การประเมินการเก็บกักคาร์บอนและรายได้จากการชดเชยคาร์บอนในสวนยางพารา

Assessment of Carbon Stock and the Potential Income of the Carbon Offset in Rubber Plantation

ระวี เจียรวิภา[1]* สุรชาติ เพชรแก้ว[2] มนตรี แก้วดวง[3] และ วิทยา พรหมมี[4]

[1]ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[2]ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[3]สถานีวิจัยพืชลำตะคอง สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

[4]ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

Rawee Chiarawipa[1]*, Surachart Pechkeo[2], Montree Keawdoung[3] and Wittaya Prommee[4]

[1]Department of Plant Science, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University

[2]Department of Earth Science, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University

[3]Lamtakhong Research Station, Thailand Institute of Scientific and Technological Research

[4]Chachoengsao Rubber Research Center, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives

บทคัดย่อ

สวนยางพาราเป็นแหล่งดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเก็บกักคาร์บอนที่สำคัญ จึงประเมินมูลค่าการชดเชยคาร์บอนในสวนยางพาราในช่วงอายุ 25 ปี โดยใช้สมการความสัมพันธ์ของมวลชีวภาพและคาร์บอนอินทรีย์ในดินจากสวนยางพาราอายุ 2 5 12 16 และ 26 ปี ผลการประเมิน พบว่า สวนยางพาราสามารถเก็บกักคาร์บอนทั้งหมดอยู่ในช่วง 50.68-193.72 ตัน/เฮกแตร์ (8.11-30.99 ตัน/ไร่) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงอายุยางพาราแบบโพลีโนเมียล (r^2 = 0.97*) ส่วนรายได้สุทธิจากการทำสัญญาชดเชยการเก็บกักคาร์บอนตลอด 25 ปี ประเมินได้เท่ากับ 573.39 US$/เฮกแตร์ (3,063.27 บาท/ไร่) ดังนั้น ศักยภาพการเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพาราน่าจะมีประสิทธิผลต่อการซื้อขายคาร์บอนเครดิตในตลาดแบบสมัครใจ

คำสำคัญ : มวลชีวภาพ การเก็บกักคาร์บอน ตลาดแบบสมัครใจ คาร์บอนเครดิต ยางพารา

Abstract

Rubber plantation is considered to be a large stationary source, where CO_2 can be captured from emissions through carbon sequestration. The aim of this study is to estimate the benefits of the carbon offset in rubber plantations over a 25-year period by using biomass allometric equations and soil organic carbon. The trial was arranged for 5 different age levels: 2, 5, 12, 16 and 26-year-old rubber plantations. Results indicated that the overall carbon stock ranged from 50.68 to 193.72 Mg ha^{-1} which estimated by fitting the polynomial equation between rubber age and carbon stock (r^2 = 0.97*). In addition, the estimated potential net income of the contract was US$ 573.39 per ha (3,063.27 Baht rai^{-1}) for the 25-year time period. These results suggest that carbon stock in the rubber plantation is more likely to be a cost-effective mitigation pathway according to voluntary market.

Keywords : biomass, carbon sequestration, voluntary market, carbon credit, *Hevea brasiliensis*

***Corresponding author.** E-mail: rawee.c@psu.ac.th

บทนำ

ตามข้อตกลงเชิงนโยบายและแนวทางปฏิบัติเพื่อลดปัญหาโลกร้อน (global climate change policy) จากสนธิสัญญาพิธีสารเกียวโต (Kyoto protocol) ทำให้เกิดแนวคิดของระบบตลาดคาร์บอน (carbon market) (IPCC, 2007) โดยใช้กลไกการตลาดส่งเสริมการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดสภาวะโลกร้อน ทั้งในรูปแบบของตลาดทางการ (mandatory market/compliance market/regulated market) ตลาดแบบ Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries (REDD) และตลาดแบบสมัครใจ (voluntary market) โดยเฉพาะตลาดแบบสมัครใจนั้น ในภาคส่วนป่าไม้สามารถนำไปซื้อขายเป็นคาร์บอนเครดิตในตลาดแบบสมัครใจ ซึ่งเรียกว่า verified emission reduction (VER) หรือ carbon offsets เพื่อนำไปซื้อขายในตลาดสำคัญ เช่น Chicago Climate Exchange (CCX), Climate Registry (CR), California Climate Action Registry (CCAR) และการซื้อขายแบบทวิภาคีหรือซื้อขายโดยตรงระหว่างผู้ซื้อและผู้พัฒนาโครงการ (Over-the-Counter: OTC) (สุมน สุเมธเชิงปรัชญา และ พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์, 2553) การทำสัญญาซื้อขายอาจเป็นโครงการคาร์บอนเครดิตในดิน (soil offset projects) ในพื้นที่การเกษตร (agricultural lands) (Ignosh *et al*., 2009) หรือโครงการส่วนของป่าไม้ (forestry projects) ในพื้นที่ปลูกสร้างและฟื้นฟูสวนป่า (afforestation and reforestation) รวมถึงกลุ่มพืชปลูก (cultivating crops) ระหว่างตัวแทนองค์กรซื้อขายคาร์บอนเครดิตและเกษตรกรหรือหน่วยงานที่เข้าร่วมโครงการ ตามระยะเวลาของสัญญาที่จะได้รับการชดเชยคาร์บอน (carbon offset) หลังหักค่าธรรมเนียมในการทำสัญญาแล้ว (Current *et al*., 2010)

ด้วยกลไกของพืชที่สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อการสังเคราะห์แสง จึงช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศได้ตลอดช่วงชีวิตของพืช โดยเก็บกักไว้ในส่วนต่างๆ ของต้นในรูปของมวลชีวภาพ (Redondo-Brenes & Montagnini, 2006) รวมถึงการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดินและเก็บกักในรูปของคาร์บอนอินทรีย์ในดิน (soil organic carbon) (Zhang & Zhang, 2003) ปัจจุบันพบว่า มีการศึกษาแนวทางการประเมินการชดเชยคาร์บอนทั้งในสภาพพื้นที่ป่า (Solberg, 1997) สวนป่าปลูก (ธีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ, 2553) ไม้ยืนต้นในเมือง (urban tree) (McHale *et al*., 2007) รวมถึงการจัดการดินในแปลงข้าวโพดถั่วเหลือง (Al-Kaisi *et al*., 2005) นาข้าว (Watkins *et al*., 2009) และทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ (Stephenson *et al*., 2004) ฯลฯ ซึ่งนอกจากมีประสิทธิผลต่อการทำสัญญาซื้อขายคาร์บอนเครดิตแล้ว ยังเป็นแนวทางปฏิบัติในเชิงอนุรักษ์ดิน เพิ่มความหลากหลายทางชีวภาพ ลดการสูญเสียพื้นที่ป่าไม้ (deforestation) พร้อมกับเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับพื้นที่ปลูกดังกล่าวด้วย (Solberg, 1997; Kinderman *et al*., 2008) เช่นเดียวกับแผนยุทธศาสตร์พัฒนายางพารา ในช่วงปี พ.ศ. 2552-2556 ของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่สนับสนุนโครงการซื้อขายคาร์บอนเครดิตเพื่อเสริมสร้างรายได้ และยกระดับคุณภาพชีวิตเกษตรกรสวนยางพารา ทั้งภายใต้โครงการกลไกการพัฒนาที่สะอาด (Clean Development Mechanism: CDM) และการตลาดแบบสมัครใจ (คณะกรรมการนโยบายยางธรรมชาติ, 2553) เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารามากเป็นอันดับ 2 ของโลก หรือประมาณ 2.70 ล้านเฮกแตร์ (ANRPC, 2010) จึงทำให้สวนยางพาราในประเทศไทยกลายเป็นแหล่งดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และมีศักยภาพในการเก็บกักคาร์บอนได้ดี (สุภาวรรณ เพ็ชศรี และ อำนาจ ชิดไธสง, 2553) การศึกษานี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสัมพันธ์ของปริมาณคาร์บอนในต้นและดินในช่วงอายุต่างๆ ของยางพารา โดยใช้แนวทางการศึกษา วิธีซื้อขายคาร์บอนเครดิตในตลาดแบบสมัครใจในภาคส่วนของป่าไม้ ร่วมกับการประเมินรายได้จากการชดเชยคาร์บอนเครดิตตามวิธีการทำสัญญาของตลาด Chicago Climate Exchange อันจะเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจเพื่อซื้อขายคาร์บอนเครดิตของเกษตรกรในอนาคต

