

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ เทคนิคการประเมินความเหมาะสมของพื้นที่ปลูก
ปริมาณไม้ และบทบาทการเก็บกักคาร์บอนของสวนป่าไม้สัก

แผนงาน การจัดการสวนป่าสักอย่างยั่งยืนเพื่อเกษตรกร



โดย

ฝ่ายวิจัยการปลูกสร้างสวนป่า
ส่วนวนวัฒนวิจัย สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้
กรมป่าไม้
2560

โครงการวิจัย

เทคนิคการประเมินความเหมาะสมของพื้นที่ปลูก ปริมาณไม้
และบทบาทการเก็บกักคาร์บอนของสวนป่าไม้สัก

Evaluation techniques for suitable planting site growing stock
and role of carbon storage of teak plantation

จัดทำโดย

นางวรพรรณ หิมพานต์	นักวิชาการป่าไม้ชำนาญการพิเศษ	หัวหน้าโครงการวิจัย
นายณรินทร์ เทศสร	นักวิชาการป่าไม้ปฏิบัติการ	ผู้ร่วมโครงการวิจัย
นายธีรยุทธ วงสอน	เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป	ผู้ร่วมโครงการวิจัย
นางสาวภรณ์นภัส ภัคคกาญจน์พัฒน์	นักวิชาการป่าไม้	ผู้ร่วมโครงการวิจัย
นางสาวปิยนุช รับพร	เจ้าพนักงานธุรการ	ผู้ร่วมโครงการวิจัย
นางสาวจารุณี โนรีเวช	เจ้าหน้าที่ธุรการ	ผู้ร่วมโครงการวิจัย
นางสาวสุพัตรา กล่อมอิม	คนงาน	ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ฝ่ายวิจัยการปลูกสร้างสวนป่า ส่วนวนวัฒนวิจัย

สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้

กรมป่าไม้

2560

บทคัดย่อ

โครงการวิจัย เทคนิคการประเมินความเหมาะสมของพื้นที่ปลูก ปริมาณไม้ และ บทบาทการเก็บกักคาร์บอนของสวนป่าไม้สัก มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง คุณภาพพื้นที่กับปัจจัยแวดล้อมด้านพื้นที่สำหรับสวนป่าสัก และการประเมินมวลชีวภาพ และการเก็บกักคาร์บอนของสวนป่าสักโดยใช้วิธีการที่เจ้าของพื้นที่สวนป่าสักโดยทั่วไปสามารถ นำไปประยุกต์ใช้ได้ ในขณะที่เทคนิคการติดตามและประเมินปริมาตรสักโดยใช้การสำรวจ ระยะไกล เพื่อการประเมินปริมาตรของต้นสักยืนต้นในพื้นที่ขนาดใหญ่ การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการ ศึกษาในพื้นที่สวนป่าสักของเกษตรกรและองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้

ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่สามารถนำมาใช้ประเมินค่าชั้นคุณภาพ พื้นที่ได้ ประกอบด้วย ความลาดชัน (Slope) ปริมาณแคลเซียม (Ca) ทิศด้านลาด (Azimuth) และปริมาณโซเดียม (Na) ตามลำดับ ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เกษตรกรสามารถนำไปใช้ในการ คัดเลือกพื้นที่เพื่อการปลูกสร้างสวนป่าสักได้อย่างง่ายคือทิศด้านลาดด้านทิศใต้ ทิศตะวันออก เฉียงใต้ ตะวันออก และทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้ได้พัฒนาสมการที่ ใช้สำหรับการประเมินมวลชีวภาพและการเก็บกักคาร์บอนในสวนป่าสัก ที่เกษตรกรหรือ ประชาชนทั่วไปสามารถประเมินได้ด้วยตัวเองเพียงวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้น สัก ในขณะที่จากการศึกษาพบว่าเทคนิคการสำรวจระยะไกลสามารถนำมาใช้สำหรับติดตาม และประเมินปริมาตรไม้ของสวนป่าสักในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ โดยการจำแนกขนาดของเรือนยอด และนำมาประมาณปริมาตรรายต้น ซึ่งวิธีการนี้จะมีข้อได้เปรียบในด้านการลดค่าใช้จ่ายและ เวลาในการสำรวจภาคสนามในพื้นที่ขนาดใหญ่

คำสำคัญ : ความเหมาะสมของพื้นที่ปลูก ปริมาณไม้ การเก็บกักคาร์บอน สวนป่าไม้สัก

ABSTRACT

The evaluation techniques for suitable planting site growing stock and role of carbon storage in teak plantation project include examining the relationship between site productivity and environmental factors at teak plantation. In addition, it was also to estimate biomass and carbon stock in teak plantation by methods that can be applied by general teak plantation owners. The evaluation and estimation teak stand growing stock using remote sensing focus on assessing the standing teak growing stock in large scale plantation. The study was carried in private and Forest Industry Organization of teak plantations.

The results showed that the environmental factors that can be used to determine the site quality of are Slope, Ca, Azimuth and Na, respectively. The aspects of South, South-east, east and North-east are the simple factors that teak owners can use to select areas for teak plantations. The simple equation for biomass estimation and carbon capture in teak plantation was created from this study that the general teak plantation owners or people can self-assess only measure the diameter at breast height of the teak tree. While studies had also shown that remote sensing techniques can be used to evaluate the teak growing stock in large areas by categorizing the canopy and estimating the stand volume. This approach has the advantage of reducing costs and time for fieldwork in large areas.

Keywords: suitable planting site growing stock carbon storage teak plantation

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้อยู่ภายใต้โครงการวิจัยร่วมระหว่างสำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ และศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์การเกษตรนานาชาติ แห่งประเทศญี่ปุ่น (Japan International Research Center for Agricultural Science : JIRCAS) โดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่นที่ร่วมดำเนินงานในโครงการนี้ ประกอบด้วย Dr.Iwao Noda, Dr.Reiji Yoneda และ Dr. Naoyuki Furuya

คณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณเจ้าของสวนป่าสักทุกท่าน หัวหน้าสวนป่าและเจ้าหน้าที่สวนป่าขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่สำหรับการวางแผนศึกษาวิจัยและเก็บข้อมูล ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการศึกษาวิจัยไม้สัก คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคุณทศพร วัชรวงกูร ข้าราชการบำนาญที่เคยเป็นหัวหน้าชุดโครงการวิจัย ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการเก็บข้อมูล รวมทั้งการวิเคราะห์ข้อมูลจนรายงานฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญภาพ	VI
บทนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	2
วิธีการศึกษา	12
ผลการศึกษา	22
สรุปผลและวิจารณ์ผล	46
ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารอ้างอิง	50
ภาพประกอบ	65

สารบัญตาราง

Table	หน้า
1 List of variable on data set	22
2 Results of GLMs	28
3 Categorized variables from continuous type	30
4 Results of GLMs using categorized explanatory variables	30
5 Parameters of site productivity estimation model	32
6 Stand age, site index value, planted spacing, initial and present tree density, sample33 numbers for above-ground and below-ground biomass, mean diameter at breast height (DBH), and tree height in each plot	38
7 Equation to estimate above- and below-ground biomass, used species, study site, mean annual precipitation (MAP, mm y ⁻¹), and mean annual temperature (MAT, °C)	41
8 Estimated above-ground biomass in each research plot using equations from the present study and other studies	43
9 Estimated below-ground biomass in each research plot using equations from the present study and other studies	43
10 Estimated above and below ground biomass [ton.ha ⁻¹] and above and below ground carbon stock [ton ha ⁻¹] of teak plantation in various sites in Thailand.	45

สารบัญภาพ

Figure	หน้า
1 Value chain of Evaluation techniques for suitable planting site, growing stock and role of carbon storage of teak plantation Project	11
2 Study area of the Improvement techniques for site productivity evaluation by environment factors Project	12
3 Site index curve (Vacharangkura, 2012)	14
4 Flowchart of dominant tree estimation	17
5 Flowchart of Teak stand volume estimation	18
6 Procedure of crown template matching	18
7 Location of biomass and carbon storage study sites in Thailand	19
8 Correlations of soil chemical properties with SI by soil depth class (*: $p < 0.05$)	23
9 Correlations of terrain and management factors with SI (*: $p < 0.05$)	24
10 Correlation coefficients among soil chemical factors by soil depth class	26
11 Correlations of soil chemical properties with <i>Fertilizer</i> by soil depth class (*: $p < 0.05$)	27
12 Correlation coefficients among Terrain and Management factors (*: $p < 0.05$)	27
13 Profile traces of the GLM Con1	29
14 Profile traces of the GLM Cat1	31
15 Relationship between the <i>SI</i> and the estimated <i>SI</i> (<i>SI'</i>) by the Eq. 1	31
16 Bar graph of parameter values of the prediction model	32
17 Examples of teak plantations location (the rectangular polygon indicates the location of the survey plot)	33
18 Distributions of the estimated DTH (eDTHpq is the result of each setting (p, q) of measurement) and the field surveyed DTH (sDTH) in each setting	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

