



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

สัญญาเลขที่ RUG6290037

โครงการ “ดัชนีสเปกตรัม นวัตกรรมสำหรับประเมิน
การเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราในประเทศไทย”

โดย ดร. ดวงรัตน์ ศตคุณ และคณะ

ธันวาคม 2563

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “ดัชนีสเปกตรัม นวัตกรรมสำหรับประเมิน
การเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราในประเทศไทย”

คณะผู้วิจัย

1. ดร. ดวงรัตน์ ศตคุณ
2. ผศ.ดร. ทิพา พาโคกหม
3. ดร. ชมภูณช ฉายาเวช

สังกัด

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกสว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

โครงการวิจัย	ดัชนีสเปกตรัม นวัตกรรมสำหรับประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราในประเทศไทย
สัญญาเลขที่	RUG6290037
หัวหน้าโครงการ	นางสาวดวงรัตน์ ศตคุณ
หน่วยงาน	ศูนย์ความร่วมมือทางวิชาการไทย-ฝรั่งเศส มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ปีงบประมาณ	2562
แหล่งทุน	สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

สืบเนื่องจากการประชุมพัฒนาข้อเสนอโครงการวิจัย “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” ซึ่งมี ศ.ดร. อรรถชัย จินตะเวช เป็นหัวหน้าโครงการ เมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม 2562 ณ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) บางเขน โดยมีข้อสรุปว่าให้ ทีมนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ดำเนินงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาดัชนีสเปกตรัม (spectral index) ที่เหมาะสมในการประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราทั่วประเทศไทย โดยการเชื่อมโยงระหว่างฟลักซ์ของสมดุลคาร์บอนที่ตรวจวัดได้จากพื้นที่ปลูกยางพาราทั้ง 3 แห่ง กับข้อมูลสำรวจระยะไกล (จากดาวเทียม) ดัชนีสเปกตรัมที่ได้ถูกนำไปใช้ขยายผลในพื้นที่ศึกษาของโครงการวิจัย “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” ในลำดับต่อไป

การประเมินการเก็บกักคาร์บอน (Carbon stock) สามารถทำได้ 2 วิธี คือ (1) การประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และ (2) การตรวจวัดฟลักซ์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ขึ้นไปยังบรรยากาศและเคลื่อนลงมาจากบรรยากาศเหนือพื้นที่ปลูกพืชที่ศึกษา (IPCC, 2006) อย่างไรก็ตาม ทั้งสองวิธีมีข้อจำกัดด้านเครื่องมือ บุคลากร ระยะเวลา และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดการเก็บกักคาร์บอนที่เกิดขึ้นในแต่ละปีได้ครอบคลุมพื้นที่ที่สนใจทั้งหมด แต่ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้มีการศึกษาการเชื่อมโยงข้อมูลการสำรวจจากระยะไกล (Remote sensing) ร่วมกับข้อมูลภาคพื้นมาใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาดัชนีสเปกตรัม (spectral index) เพื่อใช้ในการประเมินการเก็บกักคาร์บอนจากการตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance อาทิเช่น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า GPP (Gross primary production) และดัชนีต่างๆ ได้แก่ NDVI, fPAR, NIRv และ GPP โดยใช้ข้อมูลฟลักซ์ของคาร์บอนจาก Flux tower มากกว่า 100 แห่ง (Badgley *et al.*, 2017) สำหรับพื้นที่ปลูกยางในประเทศไทย ขณะนี้มี Rubber flux tower จำนวน 3 แห่ง ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา (ภาคตะวันออก) ปังกาฬ (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) และนครศรีธรรมราช (ภาคใต้) (ภาพที่ 1) มีข้อมูลปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารามากถึง 11 ปี และข้อมูลอื่นๆ ที่สามารถใช้ในการคำนวณชีวมวลของยางพาราได้ ดังนั้น การบูรณาการข้อมูลที่มีอยู่ร่วมกับข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล (จากดาวเทียม) และนำไปสู่การได้มาซึ่งนวัตกรรม (ดัชนีสเปกตรัม) ที่เหมาะสมในการประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราทั่วประเทศไทยอันจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับภาคการผลิตยางพาราของประเทศไทย

วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัย (1) การพัฒนานวัตกรรม อันได้แก่ ดัชนีสเปกตรัม (spectral index) ที่ใช้ในการประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราในประเทศไทย (ค่าการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราที่ใช้ในการพัฒนาดัชนีสเปกตรัมนั้น คือ ค่าปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค Eddy covariance) (2) เปรียบเทียบการประเมินการเก็บกักคาร์บอนระหว่างวิธีการประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (carbon stock) และ การตรวจวัดฟลักซ์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ขึ้นไปยังบรรยากาศและเคลื่อนลงมาจากบรรยากาศเหนือพื้นที่ปลูกพืชที่ศึกษา (Eddy covariance technique) และ (3) เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสงสะสม และปริมาณฝนที่มีผลกระทบต่ออัตราการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารา เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการแปลงยางพารา



ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษา 3 แห่ง ได้แก่ (1) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสานชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา (ภาคตะวันออก) (2) พื้นที่สวนยางของเกษตรกร อำเภอบึงกาฬ จังหวัดบึงกาฬ (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) และ (3) องค์การสวนยาง อำเภอนาบอน จังหวัดนครศรีธรรมราช (ภาคใต้)

การดำเนินงานวิจัย โดยการจัดเตรียมข้อมูลของแปลงยางพารา 3 แห่ง ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช อันได้แก่ (1) ข้อมูลปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราจากการตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance (2) ข้อมูลขนาดเส้นรอบวงของต้นยางพารา เพื่อใช้ในการคำนวณชีวมวลด้วยวิธี Allometric (3) ข้อมูลดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Modis (5 ดัชนี) และ Sentinel-2 (39 ดัชนี) และ (4) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสง และปริมาณฝน

ข้อมูลข้างต้นจะถูกนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารากับดัชนีสเปกตรัม เพื่อหาดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารา วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และ ปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราสะสมในระยะเวลา 1 ปี (NEE_{year}) และวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยด้าน

อุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสงสะสม และปริมาณฝนต่อปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลง
ยางพารา

วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ BPM42, PB235, PB260, PB310, PR255, RRIC110, PR305, RRIT226, GT1 และ RRIM600 และวิเคราะห์ความแตกต่างของ
ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราแต่ละสายพันธุ์ด้วยวิธี Analysis of variance

ผลจากการวิจัย

(1) ดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 สามารถอธิบายความแปรปรวนของการตรึง
คาร์บอนของแปลงยางพาราที่ตรวจวัดได้จากเทคนิค Eddy covariance ได้ดีกว่าดัชนีที่ประเมินได้จาก
ดาวเทียม Modis ดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราทั้ง 3
จังหวัด ได้แก่ TSAVI ส่วนดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลง
ยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช ได้แก่ TSAVI, EVI และ REIP ตามลำดับ

(2) การประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพารา ที่มีอายุ 4 – 9 และ 20 - 24 ปี ด้วยวิธีการ
คำนวณการเปลี่ยนแปลงของชีวมวล พบว่า ยางพารามีการเก็บกักคาร์บอน 0.36 – 1.46 ตันคาร์บอนต่อไร่
ปริมาณการเก็บกักคาร์บอนสูงเพิ่มสูงขึ้นตามอายุ ขณะที่ ปริมาณคาร์บอนที่สะสมเพิ่มขึ้นในแต่ละปีมีค่าลดลง
ต้นยางพาราอายุ 24 ปี สามารถเก็บกักคาร์บอนได้สูงถึง 20.63 ตันคาร์บอนต่อไร่ หรือ 128.97 ตันคาร์บอน
ต่อเฮกตาร์ แสดงให้เห็นว่าแปลงยางพารามีศักยภาพสูงเทียบเท่ากับความสามารถเก็บกักคาร์บอนของป่าไม้

การเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และ ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง
โดยแปลงยางพาราสะสมในระยะเวลา 1 ปี (NEE_{year}) นั้น มีความสัมพันธ์กัน โดย NEE_{year} สามารถอธิบาย
ความแปรปรวนของค่า ΔC ได้ 36.24% ($P < 0.05$) ดังนั้น NEE_{year} ยังไม่เป็นตัวแปรที่เหมาะสมในการ
ประเมินค่า ΔC แต่สามารถประเมินค่า ΔC โดยใช้อายุต้นยางพาราได้ ($r^2 = 0.7152$, $P < 0.05$) นอกจากนี้
ดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในประเมินค่า ΔC ได้แก่ ค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนี fAPAR ($r^2 = 0.7211$, $P < 0.05$)
และ GPP ($r^2 = 0.7292$, $P < 0.05$) ที่ประเมินมาจากดาวเทียม Modis ได้

สำหรับการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราสะสมในระยะเวลา 1 ปี
(NEE_{year}) นั้น สามารถใช้ค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนี LAI2 ($r^2 = 0.8585$, $P < 0.05$) และ NDRE ($r^2 = 0.9023$, $P < 0.01$)
ที่ประเมินมาจากดาวเทียม Sentinel-2 ได้

(3) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพารากับข้อมูล
ทางอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณน้ำฝน (Rain) โดยใช้พื้นที่
ปลูกยางพารา 3 จังหวัด อันได้แก่ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช และวิเคราะห์ข้อมูลแยก
เป็นรายจังหวัด พบว่า ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารามีแนวโน้มมากขึ้น (ค่า NEE ติดลบมาก
ขึ้น) เมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ขณะที่ ปริมาณคาร์บอน
สุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารามีแนวโน้มลดลง (ค่า NEE ติดลบน้อยลง) เมื่อปริมาณฝนที่ได้รับเพิ่มมากขึ้น
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ยกเว้นการวิเคราะห์แยกเป็นรายจังหวัดของจังหวัดบึงกาฬและ
นครศรีธรรมราช พบว่า ปริมาณฝนไม่มีผลกระทบต่อปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา

(4) ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์ พบว่า พันธุ์ PR 305 มีปริมาณคาร์บอนใน
เนื้อไม้มากที่สุด คือ 43.96% สายพันธุ์ยางพาราที่มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้รองลงมา ได้แก่ พันธุ์ RRIC 110,

PB 310, RRIM 600, PR235, BPM 24, RRIT 226, PB 260, GI 1 และ PB 255 ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ เท่ากับ 43.70, 43.64, 43.52, 43.50, 43.00, 42.98, 42.79, 42.60 และ 42.40% ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

(1) ปัญหาอุปสรรคของการศึกษา และแนวทางแก้ไข

การวิเคราะห์การถดถอยระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารากับค่าเฉลี่ยรายเดือนของดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้ ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความแปรปรวนสูงและมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination หรือ r^2) ที่ต่ำ เนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีไม่มากนัก ข้อมูลที่ได้ดัชนีสเปกตรัมที่ได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ซึ่งขึ้นสู่วงโคจรในปี 2559 ทำให้มีข้อมูลเพียง 67-78 ตัวอย่าง (เป็นข้อมูลรวมจากพื้นที่ศึกษา 3 พื้นที่) ถ้ามีการเก็บข้อมูลต่อไปอีกและนำมาวิเคราะห์การถดถอยระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารากับค่าเฉลี่ยรายเดือนของดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้ใหม่จะทำให้ มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (r^2) มีค่าสูงขึ้นและสามารถใช้ดัชนีสเปกตรัมมาประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราได้แม่นยำยิ่งขึ้น

(2) การศึกษาต่อยอด

- การใช้ดัชนีสเปกตรัมสำหรับการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารานั้น ควรใช้ดัชนีสเปกตรัมที่แตกต่างกันไปตามพื้นที่ศึกษาจะให้ความแม่นยำมากกว่าการใช้ดัชนีสเปกตรัมที่วิเคราะห์มาจากข้อมูลพลักซ์คาร์บอนของแปลงยางพาราทั้ง 3 จังหวัดรวมกัน และเนื่องจาก Rubber flux tower ที่ทีมนักวิจัยรับผิดชอบอยู่นั้นยังมีการเก็บข้อมูลต่อเนื่องอยู่ นักวิจัยคาดว่าถ้ามีข้อมูลเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แบบจำลองที่ใช้ดัชนีสเปกตรัมในการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารานั้นมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

- จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพารา กับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิอากาศ และปริมาณฝน แยกเป็นรายจังหวัดและรายปี พบว่า ระดับความสัมพันธ์ระหว่าง NEE กับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยานั้นแตกต่างกันไปในแต่ละปีและแต่ละพื้นที่ที่ปลูกยางพารา ดังนั้นการศึกษาในลำดับต่อไป คือ การหาสาเหตุที่ทำให้ปัจจัยด้านจุลภูมิอากาศดังกล่าวมีระดับของความรุนแรงต่อปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพาราแตกต่างกัน

- ต้นยางพาราที่ปลูกในแต่ละพื้นที่ที่มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ส่วนของลำต้นยางพาราค่อนข้างต่างกัน และสำหรับประเทศไทยที่มีการปลูกยางพารา พันธุ์ RRIM 600 มากกว่า 80% ของพื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศ ดังนั้น ข้อมูลปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา พันธุ์ RRIM 600 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 43.52% นั้นสามารถนำไปคำนวณหามวลคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราที่ปลูกในประเทศไทยได้

สำหรับโครงการวิจัย “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” ซึ่งมีการศึกษาการเก็บกักคาร์บอน (Carbon stock) ของประเทศผู้ปลูกยางพาราในกลุ่มอาเซียนด้วยนั้น ข้อมูลปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราอีก 9 พันธุ์ที่ศึกษานั้น น่าจะใช้ประโยชน์ในการคำนวณค่าการเก็บกักคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศในกลุ่มอาเซียนนี้ได้

(3) การนำผลการศึกษาไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในการกำหนดนโยบาย

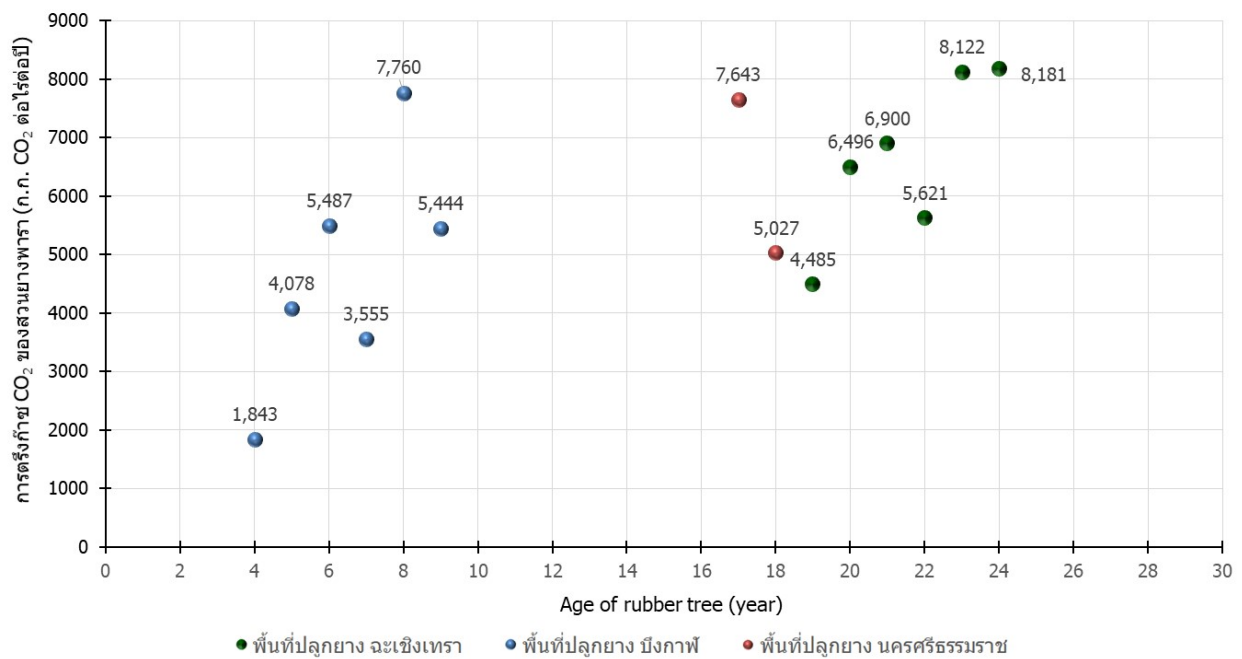
การใช้ดัชนีสเปกตรัมสำหรับการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราควรใช้ดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ได้แก่ ดัชนี TSAVI ซึ่งสามารถใช้ประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราของพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 จังหวัดได้ โดยมีความแม่นยำ 34% แต่การแยกประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราเป็นรายจังหวัดนั้น พบว่า ดัชนี TSAVI และ EVI2 เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ ซึ่งให้ความแม่นยำในการประเมินที่ 54.57 และ 43.06% ตามลำดับ ขณะที่ ดัชนี MTCI หรือ REIP หรือ S2REP เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งให้ความแม่นยำในการประเมินมากกว่า 49%

การที่ดัชนีสเปกตรัมที่ได้นั้นมีความแม่นยำไม่สูงมากนักในการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา เนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีไม่มากนัก ถ้ามีการเก็บข้อมูลต่อไปอีกและนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์การถดถอยระหว่างค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารากับดัชนีสเปกตรัมที่ประเมิน น่าจะทำให้สามารถใช้ดัชนีสเปกตรัมดังกล่าวในการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา และสามารถขยายการประเมินครอบคลุมทั้งประเทศได้

- ยางที่เปิดกรีดและมีอายุมากนั้นมีค่าการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงมาก หากสามารถนำค่าการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในส่วนของต้นยางมาผนวกในกระบวนการคิดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางพารา จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเหมาะสมกับการดำเนินธุรกิจที่เรียกว่า “Greening Economy” หรือ “ยุคเศรษฐกิจสีเขียว” ซึ่งเป็นการดำเนินธุรกิจที่ต้องใส่ใจถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

จากข้อมูลการตรึงก๊าซ CO₂ ของพื้นที่ปลูกยางพารา (ภาพที่ 30) พื้นที่ปลูกยางพาราอายุ 19 - 24 ปี ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา สามารถตรึงก๊าซ CO₂ เฉลี่ย 5.9 ตันต่อไร่ต่อปี เมื่อพิจารณาพื้นที่ปลูกยางที่เปิดกรีดแล้วในปี 2559 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) 19.6 ล้านไร่ สามารถประเมินในเบื้องต้นได้ว่า พื้นที่ปลูกยางพาราที่เปิดกรีดแล้วทั้งประเทศสามารถตรึงก๊าซ CO₂ ได้ในปริมาณสูงถึง 115 ล้านตันต่อปี ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นจุดแข็งของยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และใช้เป็นข้อได้เปรียบเชิงการค้า เช่น การเจรจาเพื่อลดปัญหาด้านการกีดกันทางการค้าของยางธรรมชาติที่ผลิตจากต้น

- การที่ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารามีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นนั้น ถ้ามีการปรับเปลี่ยนระยะการปลูกยางพาราให้สามารถรับแสงได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น น่าจะทำให้ยางพารตรึงคาร์บอนได้มากขึ้นด้วย



ภาพที่ 2 ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิที่ถูกตรึงโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (กิโลกรัม CO₂ ต่อไร่ต่อปี) ของแปลงปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา (อายุ 19-24 ปี) บึงกาฬ (อายุ 4-9 ปี) และนครศรีธรรมราช (อายุ 17-18 ปี) จากการแผนงานวิจัย เรื่อง “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2555-2558 โดย พูนพิภพและคณะ) และโครงการ “ยางธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: การศึกษาสมดุลคาร์บอน และน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2561 โดยดวงรัตน์และคณะ)

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะ (1) วิเคราะห์หาดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราในประเทศไทย โดยการเชื่อมโยงระหว่างปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราที่ตรวจวัดได้จากพื้นที่ปลูกยางพาราทั้ง 3 พื้นที่ (แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และ นครศรีธรรมราช) กับข้อมูลสำรวจระยะไกล (จากดาวเทียม Modis และ Sentinel-2) (2) เปรียบเทียบการประเมินการเก็บกักคาร์บอนระหว่างวิธีการประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (carbon stock) และ การตรวจวัดฟลักซ์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ขึ้นไปยังบรรยากาศและเคลื่อนลงมาจากบรรยากาศเหนือพื้นที่ปลูกพืชที่ศึกษา (Eddy covariance technique) และ (3) เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสงสะสม และปริมาณฝนที่มีผลกระทบต่อปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารา และการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์

ผลการวิจัย พบว่า ดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 สามารถอธิบายความแปรปรวนของปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราได้ดีกว่าดัชนีที่ประเมินได้จากดาวเทียม Modis ดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราทั้ง 3 จังหวัด ได้แก่ TSAVI ส่วนดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช ได้แก่ TSAVI, EVI และ REIP ตามลำดับ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราในระยะเวลา 1 ปี (NEE_{year}) พบว่า ค่า NEE_{year} สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่า ΔC ได้ 36.24% ($P < 0.05$) นอกจากนี้ยังสามารถประเมินค่า ΔC โดยใช้อายุยางพารา ($r^2 = 0.7152$, $P < 0.05$) หรือใช้ค่าเฉลี่ยดัชนี fAPAR ($r^2 = 0.7211$, $P < 0.05$) และ GPP ($r^2 = 0.7292$, $P < 0.05$) ที่ประเมินมาจากดาวเทียม Modis สำหรับการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราสะสมในระยะเวลา 1 ปี (NEE_{year}) นั้น สามารถใช้ค่าเฉลี่ยดัชนี LAI2 ($r^2 = 0.8585$, $P < 0.05$) และ NDRE ($r^2 = 0.9023$, $P < 0.01$) ที่ประเมินมาจากดาวเทียม Sentinel-2

จุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสง และปริมาณฝน มีสหสัมพันธ์ในทางลบ (Negative correlation) กับปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราทั้ง 3 แห่ง แต่พบว่า ปริมาณฝน มีสหสัมพันธ์ในทางบวก (Positive correlation) กับปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารา แต่ปรากฏในแปลงยางพาราที่ฉะเชิงเทรา และบึงกาฬ

ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์ พบว่า พันธุ์ PR 305 มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้มากที่สุด คือ 43.96% สายพันธุ์ยางพาราที่มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้รองลงมา ได้แก่ พันธุ์ RRIC 110, PB 310, RRIM 600, PR235, BPM 24, RRIT 226, PB 260, GI 1 และ PB 255 ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ เท่ากับ 43.70, 43.64, 43.52, 43.50, 43.00, 42.98, 42.79, 42.60 และ 42.40% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ยางพารา, ดัชนีสเปกตรัม, การเก็บกักคาร์บอน, เทคนิค Eddy covariance, ฟลักซ์ของคาร์บอน, ชีวมวล

ABSTRACT

This research project aims to (1) analyze the suitable spectral index to assess the carbon sequestration of rubber plantation in Thailand. By linking the net ecosystem exchange (NEE) or net carbon fixation by rubber photosynthesis that was measured from the three-rubber plantation (Chachoengsao, Buengkan and Nakhon Si Thammarat province) with remote sensing data (from Modis and Sentinel-2). (2) The method that was used to estimate greenhouse gas flux, estimation of net change in C stock and carbon flux rate to and from the atmosphere (Eddy covariance technique). and (3) to determine meteorological factors, air temperature (T_{air}), cumulative light intensity (PAR), and rainfall that affects the NEE of the rubber plantation. And a comparison of the carbon content in rubber wood of 10 rubber clones.

The results showed that the spectral indices assessed by Sentinel-2 were more able to explain the variability of NEE than the index assessed by the Modis. The suitable spectral index for NEE assessment of the 3-rubber plantation was TSAVI, while the spectral index suitable for assessing the NEE of the rubber plantation in Chachoengsao, Bueng Kan and Nakhon Si Thammarat provinces were TSAVI, EVI, and REIP, respectively.

Analysis of the relationship between carbon stock (ΔC) and annual NEE (NEE_{year}) found that NEE_{year} was 36.24% to explain the variance of ΔC ($P < 0.05$), NEE_{year} is unsuitable to be used to estimate ΔC . But ΔC can be estimated by using the rubber age ($r^2 = 0.7152$, $P < 0.05$) or the annual mean of indices that were assessed by Modis data, fAPAR ($r^2 = 0.7211$, $P < 0.05$) and GPP ($r^2 = 0.7292$, $P < 0.05$). For the annual NEE assessment (NEE_{year}) can use the annual mean of indices that were assessed by Sentinel-2 data, LAI2 ($r^2 = 0.8585$, $P < 0.05$) and NDRE ($r^2 = 0.9023$, $P < 0.05$).

Correlation analysis between NEE and meteorological data such as air temperature (T_{air}), cumulative light intensity (PAR), and rainfall. The result showed that NEE was negatively correlated with T_{air} and PAR in the 3-rubber plantation. While NEE was positively correlated with rainfall, only in Chachoengsao and Bueng Kan province)

The carbon content of rubber wood, 10-rubber clone, was found that PR 305 had the highest carbon content, 43.96%. The second highest carbon content was RRIC 110 and followed by PB 310, RRIM 600, PR235, BPM. 24, RRIT 226, PB 260, GI 1, and PB 255, respectively. The carbon content of the 9-rubber clone were 43.70, 43.64, 43.52, 43.50, 43.00, 42.98, 42.79, 42.60 and 42.40%, respectively ($P < 0.05$).

Keywords: *Rubber, spectral index, carbon stock, Eddy covariance technique, carbon flux, biomass*

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมดในเอกสารนี้ นักวิจัย ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้สนับสนุนข้อมูลข้อมูลการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราจากการตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance จากโครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2555-2558 โดย พูนพิภพและคณะ) และโครงการ “ยางธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: การศึกษาสมดุลคาร์บอน และน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2561 โดยดวงรัตน์และคณะ) ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) (GISTDA) ที่สนับสนุนข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมของแปลงยางพารา และการยางแห่งประเทศไทย (กยท.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างไม้ยางพารา

การวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ของสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และประสานงานในด้านต่างๆ

และขอขอบคุณนักวิจัยและผู้ช่วยนักวิจัยของแผนงานวิจัยทุกท่านที่ช่วยให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
การดำเนินงานวิจัย	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
2. วัตถุประสงค์	2
3. การ Review Literature	2
4. การดำเนินงานวิจัย	11
5. ผลการดำเนินงานวิจัย	26
6. สรุปผล และข้อเสนอแนะ	46
7. เอกสารอ้างอิง	50
ภาคผนวก	
1. บทความสำหรับการเผยแพร่	56
2. ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมา	59
3. ผลที่ได้รับตลอดโครงการ	60

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	เปรียบเทียบสมการประเมินมวลชีวภาพ (allometric equation) ในแปลงยางพารา	5
ตารางที่ 2	ข้อมูลพื้นฐานของแปลงยางพาราใน 3 พื้นที่ ได้แก่ ฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช	13
ตารางที่ 3	รายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Terra ระบบ MODIS	17
ตารางที่ 4	เปรียบเทียบรายละเอียดของดาวเทียม Terra ระบบ MODIS และ Sentinel-2	19
ตารางที่ 5	ดัชนีสเปคตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลของดาวเทียม Sentinel-2 จำนวน 39 index	20
ตารางที่ 6	ข้อมูลดัชนีสเปคตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลของดาวเทียม Sentinel-2 แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช ปี พ.ศ. 2559 - 2561	21
ตารางที่ 7	รายละเอียดข้อมูลฟลักซ์ของคาร์บอน (NEE) และดัชนีสเปคตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Modis และ Sentinel-2 ของแปลงยางพารา 3 พื้นที่	26
ตารางที่ 8	แสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปคตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Modis ของแปลงยางพารารวมทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา และแยกเป็นรายพื้นที่ ได้แก่ แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา (CRRC) บึงกาฬ (B-Kan) และ นครศรีธรรมราช (NST)	28
ตารางที่ 9	แสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปคตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ของแปลงยางพารารวมทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา และแยกเป็นรายพื้นที่ ได้แก่ แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา (CRRC) บึงกาฬ (B-Kan) และ นครศรีธรรมราช (NST)	29
ตารางที่ 10	สมการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month} หรือ ค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปคตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราทั้ง 3 จังหวัด	31

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 11	31
สมการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month} หรือ ค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา	
ตารางที่ 12	31
สมการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month} หรือ ค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดบึงกาฬ	
ตารางที่ 13	31
สมการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month} หรือ ค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช	
ตารางที่ 14	32
สมการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month} หรือ ค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพารา ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple regression analysis) ร่วมกับ step-wise	
ตารางที่ 15	36
แสดงมวลชีวภาพ ปริมาณคาร์บอนเก็บกัก ปริมาณคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลง และปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพาราที่อายุต่างๆ จาก 2 พื้นที่ศึกษา ได้แก่ จังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ	
ตารางที่ 16	39
สมการประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC หรือค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายปีที่ประเมินได้จากดาวเทียม Modis (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ	
ตารางที่ 17	39
สมการประเมินค่าการสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{year}) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายปีที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 18	40
แสดงค่าการสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลง ยางพารา (NEE_{year}) และข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความเข้ม แสงสะสม (PAR) อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (Tair) และปริมาณฝน (Rain) ของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และ นครศรีธรรมราช	
ตารางที่ 19	40
สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE) และปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสงสะสม (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณฝน (Rain) ของแปลงปลูก ยางพารา ซึ่งเป็นข้อมูลจากพื้นที่ปลูกยางพาราทั้ง 3 จังหวัด อัน ได้แก่ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช	
ตารางที่ 20	42
สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE) และปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสงสะสม (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณฝน (Rain) ของแปลงปลูก ยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา แยกเป็นรายปี	
ตารางที่ 21	42
สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE) และปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสงสะสม (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณฝน (Rain) ของแปลงปลูก ยางพาราจังหวัดบึงกาฬ แยกเป็นรายปี	
ตารางที่ 22	43
สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE) และปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสงสะสม (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณฝน (Rain) ของแปลงปลูก ยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช แยกเป็นรายปี	
ตารางที่ 23	45
ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา (%) จำนวน 10 สายพันธุ์	