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สำรวจสวนยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ซึ่งอยู่ในบริเวณพื้นที่ปลูกใกล้เคียงกันและมีความลาดชันของพื้นที่ 0-3% จำนวน 5 ช่วงอายุ คือ 2 5 12 16 และ 26 ปี ในแต่ละช่วงอายุใช้ตัวอย่างพื้นที่ศึกษาจำนวน 1 ไร่ (76 ต้น/ไร่) บริเวณ อ.เทพา จ.สงขลา ระหว่างปี พ.ศ. 2549-2551 เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

1. การประเมินการสะสมมวลชีวภาพของต้นและเศษซากยางพารา

มวลชีวภาพของต้นยางพาราคำนวณโดยใช้รูปแบบความสัมพันธ์ Allometric equation คือ $\ln(Y)= a+b \ln(DBH)$ (Redondo-Brenes & Montagnini, 2006) โดยที่ ln = ลอกการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm), Y = มวลชีวภาพ (ตัน/เฮกแตร์), DBH (diameter at breast height) = เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นที่ระดับความสูง 1.70 ซม. จากพื้นดิน (ซม.) ส่วน a และ b = ค่าคงที่ (constant values) โดยดัดแปลงจากสมการความสัมพันธ์การคำนวณค่ามวลชีวภาพในส่วนต่างๆ ของต้นยางพาราพันธุ์

RRIM 600 บริเวณพื้นที่จังหวัดสงขลา (ระวี เจียรวิภา และคณะ, 2551) (Table 1) เพื่อประเมินค่ามวลชีวภาพในส่วนต่างๆ ของต้นยางพารา (Table 2) ส่วนมวลชีวภาพเศษซากพืชวิเคราะห์จากตัวอย่างเศษซากใบและกิ่งบริเวณสวนยางพาราด้วยตาข่าย (litter fall traps) ขนาด 1.0 x 1.0 x 0.5 ลบ.ม. จำนวน 10 ตัวอย่าง/แปลง โดยบันทึกข้อมูลเดือนละ 1 ครั้ง เพื่อประเมินปริมาณการสะสมเศษซากพืชในสวนยางพารา (Table 3)

2. คุณสมบัติบางประการของดินในสวนยางพารา

สุ่มวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0-25 และ 25-50 ซม. จำนวน 5 ตัวอย่าง/แปลง เพื่อวิเคราะห์อนุภาคดินเหนียว (%clay) ปริมาณไนโตรเจน (total nitrogen) ปฏิกิริยาดิน (pH) ความหนาแน่นดิน (bulk density) และ คาร์บอนอินทรีย์ในดิน (soil organic carbon: SOC) (Table 4) ซึ่งประเมินโดยวิธี wet-oxidation method จากค่าอินทรียวัตถุในดิน (soil organic mat-

Table 1 Biomass allometric equations in different plant parts of a RRIM 600 rubber tree.

Plant part biomass (Mg ha^{-1})	Allometric equations	Coefficient of determination (r^2)
Stem	$\ln (Y_{stem}) = 2.2494(\ln DBH) - 1.8338$	$r^2 = 0.94$
Branch	$\ln (Y_{branch}) = 2.7559(\ln DBH) - 3.7155$	$r^2 = 0.98$
Leaf	$\ln (Y_{leaf}) = 0.8796(\ln DBH) - 0.6974$	$r^2 = 0.94$
Root	$\ln (Y_{root}) = 1.9903(\ln DBH) - 2.8766$	$r^2 = 0.93$

Table 2 Plant part biomass estimations in 5 different ages of rubber plantations.

Age (year)	Biomass (Mg ha^{-1})				
	Stem	Branch	Leaf	Root	Total
2	3.58±0.93a	1.36±0.43a	0.95±0.10d	0.79±0.18a	6.69±0.37a
5	32.96±10.32b	20.78±7.86b	2.26±0.29c	5.63±1.57b	61.62±4.84b
12	74.10±18.37c	55.78±16.84c	3.12±0.31b	11.55±2.54c	144.55±9.41c
16	112.76±32.00d	93.53±32.24d	3.66±0.42ab	16.73±4.22d	226.68±17.28d
26	158.78±38.58e	141.79±42.81e	4.20±0.38a	22.67±4.84e	327.44±22.13e

Means (±SD) followed by the different letters within the same column indicate significant differences (P≤0.05).

Table 3 Annual litter production in 5 different ages of rubber plantations.

Age (year)	Biomass (Mg ha^{-1})		
	Leaf	Branch	Total
2	1.52±0.09d	0.10±0.01b	1.61±0.06d
5	4.84±0.15c	0.23±0.02a	5.08±0.10c
12	6.38±0.29a	0.25±0.01a	6.63±0.20a
16	5.90±0.22b	0.25±0.02a	6.15±0.14ab
26	5.63±0.15b	0.26±0.03a	5.89±0.09b

Means (±SD) followed by the different letters within the same column indicate significant differences (P≤0.05).

Table 4 Soil properties at the 0-50 cm soil depth in 5 different ages of rubber plantations.