Figure	หน้า
19 Relationship between crown diameter and DBH	35
20 Relationship between crown diameter and volume	35
21 Individual teak crown detection using multiple size crown template matching	36
22 Stand volume estimated by the developed method (left) and the error (right)	37
23 Relationship between DBH, $DBH^2 \times H$, H , and above-ground biomass	40

บทนำ

ในประเทศไทยหลังการยกเลิกการทำสัมปทานไม้จากป่าธรรมชาติ ไม้ส่วนใหญ่มาจากการนำเข้าจากประเทศเพื่อนบ้านเพื่อใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมไม้แทน ในขณะที่ได้มีการส่งเสริมการปลูกป่าเพื่อเพิ่มการใช้ประโยชน์ไม้ภายในประเทศ การปลูกป่าเริ่มเป็นที่นิยมกันมากในปี พ.ศ.2533 ซึ่งทำให้มีการปลูกสร้างสวนป่าขึ้นทั้งโดยเกษตรกรและนักลงทุน พื้นที่สวนป่าจึงเกิดขึ้นทั่วประเทศจำนวนมาก

ในการจัดการสวนป่าไม้สักอย่างยั่งยืนนั้น นอกจากใช้เทคนิค เช่น การคัดเลือกพันธุ์ การปรับปรุงดิน การใช้เทคนิคด้านวนวัฒนวิธในการจัดการ เช่น การตัดขยายระยะ การแตกหน่อ ซึ่งนอกจากเป็นการเพิ่มผลผลิตและเป็นการลดค่าใช้จ่ายแล้ว เทคนิคในด้านการประเมินความเหมาะสมของพื้นที่ปลูก การประเมินปริมาณไม้ (growing stock) ของสวนป่า และบทบาทหรือศักยภาพของสวนป่าในการเก็บกักคาร์บอนเป็นสิ่งสำคัญเช่นเดียวกัน เพราะนอกจากจะได้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจของเกษตรกรหรือผู้ประกอบการแล้ว ยังมีประโยชน์ในด้านการวางแผนการจัดการทรัพยากรป่าไม้ทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศอีกด้วย

เนื่องจากไม้สักสามารถเติบโตได้ดีเฉพาะพื้นที่ และการเติบโตของต้นไม้มีความสัมพันธ์กับหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติของดิน และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น ระดับความสูง ปริมาณน้ำฝน สภาพภูมิอากาศ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการเติบโตของต้นไม้ จึงควรมีการศึกษาเพื่อพัฒนาเทคนิคในการประเมินผลผลิตของพื้นที่สวนป่าไม้สักจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมด้านพื้นที่ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดวิธีการที่สะดวกและเกษตรกรที่ต้องการจะปลูกไม้สักสามารถใช้ข้อมูลที่สังเกตได้ในพื้นที่เพื่อคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกสร้างสวนป่าไม้สัก และสามารถคาดคะเนผลผลิตของสวนป่าที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้ ซึ่งจะนำไปสู่ความสำเร็จในการปลูกสร้างสวนป่าไม้สัก

ในขณะที่หน้าที่ของป่าไม้ในฐานะที่เป็นแหล่งเก็บกักคาร์บอน กำลังเป็นที่ถูกจับตามอง พร้อมไปกับการเพิ่มความสนใจในประเด็นที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์โลกร้อน ไม้สักเป็นไม้ชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการเก็บกักคาร์บอนได้ดีเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์สูงเมื่อเทียบกับไม้ชนิดอื่น อีกทั้งเป็นไม้ที่นิยมปลูกเป็นสวนป่ากันอย่างแพร่หลายในหลายพื้นที่ทั่วประเทศ เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมในการเข้าร่วมโครงการในอนาคตจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาบทบาทของการเก็บกักคาร์บอนในสวนป่าไม้สัก เพื่อสร้างความมั่นใจให้แก่ผู้ปลูกว่าสามารถช่วยลดภาวะโลกร้อนจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ต่อไป

การปลูกสร้างสวนป่ามีการขยายพื้นที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสวนป่าไม้สัก ในขณะที่ยังขาดการติดตามและประเมินผล การพัฒนาเทคนิคการติดตามและประเมินปริมาณไม้ (growing stock) ในรูปปริมาตรไม้ของสวนป่าไม้สักในพื้นที่ขนาดใหญ่ (large – scale teak plantation) ซึ่งนอกจากจะได้ข้อมูลด้านปริมาตรไม้สักในภาพรวมของพื้นที่ปลูกสร้างสวนป่าในระดับหมู่บ้าน ตำบล อำเภอ สำหรับเกษตรกร ผู้ปลูกไม้สักแล้ว ยังนำไปสู่ข้อมูลประมาณการเก็บกักคาร์บอนที่จะนำไปใช้ประกอบการดำเนินการตาม CDM ด้านป่าไม้ในอนาคต จึงควรมีการพัฒนาเทคนิคการติดตามปริมาตรไม้สักยืนต้นในพื้นที่สวนป่าขนาดใหญ่โดยการสำรวจระยะไกล ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความถูกต้อง เข้าใจง่ายตรวจสอบได้ และมีความคุ้มค่า

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเทคนิคในการประเมินผลผลิตของพื้นที่สวนป่าสักจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมด้านพื้นที่ที่เกษตรกรสามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการประเมินผลผลิตไม้สักในพื้นที่ได้จริง
2. เพื่อพัฒนาเทคนิคการติดตามและประเมินปริมาตรไม้ยืนต้นในพื้นที่สวนป่าขนาดใหญ่โดยใช้การสำรวจระยะไกล
3. เพื่อศึกษามวลชีวภาพและการเก็บกักคาร์บอนของสวนป่าสัก
4. เพื่อเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนการจัดการทรัพยากรป่าไม้ทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศ รวมทั้งสำหรับการตัดสินใจในการเข้าร่วมโครงการ CDM ด้านป่าไม้ในอนาคต

การตรวจเอกสาร

1. การพัฒนาเทคนิคในการประเมินผลผลิตของพื้นที่สวนป่าสักจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมด้านพื้นที่

จากการศึกษาพื้นที่ที่เหมาะสมกับการปลูกสร้างสวนป่าไม้สักในประเทศไทย ภายใต้โครงการวิจัยร่วมระหว่าง กรมป่าไม้ และ JIRCAS ได้จัดทำแผนที่ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกสร้างสวนป่าไม้สักที่จังหวัดอุดรธานีและจังหวัดหนองบัวลำภู ซึ่งได้นำเฉพาะคุณสมบัติของดินเป็นพื้นฐาน แต่เนื่องจากไม่ใช่เพียงคุณสมบัติของดินเท่านั้น หากแต่รวมถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆที่มีความสัมพันธ์กับการเติบโตของไม้สักเช่นเดียวกัน เช่น ปริมาณน้ำฝน

ลักษณะภูมิประเทศ อุณหภูมิ ความสูงจากระดับน้ำทะเล เป็นต้น แม้ว่าจะยังไม่มีการศึกษาวิจัยในเรื่องดังกล่าว ถ้าหากทราบถึงระดับความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเติบโตของไม้สัก จะทำให้สามารถพิจารณาคัดเลือกพื้นที่ที่มีความเหมาะสมต่อการปลูกสร้างสวนป่าไม้สักได้อย่างถูกต้องมากขึ้น ในทางการปฏิบัติจริงปัจจัยที่จะนำมาพิจารณานั้นควรเป็นปัจจัยที่สามารถสังเกตได้โดยง่ายในพื้นที่ โดยไม่มีความจำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เช่นเดียวกับคุณสมบัติทางเคมีของดิน Hayashi (1950, 1952) ได้พัฒนาวิธีการประเมินคุณสมบัติทางด้านปริมาณ 4 วิธีการ (the Quantification method 1~4) จากแนวความคิดทางคณิตศาสตร์ เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่น ในหลากหลายสาขาวิชา เช่น ด้านสังคม การสำรวจตลาด การวิจัยด้านจิตวิทยา การวิจัยด้านการแพทย์ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของประเภทข้อมูลด้านปริมาณ (Tanaka, 1979) ส่วน Nishizawa, et. al. (1965;1966) ได้นำวิธีการของ Hayashi มาใช้ในด้านวิทยาศาสตร์ป่าไม้ของญี่ปุ่น เพื่อศึกษาการประเมินหรือการคาดการณ์ดัชนีชี้วัดคุณภาพพื้นที่ (Site Index, SI) จากลักษณะของดินและปัจจัยแวดล้อม Nishizawa, et. al. (1965) ใช้ตัวอย่างแบบตัวเลขในพื้นที่สวนป่า Larix 600 เฮกแตร์ ณ Ueda District Forestry Office of Nagano regional Forestry Office. ปัจจัยที่นำมาใช้ ได้แก่ ดัชนีคุณภาพของพื้นที่ ประเภทของดิน (ความหนาแน่นชั้น A1) ความลึกของชั้นหินหรือชั้นฐาน (bedrock or hard substratum) ปริมาณเศษซากพืช (content of humus) เนื้อดิน (soil texture) โครงสร้างของดิน (soil structure) ความสูง (altitude) ทิศด้านลาด (aspect) ความลาดเอียง (inclination) และวัตถุต้นกำเนิดดิน (parent material) เมื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สรุปได้ว่าดัชนีคุณภาพของพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์อย่างมากที่สุดกับความสูง รองลงไปได้แก่ เนื้อดิน โครงสร้างของดิน ปริมาณเศษซากพืชและประเภทของดิน องค์การป่าไม้ในประเทศญี่ปุ่นได้ประเมินผลผลิตของพื้นที่ป่าไม้โดยใช้วิธีการแบบที่ 1 ของ Hayashi หลังจากที่ได้นำเสนอการสำรวจเพื่อประเมินดัชนีคุณภาพของพื้นที่ รวมถึงความสูง ดัชนีค่าความอบอุ่นและความลึกของหิมะ เป็นต้น ซึ่งเป็นปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมทั้งหมดของประเทศญี่ปุ่น (Takada, 1980)