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1	แสดงการประเมิน Greenhouse gas fluxes โดย 2006 IPCC Guidelines for National Green-house Gas Inventories	2
ภาพที่ 2	ชุดอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดฟลักซ์ของคาร์บอนและน้ำด้วยเทคนิค Eddy covariance	7
ภาพที่ 3	แสดงอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรอบวันของสวนยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา ในช่วงวันที่ 1 – 9 มิถุนายน 2557	7
ภาพที่ 4	พื้นที่ศึกษา 3 แห่ง ได้แก่ (1) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนามชัย เขต จังหวัดฉะเชิงเทรา (ภาคตะวันออก) (2) พื้นที่สวนยางของเกษตรกร อำเภopakคาค จังหวัดบึงกาฬ (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) และ (3) องค์การสวนยาง อำเภอนาบอน จังหวัดนครศรีธรรมราช (ภาคใต้)	8
ภาพที่ 5	การตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂) ของแปลงยางพารา ณ Site ที่ 1 จังหวัดฉะเชิงเทรา (อายุ 19-24 ปี) Site ที่ 2 จังหวัดบึงกาฬ (อายุ 4-9 ปี) และ Site ที่ 3 จังหวัดนครศรีธรรมราช (อายุ 17-18 ปี)	8
ภาพที่ 6	ดัชนี SIF จากดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) อธิบายความแปรปรวนของ gross primary production (GPP) ที่ตรวจวัดจริงด้วยระบบ eddy covariance บน flux tower ของทุ่งหญ้า พืชปลูกและพื้นที่ป่าที่ศึกษาในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มากถึง 89% - 99% (Sun <i>et al.</i> , 2017)	10
ภาพที่ 7	ดัชนี fPAR, NDVI, GPP, NIRv จาก MODIS สามารถอธิบายความแปรปรวนของ gross primary production ของระบบนิเวศน์ต่างๆ ที่ตรวจวัดจริงด้วยระบบ Eddy covariance บน tower จำนวนมากถึง 105 แห่งทั่วโลก ได้อย่างมีนัยสำคัญ (Badgley <i>et al.</i> , 2017)	10
ภาพที่ 8	ชุดอุปกรณ์ Eddy covariance ซึ่งประกอบด้วย (a) เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม แบบ 3 มิติ (b) เครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในอากาศ ระบบเปิด และ (c) เครื่องควบคุมบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ	14

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 9	ขั้นตอนการคำนวณอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและอัตราการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกข้าว	15
ภาพที่ 10	ข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพารา ฉะเชิงเทรา	17
ภาพที่ 11	ข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพาราบึงกาฬ	18
ภาพที่ 12	ข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพารานครศรีธรรมราช	18
ภาพที่ 13	ตัวอย่างข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพารา ฉะเชิงเทรา	21
ภาพที่ 14	ตัวอย่างข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 สีนสมธรรมชาติ แปลงยางพารา ฉะเชิงเทรา วันที่ 2 มกราคม 2562	22
ภาพที่ 15	ตัวอย่างข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพารา บึงกาฬ	22
ภาพที่ 16	ตัวอย่างข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 สีนสมธรรมชาติ แปลงยางพารา บึงกาฬ วันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2560	23
ภาพที่ 17	ตัวอย่างข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพารานครศรีธรรมราช	23
ภาพที่ 18	ตัวอย่างข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 สีนสมธรรมชาติ แปลงยางพารานครศรีธรรมราช วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2559	24
ภาพที่ 19	ตัวอย่างเชิงไม้ของยางพาราพันธุ์ PR305 ที่ความสูง 6 ระดับ	25
ภาพที่ 20	เครื่องบดละเอียด (Mixer Mill รุ่น MM 400, Retsch GmbH, Germany)	25
ภาพที่ 21	เครื่องวิเคราะห์ธาตุ C, H, N, S รุ่น CHNS-628	25
ภาพที่ 22	แสดงข้อมูลการเก็บกักคาร์บอนที่ได้จากการตรวจวัดค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิ (NEE) ที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา ซึ่งตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance และข้อมูลสภาพภูมิอากาศของพื้นที่ปลูกยางพารา 3 พื้นที่ ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา (บน) บึงกาฬ (กลาง) และนครศรีธรรมราช (ล่าง) ตามลำดับ	27
ภาพที่ 23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา ที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค Eddy covariance (NEE) กับ ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ประเมินได้จากสมการถดถอยพหุคูณ (NEE_{model}) ของพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช	33

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา ที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค Eddy covariance (NEE) กับ ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ประเมินได้จากสมการถดถอยพหุคูณ (NEE_{model}) ของพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา	33
ภาพที่ 25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา ที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค Eddy covariance (NEE) กับ ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ประเมินได้จากสมการถดถอยพหุคูณ (NEE_{model}) ของพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ	34
ภาพที่ 26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา ที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค Eddy covariance (NEE) กับ ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ประเมินได้จากสมการถดถอยพหุคูณ (NEE_{model}) ของพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช	34
ภาพที่ 27	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และ การสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{year}) โดยใช้ข้อมูลจาก 2 พื้นที่ศึกษา ได้แก่ แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเพิ่มขึ้นของอายุต้นยางพารา	37
ภาพที่ 28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และ การสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{year}) โดยใช้ข้อมูลจาก 2 พื้นที่ศึกษา ได้แก่ แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ	38
ภาพที่ 29	แสดงการกระจายของปริมาณธาตุคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราจำนวน 10 สายพันธุ์	44
ภาพที่ 30	ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิที่ถูกตรึงโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (กิโลกรัม CO_2 ต่อไร่ต่อปี) ของแปลงปลูกยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา (อายุ 19-24 ปี) บึงกาฬ (อายุ 4-9 ปี) และ นครศรีธรรมราช (อายุ 17-18 ปี) จากการแผนงานวิจัย เรื่อง “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2555-2558 โดย พูนพิภพและคณะ) และโครงการ “ยางธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: การศึกษาสมดุลคาร์บอน และน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2561 โดยดวงรัตน์และคณะ)	49

การดำเนินการวิจัย

1. ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

สืบเนื่องจากประเด็นด้านคาร์บอนเครดิตจากยางพาราเป็นมติที่เห็นชอบร่วมกันจากการประชุมระดมความคิดเห็น เรื่อง “ต้นทุนการผลิตยางพาราในแต่ละภูมิภาคของประเทศ” เมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม 2562 ณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โดยมีความเห็นร่วมกันว่า ข้อมูลด้านคาร์บอนเครดิตจากยางพารา มีประโยชน์และสามารถนำไปใช้ในการเจรจาต่อรองด้านการค้าได้ ต่อมาการประชุมพัฒนาข้อเสนอโครงการวิจัย เรื่อง “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” ซึ่งมี ศ.ดร. อรรถชัย จินตะเวช เป็นหัวหน้าโครงการ เมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม 2562 ณ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี อวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) บางเขน โดยมีข้อสรุปว่าให้ ทีมนักวิจัยจากมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ดำเนินงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาดัชนีสเปกตรัม (spectral index) ที่เหมาะสมในการประเมิน การเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราทั่วประเทศไทย โดยการเชื่อมโยงระหว่างค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE, net ecosystem exchange) เข้ามาในระบบนิเวศยางพารา ซึ่งตรวจวัดได้จากพื้นที่ปลูกยางพารา 3 แห่ง กับดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากข้อมูลสำรวจระยะไกล (ข้อมูลดาวเทียม) ดัชนีสเปกตรัมที่ได้จากโครงการนี้จะถูกนำไปใช้ขยายผลในพื้นที่ศึกษาของโครงการวิจัย “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” ในลำดับต่อไป

การประเมินการเก็บกักคาร์บอน (carbon stock) สามารถทำได้ 2 วิธี คือ (1) การประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และ (2) การตรวจวัดฟลักซ์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ขึ้นไปยังบรรยากาศและเคลื่อนลงมาจากบรรยากาศเหนือพื้นที่ปลูกพืชที่ศึกษา (IPCC, 2006) อย่างไรก็ตาม ทั้งสองวิธีมีข้อจำกัดด้านเครื่องมือ บุคลากร ระยะเวลา และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดการเก็บกักคาร์บอนที่เกิดขึ้นในแต่ละปีได้ครอบคลุมพื้นที่ที่สนใจทั้งหมด แต่ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้มีการศึกษาการเชื่อมโยงข้อมูลการสำรวจจากระยะไกล (remote sensing) ร่วมกับข้อมูลภาคพื้นมาใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร โดยการพัฒนาดัชนีสเปกตรัม (spectral index) ขึ้นมาในการบ่งชี้สภาวะความเครียด (stress) ของพืชหรือผลผลิตทางการเกษตรขึ้น นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาดัชนีสเปกตรัม เพื่อใช้ในการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงเข้ามาในระบบนิเวศ ซึ่งตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance ตัวอย่างเช่น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณคาร์บอนที่ถูกตรึงเข้ามาในระบบนิเวศ (GPP, gross primary production) และดัชนีต่างๆ ได้แก่ NDVI, fPAR, NIRv และ GPP โดยใช้ข้อมูลปริมาณคาร์บอนที่ถูกตรึงเข้ามาในระบบนิเวศพืช จาก flux tower มากกว่า 100 แห่ง (Badgley *et al.*, 2017) สำหรับพื้นที่ปลูกยางในประเทศไทย ขณะนี้มี rubber flux tower จำนวน 3 แห่ง ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช มีข้อมูลปริมาณคาร์บอนที่ถูกตรึงเข้ามาในสวนยางพารามากถึง 11 ปี และข้อมูลอื่นๆ ที่สามารถใช้ในการคำนวณชีวมวลของยางพาราได้ ดังนั้น นักวิจัยเห็นว่าการบูรณาการข้อมูลที่มีอยู่ร่วมกับข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล (จากข้อมูลดาวเทียม) และนำไปสู่การได้มาซึ่งนวัตกรรม อันได้แก่ ดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมิน

ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงเข้ามาในสวนยางพาราทั่วประเทศไทยอันจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับภาคการผลิตยางจากยางพาราของประเทศไทย

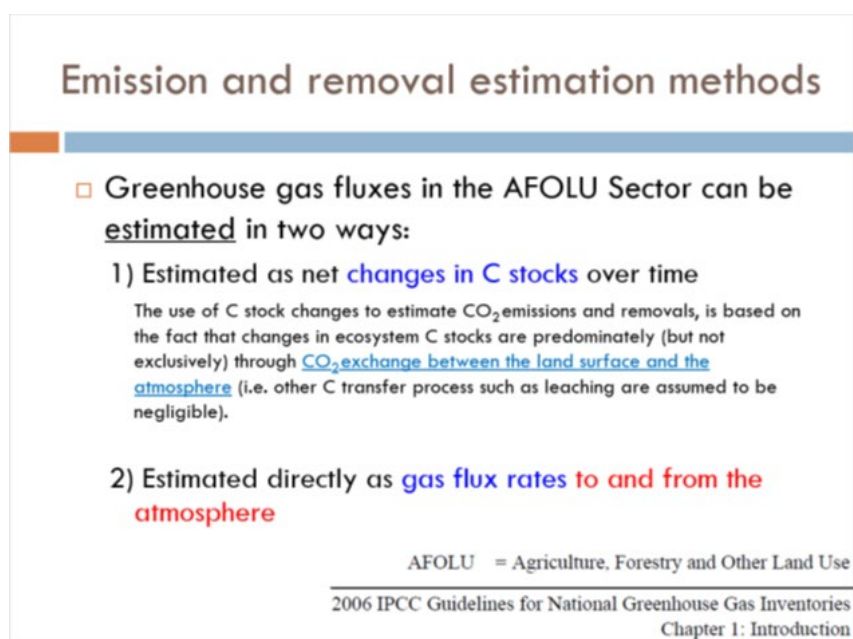
2. วัตถุประสงค์

- 2.1 การพัฒนานวัตกรรม อันได้แก่ ดัชนีสเปกตรัม (spectral index) ที่ใช้ในการประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราในประเทศไทย (ค่าการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราที่ใช้ในการพัฒนาดัชนีสเปกตรัมนี้ ได้แก่ ค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงเข้ามาในสวนยางพารา หรือ ค่า NEE ซึ่งตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance)
- 2.2 เปรียบเทียบการประเมินการเก็บกักคาร์บอนระหว่างวิธีการประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (carbon stock) และ การตรวจวัดปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงเข้ามาในสวนยางพารา ซึ่งตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance
- 2.3 เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสงสะสม และ ปริมาณฝนที่มีผลกระทบต่อการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพารา เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการแปลงยางพารา

3. การ Review Literature

การประเมินการเก็บกักคาร์บอน

การประเมินการเก็บกักคาร์บอน (carbon stock) สามารถทำได้ 2 วิธี คือ (1) การประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และ (2) การตรวจวัดฟลักซ์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ขึ้นไปยังบรรยากาศและเคลื่อนลงมาจากบรรยากาศเหนือพื้นที่ปลูกพืชที่ศึกษา (IPCC, 2006)



ภาพที่ 1 แสดงการประเมิน Greenhouse gas fluxes โดย 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

(1) การประเมินการเก็บกักคาร์บอนด้วยการคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

การประเมินโดยวิธีนี้เป็นการวัดปริมาณการเก็บกักคาร์บอนในส่วนต่างๆ ของต้นไม้ โดยใช้สมการ allometric ผลการประเมินจะแสดงการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนระหว่างที่ต้นไม้มีการเจริญเติบโต วิธีการนี้ทำได้ง่าย ค่าใช้จ่ายน้อย และไม่ทำลายตัวอย่าง แต่มีข้อจำกัด คือ ความถี่ในการประเมินคาร์บอนทั้งหมดที่เข้ามาในระบบค่อนข้างต่ำ และใช้กำลังคนค่อนข้างมาก

สมการมวลชีวภาพของแปลงยางพารามีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและความหลากหลายขึ้นกับอายุ สายพันธุ์ของต้นยางพารา ความสูงของระดับพื้นที่ที่ปลูกยางพารา การเลือกใช้สมการมวลชีวภาพควรเลือกใช้ให้เหมาะสมโดยคำนึงถึงปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น (Yang *et al.*, 2017) สำหรับประเทศไทยนั้นมีการพัฒนาสมการมวลชีวภาพเพื่อให้จำเพาะกับสวนยางพาราภายในประเทศในรายงานต่างๆ เช่น การประเมินมวลชีวภาพและคาร์บอนตามรายงานของกรมวิชาการเกษตร (อารักษ์ และคณะ, 2551) และมวลชีวภาพของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (จินตนา และ สุนทร, 2549) เป็นต้น ทั้งนี้คณะวิจัยได้สรุปสมการมวลชีวภาพไว้ในตารางที่ 1

อารักษ์และคณะ (2551) ประเมินมวลชีวภาพและคาร์บอนในยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ซึ่งเป็นพันธุ์ที่ปลูกมากถึงร้อยละ 70 ของพื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศ การศึกษาได้สุ่มเก็บตัวอย่างยางพาราช่วงอายุ 2-25 ปี ในภาคใต้ ภาคตะวันออก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ พบว่า มวลชีวภาพ (Y) มีความสัมพันธ์ในทางบวกกับเส้นรอบวง (X) ของยางพาราในรูปสมการ $Y = 0.0082x^{2.5623}$ โดยส่วนต่าง ๆ ของต้นยางพารามีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 45 ปริมาณการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราที่อายุ 9, 12, 18 และ 25 ปี เท่ากับ 8.32, 11.46, 15.44 และ 22.39 ตันคาร์บอนต่อไร่ ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนตลอดช่วงระยะเวลาการปลูกยางพารา 25 ปี มีค่าเท่ากับ 42.65 ตันคาร์บอนต่อไร่

สุภาวรรณและอำนาจ (2553) ประเมินศักยภาพการเก็บกักคาร์บอนในยางพาราโดยใช้สมการ allometric สำหรับการประเมินชีวมวลในส่วนของลำต้น กิ่ง ใบ และรากของยางพารา จากข้อมูลทุติยภูมิและใช้แบบจำลอง Logistic growth เพื่อประเมินชีวมวลของพื้นที่สวนยางพาราอายุ 1-25 ปี พบว่า ปริมาณการเก็บกักคาร์บอนรวมในสวนยางพาราที่อายุ 1 ปีเท่ากับ 11.89 ตันคาร์บอนต่อเฮกแตร์ (1.9 ตันคาร์บอนต่อไร่) และเพิ่มขึ้นเป็น 128.40 ตันคาร์บอนต่อเฮกแตร์ (20.54 ตันคาร์บอนต่อไร่) เมื่อสวนยางพาราอายุ 25 ปี ค่าเฉลี่ยของปริมาณการเก็บกักคาร์บอนในต้นยางพาราช่วงอายุก่อนกรีด (1-6 ปี) และช่วงอายุที่ให้ผลผลิต (7-25 ปี) มีค่าเท่ากับ 18.90 ± 5.30 และ 84.74 ± 31.37 ตันคาร์บอนต่อเฮกแตร์ตามลำดับ

ระวีและคณะ (2555) ประเมินการเก็บกักคาร์บอนและมูลค่าการชดเชยคาร์บอนในแปลงยางพาราช่วงอายุ 2, 5, 12, 16 และ 26 ปี ในพื้นที่ อ. เทพา จ. สงขลา โดยใช้สมการ allometric และคำนวณคาร์บอนอินทรีย์ในดินจากสวนยางพารา ผลการประเมิน พบว่า ต้นยางพาราสามารถเก็บกักคาร์บอนทั้งหมดอยู่ในช่วง 50.68-193.72 ตันต่อเฮกแตร์ (8.11-30.99 ตันต่อไร่) และสามารถเก็บกักคาร์บอนในส่วนต่างๆ ได้สูงสุดที่ช่วงอายุ 25 ปี ปริมาณการเก็บกักคาร์บอนในแปลงยางพาราซึ่งเป็นผลรวมจากส่วนต่างๆ ของต้นยางพารา (living carbon stock) เศษซากพืช (litter production) และในดิน (soil carbon stock) ที่อายุ 2, 5, 12, 16 และ 26 ปี มีค่าเท่ากับ 45.43, 89.88, 107.71, 135.27 และ 201.56 ตันต่อเฮกแตร์ ตามลำดับ และมีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่

ในช่วง 166.72-739.73 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเฮกตาร์ หากสามารถพัฒนาเข้าสู่ตลาดชดเชยคาร์บอน จะสร้างรายได้สุทธิให้เกษตรกรผู้ปลูกยางพาราตลอดช่วงระยะเวลาของสัญญา 25 ปี คิดเป็น 573.39 \$ ต่อเฮกตาร์ หรือเท่ากับ 3,063.27 บาทต่อไร่

ประดิษฐ์และคณะ (มมป.) เปรียบเทียบมวลชีวภาพในเนื้อไม้ของยางพารา (*Hevea brasiliensis* (Willd.ex A.Juss.) Müll.Arg. กับยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) และ ต้นสัก (*Tectona grandis* L.f.) พบว่า ไม้ยางพารามีปริมาณการเก็บกักคาร์บอนสูงที่สุด รองลงมาคือ ยูคาลิปตัส และสัก ตามลำดับ โดยมีคาร์บอนเฉลี่ยร้อยละ 49.90, 48.95 และ 46.60 ของน้ำหนักแห้งตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณคาร์บอนในส่วนเนื้อพื้นดินแต่ละส่วน (ลำต้น กิ่ง และใบ) พบว่า ยางพาราก็มีปริมาณคาร์บอนในลำต้น กิ่ง และใบสูงที่สุด คือ ร้อยละ 48.01, 55.05 และ 52.77 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

การประเมินมวลชีวภาพและการเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพารา พันธุ์ RRIM 600 บริเวณต้นน้ำประแส จังหวัดระยอง พื้นที่ 154 ตารางกิโลเมตร โดยการวัดขนาดเส้นรอบวงและประเมินมวลชีวภาพด้วยสมการชีวมวลในภาคสนามร่วมกับการขยายขนาดพื้นที่ศึกษาด้วยภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชต (THEOS) ผลการประเมิน พบว่า มีสวนยางพาราการกักเก็บคาร์บอน 0.99 เมกะตันคาร์บอน และในปี 2554 สวนยางพาราสามารถเก็บกักคาร์บอนได้ 121 ตันคาร์บอนต่อปี (Charoenjit *et al.*, 2015)

(2) การประเมินการเก็บกักคาร์บอนด้วยการตรวจวัดฟลักซ์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

แหล่งของคาร์บอนที่สำคัญ ประกอบไปด้วย บรรยากาศ ทะเล และ fossil fuels ในระบบนิเวศพืชที่สะสมอยู่ในพืชและดิน โดยจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน ถึงแม้ปริมาณคาร์บอนที่สะสมอยู่ในระบบนิเวศพืชจะมีปริมาณน้อยกว่าในบรรยากาศ แต่การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนที่สะสมอยู่ในระบบนิเวศพืชสร้างผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมอย่างมาก ในระบบนิเวศพืช การหมุนเวียนคาร์บอนจะเริ่มขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากอากาศบริเวณใกล้เคียงและต้นพืช กระบวนการแพร่และการเคลื่อนที่ของอากาศนำ CO₂ จากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากกว่าที่ห่างไกลจากต้นพืชเข้ามาทดแทน แต่ในทางกลับกันช่วงเวลากลางคืนที่พืชมีการปล่อย CO₂ สุทธิจากการหายใจ ก๊าซ CO₂ จะเคลื่อนจากบริเวณรอบต้นพืชที่มีความเข้มข้นมากกว่าไปยังบริเวณที่ห่างไกลจากต้น ปัจจุบันทางสภาพแวดล้อมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงสร้างผลกระทบต่อกระบวนการทั้งสองดังกล่าว ซึ่งรวมถึงความสมดุลของคาร์บอน และปริมาณก๊าซ CO₂ ในบรรยากาศอีกด้วย

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบสมการประเมินมวลชีวภาพ (allometric equation) ในแปลงยางพารา

ดัชนีที่ตรวจวัด	สมการคำนวณมวลชีวภาพ (กก.ต่อต้น)	การเก็บตัวอย่าง	เอกสารอ้างอิง																					
เส้นรอบวงของต้น	สมการประเมินมวลชีวภาพขึ้นกับขนาดของลำต้น ○ เส้นรอบวงเล็กกว่า 30 ซม. $Y = 0.0032x^{2.7863}$ ○ เส้นรอบวงตั้งแต่ 30 ซม. ขึ้นไป $Y = 0.0082x^{2.5623}$ เมื่อ Y คือ มวลชีวภาพ และ X คือ ขนาดเส้นรอบวง	สวนยางพาราช่วงอายุ 2-25 ปี พันธุ์ RRIM 600 จากสวนยางทางภาคใต้ ตะวันออก ตะวันออกเฉียงเหนือ และเหนือ	อารักษ์และคณะ 2551																					
เส้นรอบวงต้นที่ความสูง 1.70 ม. จากระดับพื้นดิน	สมการประเมินมวลชีวภาพใน 4 ส่วนประกอบของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ดังตาราง <table><tr><th>ส่วนของพืช</th><th>สมการมวลชีวภาพ</th><th>r²</th></tr><tr><td>ลำต้น</td><td>$\ln(Y_{\text{stem}}) = 2.2494(\ln DBH) - 1.8338$</td><td>0.94</td></tr><tr><td>กิ่ง</td><td>$\ln(Y_{\text{branch}}) = 2.7559(\ln DBH) - 3.7155$</td><td>0.98</td></tr><tr><td>ใบ</td><td>$\ln(Y_{\text{leaf}}) = 0.8796(\ln DBH) - 0.6974$</td><td>0.94</td></tr><tr><td>ราก</td><td>$\ln(Y_{\text{root}}) = 1.9903(\ln DBH) - 2.8766$</td><td>0.93</td></tr></table>	ส่วนของพืช	สมการมวลชีวภาพ	r ²	ลำต้น	$\ln(Y_{\text{stem}}) = 2.2494(\ln DBH) - 1.8338$	0.94	กิ่ง	$\ln(Y_{\text{branch}}) = 2.7559(\ln DBH) - 3.7155$	0.98	ใบ	$\ln(Y_{\text{leaf}}) = 0.8796(\ln DBH) - 0.6974$	0.94	ราก	$\ln(Y_{\text{root}}) = 1.9903(\ln DBH) - 2.8766$	0.93	เก็บข้อมูลยางพาราช่วงอายุ 2,5,12,16 และ 26 ปี พันธุ์ RRIM 600 จากสวนยาง จ. สงขลา	ระวีและคณะ 2555						
ส่วนของพืช	สมการมวลชีวภาพ	r ²																						
ลำต้น	$\ln(Y_{\text{stem}}) = 2.2494(\ln DBH) - 1.8338$	0.94																						
กิ่ง	$\ln(Y_{\text{branch}}) = 2.7559(\ln DBH) - 3.7155$	0.98																						
ใบ	$\ln(Y_{\text{leaf}}) = 0.8796(\ln DBH) - 0.6974$	0.94																						
ราก	$\ln(Y_{\text{root}}) = 1.9903(\ln DBH) - 2.8766$	0.93																						
เส้นรอบวงต้นที่ความสูง 1.70 ม. จากระดับพื้นดิน	ความสัมพันธ์ของลำต้นกับมวลชีวภาพ เป็นแบบ logistic function $M_d = \frac{M_o M_f}{M_o + (M_f + M_o)e^{-cG}}$ c (absolute growth) = 0.04017 cm G ขนาดของลำต้นเป็น ซม M _f = 6,093.4 กก M _o = 26.129 กก M _d มวลแห้งทั้งต้น	เก็บข้อมูลยางพาราอายุ 1-25 ปี พันธุ์ PRIM 600 บริเวณ 5 พื้นที่ทั่วประเทศไทย	จินตนาและสุนทรี 2549																					
เส้นรอบวงต้นที่ความสูง 1.30 ม. จากระดับพื้นดิน	สมการมวลชีวภาพของยางพาราในส่วนของลำต้น กิ่ง และใบ <table><tr><th>ส่วนของพืช</th><th>สมการมวลชีวภาพ</th><th>r²</th></tr><tr><td>ลำต้น</td><td>$\log W_s = 0.866 \log D^2H - 1.255$</td><td>0.991</td></tr><tr><td>กิ่ง</td><td>$\log W_B = 1.144 \log D^2H - 5.222$</td><td>0.878</td></tr><tr><td>ใบ</td><td>$\log W_L = 0.572 \log D^2H - 1.152$</td><td>0.922</td></tr></table>	ส่วนของพืช	สมการมวลชีวภาพ	r ²	ลำต้น	$\log W_s = 0.866 \log D^2H - 1.255$	0.991	กิ่ง	$\log W_B = 1.144 \log D^2H - 5.222$	0.878	ใบ	$\log W_L = 0.572 \log D^2H - 1.152$	0.922	เก็บข้อมูลยางพาราอายุ 0-7 ปี ในพื้นที่ จ. ระยอง	พงษ์ศักดิ์ และคณะ, 2531 อ้างต่อจาก ทิชา และคณะ, 2559									
ส่วนของพืช	สมการมวลชีวภาพ	r ²																						
ลำต้น	$\log W_s = 0.866 \log D^2H - 1.255$	0.991																						
กิ่ง	$\log W_B = 1.144 \log D^2H - 5.222$	0.878																						
ใบ	$\log W_L = 0.572 \log D^2H - 1.152$	0.922																						
เส้นรอบวงต้นที่ความสูง 1.30 ม. จากระดับพื้นดิน	สมการมวลชีวภาพของยางพาราในส่วนต่างๆ ของต้นยางพารา <table><tr><th>ส่วนของพืช</th><th>สมการมวลชีวภาพ</th><th>r²</th></tr><tr><td>ลำต้น</td><td>$W_s = 0.0804 (D^2H)^{0.8341}$</td><td>0.97</td></tr><tr><td>กิ่ง</td><td>$W_B = W_t - W_s - W_L$</td><td>-</td></tr><tr><td>ใบ</td><td>$W_L = 0.000008(D^2H)^{1.4986}$</td><td>0.91</td></tr><tr><td>ราก</td><td>$W_R = 0.0005(D^2H)^{1.269}$</td><td>0.95</td></tr><tr><td>รากฝอย</td><td>$W_r = 0.0022 (D^2H)^{1.0296}$</td><td>0.92</td></tr><tr><td>ส่วนเหนือดิน</td><td>$W_T = 0.0046(D^2H)^{1.2046}$</td><td>0.95</td></tr></table>	ส่วนของพืช	สมการมวลชีวภาพ	r ²	ลำต้น	$W_s = 0.0804 (D^2H)^{0.8341}$	0.97	กิ่ง	$W_B = W_t - W_s - W_L$	-	ใบ	$W_L = 0.000008(D^2H)^{1.4986}$	0.91	ราก	$W_R = 0.0005(D^2H)^{1.269}$	0.95	รากฝอย	$W_r = 0.0022 (D^2H)^{1.0296}$	0.92	ส่วนเหนือดิน	$W_T = 0.0046(D^2H)^{1.2046}$	0.95	ยางพาราอายุ 23 ปี จ. สกลนคร	ประดิษฐ์และคณะ มมป.
ส่วนของพืช	สมการมวลชีวภาพ	r ²																						
ลำต้น	$W_s = 0.0804 (D^2H)^{0.8341}$	0.97																						
กิ่ง	$W_B = W_t - W_s - W_L$	-																						
ใบ	$W_L = 0.000008(D^2H)^{1.4986}$	0.91																						
ราก	$W_R = 0.0005(D^2H)^{1.269}$	0.95																						
รากฝอย	$W_r = 0.0022 (D^2H)^{1.0296}$	0.92																						
ส่วนเหนือดิน	$W_T = 0.0046(D^2H)^{1.2046}$	0.95																						
เส้นรอบวงระดับ 1.20 เมตร เหนือพื้นดิน	สมการมวลชีวภาพ <table><tr><th>สมการที่</th><th>สมการมวลชีวภาพ</th><th>r²</th></tr><tr><td>1</td><td>$Biomass = 0.144 \times D^{2.40}$</td><td>0.976</td></tr><tr><td>2</td><td>$Biomass = 279 \times (D^2H)^{0.867}$</td><td>0.976</td></tr></table>	สมการที่	สมการมวลชีวภาพ	r ²	1	$Biomass = 0.144 \times D^{2.40}$	0.976	2	$Biomass = 279 \times (D^2H)^{0.867}$	0.976	บริเวณเกาะสุมาตรา อินโดนีเซีย ความสัมพันธ์ใช้เพียงเส้นรอบวง หรือ เส้นรอบวงและความสูงพบว่า ความสัมพันธ์ของสมการกับมวลชีวภาพไม่แตกต่างกัน	Sone et al., 2014												
สมการที่	สมการมวลชีวภาพ	r ²																						
1	$Biomass = 0.144 \times D^{2.40}$	0.976																						
2	$Biomass = 279 \times (D^2H)^{0.867}$	0.976																						