Age (year)	Soil depth (cm)	Clay (%)	Total N (%)	SOC (%)	pH	Bulk density (g cm^{-3})
2	0-25	19.01±1.80B	0.08±0.03C	0.87±0.02C	4.92±0.05A	1.56±0.01AB
	25-50	24.86±0.25bc	0.03±0.01c	0.21±0.01d	4.76±0.06c	1.58±0.08b
5	0-25	24.99±0.65A	0.14±0.07A	1.47±0.03A	4.79±0.03B	1.43±0.21B
	25-50	33.25±0.91a	0.04±0.02a	0.28±0.01b	5.23±0.01a	1.47±0.02bc
12	0-25	24.75±0.82A	0.09±0.02C	0.76±0.01D	4.81±0.03B	1.72±0.05A
	25-50	30.07±3.51b	0.03±0.01d	0.16±0.01e	4.61±0.06d	1.78±0.02a
16	0-25	13.49±1.47C	0.06±0.02D	0.51±0.02E	4.55±0.03C	1.63±0.04A
	25-50	22.09±0.83c	0.04±0.01b	0.30±0.01a	5.00±0.06b	1.44±0.06c
26	0-25	16.48±0.18B	0.10±0.03B	1.13±0.03B	4.55±0.01C	1.65±0.03A
	25-50	27.16±1.85bc	0.03±0.01e	0.25±0.01c	4.87±0.02c	1.53±0.06bc

ter: SOM) (g kg^{-1})= SOC (%) x 1.724 x 10 (Walkley & Black, 1934)

3. การประเมินการเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพารา

3.1 ประเมินปริมาณคาร์บอนในส่วนต่างๆ ของต้นยางพารา และในดินสวนยางพารา โดยดัดแปลงจากสมการการเก็บกักคาร์บอนในพืช เศษซากพืช และในดินของกลุ่มไม้ยืนต้น (Zheng *et al*., 2008) ดังนี้

$$CS_t = \sum_{i=1}^{n}(C_{Ti}B_{Ti}) + \sum_{j=1}^{n}(C_{Fj}B_{Fj}) + \sum_{l=1}^{n}(C_{Sl}BD_l)$$

โดยที่ CS_t = ปริมาณคาร์บอนที่เก็บกักในสวนยางพารา (ตัน/เฮกแตร์)

C_{Ti} = องค์ประกอบของสารคาร์บอนในส่วนต่างๆ ของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (%)

B_{Ti} = มวลชีวภาพในส่วนต่างๆ ของต้นยางพารา (ตัน/เฮกแตร์)

C_{Fj} = องค์ประกอบของสารคาร์บอนของเศษซากยางพาราบริเวณผิวดิน (%)

B_{Fj} = มวลชีวภาพของเศษซากยางพาราบริเวณผิวดิน (ตัน/เฮกแตร์)

C_{Sl} = ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดินที่ระดับความลึก 0-50 ซม. (%)

BD_l = ความหนาแน่นดินที่ระดับความลึก 0-50 ซม. (ก./ลบ.ซม.)

ทั้งนี้ ค่าคงที่สำหรับการคำนวณมวลชีวภาพในต้นยางพาราต่อพื้นที่ปลูกเท่ากับ 84% ของจำนวนต้น/พื้นที่ปลูก และองค์ประกอบของสารคาร์บอนในต้นยางพาราเฉลี่ยเท่ากับ 45% ของมวลแห้ง (อารักษ์ จันทุมา และคณะ, 2551) ส่วนค่าคงที่สำหรับการคำนวณมวลชีวภาพของเศษซากยางพาราเท่ากับ 78.2% ของเศษซากที่สามารถย่อยสลายได้ในรอบปี (จารุชาติ ปราชญ์นคร และ ประเสริฐ ชูแสง, 2545) จากการคำนวณปริมาณคาร์บอนในมวลชีวภาพและดินสวนยางพาราดังกล่าว สามารถประเมินปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 adsorption) โดยคำนวณจากค่าคงที่ 3.67 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีน้ำหนัก 1 โมเลกุล (molecular mass) เท่ากับ 44.01 กรัมอะตอม (Dalton) ไปเป็นธาตุคาร์บอน 1 กรัม (McPherson, 1998) (Figure 1)

3.2 ประเมินการสะสมคาร์บอนในสวนยางพาราระหว่างอายุกับส่วนต่างๆ ของต้นยางพารา (living carbon stock) เศษซากพืช (litter production) และในดิน (soil carbon stock) โดยใช้สมการความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (polynomial) (Figure 2) และประเมินอัตราการเก็บกักคาร์บอน (sequestration rate) 5 ช่วงอายุ คือ 1-5 6-10 11-15 16-20 และ 21-25 ปี ตามลำดับ ดังสมการ

$$CS_r = \left(\frac{\Delta s}{\Delta t}\right) = \frac{(\Delta s_{f-s_0})}{(\Delta t_{f-t_0})}$$

โดยที่ CS_r = อัตราการเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพารา (ตัน/เฮกแตร์/ปี)

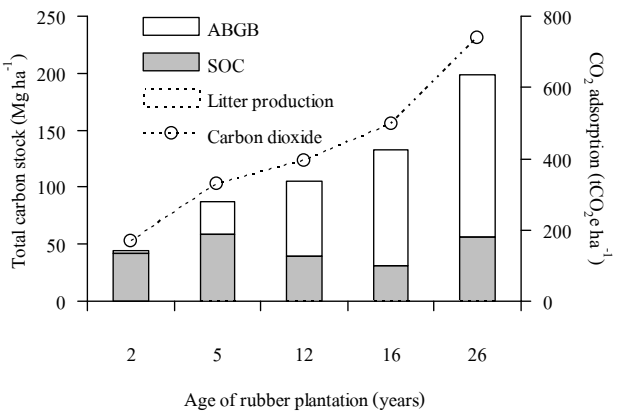

Figure 1 Estimating the carbon stock in above-ground biomass (ABGB), soil organic carbon (SOC), litter production, and CO^2 adsorption in different ages of rubber plantations.

s_o, s_f = ปริมาณคาร์บอนเริ่มต้นและสูงสุด (ตัน/เฮกแตร์)

t_o, t_f = อายุเริ่มต้นและสูงสุดของยางพารา (ปี)

4. การประเมินรายได้จากการชดเชยคาร์บอนในสวนยางพารา

ใช้ตัวอย่างการประเมินรายได้จากการทำสัญญาในตลาดแบบสมัครใจ ตามวิธีการทำสัญญาของ Chicago Climate Exchange (CCX) (Ignosh *et al*., 2009; Current *et al*., 2010) เพื่อเป็นกรณีตัวอย่างสำหรับการศึกษานี้ จึงกำหนดให้มีปริมาณคาร์บอนคงที่ทุกๆ ช่วงเวลา 5 ปี ตามช่วงอัตราการเก็บกักคาร์บอน คือ 1-5 6-10 11-15 16-20 และ 21-25 ปี เพื่อนำไปประเมินรายได้แต่ละปี ของทุกๆ ช่วงเวลา 5 ปี (Estimated annual value) และรายได้รวมทั้งหมด (US$) ตลอดช่วงอายุยางพารา 25 ปี (Table 5) โดยดัดแปลงเป็นสมการ ดังนี้

$$T_c = N_c + R_c$$

โดยที่ T_c = รายได้ทั้งหมดจากการชดเชยตลอดช่วงการทำสัญญา ($)

N_c = รายได้จากการทำสัญญาคาร์บอนเครดิต ($)

Table 5 Estimated potential income over 25 years of the contract for rubber plantation.