ในทางตรงกันข้าม ความสัมพันธ์ระหว่างการเติบโตของไม้สักในประเทศไทยกับคุณสมบัติของดิน จากการศึกษาของ Kaosa-ard (1989) พบว่าไม้สักมีความต้องการปริมาณของแคลเซียมในดินในปริมาณที่มากเพื่อการเติบโตและการพัฒนา และอินทรีย์วัตถุในดินและไนโตรเจนในดินก็มีความสำคัญต่อการเติบโตของไม้สักเช่นเดียวกัน ในการประเมินดัชนีชี้วัดคุณภาพพื้นที่ในประเทศไทย ศูนย์วิจัยป่าไม้ (2539) ได้พัฒนาสมการรีเกรสชันของสวนป่าไม้

สักโดยใช้เพียงความสูงของไม้เด่น ชั้นอายุของหมู่ไม้ และอายุฐาน โดยไม่ได้คำนึงคุณสมบัติของดินเช่นเดียวกับที่ Kaosa-ard (1989) ได้นำเสนอไว้ และในการศึกษาดังกล่าวใช้พื้นที่สวนป่าไม้สักขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้โดยเฉพาะในภาคเหนือของประเทศไทยเท่านั้น

Sakurai, *et. al.* (2002) ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีชี้วัดคุณภาพของพื้นที่จากศูนย์วิจัยป่าไม้ (2539) และปัจจัยสิ่งแวดล้อม 28 ปัจจัย เช่น คุณสมบัติทางเคมีของดิน คุณสมบัติทางกายภาพของดิน ข้อมูลด้านแร่ธาตุ ความลาดชัน โดยใช้ step-wise multiple regression analysis โดยใช้ข้อมูลไม้สักจากทางภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งผลการศึกษาพบว่าดัชนีชี้วัดคุณภาพของพื้นที่ (Site Quality Index, SQI) สามารถประเมินได้จากค่าที่มีนัยสำคัญทางสถิติได้แก่ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน เช่น ค่า soil electric conductivity (EC), soil hardness ของดินที่ระดับ 20 เซนติเมตรจากหน้าดิน, ค่าการแลกเปลี่ยน Mg และค่า pH ค่า SQI อยู่ที่ระดับ 18 และค่าความสัมพันธ์ระหว่าง SQI กับ SI มีค่าเท่ากับ 0.133

Koonkhunthod (2007) ได้ทดสอบผลผลิตของพื้นที่ โดยการวัดความสัมพันธ์ของ SI ของสวนป่าไม้สักในภาคเหนือกับคุณสมบัติของดิน โดยใช้ SI ของ ศูนย์วิจัยป่าไม้ (2539) and SQI ของ Sakurai, *et. al.* (2002) จากการวิเคราะห์ดิน เนื่องจากยังขาดข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างการเติบโตของไม้สักในสวนป่าและคุณสมบัติของดิน ซึ่งพบว่าปริมาณ cation exchange capacity (CEC) และ C/N ratio มีนัยสำคัญในการคำนวณ SQI ซึ่งที่ 24% of SI ซึ่งสามารถนำมาทำนายผลผลิตของพื้นที่เพื่อสร้างสวนป่าไม้สักในภาคเหนือของประเทศไทย

อย่างไรก็ตาม ค่า SI จากการศึกษาของศูนย์วิจัยป่าไม้ (2539) จะเหมาะสมกับสวนป่าไม้สักขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ แต่อาจมีความคลาดเคลื่อนจากความแตกต่างกันในเรื่องคุณสมบัติของดินจากพื้นที่ของเกษตรกร เพราะไม่ได้นำปัจจัยด้านคุณสมบัติของดินมาวิเคราะห์ร่วมด้วย ค่า SQI สามารถแสดงได้จากปริมาณของธาตุอาหารในดิน แต่ต้องใช้ระยะเวลาค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เช่นเดียวกับคุณสมบัติทางเคมีอื่นๆ เช่น EC, การแลกเปลี่ยน Mg, CEC, C/N ratio การตรวจวัดค่า SI โดยตรงอาจทำได้ง่ายขึ้นกว่าการคำนวณ SQI รวมถึงค่า SQI ซึ่งสามารถอธิบายค่า SI เพียงแค่ 18% หรือ 24% อาจไม่ได้ค่าที่คงที่

สัก เป็นไม้พื้นเมืองที่สำคัญและมีค่าทางเศรษฐกิจของประเทศไทย นอกจากนี้สักยังเป็นไม้ชนิดที่เติบโตได้เฉพาะพื้นที่ ภาคเหนือของประเทศไทยเป็นพื้นที่ที่มีความเหมาะสมต่อการเติบโตของสัก อย่างไรก็ตามสวนป่าสักที่ปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือก็ไม่ได้แสดงให้เห็นว่ามีการเติบโตไม่ดีมากเท่าไรนัก Ishibashi, *et. al.* (2009) ได้ศึกษาดัชนีคุณภาพพื้นที่(site

index) ของสักในสวนป่าอายุ 20 ปี และ 30 ปี ได้ site index 11–25 เมตร และ 14–30 เมตร ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งสอดคล้องกับ site index ที่ 12–22 เมตร และ 14–26 เมตร ที่ศึกษาโดยสมเกียรติ (2535) ในภาคเหนือ และจากการศึกษาของ Noda, *et. al.* (2004) พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสวนป่ายูคาลิปตัสแล้ว การจัดการสวนป่าไม้สักในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จะมีความคุ้มค่าที่ไม่แตกต่างกัน แต่ต้นทุนต่ำกว่าและได้รับผลตอบแทนที่สูงกว่า ดังนั้นการจัดการสวนป่าสักจะช่วยสนับสนุนให้เกษตรกรผู้ปลูกสร้างสวนป่าแบบ farm forestry ในการปรับปรุงให้มีชีวิตที่ดีขึ้น

2. การพัฒนาเทคนิคในการติดตามและประเมินปริมาตรไม้ของสวนป่าสักในพื้นที่ขนาดใหญ่โดยการสำรวจระยะไกล

เทคนิคการสำรวจระยะไกล ได้แก่

1) Remote sensing หมายถึง การใช้เครื่องบินหรือดาวเทียมเป็นอากาศยานสำหรับติดตั้งเครื่องมือ เพื่อจะศึกษาสิ่งที่อยู่ไกลออกไป คือ ทรัพยากรบนพื้นโลกนั่นเอง อุปกรณ์ที่ติดตั้งเรียกว่า Remote sensor หรือ sensor ซึ่งจะรับสัญญาณพลังงานที่สะท้อนหรือปล่อยออกมาจากทรัพยากรบนโลก โดยอาศัยคุณสมบัติพิเศษของแต่ละทรัพยากรที่สะท้อนหรือปล่อยออกมาเพื่อที่จะทราบว่า ทรัพยากรนั้นคืออะไร มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร (สุวิทย์, 2538)

