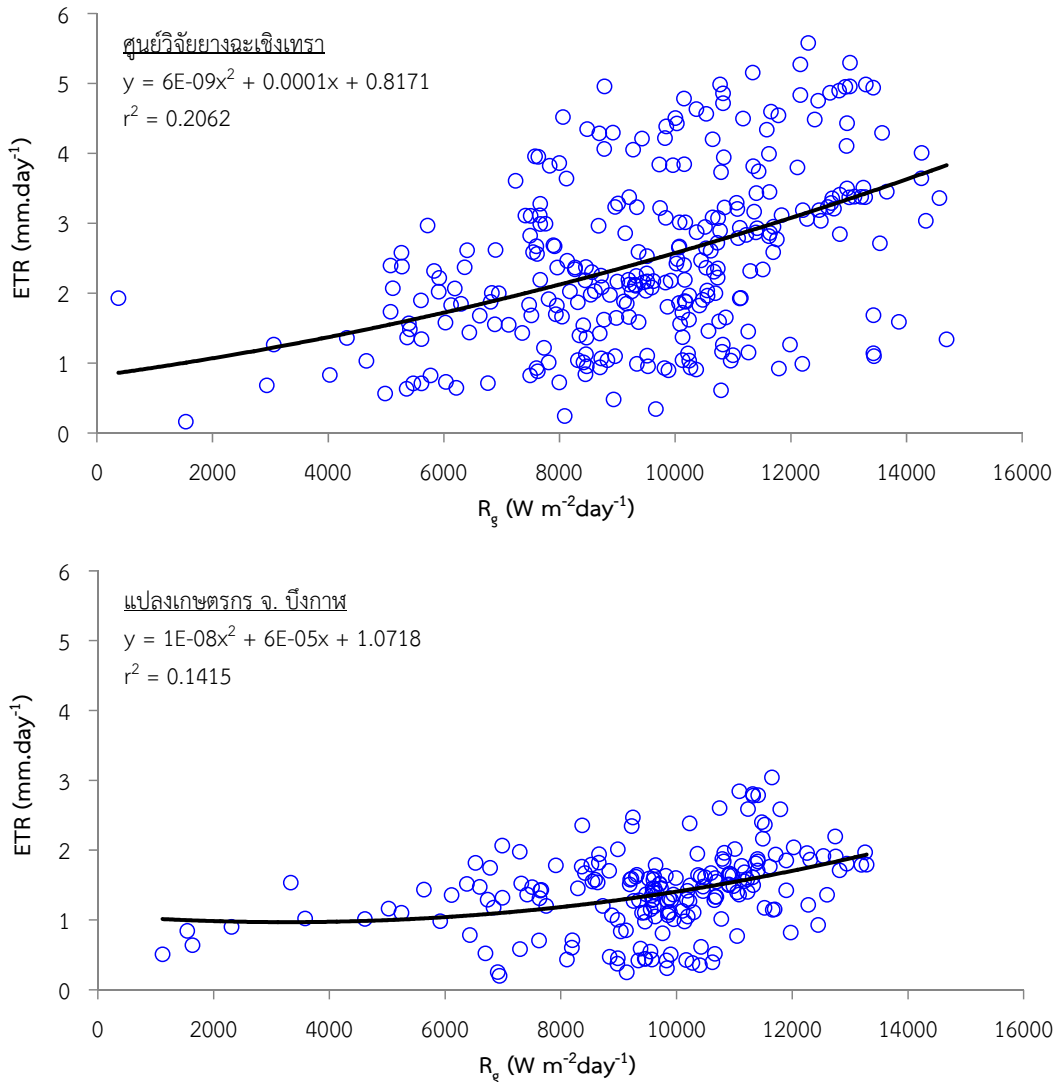
5.2.5 การตอบสนองต่อปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) ของค่าการคายระเหยน้ำ (ETR)

ค่าการคายระเหยน้ำในช่วงเวลาที่ศึกษา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า VPD แต่เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำ และ VPD เป็นช่วงเวลาต่าง ๆ ได้แก่ ฤดูฝน ฤดูหนาว ช่วงที่ยางพาราทิ้งใบ และฤดูร้อน พบว่า ในช่วงฤดูฝน ค่าการคายระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของค่า VPD ในลักษณะของสมการเส้นตรง การเปลี่ยนแปลงของค่าการคายระเหยน้ำในช่วงฤดูฝน มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่า VPD ร้อยละ 58.25 และในช่วงฤดูร้อน ค่าการคายระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของค่า VPD ในลักษณะของสมการ Polynomial การเปลี่ยนแปลงของค่าการคายระเหยน้ำในช่วงฤดูร้อน มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่า VPD ร้อยละ 47.35 สำหรับในช่วงฤดูหนาวและช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา ค่าการคายระเหยน้ำไม่มีความสัมพันธ์กับค่า VPD (รูปที่ 5-9)

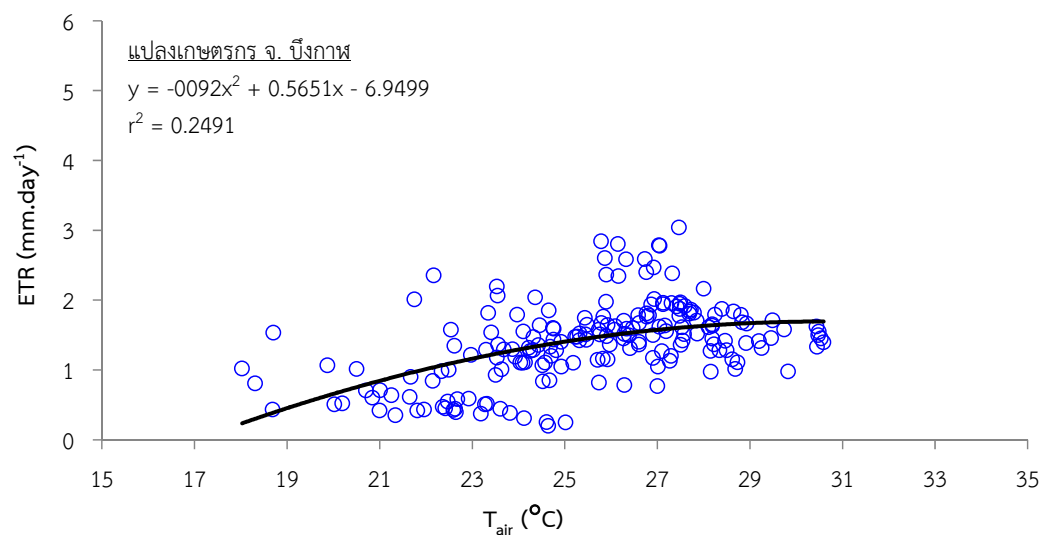
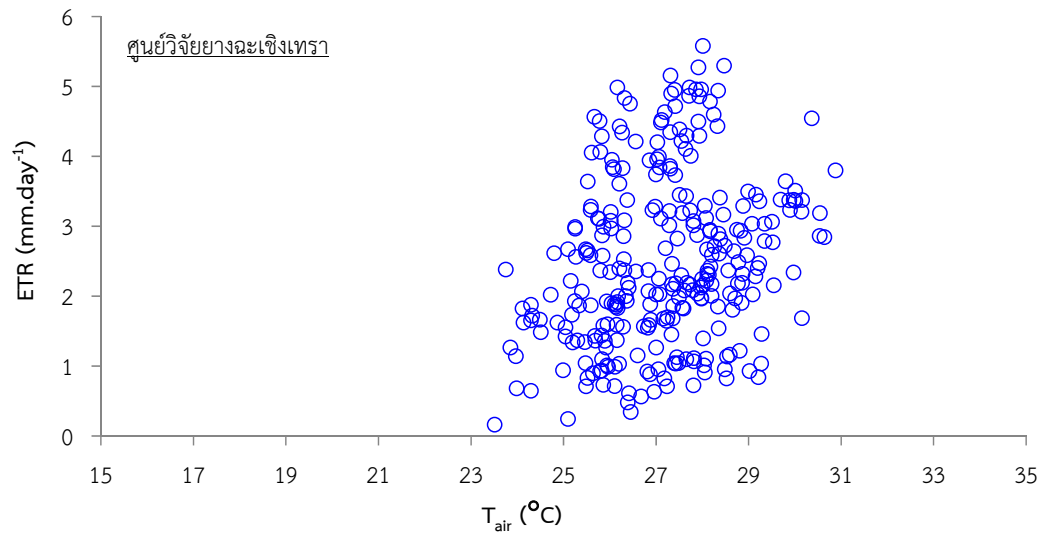
Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ค่าการคายระเหยน้ำในช่วงเวลาที่ศึกษา ณ แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า VPD แต่เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำ และ VPD เป็นช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่า ในช่วงฤดูฝน ค่าการคายระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของค่า VPD การเปลี่ยนแปลงของค่าการ

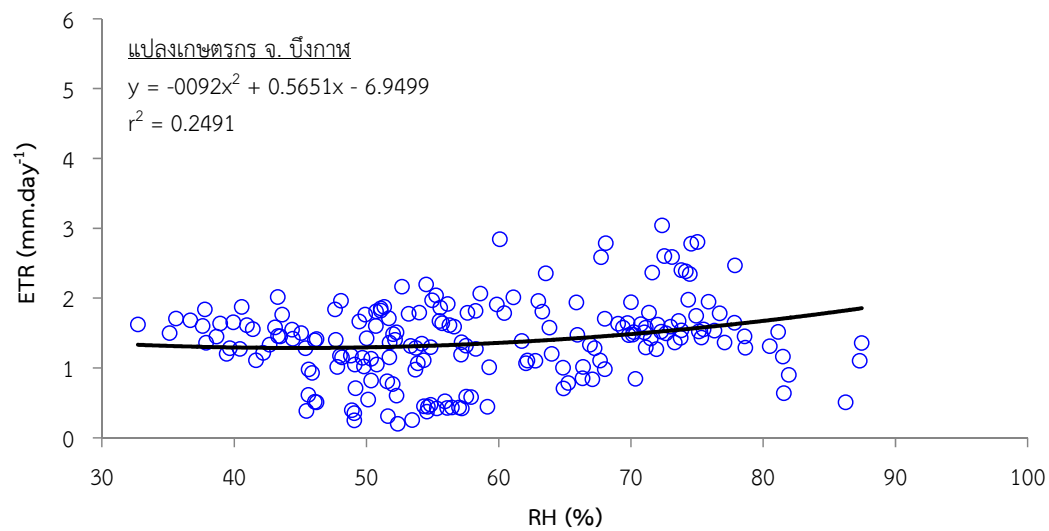
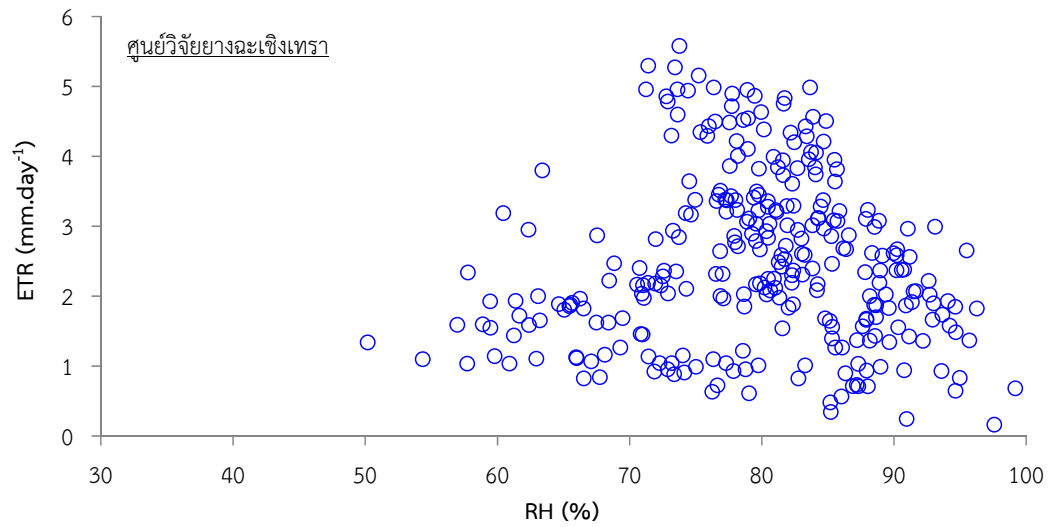
คายระเหยน้ำในช่วงฤดูฝน มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่า VPD ร้อยละ 1.28 และในช่วงฤดูหนาว ค่าการคายระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของค่า VPD ในลักษณะของสมการ Polynomial การเปลี่ยนแปลงของค่าการคายระเหยน้ำในช่วงฤดูหนาว มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่า VPD ร้อยละ 6.88 สำหรับในช่วงฤดูร้อนและช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา ค่าการคายระเหยน้ำไม่มีความสัมพันธ์กับค่า VPD (รูปที่ 5-10)



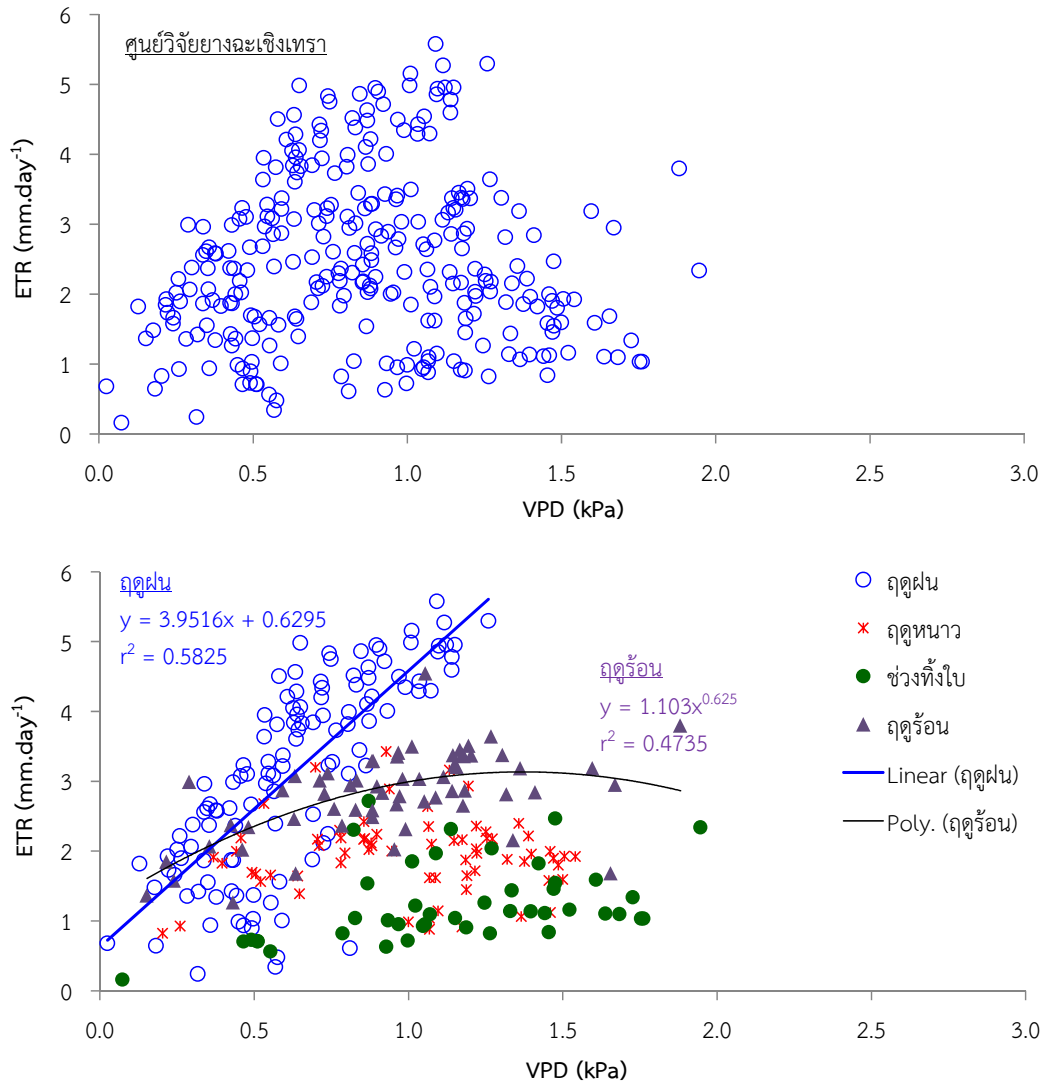
รูปที่ 5-6 ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และปริมาณแสงสะสมในรอบวัน (R_g) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางอะเซเชงเทรา จ. อะเซเชงเทรา (รูปบน) และ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง)



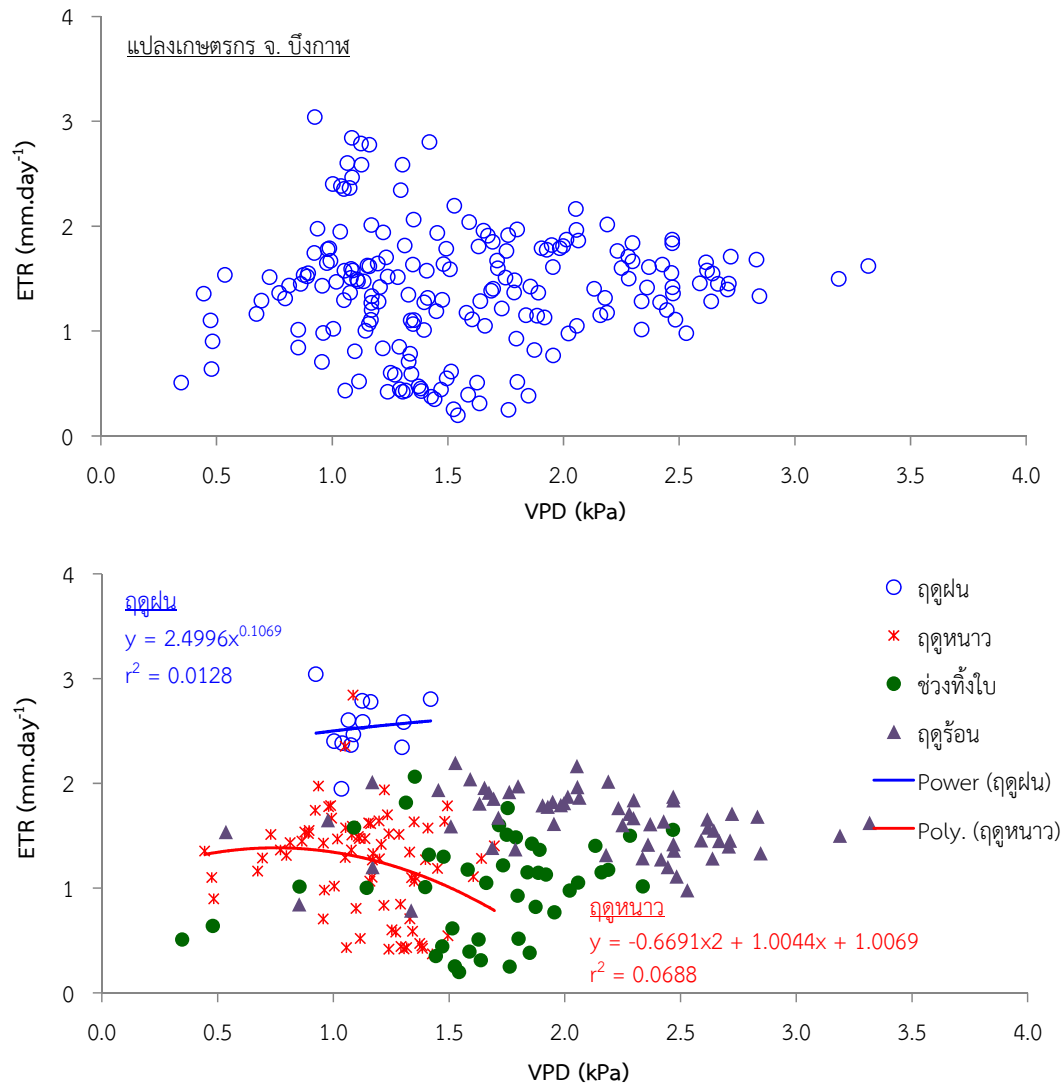
รูปที่ 5-7 ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และอุณหภูมิอากาศ (T_{air}) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง)



รูปที่ 5-8 ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (รูปบน) และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ (รูปล่าง)



รูปที่ 5-9 ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา



รูปที่ 5-10 ความสัมพันธ์ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

5.3 อิทธิพลของค่า VPD ต่อค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c)

การศึกษาสมมูลน้ำและความต้องการใช้น้ำของยางพารา นอกจากจะนำไปใช้คำนวณ water footprint ของแปลงยางพาราในสถานที่ศึกษาและในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาแล้ว ทีมวิจัยยังมุ่งเน้นศึกษาข้อมูลองค์ความรู้พื้นฐานที่จำเป็นต่อการนำไปใช้ในการคำนวณ/ประเมิน สมมูลน้ำและความต้องการใช้น้ำของยางพารา (ตามวิธีการที่ใช้ในโปรแกรม CROPWAT โดย FAO) ในสวนยางพาราในสถานที่อื่น ๆ และในช่วงระยะเวลาอื่น ๆ นอกเหนือจากที่ทำการศึกษาได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพาราเป็นตัวแปรที่สำคัญและยังไม่มีข้อมูลวัดจริงในสวนยางพารามาก่อน และความแปรปรวนของค่า K_c ในพื้นที่ปลูกยางพารานั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี และส่วนที่ 2 แบ่งเป็น 4 กลุ่มตามฤดูกาล ได้แก่ ฤดูฝน (1 มี.ย. 55 – 30 ต.ค. 55 แต่ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ มีข้อมูลตั้งแต่วันที่ 15 ต.ค. 55 – 30 ต.ค. 55) ฤดูหนาว (1 พ.ย. 55 – 15 ม.ค. 56) ช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา (15 ม.ค. 2556 – 28 ก.พ. 2556) และฤดูร้อน (1 มี.ค. 56 – 30 เม.ย. 56)

5.3.1 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า K_c มีความสัมพันธ์ไปในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า VPD ค่า K_c มีความสัมพันธ์กับค่า VPD ประมาณร้อยละ 55.39

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามฤดูกาล พบว่า ในช่วงฤดูฝน ค่า K_c ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า VPD สำหรับในช่วงฤดูหนาว ช่วงที่มีการทิ้งใบ และฤดูร้อน พบว่า ค่า K_c มีความสัมพันธ์ไปในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า VPD โดยค่า K_c มีความสัมพันธ์กับค่า VPD ประมาณร้อยละ 62.38, 46.46 และ 54.99 ตามลำดับ (ตารางที่ 5-3)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมในรอบ 1 ปี พบว่า ค่า K_c มีความสัมพันธ์ไปในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า VPD เช่นเดียวกับ Site ที่ 1 ค่า K_c มีความสัมพันธ์กับค่า VPD ประมาณร้อยละ 19.35

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มตามฤดูกาล พบว่า ในช่วงฤดูฝนและช่วงที่ยางพาราทิ้งใบ ค่า K_c ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า VPD สำหรับในช่วงฤดูหนาว และฤดูร้อน พบว่า ค่า K_c มีความสัมพันธ์ไปในทางผกผัน (Negative correlation) กับค่า VPD โดยค่า K_c มีความสัมพันธ์กับค่า VPD ประมาณร้อยละ 50.82 และ 26.04 ตามลำดับ (ตารางที่ 5-3)