Contract (yr)	Sequestration rate (Mg ha^{-1} yr^{-1})	Annual tonnage (Mg ha^{-1})	Estimated annual value ($ ha^{-1})	Estimated annual value (Baht rai^{-1})[1/]
1-5	6.69	6.69	26.76	142.97
6-10	8.35	8.35	33.40	178.42
11-15	7.54	7.54	30.15	161.07
16-20	6.73	6.73	26.90	143.71
21-25	5.98	5.98	23.93	127.87
Estimated subtotal (25-year period)		176.43	705.71	3,770.17
Fees and deductions				
20% carbon reserve pool			141.14	754.03
10% aggregator fee			70.57	377.02
Project verification fee ($0.15/ton)			26.46	141.38
CCX exchange fee ($0.20/ton)			35.29	188.51
Net annual contract payment (25-year period)			432.25	2,309.23
Net income			573.39	3,063.27

[1/]5-year (2006-2010) exchange rate (33.39 Baht/$)

โดยที่ N_c = (I_a) - (F_i)

I_a = (C_t) x (CCX)

โดยที่ I_a = มูลค่าจากการซื้อขายคาร์บอนเครดิต ($/ปี)

C_t = ปริมาณคาร์บอนเครดิตที่ซื้อขาย (80% ของ C_s) (ตัน)

โดยที่ C_s = ปริมาณการเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพารา (ตัน)

CCX = ค่าเฉลี่ยราคาซื้อขายคาร์บอนเครดิตในตลาด CCX (4 $/ตันคาร์บอน)

F_i = ค่าธรรมเนียมในการทำสัญญา ($)

โดยที่ F_i = $(F_{i,a} + F_{i,v} + F_{i,c})$

$F_{i,a}$ = ค่าธรรมเนียมในการทำสัญญากับตัวแทน (10% ของมูลค่า I_a) ($)

$F_{i,v}$ = ค่าธรรมเนียมในการตรวจสอบสัญญา (0.15 $/ตัน ของ C_t) ($)

$F_{i,c}$ = ค่าธรรมเนียมในการซื้อขายกับตลาด CCX (0.2 $/ตัน ของ C_t) ($)

R_c = รายได้จากการชดเชยจากปริมาณคาร์บอนเครดิตสำรองหลังสิ้นสุดสัญญา ($)

โดยที่ R_c = (I_r) - (F_j)

I_r = มูลค่าการชดเชยจากปริมาณคาร์บอนเครดิตสำรอง ($)

โดยที่ I_r = (Cr) x (CCX)

C_r = ปริมาณคาร์บอนเครดิตสำรอง (20% ของ C_s) (ตัน)

CCX = ค่าเฉลี่ยราคาซื้อขายคาร์บอนเครดิตในตลาด CCX (4 $/ตันคาร์บอน)

F_j = ค่าธรรมเนียมในการทำสัญญา ($)

โดยที่ F_j = $(F_{j,a} + F_{j,v} + F_{j,c})$

$F_{j,a}$ = ค่าธรรมเนียมในการทำสัญญากับตัวแทน (10% ของมูลค่า I_r) ($)

$F_{j,v}$ = ค่าธรรมเนียมในการตรวจสอบสัญญา (0.15 $/ตัน ของ C_r) ($)

$F_{j,c}$ = ค่าธรรมเนียมในการซื้อขายกับตลาด CCX (0.2 $/ตัน ของ C_r) ($)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สมการถดถอย (Regression equation) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอายุและการเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพารา พร้อมกับวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลต่างๆ ในแต่ละช่วงอายุ โดยวิธี Least Significant Different (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P \leq 0.05$)

ผลการวิจัย

1. มวลชีวภาพและคุณสมบัติบางประการของดินในสวนยางพารา

ต้นยางพารามีการสะสมมวลชีวภาพในส่วนต่างๆ ของต้นมากที่สุดที่อายุ 26 ปี และแตกต่างทางสถิติกับช่วงอายุอื่นๆ โดยมีการสะสมในส่วนของลำต้นมากที่สุด คือ 158.78 ตัน/เฮกแตร์ หรือรวมมีการสะสมมวลชีวภาพทั้งต้นเท่ากับ 327.44 ตัน/เฮกแตร์ ตามลำดับ (Table 2) ขณะที่ เศษซากยางพารา พบว่า มีปริมาณมากและน้อยที่สุดในอายุ 12 และ 2 ปี คือ 6.63 และ 1.61 ตัน/เฮกแตร์ โดยเศษซากจากใบยางพารามีค่าทางสถิติใกล้เคียงกัน ในช่วงอายุ 16 และ 26 ปี คือ 5.90 และ 5.63 ส่วนเศษซากกิ่งยางพารามีค่าทางสถิติใกล้เคียงกันในช่วงอายุตั้งแต่ 5-26 ปี คือ 0.23-0.26 ตัน/เฮกแตร์ ตามลำดับ (Table 3) ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติบางประการในดินสวนยางพาราที่ระดับความลึก 0-50 ซม. พบว่า มีความแตกต่างทางสถิติสูงที่สุดในดินสวนยางพาราอายุ 5 ปี โดยมีอนุภาคดินเหนียว ไนโตรเจน และคาร์บอนอินทรีย์ เท่ากับ 33.25% 0.14% และ 1.47% ส่วนค่า pH และความหนาแน่นดิน พบว่า มีค่าแตกต่างทางสถิติในแต่ละช่วงอายุเช่นกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.55-5.23 และ 1.43-1.78 ก./ลบ.ซม. ตามลำดับ (Table 4)

2. การเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพารา

ต้นยางพาราสามารถเก็บกักคาร์บอนในส่วนต่างๆ ได้สูงสุดเท่ากับ 143.10 ตัน/เฮกแตร์ เมื่ออายุ 26 ปี ส่วนคาร์บอนในส่วนของเศษซากยางพารานั้น มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 2.91 ตัน/เฮกแตร์ ที่อายุ 12 ปี ขณะที่ปริมาณการเก็บกักคาร์บอนในดินที่อายุ 5 ปี ประเมินได้เท่ากับ 58.77 ตัน/เฮกแตร์ ใกล้เคียงกับที่อายุ 26 ปี คือ 55.81 ตัน/เฮกแตร์ ซึ่งผลรวมทั้งหมดของปริมาณการเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพารามีค่าเท่ากับ 45.43 89.88 107.71 135.27 และ 201.56 ตัน/เฮกแตร์ ตามลำดับอายุดังกล่าว และเมื่อประเมินความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสวนยางพารา พบว่า อยู่ในช่วง 166.72-739.73 ตันคาร์บอนไดออกไซด์/เฮกแตร์ (Figure 1) นอกจากนี้ เมื่อประเมินจากสมการความสัมพันธ์

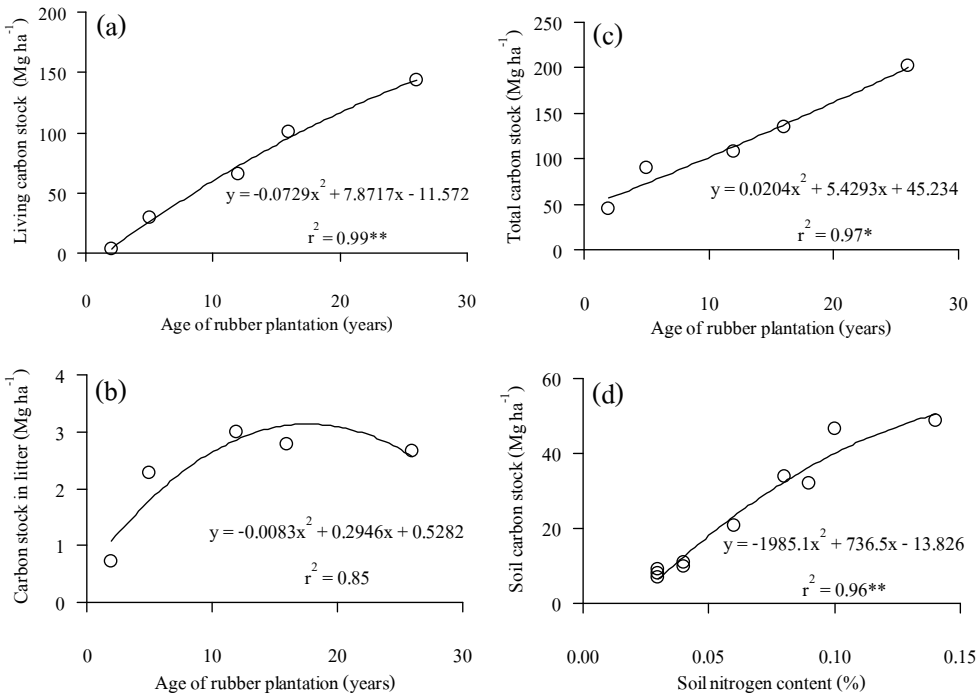

Figure 2 Relationships between carbon stock and rubber ages in living stock (a), litter production (b), total carbon stock (c), and relationship between soil carbon stock and soil nitrogen content (d).

