นิพนธ์ต้นฉบับ

การประเมินมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนของป่าธรรมชาติและระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสมที่ไม่ถูกรบกวนจากดินถล่มและที่มีการทดแทนตามธรรมชาติ

Valuation of Carbon Stock in Undisturbed Natural Forest and Mixed Fruit Tree-based Agroforestry System by Landslide and Under Natural succession

กัญจน์ชญา เม้าสิ้ว[1]
กณิตา ธนเจริญชณภาส[2]
จรัณธร บุญญานุภาพ[2*]

Kanchaya Maosew[1]
Kanita Thanacharoenchanaphas[2]
Jaruntorn Boonyanuphap[2*]

[1]บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000
The Graduate School, Naresuan University, Phitsanulok 65000 Thailand
[2]คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000
Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok 65000 Thailand
[*]Corresponding author E-mail: charuntornb@nu.ac.th

รับต้นฉบับ 25 กรกฎาคม 2561 รับแก้ไข 4 ตุลาคม 2561 รับลงพิมพ์ 16 พฤศจิกายน 2561

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the carbon stock of mixed fruit tree-based agroforestry system and deciduous forest under normal condition and natural succession at 9 years of landslide. The carbon stock was calculated from the total amount of carbon in ecosystems, including above-ground biomass (stem, branch, leaf, and bamboo), below-ground biomass (tree root), and soil organic carbon. Valuation of carbon stock was based on the carbon credit mechanism regarding the Verified Carbon Standard (VCS), which is the most popular international standards for the voluntary carbon market. The result indicated that the mixed deciduous forest with bamboo the highest carbon sequestration amount at 107.19 tCO_2e/rai, followed by mixed deciduous forest and mixed fruit tree-based agroforestry system, 95.63 and 74.23 tCO_2e/rai, respectively. Under natural succession process caused by landslide, the highest carbon sequestration was occurred in agrofores try system, followed by mixed deciduous forest and mixed deciduous forest with bamboo with 61.54, 30.37 and 29.03 tCO_2e/rai, respectively. Maepoon sub-district provided the carbon stock value of 724,301,483.40 baht for within the area of 73,815.20 rai. The data can be used as guide line for forest ecosystem restoration in the upstream areas for increasing the amount of carbon dioxide absorption to mitigate the problem by greenhouse gas emissions and global warming.

Keywords: Carbon stock's Valuation, Mixed fruit tree-based agroforestry, Deciduous forest, Natural Succession, Landslide

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนของระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสมและป่าผลัดใบภายใต้สถานการณ์ปกติและการทดแทนตามธรรมชาติภายหลังจากเกิดดินถล่มมาแล้ว 9 ปี โดยประเมินจากปริมาณของคาร์บอนทั้งหมดที่กักเก็บในระบบนิเวศ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนในมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (ส่วนของลำต้น กิ่ง ใบ และไผ่) มวลชีวภาพใต้ดิน (รากของต้นไม้) และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดิน การประเมินมูลค่าของปริมาณคาร์บอนอยู่บนฐานของกลไกของการซื้อขายคาร์บอนเครดิตในตลาดคาร์บอนภาคสมัครใจตามมาตรฐานต่างประเทศที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ ตลาด Verified Carbon Standard (VCS) ผลการศึกษาพบว่า ป่าเบญจพรรณผสมไผ่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ามากที่สุด คือ 107.19 tCO_2e/ไร่ รองลงมาคือ ป่าเบญจพรรณและระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสม เท่ากับ 95.63 และ 74.23 tCO_2e/ไร่ ตามลำดับ สำหรับระบบนิเวศที่มีการทดแทนตามธรรมชาติ มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ามากที่สุด คือ ระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสม รองลงมา คือ ป่าเบญจพรรณ และป่าเบญจพรรณผสมไผ่ เท่ากับ 61.54, 30.37 และ 29.03 tCO_2e/ไร่ ตามลำดับ ตำบลแม่พูลมีมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนจำนวน 724,301,483.40 บาท ในเนื้อที่ทั้งหมด 73,815.20 ไร่ ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางจัดการฟื้นฟูระบบนิเวศป่าไม้บนพื้นที่ต้นน้ำในการเพิ่มศักยภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อลดปัญหาการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและภาวะโลกร้อน

คำสำคัญ: การประเมินมูลค่าการกักเก็บคาร์บอน ระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสม ป่าผลัดใบ การทดแทนตามธรรมชาติ ดินถล่ม

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีโครงการกลไกการพัฒนาที่สะอาดที่ได้รับการขึ้นทะเบียนกับ คณะกรรมการบริหารกลไกการพัฒนาที่สะอาด (CDM EB) และได้รับการออกหนังสือรับรองปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ (Issuance of CERs) ซึ่งสามารถนำคาร์บอนเครดิตไปขายในตลาดคาร์บอนได้แล้ว จำนวน 35 โครงการ คิดเป็นปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ 3,525,515 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณคาร์บอนเครดิตที่สามารถนำออกไปขายในตลาดคาร์บอนได้เพียง 0.23% ของปริมาณคาร์บอนเครดิตที่สามารถนำออกไปขายในตลาดคาร์บอนทั่วโลก ดังนั้น หน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องจึงควรส่งเสริมให้ภาคเอกชนที่มีศักยภาพดำเนินโครงการกลไกการพัฒนาที่สะอาดให้มากขึ้น (Wanwisate, 2015)

ป่าไม้สามารถดูดซับและกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้เป็นส่วนหนึ่งของเนื้อไม้และส่วนต่างๆ ของต้นไม้ในรูปของมวลชีวภาพ จากการศึกษาการจัดการป่าไม้ในเอเชียของ Brown (1996) พบว่า มีพื้นที่สวนป่าอยู่ถึง 133 ล้านเฮกตาร์ และป่าธรรมชาติอีกประมาณ 48 ล้านเฮกตาร์ ที่กำลังรอการจัดการและการขึ้นทดแทนตามธรรมชาติ พื้นที่ดังกล่าวนี้คาดว่ามีศักยภาพในการดูดเก็บ CO_2 ถึง 24 PgC (1 PgC = 10^{15} g) เมื่อถึงปี 2050 สำหรับประเทศไทยนั้นมีพื้นที่ป่าธรรมชาติซึ่งครอบคลุมพื้นที่ร้อยละ 28 ของพื้นที่ประเทศ สามารถกักเก็บคาร์บอนได้ถึงร้อยละ 86 ของคาร์บอนทั้งหมดในรูปของมวลชีวภาพ และอีกประมาณร้อยละ 10 กักเก็บอยู่ในรูปมวลชีวภาพของสวนป่าที่ครอบคลุมพื้นที่ประมาณร้อยละ 8.7 ของพื้นที่ทั้งประเทศ (Openshaw, 1997) จะเห็นได้ว่าการปลูกสร้างสวนป่าและการฟื้นฟูพื้นที่ป่าธรรมชาติที่ยังเหลืออยู่ สามารถเป็นแหล่งกักเก็บ CO_2 เพื่อลดปัญหาก๊าซเรือนกระจกและภาวะโลกร้อนได้ทางหนึ่ง