5.3.2 การตอบสนองต่อปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) ของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c)

Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา

ในช่วงเวลาที่ศึกษา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่า VPD ในลักษณะของสมการ Exponential การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่า VPD ร้อยละ 34.49

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) และ VPD เป็นช่วงเวลาต่าง ๆ ได้แก่ ฤดูฝน ฤดูหนาว ช่วงที่ยางพาราทิ้งใบ และฤดูร้อน พบว่า ในช่วงฤดูฝน ไม่ปรากฏความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) และ VPD ในช่วงฤดูหนาว ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มของค่า VPD ในลักษณะของสมการ Polynomial การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) ในช่วงฤดูหนาว มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่า VPD ร้อยละ 39.32 และในช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มของค่า VPD ในลักษณะของสมการ Logarithm การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) ในช่วงนี้ มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่า VPD ร้อยละ 26.37 และสำหรับในช่วงฤดูร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มของค่า VPD ในลักษณะของสมการ Polynomial การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) ในช่วงนี้ มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่า VPD ร้อยละ 36.74 (รูปที่ 5-10)

Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ในช่วงเวลาที่ศึกษา ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่า VPD ในลักษณะของสมการ Polynomial การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่า VPD ร้อยละ 18.42

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) และ VPD เป็นช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่า ในช่วงฤดูฝนและช่วงที่มีการทิ้งใบของยางพารา ไม่ปรากฏความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) และ VPD ในช่วงฤดูหนาว และฤดูร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มของค่า VPD ในลักษณะของสมการ Polynomial การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของยางพารา (K_c) ในช่วงฤดูหนาว มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่า VPD ร้อยละ 27.37 และ 47.91 ตามลำดับ (รูปที่ 5-12)

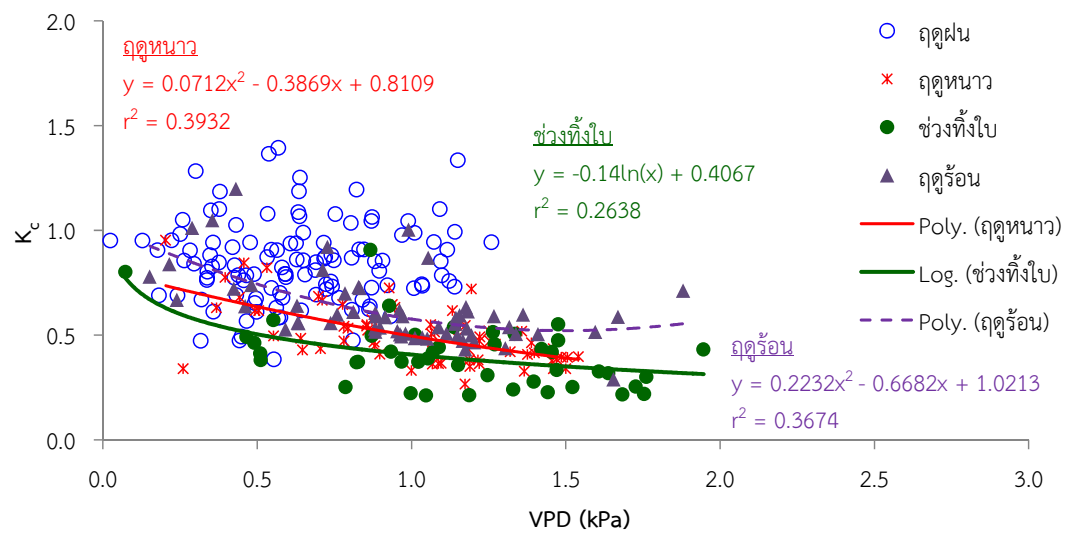
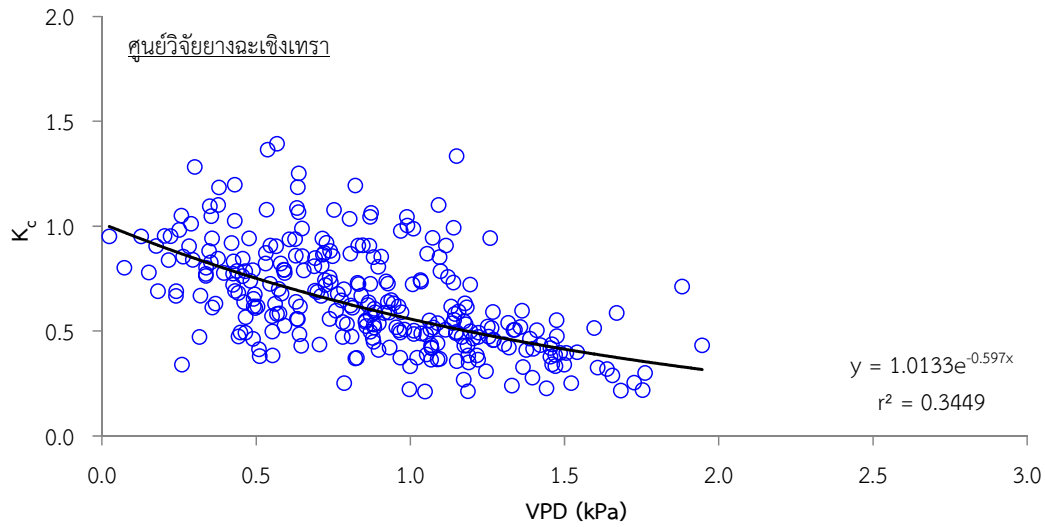
ตารางที่ 5-3

แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (K_c) กับปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (VPD) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ

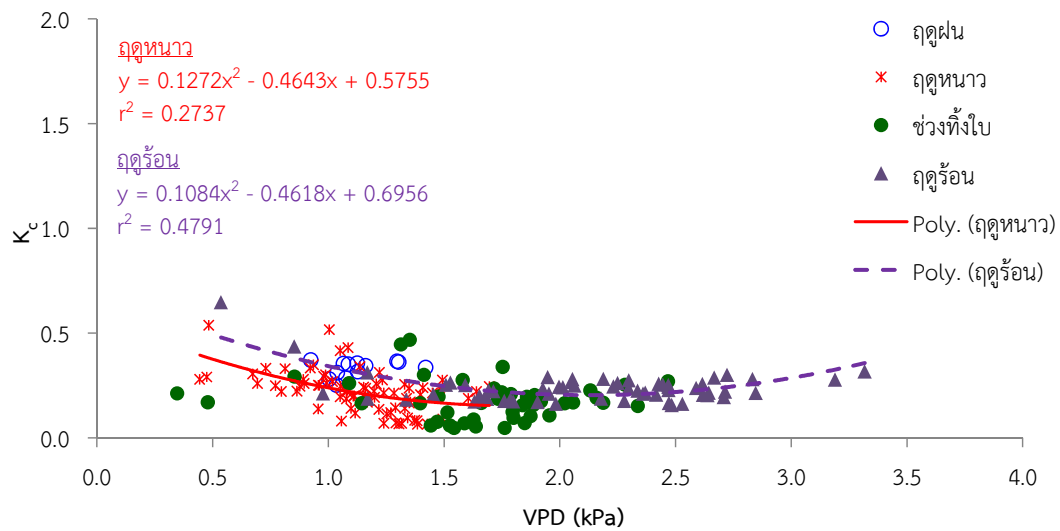
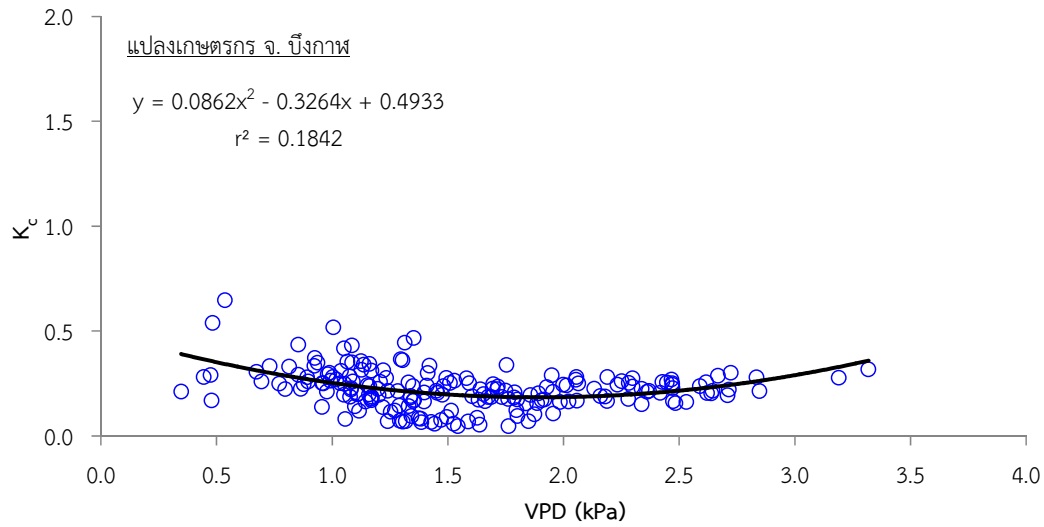
ช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี	K_c	VPD
<u>Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา</u>		
รวมทุกช่วงเวลา	r	-0.55388
	P	<0.0001
ฤดูฝน (1 ก.ค. 55- 30 ต.ค. 55)	r	0.04762
	P	ns
ฤดูหนาว (1 พ.ย. 55 – 15 ม.ค. 56)	r	-0.62379
	P	<0.0001
ช่วงทิ้งใบ (16 ม.ค. 56-28 ก.พ. 56)	r	-0.46461
	P	0.0015
ฤดูร้อน (1 มี.ค. 56-30 เม.ย. 56)	r	-0.54987
	P	<0.0001
<u>Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา</u>		
รวมทุกช่วงเวลา	r	-0.19351
	P	0.0067
ฤดูฝน (1 ต.ค. 55- 30 ต.ค. 55)	r	0.32403
	P	ns
ฤดูหนาว (1 พ.ย. 55 – 15 ม.ค. 56)	r	-0.50821
	P	<0.0001
ช่วงทิ้งใบ (16 ม.ค. 56-28 ก.พ. 56)	r	-0.13186
	P	ns
ฤดูร้อน (1 มี.ค. 56-30 เม.ย. 56)	r	-0.26044
	P	0.0426

หมายเหตุ

คำย่อ K_c = ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ
 VPD = ปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit)
 r = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
 P = ความน่าจะเป็น
 ns = ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ



รูปที่ 5-11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (K_c) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา



รูปที่ 5-12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (K_c) และปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit, VPD) ณ Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ

บทที่ 6

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

6.1 พื้นที่ศึกษา

การดำเนินงานวิจัยในปีที่ 1 ส่วนใหญ่เป็นการสร้าง Tower ช่อมแซมและติดตั้งเครื่องมือ เพื่อใช้สำหรับเก็บข้อมูลสมดุลคาร์บอนและน้ำในพื้นที่ปลูกยาง 2 Site ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา และบึงกาฬ ทำให้การเก็บข้อมูลในปีที่ 1 ไม่ครบ 1 ปี

การดำเนินงานวิจัย ณ ศูนย์วิจัยยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา สามารถดำเนินการเก็บข้อมูลได้ในระยะเวลาจนถึง 11 เดือน เนื่องจากมี Tower และติดตั้งชุดอุปกรณ์อยู่แล้ว แต่มีเครื่องมือบางชิ้นที่ได้รับความเสียหายต้องดำเนินการซ่อมและสอบเทียบค่าของ sensors ทั้งหมดที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ใหม่ทั้งหมด

ตารางที่ 6-1 สรุปข้อมูลของพื้นที่ศึกษา

Site	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา	แปลงเกษตรกร
ภาค	ตะวันออก	ตะวันออกเฉียงเหนือ
สถานที่	อ. สนาชัยเขต 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	ชุดดินกบินทร์บุรี	ชุดดินโพธิ์พล
พันธุ์ยาง	RRIM 600	RRIM 600
ระยะปลูก	2.5 x 7 เมตร	3 x 7 เมตร
อายุต้น	19 ปี (ปี 2556)	4 ปี (ปี 2556)
ระยะเวลาที่เปิดกรีด(ปี)	10 ปี	ยังไม่เปิดกรีด
ปีที่สร้างหอคาย/ความสูง	2549 / 25 m.	2555 / 15 m.
ติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดจุลภูมิอากาศ	2549	2555
ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วและทิศทางลมที่เสียหาย และสามารถดำเนินการวัดและบันทึกข้อมูลได้	ซ่อมแซมแก้ไขเครื่องวัดความเร็วและทิศทางลมที่เสียหาย และสามารถดำเนินการวัดและบันทึกข้อมูลได้	

การดำเนินงานวิจัย ณ แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ สามารถดำเนินการเก็บข้อมูลได้ในระยะเวลาเพียง 6 เดือน เนื่องจากต้องดำเนินการหาพื้นที่ศึกษาที่เหมาะสม สร้าง Tower และติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลใหม่ทั้งหมด พร้อมทั้งต้องดำเนินการสอบเทียบค่าของ sensors ใหม่ทั้งหมดเช่นเดียวกับ Site ที่ 1 การบันทึกข้อมูลในพื้นที่ศึกษานี้ค่อนข้างมีปัญหา เนื่องจากการทำงานของเครื่องมือใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมด ดังนั้นในช่วงเวลาที่มีมรสุม ฝนตกมาก และหากท้องฟ้าปิดเป็นระยะเวลาติดต่อกันหลายวันจะมีปัญหามากสำหรับการบันทึกข้อมูล เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่ไม่เพียงพอ

6.2 การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

การศึกษาสมดุลคาร์บอนแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) การศึกษาสมดุลคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยางพารา เป็นการวัดสมดุลคาร์บอนด้วยเทคนิค Eddy Covariance (2) การศึกษาสมดุลคาร์บอนของการเกษตรกรรม ด้วยวิธี LCA และ (3) ปริมาณคาร์บอนที่สะสมอยู่ในผลผลิตนํ้ายาง

พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ช่วงระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 11 เดือน (1 มิ.ย. 55 – 1 เม.ย. 56) มีปริมาณคาร์บอนที่สะสมในพื้นที่ปลูกยางพารา และผลผลิตน้ำยาง เท่ากับ 1,351.48 และ 129.11 kg C.ra⁻¹ และมีการปลดปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศเนื่องจากการเขตรกรรมเท่ากับ 9.02 kg C.ra⁻¹ ดังนั้นในช่วงเวลาดังกล่าวคาร์บอนจะถูกเก็บกักไว้ในพื้นที่ปลูกยางและผลผลิตมีปริมาณเท่ากับ 1,471.57 kg C.ra⁻¹ (ตารางที่ 6-2)

พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ช่วงระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 6 เดือน (1 พ.ย. 55 – 1 เม.ย. 56) มีปริมาณคาร์บอนที่สะสมในพื้นที่ปลูกยางพารา 334.11 kg C.ra⁻¹ และมีการปลดปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศเนื่องจากการเขตรกรรมเท่ากับ 13.23 kg C.ra⁻¹ ดังนั้นในช่วงเวลาดังกล่าวคาร์บอนจะถูกเก็บกักไว้ในพื้นที่ปลูกยางมีปริมาณเท่ากับ 320.88 kg C.ra⁻¹ และเนื่องจากแปลงยางพารา Site ที่ 2 ยังมีอายุน้อยและยังไม่ได้เปิดกรีด ทำให้ยังไม่มีข้อมูลการสะสมของคาร์บอนในผลผลิตน้ำยาง(ตารางที่ 6-2)

จากข้อมูลปริมาณคาร์บอนที่ศึกษาใน 3 ส่วน ดังกล่าวข้างต้น จะพบว่าการสะสมคาร์บอนในพื้นที่ปลูกยางนั้น Site ที่ 1 และ 2 นั้นมีปริมาณสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 90.73 และ 96.19 ตามลำดับ รองลงมาได้แก่ปริมาณคาร์บอนที่สะสมในเนื้อยาง คิดเป็นร้อยละ 8.67 สำหรับพื้นที่ Site ที่ 1 และการเขตรกรรมต่างๆ มีการปลดปล่อยคาร์บอนออกมาในสัดส่วนที่น้อยที่สุด ต่อ 0.61 และ 3.81 สำหรับพื้นที่ Site ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

6.3 การศึกษาสมดุลน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

การศึกษามูลน้ำเป็นการศึกษาสมดุลน้ำในพื้นที่ปลูกยางพารา ซึ่งวัดได้จริงด้วยเทคนิค Eddy Co-variance พื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา ในช่วงเวลา 11 เดือน มีค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง (ETR) และค่าที่ได้จากการคำนวณ เท่ากับ 799.82 และ 1,164.00 mm ซึ่งค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ค่าการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยางอายุนั้นมีค่าเท่ากับ 1,279.69 m³.rai⁻¹ ขณะที่ผลผลิตน้ำยาง มีค่าเท่ากับ 160.97 Kg rai⁻¹ ดังนั้นวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 1 จึงมีค่าเท่ากับ 7.96 m³.Kg yield⁻¹

พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 แปลงเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ ในช่วงระยะเวลา 6 เดือน มีค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง (ETR) และค่าที่ได้จากการคำนวณ เท่ากับ 271.86 และ 1,238.1 mm ซึ่งค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมากเช่นเดียวกับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 ค่าการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกยางอายุนั้นมีค่าเท่ากับ 434.98 m³.rai⁻¹ ขณะที่ผลผลิตน้ำยาง (จากการประเมิน) มีค่าเท่ากับ 30.04 Kg rai⁻¹ ดังนั้นวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ปลูกยางพารา Site ที่ 2 จึงมีค่าเท่ากับ 12.57 m³. Kg yield⁻¹ (ตารางที่ 6-3)

6.4 อิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (Net Ecosystem Exchange, NEE) กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ และสภาพแวดล้อมของข้อมูลทั้งหมด สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางผกผันกับค่า LAI, R_g และ RH แต่มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า VPD และไม่มีความสัมพันธ์กับค่า RH ขณะที่พื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 พบว่า ค่า NEE มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางผกผันกับค่า R_g, T_{air} และ VPD และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า RH (ตารางที่ 6-4)

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง (Evapotranspiration, ETR) กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ และสภาพแวดล้อมของข้อมูลทั้งหมด สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า LAI และ R_g แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า T_{air}, RH และ VPD สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 พบว่า ค่า ETR มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า R_g, T_{air} และ RH แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า VPD (ตารางที่ 6-5)

ตารางที่ 6-2 สรุปข้อมูลสมดุลคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพารา

Site	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา	แปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ
ระยะเวลาในการบันทึกข้อมูล	11 เดือน (1 มิ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56)	6 เดือน (22 ต.ค. 55 – 30 เม.ย. 56)
NEE (Net Ecosystem Exchange, kg C ra ⁻¹)	-1,351.48	-414.21
GPP (Gross Primary Production, kg C ra ⁻¹)	4,112.07	609.70
R _e (Ecosystem Respiration, kg C ra ⁻¹)	2,760.59	195.49
R _s (Soil respiration, g C m ⁻²) ^{1/}	700	386
R _{tp} (Soil respiration from trenched plot, g C m ⁻²) ^{1/}	464	302
R _a (Autotrophic respiration, g C m ⁻²) ^{1/}	700- R _h	386- R _h
R _h (Heterotrophic respiration, g C m ⁻²) ^{1/}	464- R _d	302- R _d
R _d (Decomposing root-derived CO ₂ efflux, g C m ⁻²) ^{1/}	*ยังไม่สามารถคำนวณค่า R _d ได้ เนื่องจากข้อมูลยังไม่ครบปี*	
NEP (Net Ecosystem Production, kg C ra ⁻¹)	-1,351.48	-414.21
สถานะของระบบนิเวศยางพารา	Carbon sink	Carbon sink
ปริมาณคาร์บอนจากพื้นที่สวนยาง (kg C.rai ⁻¹)	-1,351.48	-334.11
ปริมาณคาร์บอนจากการเขตกรรม (kg C.rai ⁻¹)	9.02	13.23
ปริมาณคาร์บอนจากผลผลิตน้ำยาง (kg C.rai ⁻¹)	-129.11	-2/
ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (kg C.rai ⁻¹)	-1,471.57	-320.88

หมายเหตุ ^{1/} หมายถึง R_s สะสมในระยะเวลา 170 และ 146 วัน ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทราและแปลงเกษตรกร จ. บึงกาฬ ตามลำดับ

^{2/} หมายถึง แปลงยางพาราของเกษตรกร จ. บึงกาฬ ยังไม่ได้เปิดกรีด

Carbon sink คือ ระบบนิเวศยางพาราทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งกักเก็บคาร์บอน (NEP < 0)

ตารางที่ 6-3 สรุปข้อมูลสมดุลน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา

Site	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา	แปลงเกษตรกร
ระยะเวลาในการบันทึกข้อมูล	11 เดือน (1 มิ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56)	6 เดือน (1 พ.ย. 55 – 30 เม.ย. 56)
ETR (ค่าการคายระเหยน้ำ, mm)	799.82	271.86
ET _o (ค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิงจากการคำนวณ, mm) ^{1/}	1,164.00	1,238.1
CWU (ค่าการใช้น้ำของยางพารา, m ³ ra ⁻¹)	1,279.69	377.51
ผลผลิต (kg ra ⁻¹)	160.97	30.04 ^{2/}
วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ (m ³ . kg yield ⁻¹)	7.95	12.57

หมายเหตุ ^{1/} หมายถึง ค่าการคายระเหยน้ำที่คำนวณจากสมการ FAO Penman-Monteith

^{2/} หมายถึง ข้อมูลที่ได้จากการประเมินจากเอกสารอ้างอิง

6.5 สรุปผลที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยปีที่ 1

การทำงานวิจัยในปีที่ 1 นี้ การบันทึกข้อมูลสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าคาร์บอนและวอเตอร์ฟุตพริ้นต์นั้นยังไม่ครบ 1 ปี หรือ 1 ฤดู เนื่องจากต้องใช้เวลาในช่วงเริ่มแรกของงานวิจัยในการสร้างหอคอย การจัดซื้อครุภัณฑ์ การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับบันทึกข้อมูล และการสอบเทียบค่าอุปกรณ์ทุกชนิดที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ยังทราบถึงการตอบสนองของสมดุลคาร์บอนของแปลงยางพาราต่อสภาพภูมิอากาศ ในช่วงระยะเวลาที่ดำเนินการเก็บข้อมูล

การศึกษาสมมูลคาร์บอน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ข้อมูลผลผลิตคาร์บอนสุทธิ (NEP) ซึ่งคำนวณจากข้อมูลสมมูลคาร์บอนที่วัดได้จริงด้วยเทคนิค Eddy Covariance เป็นหนึ่งในข้อมูลการปล่อยแก๊สเรือนกระจกช่วงต้นน้ำ (Upstream emissions) ซึ่งยังไม่มีการนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์เนื่องจากไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะสามารถนำมาคำนวณได้ แต่ในปัจจุบันซึ่งการพัฒนาของเทคโนโลยีและเทคนิคต่างๆ ทำให้เราสามารถตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของพื้นที่ปลูกพืชได้ และจากข้อมูลที่ได้จากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของคาร์บอนที่ถูกกักเก็บไว้ในพื้นที่ปลูกยางนั้นมีค่าสูงกว่าร้อยละ 90 ดังนั้น ถ้าสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการจะเป็นการสร้างข้อได้เปรียบในการแข่งขันของผลิตภัณฑ์ยางพาราธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ ซึ่งในปัจจุบันปรากฏว่ามีการรายงานว่ายางธรรมชาติและยางสังเคราะห์บางกลุ่มนั้นมีค่า Emission factor ที่ใกล้เคียงกัน (คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์, 2552)