การใช้เทคนิค Eddy covariance วัดฟลักซ์ของคาร์บอนและน้ำ

Eddy covariance เป็นเทคนิคทางจุลภูมิอากาศที่ดีที่สุดในปัจจุบันที่ใช้ในการตรวจวัดการแลกเปลี่ยนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) โดยตรง โดยมีการติดตั้งเครื่องมือวัดปริมาณก๊าซ CO_2 และ H_2O และเครื่องมือวัดทิศทางลมแบบ 3 ทิศทาง บนหอคอยที่มีความสูงเหนือทรงพุ่มพืชทดลอง ซึ่งทำให้การวัดอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซ CO_2 และ H_2O ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ ข้อมูลต่างๆ จะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ (Data logger) ซึ่งทำการเก็บข้อมูลวินาทีละ 10 ครั้ง จึงทำให้ข้อมูลที่ได้มีความละเอียดมาก สถานีตรวจวัดบนหอคอยจะเก็บข้อมูลการแลกเปลี่ยนก๊าซ CO_2 และ H_2O ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในบริเวณแปลงทดลอง อาทิเช่น การสังเคราะห์แสง (หรือ การตรึงก๊าซ CO_2 จากอากาศ) การหายใจ (การปลดปล่อยก๊าซ CO_2 สู่บรรยากาศ) การแลกเปลี่ยนก๊าซ CO_2 และ H_2O ของพืชอื่นที่ผิวดินและการหายใจของจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ ในดิน นอกจากนี้ ชุดเครื่องมือดังกล่าวยังสามารถตรวจวัดการคายระเหยน้ำของระบบนิเวศพืชขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังทำให้ทราบถึงความอ่อนไหวของระบบนิเวศดังกล่าวต่อปัจจัยสภาพแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับปัจจัยด้านอื่นๆ เช่น การเจริญเติบโต และผลผลิตได้

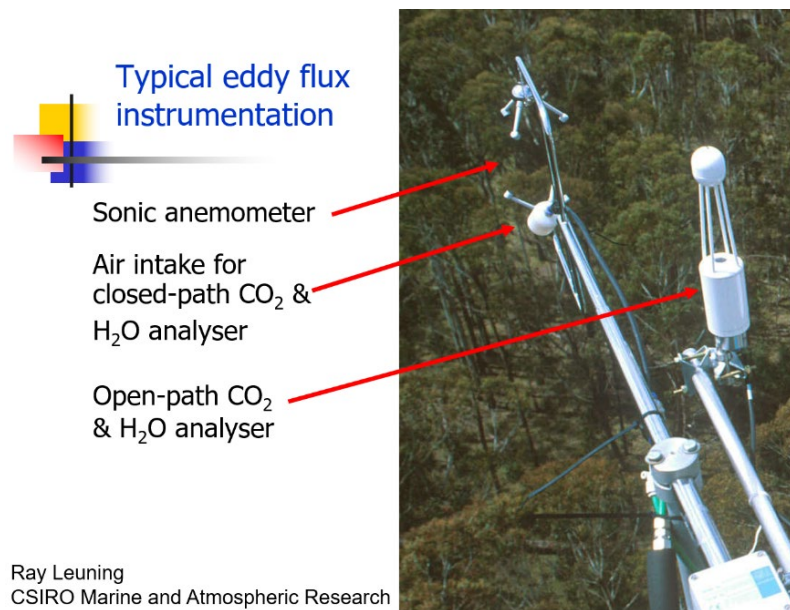
วิธีการคำนวณปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงเข้ามาในระบบนิเวศ (net ecosystem exchange, NEE) ด้วยเทคนิค Eddy covariance (Goulden *et al.*, 1996)

$$NEE = F_z(h) + \overline{\rho_a} \int_0^h \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz \quad (1)$$

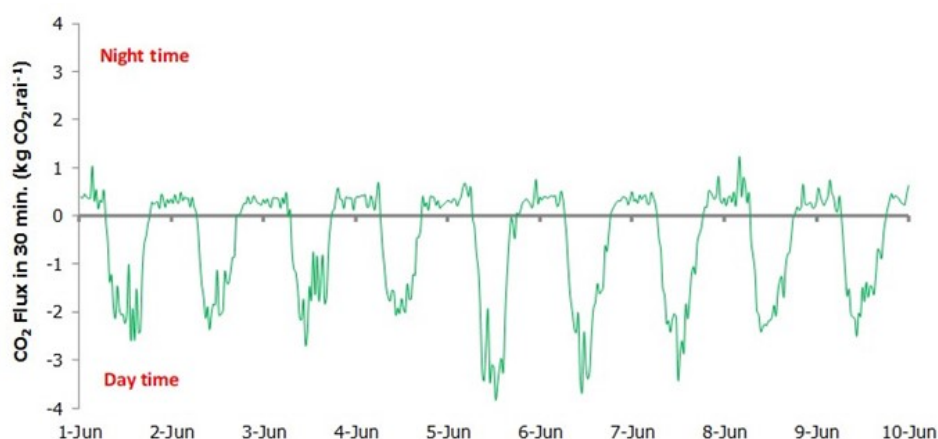
NEE เป็นค่าที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม และปริมาณความเข้มข้นของก๊าซหรือไอน้ำ เพื่อประเมินอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซหรือไอน้ำต่อพื้นที่และเวลา

ตัวอย่างผลการตรวจวัดการแลกเปลี่ยนก๊าซ CO_2 เหนือทรงพุ่มพืช (ภาพที่ 3) ค่าติดลบของค่า CO_2 flux แสดงถึง พืชตรึงก๊าซ CO_2 จากบรรยากาศ โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ส่วนค่าบวกของ CO_2 flux แสดงถึง พืชปลดปล่อยก๊าซ CO_2 สู่บรรยากาศ โดยผ่านทางกระบวนการหายใจในเวลากลางวัน

การเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค Eddy covariance ในระยะเวลาที่ยาวนานจะทำให้มีข้อมูลที่สามารถนำมาคำนวณเพื่อให้ทราบถึง ค่าการตรึงก๊าซ CO_2 สุทธิและการคายระเหยน้ำของพืชที่ปลูกในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ นอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงความอ่อนไหวของระบบนิเวศพืชที่ศึกษาต่ออิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มแสง เป็นต้น โดยข้อมูลเหล่านี้เมื่อนำไปสู่ความสัมพันธ์กับข้อมูลด้านอื่นๆ เช่น การเจริญเติบโต และผลผลิต จะทำให้ทราบอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศต่อพืชที่ศึกษา นอกจากนี้จะทำให้สามารถจัดการการใช้ทรัพยากรการผลิตต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม และได้รับผลกระทบจากความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด เช่น การจัดการให้น้ำ ซึ่งจะมีโอกาสในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีสภาพขาดน้ำยาวนานในรอบปี



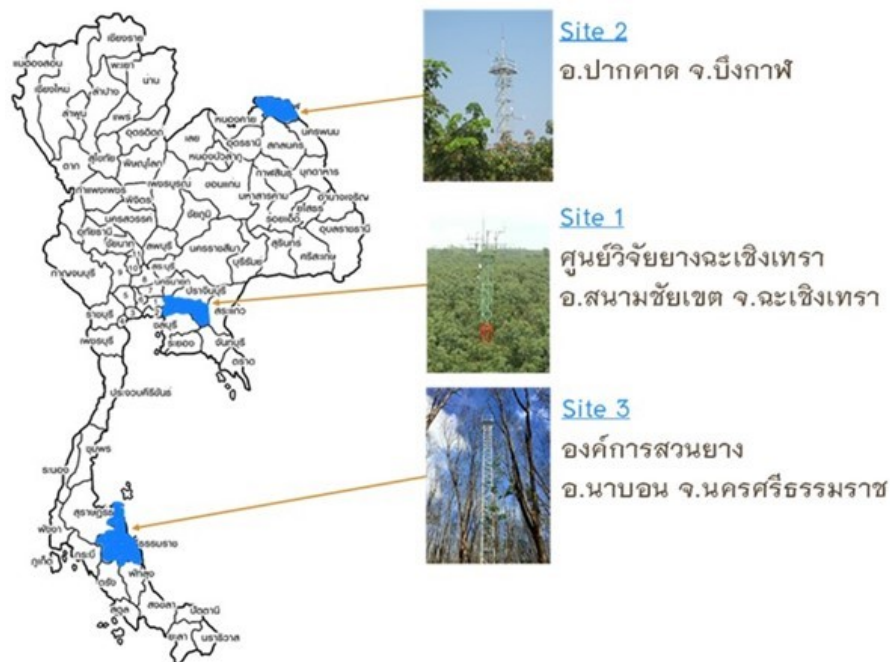
ภาพที่ 2 ชุดอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดฟลักซ์ของคาร์บอนและน้ำด้วยเทคนิค Eddy covariance



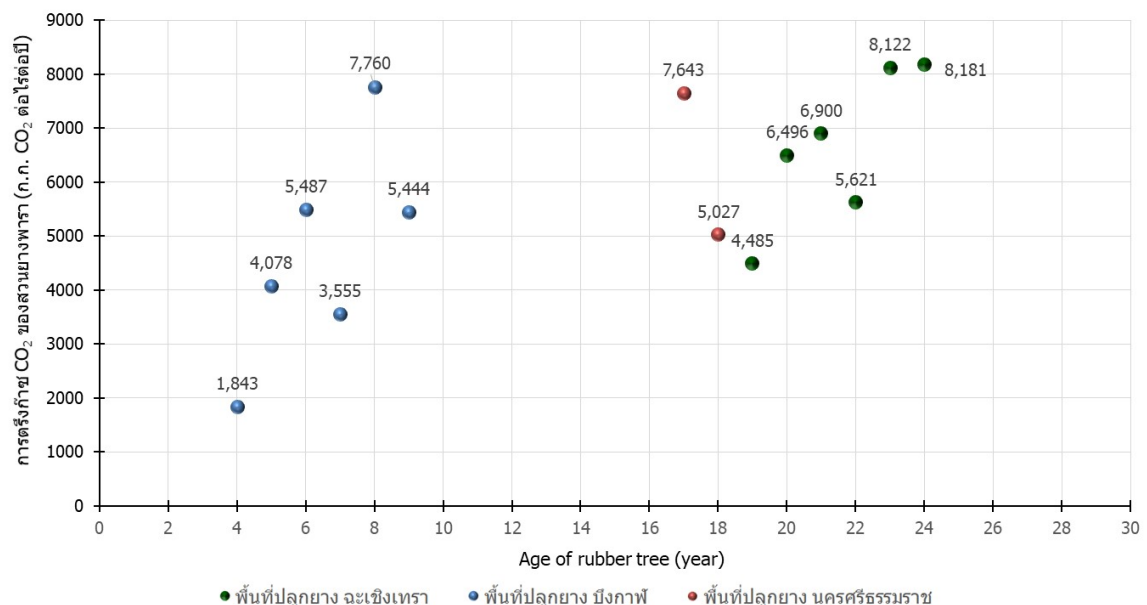
ภาพที่ 3 อัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรอบวันของสวนยางพารา Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ.ฉะเชิงเทรา ในช่วงวันที่ 1 – 9 มิถุนายน 2557

สำหรับพื้นที่ปลูกยางในประเทศไทย ขณะนี้มี Rubber flux tower จำนวน 2 แห่ง ติดตั้งที่ จังหวัดฉะเชิงเทรา และบึงกาฬ ภายใต้การดำเนินงานวิจัยของโครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2555-2558 โดย พูนพิภพและคณะ รับทุนสนับสนุนจาก วช. และ สกว.) และมี Rubber flux tower อีก 1 แห่ง ติดตั้งที่ จังหวัดนครศรีธรรมราช ภายใต้การดำเนินงานวิจัยของโครงการ “ยางธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2561 โดยดวงรัตน์และคณะ รับทุนสนับสนุนจาก วช. และ สกว. โครงการระยะที่ 2 ปีที่ 1) (ภาพที่ 4) การศึกษาสมดุลคาร์บอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา ขณะนี้นักวิจัยสามารถรวบรวมข้อมูลสมดุลคาร์บอนจากพื้นที่ศึกษา 3 แห่ง ได้จำนวน 13 ปี (อายุยางพารา 4-9 และ 18-24 ปี) และข้อมูลที่ได้นั้น แสดงให้เห็นว่า ระบบนิเวศยางพารามีสถานะเป็น Carbon sink หรือ แหล่งกักเก็บคาร์บอน มีการตรึงก๊าซ CO₂ เฉลี่ยของพื้นที่ศึกษาที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 6,634 4,105 และ

5,027 กิโลกรัม CO₂ ต่อไร่ต่อปี ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของอายุต้นยางพารา (4-24 ปี) มีแนวโน้มทำให้ต้นยางพาราสามารถตรึงก๊าซ CO₂ ได้เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 4 พื้นที่ศึกษา 3 แห่ง ได้แก่ (1) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อำเภอสนาบชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา (ภาคตะวันออก) (2) พื้นที่สวนยางของเกษตรกร อำเภopakคาค จังหวัดบึงกาฬ (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) และ (3) องค์การสวนยาง อำเภอนาบอน จังหวัดนครศรีธรรมราช (ภาคใต้)



ภาพที่ 5 การตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของแปลงยางพารา ณ Site ที่ 1 จังหวัดฉะเชิงเทรา (อายุ 19-24 ปี) Site ที่ 2 จังหวัดบึงกาฬ (อายุ 4-9 ปี) และ Site ที่ 3 จังหวัดนครศรีธรรมราช (อายุ 17-18 ปี)

การใช้การสำรวจระยะไกล (Remote sensing) ทางการเกษตร : Satellite

ข้อมูลจากดาวเทียมสำรวจทรัพยากร เป็นข้อมูลที่มีการบันทึกภาพเป็นบริเวณกว้าง ข้อมูลมีความทันสมัย บันทึกข้อมูลได้ในทุกสภาพอากาศ ดาวเทียมโคจรรอบโลกอยู่ตลอดเวลาทำให้สามารถกลับมาบันทึกข้อมูลซ้ำ ณ จุดเดิมได้อย่างสม่ำเสมอ มีช่วงระยะเวลากลับมาบันทึกภาพที่แน่นอน ซึ่งทำให้สามารถนำมาใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หรือปรากฏการณ์ต่างๆ ได้ ข้อมูลจากดาวเทียมสามารถบันทึกภาพได้หลายช่วงคลื่น ตั้งแต่ช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (Visible) ช่วง Near-Infrared (NIR) ไปจนถึงช่วงคลื่นที่มีความยาวคลื่นมากๆ เช่น ไมโครเวฟ ข้อมูลดังกล่าวที่ถูกบันทึกไว้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ พืชพรรณ แหล่งน้ำ รวมทั้งสภาพอากาศได้ นอกจากนี้รายละเอียดเชิงพื้นที่ของข้อมูลดาวเทียมยังมีความหลากหลาย เพื่อให้ผู้ใช้งานเลือกใช้ตามความเหมาะสมกับลักษณะของงานและวัตถุประสงค์ ตั้งแต่รายละเอียดระดับกิโลเมตรเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ระดับประเทศหรือภูมิภาค ไปจนถึงรายละเอียดสูงระดับเซนติเมตรเพื่อความถูกต้องแม่นยำ

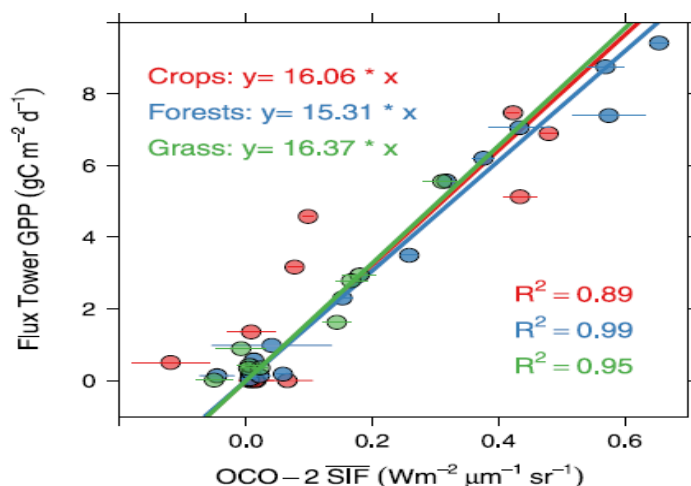
ปัจจุบันการให้บริการข้อมูลจากดาวเทียมได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ทั้งในการศึกษาวิจัย การค้าในเชิงพาณิชย์ การรักษาความมั่นคงของประเทศ การเกษตร การศึกษาสภาพแวดล้อมหรือปรากฏการณ์ต่างๆ บนพื้นผิวโลก ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่าย และข้อมูลบางประเภทยังไม่มีค่าใช้จ่าย หลายองค์กรหรือหน่วยงานจึงมีการนำข้อมูลดาวเทียมมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายรวมทั้งประเทศไทย หลายหน่วยงานมีการนำเอาข้อมูลไปศึกษาวิจัย เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการเกษตร มีการใช้ข้อมูลจากดาวเทียมในการประเมินพื้นที่ปลูกและผลผลิตของพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศ การวิเคราะห์และประเมินสถานะการเจริญเติบโตของพืช รวมทั้งการศึกษาวเคราะห์และประเมินสุขภาพของพืช ดังนั้นการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากดาวเทียมเพื่อใช้ในการศึกษาสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชจะสามารถบ่งบอกถึงสถานะเครียดของพืชได้

การสำรวจจากระยะไกลได้นำหลักการสะท้อนและการดูดซับแสงแต่ละช่วงคลื่นมาประยุกต์ใช้ ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดจะมีความการสะท้อนพลังงานที่แตกต่างกันออกไป โดยพืชพรรณธรรมชาติสะท้อนพลังงานได้ดีในช่วง NIR (700 – 1,300 นาโนเมตร) และในช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ (400-700 นาโนเมตร) นั้น จะสะท้อนพลังงานช่วงคลื่นแสงสีเขียว (500 – 600 นาโนเมตร) ส่วนการสะท้อนพลังงานของดินจะขึ้นอยู่กับปัจจัยบางประการของดิน เช่น ความชื้นในดิน แร่ธาตุในดิน และน้ำจะไม่สะท้อนพลังงานในช่วงอินฟราเรดใกล้ (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2538) จากคุณสมบัติการสะท้อนและดูดซับพลังงานที่ต่างกันในแต่ละช่วงคลื่นของพืชจึงมีการนำข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาด้านการเกษตร เช่น การแยกประเภทของพืชที่เพาะปลูก และการจัดการพื้นที่เพาะปลูก (Lillesand, Kiefer and Chipman, 2004) นอกจากนี้ข้อมูลดาวเทียมยังสามารถใช้ศึกษาสถานภาพและความสมบูรณ์ของพืช โดยพิจารณาจากค่าดัชนีสเปกตรัมต่างๆ เช่น NDVI (normalized difference vegetation index), RVI (ratio vegetation index) และ GNDVI (green normalized difference vegetation index) เป็นต้น

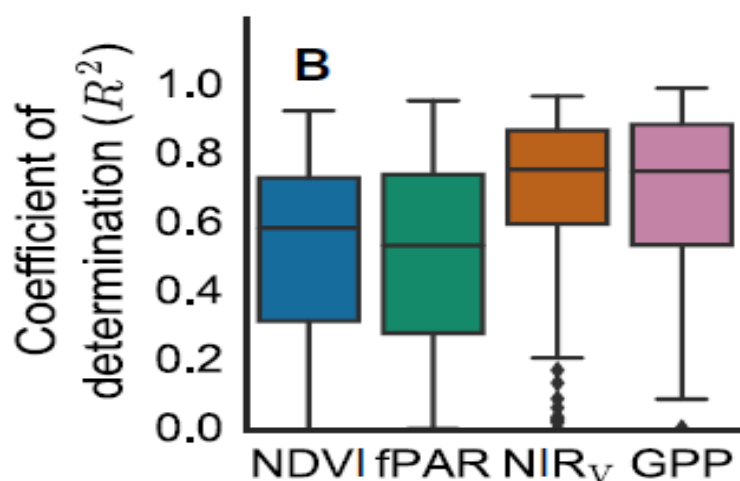
ผลงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล สามารถนำมาคำนวณค่าดัชนีต่างๆ ได้แก่ vegetation condition index (VCI), vegetation health index (VHI), fPAR, NDVI, GPP, NIRv, และ SIF เป็นต้น โดยดัชนี SIF จากดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) สามารถอธิบายความแปรปรวนของ gross

primary production (GPP, ค่าที่ถูกใช้ในการบ่งชี้สุขภาพพืช และสามารถตรวจวัดจริงด้วยเทคนิค Eddy covariance บน tower) ของทุ่งหญ้า พืชปลูก และพื้นที่ป่าที่ศึกษาในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มากถึง 89 - 99% (Sun *et al.*, 2017; ภาพที่ 6) ในขณะที่ดัชนี fPAR, NDVI, GPP, NIRv จาก MODIS สามารถอธิบายความแปรปรวนของ gross primary production ของระบบนิเวศน์ต่างๆ ที่ตรวจวัดจริงด้วยเทคนิค Eddy covariance บน tower จำนวนมากถึง 105 แห่งทั่วโลกได้อย่างมีนัยสำคัญ (Badgley *et al.*, 2017; ภาพที่ 7)



ภาพที่ 6 ดัชนี SIF จากดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) อธิบายความแปรปรวนของ gross primary production (GPP) ที่ตรวจวัดจริงด้วยเทคนิค Eddy covariance บน flux tower ของทุ่งหญ้า พืชปลูกและพื้นที่ป่าที่ศึกษาในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มากถึง 89 - 99% (Sun *et al.*, 2017)



ภาพที่ 7 ดัชนี fPAR, NDVI, GPP, NIRv จาก MODIS สามารถอธิบายความแปรปรวนของ gross primary production ของระบบนิเวศน์ต่างๆ ที่ตรวจวัดจริงด้วยเทคนิค Eddy covariance บน tower จำนวนมากถึง 105 แห่งทั่วโลก ได้อย่างมีนัยสำคัญ (Badgley *et al.*, 2017)

4. การดำเนินงานวิจัย

4.1 พื้นที่ศึกษา

ตามที่โครงการวิจัย “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” ซึ่งมี ศ.ดร. อรรถชัย จินตะเวช เป็นหัวหน้าโครงการนั้น ให้ทีมนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดำเนินงานด้านการประเมินการเก็บกักคาร์บอน และนำข้อมูลไปเชื่อมโยงกับ โครงการดังกล่าว กำหนดพื้นที่ศึกษาไว้ 8 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดเชียงราย น่าน หนองคาย บึงกาฬ ฉะเชิงเทรา ระยอง สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช

ส่วนการพัฒนานวัตกรรม อันได้แก่ ดัชนีสเปกตรัม (spectral index) ที่ใช้ในการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงเข้ามาในแปลงยางพาราที่ตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance ซึ่งนักวิจัยมีข้อมูลอยู่นั้น เป็นข้อมูลของพื้นที่ปลูกยางพารา 3 แห่ง ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ศึกษาของโครงการดังกล่าวข้างต้น อีกทั้งพื้นที่ทั้งสามยังมีการเก็บข้อมูลต่อเนื่องที่ยาวนาน ดังนั้น นักวิจัยจะดำเนินการพัฒนาดัชนีสเปกตรัมจากพื้นที่ศึกษา 3 จังหวัดนี้ ก่อน แล้วจึงนำค่าดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมมาใช้ในการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราอีก 5 จังหวัดภายใต้โครงการวิจัย “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” ในลำดับต่อไป

พื้นที่ศึกษาซึ่งมี Rubber flux tower จำนวน 2 แห่ง ติดตั้งที่จังหวัดฉะเชิงเทรา และบึงกาฬ ภายใต้การดำเนินงานวิจัยของโครงการ “การศึกษาสมดุลงานคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2555-2558 โดย พูนพิภพและคณะ ทุนสนับสนุนจาก วช. และ สกว.) และมี Rubber flux tower อีก 1 แห่ง ติดตั้งที่จังหวัดนครศรีธรรมราช ภายใต้การดำเนินงานวิจัยของโครงการ “ยางธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: การศึกษาสมดุลงานคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2561 โดย ดวงรัตน์และคณะ ทุนสนับสนุนจาก วช. และ สกว. โครงการระยะที่ 2 ปีที่ 1) พื้นที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 3 เขตพื้นที่ ที่เป็นตัวแทนของ 3 ภูมิภาค ได้แก่

(1) Site ที่ 1 ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา

ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา (ละติจูด $13^{\circ}34'21.97''N$ ลองจิจูด $101^{\circ}28'5.53''E$ ความสูงจากระดับน้ำทะเล 69 เมตร) ตั้งอยู่ที่อำเภอสนาชยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา แปลงทดลองตั้งอยู่กลางศูนย์วิจัย มีเนื้อที่ประมาณ 50 ไร่ ปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 24 ปี ในปี พ.ศ. 2561 ระยะปลูก 2.5×7 เมตร และเปิดกรีดมาแล้ว 18 ปี ดินในพื้นที่ปลูกยางเป็นชุดดินกบินทร์บุรี ความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดยางพารา นักวิจัยได้สร้างหอคอยสูง 25 เมตร และเป็นพื้นที่ตัวแทนของแหล่งปลูกยางทางภาคตะวันออก

(2) Site ที่ 2 พื้นที่สวนยางของเกษตรกร จังหวัดบึงกาฬ

แปลงเกษตรกร (ละติจูด $18^{\circ}13'22.77''N$ ลองจิจูด $103^{\circ}18'59.46''E$ ความสูงจากระดับน้ำทะเล 200 เมตร) ตั้งอยู่ที่อำเภอบึงสามพัน จังหวัดบึงกาฬ อยู่ในเขตพื้นที่การปลูก

สร้างสวนยางพารา ระยะที่ 3 แปรแสนไร่ และต่อเนื่องจากระยะที่ 2 หนึ่งล้านไร่ มีเนื้อที่ประมาณ 100 ไร่ ปลูกลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 9 ปี ในปี พ.ศ. 2561 ระยะปลูก 3 x 7 เมตร และเปิดกรีดมาแล้ว 1 ปี ดินในพื้นที่ปลูกยางเป็นชุดดินโพพิสัย พื้นที่มีความลาดชันของพื้นที่ค่อนข้างต่ำ มีความสม่ำเสมอของเรือนยอดยางพารา นักวิจัยได้สร้างหอคอยสูง 15 เมตร และเป็นพื้นที่ตัวแทนของแหล่งปลูกยางทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

(3) Site ที่ 3 องค์การสวนยาง จังหวัดนครศรีธรรมราช

แปลงยางพาราขององค์การสวนยาง (ละติจูด N 8°19'9"N ลองจิจูด 99° 35'12"E) ตั้งอยู่ที่อำเภอนาบอน จังหวัดนครศรีธรรมราช มีเนื้อที่ประมาณ 100 ไร่ ปลูกลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุต้นยาง 16 ปี ในปี พ.ศ. 2561 นักวิจัยได้สร้างหอคอยสูง 25 เมตร และเป็นพื้นที่ตัวแทนของแหล่งปลูกยางทางภาคใต้ ซึ่งเป็นภูมิภาคที่มีการผลิตรายางพาราดั้งเดิมของประเทศไทย มีการผลิตรายางพารามากที่สุดเป็นร้อยละ 72 ของทั้งประเทศในปี 2558 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559)

4.2 ข้อมูลพลั๊กซ์ของคาร์บอนของแปลงยางพารา (ต้นยางพารา ดิน พืชและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ) จากการตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance

นักวิจัยจะนำข้อมูลของพื้นที่ปลูกยางพารา 3 แห่ง ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และ นครศรีธรรมราช จากโครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2555-2558 โดย พูนพิภพและคณะ) และโครงการ “ยางธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: การศึกษาสมดุลคาร์บอน และน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2561 โดยดวงรัตน์และคณะ) ซึ่งเป็นข้อมูลสะสมรายวัน คำนวณเป็นข้อมูลการตรึงคาร์บอนสุทธิ (NEE) สะสมรายเดือน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับดัชนีสเปกตรัมต่างๆ ที่ประเมินได้จากข้อมูลการสำรวจระยะไกล (Remote sensing) ซึ่งได้จากดาวเทียม

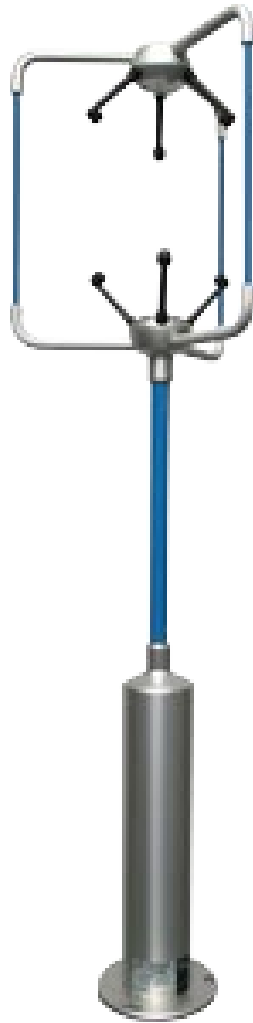
การตรวจวัดพลั๊กซ์คาร์บอนของแปลงยางพาราด้วยเทคนิค Eddy covariance ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดประกอบด้วย

- เครื่องวัดความเร็วและทิศทางการลม แบบ 3 มิติ (ความเร็วลมในทิศทาง x, y, z) (Sonic anemometer) รุ่น Wind Master Pro™ (Gill Instrument, USA)
- เครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในอากาศ ระบบเปิด (Enclosed Analyzer) รุ่น LI-7500 (Li-COR Inc., USA)
- เครื่องควบคุมบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ (Analyzer Interface Unit) รุ่น LI-7550 (Li-COR Inc., USA)

ตารางที่ 2 ข้อมูลพื้นฐานของแปลงยางพาราใน 3 พื้นที่ ได้แก่ ฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช

ข้อมูลของพื้นที่ศึกษา	Site 1 ฉะเชิงเทรา (ตะวันออก)	Site 2 บึงกาฬ (ตะวันออกเฉียงเหนือ)	Site 3 นครศรีธรรมราช (ใต้)
ที่ตั้ง	ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา อ. สนาบชัยเขต	แปลงเกษตรกร อ. ปากคาด	องค์การสวนยาง อ. นาบอน
พิกัด	ละติจูด $13^{\circ}34'21.97''N$ ลองจิจูด $101^{\circ}28'5.53''E$	ละติจูด $18^{\circ}13'22.77''N$ ลองจิจูด $103^{\circ}18'59.46''E$	ละติจูด $8^{\circ}19'9''N$ ลองจิจูด $99^{\circ}35'12''E$
ความสูงจากระดับน้ำทะเล (m)	69	200	50
ความลาดเอียงของพื้นที่	$< 4^{\circ}$	$< 4^{\circ}$	$< 4^{\circ}$
ชุดดิน	กบินทร์บุรี	โพนพิสัย	อยู่ระหว่างการหาข้อมูล
ขนาดพื้นที่ปลูก (ไร่)	50	100	100
พันธุ์ยาง	RRIM 600	RRIM 600	RRIM 600
ระยะปลูก (m)	2.5×7	3×7	3×7
ความหนาแน่นของต้นยาง (ต้น/ไร่)	91	76	76
ปีที่ปลูกยาง	2537	2552	2544
อายุต้นยาง (ปี, ปี 2561)	24	9	16
ปีที่เปิดกรีด	2543	2560	2550
อายุการกรีดยาง (ปี, ปี 2561)	18	1	10
ระบบกรีด	s2d2	s2d3	s2d2
ความสูงของ Tower (m)	25	15	25
ค่าเฉลี่ยความสูงของต้น ยางพารา (m)	20	13	21
การให้น้ำ	อาศัยน้ำฝน	อาศัยน้ำฝน	อาศัยน้ำฝน
การใส่ปุ๋ย (ครั้ง/ปี)	2	2	2
การใช้สารกำจัดศัตรูพืช (ใช้รีเปล่า / ก็ครั้งต่อปี)	เครื่องตัดหญ้า 1 ครั้ง/ปี	เครื่องตัดหญ้า 1 ครั้ง/ปี	เครื่องตัดหญ้า 1 ครั้ง/ปี
ปริมาณฝนเฉลี่ย (mm) (ปี 2561)	1981	1732	4552
อุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}C$) (ปี 2561)	26.7	25.5	26.4