ศักยภาพในการกักเก็บ CO_2 และปริมาณคาร์บอนกักเก็บของป่าชนิดต่างๆ มีความแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างและชนิดพันธุ์ไม้ที่ขึ้นอยู่ซึ่งแปรผันตามสภาพปัจจัยสิ่งแวดล้อม (Ogawa *et al*., 1965; Tsutsumi *et al*., 1983; Negi *et.al.,* 2003) ปัจจุบันได้มีการศึกษาชนิดป่าต่างๆ เช่น การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพรวมของสวนป่าสนสามใบ (Khamyong, 2001) ป่าดิบเขา (Nongnuang *et.al.,* 2010; Khamyong *et.al.,* 2008) การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของป่าดงดิบ ป่าเบญจพรรณ และ ป่าเต็งรัง (Tangtham and Tantasirin, 1997) อย่างไรก็ตาม หากพื้นที่ดังกล่าวเกิดดินถล่ม ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างและองค์ประกอบตลอดจนกระบวนการและกลไกต่างๆ ส่งผลให้พื้นที่การกักเก็บคาร์บอนลดลง และต้องใช้เวลายาวนานในการทดแทนตามธรรมชาติ การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณและมูลค่าคาร์บอนกักเก็บของระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลและป่าธรรมชาติที่ไม่ถูกรบกวนจากดินถล่มและที่มีการทดแทนตามธรรมชาติภายหลังจากเหตุการณ์ดินถล่มมาแล้ว 9 ปี ในบริเวณพื้นที่ต้นน้ำของตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ โดยผลจากการศึกษาทำให้ชุมชนท้องถิ่นและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเกิดความตระหนักต่อการสูญเสียพื้นที่ในการกักเก็บคาร์บอน อีกทั้งยังเป็นข้อมูลที่สำคัญต่อการสร้างแนวทางจัดการฟื้นฟูระบบนิเวศป่าไม้บนพื้นที่ต้นน้ำในการเพิ่มศักยภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาย่อยแม่พร่อง-แม่พูล ตำบลแม่พูล อำเภอลับแล จังหวัดอุตรดิตถ์ (ละติจูด 17°39′10′′ ถึง 17°48′40′′ N และลองจิจูด 99°57′10′′ ถึง 100°02′10′′ E) มีเนื้อที่ประมาณ 116 ตารางกิโลเมตร ความสูงของพื้นที่ตั้งแต่ 80-765 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง ระดับความลาดชันของพื้นที่โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 40-75 องศา สภาพภูมิอากาศร้อนชื้นแถบมรสุม tropical monsoon climate : Am) ปริมาณน้ำฝนรายปีเฉลี่ย 1,641.24 มิลลิเมตร อุณหภูมิรายปีเฉลี่ย 27.4 องศาเซลเซียส อัตราการระเหยเท่ากับ 1,601 มิลลิเมตรต่อปี และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศโดยเฉลี่ยร้อยละ 73 (ข้อมูลโดยเฉลี่ยปี 2535 ถึง 2559) (Figure 1) สภาพภูมิประเทศโดยทั่วไปของพื้นที่ตำบลแม่พูลเป็นเทือกเขาสูงชันปกคลุมไปด้วยผืนป่าธรรมชาติและสวนไม้ผลผสมแบบวนเกษตร ครอบคลุมทั้งในทิศตะวันออก ทิศเหนือ และทิศตะวันตกบริเวณตอนบนของพื้นที่ ขณะที่พื้นที่บางแห่งอยู่ภายใต้การทดแทนทางนิเวศวิทยาภายหลังจากเหตุการณ์ดินถล่มเป็นระยะเวลา 9 ปี ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวเกิดดินถล่มในเดือนพฤษภาคม ปี 2549 โดยมีเนื้อที่ประมาณ 4,993.75 ไร่ (Land Development Department, 2006)

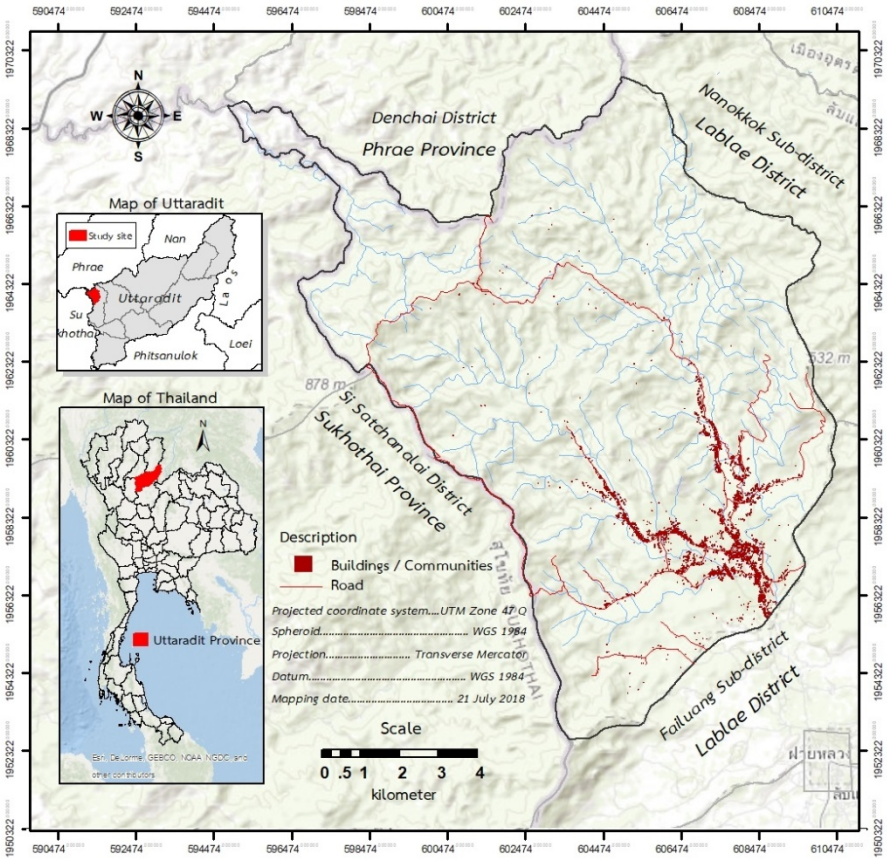

Figure 1 The location of study area in Maepoon sub-district, Uttaradit province, Thailand.

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ศึกษาลักษณะและโครงสร้างของสังคมพืชของระบบนิเวศแหล่งต้นน้ำ

ทำการวางแปลงศึกษาสังคมพืชในระบบนิเวศ 6 ระบบ โดยใช้จำนวน 5 แปลง ต่อระบบนิเวศ ซึ่งมีขนาด 40 × 40 เมตร หรือ 20 × 50 เมตร ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสภาพพื้นที่ เนื่องจากพื้นที่ที่เกิดดินถล่มส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นริ้วตามแนวยาวและมีความกว้างของแนวดินถล่มน้อยกว่า 40 เมตร และแปลงรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถครอบคลุมหย่อมพื้นที่ของชนิดพันธุ์ไม้ที่แตกต่างกันได้ดีที่สุด (Kershaw, 1964) เก็บข้อมูลพันธุ์พืชไม้ยืนต้น (tree species) ทุกชนิดในแปลงตัวอย่าง โดยเลือกไม้ยืนต้นที่มีขนาดความโตเท่ากับหรือมากกว่า 4.5 เซนติเมตร และมีความสูงทั้งหมดของต้นไม้มากกว่า 1.3 เมตร (tree with height > 1.30 m. and DBH $\geq$ 4.5 cm) ซึ่งวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก เพื่อใช้คำนวณหามวลชีวภาพของไม้ยืนต้นในขั้นตอนต่อไป

2. สัณฐานวิทยาลักษณะหน้าตัดชั้นดินและการวิเคราะห์ดินในระบบนิเวศ

กำหนดตำแหน่งของแปลงเก็บตัวอย่างดินในระบบนิเวศ 6 ระบบ โดยดำเนินการศึกษาหน้าตัดชั้นดิน (soil profile) ระบบนิเวศละ 3 หลุม (soil pit) รวมทั้งหมด 18 หลุม ขนาดของหลุม 1.5 × 1.5 เมตร จากผิวดินจนถึงความลึก 1.5 เมตร และโดยแบ่งระดับความลึกของชั้นดินตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแต่ละช่วงชั้นดิน (soil horizon) จากนั้นดำเนินการเก็บตัวอย่าง 2 แบบ คือ 1) การเก็บตัวอย่างแบบไม่ทำลายโครงสร้างดิน โดยใช้กระบอกเก็บดินขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 3 กระบอก (3 replications) เพื่อนำไป

วิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นรวมของดินแต่ละชั้น และ 2) การเก็บตัวอย่างแบบทำลายโครงสร้างของดิน ด้วยการเก็บตัวอย่างดินแบบตัวอย่างรวม นำไปวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินแต่ละช่วงชั้นดิน ใช้วิธีการของ Page *et al*. (1982)

การประเมินมูลค่าการกักเก็บคาร์บอน

คำนวณจากผลรวมของคาร์บอนที่กักเก็บในมวลชีวภาพและคาร์บอนที่กักเก็บอยู่ในดินของระบบนิเวศ ได้แก่ 1) ปริมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (above-ground biomass : AGB) ประกอบด้วย ส่วนของลำต้น กิ่ง ใบ และไผ่ 2) ปริมาณมวลชีวภาพใต้ดิน (below-ground biomass : BGB) ได้แก่ รากของต้นไม้ และ 3) ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดิน (soil organic carbon : SOC)

1. การคำนวณปริมาณมวลชีวภาพของไม้ยืนต้น

คำนวณปริมาณมวลชีวภาพที่กักเก็บอยู่ในรูปของเนื้อไม้ในสถานการณ์ปกติที่ไม่เกิดดินถล่ม โดยใช้สมการแอลโลเมตรีของป่าเบญจพรรณและป่าเต็งรังของ Ogawa *et al.* (1965) และสถานการณ์ที่เคยเกิดดินถล่มส่วนใหญ่เป็นไม้เบิกนำของป่าดิบแล้งจึงใช้สมการแอลโลเมตรีของป่าดิบแล้งของ Tsutsumi *et al.* (1983) โดยสมการแอลโลเมตรีทั้งสองใช้ประเมินมวลชีวภาพของลำต้น กิ่ง และใบของไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ ในขณะที่ มวลชีวภาพของรากคำนวณจากสมการของ Viriyabuncha *et al.* (2003) โดยมีสมการต่อไปนี้

สมการแอลโลเมตรีของป่าเบญจพรรณและป่าเต็งรัง

$$W_S = 0.0396 (D^2H)^{0.9326}$$

$$W_B = 0.00349 (D^2H)^{1.027}$$

$$W_L = (28/W_S+W_B+0.025)^{-1}$$

สมการแอลโลเมตรีของป่าดิบแล้ง

$$W_S = 0.0509 (D^2H)^{0.919}$$

$$W_B = 0.00893 (D^2H)^{0.977}$$

$$W_L = 0.0140 (D^2H)^{0.669}$$

สมการแอลโลเมตรีในการคำนวณมวลชีวภาพของราก

$$W_R = 0.0054(D^2H)^{0.9894}$$

โดย W_S คือ มวลชีวภาพส่วนของลำต้น (กิโลกรัม)

W_B คือ มวลชีวภาพส่วนของกิ่งไม้ (กิโลกรัม)

W_L คือ มวลชีวภาพส่วนของใบ (กิโลกรัม)

W_R คือ มวลชีวภาพส่วนของรากไม้ยืนต้น (กิโลกรัม)

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นไม้ (เซนติเมตร)

H คือความสูงทั้งหมดของต้นไม้ (เมตร)

2. การคำนวณปริมาณมวลชีวภาพของไผ่

การประเมินมวลชีวภาพของไผ่แต่ละชนิดพันธุ์ คำนวณเฉพาะมวลชีวภาพในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินทั้งหมด (ซึ่งไม่รวมมวลชีวภาพของรากไผ่) ทั้งนี้ การประเมินมวลชีวภาพของไผ่เฮียะได้ใช้สมการของไผ่ข้าวหลามของ Kutintara *et al.* (1995) เนื่องจากไผ่เฮียะไม่มีสมการโดยตรง ซึ่งไผ่เฮียะมีลักษณะคล้ายกับไผ่ข้าวหลามทั้งขนาดและความสูง นอกจากนี้ ไผ่เกรียบและไผ่ผากมันใช้สมการของไผ่ผากของ Kutintara *et al.* (1995) ขณะที่ไผ่ซางใช้สมการของ Royampaeng (1990) และไผ่ไร่ใช้สมการของ Kutintara *et al.* (1995) ดังนี้

ไผ่ข้าวหลาม $AGB = 0.49522 (D^2)^{0.8726}$ เมื่อ $R^2 = 0.9908$

ไผ่ผาก $AGB = 0.22574 (D^2)^{1.0214}$ เมื่อ $R^2 = 0.9726$

ไผ่ซาง $AGB = 0.3939 (D)^{1.8325}$ เมื่อ $R^2 = 0.8948$

ไผ่ไร่ $AGB = .24250 (D^2)^{1.0951}$ เมื่อ $R^2 = 0.9343$

โดย AGB คือ มวลชีวภาพส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินทั้งหมดของไผ่ (กิโลกรัม)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับอก (เซนติเมตร)

3. การคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของไม้ยืนต้นและไผ่

การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของไม้ยืนต้น (total tree organic carbon : TTC) และการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของไผ่ (organic carbon in bamboo : BBC) สามารถคำนวณจากปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของคาร์บอนในเนื้อเยื่อพืชส่วนที่เป็นลำต้น กิ่ง และใบ โดยกำหนดให้คาร์บอนในมวลชีวภาพมีค่าสัดส่วนคาร์บอน (carbon fraction: CF) เท่ากับร้อยละ 49.9 48.7 และ 48.3 ตามลำดับ (Tsutsumi *et al.,* 1983) ขณะที่รากของไม้ยืนต้นและมวลชีวภาพของไผ่ มีค่าสัดส่วนคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 47.0 (IPCC, 2006)

4. คำนวณปริมาณการกักเก็บอินทรีย์คาร์บอนในดิน (soil organic carbon accumulation)

การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินแต่ละช่วงชั้นดิน (soil horizon) ใช้วิธีการของ Page *et al.* (1982) จากนั้น คำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของทุกช่วงชั้นดินจากผิวดินถึงระดับความลึก 150 เซนติเมตร ของระบบนิเวศแต่ละประเภท ดังสมการนี้

$$SOC_{accumulated} = \sum_{i=1}^{n} Soil\ weight_i \times SOC_i$$

$$Soil\ weight_i\ (kg/rai) = \left[\frac{(T \times BD \times 1.6^7)}{1,000}\right] \times (1 - \%rock\ fragment)$$

โดย

$SOC_{accumulated}$ คือ ปริมาณการกักเก็บอินทรีย์คาร์บอนจากผิวดินถึงระดับความลึก 150 เซนติเมตร (กิโลกรัมต่อไร่)

SOC_i คือ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินของช่วงชั้นดินที่ *i* (% โดยน้ำหนัก)

$Soil\ weight_i$ คือ น้ำหนักดินในช่วงชั้นดินที่ *i* (กิโลกรัมต่อไร่)

T คือ ความหนาของช่วงชั้นดินที่ *i* (เซนติเมตร)

BD คือ Bulk density ของช่วงชั้นดินที่ *i* (g/cm^3)

% rock fragment คือ ร้อยละกระจายตัวและสัดส่วนที่เป็นหินและรากพืชในช่วงชั้นดินที่ *i*

5. การคำนวณปริมาณคาร์บอนทั้งหมดของระบบนิเวศเป็นการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 absorption) ของระบบนิเวศ เป็นผลรวมของปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศ (ecosystem carbon stock: EC stock) คูณด้วยค่าสัดส่วนระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2: มวลโมเลกุล = 44) และคาร์บอน (C: มวลโมเลกุล = 12) คือ 44/12 หรือ 3.66 (Community Forestry Development Sub-division, 2014) โดยมีสมการ ดังนี้

$$CO_{2\ absorbtion} = EC_{stock} \times CO_2\ CF$$

$$EC_{stock} = TTC + BBC + SOC_{accumulated}$$

โดย

$CO_{2\ absorbtion}$ คือ ปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบนิเวศ (tCO_2e/ไร่)