การศึกษาสมมูลน้ำ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ พบว่า ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่คำนวณได้จาก Site ที่ 2 ยางอายุน้อย (ผลผลิตมาจากการประเมิน) เท่ากับ $12.57 \text{ m}^3.\text{Kg yield}^{-1}$ และมีค่าใกล้เคียงกับที่รายงานโดย Mekonnen และ Hoekstra (2011) ซึ่งประเมินค่าโดยใช้แบบจำลอง CROPWAT 8.0 ที่มีค่า $12.96 \text{ m}^3.\text{Kg yield}^{-1}$ ขณะที่ Site ที่ 1 ซึ่งยางพารามีอายุ 19 ปีและมีผลผลิตน้ำยางพาราที่เก็บได้จริงพร้อมกับค่าการใช้น้ำที่วัดได้ แต่กลับพบว่าค่าที่รายงานโดย Mekonnen and Hoekstra (2011) มีค่ามากกว่าถึง 63% ทั้งนี้จะมาจากสภาพแวดล้อมและตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองที่ Mekonnen and Hoekstra (2011) ใช้ นั้นมีความแตกต่างจากสภาพแวดล้อมในความเป็นจริงใน Site ที่ทำการทดลอง นอกจากนี้ค่าการคายระเหยน้ำ (ETR) ที่ได้จากการวัดจริง และค่าการระเหยน้ำของพืชอ้างอิง (ETo) จากการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลจุลภูมิอากาศและค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (k_c) ตามวิธีการของ FAO Penman-Monteith พบว่า ความแตกต่างของค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงและจากการคำนวณสูงถึง 64% แสดงให้เห็นว่าการนำแบบจำลองมาใช้ในการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นต์และค่าการคายระเหยน้ำนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องมีการปรับค่าตัวแปร ซึ่งได้แก่ ค่า k_c ที่เหมาะสมสำหรับการนำไป ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะมีค่าสำคัญอย่างยิ่งในการ validate แบบจำลองว่าสามารถใช้งานได้ดีเพียงไรหลังการปรับแต่ง

การศึกษาอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมมูลคาร์บอนและน้ำ จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยใช้ข้อมูลรวมที่บันทึกได้นั้น พบว่า อัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิจากทั้ง 2 Site มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เหมือนกัน แต่พบว่า การคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงจากทั้ง 2 Site มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกับค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิและการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และ ปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้นั้นมีความแตกต่างกันระหว่าง Site ที่ศึกษา เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวิจัยในปีที่ 1 นั้นยังไม่มากพอและข้อมูลมีความแปรปรวนสูงมาก อีกทั้งการบันทึกข้อมูลในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ณ แปลงศึกษาวิจัยเพียง 2 Site นี้ยังไม่เพียงพอต่อการนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการพยากรณ์สมมูลคาร์บอนและน้ำ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความสามารถในการสร้างชีวมวล ความต้องการใช้น้ำของยางพารา และผลกระทบของสภาวะโลกร้อนต่อยางพารา ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะช่วยให้การตัดสินใจเกี่ยวกับการเกษตรกรรมมีประสิทธิภาพ สามารถจัดการการผลิตและจัดเขตพื้นที่ปลูกยางพาราได้ดียิ่งขึ้น อันจะเป็นประโยชน์ทั้งในระดับเกษตรกรและระดับนโยบายต่อไป

ดังนั้น การดำเนินงานวิจัยจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินงานเป็นระยะเวลา 4 ปีเป็นอย่างน้อย เนื่องจากในการศึกษาสมมูลของคาร์บอนและน้ำนั้น ทีมวิจัยต้องการข้อมูล NEE จำนวนขั้นต่ำที่จะวิเคราะห์สถิติได้จำนวน 4 ชุดข้อมูล (จาก 4 ปีที่ศึกษา) ที่จะใช้ศึกษาปัจจัยกำหนดความแปรปรวนของความยาวนานของแต่ละช่วงของการเจริญของต้นยางใน 1 ฤดูปลูก ซึ่งจำเป็นต่อการนำไปใช้/พัฒนาแบบจำลองประเมินสมมูลคาร์บอน

ตารางที่ 6-4 แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) กับดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลงยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ

ตารางที่ 6-5 แสดงการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริง (ETR) กับดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมต่างๆ ณ Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา และ Site ที่ 2 แปลยางเกษตรกร จ. บึงกาฬ

หมายเหตุ	คำย่อ		
	LAI	=	ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf area index)
	R _g	=	ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (Global solar radiation, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
	T _{air}	=	อุณหภูมิอากาศ (Air temperature, °C)
	RH	=	ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity, %)
	VPD	=	ปริมาณไอน้ำที่อากาศรับเพิ่มได้ (Vapor pressure deficit)
สัญลักษณ์	-	=	มีความสัมพันธ์ไปในทางผกผันกับค่า NEE และ ETR
	+	=	มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับค่า NEE และ ETR
	ns	=	ไม่มีความสัมพันธ์ค่า NEE และ ETR

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, วรุณี บุญนำ, เอนก กุณาละสิริ, ดารุณี โกศัยเสวี, ศุภมิตร ลิ้มปิชัย, เฉลิมพงษ์ ขาว
ช่วง, รัตณิตยา พวงแก้ว, นภาพรณ เลขะวิวัฒน์, ศจิรัตน์ แรมลี, กฤษดา สังข์สิงห์, อารักษ์
จันทูมา, สุรเดช ปัจฉิมกุล และพุดนา รุ่งระวี. 2554. การประเมินการเจริญเติบโตของต้นยาง
ในเขตปลูกยางใหม่. ว.ยางพารา 32 (2): 17-35.
- 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, et al. 2010. Water and energy footprints of bioenergy crop
production on marginal lands. Global Change Biology – Bioenergy 3(3):208-222.
- 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.
- 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.

ภาคผนวก ก

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผน และกิจกรรม
ที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

**ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผน และ
กิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครง**

ตารางผนวกที่ 1 แผนของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. จัดซื้อครุภัณฑ์ในการดำเนินงานวิจัย	1. จัดซื้อครุภัณฑ์ในการดำเนินงานวิจัย	1. จัดซื้อครุภัณฑ์ในการดำเนินงานวิจัยแล้วเสร็จครบทุกชิ้น	1. จัดซื้อครุภัณฑ์บางชิ้นล่าช้า ทำให้ดำเนินการเก็บข้อมูลวิจัยล่าช้ากว่าที่วางแผนไว้
2. ทราบความก้าวหน้าและปัญหาของการดำเนินงานของโครงการย่อยอย่างต่อเนื่อง และสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้โดยไม่กระทบต่อแผนการดำเนินงาน	2. ติดตามความก้าวหน้าของการดำเนินงานของโครงการย่อยทุกเดือน และประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ทุก 2 เดือน	2. ติดตามความก้าวหน้าของการดำเนินงานของโครงการย่อยทุกเดือน และประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย ทุก 2 เดือน กรณีที่มีปัญหาเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย ทีมวิจัยมีการหารือบ่อยครั้งขึ้น และมากกว่าที่วางแผนไว้	2. การติดตามความก้าวหน้าของการและการประชุมหารืออย่างต่อเนื่องทำให้ทีมวิจัยแก้ปัญหาได้ทันเวลา แม้ว่าในบางกรณีจะไม่สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้เลยก็ตาม
3. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย และจัดทำรายงานผลการวิจัย	3. ประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย และจัดทำรายงานผลการวิจัย	3. ประชุมสรุปผลการดำเนินงานวิจัย และจัดทำรายงานผลการวิจัย	3. สามารถจัดทำรายงานผลการวิจัยได้แล้วเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนด

ตารางผนวกที่ 2 แผนของโครงการย่อยที่ 1 การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. เพื่อประเมินค่า NPP	1. Eddy covariance - ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของ Site ที่ 1 - สำรวจพื้นที่สวนยางพาราที่มีอายุน้อยและยังไม่เริ่มเปิดกรีด สำหรับเป็นพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 - สร้าง Tower ติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่สวนยางพารา Site ที่ 2 - เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพารา	1. Eddy covariance - ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของ Site ที่ 1 - สำรวจพื้นที่สวนยางพาราที่มีอายุน้อยและยังไม่เริ่มเปิดกรีด สำหรับเป็นพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 - สร้าง Tower ติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่สวนยางพารา Site ที่ 2 - เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของคาร์บอนของสวนยางพารา แต่ไม่ครบ 1 ปี	1. การดำเนินการส่วนใหญ่เป็นไปตามแผนที่กำหนด แต่การเก็บข้อมูลวิจัยไม่สามารถดำเนินการให้ครบ 1 ปี หรือ 1 ฤดูกาลได้ ทำให้ยังไม่สามารถคำนวณค่า NPP ได้ เนื่องจากตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณไม่สามารถประเมินได้จากข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งไม่ครบ 1 ปี
2. เพื่อประเมินค่า R_a และ R_h	2. Soil respiration - สร้าง Trench Plot และ ติดตั้ง Soil collar ในพื้นที่ศึกษา - เก็บข้อมูล Soil CO ₂ efflux ของสวนยางพารา	2. Soil respiration - สร้าง Trench Plot และ ติดตั้ง Soil collar ในพื้นที่ศึกษา - เก็บข้อมูล Soil CO ₂ efflux ของสวนยางพารา ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ครบ 1 ปี เนื่องจากความล่าช้าของการเลือกพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 ความล่าช้าในการจัดซื้อครุภัณฑ์ และเครื่องมือขัดข้อง	2. ทีมวิจัยสามารถสร้าง Trench Plot และ ติดตั้ง Soil collar ในพื้นที่ศึกษา แต่การเก็บข้อมูลวิจัยไม่สามารถดำเนินการให้ครบ 1 ปี หรือ 1 ฤดูกาลได้ ทำให้ยังไม่สามารถคำนวณค่า R_a และ R_h ได้ เนื่องจากไม่สามารถประเมิน ค่า R_d จากข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งไม่ครบ 1 ปี

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
3. ข้อมูลประกอบในการคำนวณและประเมินความแปรปรวนของคาร์บอนฟุตพริ้นต์	3. เก็บข้อมูลประกอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลด้าน Biometric และ Litter	3. ดำเนินการเก็บข้อมูล Girht ทุก 6 เดือน และ Litter trap ทุก 2 สัปดาห์	3. ข้อมูลที่ได้จะถูกใช้ในการประเมินการเจริญเติบโตของต้นยางพารา และดัชนีพื้นที่ใบของสวนยางพารา
4. ข้อมูลประกอบในการคำนวณและประเมินความแปรปรวนของคาร์บอน	4. การคำนวณค่า GPP, NEP และ NBP	4. ทีมวิจัยสามารถคำนวณค่า GPP และ NEP ได้จากข้อมูลที่วัดได้จริง	4. ทีมวิจัยสามารถคำนวณค่า GPP และ NEP ได้ในช่วงระยะเวลา 11 และ 6 เดือน ของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
5. ข้อมูลประกอบในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา	5. คาร์บอนฟุตพริ้นต์จากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้น	5. สามารถประเมินสมดุลคาร์บอนจากการเกษตรกรรมของพื้นที่ศึกษาด้วยวิธี LCA	5. ได้ค่าสมดุลคาร์บอนจากการเกษตรกรรม เพื่อใช้ประกอบการประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์
6. คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา	6. การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์	6. แม้ว่าข้อมูลสมดุลคาร์บอนที่วัดได้จากพื้นที่ปลูกยางพาราจะไม่ครบ 1 ปี แต่ก็ยังสามารถประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ได้	6. คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ Site ที่ 1 ประเมินจากข้อมูลสมดุลคาร์บอนที่วัดได้จากพื้นที่ปลูกยางพาราในระยะเวลา 11 เดือน รวมกับสมดุลคาร์บอนจากการเกษตรกรรม คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ Site ที่ 2 ประเมินจากข้อมูลสมดุลคาร์บอนที่วัดได้จากพื้นที่ปลูกยางพาราในระยะเวลา 6 เดือน รวมกับสมดุลคาร์บอนจากการเกษตรกรรม เนื่องจากพื้นที่ศึกษานี้ยังไม่มีกรเปิดกรีด ข้อมูลผลผลิตจึงประเมินมาจากเอกสารอ้างอิง

ตารางผนวกที่ 3 แผนของโครงการย่อยที่ 2 การศึกษาสมดุสน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา

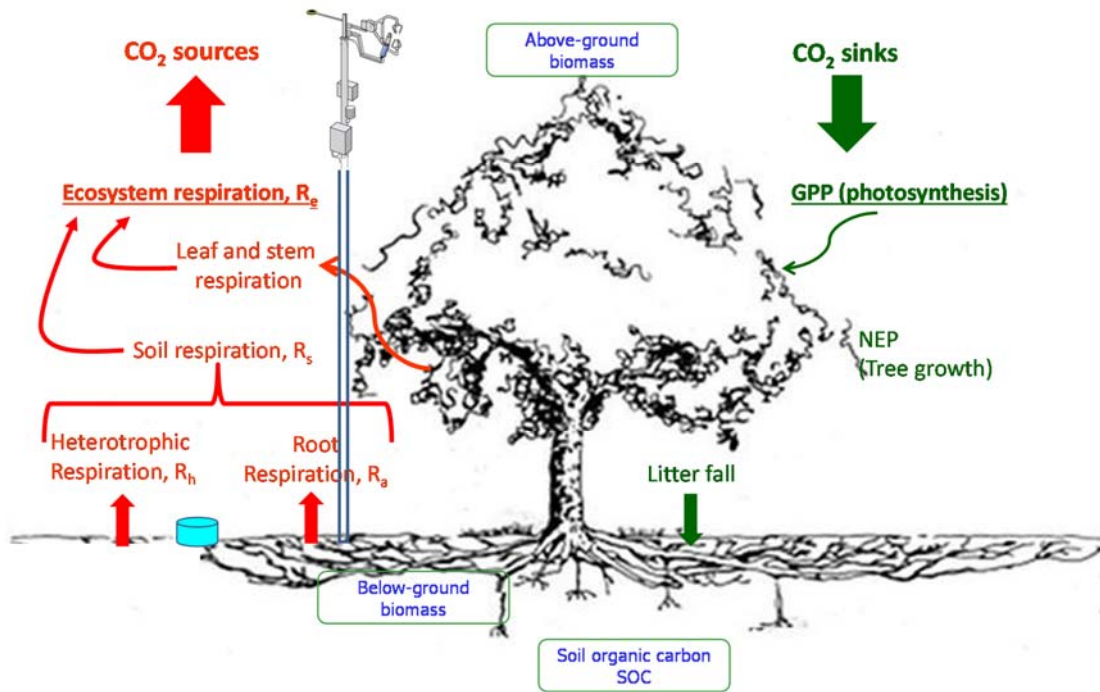
วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. ค่าการคายระเหยน้ำของสวนยางพารา ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวอเตอร์ฟุตพริ้นต์	1. Eddy covariance - ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของ Site ที่ 1 - สำรวจพื้นที่สวนยางพาราที่มีอายุน้อยและยังไม่เริ่มเปิดกรีด สำหรับเป็นพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 - สร้าง Tower ติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่สวนยางพารา Site ที่ 2 - เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของน้ำของสวนยางพารา	1. Eddy covariance - ซ่อมแซมและตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศของ Site ที่ 1 - สำรวจพื้นที่สวนยางพาราที่มีอายุน้อยและยังไม่เริ่มเปิดกรีด สำหรับเป็นพื้นที่ศึกษา Site ที่ 2 - สร้าง Tower ติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศในพื้นที่สวนยางพารา Site ที่ 2 - เก็บข้อมูลอัตราการเคลื่อนของน้ำของสวนยางพารา แต่ไม่ครบ 1 ปี	1. การดำเนินการส่วนใหญ่เป็นไปตามแผนที่กำหนด แต่การเก็บข้อมูลวิจัยไม่สามารถดำเนินการให้ครบ 1 ปี หรือ 1 ฤดูกาลได้ แต่สามารถคำนวณค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จริงด้วยเทคนิค Eddy Covariance (ETR) และค่าการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้จากสมการ FAO Penman-Monteith (ETo)
2. ข้อมูลประกอบในการคำนวณและประเมินความแปรปรวนของวอเตอร์ฟุตพริ้นต์	2. เก็บข้อมูลประกอบอื่น ๆ เช่น ข้อมูลจาก sap flow และ soil water content ผลผลิต	2. การเก็บข้อมูลประกอบอื่นๆ - Sap flow การติดตั้งลำช้า เนื่องจากความลำช้าในการจัดซื้อครุภัณฑ์ - Soil water content ติดตั้งไปพร้อมๆ กับการทำ Trenched plot ของงานวัด Soil respiration - ผลผลิตมีข้อมูลจริงจากพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 เท่านั้น	2. การเก็บข้อมูลประกอบอื่นๆ - การติดตั้ง Sap flow ทำให้ได้ค่าการคายน้ำของต้นยางพารา แต่มีข้อมูลไม่ครบปี เนื่องจากการติดตั้งชุดอุปกรณ์ลำช้า - ข้อมูล Soil water content มี 5 ระดับจากผิวดิน แต่ข้อมูลไม่ครบ 1 ปีทั้งสอง Site - ผลผลิตมีข้อมูลจริงจากพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 เท่านั้น ส่วน Site ที่ 2 ข้อมูลได้จากการประเมินตามเอกสารอ้างอิง

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
3. การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวน ยางพาราอายุ	3. การคำนวณวอเตอร์ฟุตพริ้นต์	3. แม้ว่าข้อมูลสมมูลคาร์บอนที่วัดได้จากพื้นที่ ปลูกยางพาราจะไม่ครบ 1 ปี แต่ก็ยัง สามารถประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ได้	3. วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของพื้นที่ Site ที่ 1 ประเมินจากข้อมูลสมมูลน้ำที่วัดได้จาก พื้นที่ปลูกยางพาราในระยะเวลา 11 เดือน พื้นที่ Site ที่ 2 ประเมินจากข้อมูลสมมูลน้ำ ที่วัดได้จากพื้นที่ปลูกยางพาราในระยะเวลา 8 เดือน แต่เนื่องจากพื้นที่ศึกษานี้ยังไม่มี การเปิดกรีด ข้อมูลผลผลิตจึงประเมินมา จากเอกสารอ้างอิง

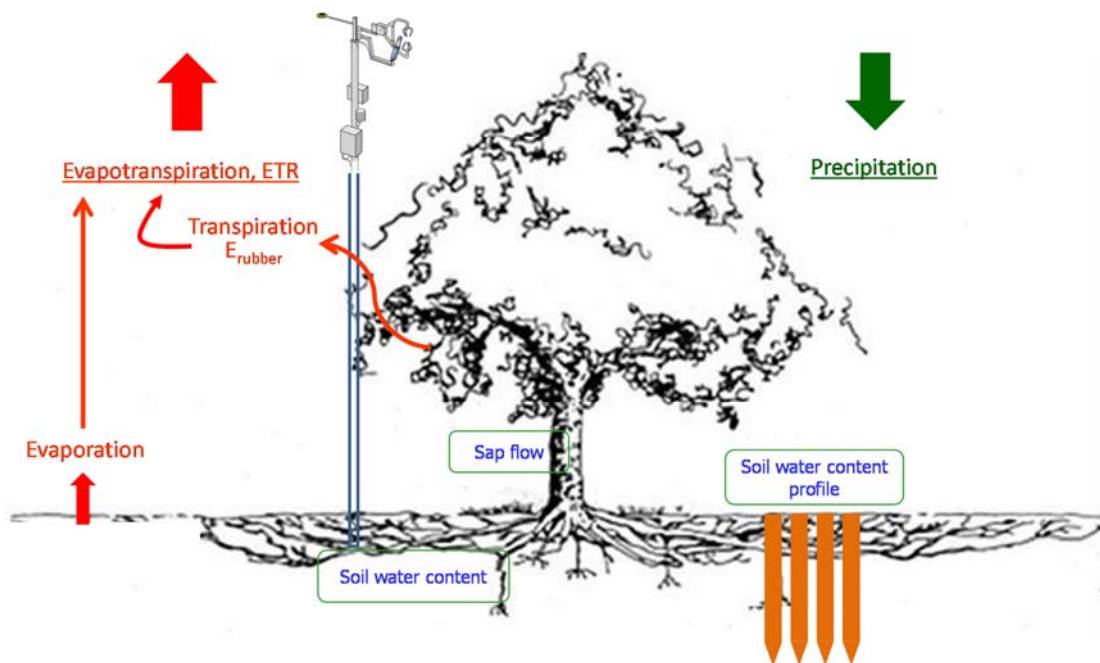
ภาคผนวก ข

ภาพ System boundary ที่รวม กิจกรรม
ที่ใช้ในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์

“Carbon footprint”



“Water footprint”



รูปผนวกที่ 1

System boundary ของแผนงาน “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา”

ภาคผนวก ค

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 Pen- man-Monteith equation	ETP	mm	30 นาที
3. Soil respiration system			
Soil respiration	Rs	μmol m ⁻² s ⁻¹	2 สัปดาห์ (กรณีที่เครื่องมือมีปัญหาอาจต้อง ขยายเวลาในการเก็บข้อมูลแต่ละ ครั้งนอนขึ้น เนื่องจากเหลือ เครื่องมือเพียงชุดเดียว แต่ต้องเก็บ ข้อมูล 2 Site)
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 ง

การศึกษาสมมูลคาร์บอนและน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา
ด้วยวิธี Eddy Covariance

การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำของพื้นที่ปลูกยางพารา ด้วยวิธี Eddy Covariance

1. Eddy Covariance

“Eddy Covariance” เป็นหนึ่งในวิธีการที่ใช้ในการวัด Flux ของแก๊สและตรวจติดตามการแพร่ของแก๊สจากพื้นที่ศึกษาที่มีความแม่นยำมากที่สุด เป็นการวัดค่าที่ศึกษาโดยตรง และมีการใช้แพร่หลายในปัจจุบัน

เทคนิค eddy covariance เป็นเทคนิคในการตรวจวัดด้านอุตุนิยมในระดับจุลภูมิอากาศ (Micro-climate) เพื่อตรวจวัดความแปรปรวนของ Flux ในแนวตั้งของชั้นบรรยากาศ โดยวัดความแปรปรวนร่วมระหว่างความเข้มข้นของสิ่งที่เราสนใจ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอ้ น้ำ และมีเทน เป็นต้น กับความเร็วของลมในแนวตั้งภายในแต่ละ Eddy ดังนั้นในการตรวจวัดต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อน เนื่องจากความผันผวนของสิ่งที่เราสนใจนั้นเกิดขึ้นเร็วมาก และมีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณที่น้อยมากทั้งความเข้มข้น ความหนาแน่น หรืออุณหภูมิ จึงจำเป็นต้องตรวจวัดในลักษณะที่รวดเร็ว และมีความแม่นยำสูงๆ

2. ชุดอุปกรณ์ Eddy covariance

2.1 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ Eddy covariance

ชุดอุปกรณ์ Eddy covariance ประกอบด้วย

2.1.2 เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม แบบ 3 มิติ(ความเร็วลมในทิศทาง x, y, z) (Three dimensional sonic anemometer) รุ่น CSAT3 ของบริษัท Campbell Scientific

2.2.2 เครื่องวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ระบบเปิด (Open path infrared gas analyzer) รุ่น LI-7500 ของบริษัท Li-COR Inc.