ระหว่างปริมาณคาร์บอนและอายุยางพาราในช่วง 25 ปี พบว่ามีความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล ทั้งปริมาณการเก็บกักคาร์บอนในส่วนของต้น ($y = -0.0729x^2 + 7.8717x - 11.572$, $r^2 = 0.99^{**}$) (Figure 2a) เศษซากยางพารา ($y = -0.0083x^2 + 0.2946x + 0.5282$, $r^2 = 0.85$) (Figure 2b) และปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในสวนยางพารา ($y = 0.0204x2 + 5.4293x + 45.234$, r2= 0.97*) (Figure 2c) ซึ่งมีค่าประเมินสูงสุดเท่ากับ 139.66 3.12 และ 193.72 ตัน/เฮกแตร์ ตามลำดับ ขณะที่ ปริมาณคาร์บอนในดินไม่มีความสัมพันธ์กันในแต่ละช่วงอายุ แต่มีความสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนในดินของสวนยางพารา ($y = -1985.1x^2 + 736.5x - 13.826$, $r^2 = 0.96^{**}$) (Figure 2d)

3. รายได้จากการชดเชยคาร์บอนในสวนยางพารา

อัตราการเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพาราทุกๆ 5 ปี มีค่าเพิ่มสูงสุดในช่วง 6-10 ปี คือ 8.35 ตัน/เฮกแตร์/ปี และลดลงต่ำสุดในช่วง 21-25 ปี คือ 5.98 ตัน/เฮกแตร์/ปี (Table 5) ทั้งนี้สามารถประเมินผลรวมอัตราการเก็บกักคาร์บอนตลอดช่วงเวลา 25 ปี ได้เท่ากับ 176.43 ตัน/เฮกแตร์ ซึ่งสามารถประเมินรายได้จากการชดเชยคาร์บอนทั้งหมดได้เท่ากับ 705.71 $/เฮกแตร์ หรือเท่ากับ 3,770.17 บาท/ไร่ โดยสามารถสรุปแยกเป็นรายได้ในแต่ละปีที่เกษตรกรจะได้รับรวมตลอดทั้ง 25 ปี เท่ากับ 432.25 $/เฮกแตร์ หรือเท่ากับ 2,309.23 บาท/ไร่ ส่วนรายได้จากคาร์บอนเครดิตสำรอง 20% หลังสิ้นสุดสัญญา (20% reimbursement from carbon reserve) เท่ากับ 141.14 $/เฮกแตร์ หรือ 754.03 บาท/ไร่ ขณะที่ค่าธรรมเนียมต่างๆ ได้แก่ ค่าธรรมเนียมตัวแทนในการทำสัญญา (aggregator fee) ค่าธรรมเนียมในการตรวจสอบสัญญา (verification fee) และค่าธรรมสำหรับตลาดซื้อขายคาร์บอนเครดิต (CCX exchange fee) รวมทั้งสิ้นเท่ากับ 132.32 $/เฮกแตร์ หรือ 706.91 บาท/ไร่ ดังนั้น รายได้สุทธิจากการชดเชยคาร์บอนหลังหักค่าธรรมเนียมต่างๆ แล้ว ตลอดช่วงระยะเวลาของสัญญา 25 ปี จึงเท่ากับ 573.39 $/เฮกแตร์ หรือเท่ากับ 3,063.27 บาท/ไร่

วิจารณ์ผลการวิจัย

ต้นยางพารามีการสะสมมวลชีวภาพในต้นยางพาราเพิ่มขึ้นตามระดับช่วงอายุ 2 5 12 16 และ 26 ปี มากที่สุดในส่วนลำต้นและกิ่งของทุกช่วงอายุ ซึ่งโดยปกติยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อาจสะสมมวลชีวภาพอยู่ในส่วนของลำต้นและกิ่งได้มากถึง 80-90% ของมวลต้น (จินตณา บางจั่น และ สุนทรี ยิ่งชัชวาลย์, 2549) ส่วนผลรวมปริมาณเศษซากยางพารามีค่าสูงสุดในช่วงอายุ 12 ปี และมีค่าลดลงใกล้เคียงกันในช่วงอายุ 16 และ 26 ปี ซึ่งเศษซากใบจะพบมากตามลักษณะธรรมชาติของต้นยางพาราที่มีการผลัดใบ

ทุกปี ขณะที่กิ่งจะมีจำนวนมากที่สุดในช่วงระยะก่อนเปิดกรีด และมักเป็นกิ่งที่มีขนาดเล็ก แต่มีการสลัดอย่างต่อเนื่องตั้งแต่หลังเปิดกรีดจนกระทั่งยางพารามีอายุมากขึ้น (Suthisong, 2005) โดยมีปริมาณเศษซากยางพารามากที่สุดในช่วงอายุ 11-12 ปี และลดน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงอายุ 20-21 ปี (อารักษ์ จันทุมา และคณะ, 2551) ทั้งนี้ ปริมาณการร่วงของใบและกิ่งอาจไม่แตกต่างกันในช่วงอายุที่ใกล้เคียงกัน แต่อาจแตกต่างกันได้ตามฤดูกาลและสภาพอากาศบริเวณสวนยางพารา (จารุชาติ ปราชญ์นคร และ ประเสริฐ ชูแสง, 2545) ต้นยางพาราจึงสามารถเก็บกักคาร์บอนในส่วนต่างๆ ของต้นได้สูงสุดที่อายุ 26 ปี เท่ากับ 143.10 ตัน/เฮกแตร์ สอดคล้องกับการประเมินปริมาณคาร์บอนจากค่ามวลชีวภาพยางพาราตลอดช่วงอายุยางพารา 25 ปี พบว่า สามารถประเมินได้เท่ากับ 139.66 ตัน/เฮกแตร์ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการประเมินการเก็บกักคาร์บอนจากค่ามวลชีวภาพในต้นยางพาราอื่นๆ ช่วงอายุ 25 ปี คือ 128.40 ตัน/เฮกแตร์ (สุภาวรรณ เพ็ชศรี และ อำนาจ ชิดไธสง, 2553) และ 139.94 ตัน/เฮกแตร์ (อารักษ์ จันทุมา และคณะ, 2551) ขณะที่ปริมาณคาร์บอนจากค่ามวลชีวภาพสวนป่าสักในช่วงอายุ 6 13 และ 21 ปี เท่ากับ 5.15 20.65 และ 53.15 ตัน/เฮกแตร์ (ทศพร วัชรางกูร และคณะ, 2548) สำหรับปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในสวนยางพาราตลอดช่วงอายุ 1-25 ปีนั้น สามารถประเมินอยู่ในช่วง 50.68-193.72 ตัน/เฮกแตร์ หรือ 8.11-30.99 ตัน/ไร่ จากผลการประเมินนี้แสดงให้เห็นว่า สวนยางพาราเป็นแหล่งดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเก็บกักคาร์บอนที่มีศักยภาพตลอดช่วงอายุของสวนยางพารา