EC_{stock} คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศ (tC/ไร่)

TTC คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของไม้ยืนต้น (tC/ไร่)

BBC คือ ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของไผ่ (tC/ไร่)

$SOC_{accumulated}$ คือ ปริมาณการกักเก็บอินทรีย์คาร์บอนจากผิวดินถึงระดับความลึก 150 ซม. (tC/ไร่)

$CO_2\ CF$ คือ ค่าสัดส่วนระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอน หรือ 3.66

การประเมินมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศ

การประเมินมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศอยู่บนฐานของกลไกของการซื้อขายคาร์บอนเครดิตในตลาดคาร์บอนภาคสมัครใจตามมาตรฐานต่างประเทศ (Voluntary Emission Reduction Program: VER) ได้แก่ ตลาด Verified Carbon Standard (VCS) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในตลาดคาร์บอนภาคสมัครใจ โดยกำหนดราคาเฉลี่ยของคาร์บอนเครดิตใน ปี 2560 เท่ากับ 3.9 US$/t$CO_2$e (Hamrick and Gallant, 2017) และกำหนดค่าธรรมเนียมการซื้อขายคาร์บอน เท่ากับ 0.1 US$/t$CO_2$e (Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), 2014) โดยอัตราแลกเปลี่ยนเงินไทย 31.4063 บาท/ดอลลาร์สหรัฐ (ธนาคารแห่งประเทศไทย ณ วันที่ 30 มีนาคม 2561) มูลค่าทั้งหมดของการกักเก็บคาร์บอนในบริเวณพื้นที่แหล่งต้นน้ำของตำบลแม่พูล ถูกคำนวณจากมูลค่าของการกักเก็บคาร์บอนของแต่ละระบบนิเวศคูณกับจำนวนเนื้อที่ของระบบนิเวศแต่ละประเภท ซึ่งได้จากชั้นข้อมูลการใช้ที่ดินในปี 2559 (GIS layers) ที่ได้จากการแปลตีความด้วยสายตาจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมไทยโชติ (THEOS) และดาวเทียม GeoEye-1

ผลและวิจารณ์

ลักษณะและโครงสร้างของสังคมพืช

ระบบนิเวศป่าไม้ตามธรรมชาติบริเวณแหล่งต้นน้ำของตำบลแม่พูลจำแนกได้ 2 ประเภท ได้แก่ ป่าเบญจพรรณและป่าเบญจพรรณผสมไผ่ โดยระบบนิเวศป่าเบญจพรรณ มีองค์ประกอบของชนิดพันธุ์ไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ (tree species) 73 ชนิด 62 สกุล 42 วงศ์ โดยมีชนิดพันธุ์ที่เด่นและมีค่าดัชนีความสำคัญมาก เช่น คอแลน (*Nephelium hypoleucum* Kurz.) ปอหยาบ (*Colona flagrocarpa* Craib var. siamica Craib) ติ้วขน (*Cratoxylum formosum* Byer) เปล้าใหญ่ (*Croton persimilis* Müll.Arg.) กางขี้มอด (*Albizia odoratissima* Benth.) และ แดง (*Xylia xylocarpa* (Roxb.) Taub.) โดยมีความหนาแน่นของไม้ยืนต้น 702.50 ต้นต่อเฮกตาร์ หรือ 112.40 ต้นต่อไร่ ขนาดพื้นที่หน้าตัด 70.71 ตารางเมตรต่อเฮกตาร์ (11.31 ตารางเมตรต่อไร่) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 16.27 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 10.87 เมตร นอกจากนี้ยังพบไผ่ผาก ไผ่เกรียบ ไผ่ซางและไผ่ไร่ ขึ้นแทรกปะปน โดยความหนาแน่นของไผ่ทุกชนิดเท่ากับ 746.67 ลำต่อเฮกตาร์ หรือ 119.47 ลำต่อไร่ (Table 1) ระบบนิเวศป่าเบญจพรรณมีค่าดัชนีความหลากหลาย Shannon – Weiner index (*H'*) เท่ากับ 3.75 ซึ่งมีค่าความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้ใหญ่สูงกว่าป่าเบญจพรรณในอุทยานแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติไทยประจัน จังหวัดราชบุรี ที่มีความหนาแน่นของไม้ยืนต้น 538 ต้นต่อเฮกตาร์ มีค่าดัชนีความหลากหลาย (*H'*) เท่ากับ 3.52 โดยพบไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ 72 ชนิด 57 สกุล 22 วงศ์ (Phetchaburi National Parks Research Center, 2016) นอกจากนี้ ชนิดพันธุ์ไม้ใหญ่ที่พบจากการศึกษาครั้งนี้ใกล้เคียงกับป่าเบญจพรรณในอุทยานแห่งชาติศรีลานนา จังหวัดเชียงใหม่ (60 ชนิด 50 สกุล 21 วงศ์) (National Parks Research and Innovation Development Center Chiang Mai Province, 2015) แต่มีจำนวนชนิดพันธุ์ไม้ใหญ่มากกว่าป่าเบญจพรรณสมบูรณ์และป่าเบญจพรรณที่ถูกใช้ประโยชน์ในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ของนิคมสหกรณ์ฟากท่า อำเภอฟากท่า จังหวัดอุตรดิตถ์ (46 ชนิด จำนวน 27 วงศ์ และ 60 ชนิด 29 วงศ์ ตามลำดับ) (Pongthornpruek, 2017)

สำหรับระบบนิเวศป่าเบญจพรรณผสมไผ่ พบชนิดพันธุ์ไม้ขนาดใหญ่ 64 ชนิด 53 สกุล 33 วงศ์ โดยมีชนิดพันธุ์ที่เด่น เช่น ประดู่ (*Pterocarpus macrocarpus* Kurz) มะเกิ้ม (*Canarium subulatum* Guill.) สมอพิเภก (*Terminalia bellirica* (Gaertn.) Roxb.) ตะแบกเปลือกบาง *Lagerstroemia duperreana* Pierre ex Gagnep. คำแสด (*Bixa Orellana* Linn.) เป็นต้น นอกจากนี้ พบ

ไผ่ซาง ไผ่ไร่ และไผ่ผากมัน ซึ่งความหนาแน่นของไผ่ทั้งสามชนิดเท่ากับ 1,603.33 ลำต่อเฮกตาร์ (256.53 ลำต่อไร่) ความหนาแน่นของไม้ยืนต้น 576.69 ต้นต่อเฮกตาร์ (92.27 ต้นต่อไร่) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 13.27 ตารางเมตรต่อเฮกตาร์ (2.12 ตารางเมตรต่อไร่) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 13.86 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 9.92 เมตร (Table 1) มีค่าดัชนีความหลากหลาย (*H'*) เท่ากับ 3.81 ซึ่งมีค่าความหลากหลายสูงกว่าระบบนิเวศป่าเบญจพรรณ

ชนิดพันธุ์ไม้ขนาดใหญ่ที่พบในระบบวนเกษตรมีทั้งหมด 16 ชนิด 16 สกุล 12 วงศ์ โดยปลูกแทรกร่วมกับพรรณไม้ป่าดั้งเดิมในท้องถิ่น เช่น ทุเรียนสายพันธุ์ต่างๆ (*Durio zibethinus* Murray) โดยส่วนใหญ่ปลูกระยะ 8 × 4 เมตร (ประมาณ 25 ต้น) ลางสาด (*Lansium domesticum* Correa) ลองกอง (*Aglaia dookkoo* Griff.) มังคุด (*Garcinia mangostana* Linn.) และกาแฟโรบัสต้า (*Coffea canephora* Pierre ex A.Froehner) ความหนาแน่นของไม้ยืนต้น 383.31 ต้นต่อเฮกตาร์ (61.33 ต้นต่อไร่) ขนาดพื้นที่หน้าตัด 10.08 ตารางเมตรต่อเฮกตาร์ (1.61 ตารางเมตรต่อไร่) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 13.91 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 7.53 เมตร (Table 1) มีค่าดัชนีความหลากหลายเท่ากับ 1.37