ในการศึกษาวิจัยชุดอุปกรณ์ Eddy Covariance ถูกติดตั้งไว้ที่ความสูง 27 และ 12 m. บนหอคอยของพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 (จังหวัดฉะเชิงเทรา) และ 2 (จังหวัดบึงกาฬ) ตามลำดับ ข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือจะถูกบันทึกในการ์ดบันทึกข้อมูลขนาดความจุ 2 GB (Compact flash) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ (Data logger) รุ่น CR5000 และ CR3000 สำหรับพื้นที่ศึกษา Site ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ นักวิจัยจะเปลี่ยนการ์ดบันทึกข้อมูลจากเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติทุกๆ 2 อาทิตย์ การบันทึกข้อมูลของเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติจะดำเนินการตามคำสั่งที่นักวิจัยโปรแกรมไว้ คือ จะบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 20 Hz หรือ 20 ครั้งต่อวินาที ตลอด 24 ชั่วโมง

2.2 การคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเหนือเรือนยอดสวนยางพาราด้วยเทคนิค Eddy Covariance

วิธีการคำนวณค่าอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิ (Net ecosystem exchange, NEE หรือ F_{CO_2}) ด้วยเทคนิค Eddy Covariance (Goulden *et al.*, 1996) เป็นการคำนวณจาก Covariance ระหว่างความแปรปรวนความเร็วลมในแนวตั้ง (w') และความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($[CO_2]$) 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) ซึ่งข้อมูลความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และความเร็วลมในแนวตั้งจะถูกนำมาคำนวณด้วยโปรแกรม EdiRe ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ฟรีที่สามารถดาวน์โหลดได้ที่จาก <http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/> นักวิจัยได้เขียนโปรแกรมคำนวณตามวิธีมาตรฐานตั้งขั้นตอนการคำนวณตามรายละเอียดของ รูปที่ 2-3 ค่า NEE เฉลี่ยทุกๆ 30 นาที จะถูกนำมาคำนวณหาค่าอื่นๆ ต่อไป ได้แก่ NEP (Net ecosystem production), NPP (Net primary production), GPP (Gross primary production), และ Re (Ecological respiration) ต่อไป

วิธีการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ด้วยเทคนิค Eddy covariance ดังสมการที่ (1) และ (2) (Bhardwaj *et al.*, 2011) ตามลำดับ

$$CF = \frac{NEP - C_{loss}}{Yield} \quad (2)$$

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

โดยที่ CF = Carbon footprint
NEP = Net ecosystem production
WF = Water footprint
CWU = Crop water use (m³)
Yield = Grain yield (Mg)

ค่า F_{CO_2} เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนสุทธิ (NEE) มีความสัมพันธ์กับค่าผลผลิตปฐมภูมิรวมระบบนิเวศ (GPP) และค่าการหายใจของระบบนิเวศ (Re) ดังแสดงในสมการข้างล่าง

$$NEE = Re - GPP \quad (4)$$

$$NEP = GPP - Re \quad (5)$$

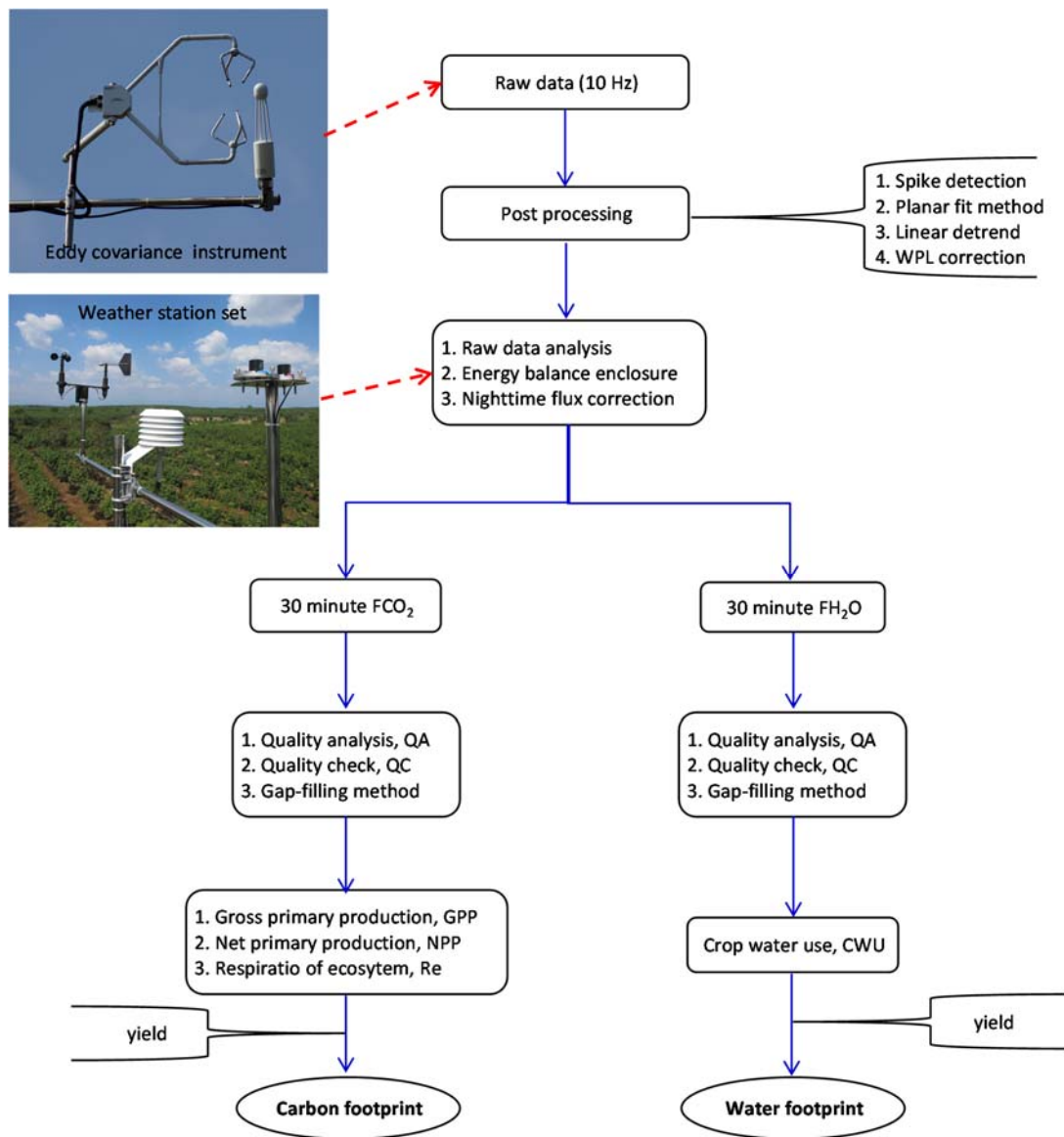
ดังนั้น

$$NEE = - NEP \quad (6)$$

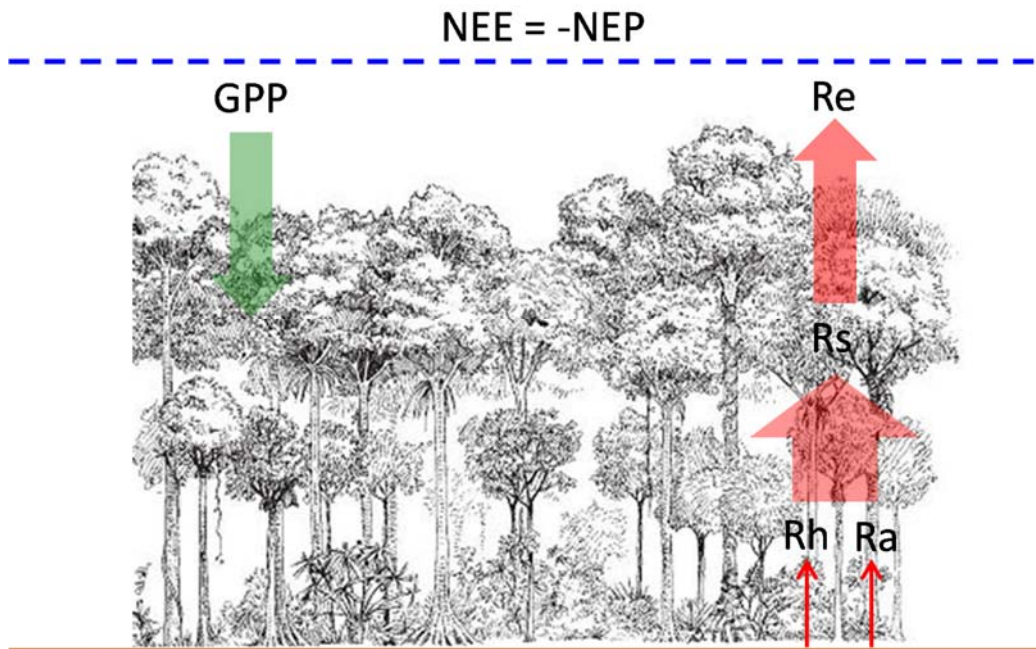
ค่าการหายใจของระบบนิเวศ (R_e) เป็นผลรวมของการหายใจรวมทั้งหมดของพืช (R_a) และส่วนที่ไม่ใช่พืช (R_h) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมาจากดินอันเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุภายในดิน

$$Re = Ra + Rh \quad (7)$$

$$NEP = NPP - Rh \quad (8)$$



รูปผนวกที่ 2 ขั้นตอนการคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (flux of CO₂ และ H₂O) และค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์



รูปผนวกที่ 3 การหายใจในระบบนิเวศของพื้นที่ปลูกพืช

2.3 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ

ชุดตรวจวัดสภาพภูมิอากาศถูกติดตั้งบนหอคอยของทั้งสองพื้นที่ศึกษา เป็นระบบที่เก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger) รุ่น CR10X (Campbell Scientific, Inc., USA) ข้อมูลที่จะจัดเก็บมี ประกอบด้วย (1) อุณหภูมิของอากาศ และ (2) ความชื้นสัมพัทธ์ ด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ รุ่น HMP45C (Vaisala, Inc., USA) (3) ปริมาณน้ำฝน ด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน (Rain Gage, dia. = 6 นิ้ว) (4) ทิศทางและความเร็วลม ด้วยเครื่องวัดทิศทางและความเร็วลม รุ่น Wind Sentry Anemometer (Campbell Scientific, Inc., USA) (5) ปริมาณแสงอาทิตย์ในลักษณะต่างๆ ได้แก่ Net Radiometer รุ่น NR-life, Short-Long Wave รุ่น CNR1, Pyranometer รุ่น LI-200SA และ Quantum Sensor รุ่น LI190SA (LI-COR Inc., USA) อุปกรณ์สำหรับวัดจุลภูมิอากาศดังกล่าวข้างต้นจะถูกเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ และเพื่อให้สามารถวัดค่าและบันทึกข้อมูลเก็บไว้ทุก 30 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง (รูปที่ 2-5) นักวิจัยจะดาวน์โหลดข้อมูลจากเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติทุก 2 อาทิตย์ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ และใช้โปรแกรม LoggerNet ในการถ่ายโอนข้อมูล ข้อมูลที่ได้จะถูกเก็บไว้ในรูปของ ASCII file

ภาคผนวก จ

สมมติฐานการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์

สมมติฐานการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพาราที่เกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ และของเสียที่เกิดจากการปลูกยางพารา โดยวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลแบบ Gate to Gate ที่ใช้ที่ใช้สำหรับจัดทำฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อมฯ และบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมฯ โดยเฉลี่ยของการปลูกยางพารา และของเสีย ที่เกิดจากการปลูกยางพารา ประกอบด้วยข้อมูลจากสวนยางพารา 3 ระยะหลัก ได้แก่ การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่ การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง และการปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง โดยข้อมูลอ้างอิงจากสำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง (สกย.) จังหวัดบึงกาฬ ที่ใช้ในการคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ แสดงได้ดังตารางที่ ก-1

ตารางผนวก 4 ข้อมูลการเกษตรกรรมสวนยางพาราของพื้นที่ จังหวัดบึงกาฬ

สาขาเข้า	หน่วย	ปริมาณ	สาขาออก	หน่วย	ปริมาณ
การเตรียมการเพาะปลูกและการปรับพื้นที่			น้ำยางพารา	กิโลกรัม	8880
น้ำมันดีเซล	ลิตร	3			
น้ำมันเครื่อง	ลิตร	1			
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนกรีดยาง (1-6 ปี)					
ต้นกล้ายางพารา	ต้น	90			
น้ำมันดีเซล	ลิตร	7			
ปุ๋ยสูตร 20-10-12	กิโลกรัม	250			
ไกลโฟเซต 48%	กิโลกรัม	7			
การปลูกและบำรุงรักษาหลังกรีดยาง (7-25 ปี)					
น้ำมันดีเซล	ลิตร	18			
ปุ๋ยสูตร 30-5-18	กิโลกรัม	1368			
พาราควอท	กิโลกรัม	18			

หมายเหตุ น้ำยางพารามี %DRC = 30

ที่มา: สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง (สกย.) จังหวัดบึงกาฬ, (2556)

นอกจากนี้การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ด้วยทฤษฎีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) ยังคำนึงถึงการได้มาซึ่งวัตถุดิบ หมายรวมถึงการขนส่งวัตถุดิบ สารเคมี และปุ๋ย มายังพื้นที่ที่มีการเกษตรกรรม จากการศึกษาของ ณิชา สุโขดมโชติ (2556)¹ ที่ได้มีการสำรวจข้อมูลจากชาวสวนยางพารา พบว่าชาวสวนยางพาราจะมีการสั่งซื้อวัตถุดิบต่างๆ ที่ใช้ในการเกษตรกรรมอยู่ในระยะรัศมี 50 กิโลเมตร จากพื้นที่สวนยางพารา ในการศึกษาจึงได้ตั้งสมมติฐานการขนส่งให้มีระยะการขนส่งวัตถุดิบอยู่ที่ 50 กิโลเมตร สำหรับรายการวัตถุดิบที่ไม่สามารถสืบค้นข้อมูลได้

¹ ณิชา สุโขดมโชติ (2556). การประเมินวัฏจักรชีวิตและประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์ไม้ยางพาราในประเทศไทย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มลสารต่าง ๆ ที่เกิดจากการเขตรกรรมของสวนยางพารา เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้คำนวณมลสารต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ได้แก่ มลสารทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง และมลสารทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการใช้ปุ๋ย โดยวิธีการคำนวณ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การคำนวณมลสารจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องจักรกลการเกษตรที่เคลื่อนที่ใช้งาน
ประมาณค่าจากสมการ

$$E_{\text{pollutant}} = FC_{\text{fuel type}} \times EF_{\text{pollutant, fuel type}} \quad (\text{ก-1})$$

เมื่อ $E_{\text{pollutant}}$ คือ ปริมาณมลสาร
 $FC_{\text{fuel type}}$ คือ ปริมาณเชื้อเพลิง
 $EF_{\text{pollutant, fuel type}}$ คือ Emission factor ตามชนิดมลสาร ชนิดเชื้อเพลิง และชนิดของระบบการเผาไหม้ (ดีเซล, เบนซินเครื่องยนต์สองจังหวะ, เบนซินเครื่องยนต์สี่จังหวะ)

แก๊สเรือนกระจก CO_2 , CH_4 , N_2O : ใช้วิธีการของ IPCC volume 2 (Energy), Chapter 3 (Mobile combustion) Tier 1 ดังภาพที่ ก - 1

TABLE 3.3.1 DEFAULT EMISSION FACTORS FOR OFF-ROAD MOBILE SOURCES AND MACHINERY ^(a)									
Off-Road Source	CO_2			$\text{CH}_4^{(b)}$			$\text{N}_2\text{O}^{(c)}$		
	Default (kg/TJ)	Lower	Upper	Default (kg/TJ)	Lower	Upper	Default (kg/TJ)	Lower	Upper
Diesel									
Agriculture	74 100	72 600	74 800	4.15	1.67	10.4	28.6	14.3	85.8
Forestry	74 100	72 600	74 800	4.15	1.67	10.4	28.6	14.3	85.8
Industry	74 100	72 600	74 800	4.15	1.67	10.4	28.6	14.3	85.8
Household	74 100	72 600	74 800	4.15	1.67	10.4	28.6	14.3	85.8
Motor Gasoline 4-stroke									
Agriculture	69 300	67 500	73 000	80	32	200	2	1	6
Forestry	69 300	67 500	73 000						
Industry	69 300	67 500	73 000	50	20	125	2	1	6
Household	69 300	67 500	73 000	120	48	300	2	1	6
Motor Gasoline 2-Stroke									
Agriculture	69 300	67 500	73 000	140	56	350	0.4	0.2	1.2
Forestry	69 300	67 500	73 000	170	68	425	0.4	0.2	1.2
Industry	69 300	67 500	73 000	130	52	325	0.4	0.2	1.2
Household	69 300	67 500	73 000	180	72	450	0.4	0.2	1.2

รูปที่ 4

Emission factors for off-road mobile sources and machinery
ที่มา: Intergovernmental Panel on climate Change (IPCC) (2006)

สำหรับผลสารจากปุ๋ยเคมี คำนวณปริมาณธาตุอาหารที่มีอยู่ในปุ๋ยเคมีที่มีสูตรเป็น $a-y-c$ ใช้ d kg จะได้ว่ามีไนโตรเจนอยู่ $a/100 * d$ kg มี P_2O_5 อยู่ $y/100 * d$ kg มี K_2O อยู่ $c/100 * d$ kg และเมื่อทราบปริมาณไนโตรเจนในปุ๋ย คำนวณปริมาณ N_2O โดยใช้วิธีการของ IPCC, volume 4, บทที่ 11 ไนโตรเจนร้อยละ 1 ของไนโตรเจนทั้งหมดในปุ๋ยจะกลายเป็น N_2O ซึ่ง N_2 28 kg จะทำให้เกิด N_2O 44 kg สมการคำนวณปริมาณ N_2O คือ

$$N_2O \text{ (kg)} = \text{น้ำหนักไนโตรเจน (kg)} \times 1/100 \times 44/28 \quad (\text{ค-2})$$

ภาคผนวก จ

Verification Sheet แปลงยางพารา จังหวัดบึงกาฬ

1	ชื่อฟอร์ม	รายละเอียดของผลิตภัณฑ์	รหัสฟอร์ม	Fr-01
	เขียนที่	สวนยางพารา อำเภอปากคาด จังหวัดบึงกาฬ		
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำยางพาราสด (นน.แห้ง)		



ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Thai)	น้ำยางพาราสด (นน.แห้ง)
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Eng)	Fresh Latex (dry weight)
ขอบเขตของการประเมิน	B2B
หน่วยการทำงาน (Thai)	1 กิโลกรัม
หน่วยการทำงาน (Eng)	1 kg

การแสดงผลของปริมาณและข้อมูลเพิ่มเติม

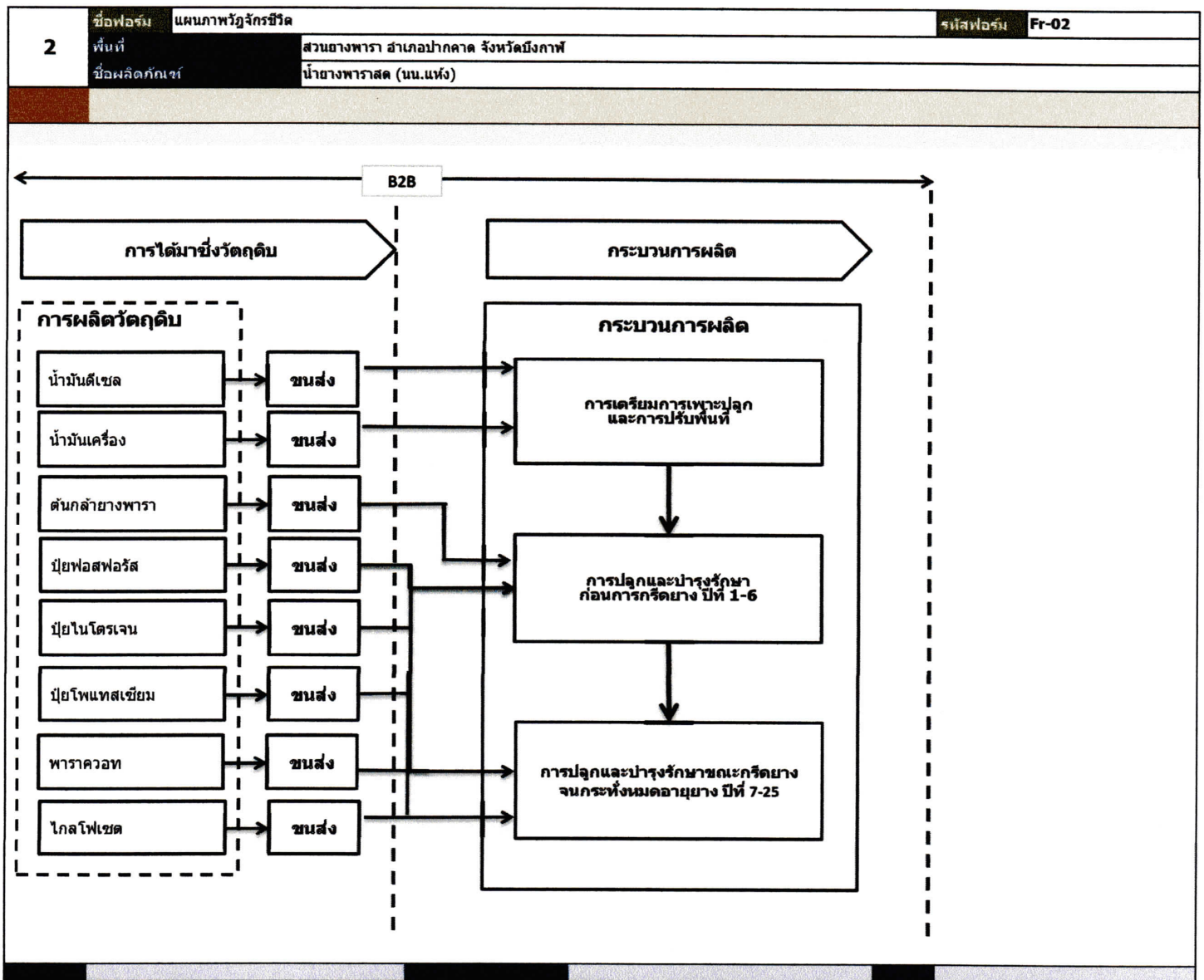


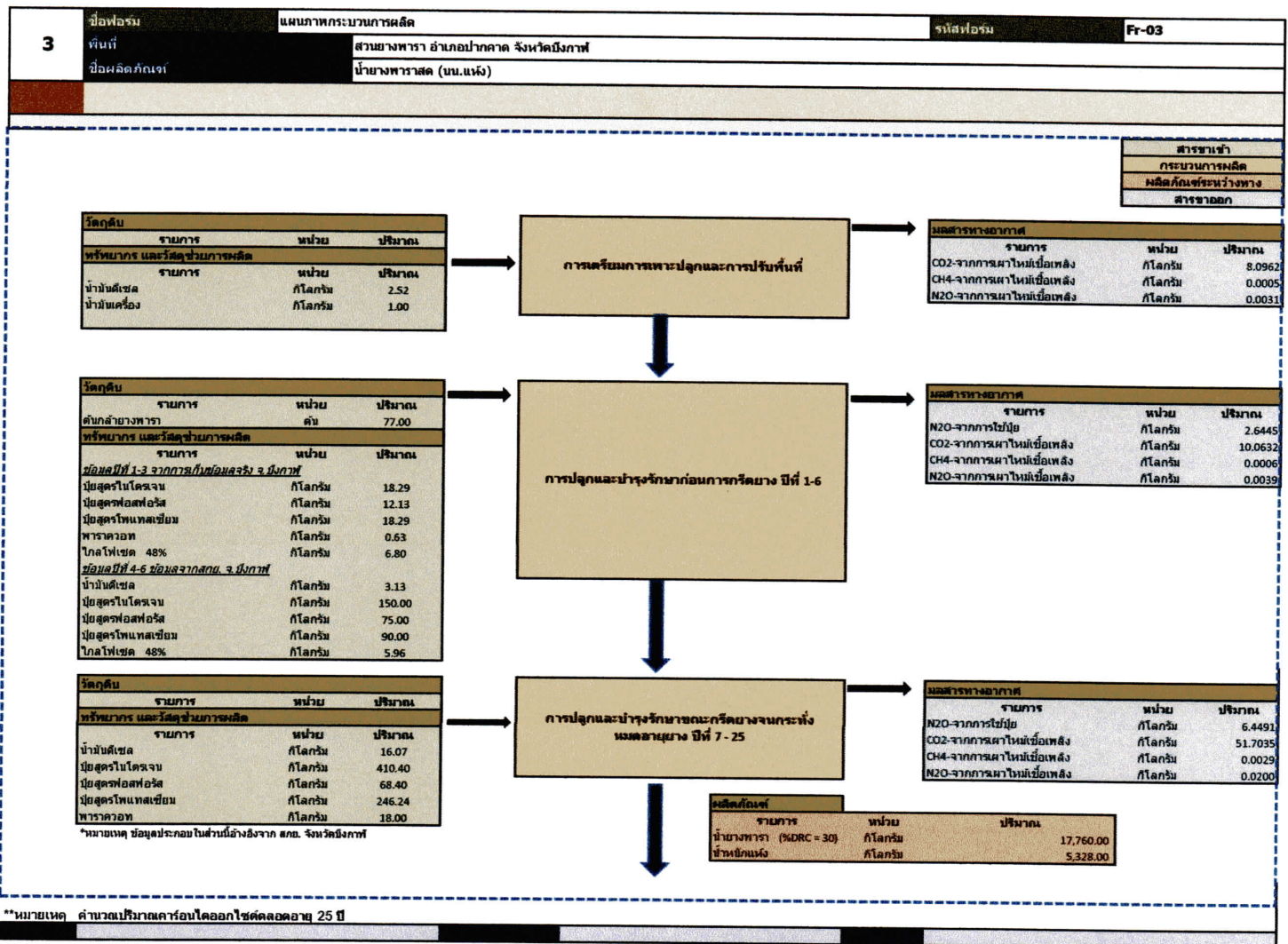
455 g CO₂e.