2) การประมาณพื้นที่ โดยการศึกษาเกี่ยวกับการติดตามการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยใช้ข้อมูลสำรวจระยะไกลนั้นได้มีการทำมาตั้งแต่มีการสำรวจพื้นผิวโลกโดยใช้ดาวเทียม Landsat ในช่วงปี 1970 (Cohen and Goward, 2004) ในปัจจุบันมีดาวเทียม (satellite) และเครื่องมือตรวจวัด (sensor) หลายชนิด บางชนิดมีความละเอียดในการแสดงผลของภาพสูงมากในระยะ 1 เมตร และบางชนิดสามารถตรวจวัดได้เป็นประจำทุกวันด้วยความละเอียดในการแสดงผลของภาพในระยะ 250 เมตร บางชนิดที่เรียกว่า hyper-spectral sensor ใช้ความยาวคลื่นในการตรวจวัด บางชนิดใช้ Synthetic Aperture Radar (SAR) นอกจากนี้ได้มีการศึกษาที่ใช้การสำรวจระยะไกลเพื่อประเมินพื้นที่สวนป่าไม้สักในลุ่มน้ำป่าสัก (Prasong and Siripun, 2004; Luclman, *et. al.*, 1997; Luclman, *et. al.*, 1998)

3) การประมาณปริมาตรหมูไม้ มีการประยุกต์ใช้วิธีการใช้ข้อมูลสำรวจระยะไกลเพื่อประเมินค่าปริมาตรหมูไม้ โดยการประเมินค่าพัฒนาจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยโครงสร้าง

หมู่ไม้กับดัชนีจากการสำรวจระยะไกล เพื่อสร้างแบบจำลองต้องมีการเก็บข้อมูลในพื้นที่ป่าที่หลากหลาย ซึ่งทำได้จากหลายวิธี คือ

3.1) การประมาณโดยใช้อายุหมู่ไม้

เนื่องจากปริมาตรหมู่ไม้ขึ้นกับปัจจัยด้านอายุของต้นไม้ ซึ่งอายุต้นไม้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สะดวกที่สุด ในการลดความผิดพลาดต้องเสริมข้อมูลอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเติบโตของต้นไม้ เช่น ความเหมาะสมของพื้นที่ และตารางผลผลิตท้องถิ่น ได้มีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผสมผสานอายุของหมู่ไม้กับดัชนีจากการสำรวจระยะไกลเพื่อจัดทำแผนที่มวลชีวภาพ (Zheng, et. al., 2007)

3.2) การประมาณโดยใช้ข้อมูลขนาดของเรือนยอด

โดยทั่วไปขนาดของเรือนยอดต้นไม้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ระดับอกของต้นไม้ รวมถึงปริมาตรของต้นไม้ด้วย ขนาดของเรือนยอดสามารถตรวจวัดได้ด้วยการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมที่มีความละเอียดของภาพสูงมาก เทคนิคในการตรวจจับเรือนยอดของต้นไม้แต่ละต้นจึงได้รับการพัฒนาอย่างจริงจังโดยใช้ airborne หรือ space-borne optical sensors ที่มีความละเอียดสูง (Leckie, et. al., 2005; Pouliot, King, & Pitt, 2005) ในการอนุมาณข้อมูลเรือนยอดของต้นไม้โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมที่มีความละเอียดสูงมากนั้นยังมีข้อจำกัดสวนใหญ่จะใช้ในป่าไม้สนซึ่งลักษณะเรือนยอดเป็นรูปทรงคล้ายข้าวโพด (Culvenor, 2003; Gougeon, 1995)

3.3) การประมาณโดยใช้ข้อมูลความสูง

ความสูงของต้นไม้ที่มีเรือนยอดเด่น (Dominant tree height, DTH) และอายุจะถูกนำไปใช้ในรูปแบบการประเมินชั้นคุณภาพของพื้นที่และผลผลิตภาพของพื้นที่ ได้มีการสร้างตารางผลผลิตของสักในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยโดยทศพร และคณะ (2554) ซึ่งแสดงว่าสักจะมีการเติบโตขึ้นกับสภาพของพื้นที่และการจัดการ ความสูงของต้นไม้ที่มีเรือนยอดเด่นเป็นตัวแปรที่ดีสำหรับการประเมินการเติบโตเนื่องจากไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของหมู่ไม้หรือความประณีตในการจัดการของพื้นที่ (Ishibashi, et. al., 2010) ข้อมูลความสูงของหมู่ไม้ รวมทั้งค่าเฉลี่ยของความสูงของเรือนยอดไม้พบว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการประมาณมวลชีวภาพและปริมาตรของหมู่ไม้ (Asner, et. al., 2012; Drake, et. al., 2002) เมื่อมีการนำระบบการสำรวจระยะไกลมาใช้ในการประเมินสวนป่าในพื้นที่ขนาดใหญ่ จึงมีความคาดหวังว่าเทคนิคการสำรวจระยะไกลจะสามารถใช้ประเมินความสูงของต้นไม้ได้

มีการนำเทคนิคการสำรวจระยะไกลมาใช้ในการวัดความสูงหลายวิธีด้วยกัน (Sirmacek, *et.al.*, 2012) ได้แก่ 1) การวิเคราะห์โดยใช้ Optical stereo (ใช้ภาพถ่ายทางอากาศและภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูง) 2) การใช้ Interferometric SAR (Synthetic Aperture Rader) และ 3) LiDAR (Light Detection and Ranging) ซึ่งการใช้ Optical stereo เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันในพื้นที่ขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่นการใช้วัดความสูงของอาคาร ซึ่งให้ค่าความถูกต้องสูงมาก (RMSE = 0.6–1.3 เมตร) (Abduelmula, *et. al.*, 2015) อย่างไรก็ตามการนำมาใช้สำหรับการวัดความสูงของต้นไม้ยังมีจำกัด

ความก้าวหน้าของเครื่องส่งสัญญาณและเทคนิคการประมวลผลภาพถ่าย หรือการสำรวจระยะไกลนั้นไม่เพียงแต่ถูกนำมาใช้ในการประเมินการกระจายของพื้นที่หรือขนาดพื้นที่ เช่น บริเวณใดเป็นพื้นที่ป่าไม้ รวมทั้งขนาดพื้นที่ หรือไม่ได้เป็นพื้นที่ป่าไม้นั้น แต่ในปัจจุบันได้มีการใช้การสำรวจระยะไกลเพื่อประเมินข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณของต้นไม้เพิ่มมากขึ้น เคยมีงานวิจัยเกี่ยวกับการติดตามประเมินผลทรัพยากรป่าไม้โดยใช้การสำรวจระยะไกลมาแล้วในหลายพื้นที่ ในประเทศไทยมีความพยายามที่ศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาหรือประยุกต์วิธีการดังกล่าวเพื่อใช้ในการประเมินพื้นที่ป่าของไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสวนป่าไม้สัก เช่น การศึกษาที่ใช้การสำรวจระยะไกลเพื่อประเมินพื้นที่สวนป่าไม้สักในลุ่มน้ำป่าสัก (Prasong and Siripun, 2004)

ประเทศไทยเคยใช้ LiDAR และภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูง (high resolution satellite imagery) ซึ่งยังมีราคาสูงและการเข้าถึงยังไม่สูงมากนัก รวมทั้งจากสภาพอากาศของประเทศไทยโดยเฉพาะในฤดูฝนค่อนข้างมีอุปสรรคในการใช้ optical sensor ซึ่งจับภาพได้เฉพาะพื้นผิว การใช้ L-band SAR ซึ่งเป็น Microwave radar จับภาพได้ทุกสภาพอากาศ รวมถึงสามารถทะลุชั้นเรือนยอดของต้นไม้ทำให้ได้ภาพในลักษณะสามมิติจึงน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการประเมินปริมาณต้นไม้ในประเทศไทย

จากโครงการส่งเสริมการปลูกไม้เศรษฐกิจทำให้มีพื้นที่ปลูกสร้างสวนป่าสักเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ในปัจจุบันยังขาดระบบหรือฐานข้อมูลสำหรับการติดตาม ประเมินทรัพยากร อุปสงค์ และอุปทาน (Mahannop, 2004) อันเนื่องมาจากการขาดแคลนทรัพยากรบุคคลและงบประมาณสำหรับการเก็บข้อมูลในภาคสนาม การติดตามและประเมินทรัพยากรในพื้นที่ขนาดใหญ่โดยใช้การสำรวจระยะไกลจึงควรนำมาใช้

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูงในการประเมินความสูงและขนาดเรือนยอดเพื่อนำมาใช้ในการติดตามและประเมินปริมาณของสวนป่าสักในพื้นที่ขนาดใหญ่