ขณะที่ระบบนิเวศที่เคยเกิดดินถล่มในปี 2549 พบว่าป่าเบญจพรรณมีชนิดพันธุ์ไม้ขนาดใหญ่ทั้งหมด 16 ชนิด 12 สกุล 9 วงศ์ มีความหนาแน่นของไม้ยืนต้น 206.63 ต้นต่อเฮกตาร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 7.45 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 6.91 เมตร และมีค่าดัชนีความหลากหลายเท่ากับ 2.27 ในด้านป่าเบญจพรรณผสมไผ่พบชนิดพันธุ์ไม้ใหญ่ทั้งหมด 28 ชนิด 20 สกุล 15 วงศ์ โดยมีความหนาแน่นของไม้ยืนต้น 576.69 ต้นต่อเฮกตาร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 7.62 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 6.46 เมตร และมีค่าดัชนีความหลากหลายเท่ากับ 2.31 และสวนวนเกษตรที่เกิดดินถล่มพบชนิดพันธุ์ไม้ใหญ่ทั้งหมด 28 ชนิด 24 สกุล 15 วงศ์ โดยมีความหนาแน่นของไม้ยืนต้น 460.00 ต้นต่อเฮกตาร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 11.91 เซนติเมตร ความสูงเฉลี่ย 7.46 เมตร และมีค่าดัชนีความหลากหลายเท่ากับ 2.63 พบในบริเวณไหล่เขาลงจนถึงพื้นที่เชิงเขา ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการกักเก็บมวลของวัตถุที่เคลื่อนที่หรือไหลลงมาจากพื้นที่สันเขาและไหล่เขา ทำให้มีการทดแทนตามธรรมชาติของพรรณไม้เร็วกว่าป่าเบญจพรรณและป่าเบญจพรรณผสมไผ่ที่เคยเกิดดินถล่ม ทุกระบบนิเวศที่เคยเกิดดินถล่มปัจจุบันอยู่ในระหว่างการทดแทนทางนิเวศวิทยาระยะที่มีไม้ยืนต้นเบิกนำโตเร็วในท้องถิ่นขึ้นปกคลุม ระบบวนเกษตรที่เคยเกิดดินถล่มมีการปกคลุมของพืชพื้นล่างอยู่ทั่วไป ส่วนใหญ่เป็นพืชล้มลุก หญ้า และไม้เลื้อย เช่น กล้วยป่า ตองกง สาบเสือ หญ้าคา เป็นต้น ขณะที่ไม้ยืนต้นที่ขึ้นอยู่ส่วนใหญ่เป็นไม้เบิกนำของป่าดิบแล้ง เช่น ตองแตบ หรือ ปอหูช้างใบเล็ก (*Macaranga denticulata* (Blume) Muell. Arg.) มะเดื่อปล้องหิน (*Ficus semicordata* Buch.-Ham. ex Sm.) เต้าหลวง (*Macaranga gigantea* (Rchb. f. & Zoll.) Müll. Arg.) และข้าวสารหลวง (*Maesa ramentacea* (Roxb.) A. DC.) เป็นต้น

Table 1 Characteristic of tree and bamboo for each ecosystem type.

Ecosystem type	DBH (cm)			Tree height (m)			Tree density		density of bamboo stands	
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	(tree/rai)	(tree/ha)	(culm/rai)	(culm/ha)
MNSL	16.27(6.66) a	80.00	4.50	10.87(2.5) a	24.00	2.00	112.40	702.50	119.47	746.67
MSSL	7.45(0.96) b	19.00	4.50	6.91(1.13) bc	13.00	3.00	33.06	206.63	16.00	100.00
BNSL	13.86(5.73) ab	108.00	4.50	9.92(2.76) ab	23.00	1.50	92.27	576.69	256.53	1,603.33
BSSL	7.62(0.90) b	39.00	4.50	6.46(0.76) c	18.00	3.00	83.20	520.00	24.00	150.00
FNSL	13.91(3.52) ab	101.10	4.50	7.53(0.77) bc	40.00	2.00	61.33	383.31	-	-
FSSL	11.91(1.64) ab	105.00	4.50	7.46(0.25) bc	22.00	1.80	73.60	460.00	60.00	375.0

Notes: Parentheses indicate standard deviation; The different letters within the same column indicate statistically significant differences (p<0.05) MNSL, Mixed deciduous forest; MSSL, Mixed deciduous forest under landslide; BNSL, Mixed deciduous forest with bamboo; BSSL, Mixed deciduous forest with bamboo under landslide; FNSL, Mixed fruit tree-based agroforestry; FSSL, Mixed fruit tree-based agroforestry under landslide

สัณฐานวิทยาและลักษณะหน้าตัดชั้นดิน

แปลงศึกษาของระบบวนเกษตรอยู่บริเวณตอนล่างของลาดดิน (down slope) ขณะที่ตำแหน่งแปลงศึกษาระบบนิเวศป่าเบญจพรรณและป่าเบญจพรรณผสมไผ่อยู่บริเวณตอนบนและตอนกลางของลาดดินตามลำดับ โดยตำแหน่งของลาดดินที่ผันแปรตามระดับความสูงของภูมิทัศน์ในพื้นที่ ซึ่งส่งผลต่อระดับความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น โดยเฉพาะดินชั้นบน (top soil : O and A horizon) และดินชั้นล่างตอนบน (upper subsoil : B horizon) ซึ่งตามปกติจะมีสัดส่วนของปริมาณหินและรากพืชที่กระจายตัวอยู่ในชั้นดินน้อยกว่าชั้นดินล่างที่อยู่ลึกลงไป (Regolith : C horizon) อันเป็นชั้นดินที่มีปริมาณเป็นหินหลายขนาดที่สลายตัวผุพังเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ (weathered parent material or rock fragments) และพบว่าหน้าตัดชั้นดินของระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสมมีปริมาณหินและปริมาณรากพืชที่กระจายตัวอยู่ในชั้นดินน้อยกว่าระบบนิเวศอื่นๆ โดยพบว่าปริมาณหินโดยเฉลี่ยของระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสมมีน้อยที่สุด รองลงมา ได้แก่ ป่าเบญจพรรณและป่าเบญจพรรณผสมไผ่ โดยรายละเอียดสัณฐานวิทยาและลักษณะหน้าตัดชั้นดินของแต่ละแปลงศึกษา (จำนวน 18 หลุม) แสดงในข้อมูลเสริม (supplementary data)

การกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศแหล่งต้นน้ำ

1. ปริมาณมวลชีวภาพ

ป่าเบญจพรรณมีปริมาณมวลชีวภาพมากที่สุด คือ 19.10 ตันต่อไร่ รองลงมา ได้แก่ ป่าเบญจพรรณผสมไผ่ ระบบวนเกษตร ระบบวนเกษตรที่เกิดดินถล่ม และป่าเบญจพรรณผสมไผ่ที่เกิดดินถล่ม (15.31, 10.01, 6.23 และ 2.26 ตันต่อไร่ ตามลำดับ) ขณะที่ ป่าเบญจพรรณที่เกิดดินถล่มมีปริมาณมวลชีวภาพของไม้ยืนต้นเฉลี่ยน้อยที่สุด (0.86 ตันต่อไร่) โดยรายละเอียดแสดงใน Table 2

2. การกักเก็บคาร์บอน (carbon stock)

2.1 การกักเก็บคาร์บอนในดิน

การกักเก็บคาร์บอนในดินหรือปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในดิน (SOC) ของป่าเบญจพรรณผสมไผ่มีปริมาณมากที่สุด (21.78 ตันคาร์บอนต่อไร่) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปริมาณคาร์บอนในดินของป่าเบญจพรรณผสมไผ่บริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี (35.83 ตันต่อไร่) (Diloksumpun *et al.*, 2005) ขณะที่ SOC ของป่าเบญจพรรณ ระบบวนเกษตร