กราฟแท่งแสดงการปล่อย GHG แต่ละเฟส



Phase	GHG Emissions (g CO ₂ e)
Phase 1	1.77
Phase 2	220.43
Phase 3	233.10





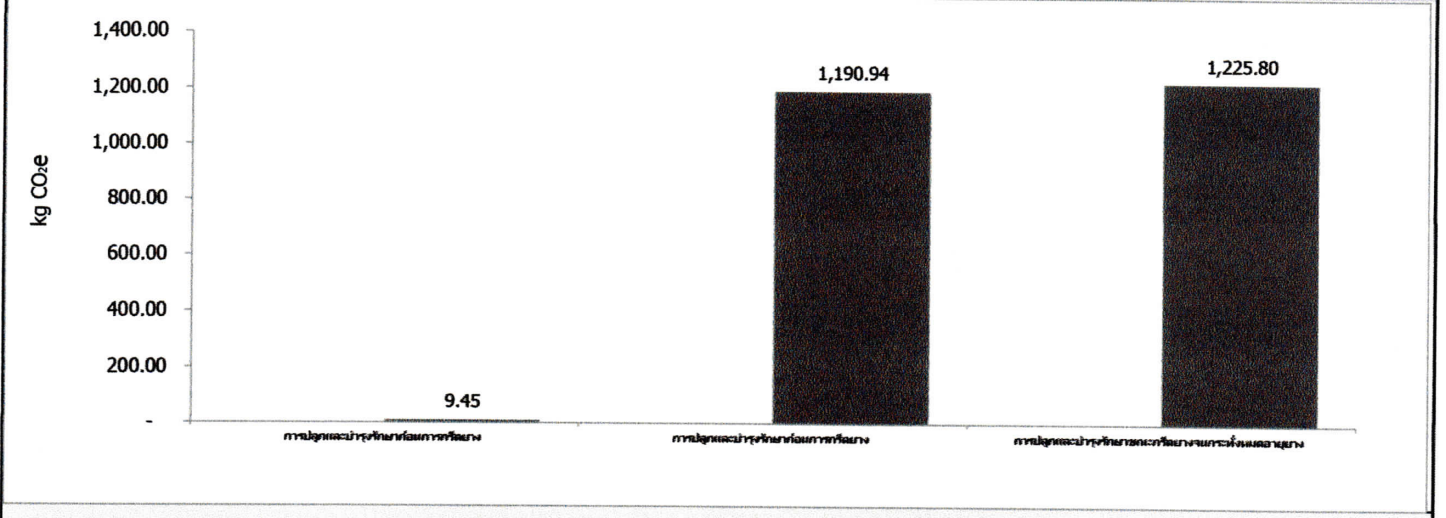
**หมายเหตุ คำนวณปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดอายุ 25 ปี

[illegible]

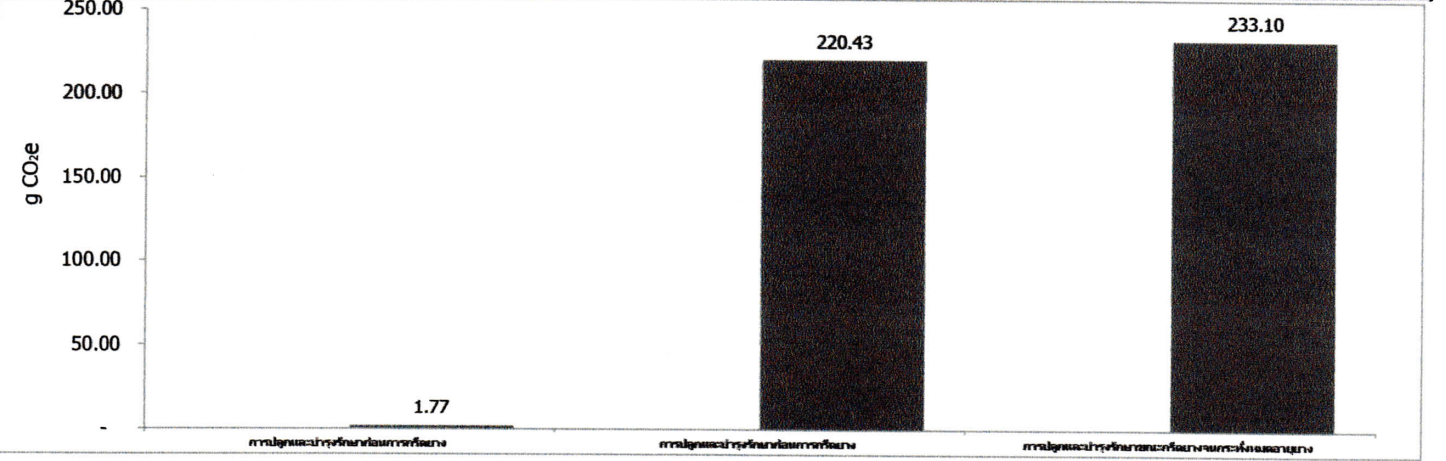
[illegible]

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

ช่วงวัฏจักรชีวิต	การปล่อย GHG ของการได้มาและการใช้ ประโยชน์ วัตถุดิบ พลังงาน 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	9,3939	0.0582	9,4521	0.39
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	1,166.7363	24.2029	1,190.9392	49.09
การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง	1,194.8250	30.9781	1,225.8031	50.52
รวม	2,370.96	55.239	2,426.19	100.00



ช่วงวัฏจักรชีวิต	การปล่อย GHG ของการได้มาและการใช้ ประโยชน์ วัตถุดิบ พลังงาน และทรัพยากร (gCO ₂ eq./FU)	การปล่อย GHG ของการขนส่ง วัตถุดิบ พลังงาน และทรัพยากร (gCO ₂ eq./FU)	ผลรวม(gCO ₂ eq./FU)	สัดส่วน
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	1.76	0.01	1.77	0.39
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	218.98	1.45	220.43	48.41
การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง	224.25	8.84	233.10	51.20
รวม	445.00	10.30	455.30	100.00



Climate type 1 : Tropical Dry

unit kgCO₂/Rai/year

Regoin Northern Eastern Central North Eastern

		ก่อนการเปลี่ยนแปลง			
		ป่า	พืชล้มลุก	พืชยืนต้น	ข้าว
หลังการเปลี่ยนแปลง	ป่า	1	0	0	0
	พืชล้มลุก	2400	0	448	496
	พืชยืนต้น	1920	-496	0	49.6
	ข้าว	1920	-368	-49.6	0

Climate type 2 : Tropical Moist

unit kgCO₂/Rai/year

Regoin Southern

		ก่อนการเปลี่ยนแปลง			
		ป่า	พืชล้มลุก	พืชยืนต้น	ข้าว
หลังการเปลี่ยนแปลง	ป่า	1	0	0	0
	พืชล้มลุก	3200	0	736	768
	พืชยืนต้น	2240	-768	0	99.2
	ข้าว	2400	-656	-99.2	0

จังหวัดที่มีภูมิอากาศและพื้นที่ป่าแบบ Tropical Moist

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1 กระบี่ | 8 พัทลุง |
| 2 ชุมพร | 9 ภูเก็ต |
| 3 ตรัง | 10 ยะลา |
| 4 นครศรีธรรมราช | 11 ระนอง |
| 5 นราธิวาส | 12 สงขลา |
| 6 ปัตตานี | 13 สตูล |
| 7 พังงา | 14 สุราษฎร์ธานี |

ภาคผนวก ข

Verification Sheet แปลงยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา

1	ชื่อฟอร์ม รายละเอียดของผลิตภัณฑ์	รหัสฟอร์ม Fr-01
	พื้นที่	สวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำยางพาราสด (นน.แห้ง)

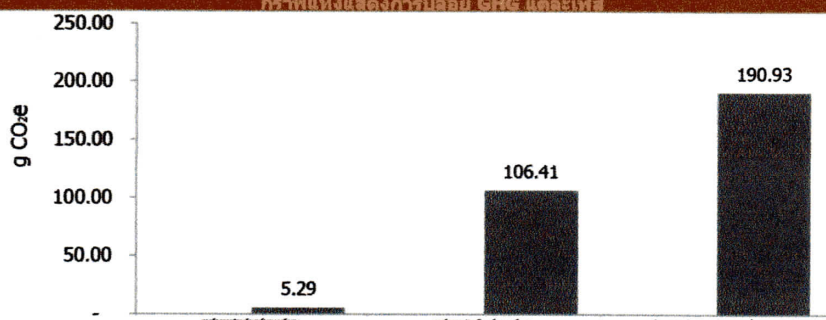


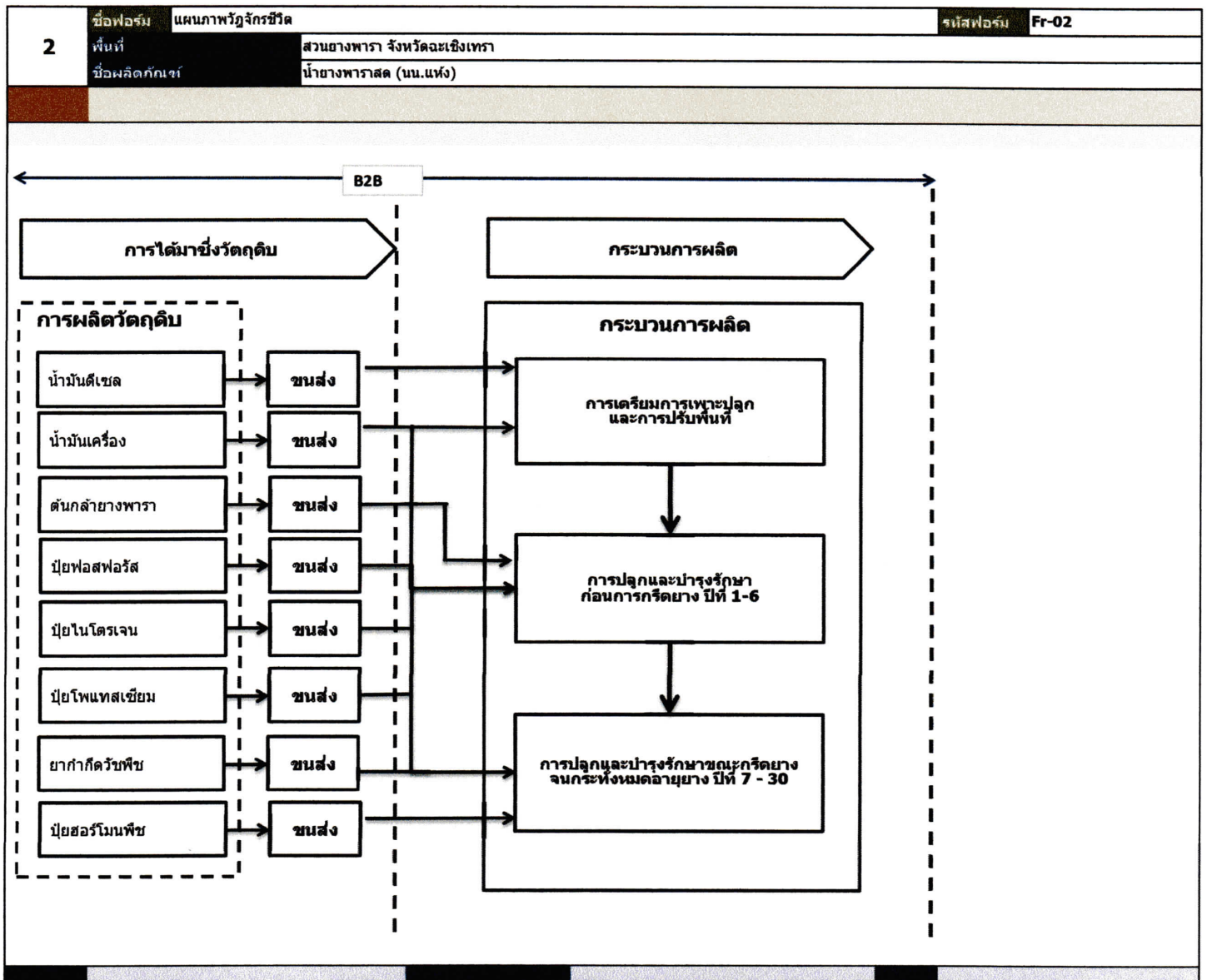
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Thai)	น้ำยางพาราสด (นน.แห้ง)
ชื่อผลิตภัณฑ์ และรุ่น (Eng)	Fresh Latex (dry weight)
ขอบเขตของการประเมิน	B2B
หน่วยการทำงาน (Thai)	1 กิโลกรัม
หน่วยการทำงาน (Eng)	1 kg

การแสดงเครื่องหมายและข้อมูลเพิ่มเติม

**303 g CO₂e.**

กราฟแท่งแสดงการปล่อย GHG แต่ละเฟส





4.1		การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัตถุดิบ														รวมทั้งหมด		Fr-04.1	
ชื่อโรงงาน		สวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา																	
วันที่		นายวงพาราผล (บม.บม.)																	
ข้อมูลผลิตภัณฑ์																			
ประเภทวัตถุดิบ	รายการ	ค่า LCI			หน่วย/ค่าของสาร LCI	ค่า EF (kgCO ₂ eq / หน่วย)	การปล่อย					การปล่อย EF	การปล่อย (%)	ค่าของ	ค่าของ (%)	ค่าของ/FU	ค่าของ (%)	ค่าของ	ค่าของ
		หน่วย	ปริมาณ	ปริมาณ/FU			Self collect	Supplier	1st	2nd	3rd								
การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัตถุดิบ	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	0.4800	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	2.7896						Ammonium sulphate, as N, at regional storehouse/	1.00	1.34	0.07	0.00	0.07	0.00	0.12%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	0.5400	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	1.6117						Diammonium phosphate, as P2O5 at regional store	1.00	0.47	0.05	0.00	0.05	0.00	0.09%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	0.4500	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	3.3780						Potassium chloride, as K2O, at regional storehouse	1.00	1.52	0.08	0.00	0.08	0.00	0.14%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	0.5235	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	0.8319						Unidentified oil, at plant/Exhaust 2.2, IPCC 2007 G	1.00	0.44	0.02	0.00	0.02	0.00	0.04%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) (ภาคใต้)	kg	4.7676	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	0.3262						Unidentified oil, at plant/Exhaust 2.2, IPCC 2007 G	1.00	1.56	0.08	0.00	0.08	0.00	0.15%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) (ภาคใต้)	kg	4.0000	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	2.7446						Unidentified oil, at plant/Exhaust 2.2, IPCC 2007 G	1.00	10.98	0.58	0.00	0.58	0.00	1.01%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	0.0075	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	298.0000						IPCC 2007	1.00	2.24	0.12	0.00	0.12	0.00	0.21%
	รวม													38.9436	1.00	0.0053	1.00		
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	73.00	0.02	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	0.1737						Ammonium sulphate, as N, at regional storehouse/	1.00	12.48	0.03	0.00	0.03	0.00	1.17%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	61.56	0.02	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	2.7896						Diammonium phosphate, as P2O5 at regional store	1.00	171.77	0.45	0.00	0.45	0.00	15.85%
การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัตถุดิบ	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	30.36	0.01	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	1.6117						Diammonium phosphate, as P2O5 at regional store	1.00	48.50	0.13	0.01	0.13	0.01	4.52%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	36.00	0.01	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	3.3780						Potassium chloride, as K2O, at regional storehouse	1.00	121.61	0.32	0.03	0.32	0.03	11.22%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) (ภาคใต้)	kg	0.86	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	2.1335						Pesticide unspecified, at regional storehouse/RER I	1.00	1.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	0.9674	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	25.0000						IPCC 2007	1.00	24.19	0.06	0.01	0.06	0.01	2.23%
	รวม													388.9754	1.00	0.1064	1.00		
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	338.10	0.09	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	0.1737						Ammonium sulphate, as N, at regional storehouse/	1.00	58.79	0.09	0.02	0.09	0.02	5.45%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	52.90	0.01	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	2.7896						Diammonium phosphate, as P2O5 at regional store	1.00	147.57	0.22	0.04	0.22	0.04	13.62%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	207.00	0.06	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	1.6117						Diammonium phosphate, as P2O5 at regional store	1.00	333.62	0.49	0.09	0.49	0.09	30.79%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) (ภาคใต้)	kg	4.57	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	2.1335						Pesticide unspecified, at regional storehouse/RER I	1.00	10.60	0.02	0.00	0.02	0.00	0.96%
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	5.313	0.00	ข้อมูลจากข้อมูลสวน	25.0000						IPCC 2007	1.00	132.83	0.19	0.04	0.19	0.04	12.25%
การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากวัตถุดิบ	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	11193.33											683.3438	1.00	0.1908	1.00		
	ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0)	kg	3581.87	1.0000										1.083.20		0.3024		0.3024	
	รวม													1.083.20		0.3024		0.3024	
	รวม													1.083.20		0.3024		0.3024	
	รวม													1.083.20		0.3024		0.3024	
	รวม													1.083.20		0.3024		0.3024	
	รวม													1.083.20		0.3024		0.3024	
	รวม													1.083.20		0.3024		0.3024	
	รวม													1.083.20		0.3024		0.3024	
	รวม													1.083.20		0.3024		0.3024	

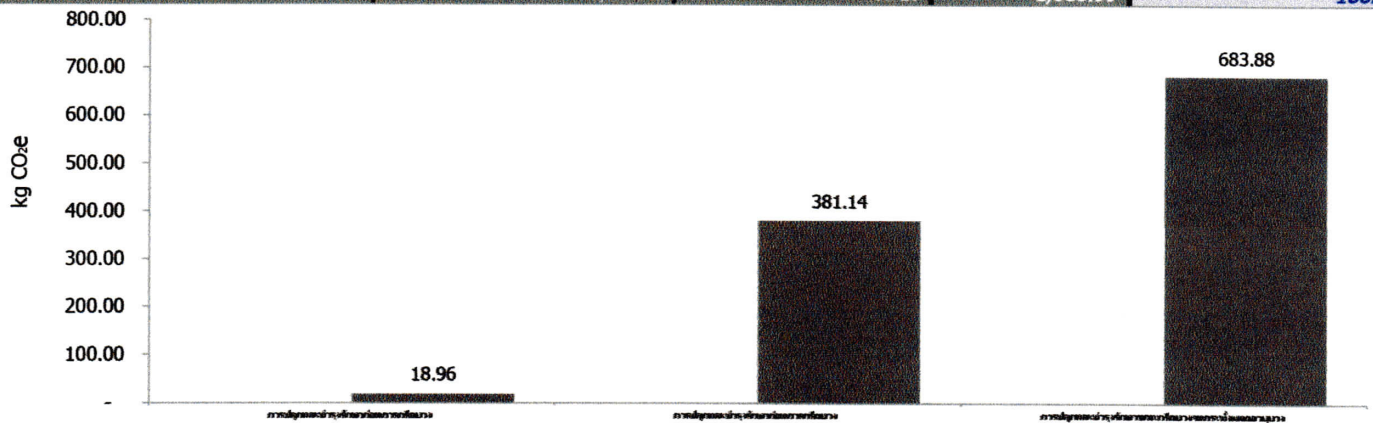
คำอธิบาย :

หากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้สำหรับการบำบัดในผู้ป่วยที่มีโรคหัวใจและหลอดเลือด (CHD) จากการศึกษาแบบสังเกตการณ์พบว่า การใช้ยาในกลุ่มนี้ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดได้ประมาณ 10-15% อย่างไรก็ตาม การใช้ยาในกลุ่มนี้ควรใช้ภายใต้การดูแลของแพทย์เท่านั้น