หมายเหตุ - ระบบกรีดแบบ s2d2 คือ การกรีดครั้งลำต้น กรีดวันเว้นวัน และ s2d3 คือ การกรีดครั้งลำต้น กรีดวันเว้น 2 วัน



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 8 ชุดอุปกรณ์ Eddy covariance ซึ่งประกอบด้วย (a) เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม แบบ 3 มิติ (b) เครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในอากาศ ระบบเปิด และ (c) เครื่องควบคุมบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ

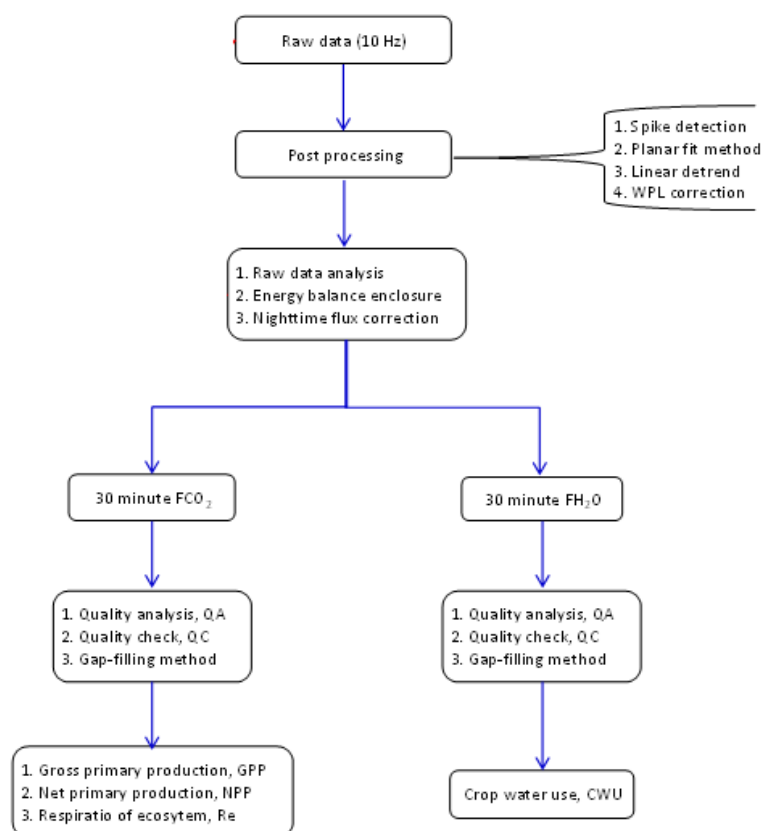
ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ ซึ่งประกอบด้วย Data acquisition system เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ (Vaisala, HMP155) เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน (Texas Electronics, TR-525M) Quantum sensor และ Pyranometer เครื่องวัดปริมาณรังสีสุทธิ (Kipp & Zonen, NRLite2) เครื่องวัดอุณหภูมิดิน (Stevens Hydra Probe) และ Soil heat flux plates (HukseFlux, HFP01) ความถี่ในการวัดค่าและการบันทึกค่าที่วัดได้ของชุดอุปกรณ์ Eddy covariance และชุดอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศจะเป็นไปตามคำสั่งที่นักวิจัยโปรแกรมในเครื่องควบคุมและบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ คือ มีการบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 20 Hz หรือ 20 ครั้งต่อวินาที ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ข้อมูลที่วัดได้จะถูกบันทึกลงในการ์ดบันทึกข้อมูลขนาดความจุ 2 GB (Compact flash) ซึ่งติดตั้งอยู่ในเครื่องควบคุมและบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งระบบการส่งข้อมูลผ่านทางสัญญาณโทรศัพท์ สำหรับตรวจสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ นักวิจัยจะเดินทางมา download ข้อมูลและตรวจสอบสภาพการทำงาน ของชุดอุปกรณ์ทุก 2 สัปดาห์ การทำงานของชุดอุปกรณ์ทั้งหมดอาศัยพลังงานจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cell) ซึ่งนักวิจัยจะติดตั้งไปพร้อมๆ กับชุดอุปกรณ์วิจัยดังกล่าวข้างต้น

การคำนวณปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงเข้ามาในระบบนิเวศพืช (net ecosystem exchange, NEE หรือ F_{CO_2}) ด้วยเทคนิค Eddy covariance (Goulden *et al.*, 1996) เป็นการคำนวณจาก covariance ระหว่างความแปรปรวนความเร็วลมในแนวตั้ง (w') และความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($[CO_2]$) ดังสมการที่ (2)

$$NEE = F_{CO_2} = \overline{\rho w' [CO_2]'} \quad (2)$$

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/> นักวิจัยได้เขียนโปรแกรมคำนวณตามวิธีมาตรฐานดังขั้นตอนการคำนวณของ รูปที่ 9 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



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการคำนวณอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและอัตราการใช้น้ำของพื้นที่ปลูกข้าว

4.3 การประเมินการเก็บกักคาร์บอนด้วยการคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

ใช้ข้อมูลขนาดเส้นรอบวงของต้นไม้ยางพาราที่ระดับความสูง 1.7 เมตร จากพื้นดิน ระยะเวลาเก็บข้อมูล 2555-2562 โดยพื้นที่ปลูกยางพารา (1) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จ. ฉะเชิงเทรา (อายุยางพารา 19-24 ปี) เป็นข้อมูลปี พ.ศ. 2556-2561 (2) แปลงเกษตรกร จ.บึงกาฬ (อายุยางพารา 3-10 ปี) เป็นข้อมูล ปี พ.ศ. 2555-2562 และ (3) องค์การสวนยาง จ. นครศรีธรรมราช (อายุยางพารา 15-19 ปี) ปี พ.ศ. 2558-2562

นำข้อมูลเส้นรอบวงที่ตรวจวัดมาคำนวณหามวลชีวภาพ ด้วยสมการ

$$Y = 0.0082X^{2.5623} \quad (3)$$

เมื่อ Y คือ มวลชีวภาพ (กก. ต่อดัน) และ X คือ ขนาดเส้นรอบวง (ซม.) (อาร์ักษ์ และคณะ, 2551) นำปริมาณมวลชีวภาพที่คำนวณได้มาหาค่าปริมาณคาร์บอนที่เก็บกักสะสม โดยนำค่าสัดส่วนคาร์บอนที่เก็บกักในต้นยางพารา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4452 ของปริมาณมวลชีวภาพทั้งหมด (อาร์ักษ์ และคณะ, 2551) จากนั้นวิเคราะห์เป็นมวลชีวภาพและปริมาณการเก็บกักคาร์บอนต่อหน่วยพื้นที่

4.4 ข้อมูลการสำรวจระยะไกลของพื้นที่ปลูกยางพารา

ข้อมูลดัชนีสเปกตรัมจากดาวเทียม นั้น GISTDA หรือ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบในการจัดหาข้อมูลดังกล่าว โดยใช้ดัชนีสเปกตรัมที่มาจาก (1) ดาวเทียม Terra ระบบ MODIS โดยศึกษาดัชนีสเปกตรัมที่ต่างชนิดกัน จำนวน 5 ดัชนี ได้แก่ NDVI (normalized difference vegetation index), EVI (enhanced vegetation index), GPP (gross primary productivity), fPAR (fraction of photosynthetically active radiation) และ LAI (leaf area index) และ (2) ดาวเทียม Sentinel-2 ซึ่งดาวเทียม Sentinel-2 นี้เป็นดาวเทียมสำรวจโลกภายใต้ EU Copernicus Programme ประกอบด้วยดาวเทียมคู่แฝดสองดวง คือ Sentinel-2A และ Sentinel-2B มีระบบบันทึกภาพทั้งหมด 13 ช่วงคลื่น ทั้งช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (visible), near infrared และ short wave infrared มีรายละเอียดเชิงพื้นที่ 10, 20 และ 60 เมตร ขึ้นอยู่กับช่วงคลื่นที่บันทึกภาพ ข้อมูลจากดาวเทียม Sentinel-2 จะถูกนำมาปรับแก้ Radiometric correction เพื่อปรับแก้ค่าของจุดภาพที่คลาดเคลื่อนจากการบันทึก ซึ่งอาจเกิดจากสัญญาณรบกวนจากชั้นบรรยากาศ เพื่อปรับแก้ข้อมูลให้มีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการประมวลผลมากยิ่งขึ้น จากนั้นจึงดำเนินการวิเคราะห์หาค่าดัชนีสเปกตรัมต่างๆ เช่น ค่า NDVI, SAVI, LAI, FAPAR และ NDRE เป็นต้น

(1) การวิเคราะห์ดัชนีสเปกตรัมจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS

วิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม MODIS โดยศึกษาดัชนีพืชพรรณที่ต่างชนิดกัน จำนวน 5 ดัชนี ได้แก่ NDVI (normalized difference vegetation index), EVI (enhanced vegetation index), GPP (gross primary productivity), fPAR (fraction of photosynthetically active radiation) และ LAI (leaf area index) (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 รายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Terra ระบบ MODIS

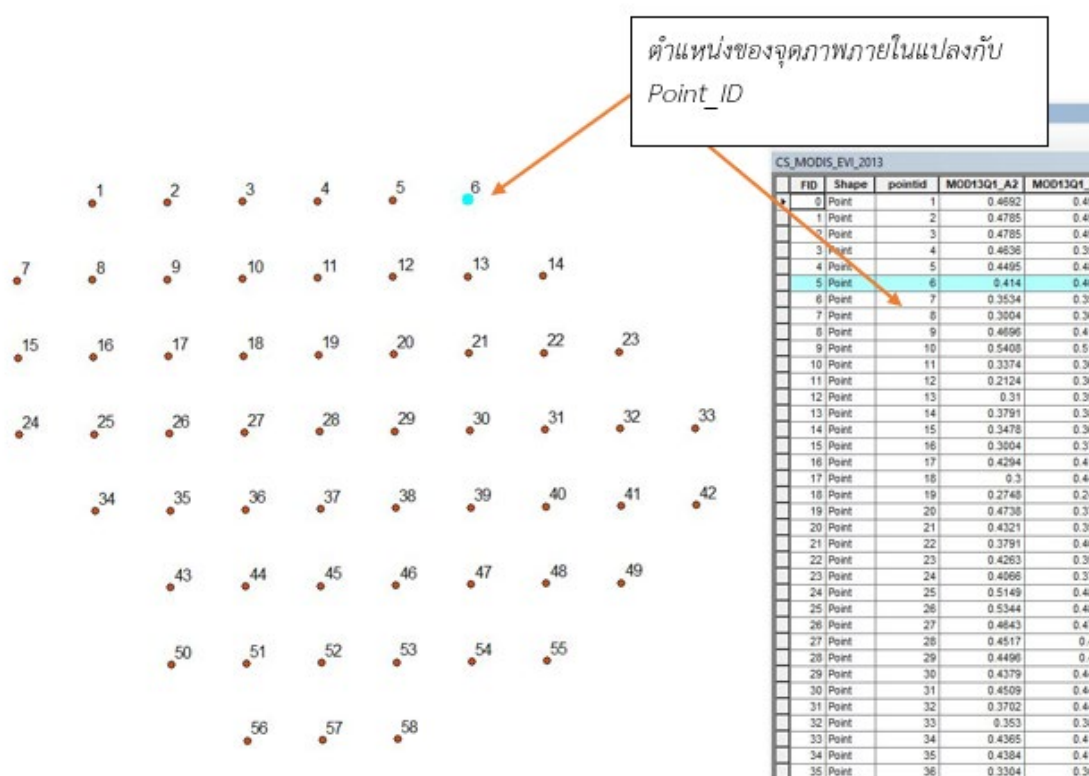
ลำดับ	ดัชนี	ชุดผลิตภัณฑ์	รายละเอียดเชิงพื้นที่	ช่วงเวลาที่ยืนยันข้อมูล	ความถี่
1	NDVI	MOD13Q1	250 m	พ.ศ. 2556 - 2561	ทุก 16 วัน
2	EVI	MOD13Q1			
3	GPP	MOD15A2H	500 m	พ.ศ. 2556 - 2561	ทุก 8 วัน
4	FPAR	MOD17A2H			
5	LAI	MOD17A2H			

การวิเคราะห์ข้อมูลรายแปลงของดัชนีสเปกตรัมจากดาวเทียม MODIS นักวิจัยดำเนินการสกัดข้อมูลดัชนีสเปกตรัมเป็นรายจุดภาพทุกจุดภาพที่อยู่ภายในพื้นที่แปลงแต่ละแปลง โดยค่าดัชนีสเปกตรัมที่สกัดได้จะเรียงลำดับตามวันที่ โดยมีชื่อและวันที่กำกับในแต่ละคอลัมน์ ดังนี้

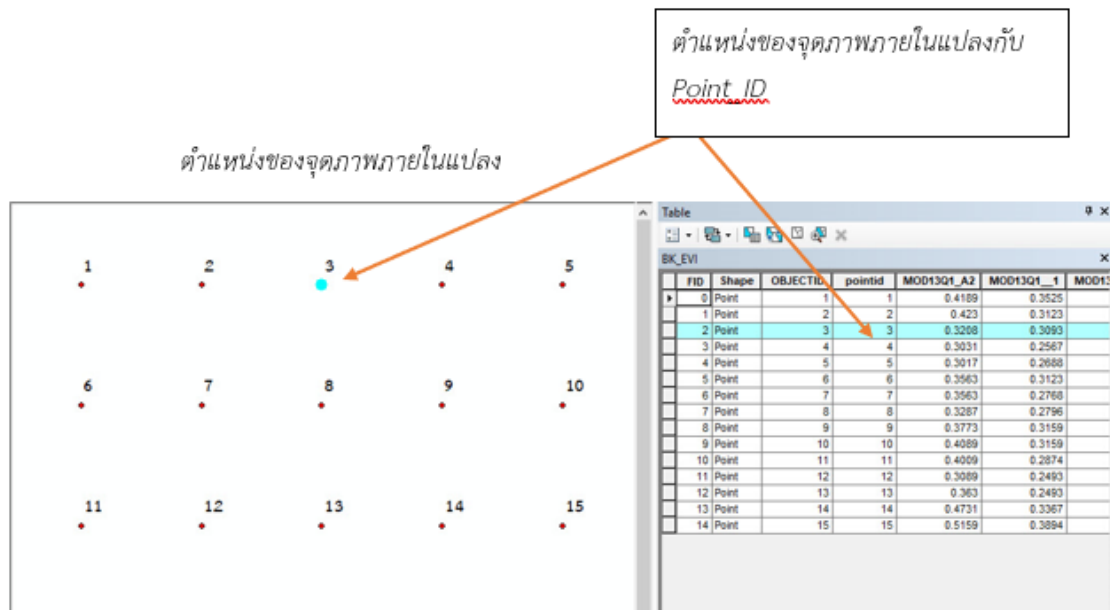
ndvi_2019001

ชื่อดัชนี_วันที่ตาม Julian date

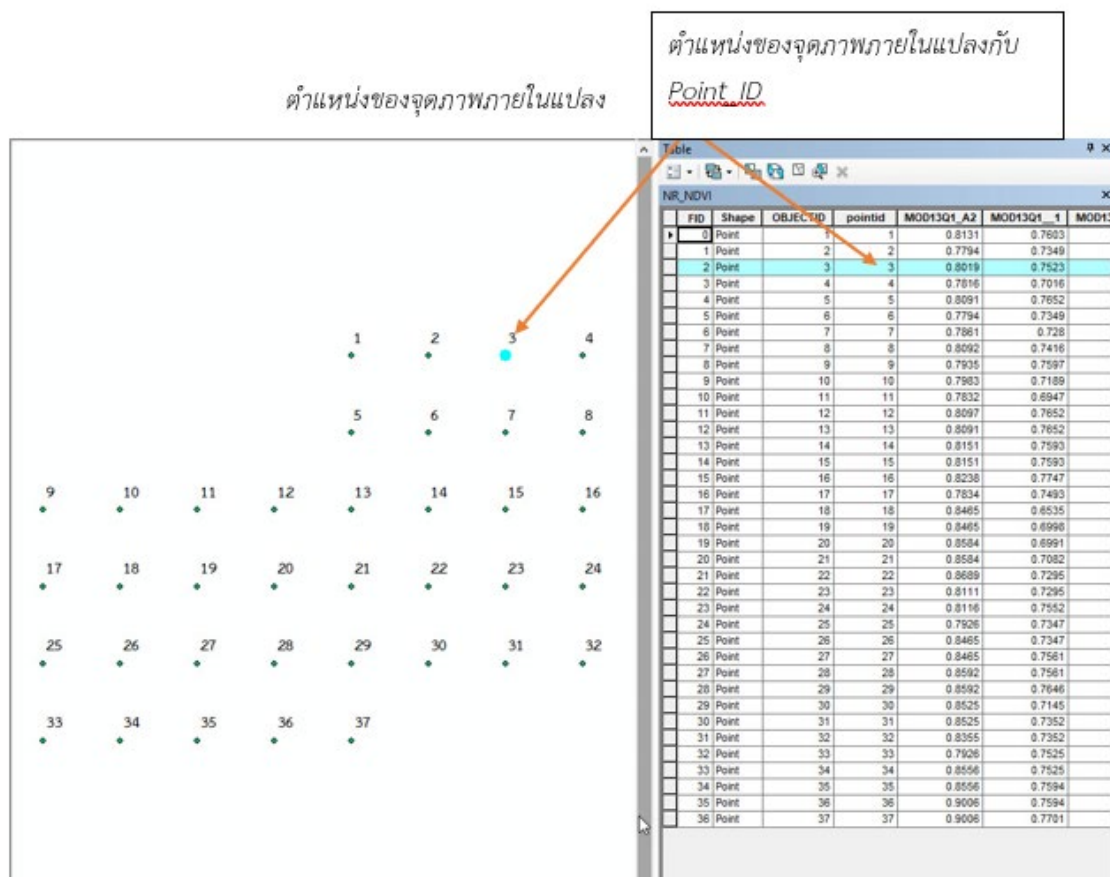
ส่วนหมายเลขของแต่ละแถว ของคอลัมน์ Point_ID จะแสดงลำดับหมายเลขของจุดภาพในแปลง โดยเรียงจากจุดภาพบนลงล่าง และซ้ายไปขวา ซึ่งสามารถดูตำแหน่งของจุดภาพได้จากไฟล์ CS_MODIS_points.shp อยู่ภายในโฟลเดอร์ CRRC_MODIS, BK_Modis และ NR_Modis สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช ตามลำดับ โดยแสดงข้อมูลอยู่ในรูปแบบ point



ภาพที่ 10 ข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพาราฉะเชิงเทรา



ภาพที่ 11 ข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพาราบึงกาฬ



ภาพที่ 12 ข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพารานครศรีธรรมราช

(2) การวิเคราะห์ดัชนีสเปกตรัมจากดาวเทียม Sentinel-2

Sentinel-2 เป็นภารกิจสำรวจโลกภายใต้ EU Copernicus Programme ขึ้นโคจรเมื่อวันที่ 23 มิถุนายน 2558 และ 1 มีนาคม 2560 สำหรับ Sentinel-2A และ Sentinel-2B ตามลำดับ มีระบบบันทึกภาพทั้งหมด 13 ช่วงคลื่น ทั้งช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (visible), near infrared และ short wave infrared มีรายละเอียดเชิงพื้นที่ 10, 20 และ 60 เมตร ขึ้นอยู่กับช่วงคลื่นที่บันทึกภาพ มีการบันทึกข้อมูลซ้ำทุกๆ 5 วัน ข้อมูลจากดาวเทียม Sentinel-2 จะถูกนำมาปรับแก้ Radiometric correction เพื่อปรับแก้ค่าของจุดภาพที่คลาดเคลื่อนจากการบันทึก ซึ่งอาจเกิดจากสัญญาณรบกวนจากชั้นบรรยากาศ เพื่อปรับแก้ข้อมูลให้มีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการประมวลผลมากยิ่งขึ้น จากนั้นจึงดำเนินการวิเคราะห์ดัชนีสเปกตรัม โดยใช้โปรแกรม SNAP โดยจำแนกเป็นการวิเคราะห์หา Biophysical processor (LAI และ fAPAR เป็นต้น) การวิเคราะห์ vegetation index, soil index และ water index และการวิเคราะห์ index อื่นนอกเหนือจากที่โปรแกรม SNAP กำหนดมาให้ เช่น การวิเคราะห์ EVI เป็นต้น ค่าดัชนีสเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้จากข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 ประกอบด้วยดัชนีทั้งหมด 39 ดัชนี ดังแสดงในตารางที่ 5

การวิเคราะห์ข้อมูลรายแปลงของดัชนีสเปกตรัมจากดาวเทียม Sentinel-2 มีข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 (ค.ศ. 2016) นักวิจัยดำเนินการ สกัดข้อมูลดัชนีสเปกตรัมเป็นรายจุดภาพทุกจุดภาพที่อยู่ในพื้นที่แปลงแต่ละแปลง โดยค่าดัชนีสเปกตรัมที่สกัดได้จะเรียงลำดับตามวันที่ โดยมีชื่อและวันที่กำกับในแต่ละคอลัมน์ ดังนี้

ndvi_20160103

ชื่อดัชนี_ปีเดือนวัน

ส่วนหมายเลขของแต่ละแถว ของคอลัมน์ Point_ID จะแสดงลำดับหมายเลขของจุดภาพในแปลง โดยเรียงจากจุดภาพบนลงล่าง และซ้ายไปขวา ซึ่งสามารถดูตำแหน่งของจุดภาพได้จากไฟล์ CS_2016_points.shp อยู่ภายในโฟลเดอร์ CRRC_2016 ซึ่งจะเป็นข้อมูลของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา ปี ค.ศ. 2016 โดยแสดงข้อมูลอยู่ในรูปแบบ point ส่วนโฟลเดอร์ Sentinel_2016 เป็นไฟล์ข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 สีธรรมชาติ ปี ค.ศ. 2016 ตามข้อมูลวันที่ใช้งาน ตัดภาพตามขอบเขตแปลง ซึ่งผู้วิเคราะห์สามารถตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลดาวเทียมแต่ละวัน ของแต่ละจุดภาพได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลภาพดาวเทียมสีผสมกับข้อมูล shape file

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบรายละเอียดของดาวเทียม Terra ระบบ MODIS และ Sentinel-2

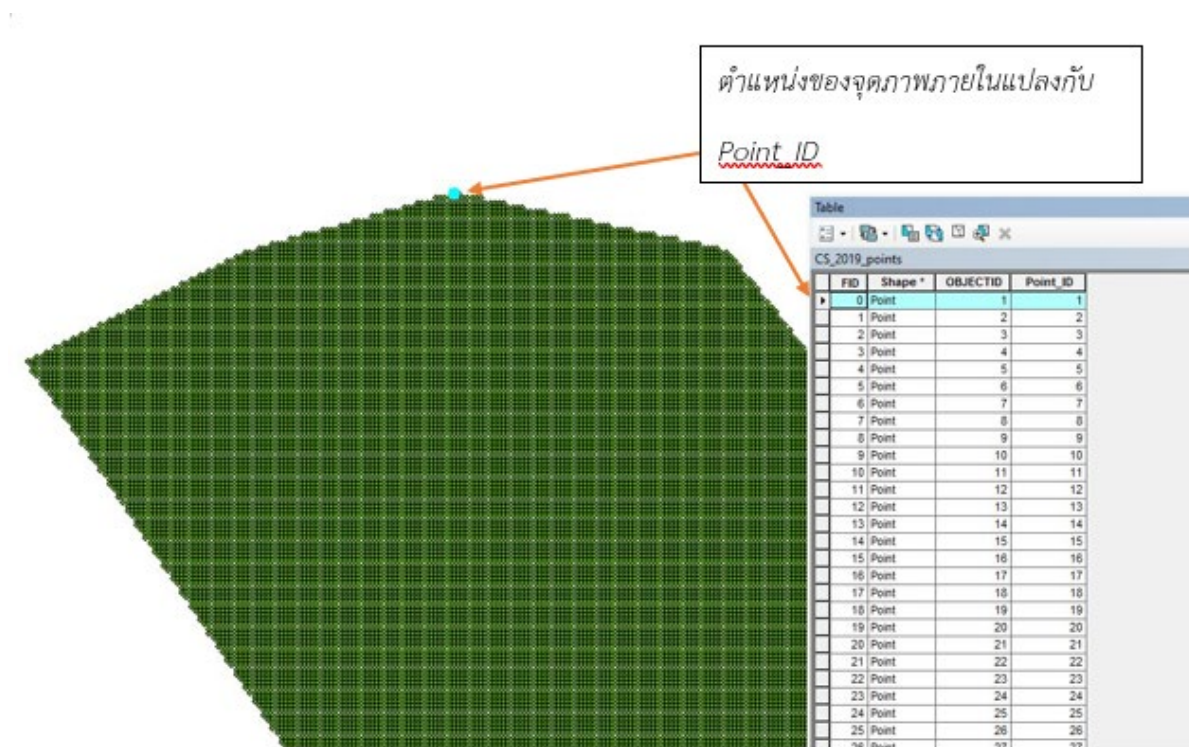
รายละเอียด	MODIS	Sentinel-2
วันที่ขึ้นสู่วงโคจร	18 ธันวาคม 2542	23 มิถุนายน 2558 (2A) 1 มีนาคม 2560 (2B)
รายละเอียดเชิงพื้นที่	250, 500 และ 1000 เมตร	10, 20 และ 60 เมตร
ความถี่	ทุก 8 และ 16 วัน	ทุก 5 วัน
จำนวนดัชนีที่ได้	5	39

ตารางที่ 5 ดัชนีสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลของดาวเทียม Sentinel-2 จำนวน 39 index

Layer	Index	Description
1	NDVI	normalized difference vegetation index
2	SAVI	soil adjusted vegetation index
3	TSAVI	transformed soil adjusted vegetation index
4	MSAVI	modified soil adjusted vegetation index
5	MSAVI2	second modified soil adjusted vegetation index
6	DVI	difference vegetation index
7	RVI	ratio vegetation index
8	PVI	perpendicular vegetation index
9	IPVI	infrared percentage vegetation index
10	WDVI	weighted difference vegetation index
11	TNDVI	transformed normalized difference vegetation index
12	GNDVI	green normalized difference vegetation index
13	GEMI	global environmental monitoring index
14	ARVI	atmospherically resistant vegetation index
15	NDI45	normalized difference index
16	MTCI	meris terrestrial chlorophyll index
17	MCARI	modified chlorophyll absorption ratio index
18	REIP	red-edge inflection point index
19	S2REP	sentinel-2 red-edge position index
20	IRECI	inverted red-edge chlorophyll index
21	PSSRa	pigment specific simple ratio
22	BI	brightness index
23	BI2	second brightness index
24	RI	redness index
25	CI	colour index
26	NDWI	normalized difference water index
27	NDWI2	second normalized difference water index
28	MNDWI	modified normalized difference water index
29	NDPI	normalized difference pond index (or NHI: normalized humidity index)
30	NDTI	normalized difference turbidity index
31	LAI	leaf area index
32	FAPAR	fraction of absorbed photosynthetically active radiation
33	FCOVER	fraction of vegetation cover
34	LAI_CAB	chlorophyll content in the leaf
35	LAI_CW	canopy water content
36	EVI	enhanced vegetation index
37	NDRE	normalized difference red-edge index
38	NDRE2	normalized difference red-edge index 2
39	VARI	visible atmospheric resistant index

ตารางที่ 6 ข้อมูลดัชนีสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลของดาวเทียม Sentinel-2 แปลงยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช ปี พ.ศ. 2559 - 2561

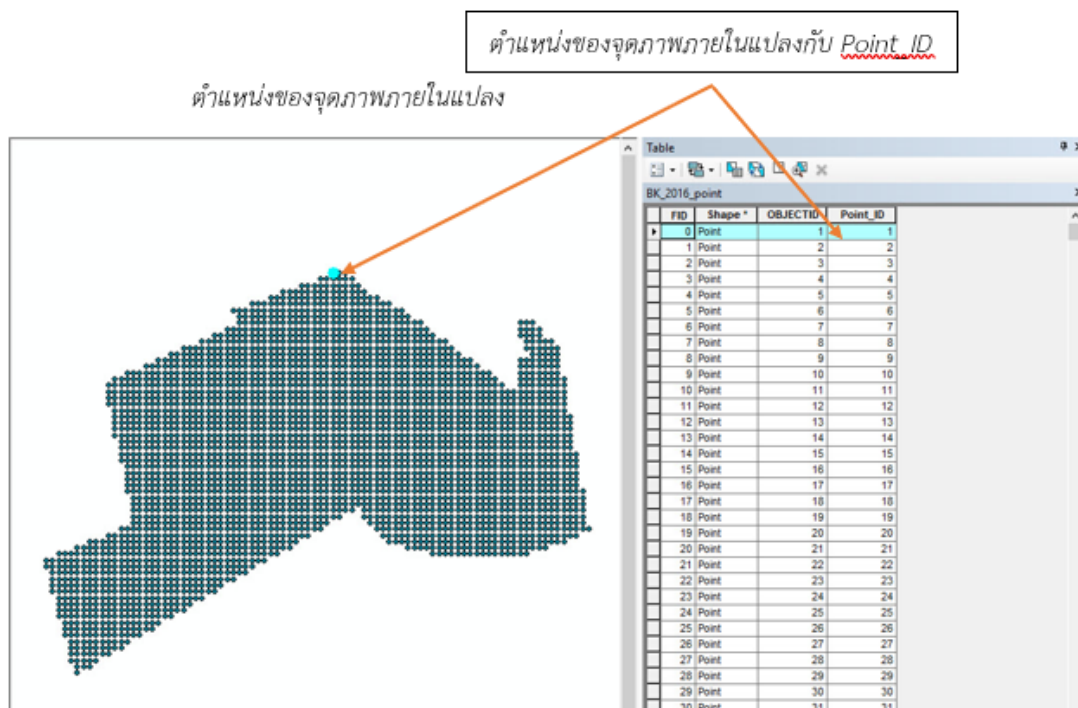
รายละเอียด	จำนวนวันที่มีข้อมูลดัชนีสเปกตรัม		
	ปี 2559 (2016)	ปี 2560 (2017)	ปี 2561 (2018)
ฉะเชิงเทรา	5	21	29
บึงกาฬ	19	21	34
นครศรีธรรมราช	6	7	21