3. บทบาทของการเก็บกักคาร์บอนในสวนป่าสัก

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นับเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีปริมาณมากที่สุดในบรรยากาศเมื่อเปรียบเทียบกับบรรดาก๊าซเรือนกระจกด้วยกัน ในปัจจุบันมีประมาณ 345–360 ppm และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง Oechel and Vourlitis (1994) ระบบนิเวศป่าไม้ เป็นระบบที่มีการสะสมคาร์บอนมากที่สุดถึง 75% เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของพืชคือคาร์บอน (47%) โดยการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเปลี่ยนสภาพให้อยู่ในรูปของมวลชีวภาพผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง พรรณไม้แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือการสังเคราะห์แสงที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่เกี่ยวข้องระหว่างต้นไม้กับสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน และแม้กระทั่งในต้นไม้ต้นเดียวกัน อัตราการสังเคราะห์แสงก็ยังมีคามผันแปร ทั้งในรอบวัน และในแต่ละฤดูกาล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ เช่น แสง อุณหภูมิ ปริมาณน้ำที่พืชได้รับ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นในดิน มลพิษ ตลอดจนโรค และแมลง ซึ่งปัจจัยแวดล้อมเหล่านี้ก่อให้เกิดความผันแปรดังกล่าวข้างต้น ตามสภาพสิ่งแวดล้อมของพื้นที่นั้น (Kozlowski and Pallardy, 1997) โดยผลผลิตขั้นสุดท้ายที่ได้จากการสังเคราะห์แสงของต้นไม้ก็คือการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพของต้นไม้ ซึ่งสมมูลของการสังเคราะห์แสง และการหายใจจะแสดงให้เห็นถึงปริมาณคาร์บอนที่พืชสามารถใช้ในการเติบโตซึ่งเป็นผลจากการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับเรือนยอดไม้ตนเอง

การประชุมสมัชชาภาคีอนุสัญญาว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change หรือ COP) ครั้งที่ 3 ปี พ. ศ. 2540 ณ กรุงโตเกียว ได้ปรับปรุงกรอบอนุสัญญาให้มีประสิทธิผลมากยิ่งขึ้น โดยได้ประกาศใช้พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ภายใต้พิธีสารเกียวโต กลุ่มประเทศ Annex 1 มีพันธกรณีที่จะต้องทำการลดก๊าซเรือนกระจกจำนวน 6 ชนิด คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์คาร์บอน ก๊าซเพอร์ฟลูออไรด์คาร์บอน และก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ให้ต่ำกว่าร้อยละ 5 จากระดับที่ปล่อยโดยรวมของกลุ่มเมื่อปี พ. ศ. 2533 ภายในปี พ. ศ. 2551–2555 โดยนำกลไกต่างๆในการลดก๊าซเรือนกระจกมาใช้ ได้แก่ (1) กลไกการดำเนินการร่วม (Joint Implementation, JI) (2) กลไกการซื้อขายปริมาณการปล่อยก๊าซ (Emission Trading, ET) และ (3) กลไกการพัฒนาที่สะอาด (Clean Development Mechanism, CDM) โดยสองกลไกแรกนั้นจำกัดให้เฉพาะกลุ่มประเทศ Annex 1 ดำเนินการเท่านั้น ส่วนกลไกที่สามเป็นกลไกที่เอื้ออำนวยให้เกิดการดำเนินการระหว่างกลุ่มประเทศ

Annex 1 และกลุ่มประเทศ Non-Annex 1 เพื่อส่งเสริมการพัฒนาที่ยั่งยืนของประเทศกำลังพัฒนาด้วยการถ่ายทอดเทคโนโลยีที่สะอาด การเรียนรู้ด้านวิชาการ การเรียนรู้ด้านการวิจัยและพัฒนา ตลอดจนการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารเพื่อดำเนินการด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภายใต้กลไกการพัฒนาที่สะอาด

โครงการภายใต้กลไกการพัฒนาที่สะอาดที่สามารถลดการเกิดก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพ เพียงพอนั้นสามารถสรุปได้ 2 วิธีหลัก คือ (1) การหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการปรับเปลี่ยนใช้เชื้อเพลิงที่สะอาด เป็นต้น และ (2) การดูดซับก๊าซเรือนกระจกที่มีอยู่ในบรรยากาศ เช่น การปลูกป่า และการเพิ่มความสามารถในการดูดซับก๊าซเรือนกระจกของดิน เป็นต้น และหลักเกณฑ์โครงการที่สามารถดำเนินการภายใต้ CDM นั้นต้องทำให้ก๊าซเรือนกระจกลดลงอย่างเป็นรูปธรรมและสามารถวัดได้ ช่วยให้บรรลุถึงการพัฒนาที่ยั่งยืนในประเทศเจ้าบ้าน และจะต้องเป็นโครงการที่ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกนอกเหนือไปจากที่มีการลดอยู่แล้วในโครงการอื่นๆ ซึ่งการดำเนินโครงการภายใต้ CDM จะต้องมีการจัดระบบที่สามารถวัดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาในช่วงเวลาฐานหรือเวลาอ้างอิง (baseline scenario) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณการปล่อยหลังจากมีโครงการ CDM ทั้งนี้ผู้ที่กำหนดตัวแปรต่างๆ ในระยะเวลาอ้างอิง คือ นักลงทุนและเจ้าของโครงการ ทั้งนี้ผู้ที่กำหนดตัวแปรต่างๆ ในระยะเวลาอ้างอิงคือ นักลงทุนและเจ้าของโครงการ CDM โดยใช้ระเบียบวิธีการวัดที่ได้ผ่านการเห็นชอบของคณะกรรมการบริหาร CDM การปลูกป่า CDM ตามโครงการ CDM ด้านป่าไม้มีทั้งการปลูกป่าขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ โดยโครงการปลูกป่าขนาดเล็กเป็นโครงการที่มีการดูดซับก๊าซ CO₂ ได้ไม่เกิน 16,000 ตัน CO₂ ต่อปี ขนาดของพื้นที่ป่าแต่ละโครงการสามารถปลูกเป็นแปลง ๆ และนำปริมาณการดูดซับ CO₂ มารวมกันได้ แต่ต้องไม่เกิน 16,000 ตันต่อ CO₂ ต่อปี และแต่ละแปลงที่เป็นพื้นที่ปลูกป่าจะต้องมีระยะห่างกันไม่เกิน 1 กิโลเมตร ส่วนการปลูกป่าขนาดใหญ่คือทำการปลูกป่าที่สามารถดูดซับก๊าซ CO₂ ได้มากกว่า 16,000 ตัน CO₂ ต่อปี (เจษฎา, 2551)

การประมาณมวลชีวภาพของต้นไม้และป่าและการเก็บกักคาร์บอนจะทำโดยการพัฒนาสมการแอลโลเมตริกระหว่างมวลชีวภาพของส่วนต่างๆ กับตัวแปรของขนาดของต้นไม้ เช่น ความสูง และความโต เพื่อหลีกเลี่ยงการตัดทำลายต้นไม้ และยังสามารถประมาณในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ด้วย (Brown, 1997; Chave, *et.al.*, 2005) มีการศึกษาเพื่อพัฒนาสมการแอลโลเมตริกสำหรับการประมาณมวลชีวภาพของสวนป่าสักในหลายประเทศ (Kraenzel, *et.al.*, 2003; Pérez Cordero and Kanninen, 2003; Hase and Foelster, 1983; Nwoboshi, 1983;

Ola-Adams, 1993; Buvaneswaran, *et.al.*, 2006; Negi, *et.al.*, 1995; Singh, *et.al.*, 1980; Jha, *et.al.*, 2015; Purwanto and Shiba, 2005) รวมถึงในประเทศไทย แต่ในประเทศไทยการประมาณมวลชีวภาพของสักในสวนป่าส่วนใหญ่จะทำในภาคเหนือและภาคตะวันตก (ชิงชัยและกันตินันท์, 2546; ทศพร และคณะ, 2548; Hiratsukam *et.al.*, 2005; Meunpong, *et.al.*, 2010) เนื่องจากสภาพดินจะเหมาะสมต่อการเติบโตของสัก และจะมีกระจายอยู่ในภาคอื่นๆ บ้าง (Kaosa-ard, 1989) เพื่อลดความแปรผันของข้อมูลและให้สมการมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นจึงสร้างสมการเฉพาะแต่ละพื้นที่ แต่เพื่อความสะดวกของผู้นำมาใช้ สมการที่จะใช้ประมาณมวลชีวภาพของสักควรทำการเก็บข้อมูลจากในแหล่งที่หลากหลายทั้งในด้านพื้นที่และสภาพอากาศ และนำมาสร้างเป็นสมการที่ใช้ได้ง่าย

ในเขตร้อนมีการศึกษาเกี่ยวกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจำนวนมาก แต่มีการศึกษามวลชีวภาพใต้ดินมีไม่มากนัก เนื่องจากการเก็บข้อมูลทำได้ลำบาก (Niiyamam *et.al.*, 2010; Ziegler *et.al.*, 2012) แม้ว่าจะมีรายงานการศึกษามวลชีวภาพใต้ดินของสักในประเทศอินเดียและอเมริกากลาง (Kraenzel, *et.al.*, 2003; Negi, *et.al.*, 1995; Prasad and Mishra, 1984) และประเทศไทย (Hiratsuka, *et.al.*, 2005, Meunpong, *et.al.*, 2010, Takahashi, *et.al.*, 2011) แต่รายงานมวลชีวภาพใต้พื้นดินของสักก็ยังมีไม่เพียงพอ