ระบบวนเกษตรที่เกิดดินถล่ม ป่าเบญจพรรณที่เกิดดินถล่ม และป่าเบญจพรรณผสมไผ่ที่เกิดดินถล่ม เท่ากับ 16.73, 15.32, 13.73, 7.86 และ 6.806 ตันคาร์บอนต่อไร่ ตามลำดับ (Table 2)

2.2 การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของไม้ยืนต้นและไผ่

การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของไม้ยืนต้นขนาดใหญ่และไผ่ในระบบนิเวศป่าเบญจพรรณมีปริมาณมากที่สุด (9.36 ตันคาร์บอนต่อไร่) ซึ่งมีปริมาณมากกว่าป่าเบญจพรรณในอุทยานแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติไทยประจันที่มีปริมาณ 5.07 ตันคาร์บอนต่อไร่ (Phetchaburi National Parks Research Center, 2016) สำหรับระบบนิเวศป่าเบญจพรรณผสมไผ่มีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของไม้ใหญ่ 7.45 ตันคาร์บอนต่อไร่ โดยมีค่าน้อยกว่าการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของไม้ใหญ่และไผ่ในป่าเบญจพรรณบริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี (19.25 ตันคาร์บอนต่อไร่) (Diloksumpun *et al.*, 2005) ขณะที่ระบบวนเกษตร ระบบวนเกษตรที่เกิดดินถล่ม ป่าเบญจพรรณผสมไผ่ที่เกิดดินถล่ม และป่าเบญจพรรณที่เกิดดินถล่มมีการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพ 4.93, 3.06, 1.12 และ 0.42 ตันคาร์บอนต่อไร่ ตามลำดับ (Table 2)

2.3 ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในระบบนิเวศ

การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพและในดิน หรือ ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (total carbon stock) ในระบบนิเวศป่าเบญจพรรณผสมไผ่มีค่า 29.23 ตันคาร์บอนต่อไร่ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าป่าเบญจพรรณผสมไผ่บริเวณลุ่มน้ำแม่กลอง (56.09 ตันคาร์บอนต่อไร่) (Diloksumpun *et al.*, 2005) สำหรับปริมาณคาร์บอนทั้งหมดของป่าเบญจพรรณในพื้นที่ศึกษา (26.09 ตันคาร์บอนต่อไร่) มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพและในดินที่ระดับความลึก 1 เมตร ของป่าเบญจพรรณจากการศึกษาของ Tangtham and Tantasirin (1997) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 27.68 ตันคาร์บอนต่อไร่ อย่างไรก็ตาม ป่าดิบแล้งสะแกราช อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา มีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมด 69.53 ตันคาร์บอนต่อไร่ (Diloksumpun *et al.*, 2005) เนื่องจากระบบนิเวศที่เกิดดินถล่มอยู่ในระยะการทดแทนทางนิเวศตามธรรมชาติ จึงส่งผลให้การกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดมีปริมาณน้อยกว่าระบบนิเวศประเภทเดียวกันที่ไม่เกิดดินถล่ม โดยระบบวนเกษตรที่เคยเกิดดินถล่มมีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมด 16.79 ตันคาร์บอนต่อไร่ ขณะที่ระบบนิเวศป่าเบญจพรรณและป่าเบญจพรรณผสมไผ่ที่เคยเกิดดินถล่มมีการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมด 8.28 และ 7.92 ตันคาร์บอนต่อไร่ ตามลำดับ ทั้งนี้ จากการสำรวจภาคสนามพบว่าดินถล่มที่เกิดขึ้นในป่าเบญจพรรณส่วนใหญ่พบอยู่บริเวณไหล่เขาตอนบนและเกิดความเสียหายระดับรุนแรง ผลจากการศึกษาสัณฐานวิทยาของหน้าตัดชั้นดินและชนิดพรรณไม้องค์ประกอบของสังคมพืชแสดงให้เห็นว่าดินถล่มระดับรุนแรงสามารถทำให้เกิดการสูญเสียชั้นดินลึกถึงระดับมากกว่า 60 เซนติเมตร ส่งผลให้กระบวนการทดแทนของสังคมพืชเป็นไปค่อนข้างช้าและใช้ระยะเวลายาวนาน โดยเฉพาะการเจริญเติบโตของไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ที่ขึ้นปกคลุมบริเวณป่าเบญจพรรณที่เกิดดินถล่ม ในทางกลับกันระบบวนเกษตรที่เคยเกิดดินถล่มเป็นบริเวณที่มีการสะสมมวลของวัตถุที่เคลื่อนที่หรือไหลลงมาจากพื้นที่สันเขาและไหล่เขาเมื่อเกิดดินถล่ม ทำให้มีการทดแทนตามธรรมชาติของพรรณไม้เร็วกว่าป่าเบญจพรรณและป่าเบญจพรรณผสมไผ่ที่เคยเกิดดินถล่ม

3. ปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบนิเวศ

ปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในป่าเบญจพรรณผสมไผ่มีมากที่สุด คือ 107.19 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ รองลงมาได้แก่ ป่าเบญจพรรณ ระบบวนเกษตร ระบบวนเกษตรที่เกิด

ดินถล่ม ป่าเบญจพรรณที่เกิดดินถล่ม และป่าเบญจพรรณผสมไผ่ที่เกิดดินถล่ม มีค่าเท่ากับ 95.63, 74.23, 61.54, 30.37, และ 29.03 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ ตามลำดับ (Table 3)

4. มูลค่าการกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศ

ป่าเบญจพรรณผสมไผ่มีมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนมากที่สุด คือ 12,791.93 บาทต่อไร่ รองลงมาได้แก่ ป่าเบญจพรรณ ระบบวนเกษตร ระบบวนเกษตรที่เกิดดินถล่ม ป่าเบญจพรรณที่เกิดดินถล่ม และป่าเบญจพรรณผสมไผ่ที่เกิดดินถล่ม โดยมีมูลค่าเท่ากับ 11,412.56, 8,858.37, 7,344.46, 3,624.57 และ 3,464.51 บาทต่อไร่ ตามลำดับ เมื่อคำนวณร่วมกับชั้นข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินปี 2559 พบว่า พื้นที่แหล่งต้นน้ำของตำบลแม่พูลมีมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมด 724,301,483.40 บาท โดยที่ระบบวนเกษตรมีมูลค่าสูงสุดคือ 370,328,739.31 บาท เนื่องจากการใช้ที่ดินส่วนใหญ่เป็นระบบวนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสมจึงทำให้มีมูลค่ามากที่สุด รองลงมา คือ ป่าเบญจพรรณผสมไผ่ ป่าเบญจพรรณ ระบบวนเกษตรที่เคยเกินดินถล่ม ป่าเบญจพรรณที่เคยเกิดดินถล่ม และ ป่าเบญจพรรณผสมไผ่ที่เคยเกิดดินถล่ม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 205,355,027.75, 111,009,708.76, 29,696,974.48, 7,665,018.53 และ 246,014.57 บาทต่อไร่ ตามลำดับ (Table 3)

Table 2 Total biomass and carbon stocks for each ecosystem type.