คุณสมบัติบางประการในดินสวนยางพารานั้น พบว่ามีอนุภาคดินเหนียว ไนโตรเจน และคาร์บอนอินทรีย์สูงในดินสวนยางพาราอายุ 5 ปี โดยเฉพาะที่ระดับความลึก 0-25 ซม. จึงทำให้ผลรวมของปริมาณการเก็บกักคาร์บอนในดินมีค่าสูงกว่าช่วงอายุอื่นๆ และหากพิจารณาเฉพาะในสวนยางพาราอายุ 26 ปี พบว่ามีปริมาณคาร์บอนในดินเท่ากับ 46.62 ตัน/เฮกแตร์ (ระดับความลึก 25 ซม.) ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาอื่นๆ คือ 49.00 ตัน/เฮกแตร์ (ดินสวนยางพาราระดับความลึก 30 ซม.) (อารักษ์ จันทุมา และคณะ, 2551) 58.24 ตัน/เฮกแตร์ (ดินป่าดิบแล้งระดับความลึก 20 ซม.) และ 79.74 ตัน/เฮกแตร์ (ดินป่าเบญจพรรณระดับความลึก 20 ซม.) (สิริรัตน์ จันทร์มหเสถียร และคณะ, 2547) ทั้งนี้ แม้ปริมาณการเก็บกักคาร์บอนในดินไม่มีความสัมพันธ์กันในแต่ละช่วงอายุ (Figure 1) แต่มีความสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนในดิน (Figure 2d) หรืออาจผันแปรตามปัจจัยต่างๆ เช่น กิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน (Zhang & Zhang, 2003) การไถพรวนดิน (Al-Kaisi *et al*., 2005) การปลูกพืชร่วม (Zhang *et al*., 2007) อุณหภูมิและการหายใจในดิน (soil respiration) (Smith & Fang, 2010) รวมถึงปริมาณการย่อยสลายของเศษซากพืช และปริมาณไนโตรเจนในดิน (Piñeiro *et al*., 2006) โดยจะมีปริมาณลดลงจากระดับความลึก 0-30 ซม. จากผิวดิน (Yang *et al*., 2010) นอกจากนี้ ยังขึ้นกับการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Pibumrung *et al*., 2008) โดยอาจทำให้มีการสะสมคาร์บอนในดินเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาหากเป็นสภาพพื้นที่ป่า (Zhou *et al*., 2006) แต่อาจลดลงหากเป็นสภาพพื้นที่ทำการเกษตร (Khan *et al*., 2007; David *et al*., 2009)

สวนยางพาราจึงมีศักยภาพเพียงพอต่อการเก็บกักคาร์บอนได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ยืนต้นอื่นๆ ในช่วงอายุใกล้เคียงกันที่ปลูกสร้างเป็นสวนป่าในประเทศไทย เช่น สัก และยูคาลิปตัส ฯลฯ (ทศพร วัชรางกูร และคณะ, 2548) เนื่องจาก ต้นยางพาราสามารถเจริญเติบโตได้เร็วทั้งในระยะก่อนและหลังเปิดกรีด มีปริมาณเศษซากยางพาราร่วงหล่นจำนวนมากในแต่ละปี และยังมีหลักการจัดการสวนที่เอื้อต่อการเก็บกักคาร์บอนได้ดีทั้งในต้นและดิน เช่น การใส่ปุ๋ยเคมีที่มีองค์ประกอบไนโตรเจนสูง (20-8-20 หรือ 30-5-18) หรือปุ๋ยอินทรีย์เพิ่มอินทรียวัตถุในดิน การปลูกพืชร่วมและพืชแซม รวมทั้งไม่มีการไถพรวนดินหลังจากระยะเปิดกรีด และสวนยางพารายังมีอายุเก็บเกี่ยวยาวนานถึง 25-30 ปี ก่อนจะมีการตัดโค่นเพื่อปลูกทดแทน (สถาบันวิจัยยาง, 2550) อย่างไรก็ตาม การสะสมคาร์บอนในสวนยางพาราอาจมีความแตกต่างกันได้ในแต่ละพื้นที่ปลูก ตามสภาพอากาศหรือความสมบูรณ์ของดินแต่ละภูมิภาค โดยเฉพาะผลกระทบจากสภาวะแล้ง (Wauters *et al*., 2008) การศึกษาต่อไป จึงควรวิจัยร่วมกับด้านนิเวศสรีรวิทยา (ecophysiology) และสมดุลของคาร์บอน (carbon balance) ในต้นและดินสวนยางพารา เพื่อประเมินการสะสมและการสูญเสียคาร์บอนได้อย่างแม่นยำขึ้น รวมถึงการพัฒนาเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในแต่ละสภาพแวดล้อมต่อไป (Tuyl *et al*., 2005; Simioni *et al*., 2009)

การประเมินรายได้จากการชดเชยคาร์บอนในสวนยางพาราทั้ง 5 ช่วงเวลานั้น สามารถประเมินรายได้ อยู่ในช่วง 23.93-33.40 $/เฮกแตร์/ปี หรือ 127.87-178.42 บาท/ไร่/ปี ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละช่วงอายุของยางพารา โดยมีอัตราสูงสุดในช่วงอายุ 6-10 ปี และลดลงตั้งแต่ช่วงอายุ 11-15 ปี ตามอัตราการสะสมมวลชีวภาพในต้นยางพาราในระยะหลังเปิดกรีด ซึ่งจะเป็นช่วงเวลาที่เกษตรกรจะมีรายได้สูงสุดในช่วงเวลาของการทำสัญญา อย่างไรก็ตาม การทำสัญญาเพื่อชดเชยคาร์บอนเครดิตในพื้นที่การเกษตรอาจมีความแตกต่างกัน ทั้งในส่วนของระยะเวลาขั้นต่ำ วิธีคำนวณค่าธรรมเนียม