โครงการวิจัยนี้ประกอบด้วย การพัฒนาเทคนิคเพื่อประเมินผลผลิตโดยใช้ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เกษตรกรสามารถนำไปใช้ได้โดยข้อมูลที่สังเกตได้ การประเมินปริมาณของสวนป่าไม้สักในพื้นที่ขนาดใหญ่โดยใช้การสำรวจระยะไกล และการประเมินปริมาณคาร์บอนในสวนป่าไม้สัก ซึ่งจะนำไปใช้ประกอบการวางแผนการจัดการสวนป่าไม้สักเพื่อเสริมกับเทคนิคในการเพิ่มผลผลิตของสวนป่าไม้สัก ได้แก่ การคัดเลือกพันธุ์ การปรับปรุงบำรุงดิน การจัดการสวนป่า เช่น การตัดขยายระยะ หรือการสลับพื้นที่แบบแตกหน่อ ซึ่งจะทำให้ผลผลิตของสวนป่าไม้สักมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งนอกจากผู้ประกอบการหรือเกษตรกรจะได้รับผลประโยชน์จากผลผลิตและมูลค่าที่เพิ่มมากขึ้นแล้ว ผลจากการศึกษาเพื่อหาปริมาณการสะสมคาร์บอน และเทคนิคในการติดตามปริมาณไม้สักในพื้นที่ขนาดใหญ่ยังสามารถนำไปประกอบการเข้าร่วมโครงการ CDM ด้านป่าไม้ในอนาคตอีกด้วย แผนภูมิห่วงโซ่มูลค่าเพิ่ม ปรากฏดัง Figure 1

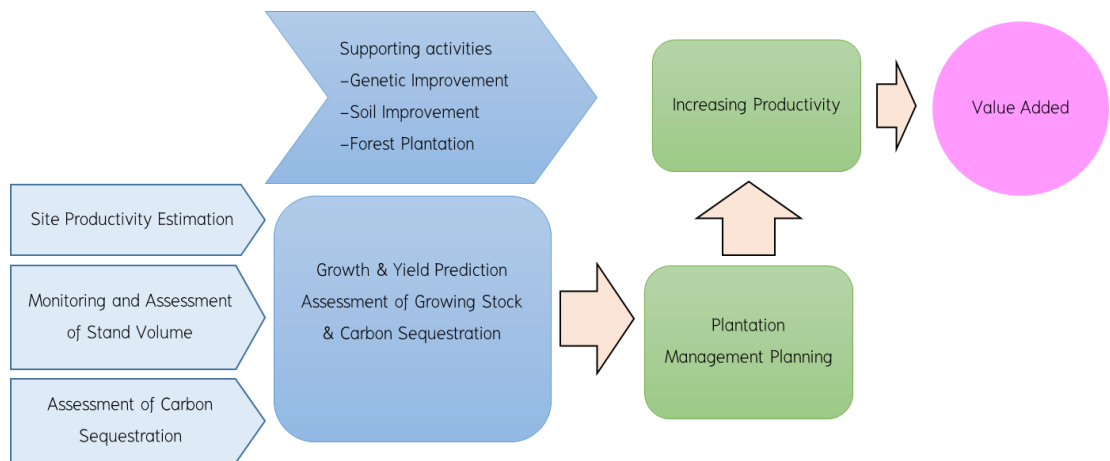


Figure 1 Value chain of Evaluation techniques for suitable planting site, growing stock and role of carbon storage of teak plantation Project

วิธีการศึกษา

การศึกษาตามโครงการวิจัยนี้ดำเนินการเป็นระยะเวลา 5 ปี เริ่มต้นการวิจัย ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2554 สิ้นสุดการวิจัย 30 กันยายน 2559 (ปีงบประมาณ 2555–2559) โดยแต่ละกิจกรรม มีวิธีดำเนินการดังนี้

1. การพัฒนาเทคนิคในการประเมินผลผลิตของพื้นที่สวนป่าสักจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมด้านพื้นที่

1) พื้นที่ศึกษาใน 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดเลย จังหวัดหนองบัวลำภู และจังหวัดอุดรธานี (Figure 2) ซึ่งมีผลมีการศึกษาเพื่อจัดทำแผนที่ดินที่มีความเหมาะสมกับการเติบโตของสักในภาคตะวันออกเฉียงเหนือแล้ว ภายใต้โครงการวิจัยการพัฒนาการจัดการแบบผสมผสานด้านเกษตรและป่าไม้เพื่อสนับสนุนเกษตรกรที่เข้าร่วมการปลูกสร้างสวนป่าไม้พื้นเมืองที่เป็นประโยชน์

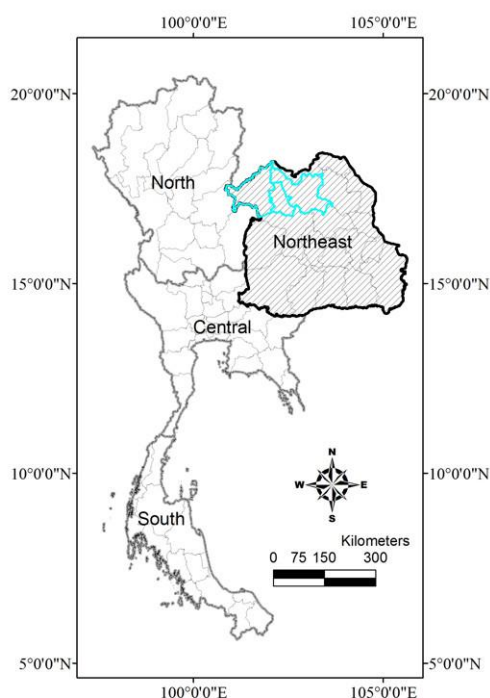


Figure 2 Study area of the Improvement techniques for site productivity evaluation by environment factors Project

2) วิธีการศึกษา

2.1) รวบรวมจากเอกสารที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของพื้นที่และคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินกับการเติบโตของไม้สัก เพื่อคัดเลือกเฉพาะตัวแปรที่มีผลต่อการเติบโตและผลผลิตของไม้สัก

2.2) สํารวจและเก็บข้อมูลในภาคสนาม ได้แก่ ข้อมูลการเติบโตของไม้สัก ข้อมูลลักษณะของภูมิประเทศและภูมิศาสตร์ เช่น ความสูง ปริมาณน้ำฝน และคุณสมบัติของดิน เป็นต้น รวมทั้งการวัดพิกัดทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่จำนวนประมาณ 100 พื้นที่ โดยการวางแผนตัวอย่างขนาด 20x40 m (800 ม.²) แล้วเก็บข้อมูล ดังนี้

- ข้อมูลการเติบโตของต้นสัก โดยการวัดความสูง และเส้นผ่าศูนย์กลางที่ระดับความสูงเพียงอกของต้นสักในพื้นที่แปลงขนาด 40 เมตร x 40 เมตร

- สุ่มตัวอย่างต้นไม้นขนาดต่างๆ ให้กระจายตามชั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (DBH) ของต้นไม้ในแปลง

- ข้อมูลดิน โดยการสำรวจและจดบันทึกลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏเห็นได้ และเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร และ 40-60 เซนติเมตร เพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติทางเคมี

- ข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่ เช่น ความสูง ภูมิอากาศ ปริมาณน้ำฝน จากการสำรวจและเก็บข้อมูลในพื้นที่

- รวบรวมข้อมูลอื่นๆ ได้แก่ ประวัติการจัดการสวนป่าไม้สัก เช่น การใช้ประโยชน์พื้นที่ก่อนการปลูกสร้างสวนป่าไม้สัก และการจัดการสวนป่าไม้สัก จากการสัมภาษณ์เกษตรกร

2.3) วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ pH ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และการนำไฟฟ้า (electric conductivity: EC) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity: CEC) และความอิ่มตัวของเบส (base saturation : BS) และทางกายภาพของดินในห้องปฏิบัติการโดยกรมพัฒนาที่ดิน เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติจากห้องปฏิบัติการและค่าจากการประเมินหรือสังเกตได้ในพื้นที่

2.4) นำปัจจัยทั้งหมดที่ได้รวบรวมมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลและพัฒนาวิธีการประเมินค่าโดยใช้ multivariate analysis เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแวดล้อมต่างๆ กับการเติบโตของสัก โดยใช้ตัวแปรคือ ชั้นคุณภาพพื้นที่ (Site index : SI) ที่ได้จากสมการที่ใช้

สำหรับสักในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งคิดรอบตัดฟันเมื่อสักมีอายุ 30 ปี ของ Vacharangkura (2012)

$$DTH_t = SI \cdot \frac{31.7550156211 - 0.772111113 \exp(-0.027606608 \times t)}{31.7550156211 - 0.772111113 \exp(-0.027606608 \times 30)}$$