ภาพที่ 13 ตัวอย่างข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพาราฉะเชิงเทรา



ภาพที่ 14 ตัวอย่างข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 สีส้มธรรมชาติ แปลงยางพาราฉะเชิงเทรา วันที่ 2 มกราคม 2562



ภาพที่ 15 ตัวอย่างข้อมูล shape file แสดงตำแหน่งจุดภาพของแปลงยางพาราบึงกาฬ



ภาพที่ 18 ตัวอย่างข้อมูลดาวเทียม Sentinel-2 สีสผสมธรรมชาติ แปลงยางพารา นครศรีธรรมราช วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2559

4.5 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ความชื้นแสง และปริมาณฝน ข้อมูลดังกล่าวนี้มีการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลไปพร้อมๆ กับการตรวจวัดการเก็บกักคาร์บอนของต้นยางพาราของพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 จังหวัด ข้อมูลดังกล่าวนี้จะถูกจัดให้อยู่ใน scale เดียวกับข้อมูลการเก็บกักคาร์บอนของต้นยางพารา เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวนี้มาวิเคราะห์หาอิทธิพลของสภาพภูมิอากาศต่อการตรึงคาร์บอนด้วยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของแปลงยางพารา

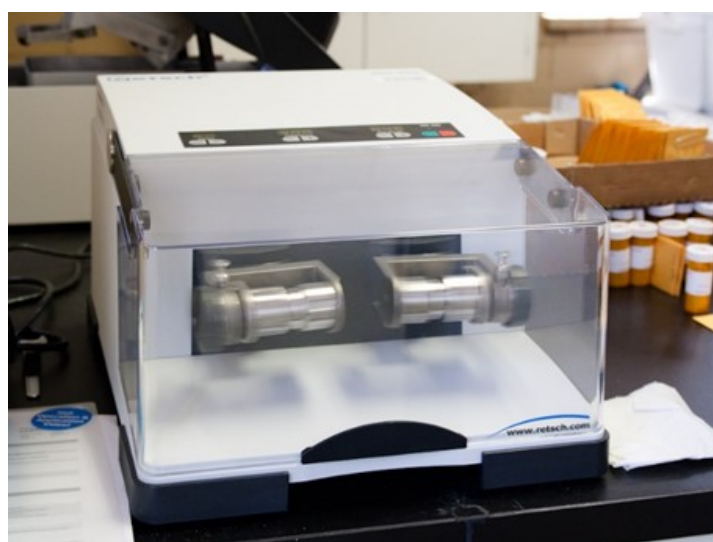
4.6 การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์

นักวิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร. จิตาภรณ์ ภูมิไชย การยางแห่งประเทศไทย มอบตัวอย่างเนื้อไม้ยางพาราจากศูนย์วิจัยยางบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์ จำนวน 10 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ BPM42, PB235, PB260, PB310, PR255, RRIC110, PR305, RRIT226, GT1 และ RRIM600 ตัวอย่างสายพันธุ์ละ 4 ต้น ถูกตัดเป็นเชียงไม้ 6 ชิ้น (6 ระดับความสูง) ยางพาราทุกสายพันธุ์มีอายุ 25 ปี (ภาพที่ 19)

เลือกตัวอย่างเชียงไม้ที่ 2 ระดับความสูง คือ คือ L1 (ความสูง 0.9-0.95 m) และ L2 (ความสูง 2.65-2.70 m) จำนวน 4 ซ้ำ (1 ซ้ำมาจากยางพารา 1 ต้น) เจาะเก็บตัวอย่างเนื้อไม้จากเชียงไม้ดังกล่าว นำตัวอย่างเนื้อไม้ไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด (Mixer Mill รุ่น MM 400, Retsch GmbH, Germany) (ภาพที่ 20) บดตัวอย่างให้ละเอียดและบรรจุใน tin capsule เพื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ C, H, N, S รุ่น CHNS-628 (ภาพที่ 21)



ภาพที่ 19 ตัวอย่างชิ้นไม้ของยางพาราพันธุ์ PR305 ที่ความสูง 6 ระดับ



ภาพที่ 20 เครื่องบดละเอียด (Mixer Mill รุ่น MM 400, Retsch GmbH, Germany)



ภาพที่ 21 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ C, H, N, S รุ่น CHNS-628

5. ผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 ดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา

การพัฒนาดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE) โดยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ระหว่างค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิสะสมรายเดือนที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา กับค่าดัชนีสเปกตรัมเฉลี่ยรายเดือน ซึ่งประเมินได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม มีการดำเนินการ ดังนี้

(1) การรวบรวมข้อมูลปริมาณคาร์บอนสุทธิ (net ecosystem exchange, NEE) ที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา จากโครงการ “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2555-2558 โดย พูนพิภพและคณะ) และโครงการ “ยางธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: การศึกษาสมดุลคาร์บอน และน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2561 โดยดวงรัตน์และคณะ) ข้อมูล NEE ถูกรวบรวมจาก 3 พื้นที่ศึกษา อันได้แก่ แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช มีอายุต้นยางพาราแตกต่างกัน อยู่ในช่วงตั้งแต่ 4 – 24 ปี (ตารางที่ 7 และภาพที่ 14) เป็นข้อมูลรายวัน จากนั้นนำมาคำนวณเป็นค่าสะสมรายเดือน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 7 รายละเอียดข้อมูลหลักซ์ของคาร์บอน (NEE) และดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Modis และ Sentinel-2 ของแปลงยางพารา 3 พื้นที่

พื้นที่ศึกษา	อายุต้นยางพารา (ปี)	ปีที่มีข้อมูล		
		NEE	ดัชนีสเปกตรัมจากดาวเทียม	
			Modis	Sentinel-2
ฉะเชิงเทรา	19 - 24	2556 - 2561	2556 - 2561	2559 - 2561
บึงกาฬ	4 - 9	2556 - 2561	2556 - 2561	2559 - 2561
นครศรีธรรมราช	17 - 18	2559 - 2561	2559 - 2561	2560 - 2561

(2) การรวบรวมข้อมูลดัชนีสเปกตรัมแสงที่ประเมินได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

ดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จาก (1) ดาวเทียม Modis จำนวน 5 ดัชนี ได้แก่ NDVI, EVI, GPP, fPAR และ LAI นักวิจัยจัดทำข้อมูลดัชนีสเปกตรัมของพื้นที่ปลูกยาง 3 พื้นที่ โดยมีข้อมูลตั้งแต่ปี 2556 – 2561 สำหรับพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา และบึงกาฬ และข้อมูลปี 2560 – 2561 สำหรับพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช

ดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จาก (2) ดาวเทียม Sentinel-2 ซึ่งประกอบด้วยดัชนีสเปกตรัมจำนวน 39 ดัชนี เช่น NDVI, SAVI, LAI, FAPAR และ NDRE เป็นต้น นักวิจัยจัดทำข้อมูลดัชนีสเปกตรัมของพื้นที่ปลูกยาง 3 พื้นที่ โดยมีข้อมูลตั้งแต่ปี 2559 – 2561 สำหรับพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา และบึงกาฬ และข้อมูลปี 2560 – 2561 สำหรับพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช

ข้อมูลดัชนีสเปกตรัมจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมทั้ง 2 ดวงดังกล่าว นั้น จะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยรายเดือน และนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) กับค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิสะสมรายเดือนที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา เพื่อพัฒนาดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราต่อไป

A	B	C	D	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
Year	Month	Date	DOY	NEE, g	GPP, g	Reco, g	Avg Ta	Rainfall (mm)	Avg RH	Avg VPD	Rn_cum (MW/m2/da ⁻¹)	Rg_cum (MW/m2/da ⁻¹)	Part_cum (mol/m2/da ⁻¹)	EVI	NDVI
2013	1	1	1	-1.74	4.62	2.87	24.24		65.61	1.59	6.14	9.16	15.14	0.4248	0.7068
2013	1	2	2	-1.39	4.48	3.09	26.37		61.37	2.01	6.71	10.02	16.74		
2013	1	3	3	-1.36	4.43	3.06	26.18		63.09	2.03	6.18	9.63	16.15		
2013	1	4	4	-1.39	4.32	2.93	24.87		68.41	1.34	5.08	7.89	13.20		
2013	1	5	5	-1.46	4.51	3.05	25.94		59.46	2.01	6.57	10.01	16.81		
2013	1	6	6	-1.05	4.10	3.04	25.95		58.89	1.96	6.39	9.68	15.66		
2013	1	7	7	-1.17	4.30	3.13	26.85		62.39	1.84	5.82	8.43	13.72		
2013	1	8	8	0.11	3.12	3.23	27.82		67.09	2.00	5.29	7.85	13.31		
2013	1	9	9	-0.08	3.28	3.20	27.45		65.96	2.20	4.93	7.61	12.54		
2013	1	10	10	-0.15	3.35	3.20	26.87		73.38	1.54	4.63	6.86	11.08		
2013	1	11	11	-0.99	4.31	3.32	27.34		70.98	1.63	5.65	8.14	13.17		
2013	1	12	12	0.27	3.05	3.32	27.49		73.19	1.49	3.99	6.02	9.92		
2013	1	13	13	0.10	3.03	3.13	26.60		74.03	1.66	5.35	7.85	13.18		
2013	1	14	14	0.27	2.72	2.99	26.11		75.02	1.53	5.89	8.67	14.36		
2018	12	17	351	-1.98	3.16	1.18	25.40		67.81	1.69	5.46	9.64	15.85		
2018	12	18	352	-2.36	3.23	0.88	26.63		63.36	1.91	5.59	9.62	15.98		
2018	12	19	353	-1.61	2.77	1.16	27.27		68.15	2.04	5.41	9.12	15.18	0.4901	0.7626
2018	12	20	354	-1.82	2.51	0.69	27.50		75.43	1.75	4.93	8.36	13.51		
2018	12	21	355	-1.14	2.72	1.57	28.21	0.40	75.74	1.74	4.94	8.40	13.43		
2018	12	22	356	-0.86	2.66	1.81	28.63	2.70	67.00	2.18	5.37	8.92	14.51		
2018	12	23	357	1.16	-0.69	0.48	27.37	6.60	61.33	2.05	5.37	9.64	15.86		
2018	12	24	358	1.12	0.45	1.57	27.11	6.00	58.13	2.22	5.40	9.77	16.17		
2018	12	25	359	0.30	0.58	0.88	26.34	0.10	63.08	1.91	3.72	7.36	11.96		
2018	12	26	360	-0.80	2.35	1.55	27.11	0.60	58.89	2.31	4.47	8.32	13.57		
2018	12	27	361	-1.71	2.30	0.59	26.55	2.00	71.68	1.54	4.04	6.91	10.74		
2018	12	28	362	-1.95	2.68	0.73	26.01	0.90	75.89	1.33	5.17	8.35	13.61		
2018	12	29	363	-1.58	2.65	1.07	25.89		69.46	1.57	4.77	8.11	13.42		
2018	12	30	364	-1.20	2.42	1.22	24.38	1.60	65.85	1.57	5.61	10.05	16.60		
2018	12	31	365	-0.40	2.40	2.00	27.97	3.70	71.53	1.77	5.35	8.58	14.73		
Data-CRRC															
A	B	C	D	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
Year	Month	Date	DOY	NEE, g C.m ⁻²	GPP, g C.m ⁻²	Reco, g C.m ⁻²	Avg Ta	Rainfall	Avg RH	Avg VPD	Rn_cum (MW/m2/da ⁻¹)	Rg_cum (MW/m2/da ⁻¹)	Part_cum (mol/m2/da ⁻¹)	EVI	NDVI
2013	1	1	1	-0.96	1.23	0.27	18.69		56.46	0.29	4.36	7.30	14.11		
2013	1	2	2	-1.28	1.57	0.28	21.81		57.21	0.29	5.27	8.85	17.11		
2013	1	3	3	-0.87	1.48	0.61	22.93		57.55	0.30	5.21	8.44	16.37		
2013	1	4	4	-0.91	1.51	0.60	22.47		50.14	0.34	5.07	8.60	16.63		
2013	1	5	5	-1.26	1.62	0.36	22.59		56.10	0.29	5.39	9.15	17.55		
2013	1	6	6	-1.04	1.38	0.33	22.42		54.36	0.31	4.69	8.09	15.47		
2013	1	7	7	-1.21	1.50	0.30	21.96		57.02	0.29	5.15	8.62	16.59		
2013	1	8	8	-1.13	1.48	0.35	22.63		59.15	0.28	5.07	8.52	16.38		
2013	1	9	9	-0.47	1.03	0.57	22.68		57.92	0.30	3.96	6.57	12.51		
2013	1	10	10	-0.47	1.26	0.78	21.01		49.19	0.37	4.43	7.38	14.02		
2013	1	11	11	-0.31	1.09	0.78	20.85		52.28	0.34	4.47	7.37	13.85		
2013	1	12	12	-0.36	0.91	0.55	20.19		55.94	0.31	3.57	6.03	11.53		
2013	1	13	13	-1.04	1.28	0.24	21.00		55.32	0.30	4.86	8.41	15.63		
2013	1	14	14	-0.73	1.18	0.45	22.36		54.86	0.31	4.67	7.96	14.84		
2018	12	17	351	-1.22	3.42	2.19	22.29		62.98	1.47	5.41	8.39	15.65		
2018	12	18	352	-2.63	3.23	0.60	21.62		70.43	1.35	4.84	7.50	14.00		
2018	12	19	353	-3.28	3.16	-0.12	22.50		74.00	1.37	5.37	8.28	15.43		
2018	12	20	354	-2.45	2.93	0.48	24.10		74.03	1.52	5.34	8.16	15.33		
2018	12	21	355	-2.58	3.01	0.44	25.97		72.94	1.82	5.11	7.77	14.52		
2018	12	22	356	-2.29	2.88	0.58	26.06		71.36	1.80	5.05	7.78	14.48		
2018	12	23	357	-1.33	1.87	0.55	24.93		69.93	1.78	5.08	7.99	14.76		
2018	12	24	358	-0.69	1.28	0.59	24.17		66.21	1.82	5.07	8.19	14.99		
2018	12	25	359	-1.52	1.68	0.15	22.78		71.25	1.53	5.28	8.43	15.31		
2018	12	26	360	0.03	0.42	0.45	23.11		67.14	1.83	5.31	8.63	15.68		
2018	12	27	361	0.96	-0.05	0.90	23.23		62.97	1.97	5.30	8.78	15.84		
2018	12	28	362	1.47	-0.34	1.13	24.25		65.29	1.78	4.35	6.95	13.03		
2018	12	29	363	3.41	-1.09	2.32	23.36		54.78	1.66	4.26	6.58	12.32		
2018	12	30	364	3.33	-0.97	2.36	21.15		61.11	1.17	4.34	6.63	12.45		
2018	12	31	365	1.93	-0.81	1.12	19.91		60.50	1.26	5.06	7.73	14.37		
Data-B-Kan															
A	B	C	D	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
Year	Month	Date	DOY	NEE, g C.m ⁻²	GPP, g C.m ⁻²	Reco, g C.m ⁻²	Avg Ta	Rainfall	Avg RH	Avg VPD	Rn_cum (MW/m2/da ⁻¹)	Rg_cum (MW/m2/da ⁻¹)	Part_cum (mol/m2/da ⁻¹)	EVI	NDVI
2017	1	1	1	0.05	1.79	1.84	25.32	103.39	87.76	0.39	1.47	1.84	3.64		
2017	1	2	2	-0.95	1.92	0.97	25.91	23.62	81.72	0.59	2.83	3.54	6.68		
2017	1	3	3	0.11	1.66	1.77	24.22	262.12	93.97	0.11	0.51	0.64	1.43		
2017	1	4	4	-0.32	1.83	1.51	24.85	127.76	92.41	0.30	1.68	2.10	3.83		
2017	1	5	5	-1.46	3.10	1.65	24.50	88.90	94.62	0.26	2.41	3.01	5.39		
2017	1	6	6	-1.61	2.25	0.64	24.41	165.62	93.14	0.32	2.35	2.94	5.19		
2017	1	7	7	-1.28	3.08	1.80	23.86	104.64	94.34	0.31	2.61	3.26	5.78		
2017	1	8	8	-0.35	1.88	1.53	24.36	57.91	95.31	0.20	1.43	1.78	3.35		
2017	1	9	9	-1.90	2.15	0.25	26.57	1.52	83.11	0.87	5.22	6.53	11.10		
2017	1	10	10	-2.93	3.76	0.83	26.31	18.28	83.89	1.09	6.13	7.66	13.13		
2017	1	11	11	-2.21	3.15	0.94	26.70	0.25	81.25	1.18	8.26	10.33	18.04		
2017	1	12	12	-2.66	3.73	1.06	27.00	0.00	80.61	1.25	8.29	10.36	18.67		
2017	1	13	13	-1.69	2.90	1.21	26.96	0.00	81.34	1.15	6.94	8.67	16.06		
2017	1	14	14	-2.63	3.25	0.61	26.56	48.51	84.92	0.94	6.55	8.19	15.22		
2018	12	17	351	2.94	-2.55	0.39	26.47	19.56	84.19	0.70	3.55	4.43	6.70		
2018	12	18	352	3.58	-3.19	0.38	27.58	16.76	81.69	0.83	5.16	6.45	9.65		
2018	12	19	353	2.94	-2.18	0.75	25.89	305.05	89.45	0.47	5.01	6.26	9.49		
2018	12	20	354	5.07	-3.38	1.69	27.85	0.00	75.70	1.17	6.88	8.60	12.96		
2018	12	21	355	4.52	-3.56	0.96	27.50	0.00	82.40	1.20	6.81	8.51	12.63		
2018	12	22													

(3) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation analysis) ของปริมาณคาร์บอนสุทธิ (NEE) ที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา และดัชนีสเปกตรัม

ดาวเทียม Modis

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินมาจากดาวเทียม Modis จำนวน 5 ดัชนี ได้แก่ EVI, GPP, LAI, NDVI และ fPAR ของแปลงยางพารารวมทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา โดยใช้ Correlation analysis จากโปรแกรม SAS (University edition) พบว่า NEE_{month} มีสหสัมพันธ์ทางลบกับดัชนี EVI และมีสหสัมพันธ์ในทางบวกกับดัชนี fAPAR, GPP และ LAI ที่ระดับนัยน้อยมาก (ตารางที่ 8)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินมาจากดาวเทียม Modis แยกเป็นรายพื้นที่ พบว่า แปลงยางจังหวัดฉะเชิงเทรา ค่า NEE_{month} มีสหสัมพันธ์ทางลบกับดัชนี EVI และมีสหสัมพันธ์ในทางบวกกับดัชนี fAPAR, GPP และ LAI ที่ระดับนัยน้อยมาก ส่วนแปลงยางพาราจังหวัดบึงกาฬ ค่า NEE_{month} มีสหสัมพันธ์ทางลบกับดัชนี EVI และ NDVI2 ที่ระดับนัยน้อยมาก และไม่ปรากฏสหสัมพันธ์ระหว่าง NEE_{month} และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินมาจากดาวเทียม Modis ในแปลงยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 แสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Modis ของแปลงยางพารารวมทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา และแยกเป็นรายพื้นที่ ได้แก่ แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา (CRRC) บึงกาฬ (B-Kan) และ นครศรีธรรมราช (NST)

ดัชนีสเปกตรัม	All site		CRRC		B-Kan		NST	
	NEE_{month}	N	NEE_{month}	N	NEE_{month}	N	NEE_{month}	N
EVI	-0.3186**	72	-0.2657*	72	-0.3959**	72	ns	24
NDVI2	ns	72	ns	72	-0.3306**	72	ns	24
fAPAR	0.1784*	72	0.5011**	72	ns	72	ns	24
GPP	0.1891*	72	0.4445**	72	ns	72	ns	24
LAI	0.2699**	61	0.4720**	61	ns	37	ns	22

หมายเหตุ * มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

ns ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

N จำนวนตัวอย่าง

ดาวเทียม Sentinel-2

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินมาจากดาวเทียม Sentinel-2 จำนวน 39 ดัชนี โดยใช้ correlation analysis จากโปรแกรม SAS (University edition) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า NEE_{month} และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมของแปลงยางพารารวมทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา

พบว่า NEE_{month} มีสหสัมพันธ์ทางลบกับดัชนี BI2, TSAVI และ WDVl และมีสหสัมพันธ์ในทางบวกกับดัชนี RI ที่ระดับปานกลาง (ตารางที่ 9)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินมาจากดาวเทียม Sentinel แยกเป็นรายพื้นที่ พบว่า แปลงยางจังหวัดฉะเชิงเทรา ค่า NEE_{month} มีสหสัมพันธ์ทางลบกับดัชนี BI2, LAI2, MNDWI, TSAVI และ WDVl ที่ระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง และมีสหสัมพันธ์ในทางบวกกับดัชนี RI ที่ระดับค่อนข้างสูง แปลงยางพาราจังหวัดบึงกาฬ ค่า NEE_{month} มีสหสัมพันธ์ทางลบกับดัชนี DVI, EVI, MSAVI และ WDVl ที่ระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง และมีสหสัมพันธ์ในทางบวกกับดัชนี RI ที่ระดับปานกลาง และสำหรับแปลงยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช NEE_{month} มีสหสัมพันธ์ทางลบกับดัชนี MTCI, REIP และ S2REP ที่ระดับค่อนข้างสูง (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 แสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ของแปลงยางพารารวมทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา และแยกเป็นรายพื้นที่ ได้แก่ แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา (CRRC) บึงกาฬ (B-Kan) และ นครศรีธรรมราช (NST)

ดัชนี สเปกตรัม	All site		CRRC		B-Kan		NST	
	NEE_{month}	N	NEE_{month}	N	NEE_{month}	N	NEE	N
BI2	-0.4806 **	78	-0.5349 **	30	-0.4475 *	32	ns	16
DVI	-0.2729 *	78	ns	30	-0.6155 **	32	ns	16
EVI	-0.3780 **	78	-0.3692 *	29	-0.6701 **	32	ns	16
LAI2	-0.3388 **	64	-0.6774 **	24	ns	25	ns	15
MNDWI	-0.3054 **	78	-0.5253 *	30	ns	32	ns	16
MSAVI	ns	78	ns	30	-0.5140 *	32	ns	16
MTCI	-0.2878 *	73	-0.3929 *	27	ns	30	-0.6011 **	16
PVI	-0.2821 *	78	ns	30	-0.6155 **	32	ns	16
REIP	ns	76	ns	28	ns	32	-0.7304 **	16
RI	0.4537 **	78	0.6098 *	30	0.5247 **	32	ns	16
S2REP	ns	78	ns	30	ns	32	-0.7300 **	16
TSAVI	-0.5060 **	67	-0.6616 **	24	-0.4742 *	27	ns	16
WDVI	-0.4890 **	78	-0.5840 **	30	-0.6485 **	32	ns	16

หมายเหตุ * มีนัยส าคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05
 ** มีนัยส าคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01
 ns ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ
 N จำนวนตัวอย่าง

(4) การวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) ของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราและดัชนีสเปกตรัม

ดาวเทียม Modis

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินมาจากดาวเทียม Modis จำนวน 5 ดัชนีนั้น พบว่า NEE_{month} มีสหสัมพันธ์กับดัชนีที่ประเมินได้ที่ระดับน้อยมาก ดังนั้น จึงไม่ได้ดำเนินการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของค่าสะสมรายเดือนของฟลักซ์ของคาร์บอน (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือน

ดาวเทียม Sentinel-2

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 โดยเลือกวิเคราะห์เฉพาะดัชนีที่มีสหสัมพันธ์กับค่า NEE_{month} ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง

วิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของค่า NEE_{month} และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ของแปลงยางพารารวมทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา โดยใช้ Regression analysis ร่วมกับ stepwise จากโปรแกรม SAS (University edition) พบว่า ดัชนี BI2, RI, TSAVI และ WDI สามารถใช้ในการประเมินค่า NEE_{month} ได้ แต่มีค่า r^2 ค่อนข้างต่ำ คือมีค่าอยู่ในช่วงเท่ากับ 0.2053 - 0.3475 และดัชนี MSAVI มีค่า r^2 สูงที่สุด คือ 0.3475 (ตารางที่ 10)

วิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของค่า NEE_{month} และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่า ดัชนี BI2, LAI2, MNDWI, RI, TSAVI และ WDI สามารถใช้ในการประเมินค่า NEE_{month} ได้ และมีค่า r^2 อยู่ในช่วง 0.2501 - 0.5457 และดัชนี TSAVI มีค่า r^2 สูงที่สุด คือ 0.5457 (ตารางที่ 11)

วิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของค่า NEE_{month} และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ของแปลงยางพาราจังหวัดบึงกาฬ พบว่า ดัชนี DVI, EVI, MSAVI, PVI, RI และ WDI สามารถใช้ในการประเมินค่า NEE_{month} ได้ และมีค่า r^2 อยู่ในช่วง 0.2397 - 0.4306 และดัชนี EVI มีค่า r^2 สูงที่สุด คือ 0.4306 (ตารางที่ 12)

วิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของค่า NEE_{month} และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ของแปลงยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่า ดัชนี MTCI, REIP และ S2REP สามารถใช้ในการประเมินค่า NEE_{month} ได้ และมีค่า r^2 อยู่ในช่วง 0.4993 - 0.5002 และดัชนี REIP มีค่า r^2 สูงที่สุด คือ 0.5002 (ตารางที่ 13)

ตารางที่ 10 สมการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month} หรือ ค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราทั้ง 3 จังหวัด

ดัชนีสเปกตรัม (x)	จำนวนตัวอย่าง (N)	P	r^2	สมการ
BI2	78	<0.0001	0.2309	$y = 18.1 - 493.45x$
RI	78	<0.0001	0.2053	$y = -135.53 + 5.29x$
TSAVI	67	<0.0001	0.3475	$y = -152.97 - 52.88x - 5.82x^2$
WDVI	78	<0.0001	0.2391	$y = 73.89 - 555.89x$

ตารางที่ 11 สมการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month} หรือ ค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา

ดัชนีสเปกตรัม (x)	จำนวนตัวอย่าง (N)	P	r^2	สมการ
BI2	30	0.0023	0.2606	$y = 23.06 - 535.70x$
LAI2	24	0.0003	0.4343	$y = 198.11 - 172.21x$
MNDWI	30	0.0029	0.2501	$y = -147.75 - 291.59x$
RI	30	0.0003	0.3494	$y = -192.50 - 10.15x$
TSAVI	24	<0.0001	0.5457	$y = -185.18 - 68.81x - 7.09x^2$
WDVI	30	<0.0001	0.3844	$y = -1.19 - 555.89x - 4119x^3$

ตารางที่ 12 สมการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month} หรือ ค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดบึงกาฬ

ดัชนีสเปกตรัม (x)	จำนวนตัวอย่าง (N)	P	r^2	สมการ
DVI	32	<0.0001	0.3581	$y = 64.66 - 564.03x$
EVI	32	<0.0001	0.4306	$y = 89.49 - 323.48x$
MSAVI	32	0.0026	0.2397	$y = 46.21 - 332.60x$
PVI	32	0.0002	0.3581	$y = 64.66 - 797.66x$
RI	32	0.0020	0.2511	$y = -120.45 - 3.93x$
WDVI	32	<0.0001	0.4013	$y = -86.31 - 569.21$

ตารางที่ 13 สมการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month} หรือ ค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช

ดัชนีสเปกตรัม (x)	จำนวนตัวอย่าง (N)	P	r^2	สมการ
MTCI	16	0.0044	0.4993	$y = 1481 - 937.66x + 138.53x^2$
REIP	16	0.0013	0.5002	$y = 20372 - 28.40x$
S2REP	16	0.0013	0.4995	$y = 23358 - 32.43x$

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) ของค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month}) และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 โดยเลือกวิเคราะห์เฉพาะดัชนีที่มีสหสัมพันธ์กับค่า NEE_{month} ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างสูง

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของค่า NEE_{month} และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ของแปลงยางพารารวมทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา พบว่า ดัชนี TSAVI และ WDWI สามารถใช้ในการประเมินค่า NEE_{month} ได้ แต่มีค่า r^2 ค่อนข้างต่ำ คือ มีค่าเท่ากับ 0.3120 (ตารางที่ 14 และ ภาพที่ 23)

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของค่า NEE_{month} และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่า ดัชนี LAI2 และ MNDWI สามารถใช้ในการประเมินค่า NEE_{month} ได้ และมีค่า r^2 สูงถึง 0.6133 (ตารางที่ 14 และ ภาพที่ 24)

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของค่า NEE_{month} และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ของแปลงยางพาราจังหวัดบึงกาฬ พบว่า ดัชนี EVI สามารถใช้ในการประเมินค่า NEE_{month} ได้ และมีค่า r^2 เท่ากับ 0.4306 (ตารางที่ 14 และ ภาพที่ 25)

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของค่า NEE_{month} และค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ของแปลงยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่า ดัชนี REIP สามารถใช้ในการประเมินค่า NEE_{month} ได้ และมีค่า r^2 สูงถึง 0.5002 (ตารางที่ 14 และ ภาพที่ 26)

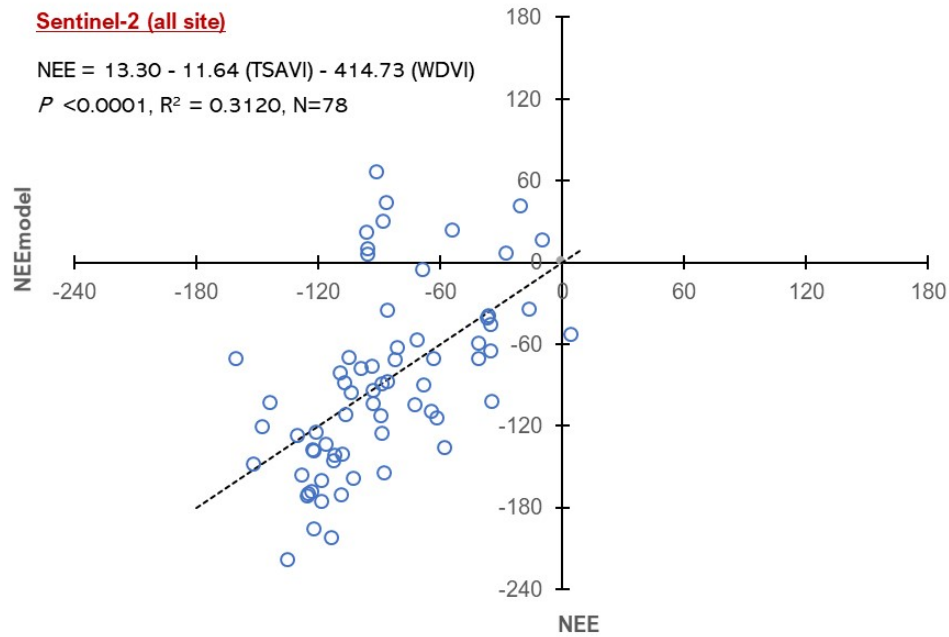
ตารางที่ 14 สมการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{month} หรือ ค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายเดือนที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพารา ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple regression analysis) ร่วมกับ stepwise