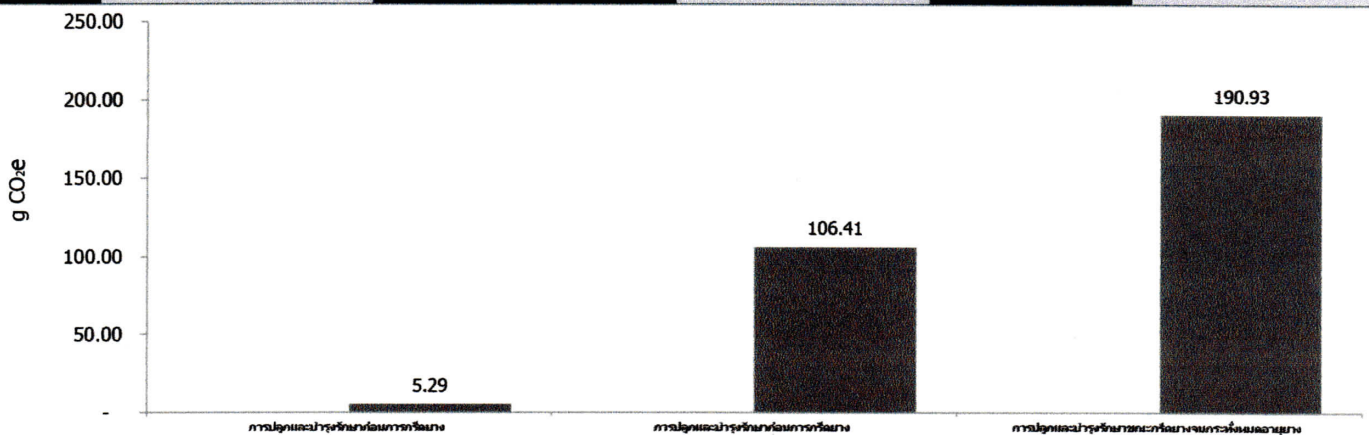
[illegible]

5	ชื่อฟอร์ม	สรุปการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์	รหัสฟอร์ม	Fr-05
	พื้นที่	สวนยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา		
	ชื่อผลิตภัณฑ์	น้ำยางพาราสด (น.น.แห้ง)		

ช่วงวัฏจักรชีวิต	การปล่อย GHG ของการไถมาและการใช้ประโยชน์ วัสดุคดทับ พลังงาน และทรัพยากร (kgCO ₂ eq./ไร่/ปี)	การปล่อย GHG ของการขนส่ง วัสดุคดทับ พลังงาน และทรัพยากร (kgCO ₂ eq./ไร่/ปี)	ผลรวม(kgCO ₂ eq./ไร่/ปี)	สัดส่วน
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	18.9430	0.0188	18.9619	1.75
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	380.9754	0.1638	381.1392	35.16
การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง	683.3438	0.5405	683.8844	63.09
รวม	1,083.26	0.723	1,083.99	100.00



ช่วงวัฏจักรชีวิต	การปล่อย GHG ของการไถมาและการใช้ประโยชน์ วัสดุคดทับ พลังงาน และทรัพยากร (gCO ₂ eq./FU)	การปล่อย GHG ของการขนส่ง วัสดุคดทับ พลังงาน และทรัพยากร (gCO ₂ eq./FU)	ผลรวม(gCO ₂ eq./FU)	สัดส่วน
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	5.2886	0.0053	5.2939	0.49
การปลูกและบำรุงรักษาก่อนการกรีดยาง	106.3623	0.0457	106.4080	9.82
การปลูกและบำรุงรักษาขณะกรีดยางจนกระทั่งหมดอายุยาง	190.7787	0.1509	190.9296	17.61
รวม	302.43	0.202	302.63	27.92



Climate type 1 : Tropical Dry

unit kgCO2/Rai/year

Regoin Northern Eastern Central North Eastern

		ก่อนการเปลี่ยนแปลง			
		ป่า	พืชล้มลุก	พืชยืนต้น	ข้าว
หลังการเปลี่ยนแปลง	ป่า	1	0	0	0
	พืชล้มลุก	2400	0	448	496
	พืชยืนต้น	1920	-496	0	49.6
	ข้าว	1920	-368	-49.6	0

Climate type 2 : Tropical Moist

unit kgCO2/Rai/year

Regoin Southern

		ก่อนการเปลี่ยนแปลง			
		ป่า	พืชล้มลุก	พืชยืนต้น	ข้าว
หลังการเปลี่ยนแปลง	ป่า	1	0	0	0
	พืชล้มลุก	3200	0	736	768
	พืชยืนต้น	2240	-768	0	99.2
	ข้าว	2400	-656	-99.2	0

จังหวัดที่มีภูมิอากาศและพื้นที่ป่าแบบ Tropical Moist

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1 กระบี่ | 8 พัทลุง |
| 2 ชุมพร | 9 ภูเก็ต |
| 3 ตรัง | 10 ยะลา |
| 4 นครศรีธรรมราช | 11 ระนอง |
| 5 นราธิวาส | 12 สงขลา |
| 6 ปัตตานี | 13 สตูล |
| 7 พังงา | 14 สุราษฎร์ธานี |

ภาคผนวก ซ

ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor)

ตารางผนวกที่ 5 ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission factor)

รายการ	ชื่อฐานข้อมูลที่ใช้	แหล่งฐานข้อมูล
สารขาเข้า		
น้ำมันดีเซล (การได้มา)	Diesel (น้ำมันดีเซล / น้ำมันโซลาร์)	Thai national database การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์
น้ำมันดีเซล (การเผาไหม้)	Gas/ Diesel Oil (พลังงานเคลื่อนที่)	Thai national database การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร
น้ำมันเครื่อง	Lubricant oil (น้ำมันเกียร์)	Thai national database Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a
ต้นกล้ายางพารา	ต้นกล้ายางพารา	วิทยานิพนธ์ ณิชชา สุโขดมโชติ, (2556)
ปุ๋ยสูตรไนโตรเจน	Ammonium sulphate, as N, at regional storehouse/RER U-TH1	Ecoinvent 2.0, IPCC 2007 GWP 100a
ปุ๋ยสูตรฟอสฟอรัส	Diammonium phosphate, as P ₂ O ₅ , at regional storehouse/RER U	Ecoinvent 2.0, IPCC 2007 GWP 100a
ปุ๋ยสูตรโพแทสเซียม	Potassium chloride, as K ₂ O, at regional storehouse/RER U	Ecoinvent 2.0, IPCC 2007 GWP 100a
พาราควอท	Pesticide unspecified, at regional storehouse/RER U	Ecoinvent 2.0, IPCC 2007 GWP 100a
ไกลโฟเซต 48%	Glyphosate, at regional storehouse/RER U	Ecoinvent 2.0, IPCC 2007 GWP 100a
รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ ขนาดเล็ก น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7 ตัน	รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ ขนาดเล็ก น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 7 ตัน	Thai national database การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์
รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 16 ตัน	รถกระบะบรรทุก 10 ล้อ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 16 ตัน	Thai national database การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์

ภาคผนวก ฅ

เอกสารอ้างอิงประกอบการวิจัย

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 bio-physical and social dimensions, it commonly focuses on bio-physical aspects with the assumption that socioeconomic 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-

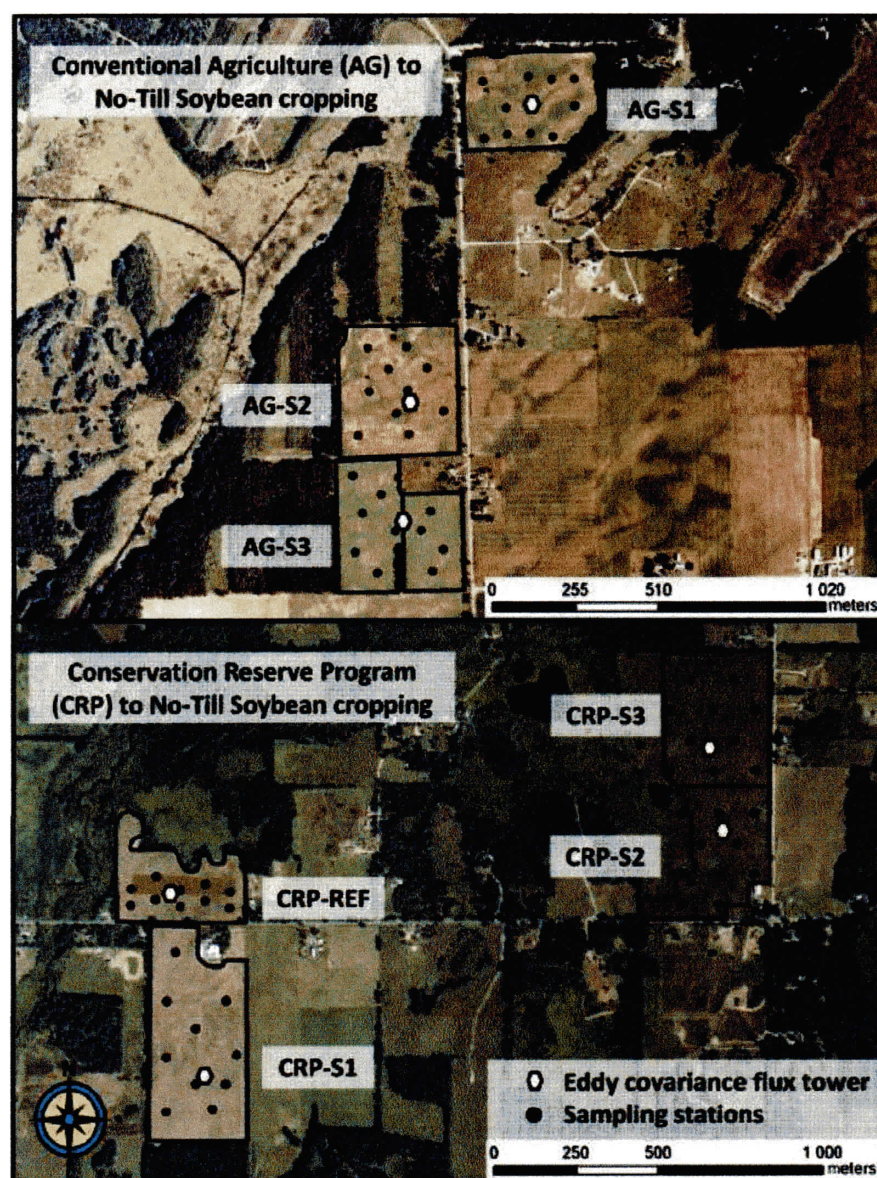


Fig. 1 Experimental layout of the sites and locations of eddy flux towers. AG-S1, -S2, and -S3 were converted from conventional agriculture to no-till soybean; CRP-S1, -S2, and -S3 were converted from Conservation Reserve Program (CRP) to no-till soybean; CRP-REF was the reference site with continued 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 H₂O 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 (Ca²⁺) (10), and Magnesium (Mg²⁺) (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⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ were extracted using 1.0 N neutral ammonium acetate. P concentrations were determined by colorimetry with a spectrophotometer (Olsen *et al.*, 1954), and K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ 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 ^{bcd†}	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.

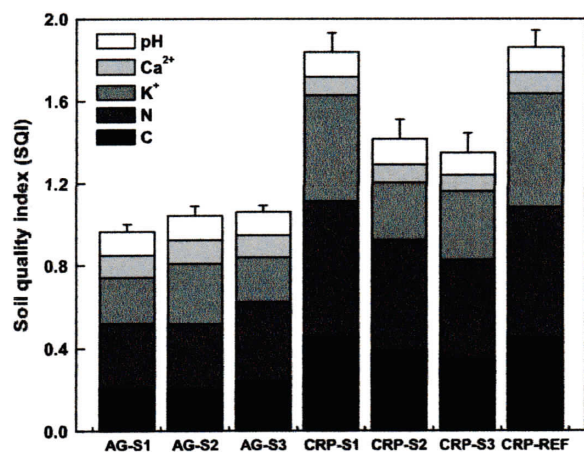


Fig. 2 Soil quality index (SQI) for the sites. Error bars indicate ± 1 SD. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

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-

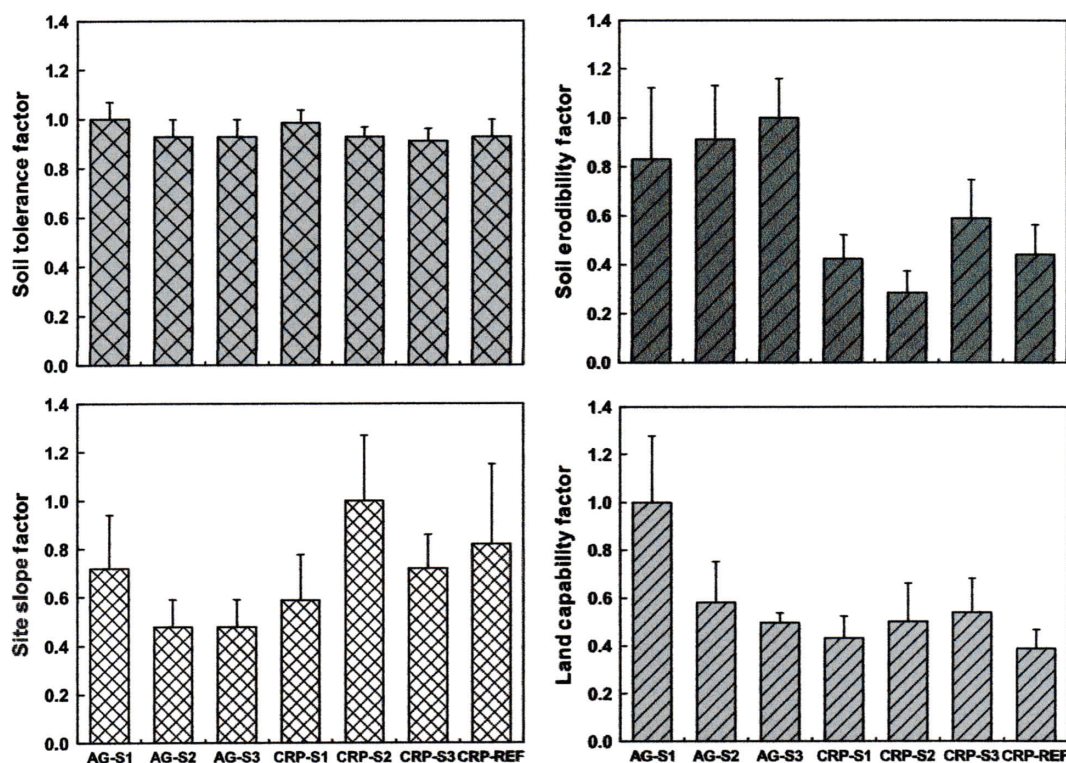


Fig. 3 Selected factors included in the land marginality index (LMI) developed for the sites. Error bars indicate ± 1 SD for soil map unit on a site. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean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

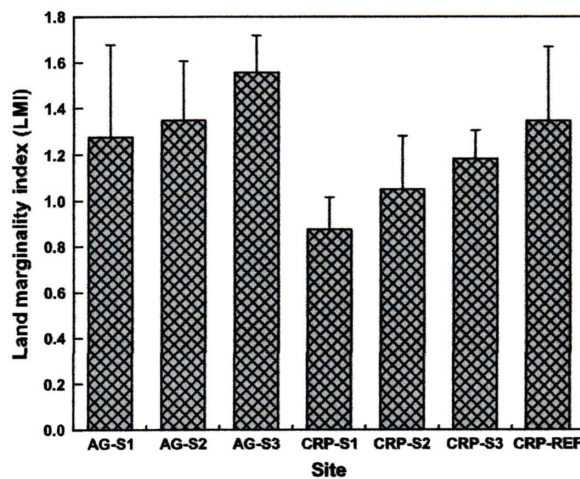


Fig. 4 Land Marginality Index (LMI) for the sites. Error bars indicate ± 1 SD for soil map unit on a site. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site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

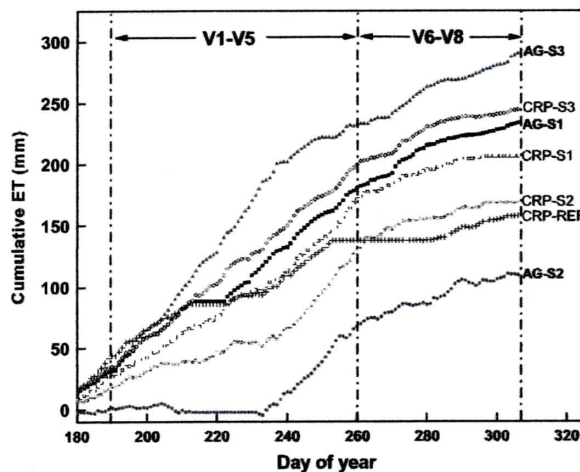


Fig. 5 Changes in cumulative evapotranspiration (ET) of soybeans over the growing period on the sites. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with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

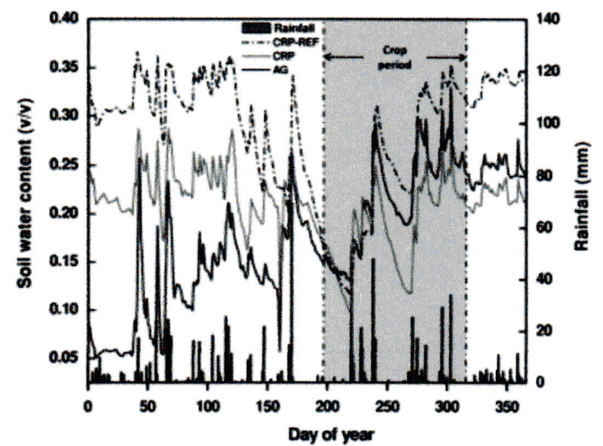


Fig. 6 Average daily soil water content for the sites based on samples taken from 0 to 0.25 m. AG-S, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

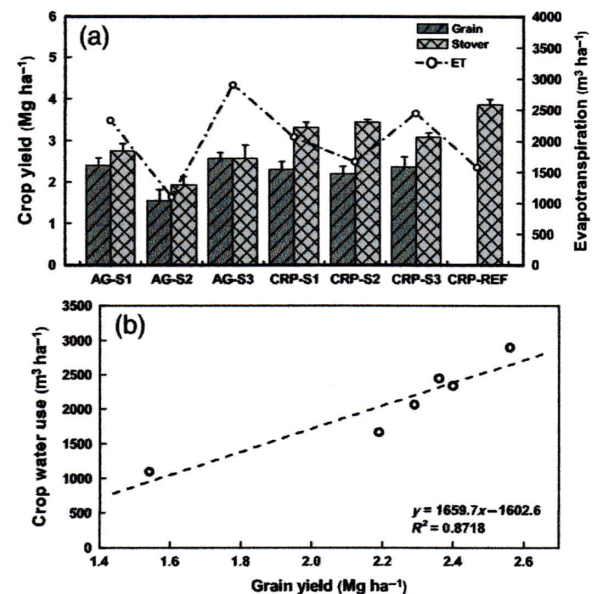


Fig. 7 Total crop water use and soybean biomass yields from the sites. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with continued CRP land use.

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

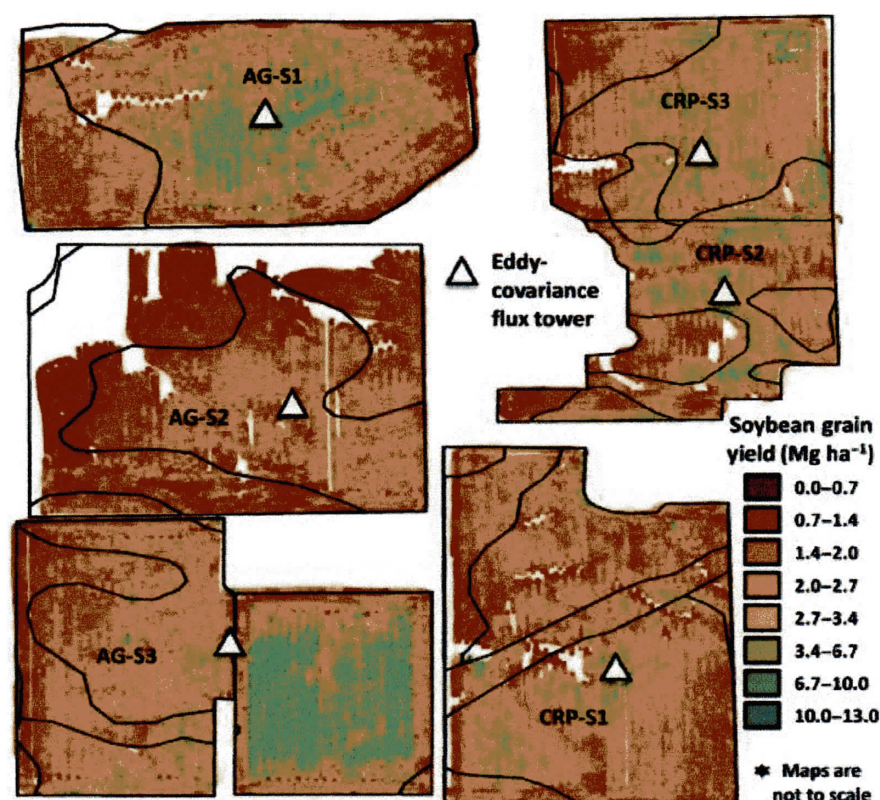


Fig. 8 Harvested soybean grain yield maps of the sites showing spatial variability of productivity. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean land use change; CRP-REF, reference site with 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

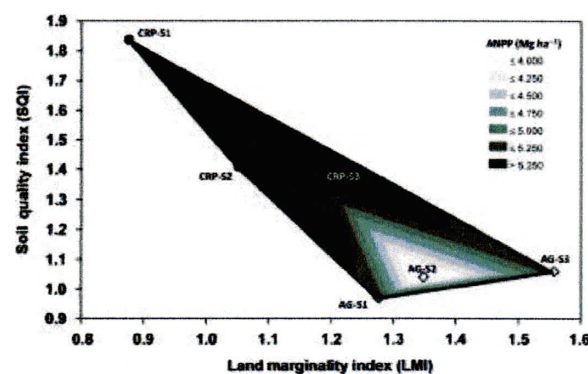


Fig. 9 Contour map of the interactions between aboveground net primary productivity (ANPP), soil quality index (SQI) and land marginality index (LMI). AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP) land to no-till soybean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

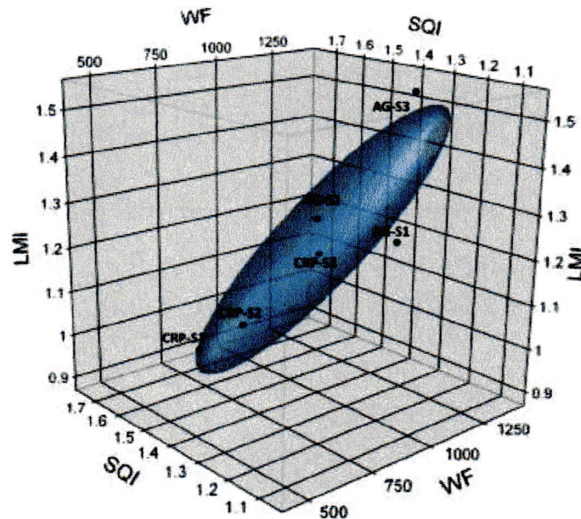


Fig. 10 Interrelationships of water footprints (WF; $\text{m}^3 \text{ Mg}^{-1}$) with the soil quality index (SQI) and Land Marginality Index (LMI) on the studied sites. AG-S1, -S2, -S3, conventional agriculture to no-till soybean land use change; CRP-S1, -S2, -S3, Conservation Reserve Program (CRP)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