โดย

DTH_t = ความสูงของไม้เรือนยอดเด่น ที่อายุ t ปี (m)
 คิดจากค่าเฉลี่ยต้นไม้ที่มีค่าสูงที่สุดจำนวน 100 ต้น/เฮกแตร์

SI = ค่าชั้นคุณภาพของพื้นที่ (m)

ซึ่งมีเส้นกราฟแสดงใน Figure 3

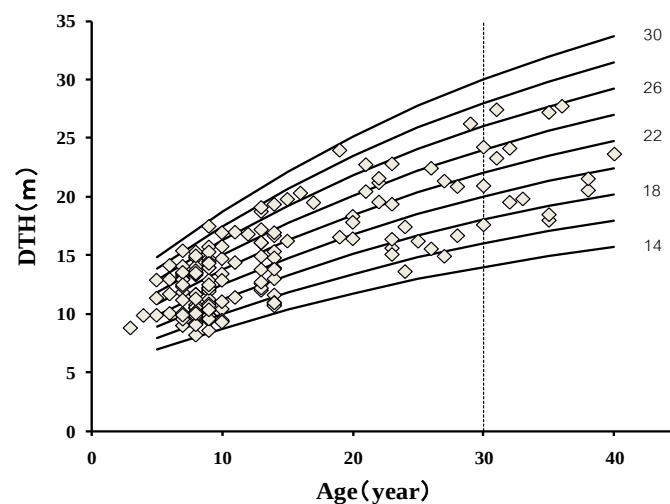


Figure 3 Site index curve (Vacharangkura, 2012)

2.5) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ (correlation analysis) เพื่อหาตัวแปรที่มีความสำคัญ สำหรับการสร้างรูปแบบ ซึ่งตัวแปรอิสระบางตัวมีความสัมพันธ์ที่ไม่ใช่เชิงเส้น (non-linear relation) กับค่าเติบโตของสัก เช่น ทิศของด้านลาด (Azimuth) จะมีความสัมพันธ์ไม่ใช่เชิงเส้น กับชั้นคุณภาพพื้นที่ ซึ่งแสดงในการศึกษาของ Teraoka, et. al.. (1991) ซึ่งแสดงว่าด้าน South-West, West และ North-West จะมีผลด้านบวกต่อการเติบโตของต้น Sugi และ Hinoki

มากกว่าด้าน North-East และ East ประมาณ 10 เท่า นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ประมาณ 6.5 จะมีผลต่อการเติบโตของสัก

2.6) ทำการวิเคราะห์หัวแปรตอบสนองแบบหลายตัวแปรที่มีผลต่อค่าชั้นคุณภาพพื้นที่ เพื่อสร้างสมการแบบจำลองประมาณผลผลิต โดยใช้การวิเคราะห์วิธีเชิงเส้นทั่วไปโดยโปรแกรมทางสถิติ JMP 9.0

2.7) ตรวจสอบค่าความถูกต้องในภาคสนามในแต่ละจังหวัด

2.8) จัดทำรูปแบบการประเมินผลผลิตของสักจากปัจจัยแวดล้อม ที่เกษตรกรสามารถนำไปใช้ได้ในพื้นที่

2. การพัฒนาเทคนิคในการติดตามและประเมินปริมาตรไม้ของสวนป่าสักในพื้นที่ขนาดใหญ่โดยการสำรวจระยะไกล

1) พื้นที่ศึกษา

คัดเลือกพื้นที่สวนป่าไม้สักในพื้นที่ 3 จังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ จังหวัดเลย หนองบัวลำภู และอุดรธานี (Figure 2) ซึ่งได้มีการศึกษาเพื่อจัดทำแผนที่ความเหมาะสมสำหรับการปลูกสัก พื้นที่สวนป่าขนาดเล็กที่จัดการโดยเกษตรกร และพื้นที่ขนาดใหญ่ดำเนินการโดยองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ (อ.อ.ป.) พื้นที่สวนป่าสักจะกระจายอยู่ร่วมกับพื้นที่เกษตร เช่น นาข้าว ไร่มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ รวมทั้งสวนผลไม้และไม้ยืนต้นชนิดอื่น เช่น ยางพารา และยูคาลิปตัส สวนป่าสักของเกษตรกรส่วนใหญ่ปลูกเมื่อปี พ.ศ. 2537 ด้วยระยะปลูกแคบ เช่น 2x2 เมตร 2x3 เมตร และ 2x4 เมตร ในขณะที่สวนป่าขนาดใหญ่ของ อ.อ.ป. ปลูกด้วยระยะปลูก 4x4 เมตร เป็นหลัก สวนป่าของ อ.อ.ป. จะมีการตัดขยายระยะและพบไม้มากนักในกรณีของสวนป่าของเกษตรกร

2) วิธีการศึกษา

2.1) ใช้ภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูง Pléiades ซึ่งเป็นของประเทศฝรั่งเศส มีความละเอียด 0.5 เมตร ที่ถ่ายเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน 2555 ในการวิเคราะห์

2.2) การตรวจวัดภาคสนาม โดยวางแผนตัวอย่างขนาด 40x40 เมตร (0.16 เฮกแตร์ หรือ 1 ไร่) จำนวน 67 แปลง วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) ของต้นไม้ทั้งหมดในแปลง และตัดเลือกต้นไม้ตัวอย่างเพื่อทำการวัดความสูงของต้นไม้และความกว้างของเรือนยอดซึ่งวัด 4 ด้าน ความสูงของต้นไม้ทุกต้นใช้การประเมินจากกราฟความสูง (Nöslund's function) ซึ่งสร้างขึ้นในแต่ละแปลงทดลอง เก็บข้อมูลประกอบอื่นๆ เช่น อายุหมู่ไม้ ลักษณะภูมิ

ประเทศ พืชพรรณในพื้นที่ รวมทั้งการจับค่าพิกัดของพื้นที่ รวมทั้งสภาพทั่วไป เช่น ประวัติการเกิดน้ำท่วม หรือไฟไหม้ เป็นต้น คำนวณหาค่าปริมาตรของหมู่ไม้ในแปลงโดยใช้สมการสำหรับการประเมินปริมาตรสักในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่พัฒนาโดย Ishibashi *et.al.* (2002) คือ

$$v = 0.000100712 \times dbh^{1.89445042} \times h^{0.763796917} \quad (1)$$

โดย v คือ ปริมาตรรายต้นของสัก (m^3), dbh คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (cm)

h คือ ความสูง (m)

2.3) การวิเคราะห์ภาพถ่าย

(1) การประเมินความสูงไม้เด่น ใช้การประมาณโดยการวัดในภาพถ่ายดาวเทียมด้วย stereoscopic (Figure 4) ซึ่งใช้เครื่องมือวัดแบบสามมิติ (Stereo analyst (Hexagon Geospatial, 2010) of ERDAS Imagine image processing software (Hexagon Geospatial)) วัดค่าความสูงของส่วนบนสุดของต้นไม้และพื้นที่เปล่ารอบสวนป่าสัก ใช้หลักการรูปสามเหลี่ยมโดยใช้เครื่องมือสร้างแบบจำลองพื้นผิว Tntmips GIS analysis software (MicrolImages, Inc.) แบบจำลองภูมิประเทศถูกสร้างขึ้นในรูปแบบที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 0.5 เมตร ความสูงของต้นไม้แต่ละต้นจะถูกคำนวณจากความแตกต่างระหว่างตำแหน่งของส่วนบนสุดกับพื้นภูมิประเทศ และนำค่าความสูงมาหาความสูงของไม้เด่นของแต่ละแปลงต่อไป