พื้นที่ศึกษา	จำนวนตัวอย่าง (N)	P	R^2	สมการ
All site	78	<0.0001	0.3120	$y = 13.30 - 11.64 \text{ (TSAVI)} - 414.73 \text{ (WDVI)}$
CRRC	23	<0.0001	0.6133	$y = 124.38 - 152.06 \text{ (LAI2)} - 264 \text{ (MNDWI)}$
B-Kan	32	<0.0001	0.4306	$Y = 89.49 - 323.48 \text{ (EVI)}$
NST	16	0.0013	0.5002	$Y = 20372 - 28.40 \text{ (REIP)}$

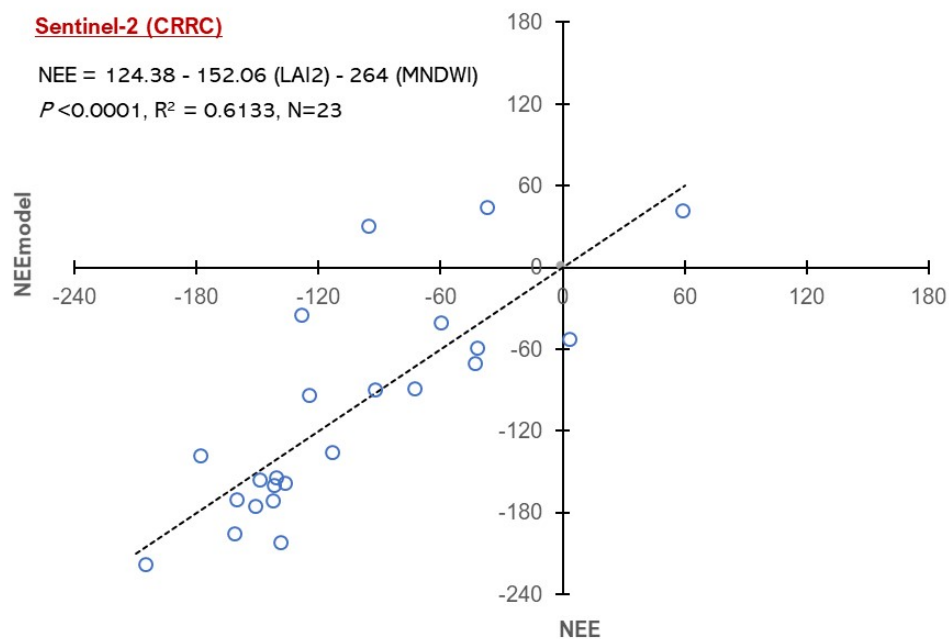
หมายเหตุ CRRC = แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา

B-Kan = แปลงยางพาราจังหวัดบึงกาฬ

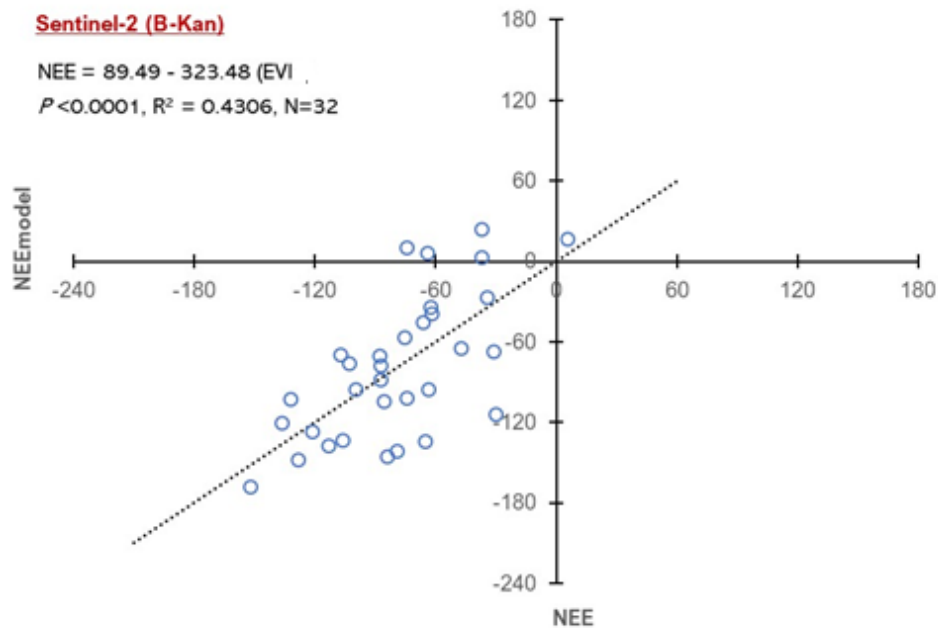
NST = แปลงยางพาราจังหวัดศรีธรรมราช



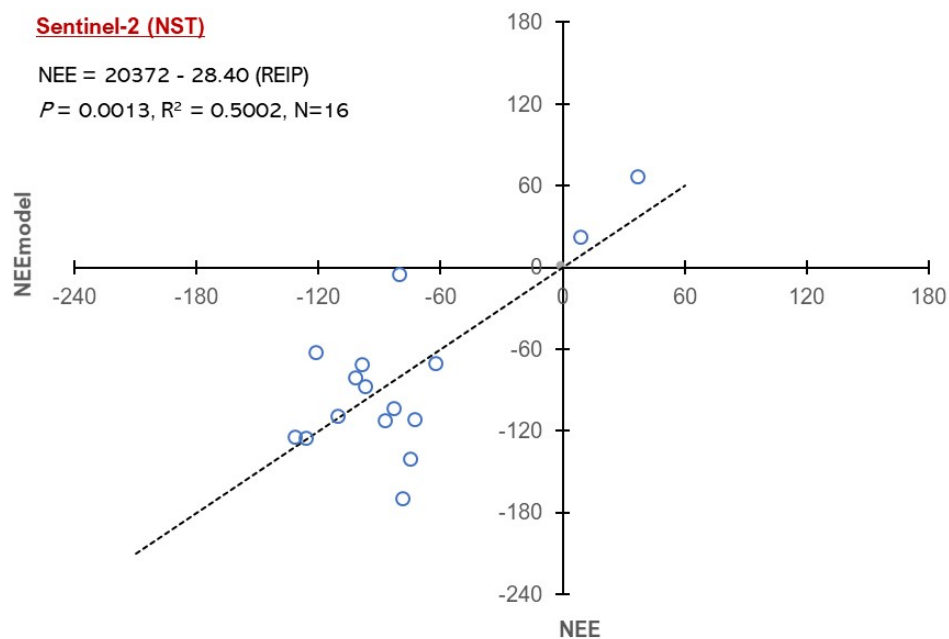
ภาพที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค Eddy covariance (NEE) กับ ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ประเมินได้จากสมการถดถอยพหุคูณ (NEE_{model}) ของพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช



ภาพที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค Eddy covariance (NEE) กับ ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ประเมินได้จากสมการถดถอยพหุคูณ (NEE_{model}) ของพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา



ภาพที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค Eddy covariance (NEE) กับ ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ประเมินได้จากสมการถดถอยพหุคูณ (NEE_{model}) ของพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ



ภาพที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค Eddy covariance (NEE) กับ ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ประเมินได้จากสมการถดถอยพหุคูณ (NEE_{model}) ของพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช

ผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินมาจากดาวเทียม Sentinel-2 สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราได้ดีกว่าดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินมาจากดาวเทียม Modis แม้จะพบว่า ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ตรวจวัดได้นั้นมีสหสัมพันธ์กับดัชนี EVI, fAPAR, GPP และ LAI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเคยมีรายงานผลการวิจัยว่าสามารถใช้ดัชนี EVI, LAI, และ NDVI ในการประเมินปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่ถูกตรึงเข้ามาโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชต่างๆ และรวมถึงพื้นที่ป่าด้วย (Prapastin and Kappas, 2009; Muraok *et al.*, 2013; Atkinson *et al.*, 2020; Lie and Wu, 2020) ได้ แต่สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารากับดัชนีสเปกตรัมนั้นนั้นระดับที่ต่ำมาก

ดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินจากดาวเทียม Sentinel ที่เหมาะสมในการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารานั้น การใช้แบบจำลองถดถอยอย่างง่าย (Simple regression model) พบว่า ดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมสำหรับแปลงยางพาราในแต่ละพื้นที่นั้นแตกต่างกันไป คือ ถ้าต้องการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราทั้งสามจังหวัด สามารถใช้ดัชนี TSAVI แต่มีความแม่นยำค่อนข้างต่ำ ($r^2=0.3475$) สำหรับการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราแยกเป็นจังหวัด คือ ฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช สามารถใช้ดัชนี TSAVI ($r^2=0.5457$), EVI ($r^2=0.4306$) และ REIP ($r^2=0.5002$) ตามลำดับ ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ประเมินได้นั้น มีความแม่นยำในระดับปานกลาง

การใช้แบบจำลองถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple regression model) พบว่า ดัชนีสเปกตรัมที่ใช้สำหรับแปลงยางพาราในแต่ละพื้นที่นั้นแตกต่างกันไป คือ ถ้าต้องการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราทั้งสามจังหวัด สามารถใช้ดัชนี TSAVI และ WDAVI แต่มีความแม่นยำค่อนข้างต่ำ ($r^2=0.3120$) สำหรับการประเมินค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราแยกเป็นจังหวัดนั้น จังหวัด ฉะเชิงเทรา สามารถใช้ดัชนี LAI2 ร่วมกับ MNDWI ($r^2=0.6133$) ค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราที่ประเมินได้นั้นมีความแม่นยำในระดับค่อนข้างสูง ดัชนีสเปกตรัมบางดัชนีที่ใช้ในแบบจำลองแบบง่ายและแบบพหุคูณนั้น เช่น ดัชนี MTCI และ WDAVI เป็นดัชนีสเปกตรัมที่มีรายงานในงานวิจัยของ Cerasoli *et al.* (2018) เช่นกัน

5.2 การประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราด้วยการคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวล

การประเมินมวลชีวภาพในพื้นที่ปลูกยางพารา 2 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) และ ฉะเชิงเทรา (ภาคตะวันออก) ในช่วงอายุ 3 – 9 และ 20 - 24 ปี ตามลำดับ มวลชีวภาพที่ประเมินได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามอายุยางพาราที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 15) กล่าวคือ ยางพาราอายุ 3 - 9 และ 20 - 24 ปี มีมวลชีวภาพตั้งแต่ 6.36 – 18.71 และ 43.69 - 46.35 ตันต่อไร่ ตามลำดับ การประเมินการเก็บกักคาร์บอน พบว่า ยางพาราอายุ 3 - 9 และ 20 - 24 ปี มีค่าตั้งแต่ 2.83 – 8.33 และ 19.45 - 20.63 ตันคาร์บอนต่อไร่ ตามลำดับ และปริมาณคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงนั้น พบว่า ยางพาราอายุ 3 - 9 และ 20 - 24 ปี มีค่าตั้งแต่ 0.73 – 1.46 และ 0.04 – 0.69 ตันคาร์บอน

ต่อไร่ต่อปี ตามลำดับ ขณะที่ ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพาราอายุ 3 - 9 และ 20 - 24 ปี มีค่าตั้งแต่ 0.503 - 2.116 และ 1.533 - 2.231 ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี ตามลำดับ

การประเมินคาร์บอนในแปลงยางพาราขณะอายุต้น 4 - 9 และ 20 - 24 ปี ยางพารามีความสามารถในการเก็บกักคาร์บอน (above ground carbon) เพิ่มขึ้นตามอายุในช่วง 0.36 - 1.46 ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี ในการศึกษาครั้งนี้ ยางพาราที่อายุ 24 ปี สามารถเก็บกักคาร์บอนได้สูงสุด 20.63 ตันคาร์บอนต่อไร่ หรือ 128.97 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับผลการประเมินตามรายงานของ สุภาวรรณ และ อำนาจ (2553) ซึ่งพบว่า ยางพาราที่อายุ 25 ปี มีการเก็บกักคาร์บอนเท่ากับ 128.40 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ แต่ยังมีค่าน้อยกว่าค่าที่รายงานของระวีและคณะ (2555) และ อารักษ์ และคณะ (2551) ซึ่งรายงานว่ายางพาราเก็บกักคาร์บอนในส่วนต่างๆ ของต้นได้สูงสุดที่อายุ 25 และ 26 ปี เท่ากับ 139.66 และ 143.10 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ ตามลำดับ

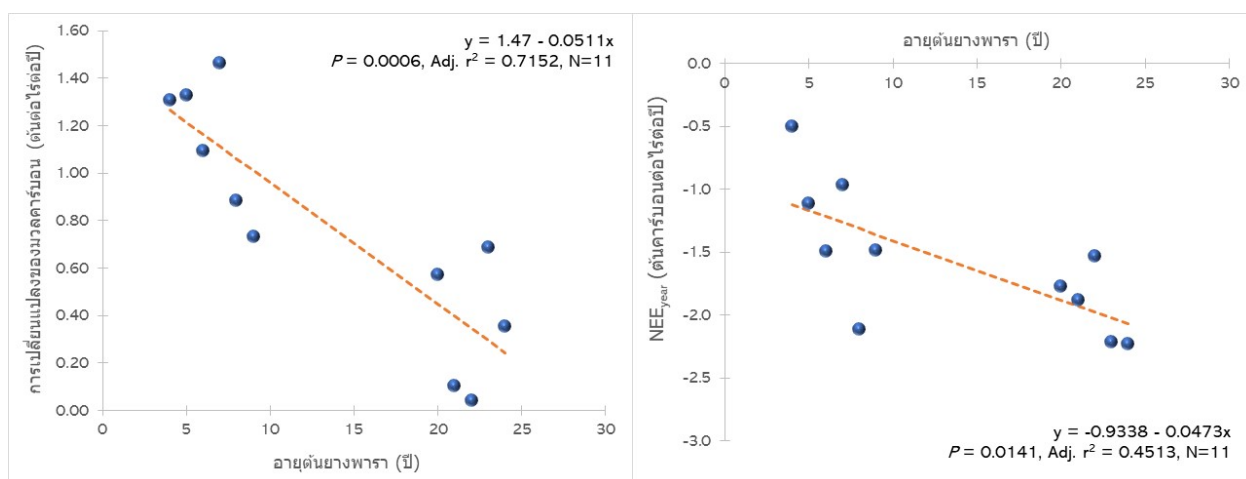
ตารางที่ 15 แสดงมวลชีวภาพ ปริมาณคาร์บอนเก็บกัก ปริมาณคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลง และปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพาราที่อายุต่างๆ จาก 2 พื้นที่ศึกษา ได้แก่ จังหวัดฉะเชิงเทรา และบึงกาฬ

พื้นที่ศึกษา	อายุต้นยางพารา (ปี)	มวลชีวภาพ (ตันต่อไร่)	ปริมาณคาร์บอน (ตันคาร์บอนต่อไร่)	ปริมาณคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลง (ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี)	ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพารา (ตันคาร์บอนต่อไร่ต่อปี)
บึงกาฬ	4	6.36	2.83	1.31	0.503
	5	9.34	4.16	1.33	1.112
	6	11.79	5.25	1.09	1.497
	7	15.08	6.71	1.46	0.969
	8	17.06	7.60	0.88	2.116
	9	18.71	8.33	0.73	1.485
ฉะเชิงเทรา	20	43.69	19.45	0.57	1.772
	21	43.92	19.55	0.10	1.882
	22	44.01	19.59	0.04	1.533
	23	45.55	20.28	0.69	2.215
	24	46.35	20.63	0.36	2.231

ปริมาณการเก็บกักคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพารา จังหวัดบึงกาฬ ที่อายุ 5 เท่ากับ 4.16 ตันคาร์บอนต่อไร่ หรือ 26 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ มีค่าใกล้เคียงกับการรายงานของ Saengrukwong *et al.* (2012) กล่าวคือ ยางพาราสามารถเก็บกักคาร์บอนได้ 29.87 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ ที่ช่วงอายุเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ศักยภาพในการเก็บกักคาร์บอนของยางพาราในประเทศไทยมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับทางตะวันตกของประเทศกานา (Ghana) และแถบ Mato Grosso ของบราซิล ซึ่งที่ค่าเท่ากับ 135 และ 153 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ ขณะยางพาราอายุ 14 ปี (Wauters *et al.*, 2008) ในการศึกษาครั้งนี้แปลงยางพาราที่ใช้ศึกษามีอายุปลูกแตกต่างกัน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบศักยภาพการเก็บกักคาร์บอนในแต่ละพื้นที่ศึกษาได้ อย่างไรก็ตามคาดว่าระยะปลูกและจำนวนต้นต่อไร่อาจจะมีผลต่อปริมาณมวลชีวภาพและคาร์บอนในแปลงยางพารา ดังรายงานของ Blagodatsky *et al.* (2016) กล่าวว่าการเก็บกักคาร์บอนจะขึ้นกับพัฒนาการของลำต้น ซึ่งพัฒนาการของต้นจะดี เมื่อความหนาแน่นในการปลูกต่ำทำให้ได้รับปัจจัยแวดล้อมสำหรับการเติบโตอย่างเต็มที่

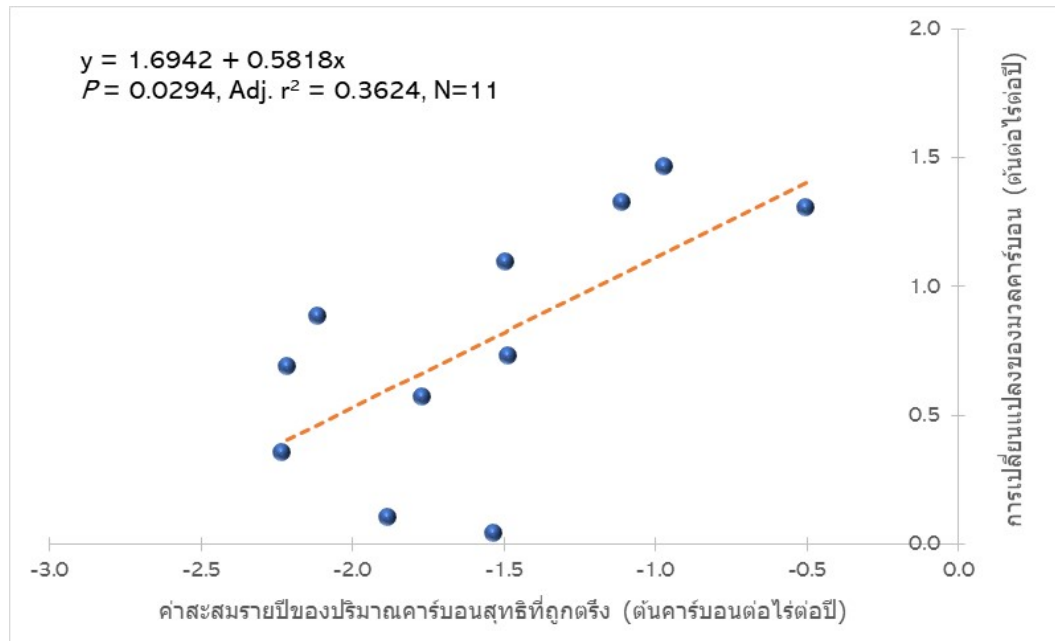
การเปรียบเทียบความสามารถในการเก็บกักคาร์บอนของพืชเศรษฐกิจสำคัญ ได้แก่ ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) โกโก้ (*Theobroma cacao*) ปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis*) และส้ม (*Citrus sinensis*) พบว่า ยางพาราสามารถเก็บกักคาร์บอนได้ถึง 214 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ ขณะที่โกโก้ ส้มและปาล์มน้ำมันสามารถเก็บกักได้ 65, 76 และ 45 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ ตามลำดับ (Kongsager *et al.*, 2013) การเปรียบเทียบความสามารถในการเก็บกักคาร์บอนในยางพารากับป่าดิบแล้งใน จ.บึงกาฬ พบว่าแปลงยางพารามีความสามารถในการเก็บกักคาร์บอนน้อยกว่าป่าดิบแล้ง (83.74 และ 124.20 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์) (Saengrukwong *et al.*, 2012) ยางพาราสามารถเก็บกักคาร์บอนจากบรรยากาศได้ 4.11 ล้านตันคาร์บอนต่อปี สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าป่าฝนเขตร้อน 4.7 เท่า (Jusheng and Wang, 2002) ตลอดช่วงอายุ 30 ปี แปลงยางพาราสามารถเก็บกักคาร์บอน 272.08 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ ขณะที่ป่าร้อนชื้น (tropical rainforest) และป่าเขตร้อนพื้นต่ำ (secondary rainforest) เก็บกักได้ 234.30 และ 150.20 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ (Cheng *et al.*, 2007) ป่าเขตร้อน (Tropical seasonal rainforest) เก็บกักคาร์บอนได้ 163 - 258 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ (Lue *et al.*, 2010) ป่าเต็งรังสามารถเก็บกักคาร์บอนได้เพียง 31.70 - 72.69 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ (Hanpattakit *et al.*, 2016; Intanil *et al.*, 2016) ดังนั้นยางพาราจึงเป็นพืชที่มีศักยภาพในการเก็บกักคาร์บอนสูงมาก

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ระหว่างอายุต้นยางพารากับการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และการสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{year}) โดยใช้ข้อมูลจาก 2 พื้นที่ศึกษา ได้แก่ แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ พบว่า ค่า ΔC มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอายุต้นยางพารา และอายุต้นยางพาราสามารถใช้ในการอธิบายความแปรปรวนของค่า ΔC ได้สูงถึง 71.52% ($P < 0.05$) ส่วนค่า NEE_{year} มีแนวโน้มลดลงหรือมีการเคลื่อนย้ายของคาร์บอนเข้ามาในระบบนิเวศยางพารามากขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของอายุต้นยางพารา และอายุต้นยางพาราสามารถใช้ในการอธิบายความแปรปรวนของค่า NEE_{year} ได้สูงถึง 45.13% ($P < 0.05$) (ภาพที่ 27)



ภาพที่ 27 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และ การสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{year}) โดยใช้ข้อมูลจาก 2 พื้นที่ศึกษา ได้แก่ แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเพิ่มขึ้นของอายุต้นยางพารา

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และ ค่าสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{year}) พบว่า NEE_{year} สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่า ΔC ได้เพียง 36.24% ($P < 0.05$) แสดงว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และ การสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{year}) นั้นมีความสัมพันธ์กัน แต่ยังไม่สามารถใช้ค่า NEE_{year} มาประเมิน ΔC ได้



ภาพที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และการสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{year}) โดยใช้ข้อมูลจาก 2 พื้นที่ศึกษา ได้แก่ แปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของค่า ΔC และ NEE_{year} และค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนีสเปกตรัมของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของค่า ΔC และค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนีสเปกตรัมของแปลงยางพารา พบว่า ค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินจากดาวเทียม Modis ที่มีสหสัมพันธ์กับค่า ΔC ได้แก่ ดัชนี NDVI2, fAPAR, GPP และ LAI และดัชนีที่มีสหสัมพันธ์ที่ระดับสูง ($r > 0.8$) คือ ดัชนี fAPAR และ GPP ดังนั้นจึงนำดัชนีดังกล่าวมาวิเคราะห์การถดถอยกับค่า ΔC ซึ่งพบว่า ดัชนี fAPAR และ GPP สามารถใช้ในการประเมินค่า ΔC ได้ โดยมีค่า r^2 ค่อนข้างสูง คือ 72.11 และ 72.92% ตามลำดับ (ตารางที่ 16)

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของค่า NEE_{year} และค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนีสเปกตรัมของแปลงยางพารา พบว่า ค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินจากดาวเทียม Modis ที่มีสหสัมพันธ์กับค่า NEE_{year} ได้แก่ ดัชนี GPP และค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินจากดาวเทียม Sentinel-2 ที่มีสหสัมพันธ์กับค่า NEE_{year} ได้แก่ ดัชนี BI2, LAI2, NDRE, NDRE2 และ RI ดัชนีที่มีสหสัมพันธ์ที่ระดับสูง (r

> 0.8) คือ ดัชนี BI2, LAI2, NDRE, NDRE2 และ RI ดังนั้นจึงนำดัชนีดังกล่าวมาวิเคราะห์การถดถอยกับค่า NEE_{year} ซึ่งพบว่า ดัชนี LAI2 และ NDRE สามารถใช้ในการประเมินค่า NEE_{year} ได้ โดยมีค่า r^2 ค่อนข้างสูง คือ 85.85 และ 90.232% ตามลำดับ (ตารางที่ 17)

ตารางที่ 16 สมการประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC หรือค่า y) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายปีที่ประเมินได้จากดาวเทียม Modis (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ

ดัชนีสเปกตรัม (x)	จำนวนตัวอย่าง (N)	P	r^2	สมการ
fAPAR	11	0.0006	0.7211	$y = 9.339 - 14.67x$
GPP	11	0.0006	0.7292	$y = 6.999 - 179.18x$

ตารางที่ 17 สมการประเมินค่าการสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{year}) ด้วยค่าเฉลี่ยดัชนีสเปกตรัมรายปีที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 (หรือค่า x) สำหรับแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ

ดัชนีสเปกตรัม (x)	จำนวนตัวอย่าง (N)	P	r^2	สมการ
LAI2	6	0.0247	0.8585	$y = 51.00 - 44.184x + 4.498x^3$
NDRE	6	0.0024	0.9023	$y = -4.79 + 37.228x$
NDRE2	6	0.0112	0.7907	$y = -4.32 + 18.421x$

5.3 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง

แปลงยางพาราทั้ง 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช นั้น มีข้อมูลสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา ตั้งแต่ -1771.7 ถึง -2231.1 กิโลกรัมคาร์บอนต่อไร่ต่อปี (ปี 2556-2561), -502.6 ถึง -2116.3 กิโลกรัมคาร์บอนต่อไร่ต่อปี (ปี 2556-2561) และ -1371.1 ถึง -2084.5 กิโลกรัมคาร์บอนต่อไร่ต่อปี (ปี 2560-2561) ตามลำดับ (ตารางที่ 18)

ความเข้มแสงสะสม (PAR) ของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช นั้น มีค่าสะสมรายปีตั้งแต่ 4724.9 ถึง 5725.0 $\text{mol m}^{-2}\text{year}^{-1}$ (ปี 2556-2561), 4355.2 ถึง 5656.1 $\text{mol m}^{-2}\text{year}^{-1}$ (ปี 2556-2561) และ 4965.7 ถึง 5239.7 $\text{mol m}^{-2}\text{year}^{-1}$ (ปี 2560-2561) ตามลำดับ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (Tair) ของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช นั้น มีค่าเฉลี่ยรายปีตั้งแต่ 26.7 ถึง 27.8°C (ปี 2556-2561), 25.5 ถึง 26.4°C (ปี 2556-2561) และ 26.4°C (ปี 2560-2561) ตามลำดับ ปริมาณฝน (Rain) สะสมรายปีของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช มีค่าตั้งแต่ 1022.8 ถึง 2262.5 (ปี 2556-2561), 1544.6 ถึง 2007.2 (ปี 2556-2561) และ 4551.7 ถึง 5510.1 (ปี 2560-2561) มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ (ตารางที่ 18)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพารากับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณน้ำฝน (Rain) ด้วยวิธี Correlation analysis (SAS® University Edition) ของแปลงปลูกยางพารา ซึ่งเป็นข้อมูลรวมจากพื้นที่ปลูกยางพาราทั้ง 3 จังหวัด อันได้แก่ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช พบว่า ค่า NEE มีสหสัมพันธ์ในทางลบ (Negative correlation) กับค่า PAR และ Tair อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($P < 0.01$) ขณะที่มีความสัมพันธ์ในทางบวก (Positive correlation) กับค่า Rain อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) แต่มีความสัมพันธ์น้อยมาก (ตารางที่ 19)

ตารางที่ 18 แสดงค่าการสะสมรายปีของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE_{year}) และข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความเข้มแสงสะสม (PAR) อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (Tair) และปริมาณฝน (Rain) ของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช

พื้นที่ศึกษา	ปี	NEE_{year} (kg C ต่อไร่ต่อปี)	PAR (mol m ⁻²)	Tair (°C)	Rain (mm)
ฉะเชิงเทรา	2556	-1223.2	5418.5	27.2	1316.2
	2557	-1771.7	5725.0	27.3	1282.4
	2558	-1881.9	5688.3	27.7	1160.5
	2559	-1532.9	5665.3	27.8	1022.8
	2560	-2215.2	5316.8	27.3	2262.5
	2561	-2231.1	4724.9	26.7	1980.8
บึงกาฬ	2556	-502.6	5625.5	25.5	1440.6
	2557	-1112.2	5656.1	25.5	1544.6
	2558	-1496.5	5543.5	26.1	1535.0
	2559	-969.4	5278.9	26.4	1889.0
	2560	-2116.3	4951.7	25.6	2007.2
	2561	-1484.7	4355.2	25.5	1544.4
นครศรีธรรมราช	2560	-2084.5	5239.7	26.4	5510.1
	2561	-1371.1	4965.7	26.4	4551.7

ตารางที่ 19 สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE) และปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสงสะสม (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณฝน (Rain) ของแปลงปลูกยางพารา ซึ่งเป็นข้อมูลจากพื้นที่ปลูกยางพาราทั้ง 3 จังหวัด อันได้แก่ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช

	NEE				Statistic value
	รวม 3 พื้นที่	ฉะเชิงเทรา	บึงกาฬ	นครศรีธรรมราช	
PAR	-0.32805	-0.20752	-0.39336	-0.31118	r
	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	P
	2129	995	648	486	N
Tair	-0.35508	-0.32712	-0.34069	-0.25645	r
	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	P
	2129	995	648	486	N
Rain	0.06581	0.12986	ns	ns	r
	0.0024	<.0001			P
	2129	995			N

หมายเหตุ r = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
P = ความน่าจะเป็น
ns = ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ
N = จำนวนตัวอย่าง

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่าง NEE กับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ PAR Tair และ Rain แยกเป็นรายจังหวัด พบว่า ค่า NEE มีสหสัมพันธ์ในทางลบ กับค่า PAR และ Tair อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) เหมือนกันในทุกพื้นที่ แต่มีสหสัมพันธ์ในทางบวก กับค่า Rain เฉพาะพื้นที่ปลูกยางพารา จังหวัดฉะเชิงเทราอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) แต่มีความสัมพันธ์น้อยมาก (ตารางที่ 19)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่าง NEE กับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ PAR Tair และ Rain แยกเป็นรายจังหวัดและรายปี พบว่า ระดับความสัมพันธ์ระหว่าง NEE กับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยานั้น แตกต่างกันไปในแต่ละปีและแต่ละพื้นที่ที่ปลูกยางพารา