ภาคผนวก ญ

ตอบข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิต่อ
ร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการ

ตอบข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิต่อร่างรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการ
“การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา”
โดยมี รศ.ดร. พูนพิภพ เกษมทรัพย์ เป็นหัวหน้าโครงการ

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ
ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)	
- หน้า 85 ควรเป็นข้อ 4.3 การคำนวณ “วอเตอร์” ฟุตพริ้นต์ - หน้า 116 ภาคผนวก กและผลที่ได้รับตลอดโครง “การ”	- ดำเนินการปรับแก้ไขแล้ว (หน้า 85) - ดำเนินการปรับแก้ไขแล้ว (หน้า 116)
ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)	
แผนงานวิจัย : การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา	
ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 1	
1. ขาดความเชื่อมโยงระหว่างการนำสมดุลคาร์บอนไปเป็นข้อมูลจัดทำ carbon footprint ของสวนยางพารา	1. สมดุลคาร์บอนเป็น 1 ในองค์ประกอบหลักของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ร่วมกับองค์ประกอบด้านการเกษตรกรรม และคาร์บอนในเนื้อยาง ในช่วงแรกนี้ การดำเนินงานวิจัยศึกษาองค์ประกอบหลักเน้นไปที่การศึกษาข้อมูลสมดุลปริมาณคาร์บอนจากพื้นที่ปลูกยางพารา ซึ่งเป็นข้อมูลในส่วนของ Upstream emissions เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญสำหรับการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ยังต้องนำไปใช้ร่วมกับข้อมูลอื่น และสมมติฐานอื่นเพื่อคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อไป
2. ความครบถ้วนของเนื้อหา 2.1 ขาดความเชื่อมโยงระหว่างการนำสมดุลคาร์บอนที่ได้จากการศึกษาในบทที่ 2 (ข้อ 2.5) ไปต่อเชื่อมกับบทที่ 3 การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ 2.2 มีการทำสมดุลน้ำ แต่ไม่ได้คำนวณต่อเป็น water footprint (บทที่ 4 หน้า 85 ไม่ใช้การคำนวณ water footprint	2.1 การดำเนินงานวิจัยสมดุลคาร์บอนที่ได้จากการศึกษาในบทที่ 2 (ข้อ 2.5) แสดงว่าองค์ประกอบสมดุลการตรึงคาร์บอนสุทธิโดยพื้นที่ปลูกยางพาราที่มะเขิงเทรา (-1351 kg C.ra ⁻¹) มีค่ามากกว่า องค์ประกอบสมดุลการปล่อยคาร์บอนสุทธิที่เกิดจากการเกษตรกรรมในบทที่ 3 (9 kg C.ra ⁻¹) อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ในขณะที่สวนยางพาราที่บึงกาฬที่แม้จะมีอายุน้อยยังไม่เปิดกรีดแต่ก็มีข้อมูลสมดุลคาร์บอนในทิศทางเดียวกัน จึงน่าจะเป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำไปใช้ประกอบให้สามารถให้คำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ได้ต่อไปในอนาคต 2.2 วอเตอร์ฟุตพริ้นต์ที่คำนวณได้จากการทดลองนี้ คือ วอเตอร์ฟุตพริ้นต์สีเขียว (green water footprint) ซึ่งคือปริมาณน้ำที่อยู่ในรูปความชื้นดินที่ถูกใช้ไปในการผลิตน้ำยางในหน่วยลูกบาศก์

	เมตรต่อผลผลิตน้ำยาง 1 กิโลกรัม (Hoekstra et al., 2011) และนักวิจัยอ้างอิงผลงานตีพิมพ์ของ (Bhardwaj et al. 2011, เอกสารแนบ) ซึ่งใช้เทคนิค Eddy covariance ในการตรวจวัด crop water use อนึ่ง นักวิจัยสามารถศึกษา grey water footprint ได้ หากได้รับการสนับสนุนให้ศึกษาในปีต่อ ๆ ไป
3. ควรมีการเพิ่มข้อเสนอแนะเชิงนโยบายว่าจะสามารถนำผลการศึกษาไปใช้ได้ อย่างไรบ้าง เพราะการอภิปรายผลและข้อเสนอแนะในรายงานอยู่ในรูปของการ วิเคราะห์ข้อมูลทางเทคนิคเท่านั้น	3. ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายที่สำคัญ ได้แก่ <i>คาร์บอนฟุตพริ้นท์</i> : วัตถุดิบยางธรรมชาติ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ายางสังเคราะห์ ด้วยต้นยางพารา ตรึงคาร์บอนจำนวนมหาศาลไว้ในส่วนต่าง ๆ ของต้น ดิน และผลิตภัณฑ์ (ไม้ยาง ยาง) ตัวอย่างเช่น คาร์บอนที่สวนยางพาราอายุ 18 ปีที่ฉะเชิงเทราตรึงไว้ในแต่ละปีมีมากกว่าคาร์บอนที่ปลดปล่อยออกมาจาก กระบวนการเขตกรรมถึง 150 เท่า ($-1351 \text{ kg C ra}^{-1}\text{yr}^{-1}$ เทียบกับ $9 \text{ kg C ra}^{-1}\text{yr}^{-1}$) ซึ่งคิดเป็น carbon footprint ในองค์ประกอบของการตรึงคาร์บอนสุทธิโดยสวนยางพาราประมาณ $-30.8 \text{ kg CO}_2 \text{ e kg}^{-1}$ (ตรึง สุทธิ) และในองค์ประกอบของการปลดปล่อยจากการเขตกรรมประมาณ $+0.205 \text{ kg CO}_2 \text{ e kg}^{-1}$ (ปล่อย สุทธิ) (ประเมินที่ผลผลิตยางพารา $161 \text{ kg ra}^{-1}\text{yr}^{-1}$) ดังนั้น การนำเสนอข้อมูลผลการศึกษามูลค่าคาร์บอน ของสวนยางที่เชื่อถือได้และมีพื้นฐานสนับสนุนทางวิทยาศาสตร์จะช่วยให้ยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์มี ข้อได้เปรียบทางการแข่งขัน เป็นประโยชน์ต่อประเทศไทยซึ่งเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ของโลก ด้วยในวันนี้ ข้อได้เปรียบนี้ยังไม่ได้ถูกใช้ให้เป็นประโยชน์ เพราะการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในปัจจุบันมุ่ง คิดเพียงเฉพาะแต่การปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการต่าง ๆ ในการผลิตยาง จึงทำให้ Emission factor ของยางธรรมชาติ คือ $0.1887\text{-}0.6160 \text{ kg CO}_2 \text{ e kg}^{-1}$ ในขณะที่ค่าของยางสังเคราะห์คือ $0.589\text{-}2.17 \text{ kg CO}_2 \text{ e kg}^{-1}$ (คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ 2552) <i>วอเตอร์ฟุตพริ้นท์</i> : การประเมินองค์ประกอบของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์จาก crop water use ในปัจจุบันทำได้ โดยใช้ simulation model ซึ่งมีข้อสมมุติที่ยังไม่น่าเชื่อถือหลายข้อ เช่น ค่า crop coefficient และ ระยะเวลาความยาวนานของช่วงการเจริญเติบโตแต่ละช่วงของต้นยางพาราใน 1 ปี อีกทั้งยังขาดองค์ความรู้ เรื่องอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อ crop water use ด้วย ผลการศึกษานี้ จะให้ข้อมูลค่า crop coefficient ระยะเวลาความยาวนานของช่วงการ

	เจริญเติบโตแต่ละช่วงของต้นยางพาราใน 1 ปี องค์ความรู้เรื่องอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อ crop water use ที่มีความน่าเชื่อถือ และเป็นข้อมูลจริงของประเทศไทยที่สามารถนำไปใช้ใน simulation model เพื่อพยากรณ์สมดุลคาร์บอนและน้ำ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความสามารถในการสร้างชีวมวล ความต้องการใช้น้ำของยางพารา และผลกระทบของสภาวะโลกร้อนต่อยางพารา ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะช่วยให้การตัดสินใจเกี่ยวกับการเกษตรกรรมมีประสิทธิภาพ สามารถจัดการการผลิตและจัดเขตพื้นที่ปลูกยางพาราได้ดีมากยิ่งขึ้น อันจะเป็นประโยชน์ทั้งในระดับเกษตรกรและระดับนโยบายต่อไป
4. ผลงานวิจัยมีแนวโน้มว่าจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ แต่จำกัด เนื่องจากเป็นการเก็บข้อมูลเฉพาะที่ เฉพาะเวลา จึงยังไม่สามารถเป็นข้อมูลตัวแทนทั้งหมดได้	4. ด้วยพื้นที่ปลูกยางพาราของประเทศไทย มีกระจายอยู่ในทุกภาค มีพื้นที่รวมกันมากกว่า 18 ล้านไร่ จึงเป็นไปได้ที่จะเก็บข้อมูลได้ทุกแปลง ดังนั้น ในทางปฏิบัติ จึงควรศึกษาอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อจะได้ข้อมูลพื้นฐานสำคัญ สามารถนำไปใช้สร้าง simulation model และ/หรือให้ parameters สำคัญที่ใช้อยู่ใน existing models เพื่อสามารถนำไปใช้ประเมินและคาดการณ์ในสถานที่และช่วงเวลาอื่นได้ แต่ทั้งนี้ จำเป็นที่จะต้องศึกษาในพื้นที่หลาย site และหลายอายุ เพื่อให้ได้ข้อมูลตัวแทนที่ครอบคลุม เช่น ในพื้นที่ที่มี ecological zone หนึ่ง ควรมีข้อมูลจากสวนยางหลากหลายอายุ ตั้งแต่ต้นอายุน้อยที่เริ่มปลูก ก่อนกรีด เริ่มกรีด กรีดไปนานระยะหนึ่ง และก่อนตัดโค่นเพื่อปลูกใหม่ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประเมินสมดุลคาร์บอนและน้ำได้ครอบคลุมตลอดอายุปลูกได้โดยมีความมั่นใจ นักวิจัยเห็นด้วยที่การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำและอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำในโครงการนี้ ยังไม่สามารถได้ข้อมูลที่เป็นตัวแทนทั้งหมดได้ แต่ก็ข้อมูลชุดแรกและยังคงเป็นข้อมูลชุดเดียวของประเทศไทยในขณะนี้ ด้วยยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ ทำรายได้เลี้ยงประชาชนไทย 6-7 ล้านคน จึงควรที่จะศึกษาใน ecological zone ต่าง ๆ อย่างน้อยที่สุดควรมีการศึกษาในแต่ละภาค-ทุกภาค และในแต่ละ zone/ภาค นั้นควรมีการศึกษา 3 ช่วงอายุเป็นอย่างน้อย
<u>ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 2</u> 1. ขอให้ตรวจสอบ 1.1 หน่วยที่ใช้ให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกัน 1.2 การตรวจสอบสมการที่นำเสนอในรายงาน 1.3 ตรวจสอบคำผิด	1. ได้ตรวจสอบและแก้ไขตามคำแนะนำแล้ว

1.4 ตรวจสอบการอ้างอิงตารางและรูปภาพ 2. ควรวิเคราะห์และให้เหตุผลเพิ่มเติมในเรื่องอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำ เนื่องจากผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลของ 2 site ไม่เหมือนกัน 3. ควรตรวจสอบปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนของ site ที่ 2 ถ้าไม่ถูกต้องให้แก้ไขข้อมูลในรายงานทั้งหมดให้ถูกต้องด้วย 4. ควรนำข้อมูล soil water content เข้ามาวิเคราะห์ด้วย 5. ผลงานวิจัยมีแนวโน้มว่าจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยใช้ในการปรับปรุงโมเดล	2. ได้มีการวิเคราะห์และให้เหตุผลเพิ่มเติมในเรื่องอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำไว้แล้วในบทที่ 5 ซึ่งทำได้ในระดับหนึ่ง ทีมผู้วิจัยจะได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบให้ละเอียดยิ่งขึ้นในลำดับต่อไป 3. ได้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลตามคำแนะนำแล้ว 4. ผลการวิเคราะห์ขั้นต้นยังไม่สามารถสรุปทิศทางได้แน่ชัด เมื่อได้ข้อมูลครบ 2 ปี จะได้นำมาวิเคราะห์ร่วมกันกับข้อมูลสภาพแวดล้อมทั้งหมดโดยละเอียดขึ้นต่อไป 5. ขอขอบคุณครับ
<u>ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 3</u> 1. ควรตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและการวิเคราะห์ที่ขัดแย้งกับทฤษฎี โดยเฉพาะสมบัติของดินในตารางที่ 2-1 (หน้าที่ 10)	เนื่องจากช่องว่าง (porosity) ของดินสัมพันธ์กับ 2 สมบัติ คือ เนื้อดินและโครงสร้างดิน ดินที่ปริมาณดินเหนียวสูงอาจมีช่องว่างน้อย ถ้าดินนั้นไม่มีโครงสร้างหรือมีการพัฒนาโครงสร้างต่ำกว่าอีกดินหนึ่ง จากข้อมูลความหนาแน่นดินรวมของแปลงบึงกาฬมีความหนาแน่นดินรวมต่ำกว่าแปลงฉะเชิงเทราชัดเจน แสดงให้เห็นว่าดินจากแปลงปลูกยางพาราที่บึงกาฬมีโครงสร้างที่จัดเรียงแล้วทำให้เกิดช่องว่างปริมาณมากกว่าดินจากแปลงปลูกยางพาราที่ฉะเชิงเทรา จากการตรวจสอบคำบรรยายหน้าตัดดินจากกรมพัฒนาที่ดิน (กิตติ และคณะ, 2547) พบว่าชุดดินโพธิ์ชัยซึ่งเป็นดินที่ทำการวิเคราะห์ในแปลงบึงกาฬมีโครงสร้างดินบนเป็นแบบเม็ดก้อนกลม (granular structure) ขนาดเล็ก ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างดินเฉพาะของดินพัฒนาการสูงมาก โครงสร้างนี้ทำให้ดินมีขนาดช่องว่างดินส่วนใหญ่เป็นแบบช่องขนาดใหญ่ (Macropores) ที่อยู่ระหว่างเม็ดดิน และจะมีช่องขนาดเล็กมากๆ (Cryptopores) ปริมาณมากภายในด้วย ทั้ง 2 ช่องว่างดังกล่าวทำให้ดินโพธิ์ชัยมีช่องว่างรวมสูงกว่าดินจากแปลงฉะเชิงเทราซึ่งมีโครงสร้างแบบก้อนเหลี่ยม ดังนั้นการที่ดินจากบึงกาฬมีปริมาณช่องว่างมากกว่าทั้งๆ ที่มีปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าดินจากฉะเชิงเทรา เนื่องจากโครงสร้างดินที่จัดเรียงตัวให้มีช่องว่างรวมปริมาณมากกว่าดินจากฉะเชิงเทรา จะเห็นได้ว่าการจัดเรียงตัวของโครงสร้างมีผลมากต่อปริมาณช่องว่างโดยเฉพาะดินที่พัฒนาการสูง นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณช่องว่างในดินจาก 2 พื้นที่ พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %Clay ที่ความลึกจากผิวดินระดับ 0-10 ซม. มีค่าไม่แตกต่างกันระหว่าง 2 Site ที่ศึกษา แต่ค่าเฉลี่ยของ %OM

2. ต้องมีการสังเคราะห์บทสรุปและข้อเสนอแนะของทุกโครงการย่อย 3. ต้องมีข้อเสนอแนะในการนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อกำหนดเป็นนโยบายและแผนการจัดการ	ของ site ที่ฉะเชิงเทรามีปริมาณสูงกว่าบึงกาฬ ($P<0.05$) แต่ค่าเฉลี่ย porosity ของ site ที่ฉะเชิงเทราก็มีค่าต่ำกว่าบึงกาฬ ($P<0.05$) และที่ความลึกจากผิวดินระดับ 10-20 ซม. พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %Clay และ %OM ของ site ที่ฉะเชิงเทรามีปริมาณสูงกว่าบึงกาฬ ($P<0.05$) แต่ค่าเฉลี่ย porosity ของ site ที่ฉะเชิงเทราก็มีค่าต่ำกว่าบึงกาฬ ($P<0.05$) <u>เอกสารอ้างอิง</u> กิติ มาลัยโรจน์ศิริ อนุกุล สุจินัย และชนิษฐศรี ชื่นตระกูล. 2547. การกำหนดลักษณะของชุดดินที่จัดตั้งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จำแนกใหม่ตามระบบอนุกรมวิธานดิน 2546. เอกสารวิชาการฉบับที่ 522. ส่วนมาตรฐานการสำรวจจำแนกดินและที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน 2. บรรยายอยู่ใน บทที่ 6 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 3. บรรยายอยู่ใน บทที่ 6 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ
--	---

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ
โครงการย่อยที่ 1 : การศึกษาสมดุลคาร์บอนเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุต-พริ้นต์ของสวนยางพารา ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 1 1. ขาดความเชื่อมโยงระหว่างการนำสมดุลคาร์บอนจาก Eddy Covariance ไปเป็นข้อมูลจัดทำ carbon footprint ของสวนยางพารา 2. ไม่มีการสรุปข้อมูล carbon footprint ที่ได้ในบทที่ 3 ไว้ใน Executive summary, บทคัดย่อ และบทที่ 6 เหมือนแยกกันศึกษาและใช้ข้อมูลคนละชุดกัน 3. ยังขาดการสังเคราะห์ข้อมูลให้เป็นความรู้อย่างแท้จริง 4. ผลที่ได้ในบทที่ 2 มีความขัดแย้งกับผลในบทที่ 3 ไม่มี logic สนับสนุนซึ่งกันและกัน	1. สมดุลคาร์บอนเป็น 1 ในองค์ประกอบหลักของคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ร่วมกับองค์ประกอบด้านการเกษตรกรรม และคาร์บอนในเนื้อยาง ในช่วงแรกนี้ การดำเนินงานวิจัยศึกษาองค์ประกอบหลักเน้นไปที่การศึกษาข้อมูลสมดุลปริมาณคาร์บอนจากพื้นที่ปลูกยางพารา ซึ่งเป็นข้อมูลในส่วนของ Upstream emissions เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญสำหรับการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ยังต้องนำไปใช้ร่วมกับข้อมูลอื่น และสมมติฐานอื่นเพื่อคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อไป 2. ปรับแก้ไขตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิแนะนำแล้ว 3. การทดลองนี้เป็นการศึกษาใหม่ ซึ่งยังไม่เคยมีการศึกษาลักษณะนี้ในยางพารามาก่อนในประเทศไทย ช่วงระยะเวลาในปีแรกนั้นนักวิจัยมุ่งทำระบบในการเก็บข้อมูลซึ่งมีความท้าทายด้านเทคนิควิทยาศาสตร์ และการวิเคราะห์ข้อมูลให้เป็นมาตรฐาน จากนั้นนักวิจัยจะพยายามสังเคราะห์ข้อมูลให้ได้เป็นความรู้อย่างแท้จริงในลำดับต่อไป 4. ปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่เกิดโดยตรงหรือโดยอ้อมจากสวนยางพารา โดยนำเสนอเป็น CO₂ equivalent มีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ 1) คาร์บอนที่เกิดจากกิจกรรมของต้นยางพาราและดินซึ่งแสดงผลในบทที่ 2 และ 2) คาร์บอนฟุตเกิดจากการเกษตรกรรม ปุ๋ย ยา และสารเคมีที่ใช้ ซึ่งนำเสนอผลในบทที่ 3 และ 3) คาร์บอนที่เกิดจากการเก็บเกี่ยว บทที่ 2 เป็นการศึกษาสมดุลคาร์บอนของสวนยางพารา ซึ่งเป็นข้อมูลสมดุลของปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่เกิดโดยตรงหรือโดยอ้อมจากกิจกรรมของต้นยางพารา วัชพืช ดิน ในขณะที่ บทที่ 3 เป็นการศึกษาปริมาณแก๊สเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการการได้มาซึ่งน้ำยางสด ซึ่งเป็นกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเกษตรกรรมต่าง ๆ ดังนั้นผลการทดลองในส่วนที่ 2 และ 3 จึงไม่เกี่ยวข้องกันโดยตรง และได้ตัวเลขที่ตรงกันข้าม บทที่ 2 เป็น

5. การนำปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บไว้ในต้นยางมาคำนวณด้วย เพื่อให้สมดุลคาร์บอนเป็นลบเป็นแนวคิดที่ดี (หน้า 2) และสามารถเป็นจุดขายแข่งกับยางสังเคราะห์ได้ อย่างไรก็ตาม การดูดซับคาร์บอนของต้นไม้มีลักษณะที่เรียกว่า “non-permanence” คือไม่ถาวร เมื่อต้นยางถูกโค่นและนำไปทำผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ไม่ถาวร (นอกจากเฟอร์นิเจอร์) คาร์บอนที่ถูกกักเก็บไว้ก็จะถูกปล่อยออกมาสู่บรรยากาศในรูป CO₂ ดังนั้น หลักการคำนวณ carbon footprint ของสากล (ISO) จึงมิได้รวมการดูดซับไว้ ยกเว้นกรณีที่ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ได้จากต้นยางมีอายุเกิน 10 ขึ้นไป

การตรึงคาร์บอนโดยการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นยางพารา จากนั้นจึงเก็บคาร์บอนไว้ในเนื้อไม้ กิ่ง-ใบ-ราก ร่วมกับการปล่อยคาร์บอนออกมาจากหายใจของส่วนต่าง ๆ และการย่อยสลายกิ่ง-ใบ-รากที่ร่วงหล่นลงพื้น ขณะที่บทที่ 3 เป็นการปลดปล่อยคาร์บอนซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ในกระบวนการผลิต

5. เป็นจริงบางส่วน ที่การดูดซับคาร์บอนของต้นไม้มีลักษณะที่เรียกว่า “non-permanence” คือไม่ถาวร เมื่อต้นยางถูกโค่นและนำไปทำผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ไม่ถาวร คาร์บอนที่ถูกกักเก็บไว้ก็จะถูกปล่อยออกมาสู่บรรยากาศในรูป CO₂

แต่ความเป็นจริงอีกส่วนหนึ่ง คือ (1) คาร์บอนจำนวนมากที่ต้นไม้ดูดซับไว้ สามารถจะถูกเก็บไว้เป็นระยะเวลายาวนานมาก ตัวอย่างเช่น คาร์บอนที่เก็บไว้พืชที่ต่อมากลายเป็นถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ และ (2) คาร์บอนอีกจำนวนหนึ่งที่ต้นไม้ดูดซับไว้ในส่วนต่าง ๆ (ต้น ใบ ราก กิ่ง ก้าน) เมื่อตายหรือหลุดร่วงลงสู่ดิน ก็จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และปล่อยคาร์บอนสู่อากาศเพียงบางส่วนเท่านั้น แต่ยังมีคาร์บอนอีกส่วนใหญ่ที่จะกลายเป็นอินทรีย์วัตถุเก็บไว้ในดินเป็นระยะเวลายาวนานถ้าไม่มี disturbance ซึ่งจะทำให้มีการปลดปล่อยคาร์บอนที่เก็บในดินออกมา (ดังนั้น ในกรณีการตัดป่าไม้ซึ่งช่วยเก็บสะสมคาร์บอนไว้ในดินเป็นระยะเวลานาน และมีการไถพรวนปลูกพืชอื่น จะมีการปล่อยคาร์บอนในดินซึ่งมีที่มาจาก การหลุดร่วงของส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ในป่า ออกสู่อากาศเป็นจำนวนมาก)