และรายได้จากการชดเชยคาร์บอน อาทิเช่น บางองค์กรอาจไม่คำนวณค่าธรรมเนียมสำหรับการตรวจสอบการทำสัญญา (verification fee) หรือไม่มีการคำนวณค่าธรรมเนียมของสัญญาในส่วนคาร์บอนเครดิตสำรอง 20% (Farlee & Stelzer, 2008) ขณะที่บางองค์กร ใช้วิธีชดเชยในส่วนของคาร์บอนเครดิตสำรอง 20% ให้สูงขึ้น (Current *et al*., 2010) รวมถึงราคาอ้างอิงตามตลาดคาร์บอนที่แต่ละองค์กรอาจกำหนดค่าเฉลี่ยแตกต่างกันหรืออาจต่ำกว่า 4 $/ตัน เป็นต้น จึงมีผลให้รายได้รวมจากการชดเชยคาร์บอนแตกต่างกันได้ ซึ่งการศึกษานี้ ได้คิดค่าธรรมเนียมทั้ง 3 รายการ จากทั้งสองส่วนของรายได้ ทำให้สามารถประเมินรายได้สุทธิเท่ากับ 573.39 $/เฮกแตร์ หรือ 3,063.27 บาท/ไร่ และหากประเมินจากค่าเฉลี่ยการถือครองพื้นที่สวนยางพาราต่อครัวเรือนในประเทศไทยประมาณ 10 ไร่/ครัวเรือน (Somboonsuke *et al*., 2002) ฉะนั้น เกณฑ์เฉลี่ยที่เกษตรกรส่วนใหญ่จะได้รับการชดเชยตลอดช่วงอายุยางพารา คือ 30,632.70 บาท/ครัวเรือนขณะที่การประเมินคาร์บอนเครดิตในสวนป่า 1,000 ไร่ ช่วงอายุ 30 ปี ของต้นยูคาลิปตัส (2x2 ม.) จะมีกำไรประมาณ 2,497 บาท/ตันคาร์บอน (นาฏสุดา ภูมิจำนงค์, 2547)

ผลการศึกษานี้จึงแสดงให้เห็นว่า สวนยางพาราสามารถพัฒนาเป็นโครงการซื้อขายคาร์บอนเครดิตแบบสมัครใจได้เช่นเดียวกับในภาคส่วนของป่าไม้อื่นๆ เพราะเป็นแหล่งเก็บกักคาร์บอนได้ดีทั้งในต้นและดินสวนยางพารา และมีการจัดการสวนที่ช่วยลดการสูญเสียคาร์บอนตลอดช่วงอายุของยางพารา ซึ่งมีระยะเวลายาวนานเพียงพอสำหรับการทำสัญญาซื้อขายคาร์บอนเครดิตตามวิธีการทำสัญญาในตลาด Chicago Climate Exchange อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงความคุ้มค่าในการทำสัญญา แม้ว่าการเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพาราอาจมีประสิทธิผลที่จะซื้อขายในตลาดซื้อขายคาร์บอนเครดิต แต่การทำสัญญาอาจทำให้เกษตรกรมีภาระผูกพัน และไม่สามารถเปลี่ยนแปลงสภาพสวนยางพาราเป็นระยะเวลานานกว่า 25 ปี รวมถึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงผลกระทบต่างๆ เช่น ราคาผลผลิตยางพาราในอนาคต และความสอดคล้องกับบริบททางสังคมหรือวิถีชีวิตของเกษตรกรชาวสวนยางพารา ดังนั้น หากภาครัฐต้องการสนับสนุนโครงการซื้อขายคาร์บอนเครดิตในสวนยางพารา ในระยะแรกควรมีโครงการนำร่องจากภาครัฐเพื่อจัดทำสัญญา เช่น อาจใช้พื้นที่สวนยางพาราบริเวณเขตป่าสงวน ซึ่งปัจจุบันได้เปลี่ยนสภาพเป็นสวนยางพาราประมาณ 1 ล้านไร่ และส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ซึ่งเกษตรกรไม่มีเอกสารสิทธิ์ หรือการร่วมโครงการในพื้นที่สำหรับการสงเคราะห์การทำสวนยาง เป็นต้น (องค์การทำสวนยาง, 2546) ขณะเดียวกัน ภาครัฐสามารถมีส่วนร่วมและดูแลผลประโยชน์ได้ดีกว่าการปล่อยให้มีการทำสัญญากับกลุ่มเกษตรกรสวนยางพาราพื้นที่อื่นๆ โดยตรง และยังเป็นการอนุรักษ์สภาพพื้นที่ป่ายางพาราหรือการปลูกทดแทนสภาพพื้นที่ป่าเสื่อมโทรมบางแห่งได้ยาวนานขึ้นตามระยะเวลาในการทำสัญญาอีกด้วย

สรุปผลการวิจัย

การเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพารามีความสัมพันธ์กับช่วงอายุยางพารา โดยสามารถประเมินการเก็บกักคาร์บอนทั้งหมดในสวนยางพาราช่วง 25 ปี ได้สูงสุดเท่ากับ 193.72 ตัน/เฮกแตร์ หรือ 30.99 ตัน/ไร่ และสามารถประเมินรายได้สุทธิจากการทำสัญญาชดเชยการเก็บกักคาร์บอนตลอด 25 ปี เท่ากับ 573.39 $/เฮกแตร์ หรือ 3,063.27 บาท/ไร่

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ Miss Virginia Hunt ที่มีส่วนร่วมในการเตรียมต้นฉบับงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2549

เอกสารอ้างอิง

คณะกรรมการนโยบายยางธรรมชาติ. (2553). *ยุทธศาสตร์พัฒนายางพารา พ.ศ. 2552-2556*. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

จารุชาติ ปราชญ์นคร และ ประเสริฐ ชูแสง. (2545). *ปริมาณการสะสมและการสลายตัวของเศษไม้ใบไม้ในสวนยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช*. กรุงเทพฯ: กลุ่มลุ่มน้ำ ส่วนวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมป่าไม้ สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้.

จินตณา บางจั่น และสุนทรี ยิ่งชัชวาลย์. (2549). มวลชีวภาพของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 37*(4), 341-351.

ทศพร วัชรางกูร ชิงชัย วิริยะบัญชา และ กันตินันท์ ผิวสอาด. (2548). การประมาณปริมาณการสะสมของคาร์บอนในต้นไม้ในสวนป่าเพื่อการอุตสาหกรรมในประเทศไทย. ใน *รายงานการประชุมวิชาการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทางด้านป่าไม้ "ศักยภาพของป่าไม้ในการสนับสนุนพิธีสารเกียวโต"* (หน้า 137-157). วันที่ 4-5 ส.ค. 2548 กรุงเทพฯ.

ธีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ. (2553). การบริหารจัดการข้อมูลคาร์บอนเครดิตสู่ตลาดสมัครใจ. *วารสารวิจัยเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่, 3*(2), 46-59.

นาฏสุดา ภูมิจำนงค์. (2547). แหล่งกักเก็บก๊าซเรือนกระจกจากภาคป่าไม้และกิจกรรมการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินภายใต้พิธีสารเกียวโต. ใน *การประชุมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทางด้านป่าไม้: ป่าไม้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ*. (16 หน้า). วันที่ 16-17 ส.ค. 2547 กรุงเทพฯ.

ระวี เจียรวิภา อิบรอเฮม ยีดำ และ สายัณห์ สดุดี. (2551). การตัดสินใจโค่นล้มยางพาราโดยอาศัยมวลชีวภาพเหนือดินและอาการผิดปกติทางสรีรวิทยา. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า, 26*(2), 18-27.

สถาบันวิจัยยาง. (2550). *ข้อมูลวิชาการยางพารา 2550*. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สิริรัตน์ จันทร์มหเสถียร ศิริภา โพธิ์พินิจ และ วิลาวัณย์ วิเชียรนพรัตน์. (2547). การศึกษาปริมาณคาร์บอนในดินของระบบนิเวศป่าดิบแล้งและป่าเบญจพรรณ. ใน *การประชุมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทางด้านป่าไม้: ป่าไม้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ*. (15 หน้า). วันที่ 16-17 ส.ค. 2547 กรุงเทพฯ.