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่าง NEE กับค่า PAR Tair และ Rain แยกเป็นรายปีของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่า NEE มีสหสัมพันธ์ในทางลบ กับ PAR ในปี 2556 – 2560 ระดับความสัมพันธ์ค่อนข้างน้อย ($P<0.01$) และมีสหสัมพันธ์ในทางลบ กับ Tair ในปี 2556 – 2558 และ 2560 ระดับความสัมพันธ์ค่อนข้างน้อย ($P<0.01$) เช่นกัน นอกจากนี้ พบว่า NEE มีสหสัมพันธ์ในทางบวก กับ Rain ในปี 2557 และ 2561 ระดับความสัมพันธ์น้อยมาก ($P<0.01$) พื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา นั้น ค่า NEE ค่อนข้างได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของ PAR และ Tair (ตารางที่ 20)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่าง NEE กับค่า PAR Tair และ Rain แยกเป็นรายปีของแปลงยางพาราจังหวัดบึงกาฬ พบว่า NEE มีสหสัมพันธ์ในทางลบ กับ PAR ในปี 2556 – 2561 ระดับความสัมพันธ์ปานกลางถึงค่อนข้างสูง ($P<0.01$) และมีสหสัมพันธ์ในทางลบ กับ Tair ในปี 2556 และ 2558 - 2561 ระดับความสัมพันธ์ปานกลาง ($P<0.01$) นอกจากนี้ พบว่า NEE มีสหสัมพันธ์ในทางบวก กับ Rain ในปี 2556 2558 และ 2560 ระดับความสัมพันธ์น้อย ($P<0.01$) พื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬนั้น ค่า NEE ค่อนข้างได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของ PAR มาก และมากกว่าแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและนครศรีธรรมราช (ตารางที่ 20)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่าง NEE กับค่า PAR Tair และ Rain แยกเป็นรายปีของแปลงยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่า NEE มีสหสัมพันธ์ในทางลบ กับ PAR และ Tair ในปี 2560 – 2561 ระดับความสัมพันธ์ค่อนข้างน้อย ($P<0.01$) และไม่มีสหสัมพันธ์กับ Rain ในปี 2556 2558 และ 2560 ระดับความสัมพันธ์น้อย ($P<0.01$) พื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬนั้น ค่า NEE สาเหตุที่ไม่พบสหสัมพันธ์ระหว่าง NEE และ Rain นั้น อาจเนื่องมาจากพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราชนั้นมีปริมาณน้ำฝนสะสมที่มากอยู่แล้ว และมากกว่าพื้นที่ศึกษาอีก 2 จังหวัดอย่างชัดเจน ดังนั้น ปริมาณน้ำฝนจึงไม่ใช่ปัจจัยจำกัดสำหรับการเก็บกักคาร์บอนในแปลงยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราชนี้ (ตารางที่ 20)

ตารางที่ 20 สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิต่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE) และปัจจัยด้าน
 อุตุณิยมวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสงสะสม (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณฝน
 (Rain) ของแปลงปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา แยกเป็นรายปี

ฉะเชิงเทรา	NEE						Statistic value
	2556	2557	2558	2559	2560	2561	
PAR	-0.21772 0.0005 250	-0.36606 <.0001 145	-0.26872 0.0072 99	-0.31208 0.0003 130	-0.49828 <.0001 173	ns	r P N
Tair	-0.44789 <.0001 250	-0.37055 <.0001 145	-0.43749 <.0001 99	ns	-0.48165 <.0001 173	ns	r P N
Rain	ns	0.1926 0.0203 145	ns	ns	ns	0.14266 0.045 193	r P N

หมายเหตุ r = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
 P = ความน่าจะเป็น
 ns = ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ
 N = จำนวนตัวอย่าง

ตารางที่ 21 สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิต่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE) และปัจจัยด้าน
 อุตุณิยมวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสงสะสม (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณฝน
 (Rain) ของแปลงปลูกยางพาราจังหวัดบึงกาฬ แยกเป็นรายปี

บึงกาฬ	NEE						Statistic value
	2556	2557	2558	2559	2560	2561	
PAR	-0.76851 <.0001 96	-0.3627 0.0014 75	-0.67727 <.0001 130	-0.65262 <.0001 130	-0.55291 <.0001 138	-0.64099 <.0001 79	r P N
Tair	-0.3758 0.0002 96	ns	-0.63204 <.0001 130	-0.31946 0.0002 130	-0.33998 <.0001 138	-0.46834 <.0001 79	r P N
Rain	0.27576 0.0065 96	ns	0.35601 <.0001 130	ns	0.24124 0.0044 138	ns	r P N

หมายเหตุ r = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
 P = ความน่าจะเป็น
 ns = ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ
 N = จำนวนตัวอย่าง

ตารางที่ 22 สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา (NEE) และปัจจัยด้าน อุณหภูมิวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสงสะสม (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณฝน (Rain) ของแปลงปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช แยกเป็นรายปี

นครศรีธรรมราช	NEE		Statistic value
	2560	2561	
PAR	-0.32783	-0.28006	r
	<.0001	<.0001	P
	247	239	N
Tair	-0.26491	-0.282	r
	<.0001	<.0001	P
	247	239	N
Rain	ns	ns	r
			P
			N

หมายเหตุ r = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
P = ความน่าจะเป็น
ns = ไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ
N = จำนวนตัวอย่าง

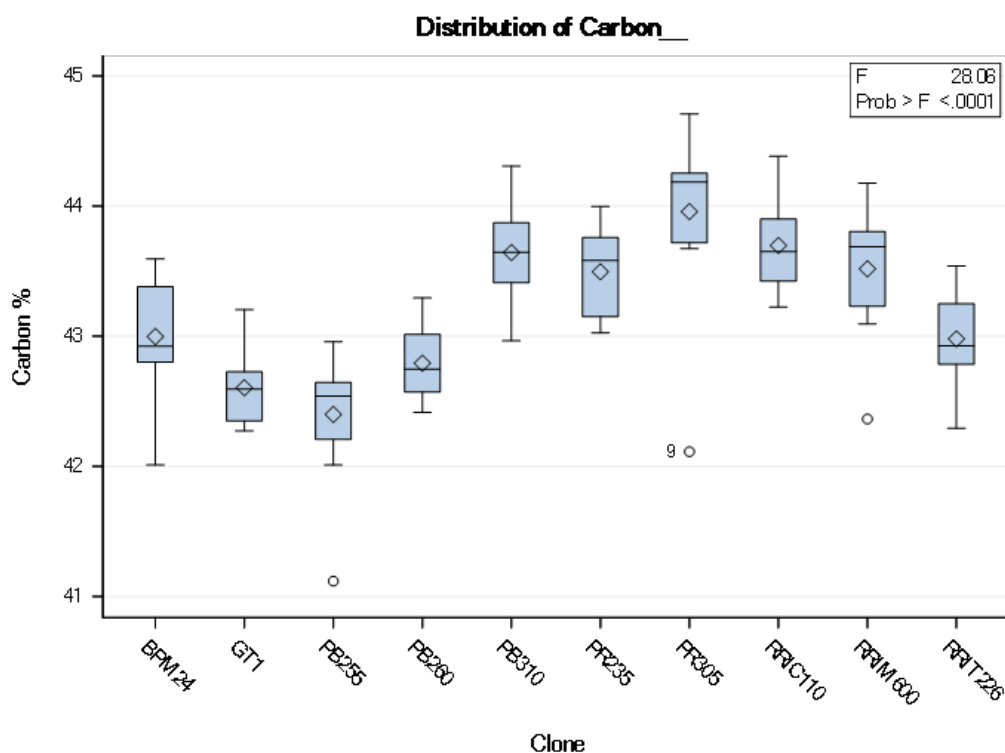
จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่าง NEE และ จุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า PAR มีผลทำให้ ค่า NEE น้อยลง ซึ่งหมายความว่า การเพิ่มขึ้นของความเข้มแสงมีผลทำให้พื้นที่ปลูกยางนั้นมีการตรึงคาร์บอนโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น (NEE มีค่าเป็นลบมากขึ้น) แต่เมื่อถึงจุดอิ่มตัวด้วยแสง การตรึงก๊าซ CO₂ จะ ไม่มีการเพิ่มขึ้นอีก (Li *et al.*, 2005, Wang *et al.*, 2008, Holst *et al.*, 2008 และ Serrano-Ortiz *et al.*, 2007) ส่วนการเพิ่มขึ้นของ Tair นั้น มีผลทำให้ NEE น้อยลงเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ Tair มีผลทำให้พื้นที่ปลูกยางมีอัตราการตรึงก๊าซ CO₂ เพิ่มขึ้น ข้อมูลที่ได้ยังไม่สอดคล้องกับงานวิจัยที่เคยรายงานว่าการเพิ่มขึ้นของ Tair มีผลทำให้พื้นที่ปลูกยางมีอัตราการตรึงก๊าซ CO₂ ลดลง (NEE มีค่าติดลบน้อยลง) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า vapor pressure deficit และ Tair ทำให้ปากใบปิด และส่งผลให้อัตราการตรึง CO₂ น้อยลง (Aubinet *et al.*, 2001, Suyker and Verma, 2001 และ Lasslop *et al.*, 2010) สาเหตุที่ทำให้การตอบสนองที่ต่างกันอาจเนื่องมาจากระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสงของแต่ละพื้นที่ศึกษานั้นแตกต่างกัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสงของพื้นที่ที่ศึกษานั้นอาจมีค่าสูงกว่าพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 จังหวัด ส่วนปริมาณฝน (Rain) ที่มีสหสัมพันธ์ในทางบวกกับ NEE เพียง 2 พื้นที่ และไม่ปรากฏทุกปี อาจเนื่องมาจากในบางปีที่พื้นที่ศึกษามีฝนตกในปริมาณมาก โดยเฉพาะพื้นที่ทางภาคใต้ดังเช่นในจังหวัดนครศรีธรรมราช ทำให้ปริมาณฝนไม่ใช่ปัจจัยจำกัดในการสังเคราะห์ด้วยแสงของยางพาราดังกล่าว

อย่างไรก็ตาม ปัจจัยด้านจุลภูมิอากาศที่มีความสำคัญต่อปริมาณการตรึงคาร์บอน (NEE) ของแปลงยางพารานั้น ได้แก่ ความเข้มแสงและอุณหภูมิอากาศ แต่ผลการวิเคราะห์ในแต่ละปีนั้น พบว่าผลกระทบของปัจจัยดังกล่าวมีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นการศึกษาในลำดับต่อไป คือ การหาสาเหตุที่ทำให้ปัจจัยด้านจุลภูมิอากาศดังกล่าวมีระดับของความรุนแรงต่อปริมาณการตรึงคาร์บอน (NEE) ของแปลงยางพาราที่แตกต่างกัน

5.4 การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์

ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ BPM42, PB235, PB260, PB310, PR255, RRIC110, PR305, RRIT226, GT1 และ RRIM600 ซึ่งด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ C, H, N, S รุ่น CHNS-628 นั้น พบว่า ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราแต่ละสายพันธุ์นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยยางพาราสายพันธุ์ PB305 มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้มากที่สุด รองลงมา ได้แก่ RRIC110, PB310, RRIM600, PR235, BPM24, RRIT226, PB260, GT1 และ PB255 ตามลำดับ ผลการวิจัยที่ได้แตกต่างจาก Srisondee และคณะ (2019) ซึ่งรายงานว่าปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราสายพันธุ์ RRIT 251, PB 260, RRIM 600, RRIT 408 และ BPM 24 ที่ปลูกในจังหวัดหนองคายนั้นไม่แตกต่างกันทางสถิติและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.01% และจากรายงานของ Hytone และคณะ (2019) พบว่า ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราสายพันธุ์ RRIM 600 ที่ปลูกทางภาคใต้ของไทย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 49.8%

จากข้อมูลข้างต้น ต้นยางพาราที่ปลูกในแต่ละพื้นที่ที่มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ส่วนของลำต้นยางพาราค่อนข้างต่างกัน ดังนั้น สำหรับโครงการวิจัย “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” การประเมินการเก็บกักคาร์บอน (Carbon stock) ด้วยวิธีการประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในช่วงระยะเวลาหนึ่งนั้น โดยใช้ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราร่วมในการคำนวณนั้น ควรพิจารณาปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราว่าควรใช้ค่าใด เนื่องจากประเทศผู้ผลิตยางพาราในภูมิภาคอาเซียนนั้นมีการปลูกยางพาราที่สายพันธุ์แตกต่างกันไป



ภาพที่ 29 แสดงการกระจายของปริมาณธาตุคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราจำนวน 10 สายพันธุ์

ตารางที่ 23 ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา (%) จำนวน 10 สายพันธุ์

สายพันธุ์ยางพารา	ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา (%)	StdDev
PR 305	43.96 a	0.584
RRIC 110	43.70 ab	0.337
PB 310	43.64 ab	0.379
RRIM 600	43.52 ab	0.438
PR 235	43.50 ab	0.315
BPM 24	43.00 c	0.421
RRIT 226	42.98 c	0.313
PB 260	42.79 cd	0.263
GT1	42.60 de	0.268
PB 255	42.40 de	0.455
<i>F-test</i>	**	

หมายเหตุ ** มีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P < 0.01$

ตัวเลขในแถวตั้งที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

6. สรุปผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผล

(1) ดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารา

- ควรใช้ดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ในการประเมินการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราที่ตรวจวัดได้จากเทคนิค Eddy covariance
- ดัชนีสเปกตรัมที่ใช้ในการประเมินการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารา ด้วยสมการถดถอยแบบง่าย (simple regression model)

แปลงยางพารา	ดัชนีสเปกตรัม	r^2
ทั้ง 3 จังหวัด	TSAVI	0.3475
จังหวัดฉะเชิงเทรา	TSAVI	0.5457
จังหวัดบึงกาฬ	EVI	0.4306
จังหวัดนครศรีธรรมราช	REIP	0.5002

- ดัชนีสเปกตรัมที่ใช้ในการประเมินการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารา ด้วยสมการถดถอยแบบพหุคูณ (multiple regression model)

แปลงยางพารา	ดัชนีสเปกตรัม	r^2
ทั้ง 3 จังหวัด	TSAVI และ WDWI	0.3120
จังหวัดฉะเชิงเทรา	LAI2 และ MNDWI	0.6133
จังหวัดบึงกาฬ	EVI	0.4306
จังหวัดนครศรีธรรมราช	REIP	0.5002

- การใช้ดัชนีสเปกตรัมที่ใช้ในการประเมินการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารานั้น ควรใช้ดัชนีสเปกตรัมที่แตกต่างกันไปตามพื้นที่ศึกษาจะให้ความแม่นยำมากกว่าการใช้ดัชนีสเปกตรัมที่วิเคราะห์มาจากการข้อมูลการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารารวมทั้ง 3 จังหวัด

(2) การประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพารา ที่มีอายุ 4 – 9 และ 20 - 24 ปี ด้วยวิธีการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของชีวมวล พบว่า ยางพารามีการเก็บกักคาร์บอน 0.36 – 1.46 ตันคาร์บอนต่อไร่ ปริมาณการเก็บกักคาร์บอนสูงเพิ่มสูงขึ้นตามอายุ ขณะที่ ปริมาณคาร์บอนที่สะสมเพิ่มขึ้นในแต่ละปีมีค่าลดลง ต้นยางพาราอายุ 24 ปี สามารถเก็บกักคาร์บอนได้สูงถึง 20.63 ตันคาร์บอนต่อไร่ หรือ 128.97 ตันคาร์บอนต่อเฮกเตอร์ แสดงให้เห็นว่าแปลงยางพารามีศักยภาพสูงเทียบเท่ากับความสามารถเก็บกักคาร์บอนของป่าไม้

การเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และ ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราสะสมในระยะเวลา 1 ปี (NEE_{year}) นั้น มีความสัมพันธ์กัน โดย NEE_{year} สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่า ΔC ได้ 36.24% ($P < 0.05$) ดังนั้น NEE_{year} ยังไม่เป็นตัวแปรที่เหมาะสมในการประเมินค่า ΔC แต่สามารถประเมินค่า ΔC โดยใช้อายุต้นยางพาราได้ ($r^2 = 0.7152$, $P < 0.05$) นอกจากนี้ ดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินค่า ΔC ได้แก่ ค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนี fAPAR ($r^2 = 0.7211$, $P < 0.05$) และ GPP ($r^2 = 0.7292$, $P < 0.05$) ที่ประเมินมาจากดาวเทียม Modis ได้

สำหรับการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราสะสมในระยะเวลา 1 ปี (NEE_{year}) นั้น สามารถใช้ค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนี LAI2 ($r^2 = 0.8585$, $P < 0.05$) และ NDRE ($r^2 = 0.9023$, $P < 0.01$) ที่ประเมินมาจากดาวเทียม Sentinel-2 ได้

(3) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพารากับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ ความเข้มแสง (PAR) อุณหภูมิอากาศ (Tair) และปริมาณน้ำฝน (Rain) โดยใช้พื้นที่ปลูกยางพารา 3 จังหวัด อันได้แก่ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช และวิเคราะห์ข้อมูลแยกเป็นรายจังหวัด พบว่า ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารามีแนวโน้มมากขึ้น (ค่า NEE ติดลบมากขึ้น) เมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ขณะที่ ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารามีแนวโน้มลดลง (ค่า NEE ติดลบน้อยลง) เมื่อปริมาณฝนที่ได้รับเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ยกเว้นการวิเคราะห์แยกเป็นรายจังหวัดของจังหวัดบึงกาฬและนครศรีธรรมราช พบว่า ปริมาณฝนไม่มีผลกระทบต่อปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา

(4) ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์ พบว่า พันธุ์ PR 305 มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้มากที่สุด คือ 43.96% สายพันธุ์ยางพาราที่มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้รองลงมา ได้แก่ พันธุ์ RRIC 110, PB 310, RRIM 600, PR235, BPM 24, RRIT 226, PB 260, GI 1 และ PB 255 ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ เท่ากับ 43.70, 43.64, 43.52, 43.50, 43.00, 42.98, 42.79, 42.60 และ 42.40% ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

(1) ปัญหาอุปสรรคของการศึกษา และแนวทางแก้ไข

การวิเคราะห์การถดถอยระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารากับค่าเฉลี่ยรายเดือนของดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้ ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความแปรปรวนสูงและมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination หรือ r^2) ที่ต่ำ เนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีไม่มากนัก ข้อมูลที่ได้ดัชนีสเปกตรัมที่ได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ซึ่งขึ้นสู่วงโคจรในปี 2559 ทำให้มีข้อมูลเพียง 67-78 ตัวอย่าง (เป็นข้อมูลรวมจากพื้นที่ศึกษา 3 พื้นที่) ถ้ามีการเก็บข้อมูลต่อไปอีกและนำมาวิเคราะห์การถดถอยระหว่างค่าสะสมรายเดือนของปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารากับค่าเฉลี่ยรายเดือนของดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้ใหม่ น่าจะทำให้ มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (r^2) มีค่าสูงขึ้นและสามารถใช้ดัชนีสเปกตรัมมาประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราได้แม่นยำยิ่งขึ้น

(2) การศึกษาต่อยอด

- การใช้ดัชนีสเปกตรัมสำหรับการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา นั้น ควรใช้ดัชนีสเปกตรัมที่แตกต่างกันไปตามพื้นที่ศึกษาจะให้ความแม่นยำมากกว่าการใช้ดัชนีสเปกตรัมที่วิเคราะห์มาจากข้อมูลฟลักซ์คาร์บอนของแปลงยางพาราทั้ง 3 จังหวัดรวมกัน และเนื่องจาก Rubber flux tower ที่ทีมนักวิจัยรับผิดชอบอยู่นั้นยังมีการเก็บข้อมูลต่อเนื่องอยู่ นักวิจัยคาดว่าถ้ามีข้อมูลเพิ่มเติมจะทำให้แบบจำลองที่ใช้ดัชนีสเปกตรัมในการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารานั้นมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

- จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพารา กับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิอากาศ และปริมาณฝน แยกเป็นรายจังหวัดและรายปี พบว่า ระดับความสัมพันธ์ระหว่าง NEE กับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยานั้นแตกต่างกันไปในแต่ละปีและแต่ละพื้นที่ที่ปลูกยางพารา ดังนั้นการศึกษาในลำดับต่อไป คือ การหาสาเหตุที่ทำให้ปัจจัยด้านจุลภูมิอากาศดังกล่าวมีระดับของความรุนแรงต่อปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึง (NEE) โดยแปลงยางพารา แตกต่างกันไป

- ดัชนียางพาราที่ปลูกในแต่ละพื้นที่ที่มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ส่วนของลำต้นยางพาราค่อนข้างต่างกัน และสำหรับประเทศไทยที่มีการปลูกยางพารา พันธุ์ RRIM 600 มากกว่า 80% ของพื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศ ดังนั้น ข้อมูลปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา พันธุ์ RRIM 600 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 43.52% นั้นสามารถนำไปคำนวณหามวลคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราที่ปลูกในประเทศไทยได้

สำหรับโครงการวิจัย “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” ซึ่งมีการศึกษาการเก็บกักคาร์บอน (Carbon stock) ของประเทศผู้ปลูกยางพาราในกลุ่มอาเซียนด้วยนั้น ข้อมูลปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราอีก 9 พันธุ์ที่ศึกษามานั้น น่าจะใช้ประโยชน์ในการคำนวณค่าการเก็บกักคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศในกลุ่มอาเซียนนี้ได้

(3) การนำผลการศึกษาไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในการเงินโยบาย

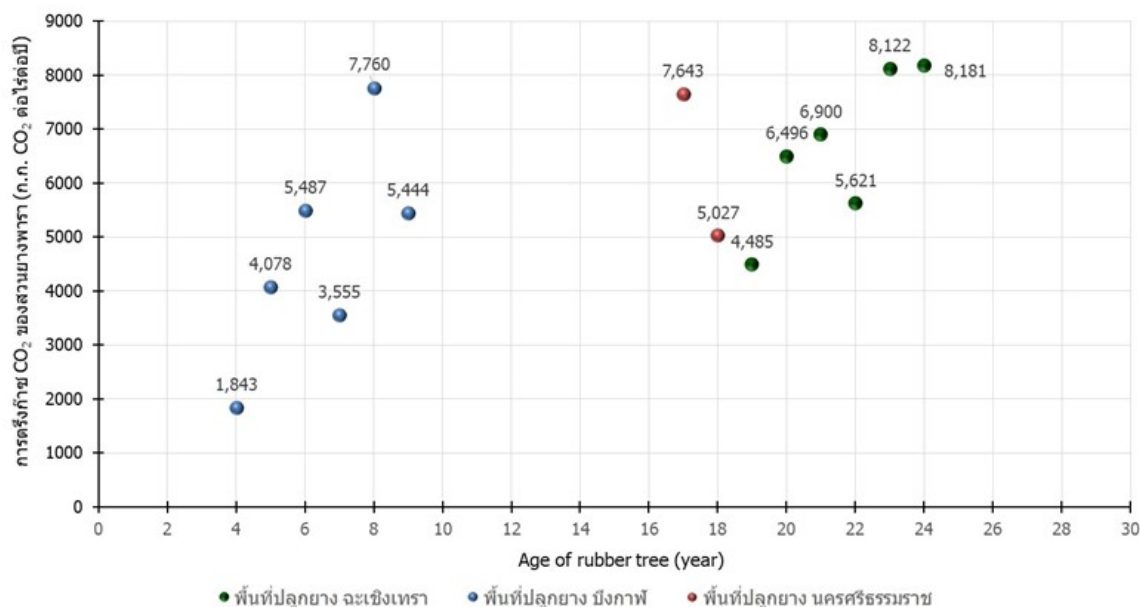
- การใช้ดัชนีสเปกตรัมสำหรับการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราควรใช้ดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ได้แก่ ดัชนี TSAVI ซึ่งสามารถใช้ประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราของพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 จังหวัดได้ โดยมีความแม่นยำ 34% แต่การแยกประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราเป็นรายจังหวัดนั้น พบว่า ดัชนี TSAVI และ EVI เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทราและบึงกาฬ ซึ่งให้ความแม่นยำในการประเมินที่ 54.57 และ 43.06% ตามลำดับ ขณะที่ ดัชนี MTCI หรือ REIP หรือ S2REP เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งให้ความแม่นยำในการประเมินมากกว่า 49%

การที่ดัชนีสเปกตรัมที่ได้นั้นมีความแม่นยำไม่สูงมากนักในการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา เนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีไม่มากนัก ถ้ามีการเก็บข้อมูลต่อไปอีกและนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์การถดถอยระหว่างค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารากับดัชนีสเปกตรัมที่ประเมิน น่าจะทำให้สามารถใช้ดัชนีสเปกตรัมดังกล่าวในการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา และสามารถขยายการประเมินครอบคลุมทั้งประเทศได้

- ยางที่เปิดกรีดและมีอายุมากนั้นมีค่าการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงมาก หากสามารถนำค่าการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในส่วนของต้นยางมาผนวกในกระบวนการคิดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางพารา จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเหมาะสมกับการดำเนินธุรกิจที่เรียกว่า “Greening Economy” หรือ “ยุทธศาสตร์สีเขียว” ซึ่งเป็นการดำเนินธุรกิจที่ต้องใส่ใจถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

จากข้อมูลการตรึงก๊าซ CO₂ ของพื้นที่ปลูกยางพารา (ภาพที่ 30) พื้นที่ปลูกยางพาราอายุ 19 - 24 ปี ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา สามารถตรึงก๊าซ CO₂ เฉลี่ย 5.9 ตันต่อไร่ต่อปี เมื่อพิจารณาพื้นที่ปลูกยางที่เปิดกรีดแล้วในปี 2559 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) 19.6 ล้านไร่ สามารถประเมินในเบื้องต้นได้ว่า พื้นที่ปลูกยางพาราที่เปิดกรีดแล้วทั้งประเทศสามารถตรึงก๊าซ CO₂ ได้ใน

ปริมาณสูงถึง 115 ล้านตันต่อปี ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นจุดแข็งของยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และใช้เป็นข้อได้เปรียบเชิงการค้า เช่น การเจรจาเพื่อลดปัญหาด้านการกีดกันทางการค้าของยางธรรมชาติที่ผลิตจากต้นยางพารา อีกทั้งยังเป็นข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการลดสภาวะโลกร้อน



ภาพที่ 30 ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิที่ถูกตรึงโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (กิโลกรัม CO₂ ต่อไร่ต่อปี) ของแปลงปลูกยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา (อายุ 19-24 ปี) บึงกาฬ (อายุ 4-9 ปี) และนครศรีธรรมราช (อายุ 17-18 ปี) จากการแผนงานวิจัย เรื่อง “การศึกษาสมดุลคาร์บอนและน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2555-2558 โดย พูนพิภพและคณะ) และโครงการ “ยางธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม: การศึกษาสมดุลคาร์บอน และน้ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์และวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของสวนยางพารา” (ปี 2561 โดยดวงรัตน์และคณะ)

- การที่ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารามีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นนั้น ถ้ามีการปรับเปลี่ยนระยะการปลูกยางพาราให้สามารถรับแสงได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น น่าจะทำให้ยางพาราตรึงคาร์บอนได้มากขึ้นด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- การยางแห่งประเทศไทย. 2563. ความเคลื่อนไหวของยางพาราชนิดต่าง ๆ . สืบค้นเมื่อ 28 มีนาคม 2563 จาก <https://www.rubber.co.th/rubber2012/menu5.php>.
- คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ 2553 แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ พิมพ์ครั้งที่ 2 (กันยายน 2553) พิมพ์ที่ บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน)
- จินตนา บางจั่น และ สุนทรี ยิ่งชัชวาลย์. 2549. มวลชีวภาพของต้นยางพาราพันธุ์ PRIM600. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร: 37(4). 341-351.
- ทิวา โลฬิมา, กาญจนา นาคะภากร และ อัจฉรา อัครจุลชัย. 2559. การประเมินการกักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดินของสวนยางพาราโดยการประยุกต์เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลกรณีศึกษา จังหวัดระยอง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: 24(6). 914-926.
- ประดิษฐ์ ตรีพัฒนสุวรรณ, สาทิศ ดิลกสัมพันธ์, ดุริยะ สถาพร และ เจตน์ รัตนแก้ว. มมป. การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของพรรณไม้บางชนิดที่ปลูก ณ ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดสกลนคร. 1-18.
- พงษ์ศักดิ์ วิทวัสสุติกุล และ วารินทร์ จิระสุขทวีกุล. 2531. ผลผลิตมวลชีวภาพเหนือผิวดินของสวนยางพาราในกลุ่มน้ำระยอง, ฝ่ายวิจัยกองอนุรักษ์ต้นน้ำ กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.
- ระวี เจริญวิภา, สุรชาติ เพชรแก้ว, มนต์รี แก้วดวง และ วิทยา พรหมมี. 2555. การประเมินการเก็บกักคาร์บอนและรายได้จากการชดเชยคาร์บอนในสวนยางพารา. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา: 17(2). 91-102.
- สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2558. แผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2558-2593. 120.
- สำนักเศรษฐกิจการเกษตร. 2563. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร. สืบค้นเมื่อ 28 มีนาคม 2563 จาก <http://www.oae.go.th/view/1/ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร/>.
- องค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก (อบก). 2563. ระเบียบวิธีการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ. สืบค้นเมื่อ 29 มีนาคม 2563 จาก <http://ghgreduction.tgo.or.th/t-ver.html>.
- อัศมน ลิ้มสกุล, สายัณห์ สดุดี และ วุฒิชัย แพงแก้ว. 2559. การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและแนวโน้มผลกระทบต่องานพาราในภาคใต้ของไทย. ใน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย (Thailand climate change information) เล่มที่ 3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการเกษตร (อำนาจ ชิดไธสง, บรรณาธิการ). กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 93-128.
- อารักษ์ จันทมา ธีรชาติ วิชิตชลชัย พิศมัย จันทมา ไวยวิทย์ บุรณธรรม ดารุณี โกสีย์เสวี และ สว่างรัตน์ สมนาถ. 2551. ผลของการปลูกสร้างสวนยางพาราต่อการเก็บเกี่ยวก๊าซคาร์บอน ใน รายงานผลงานวิจัย36 ปีกรมวิชาการเกษตร.กระทรวง เกษตรและสหกรณ์. 25-27.