Ecosystem type	Above-ground biomass (ton/rai)				Below-ground biomass (Tree root) (ton/rai)	Total biomass (ton/rai)	Carbon stock (ton/rai)						SOC	Total carbon stock (ton/rai)
	Stem	Branch	Leaf	Bamboo			Stem	Branch	Leaf	Bamboo	Root	Total biomass carbon (ton/rai)		
MNSL	11.28 (5.64) a	2.48(1.36) a	0.49(0.25) a	2.19(0.57) b	2.66(1.41) a	19.10(9.69) a	5.63(2.81) a	1.21(0.66) a	0.24(0.12) a	1.03(0.56) b	1.25(0.66) a	9.36	16.73(3.13) ab	26.09(12.08) ab
MSSL	0.52 (0.19) b	0.13(0.05) a	0.03(0.01) b	0.09(0.16) b	0.09(0.04) b	0.86(0.15) c	0.26(0.10) b	0.07(0.03) b	0.01(0.00) b	0.04(0.08) b	0.04(0.02) b	0.42	7.86(3.64) cd	8.28(3.5) b
BNSL	7.65 (8.48) ab	1.79(2.08) a	0.34(0.38) ab	3.65(1.86) a	1.87(2.13) ab	15.31(11.83) ab	3.82(4.23) ab	0.87(1.01) ab	0.16(0.18) ab	1.72(0.88) a	0.88(1.00) ab	7.45	21.78(4.62) a	29.23(7.98) a
BSSL	1.42 (1.08) b	0.38(0.31) a	0.07(0.04) b	0.14(0.24) b	0.25(0.21) b	2.26(1.89) bc	0.71(0.54) b	0.19(0.15) ab	0.03(0.02) b	0.07(0.12) b	0.12(0.10) b	1.12	6.80(2.73) d	7.92(3.58) b
FNSL	6.50 (2.33) ab	1.59(0.77) a	0.29(0.11) ab	0.00(0.00) b	1.63(0.70) ab	10.01(3.89) abc	3.24(1.16) ab	0.78(0.37) ab	0.14(0.05) ab	0.00(0.00) b	0.77(0.33) ab	4.93	15.32(0.66) b	20.24(1.43) ab
FSSL	3.93 (2.98) ab	1.16(0.92) a	0.13(0.08) ab	0.23(0.39) b	0.78(0.63) ab	6.23(4.68) bc	1.96(1.54) b	0.56(0.46) ab	0.06(0.04) b	0.11(0.18) b	0.37(0.30) b	3.06	13.73(4.45) bc	16.79(6.44) ab

Notes: 6.25 rai is 1 ha; Parentheses indicate standard deviation; The different letters within the same column indicate statistically significant differences (p<0.05); MNSL, Mixed deciduous forest; MSSL, Mixed deciduous forest under landslide; BNSL, Mixed deciduous forest with bamboo; BSSL, Mixed deciduous forest with bamboo under landslide; FNSL, Mixed fruit tree-based agroforestry; FSSL, Mixed fruit tree-based agroforestry under landslide

Table 3 Carbon sequestration and valuation of carbon stock for each ecosystem type.

Ecosystem type	CO_2 (tCO_2e/rai)			Sum CO_2 (tCO_2e/rai)	Area[a] (rai)	Total CO_2 (tCO_2e)	Value (baht)	Fee (baht)	Net value (baht)	Value/rai (baht)
	Tree	Bamboo	SOC							
MNSL	30.52	3.78	61.33	95.63	9,726.98	930,166.28	113,931,016.89	2,921,308.13	111,009,708.76	11,412.56
MSSL	1.38	0.16	28.83	30.37	2,114.74	64,226.29	7,866,729.54	201,711.01	7,665,018.53	3,624.57
BNSL	21.02	6.30	79.86	107.19	16,053.48	210,759,107.42	210,759,107.42	5,404,079.68	205,355,027.75	12,791.93
BSSL	3.83	0.25	24.95	29.03	71.01	252,488.64	252,488.64	6,474.07	246,014.57	3,464.51
FNSL	18.06	0.0	56.17	74.23	41,805.54	3,103,037.65	380,074,232.45	9,745,493.14	370,328,739.31	8,858.37
FSSL	10.82	0.39	50.33	61.54	4,043.45	248,835.21	30,478,473.80	781,499.33	29,696,974.48	7,344.46
				Sum	73,815.20	743,362,048.75	606,902.61	19,060,565.35	724,301,483.40	

Notes: [a]6.25 rai is 1 ha MNSL, Mixed deciduous forest; MSSL, Mixed deciduous forest under landslide; BNSL, Mixed deciduous forest with bamboo; BSSL, Mixed deciduous forest with bamboo under landslide; FNSL, Mixed fruit tree-based agroforestry; FSSL, Mixed fruit tree-based agroforestry under landslide

สรุป

พื้นที่ต้นน้ำของตำบลแม่พูลส่วนใหญ่มีสภาพเป็นระบบวนเกษตร (ร้อยละ 56.64 ของพื้นที่ต้นน้ำ) โดยมีระบบนิเวศป่าเบญจพรรณและป่าเบญจพรรณผสมไผ่ปกคลุมพื้นที่บางส่วนของแหล่งต้นน้ำ (ร้อยละ 13.18 และ 21.75 ตามลำดับ) ขณะที่บริเวณที่เกิดดินถล่มของทุกระบบนิเวศมีเนื้อที่รวมกันร้อยละ 8.44 ของพื้นที่ต้นน้ำ เบญจพรรณผสมไผ่มีการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมด 29.23 ตันคาร์บอนต่อไร่ โดยมีการสะสมของปริมาณคาร์บอนในดินและในไผ่มากกว่าระบบนิเวศประเภทอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2 และ Figure 2) ขณะที่ ป่าเบญจพรรณและระบบวนเกษตรมีการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมด 26.09 และ 20.24 ตันคาร์บอนต่อไร่ ตามลำดับ การกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของลำต้น กิ่ง ใบ และรากของไม้ใหญ่พบมากที่สุดในป่าเบญจพรรณ สำหรับระบบนิเวศภายใต้การทดแทนทางธรรมชาติ พบว่า ระบบวนเกษตรที่เคยเกิดดินถล่มมีการกักเก็บคาร์บอนมากที่สุดใน 16.79 ตันคาร์บอนต่อไร่ โดยปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในดินมีสัดส่วนมากที่สุด (ร้อยละ 81.77 ของปริมาณคาร์บอนทั้งหมด) (Table 2 และ Figure 2) หากพื้นที่ป่าเบญจพรรณและป่าเบญจพรรณผสมไผ่ถูกเปลี่ยนไปเป็นพื้นที่วนเกษตรแบบสวนไม้ผลผสม จะส่งผลให้การกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดลดลง 5.85 และ 8.99 ตันคาร์บอนต่อไร่ ตามลำดับ ขณะที่กระบวนการทดแทนทางธรรมชาติภายหลังจากเกิดดินถล่มมาแล้ว 9 ปี ส่งผลให้ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดของป่าเบญจพรรณผสมไผ่ ป่าเบญจพรรณ และระบบวนเกษตรต้องมีการสะสมเพิ่มขึ้นอีก ร้อยละ 72.90 68.26 และ 17.05 ตันคาร์บอนต่อไร่ เพื่อให้มีปริมาณการกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดเทียบเท่ากับระบบนิเวศภายใต้สถานการณ์ปกติ การกักเก็บคาร์บอนทั้งหมดในพื้นที่แหล่งต้นน้ำของตำบลแม่พูลมีมูลค่า 724,760,247.77 บาท ขณะที่ มูลค่าการกักเก็บคาร์บอนที่ได้จากการทดแทนทางธรรมชาติภายหลังจากเกิดดินถล่มมาแล้ว 9 ปี ของทุกระบบนิเวศเท่ากับ 38,066,771.95 บาท ผลจากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลที่สำคัญต่อการสร้างแนวทางจัดการฟื้นฟูระบบนิเวศป่าไม้บนพื้นที่ต้นน้ำ เพื่อเพิ่มความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศ (ecosystem carbon storage capacity) ต่อไป