การวัดปริมาณสมดุลคาร์บอนตามวิธีในบทที่ 2 หากทำทุกปีตลอดอายุของยางพารา จะให้ข้อมูลสมดุลคาร์บอนสุทธิซึ่งเป็นผลของการตรึงคาร์บอนโดยต้นไม้และการปล่อยคาร์บอนโดยการย่อยสลายของส่วนต่าง ๆ (ต้น ใบ ราก กิ่ง ก้าน) เมื่อตายหรือหลุดร่วงลงสู่ดิน ตลอดอายุ 25-30 ปี เมื่อนำมาใช้ร่วมกับข้อมูลปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในต้นยางพาราขณะที่ตัดโค่น (เพื่อประเมินว่าการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และปล่อยคาร์บอนสู่อากาศเท่าใด) และร่วมกับสัดส่วนของไม้ยางที่นำออกไปนอกสวนยางพารา ก็จะเพียงพอให้ประเมินคาร์บอนที่ถูกตรึงโดยต้นยางพาราที่เหลือเก็บไว้ในดินและกลายเป็นอินทรีย์วัตถุเก็บไว้ในดินเป็นระยะเวลายาวได้

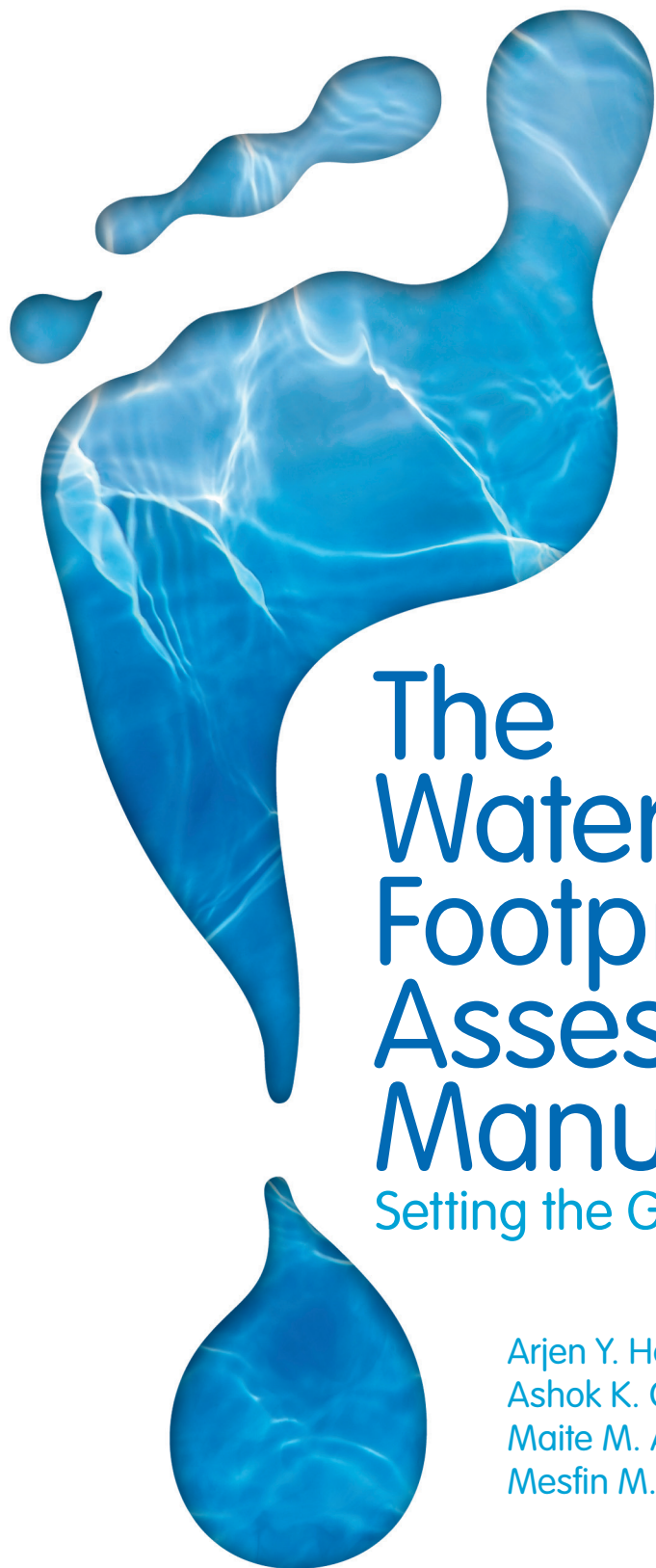
ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในปีแรกที่ฉะเชิงเทรา บ่งชี้ชัดเจนว่า สวนยางพาราตรึงคาร์บอนจำนวนมากในการผลิตเนื้อยางพารา 1 kg (-30.8 kg CO₂ e kg⁻¹) และมีการในการเกษตรกรรมจะเทียบได้ว่ามีการปล่อยคาร์บอนออกมาประมาณ +0.205 kg CO₂ e kg⁻¹ ในขณะที่มีคาร์บอนติดไปกับผลผลิตเนื้อยางอีกประมาณ

6. บทที่ 3 กำหนด Functional Unit เป็นหน่วยกิโลกรัมของน้ำยางพาราสด (หน้า 54) แต่ผลการคำนวณออกมาในรูปกิโลกรัม CO₂/ไร่ ซึ่งจะนำค่ามาเปรียบเทียบกันไม่ได้ระหว่างสวนยางบึงกาฬและสวนยางฉะเชิงเทรา 7. บทที่ 3 หน้า 72 ผู้วิเคราะห์ว่าน้ำยางแห้ง 1 กิโลกรัมจากทั้ง 2 แห่ง มีการใช้ทรัพยากร สารเคมี และปุ๋ยใกล้เคียงกัน ค่า carbon footprint ของทั้ง 2 พื้นที่ น่าจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน การสรุปเช่นนี้ควรมีผลการคำนวณต่อผลิตภัณฑ์ 1 กิโลกรัมมาเปรียบเทียบด้วย 8. ควรสังเคราะห์ข้อมูลและทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายว่าจะนำตัวเลขที่ได้จากรายงานไปใช้ทางไหนบ้าง อย่างไร <u>ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 2</u> 1. ควรตรวจสอบและแก้ไข 1.1 หน่วยที่ใช้ให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกัน 1.2 ข้อมูลจำนวนต้นกล้าของบึงกาฬที่ใช้ในการคำนวณ 1.3 การอ้างอิงตารางและรูปภาพ และตรวจสอบคำผิด 1.4 จัดรูปแบบตาราง 3-2 (หน้า 56) ให้เหมาะสม 1.5 สมการที่ 12 หน้า 47 1.6 ค่า GPP ในตาราง 2-3 หน้า 49 ไม่น่าจะถูกต้อง ควรตรวจสอบและแก้ไข	2.94 kg CO₂ e kg⁻¹ ซึ่งรวมแล้วจะเป็นการตรึงคาร์บอนสุทธิ ในปริมาณที่มากกว่า ค่า Emission factor ของยางธรรมชาติในปัจจุบัน ที่ปล่อยคาร์บอนสุทธิ 0.1887-0.6160 kg CO₂ e kg⁻¹ (คณะกรรมการเทคนิค ด้านคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ 2552) นักวิจัยเชื่อว่า แม้หลักการคำนวณ carbon footprint ของสากล (ISO) ในปัจจุบันยังมิได้รวมการดูดซับไว้ (ยกเว้นกรณีที่ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ได้จากต้นยางมีอายุเกิน 10 ขึ้นไป) แต่ก็มีการสมเหตุสมผลและเป็นการยุติธรรมที่ในอนาคตการคำนวณจะรวมคาร์บอนที่ต้นยาง (ซึ่งเป็นไม้ยืนต้น เช่นเดียวกับป่าไม้) ได้ตรงเอาไว้และต่อมาจะกลายเป็นคาร์บอนในอินทรีย์วัตถุเก็บไว้ในดินเป็นระยะเวลายาว เข้ามาคิดคำนวณ carbon footprint ได้ เมื่อมีข้อมูลสนับสนุนที่สมบูรณ์และน่าเชื่อถือเพียงพอ 6. ดำเนินการปรับแก้ไขแล้ว (หน้า 70-73) 7. ดำเนินการปรับแก้ไขแล้ว (หน้า 70-73) 8. บรรยายอยู่ใน บทที่ 6 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 1. ได้ตรวจสอบและแก้ไขตามคำแนะนำแล้ว
--	--

ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 3 1. ควรตรวจสอบความข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลบางอย่างที่ขัดแย้งกัน เช่น กรณีสึกษาสมบัติทางกายภาพของดินในกรณีเนื้อดินมีปริมาณ Clay สูงแต่ porosity ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับดินที่มีปริมาณ Clay ต่ำแต่มีค่า porosity สูง (ตารางที่ 2-1 หน้า 10) เพราะสาเหตุใด อีกทั้งปริมาณ OM (%) ก็ไม่ได้สูงกว่า 2. ควรเพิ่มบทสรุปและข้อเสนอแนะจากผลการศึกษา 3. ต้องมีข้อเสนอแนะในการนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อกำหนดเป็นนโยบาย	เนื่องจากช่องว่าง (porosity) ของดินสัมพันธ์กับ 2 สมบัติ คือ เนื้อดินและโครงสร้างดิน ดินที่มีปริมาณดินเหนียวสูงอาจมีช่องว่างน้อย ถ้าดินนั้นไม่มีโครงสร้างหรือมีการพัฒนาโครงสร้างต่ำกว่าอีกดินหนึ่ง จากข้อมูลความหนาแน่นดินรวมของแปลงบึงกาฬมีความหนาแน่นดินรวมต่ำกว่าแปลงฉะเชิงเทราชัดเจน แสดงให้เห็นว่าดินจากแปลงปลูกยางพาราที่บึงกาฬมีโครงสร้างที่จัดเรียงแล้วทำให้เกิดช่องว่างปริมาณมากกว่าดินจากแปลงปลูกยางพาราที่ฉะเชิงเทรา จากการตรวจสอบคำบรรยายหน้าตัดดินจากกรมพัฒนาที่ดิน (กิตติ และคณะ, 2547) พบว่าชุดดินโพนพิสัยซึ่งเป็นดินที่ทำการวิเคราะห์ในแปลงบึงกาฬมีโครงสร้างดินบนเป็นแบบเม็ดก้อนกลม (granular structure) ขนาดเล็ก ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างดินเฉพาะของดินพัฒนาการสูงมาก โครงสร้างนี้ทำให้ดินมีขนาดช่องว่างดินส่วนใหญ่เป็นแบบช่องขนาดใหญ่ (Macropores) ที่อยู่ระหว่างเม็ดดิน และจะมีช่องขนาดเล็กมากๆ (Cryptopores) ปริมาณมากภายในด้วย ทั้ง 2 ช่องว่างดังกล่าวทำให้ดินโพนพิสัยมีช่องว่างรวมสูงกว่าดินจากแปลงฉะเชิงเทราซึ่งมีโครงสร้างแบบก้อนเหลี่ยม ดังนั้นการที่ดินจากบึงกาฬมีปริมาณช่องว่างมากกว่าทั้งๆ ที่มีปริมาณอนุภาคขนาดดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ น้อยกว่าดินจากฉะเชิงเทรา เนื่องจากโครงสร้างดินที่จัดเรียงตัวให้มีช่องว่างรวมปริมาณมากกว่าดินจากฉะเชิงเทรา จะเห็นได้ว่าการจัดเรียงตัวของโครงสร้างมีผลมากต่อปริมาณช่องว่างโดยเฉพาะดินที่พัฒนาการสูง นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณช่องว่างในดินจาก 2 พื้นที่ พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %Clay ที่ความลึกจากผิวดินระดับ 0-10 ซม. มีค่าไม่แตกต่างกันระหว่าง 2 Site ที่ศึกษา แต่ค่าเฉลี่ยของ %OM ของ site ที่ฉะเชิงเทรามีปริมาณสูงกว่าบึงกาฬ ($P<0.05$) แต่ค่าเฉลี่ย porosity ของ site ที่ฉะเชิงเทราก็มีค่าต่ำกว่าบึงกาฬ ($P<0.05$) และที่ความลึกจากผิวดินระดับ 10-20 ซม. พบว่า ค่าเฉลี่ยของ %Clay และ %OM ของ site ที่ฉะเชิงเทรามีปริมาณสูงกว่าบึงกาฬ ($P<0.05$) แต่ค่าเฉลี่ย porosity ของ site ที่ฉะเชิงเทราก็มีค่าต่ำกว่าบึงกาฬ ($P<0.05$) <u>เอกสารอ้างอิง</u> กิตติ มาลัยโรจน์ศิริ อนุกุล สุจินัย และชนิษฐศรี อุ้นตระกูล. 2547. การกำหนดลักษณะของชุดดินที่จัดตั้งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จำแนกใหม่ตามระบบอนุกรมวิธานดิน 2546. เอกสารวิชาการฉบับที่ 522. ส่วนมาตรฐานการสำรวจจำแนกดินและที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน 2. บรรยายอยู่ใน บทที่ 6 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 3. บรรยายอยู่ใน บทที่ 6 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ
---	---

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ
โครงการย่อยที่ 2 : การศึกษาสมมูลน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำเวเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 1 1. การอภิปรายผลขาดการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการศึกษาอื่นๆ ว่าผลที่ได้รับมีความเชื่อถือประการใด แตกต่างจากการศึกษาอื่นหรือไม่ 2. ค่า water footprint ที่ศึกษาได้ (ซึ่งน่าจะเป็นอัตราการคายน้ำหารด้วยผลผลิตน้ำยางของแต่ละพื้นที่มากกว่า water footprint) เท่ากับ 682.36, 1241.18 ลบ.ม./กก. ผลผลิต ซึ่งต่างจากค่า water footprint ของจุฬาฯ มาก คือ 12.7-18.3 ลบ.ม./กก. ผลผลิต จึงน่าจะมีการนำมาเปรียบเทียบ และทำ literature review การคำนวณ water footprint ของต่างประเทศด้วย 3. รายงานสมบูรณ์ แต่ควรศึกษาและคำนวณ water footprint ตามหลักการในระยะต่อไป 4. ควรมีข้อเสนอแนะเชิงนโยบายว่าจะสามารถเอาผลการศึกษาไปใช้ได้อย่างไรบ้าง เพราะการอภิปรายผลและข้อเสนอแนะในรายงานอยู่ในรูปของการวิเคราะห์ข้อมูลเทคนิคเท่านั้น 5. ไม่สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากไม่ใช่ค่า water footprint อย่างแท้จริง และเป็นการเก็บข้อมูลเฉพาะที่ เฉพาะเวลา	1. ได้เพิ่มเติมเปรียบเทียบผลกับการรายงานของ Mekonnen and Hoekstra (2011) พร้อมทั้งวิจารณ์ 2. ได้เพิ่มเติมเปรียบเทียบผลกับการรายงานของ Mekonnen and Hoekstra (2011) พร้อมทั้งวิจารณ์ 3. ได้ชี้แจงการคำนวณ water footprint เพิ่มเติมซึ่งชี้ให้เห็นว่าค่า water footprint ที่ได้จากการทดลองนี้เป็นค่า green water footprint 4. ได้เพิ่มเติมข้อความเพื่อชี้ให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการ ได้ข้อมูล paramters สำคัญของประเทศไทย และ validate แบบจำลองได้ 5. ผลงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลจริงเพียงชุดเดียวของประเทศไทยในขณะนี้ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้านเมื่อเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลครบถ้วนสมบูรณ์แล้ว เช่น นำข้อมูล (เช่น ช่วงความยาวนานของแต่ละระยะการเจริญเติบโตในแต่ละปี) และค่า parameter (Kc) ซึ่งเป็นข้อมูลจริงของประเทศไทยไปใช้ในการปรับแต่งและ validate แบบจำลอง (เช่น CropWat) เพื่อประเมินการใช้น้ำและ water footprint ของยางพาราในสถานที่อื่น ๆ ได้ อนึ่ง ค่า water footprint ที่ได้จากการทดลองนี้ยังเป็น green water footprint ซึ่งเป็นค่าจริงที่วัดได้จริงจากแปลง ไม่ใช่ค่าที่ประเมินได้จากการใช้แบบจำลอง (ที่ไม่สามารถบอกความถูกต้องแม่นยำของการคาดการณ์ได้) ด้วยพื้นที่ปลูกยางพาราของประเทศไทย มีกระจายอยู่ในทุกภาค มีพื้นที่รวมกันมากกว่า 18 ล้านไร่ จึงเป็นไปได้ที่จะเก็บข้อมูลได้ทุกแปลง ทุกที่ ตลอดเวลา ดังนั้น ในทางปฏิบัติ จึงศึกษาสมมูลคาร์บอนและน้ำ และอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมมูลคาร์บอนและน้ำ เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานสำคัญ สามารถนำไปใช้

ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 2 1. ควรตรวจสอบและแก้ไข 1.1 หน่วยที่ใช้ให้มีความถูกต้องและสอดคล้องกัน 1.2 การอ้างอิงตารางและรูปภาพ และตรวจสอบคำผิด 1.3 ระยะเวลาในการบันทึกข้อมูล 2. ควรวิเคราะห์และให้เหตุผลเพิ่มเติมในเรื่องอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำ เนื่องจากผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลของ 2 site ไม่เหมือนกัน 3. ควรนำข้อมูล soil water content มาวิเคราะห์ด้วย ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 3 1. ควรมีการสรุปและวิจารณ์ผล 2. ควรมีข้อเสนอแนะจากผลการศึกษา และข้อเสนอแนะเพื่อการบริหารจัดการ	สร้าง simulation model และ/หรือให้ parameters สำคัญที่ใช้อยู่ใน existing models เพื่อสามารถนำไปใช้ประเมินและคาดการณ์ในสถานที่และช่วงเวลาอื่นได้ โดยมีความน่าเชื่อถือและตรวจสอบความถูกต้องได้ 1. ได้ตรวจสอบและแก้ไขตามคำแนะนำแล้ว 2. ได้มีการวิเคราะห์และให้เหตุผลเพิ่มเติมในเรื่องอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อสมดุลคาร์บอนและน้ำไว้ในบทที่ 5 ซึ่งทำได้ในระดับหนึ่ง ทีมผู้วิจัยจะได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบให้ละเอียดยิ่งขึ้นในลำดับต่อไป 3. ผลการวิเคราะห์ขั้นต้นยังไม่สามารถสรุปทิศทางได้แน่ชัด เมื่อได้ข้อมูลครบ 2 ปี จะได้นำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลสภาพแวดล้อมทั้งหมดโดยละเอียดขึ้นต่อไป 1. ได้เพิ่มการวิจารณ์และสรุปไว้ท้ายบทแล้ว 2. ได้เสนอแนะในบทวิจารณ์เพื่อชี้ให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะมีผลสำคัญอย่างยิ่งในการปรับแต่ง และ validate แบบจำลอง และเมื่อมีข้อมูลมากเพียงพอทีมผู้วิจัยจะได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ และให้เพื่อการบริหารจัดการได้ในลำดับต่อไป
--	--



The Water Footprint Assessment Manual

Setting the Global Standard

Arjen Y. Hoekstra,
Ashok K. Chapagain,
Maite M. Aldaya and
Mesfin M. Mekonnen

Inter-basin water transfer

An inter-basin water transfer is the abstraction of water from a river basin A and move it – through pipelines, canals or bulk transport (for example, by lorry or ship) – to another river basin B. According to the blue water footprint definition, moving water away from a river basin is a blue water footprint within that basin, because it is ‘consumptive water use’. The blue water footprint of the total transfer will be allocated to the beneficiaries of the water in the receiving river basin. Thus, processes in basin B that use water from another basin A have a blue water footprint located in basin A, the size of which is equal to the amount of water they receive plus the possible losses on the way. If the water users in the receiving river basin B return (part of) the used water to their own basin, we see that water is ‘added’ to the water resources in river basin B. This ‘added’ water may compensate for the blue water footprint of other users that have consumed water from basin B; in that sense one may argue that the inter-basin water transfer creates a ‘negative blue water footprint’ in the receiving river basin (insofar as the water does not evaporate and indeed adds to the water system of the receiving basin). The negative blue water footprint in basin B partly compensates the positive blue water footprint of other users in basin B. Note that it does not compensate for the blue water footprint in river basin A! When the goal is to assess the overall water footprint of humans in basin B, we recommend to include a possible ‘negative blue water footprint’ that exists as a result of real water transfer into the basin (provided that it indeed compensates for a positive blue water footprint in the basin in the same period). In the case of water footprint accounts for individual processes, products, consumers or producers, one should leave calculated negative blue water footprints out of the footprint accounts in order to make a clear separation between the discussion about the gross water footprint of a process, product, consumer or producer and the discussion about possible compensation. The issue of compensation (subtractability) is debatable and should be dealt with separately from the accounting phase. It has been argued that doing good in one basin (for example, through a negative blue water footprint in that basin) cannot compensate for the positive blue water footprint in another basin, since water depletion and resulting impacts in one place will not be solved by adding water somewhere else. In this case, adding a calculated negative blue water footprint to the calculated positive blue water footprint would result in a misleading figure. Read more on the impossibility to compensate a water footprint in one basin by adding water in another basin in Chapter 5 (Box 5.2).

3.3.2 Green water footprint

The green water footprint is an indicator of the human use of so-called green water. Green water refers to the precipitation on land that does not run off or

recharge the groundwater but is stored in the soil or temporarily stays on top of the soil or vegetation. Eventually, this part of precipitation evaporates or transpires through plants. Green water can be made productive for crop growth (but not all green water can be taken up by crops, because there will always be evaporation from the soil and because not all periods of the year or areas are suitable for crop growth).

The green water footprint is the volume of rainwater consumed during the production process. This is particularly relevant for agricultural and forestry products (products based on crops or wood), where it refers to the total rainwater evapotranspiration (from fields and plantations) plus the water incorporated into the harvested crop or wood. The green water footprint in a process step is equal to:

$$WF_{proc,green} = GreenWaterEvaporation + GreenWaterIncorporation$$

[volume/time] (2)

The distinction between the blue and green water footprint is important because the hydrological, environmental and social impacts, as well as the economic opportunity costs of surface and groundwater use for production, differ distinctively from the impacts and costs of rainwater use (Falkenmark and Rockström, 2004; Hoekstra and Chapagain, 2008).

Green water consumption in agriculture can be measured or estimated with a set of empirical formulas or with a crop model suitable for estimating evapotranspiration based on input data on climate, soil and crop characteristics. In Section 3.3.4 we will present in more detail how one can estimate the green water footprint in crop growth.

3.3.3 Grey water footprint

The grey water footprint of a process step is an indicator of the degree of freshwater pollution that can be associated with the process step. It is defined as the volume of freshwater that is required to assimilate the load of pollutants based on natural background concentrations and existing ambient water quality standards. The grey water footprint concept has grown out of the recognition that the size of water pollution can be expressed in terms of the volume of water that is required to dilute pollutants such that they become harmless (Box 3.4).

The grey water footprint is calculated by dividing the pollutant load (L , in mass/time) by the difference between the ambient water quality standard for that pollutant (the maximum acceptable concentration c_{max} , in mass/volume) and its natural concentration in the receiving water body (c_{nat} , in mass/volume).