- Atkinson, D.M., K.Y. Jacqueline K. Y. Hung, Fiona M. Gregory, Neal A. Scott, and Paul M. Treitz. 2020. High spatial resolution remote sensing models for landscape-scale CO₂ exchange in the Canadian. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 52(1), 248–263.
- Aubinet, M., B. Chermanne, M. Vandenhaute, B. Longdoz, M. Yernaux and E. Laitat. 2001. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. Agric. Forest Meteorol. 108: 293–315.
- Badgley, G., C.B. Field and J. A. Berry. 2017. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. Sci. Adv. 3: e1602244.
- Brahma, B., Sileshi, G. W., Nath, A. J. and Das, A. K. 2017. Development and evaluation of robust tree biomass equations for rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations in India. Forest Ecosystems, 4(14). 1-10 p.
- Cerasoli, S., M. Campagnolo, J. Faria, C. Nogueira, and M. da Conceição Caldeira. 2018. On estimating the gross primary productivity of Mediterranean grasslands under different fertilization regimes using vegetation indices and hyperspectral reflectance. Biogeosciences, 15, 5455–5471.
- Chantuma, A., Wichitchonlachai, T. and Chantuma, T. 2012. Rubber new planting in Thailand: towards the world affected on climate change. Rubber Thai, 1, 40–47.
- Cheng, C. M., WANG, R. S. and JIANG, J. S. 2007. Variation of soil fertility and carbon sequestration by planting *Hevea brasiliensis* in Hainan Island, China. Journal of Environmental Sciences, 19(3), 348-352.
- Duveiller, G. and A. Cescatti. 2016. Spatially downscaling sun-induced chlorophyll fluorescence leads to an improved temporal correlation with gross primary productivity. Remote Sensing of Environment 182: 72–89.
- Goulden, M.L., J.W. Munger, S.M. Fan, B.C. Daube, and S.C. Wofsy. 1996. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: method and a critical evaluation of accuracy. Global Change Biol. 2: 169-182.
- Grayson Badgley, C. B. (2017). Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. SCIENCE ADVANCES. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M.M.B., Miller, H.L., Chen, Z. (Eds.), Climate Change 2007: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK/New York, USA
- Hanpattanakit, P., Leclerc M. Y., Mcmillan A. M. S, Limtong P., Maeght J. L., Panuthai, S., Inubushi, K., and Chidthaisong, A. 2015. "Multiple timescale variations and controls of soil respiration in a tropical dry dipterocarp forest, western Thailand", Plant Soil, 390(1-2), 167-181.

- Holst, J., R. Barnard, E. Brandes, N. Buchmann, A. Gessler and L. Jaeger. 2008. Impacts of summer water limitation on the carbon balance of a scots pine forest in the southern upper rhine plain. *Agr. Forest Meteorol.* 148: 1815–1826.
- Hytonen, J., J. Nurmi, N. Kaakkurivaara, and T. Kaakkurivaara. 2019. Rubber tree (*Hevea brasiliensis*) biomass, nutrient content, and heating values in Southern Thailand. *Forest.* 10(8): 638.
- Intanil, P., Sanwangsri, M., Boonpoke, A., Hanpattanakit, P., 2018. Contribution of Root Respiration to Soil Respiration during Rainy Season in Applied Environmental Research Contribution of Root Respiration to Soil Respiration during Rainy Season in Dry Dipterocarp Forest, Northern Thailand. *Appl. Environ. Res. J.* 40, 19–27.
- IPCC 2012. Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 1-19.
- IPCC. 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York. 27 p.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers. The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 31 p.
- Jassal, R.S. and T.A. Black. 2006. Estimating heterotrophic and autotrophic soil respiration using small-area trenched plot technique: Theory and practice. *Agric. For. Meteorol.* 140: 193-202
- Jusheng, J. and Wang, R. 2002. Function of carbon sequestration and oxygen release of rubber plantations and its value estimation. *Acta Ecologica Sinica*, 22(9), 1545-1551.
- Kongsager, R., Napier, J., and Mertz, O. 2013. The carbon sequestration potential of tree crop plantations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(8), 1197-1213.
- Kotowska, M.M., Leuschner, C., Triadiati, T., Meriem, S., Hertel., D. 2015. Quantifying above and below ground biomass carbon loss with forest conversion in tropical low lands of Sumatra (Indonesia). *Global Change Biology*, 21, 3620-3634.

- Lasslop, G., M. Reichstein, D. Papale, A.D. Richardson, A. Arneth, A. Barr, P. Stoy and G. Wohlfahrt. 2010. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Glob. Change Biol.* 16: 187–208.
- Li, S. G., J. Asanuma, W. Eugster, A. Kotani, J.-J. Liu, T. Urano, T. Oikawa, G. Davaa, D. Oyunbaatar, and M. Sugita. 2005. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biol.* 11: 1941– 1955.
- Liu, Y. and C. Wu. 2020. Understanding the role of phenology and summer physiology in controlling net ecosystem production: a multiscale comparison of satellite, PhenoCam and eddy covariance data. *Environ. Res. Lett.* 15 (104086).
- Lue, X. T., Yin, J. X., Jepsen, M.R. and Tang, J. W. 2010. Ecosystem carbon storage and partitioning in a tropical seasonal forest in Southwestern China. *Forest Ecology and Management*, 260, 1798–1803.
- M. Rossini, S. C. (2012). Remote sensing-based estimation of gross primary production in a subalpine grassland. *Biogeosciences*, 2565-2584.
- Meroni, M., M. Rossini, L. Guanter, L. Alonso, U. Rascher, R. Colombo and J. Moreno. 2009. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Review of methods and applications. *Remote Sensing of Environment* 113: 2037–2051.
- Muraoka, K., H.M. Noda, S. Nagai, T. Motohka, T.M. Saitoh, K.N. Nasahara, and N. Saigusa. 2013. Spectral vegetation indices as the indicator of canopy photosynthetic productivity in a deciduous broadleaf forest. *Journal of Plant Ecology*, 6 (5): 393–407.
- Petsri, S., Chidthaisong, A., Pumijumnong, N., and Wachrinrat, C. 2013. Greenhouse gas emissions and carbon stock changes in rubber tree plantations in Thailand from 1990 to 2004. *Journal of cleaner production*, 52, 61-70.
- Propastin, P. and M. Kappas. 2009. Modeling Net Ecosystem Exchange for Grassland in Central Kazakhstan by Combining Remote Sensing and Field Data. *Remote Sens.* 1: 159-183.
- Saengruksawong, C., Khamyong, S., Anongrak, N. and Pinthong, J. 2012. Growths and carbon stocks in rubber plantations on Chakkarat soil series, Northeastern Thailand. *Journal of Science and Technology*, 19(4), 271-278.
- Satheesh, P. R. and Jacob, J. 2011. Impact of climate warming on natural rubber productivity in different agro-climatic regions of India. *Natural Rubber Research*, 24(1), 1-9.
- Serrano-Ortiz, P., A. Kowalski, F. Domingo, A. Rey, E. Pegoraro, L. Villagarcía, and L. Alados-Arboledas. Variations in daytime net carbon and water exchange in a montane shrubland ecosystem in southeast Spain. *Photosynthetica* 45: 30–35.

- Shimada, S., E. Funatsuka, M. Ooda, M. Takyu, T. Fujikawa and H. Toyoda. 2012. Developing the Monitoring method for plant water stress using spectral reflectance measurement. *Journal of Arid Land Studies* 22-1: 251-254.
- Sone, K., Watanabe, N., Takase, M., Hosaka, T. and Kyokusen, K. 2014. Carbon Sequestration, Tree Biomass Growth and Rubber Yield of PB260 Clone of Rubber Tree (*Hevea brasiliensis*) in North Sumatra. *Journal of Rubber Research*, 17(2), 115-127.
- Srisondee, D., R. Ratthanawong, F.C. Do, S. Sitthaphanit, and J. Phattharalerphong. 2019. Carbon content in various parts of 5 para rubber clones (*Hevea brasiliensis*) Khon Kaen Agr. J. 47 Suppl. 1.
- Sun, Y., C. Frankenberg, J. D. Wood, D. S. Schimel, M. Jung, L. Guanter, D. T. Drewry, M. Verma, A. Porcar-Castell, T. J. Griffis, L. Gu, T. S. Magney, P. Köhler, B. Evans, K. Yuen. 2017. OCO-2 advances photosynthesis observation from space via solar induced chlorophyll fluorescence. *Science* 358, eaam5747.
- Suyker, A.E. and S.B. Verma. 2001. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. *Global Change Biol.* 7: 279–289.
- Tanga, X., Z. Wanga, D. Liua, K. Songa, M. Jia, Z. Donga, J.W. Mungerc, D.Y. Hollingerd, P.V. Bolstade, A.H. Goldsteinf, A.R. Desai, D. Dragonih and X. Liui. 2012. Estimating the net ecosystem exchange for the major forests in the northern United States by integrating MODIS and AmeriFlux data. *Agricultural and Forest Meteorology* 156: 75–84.
- Van der Tol, C., J.A. Berry, P.K. E. Campbell and U. Rascher. 2014. Models of fluorescence and photosynthesis for interpreting measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 119: 2312–2327.
- Wang, Y. L., G.S. Zhou and Y.H. Wang. 2008. Environmental effects on net ecosystem CO₂ exchange at half-hour and month scales over *stipa krylovii* steppe in northern China. *Agr. Forest Meteorol.* 148: 714–722.
- Wauters, J. B., Coudert, S., Grallien, E., Jonard, M. and Ponette, Q. 2008. Carbon stock in rubber tree plantations in Western Ghana and Mato Grosso (Brazil). *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2347-2361.
- Yang, X., Blagodatsky, S., Liu, F., Beckschafer, P., Xu, J. and Cadisch, G. 2017. Rubber tree allometry, biomass partitioning and carbon stocks in mountainous landscapes of sub-tropical China. *Forest Ecology and Management*, 404, 84-99.

- Yang, X., J. Tang, J. F. Mustard, J.-E. Lee, M. Rossini, J. Joiner, J. W. Munger, A. Kornfeld, and A. D. Richardson. 2015. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2015GL063201.
- Zhang, P., S. Chen, W. Zhang, H. Miao, J. Chen, X. Han and G. Lin. 2012. Biophysical regulations of NEE light response in a steppe and a cropland in Inner Mongolia. *Plant Eco.* 5 (2): 238–248.

ภาคผนวก

1. บทความสำหรับการเผยแพร่

1. ชื่อผลงาน/ โครงการ (ภาษาไทย)
ดัชนีสเปกตรัม นวัตกรรมสำหรับประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราในประเทศไทย
2. ชื่อผลงาน/ โครงการ (ภาษาอังกฤษ)
Spectrum index, Innovation for carbon sequestration assessment of rubber tree in Thailand
3. ชื่อ นามสกุล นักวิจัย (ภาษาไทย): ดร. ดวงรัตน์ ศตคุณ
4. ชื่อ นามสกุล นักวิจัย (ภาษาอังกฤษ): Dr. Duangrat Satakhun
5. ที่อยู่ติดต่อได้ เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
เบอร์โทร 0-2942-7623
อีเมลล์ psddrsk@ku.ac.th
6. ชื่อหน่วยงาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
7. ปี พ.ศ. ที่ดำเนินงานเสร็จ: 2562
8. คำค้นหา keyword
ยางพารา, ดัชนีสเปกตรัม, การเก็บกักคาร์บอน, เทคนิค Eddy covariance, ฟลักซ์ของคาร์บอน, ชีวมวล
Rubber, spectral index, carbon stock, Eddy covariance technique, carbon flux, biomass
9. คำอธิบาย 1 หน้ากระดาษ A4 (font Tahoma ขนาด 10 แบบ Regular)

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

สืบเนื่องจากประเด็นด้านคาร์บอนเครดิตจากยางพาราเป็นมิติที่เห็นชอบร่วมกันจากการประชุมระดับความคิดเห็น “ต้นทุนการผลิตยางพาราในแต่ละภูมิภาคของประเทศ” เมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม 2562 ณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โดยมีความเห็นร่วมกันว่า ข้อมูลด้านคาร์บอนเครดิตจากยางพารามีประโยชน์และสามารถนำไปใช้ในการเจรจาต่อรองด้านการค้าได้ ต่อมาการประชุมพัฒนาข้อเสนอโครงการวิจัย “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” ซึ่งมี ศ.ดร. อรรถชัย จินตะเวช เป็นหัวหน้าโครงการ เมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม 2562 ณ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) บางเขน โดยมีข้อสรุปว่าให้ ทีมนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ดำเนินงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาดัชนีสเปกตรัม (spectral index) ที่เหมาะสมในการประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราทั่วประเทศไทย โดยการเชื่อมโยงระหว่างฟลักซ์ของคาร์บอนที่ตรวจวัดได้จากพื้นที่ปลูกยางพาราทั้ง 3 แห่ง กับข้อมูลสำรวจระยะไกล (จากดาวเทียม) ดัชนีสเปกตรัมที่ได้จากโครงการนี้จะถูกนำไปใช้ขยายผลในพื้นที่ศึกษาของโครงการวิจัย “ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ” ในลำดับต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

(1) การพัฒนานวัตกรรม อันได้แก่ ดัชนีสเปกตรัม (spectral index) ที่ใช้ในการประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราในประเทศไทย (ค่าการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราที่ใช้ในการพัฒนาดัชนีสเปกตรัมนั้น เป็นค่าการตรึงคาร์บอนโดยแปลงยางพาราที่วัดได้โดยใช้ด้วยเทคนิค Eddy covariance) (2) เปรียบเทียบการประเมินการเก็บกักคาร์บอนระหว่างวิธีการประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (carbon stock) และ การตรวจวัดฟลักซ์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ขึ้นไปยังบรรยากาศและเคลื่อนลงมาจากบรรยากาศเหนือพื้นที่ปลูกพืชที่ศึกษา (Eddy covariance technique) และ (3) เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสงสะสม และปริมาณฝนที่มีผลกระทบต่อการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพารา เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการแปลงยางพารา

วิธีการวิจัย

1. จัดเตรียมข้อมูลของแปลงยางพารา 3 แห่ง ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช อันได้แก่ (1) ข้อมูลการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราจากการตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance (2) ข้อมูลขนาดเส้นรอบวงของต้นยางพารา เพื่อใช้ในการคำนวณชีวมวลด้วยวิธี Allometric (3) ข้อมูลดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Modis (5 ดัชนี) และ Sentinel-2 (39 ดัชนี) และ (4) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสงสะสม และปริมาณฝน

2. ข้อมูลข้างต้นจะถูกนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการตรึงคาร์บอนกับดัชนีสเปกตรัมเพื่อหาดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินค่าปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพารา วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และ ปริมาณการตรึงคาร์บอนสะสมในระยะเวลา 1 ปี (NEE_{year}) และวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสงสะสม และปริมาณฝน ต่อปริมาณการตรึงคาร์บอน

3. วิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ BPM42, PB235, PB260, PB310, PR255, RRIC110, PR305, RRIT226, GT1 และ RRIM600 และวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราแต่ละสายพันธุ์ด้วยวิธี Analysis of variance

ผลการวิจัย

ดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 สามารถอธิบายความแปรปรวนของปริมาณการตรึงคาร์บอนได้ดีกว่าดัชนีที่ประเมินได้จากดาวเทียม Modis ดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราทั้ง 3 จังหวัด ได้แก่ TSAVI ส่วนดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอนของแปลงยางพาราจังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช ได้แก่ TSAVI, EVI และ REIP ตามลำดับ

การประเมินคาร์บอนของแปลงยางพารา ขณะอายุต้นยางพารา 4 – 9 และ 20 - 24 ปี ยางพารามีความสามารถในการเก็บกักคาร์บอน 0.36 – 1.46 ตันคาร์บอนต่อไร่ ปริมาณการเก็บกักคาร์บอนสูงเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอายุยางพารา จนกระทั่งต้นยางพาราอายุ 24 ปี สามารถเก็บกักคาร์บอนได้สูงสุด 20.63 ตันคาร์บอนต่อไร่ หรือ 128.97 ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์ แสดงให้เห็นว่าแปลงยางพารามีศักยภาพสูงเทียบเท่ากับความสามารถในการเก็บกักคาร์บอนของป่าไม้

การเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC) และปริมาณการตรึงคาร์บอนสะสมในระยะเวลา 1 ปี (NEE_{year}) นั้น พบว่า มีความสัมพันธ์กัน โดย NEE_{year} สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่า ΔC ได้ 36.24% ($P < 0.05$) และยังไม่สามารถใช้ค่า NEE_{year} มาประเมิน ΔC ได้ แต่สามารถประเมินค่า ΔC โดยใช้อายุยางพารา ($r^2 = 0.7152$, $P < 0.05$) หรือใช้ค่าเฉลี่ยดัชนี fAPAR ($r^2 = 0.7211$, $P < 0.05$) และ GPP ($r^2 = 0.7292$, $P < 0.05$) ที่ประเมินมาจากดาวเทียม Modis สำหรับการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอน

สะสมในระยะเวลา 1 ปี (NEE_{year}) นั้น สามารถใช้ค่าเฉลี่ยดัชนี LAI2 ($r^2 = 0.8585$, $P < 0.05$) และ NDRE ($r^2 = 0.9023$, $P < 0.01$) ที่ประเมินมาจากดาวเทียม Sentinel-2

จุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ ความเข้มแสง และอุณหภูมิอากาศ มีสหสัมพันธ์ในทางลบ (Negative correlation) กับปริมาณการตรึงคาร์บอนสุทธิโดยสวนยางพารา คือ การเพิ่มขึ้นของความเข้มแสง และอุณหภูมิอากาศ ทำให้ปริมาณการตรึงคาร์บอนสุทธิโดยสวนยางพาราเพิ่มขึ้น ซึ่งก็คือ ระบบนิเวศยางพารามีการตรึงก๊าซ CO_2 เพิ่มมากขึ้น ส่วนปริมาณฝน (Rain) มีสหสัมพันธ์ในทางบวกกับปริมาณการตรึงคาร์บอนสุทธิโดยสวนยางพาราเพียง 2 พื้นที่ แต่ไม่ปรากฏทุกปี อาจเนื่องมาจากในบางปีที่พื้นที่ศึกษามีฝนตกในปริมาณมาก โดยเฉพาะพื้นที่ทางภาคใต้ ทำให้ปริมาณฝนไม่ใช่ว่าจะจำกัดในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพื้นที่ปลูกยางพาราดังกล่าว

ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์ พบว่า พันธุ์ PR 305 มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้มากที่สุด คือ 43.96% สายพันธุ์ยางพาราที่มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้รองลงมา ได้แก่ พันธุ์ RRIC 110, PB 310, RRIM 600, PR235, BPM 24, RRIT 226, PB 260, GI 1 และ PB 255 ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ เท่ากับ 43.70, 43.64, 43.52, 43.50, 43.00, 42.98, 42.79, 42.60 และ 42.40% ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ การใช้ประโยชน์จากข้อมูล

1. การใช้ดัชนีสเปคตรัมสำหรับการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราควรใช้ดัชนีสเปคตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2 ได้แก่ ดัชนี TSAVI ซึ่งสามารถใช้ประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราของพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 จังหวัดได้ โดยมีความแม่นยำ 34% แต่การแยกประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพาราเป็นรายจังหวัดนั้น พบว่า ดัชนี TSAVI และ EVI เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดยะลาและนราธิวาส ซึ่งให้ความแม่นยำในการประเมินที่ 54.57 และ 43.06% ตามลำดับ ขณะที่ ดัชนี MTCI หรือ REIP หรือ S2REP เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งให้ความแม่นยำในการประเมินมากกว่า 49%

การใช้ดัชนีสเปคตรัมที่ได้นั้นมีความแม่นยำไม่สูงมากนักในการประเมินค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา เนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีไม่มากนัก ถ้ามีการเก็บข้อมูลต่อไปอีกและนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์การถดถอยระหว่างค่าปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารากับดัชนีสเปคตรัมที่ประเมิน น่าจะทำให้สามารถใช้ดัชนีสเปคตรัมดังกล่าวในการประเมินปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารา และสามารถขยายการประเมินครอบคลุมทั้งประเทศได้

2. ยางที่เป็ดกริดและมีอายุมากนั้นมีค่าการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงมาก หากสามารถนำค่าการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในส่วนของต้นยางมาผนวกในกระบวนการคิดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของยางพารา จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเหมาะสมกับการดำเนินธุรกิจที่เรียกว่า "Greening Economy" หรือ "ยุคเศรษฐกิจสีเขียว" ซึ่งเป็นการดำเนินธุรกิจที่ต้องใส่ใจถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

จากข้อมูลการตรึงก๊าซ CO_2 ของพื้นที่ปลูกยางพารา (ภาพที่ 30) พื้นที่ปลูกยางพาราอายุ 19 - 24 ปี ณ ศูนย์วิจัยยางยะลา จังหวัดยะลา สามารถตรึงก๊าซ CO_2 เฉลี่ย 5.9 ตันต่อไร่ต่อปี เมื่อพิจารณาพื้นที่ปลูกยางที่เป็ดกริดแล้วในปี 2559 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) 19.6 ล้านไร่ สามารถประเมินในเบื้องต้นได้ว่า พื้นที่ปลูกยางพาราที่เป็ดกริดแล้วทั้งประเทศสามารถตรึงก๊าซ CO_2 ได้ในปริมาณสูงถึง 115 ล้านตันต่อปี ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นจุดแข็งของยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และใช้เป็นข้อได้เปรียบเชิงการค้า เช่น การเจรจาเพื่อลดปัญหาด้านการกีดกันทางการค้าของยางธรรมชาติที่ผลิตจากต้นยางพารา อีกทั้งยังเป็นข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการลดสภาวะโลกร้อน

3. การที่ปริมาณคาร์บอนสุทธิที่ถูกตรึงโดยแปลงยางพารามีแนวโน้มมากขึ้น เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นนั้น ถ้ามีการปรับเปลี่ยนระยะการปลูกยางพาราให้สามารถรับแสงได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น น่าจะทำให้ยางพาราดังกล่าวได้มากขึ้นด้วย

4. ต้นยางพาราที่ปลูกในแต่ละพื้นที่ที่มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ส่วนของลำต้นยางพาราค่อนข้างต่างกัน และสำหรับประเทศไทยที่มีการปลูกยางพารา พันธุ์ RRIM 600 มากกว่า 80% ของพื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศ ดังนั้น ข้อมูลปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา พันธุ์ RRIM 600 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 43.52% นั้นสามารถนำไปคำนวณหามวลคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราที่ปลูกในประเทศไทยได้

สำหรับโครงการวิจัย "ระบบนวัตกรรมติดตามและพยากรณ์พื้นที่ปลูกและปริมาณมวลชีวภาพเหนือดินของยางพาราในภูมิภาคอาเซียนด้วยข้อมูลระยะไกล ข้อมูลภาคสนาม และระบบภูมิสารสนเทศ" ซึ่งมีการศึกษาการเก็บกักคาร์บอน (Carbon stock) ของประเทศผู้ปลูกยางพาราในกลุ่มอาเซียนด้วยนั้น ข้อมูลปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพาราก็ 9 พันธุ์ที่ศึกษานั้น น่าจะใช้ประโยชน์ในการคำนวณค่าการเก็บกักคาร์บอนของพื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศในกลุ่มอาเซียนนี้ได้

2. ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมา

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการ	ผลสำเร็จ
1. การพัฒนานวัตกรรม (spectral index) ในการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพาราในประเทศไทย	1. การรวบรวมและจัดเตรียมข้อมูลการเก็บกักคาร์บอนด้วยการตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance	การรวบรวมและจัดเตรียมข้อมูลการเก็บกักคาร์บอนด้วยการตรวจวัดด้วยเทคนิค Eddy covariance จากพื้นที่ศึกษา 3 แห่ง จากภาคตะวันออก ตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ของประเทศไทย ณ จังหวัดฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช ตามลำดับ	100
	2. การคำนวณชีวมวลของต้นยางพาราด้วยวิธี Allometric	คำนวณชีวมวลของต้นยางพาราด้วยวิธี Allometric ของแปลงยางพารา 3 พื้นที่ ได้แก่ จังหวัด ฉะเชิงเทรา บึงกาฬ และนครศรีธรรมราช ในช่วงอายุ 3 - 9, 17 - 24 ปี ตามลำดับ	100
	3. การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา 10 สายพันธุ์	การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา 10 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ BPM42, PB235, PB260, PB310, PR255, RRIC110, PR305, RRIT226, GT1 และ RRIM600	100
	4. การรวบรวมข้อมูลสำรวจระยะไกลของพื้นที่ศึกษา และค่าดัชนีสเปกตรัมต่างๆ	การรวบรวมข้อมูลสำรวจระยะไกลของพื้นที่ศึกษา และค่าดัชนีสเปกตรัมต่างๆ จาก (1) ดาวเทียม Terra ระบบ MODIS (ปี 2556-2561) และ (2) ดาวเทียม Sentinel-2 (ปี 2559-2561)	100
	5. การวิเคราะห์หาค่าดัชนีสเปกตรัม (spectral index) ที่เหมาะสมในการประเมินการเก็บกักคาร์บอนของแปลงยางพารา	วิเคราะห์หาค่าดัชนีสเปกตรัมต่างๆ จาก (1) ดาวเทียม Terra ระบบ MODIS (ปี 2556-2561) จำนวน 5 ดัชนี ได้แก่ NDVI, EVI, GPP, fPAR และ LAI และ (2) ดาวเทียม Sentinel-2 (ปี 2559-2561) จำนวน 39 ดัชนี เช่น NDVI, SAVI, LAI, fAPAR และ NDRE เป็นต้น	100
	6. การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ระหว่างการเก็บกักคาร์บอนที่ประเมินได้ จาก (1) Carbon stock และ (2) การวัดจากฟลักซ์ของคาร์บอน	วิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ระหว่างการเก็บกักคาร์บอนที่ประเมินได้จาก (1) Carbon stock และ (2) การวัดจากฟลักซ์ของคาร์บอน	100
2. เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสงสะสม และปริมาณฝนที่มีผลกระทบต่อการเก็บกักคาร์บอนของต้นยางพารา เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการพื้นที่ปลูกยางพารา	1. การวิเคราะห์หาปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสงสะสม และปริมาณฝน ที่มีอิทธิพลต่อการเก็บกักคาร์บอนของต้นยางพารา	วิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ระหว่างปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยา อันได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความเข้มแสงสะสม และปริมาณฝน กับ การเก็บกักคาร์บอนที่ประเมินได้จากการวัดฟลักซ์ของคาร์บอน (NEE)	100

3. ผลที่ได้รับตลอดโครงการ

Output

- ดัชนีสเปกตรัมที่เหมาะสมในการประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอน (y) ของแปลงยางพารา ได้แก่ ดัชนีสเปกตรัมที่ประเมินได้จากดาวเทียม Sentinel-2

สมการถดถอยแบบง่าย (simple regression model)			
แปลงยางพารา	x	r^2	สมการ
ทั้ง 3 จังหวัด	TSAVI	0.3475	$y = -152.97 - 52.88x - 5.82x^2$
จังหวัดฉะเชิงเทรา	TSAVI	0.5457	$y = -185.18 - 68.81x - 7.09x^2$
จังหวัดบึงกาฬ	EVI	0.4306	$y = 89.49 - 323.48x$
จังหวัดนครศรีธรรมราช	REIP	0.5002	$y = 20372 - 28.40x$
สมการถดถอยแบบพหุคูณ (multiple regression model)			
แปลงยางพารา	x	r^2	สมการ
ทั้ง 3 จังหวัด	TSAVI และ WDAVI	0.3120	$y = 13.30 - 11.64 (TSAVI) - 414.73 (WDAVI)$
จังหวัดฉะเชิงเทรา	LAI2 และ MNDWI	0.6133	$y = 124.38 - 152.06 (LAI2) - 264 (MNDWI)$
จังหวัดบึงกาฬ	EVI	0.4306	$Y = 89.49 - 323.48 (EVI)$
จังหวัดนครศรีธรรมราช	REIP	0.5002	$Y = 20372 - 28.40 (REIP)$

- การเปลี่ยนแปลงของมวลคาร์บอนในช่วงระยะเวลา 1 ปี (ΔC หรือค่า y) สามารถประเมินค่าได้โดยใช้อายุยางพารา และค่าเฉลี่ยดัชนี fAPAR และ GPP ที่ประเมินมาจากดาวเทียม Modis

สมการถดถอยแบบง่าย (simple regression model)			
แปลงยางพารา	x	r^2	สมการ
จังหวัดฉะเชิงเทรา และ บึงกาฬ	อายุต้นยาง	0.7152	$y = 1.47 - 0.0511x$
	fAPAR	0.7211	$y = 9.339 - 14.67x$
	GPP	0.7292	$y = 6.999 - 179.18x$

การประเมินปริมาณการตรึงคาร์บอนสะสมในระยะเวลา 1 ปี (NEE_{year}) นั้น สามารถใช้ค่าเฉลี่ยดัชนี LAI2 และ NDRE ที่ประเมินมาจากดาวเทียม Sentinel-2

สมการถดถอยแบบง่าย (simple regression model)			
แปลงยางพารา	x	r^2	สมการ
จังหวัดฉะเชิงเทรา และ บึงกาฬ	LAI2	0.8585	$y = 51.00 - 44.184x + 4.498x^3$
	NDRE	0.9023	$y = -4.79 + 37.228x$

- ข้อมูลที่แสดงว่าจุลภูมิอากาศของระบบนิเวศยางพารา อันได้แก่ ความชื้นแสง และอุณหภูมิอากาศ มีสหสัมพันธ์ในทางลบ (Negative correlation) กับปริมาณการตรึงคาร์บอน คือ การเพิ่มขึ้นของความชื้นแสง และอุณหภูมิอากาศ ทำให้ระบบนิเวศยางพารามีการตรึงคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น ส่วนปริมาณฝนนั้นปรากฏสหสัมพันธ์ในทางบวกกับปริมาณการตรึงคาร์บอนเพียง 2 พื้นที่ แต่ไม่ปรากฏทุกปี อาจเนื่องมากในบางปีที่พื้นที่ศึกษามีฝนตกในปริมาณมาก โดยเฉพาะพื้นที่ทางภาคใต้ ทำให้ปริมาณฝนไม่ใช่ปัจจัยจำกัดในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพื้นที่ปลูก

ยางพาราดังกล่าว นอกจากนี้ ยังพบว่า ระดับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการตรึงคาร์บอนกับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยานั้นแตกต่างกันไปในแต่ละปีและแต่ละพื้นที่ที่ปลูกยางพารา ดังนั้น การศึกษาในลำดับต่อไป คือ การหาสาเหตุที่ทำให้ปัจจัยด้านจุลภูมิอากาศดังกล่าวมีระดับของความรุนแรงต่อการตรึงคาร์บอนโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่แตกต่างกัน

- ปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ยางพารา จำนวน 10 สายพันธุ์ พบว่า พันธุ์ PR 305 มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้มากที่สุด คือ 43.96% สายพันธุ์ยางพาราที่มีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้รองลงมา ได้แก่ พันธุ์ RRIC 110, PB 310, RRIM 600, PR235, BPM 24, RRIT 226, PB 260, GI 1 และ PB 255 ตามลำดับ และมีปริมาณคาร์บอนในเนื้อไม้ เท่ากับ 43.70, 43.64, 43.52, 43.50, 43.00, 42.98, 42.79, 42.60 และ 42.40% ตามลำดับ