สุภาวรรณ เพ็ชศรี และ อำนาจ ชิดไธสง. (2553). ศักยภาพการเก็บกักคาร์บอนในสวนยางพาราของประเทศไทย. ใน *รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติ เรื่อง ประเทศไทยกับภูมิอากาศโลก ครั้งที่ 1: ความเสี่ยงและโอกาสท้าทายในกลไกการจัดการสภาพภูมิอากาศโลก*. (หน้า 439-447). วันที่ 19-21 ส.ค. 2553 จ.นนทบุรี.

สุมน สุเมธเชิงปรัชญา และ พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์. (2553). *แนวทางการพัฒนาโครงการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคป่าไม้*. องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน).

องค์การทำสวนยาง. (2546). *โครงการแปลงสวนยางเป็นทุน*. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. แหล่งข้อมูลออนไลน์ http://www.reothai.co.th/News2.htm (อ้างเมื่อ 18 มี.ค. 54).

อารักษ์ จันทุมา ธีรชาต วิชิตชลชัย พิศมัย จันทุมา ไววิทย์ บูรณธรรม ดารุณี โกสัยเสวี และ สว่างรัตน์ สมนาค. (2551). ผลของการปลูกสร้างสวนยางพาราต่อการเก็บเกี่ยวก๊าซคาร์บอน. ใน *รายงานผลงานวิจัย 36 ปี กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์*. (หน้า 25-27). กรุงเทพฯ.

Al-Kaisi, M.M., Yin, X.H. & Licht, M.A. (2005). Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 105*(4), 635-647.

ANRPC. (2010). *Natural Rubber Trends & Statistics*. Association of Natural Rubber Producing Countries, 2(3), 1-27.

Current, D., Scheer, K., Harting, J., Zamora, D. & Ulland, L. (2010). *A Landowner's Guide to Carbon Sequestration Credits: In association with the Commonwealth Project*. Minnesota: Regional Sustainable Development Partnership.

David, M.B., McIsaac, G.F., Darmody, R.G. & Omonode, R.A. (2009). Long-term changes in Mollisol organic carbon and nitrogen. *Journal of Environmental Quality, 38*, 200-211.

Farlee, L.D. & Stelzer, H.E. (2008). *Cash for Carbon: A Woodland Owner's Guide for Accessing Carbon Markets*. Purdue: Purdue Extension, FNR-228-W, Purdue University.

Ignosh, J., Stephenson, K., Yancey, M., Whittle, B., Alley, M. & Wysor, W.G. (2009). *Virginia Landowner's Guide to the Carbon Market*. Virginia: College of Agriculture and Life Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University, Publication no. 442-138.

IPCC. (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. In. R.K. Pachauri & A. Reisinger (eds.). *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC.

Khan, S.A., Mulvaney, R.L., Ellsworth, T.R. & Boast, C.W. (2007). The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality, 36*, 1821-1832.

Kindermann, G., Obersteiner, M., Sohngen, B., Sathaye, J., Andrasko, K., Rametsteiner, E., Schlamadinger, B., Wunder, S. & Beach, R. (2008). Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105*(30), 10302-10307.

McHale, M.R., McPherson, E.G. & Burke, I.C. (2007). The potential of urban tree plantings to be cost effective in carbon credit markets. *Urban Forestry & Urban Greening, 6*(1), 49-60.

McPherson, E.G. (1998). Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture, 24*(4), 215-223.

Pibumrung, P., Gajaseni, N. & Popan, A. (2008). Profiles of carbon stocks in forest, reforestation and agricultural land, northern Thailand. *Journal of Forest Research, 19*(1), 11-18.

Piñeiro, G., Paruelo, J.M. & Oesterheld, M. (2006). Potential long-term impacts of livestock introduction on carbon and nitrogen cycling in grasslands of Southern South America. *Global Change Biology, 12*, 1267-1284.

Redondo-Brenes, A. & Montagnini, R. (2006). Growth, productivity, aboveground biomass, and carbon sequestration of pure and mixed native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica. *Forest Ecology and Management, 232*, 168-178.

Simioni, G., Ritson, P., Kirschbaum, M.U.F., McGrath, J., Dumbrell, I. & Copeland, B. (2009). The carbon budget of *Pinus radiata* plantations in south-western Australia under four climate change scenarios. *Tree Physiology, 29*, 1081-1093.

Solberg, B. (1997). Forest biomass as carbon sink-economic value and forest management/policy implications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 27*(S1), 323-333.

Somboonsuke, B., Ganesh, P.S. & Demaine, H. (2002). Rubber-based farming system in Thailand: Problems, potential, solution and constraints. *Journal of Rural Development, 21*, 85-113.

Smith, P. & Fang, C.M. (2010). A warm response by soils. *Nature, 464*(25), 499-500.

Stephenson, K., Bosch, D. & Groover, G. (2004). Carbon credit potential from intensive rotational grazing under carbon credit certification protocols. In. *American Agricultural Economics Association Annual Meeting*. (18 pp.). August 1-4, 2004, Denver.

Suthisong, S. (2005). Growing rubber as professional owner: The bark's hardness and the environment of each rubber clone (Part 21). *The Rubber International Magazine, 7*(10), 59-61.

Tuyl, S.V., Law, B.E., Turner, D.P. & Gitelman, A.I. (2005). Variability in net primary production and carbon storage in biomass across Oregon forests-an assessment integrating data from forest inventories, intensive sites, and remote sensing. *Forest Ecology and Management, 209*(3), 273-291.

Walkley, A. & Black, A. (1934). Anexamination of the Degiareff method for determine soil organic matter and a proposed modification of the chromicacid titration method. *Soil Science, 37*, 19-28.

Watkins, K.B., Hignight, J.A. & Anders, M.M. (2009). Assessing the impacts of soil carbon credits and risk on no-till rice profitability. In. *Southern Agricultural Economics Association Annual Meeting*. (25 pp.). January 31-February 3, 2009, Atlanta, Georgia.

Wauters, J.B., Coudert, S., Grallien, E., Jonard, M. & 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, Y.H., Fang, J.Y., Guo, D.L., Ji, C.J. & Ma, W.H. (2010). Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands. *Biogeosciences, 7*, 1-24.

Zhang, H. & Zhang, G.L. (2003). Microbial biomass carbon and total organic carbon of soils as affected by rubber cultivation. *Pedosphere, 13*, 353-357.

Zhang, M., Fu, X.H., Feng, W.T. & Zou, X.M. (2007). Soil organic carbon in pure rubber and tea-rubber plantations in South-western China. *Tropical Ecology, 48*(2), 201-207.

Zheng, H., Ouyang, Z.Y., Xu, W.H., Wang, X.K., Miao, H., Li, X.Q. & Tian, Y.X. (2008). Variation of carbon storage by different reforestation types in the hilly red soil region of southern China. *Forest Ecology and Management, 255*(3-4), 1113-1121.

Zhou, G.Y., Liu, S.G., Li, Z.A. Zhang, D.Q., Tang, X.L., Zhou, C.Y., Yan, J.H. & Mo, J.M. (2006). Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science, 314*, 1417.