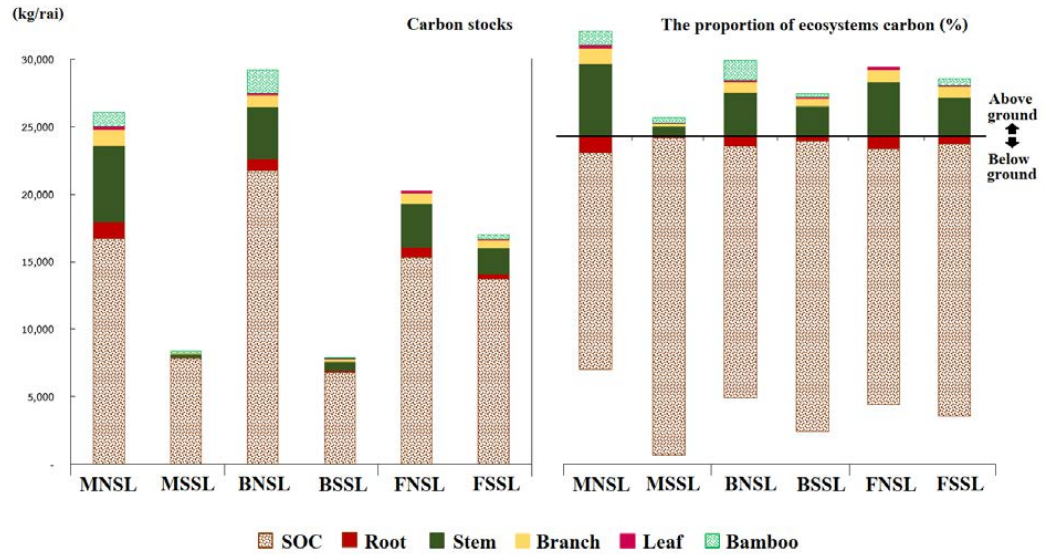

Figure 2 Carbon stocks and carbon proportion in the ecosystems.

Notes: MNSL, Mixed deciduous forest; MSSL, Mixed deciduous forest under landslide; BNSL, Mixed deciduous forest with bamboo; BSSL, Mixed deciduous forest with bamboo under landslide; FNSL, Mixed fruit tree-based agroforestry; FSSL, Mixed fruit tree-based agroforestry under landslide

คำนิยม

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2560 ในการทำวิจัย ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

REFERENCES

Brown, S. 1996. Mitigation potential of carbon dioxide emission by management of forests in Asia. **AMBIO**. 25(4) : 273-278.

Community Forestry Development Sub-division, 2014. **A Guide to Monitoring Carbon Stock and Biodiversity in Community Forestry**. Royal Forest Department, Bangkok. (in Thai)

Diloksumpun, S., T. Visaratana, S. Panuthai,, P. Ladpala, , S. Janmahasatien, and S. Sumran, 2005. Carbon cycling in the Sakaerat dry evergreen and the Maeklong mixed deciduous forests. pp 77-94. **The Proceedings of Climate Change in Forestry, Potential of Forests in Support of the Kyoto Protocol Annual Conference**. Maruay Garden Hotel, Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, Bangkok. 4-5 August 2005. (in Thai)

Hamrick, K. and M. Gallant, 2017. Unlocking Potential: State of the Voluntary Carbon Markets 2017. **Washington, DC**: Forest Trends

IPCC. 2006. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**, H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe. Published, Institute for Global Environmental Strategies. Japan

Kershaw, K. A. 1964. **Quantitative and Dynamic Ecology**. Edward, London.

Khamyong, S., T. Seramethakun, and S. Pampasit, 2008. Carbon accumulation in forest ecosystems at Doi Inthanon, Chiang Mai province. pp 126-13. **The Proceedings of 4th Naresuan Environmental Annual Conference**, Phayao Campus of Naresuan University, Phayao. 26-27 May 2008, (in Thai)

Khamyong, S. 2001. The Ecological Effect of Pine Plantations (*Pinus kesiya*) in the HighlandWatershed, Northern Thailand. Faculty of Agriculture, Chiang Mai University. Chiang Mai. (in Thai)

Kutintara, U., D. Marod, M. Takahashi, and T. Nakashizuka, 1995. Growth and dynamics of bamboos in a tropical seasonal forest. pp. 125-139 In, **The International Workshop on The changes of tropical forest ecosystems by El Niño and others**. National Research Council, Kanchanaburi.

Land Development Department, 2006. **A Study on the Causes of Debris Flow Damage in Provinces of Uttaradit**, Sukhothai and Phrae Northern, Thailand. Final Report. 179. (in Thai)

National Parks Research and Innovation Development Center Chiang Mai Province, 2015. **The Permanent Mixed Deciduous Forest Plot Project of Si Lanna National Park Chiangmai Province**. Research Report Vol. 12 (27). National Park Research Division, Office of National Park, Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, Bangkok. (in Thai)

Negi, J. D. S., R. K. Manhas, and P.S. Chauhan. 2003. Carbon allocation in different components of some tree species of India: A new approach for carbon estimation. **Current Science** 85(11): 1528 - 1531.

Nongnuang, S., S. Khamyong, K. Sri-ngernyuang, and N. Anongrak, 2010. Carbon Stocks and Nutrients in Biomass of Fragmented Hill

Evergreen Forest on Highland Watershed at Boa Kaew Watershed Management Station, Chiang Mai Province. pp 131-141. **Proceedings of The 6th Naresuan Environmental Annual Conference**, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok, 1 – 2 August 2010, (in Thai)

Ogawa, H., K. Yoda, K. Ogino, and T. Kira, 1965. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand. II. Plant Biomass. **Nature and Life in Southeast Asia**, 4(1): 49-80.

Openshaw, K. 1997. Global warming and the role of trees: Thailand a case study. In: Tropical Forestry in the 21st Century Volume 2: Global Changed in the Tropical Contexts. C. Khemnark, B. Thaiutsa, L. Puangchit and Thammincha eds.. **FORTROP'96 International Conference**, Bangkok, Thailand.

Page, A.L., R.H. Miller, and D.R. Keeney, 1982. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. **In Soil Science Society of America,** Vol. 1159.

Phetchaburi National Parks Research Center, 2016. **The Permanent Plot in the National Nark Project : Mixed Deciduous Forest of Chaloem Phra Kiat Thai Prakhan National Park Ratchaburi Province**. Research Report Vol. 13 (2). National Park Research Division, Office of National Park, Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, Bangkok. (in Thai)

Pongthornpruek, S. 2017. The Biodiversity and Plant Association Structure of Mixed Deciduous Forest in Conservative Forest of Fak Tha Land Settlement Cooperative, Fak Tha District Uttaradit Province. pp 340-350. **Proceeding of the 8th RSPG Researcher Club Conference "Thai Resources : Enormous Potential to be Seen",** Centre of Learning for the Region, Chulalongkorn University, Saraburi, 29 November – 1 December 2017. (in Thai)

Royampaeng, S. 1990. **Biomass Productivity of Four Species of Bamboo**. Department of Silviculture, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

Tangtham, N. and C. Tantasirin, 1997. An assessment of policies to reduce carbon emissions in the Thai forestry sector with emphasis on forest protection and reforestation for conservation, pp. 100-121. In: C. Khemnark, B. Thaiutsa, L. Puangchit and S. Thammincha eds. Tropical Forestry in the 21st Century Volume 2: Global Changes in the Tropical Contexts. **Proceedings of FORTROP'96 International Conference,** 25-28 November 1996, Bangkok.

Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), 2014. **VCS implementation fee: VCS Guidelines: Verification and Verification Guid**e. Bangkok: P2 Design & Print. (in Thai)

Tsutsumi, T., K. Yoda, P. Sahunalu, P. Dhanmanonda, and B. Prachaiyo, 1983. **Forest: Felling, Burning and Regeneration**, Shifting cultivation, Tokyo University, Japan.

Viriyabuncha, C., S. Janmahasatien, and K. Peawsad, 2003. **Assessment of the Potentiality of Re-afforestation Activities in Climate Change Mitigation**. Wildlife and Plant Conservation, Thailand.

Wanwisate, W. 2015. **Carbon Credit : Business for Relieve Global Warming**. The Secretariat of the Senate. Available source: http://library.senate.go.th/document/Ext9395/9395436_0002.PDF. (in Thai)