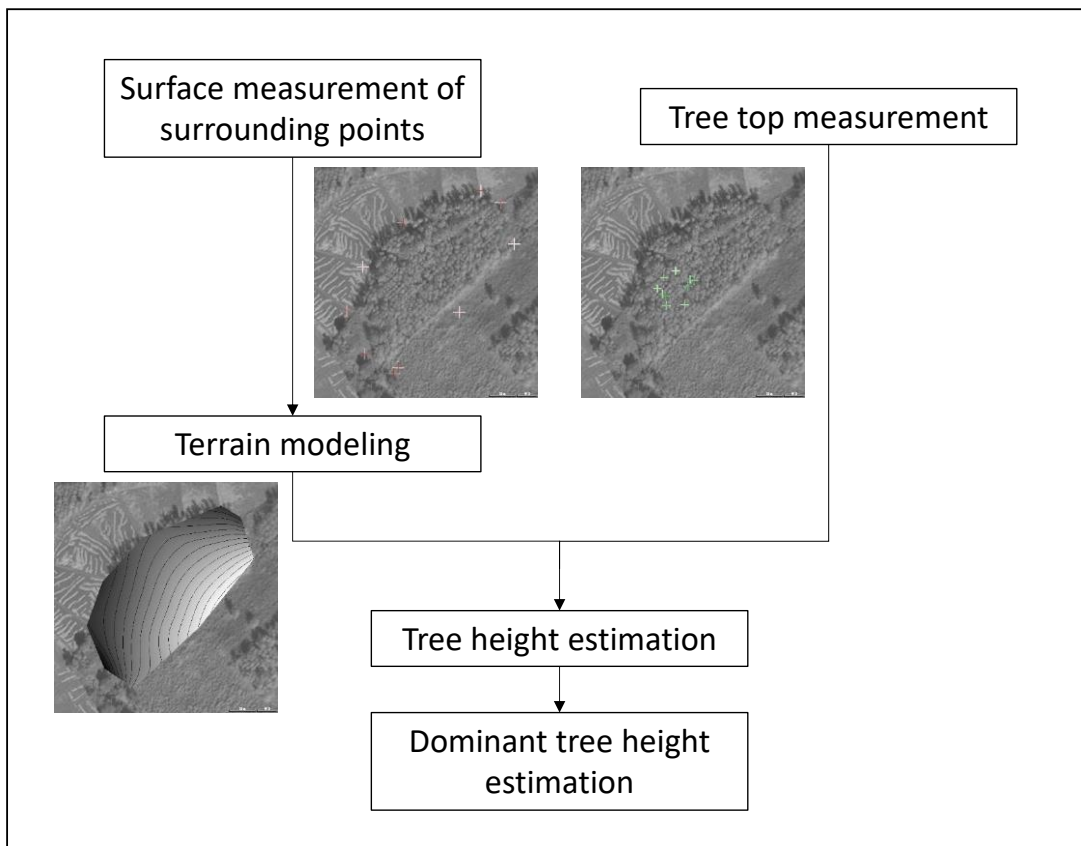


Figure 4 Flowchart of dominant tree estimation

(2) การประเมินปริมาตรหมู่ไม้จากการแปลงขนาดของเรือนยอด โดยการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูง มีขั้นตอนดังแสดงใน Figure 5 ขั้นตอนแรกคือการใช้ข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามมาใช้พัฒนาความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการแอลโลเมตริก ระหว่างขนาดความกว้างของเรือนยอดและเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก หลังจากนั้นทำการตรวจสอบเรือนยอดของต้นไม้แต่ละต้นจากภาพถ่ายและจับคู่กับแบบ (template) ที่สร้างให้มีหลายขนาด (Figure 6) เมื่อจำแนกเรือนยอดออกเป็นขนาดต่างๆ นำมาใช้ประเมินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกและปริมาตรของลำจากสมการความสัมพันธ์และประเมินปริมาตรของหมู่ไม้ต่อไป

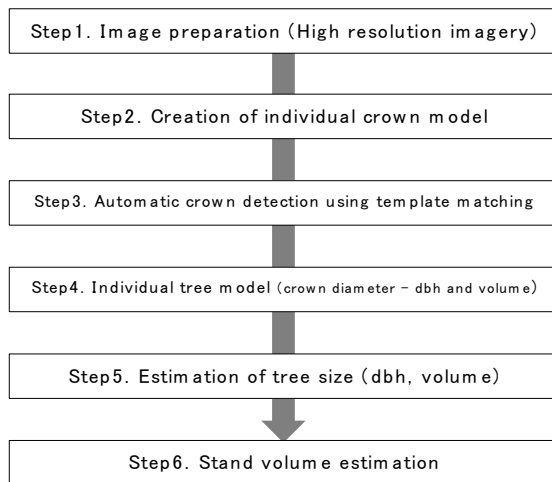


Figure 5 Flowchart of Teak stand volume estimation

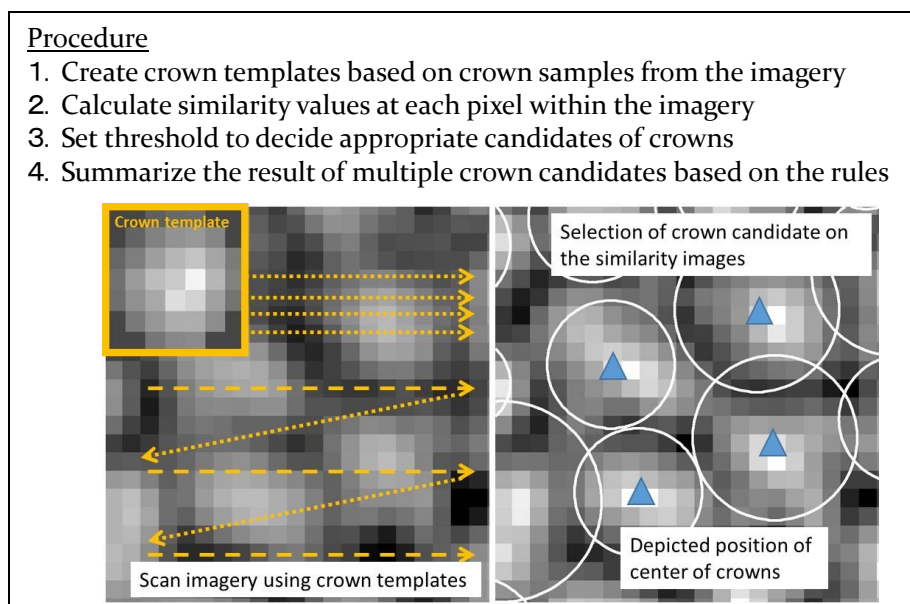


Figure 6 Procedure of crown template matching

3. บทบาทของการเก็บกักคาร์บอนในสวนป่าสัก

1) พื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้ทำการเก็บข้อมูลจาก 14 สวนป่า ใน 6 จังหวัด มีอายุระหว่าง 5–33 ปี ในจำนวนทั้งหมดนี้ได้มีการเก็บตัวอย่างในพื้นที่สวนป่าเกริงกระเวีย ขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี จำนวน 4 ชั้นอายุ (Figure 7) สภาพอากาศของพื้นที่ศึกษาอยู่ในเขตร้อนชื้น มีฤดูฝนในเดือนพฤษภาคมถึงกันยายน และมีฤดูแล้งจากเดือนตุลาคมถึงเมษายน อุณหภูมิเฉลี่ย 27 °C ปริมาณน้ำฝนรายปีแตกต่างกันในแต่ละภาค เช่น ภาคตะวันตก ที่อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ปริมาณน้ำฝนรวมรายปีประมาณ 1,650 มิลลิเมตร (Marod *et.al.*, 2002) ที่จังหวัดอื่นๆ ได้แก่ ลพบุรี อุตรดิตถ์ หนองบัวลำภู และขอนแก่น มีปริมาณน้ำฝนรวมรายปีประมาณ 1,200 มิลลิเมตร ชนิดดินในพื้นที่ศึกษามี 7 ชนิดตามการจำแนกของ USDA soil taxonomy (Vijarnsorn and Jongpakdee, 1979) ในสวนป่าขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ ได้แก่ สวนป่าเกริงกระเวีย สวนป่านาดวง และสวนป่าทองผาภูมิ มีลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ลาดชัน ส่วนสวนป่าของภาคเอกชนหรือเกษตรกรส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบ

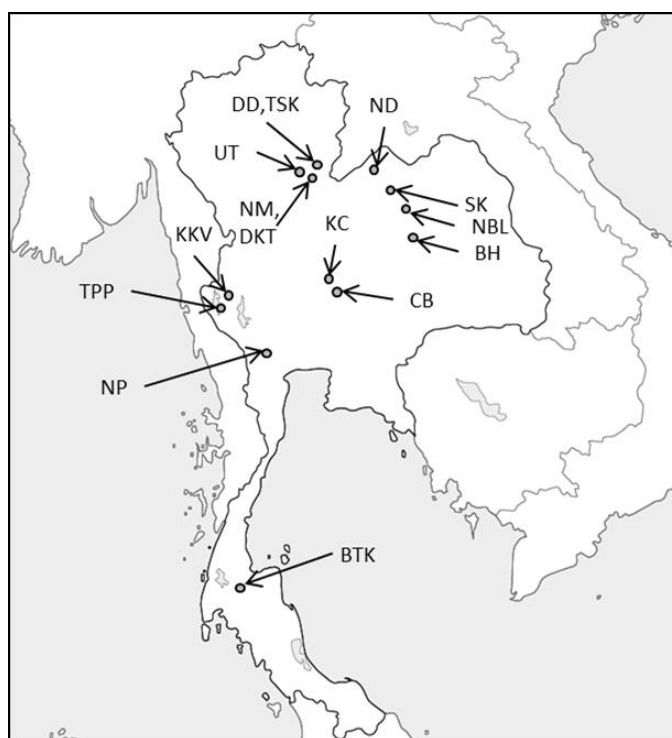


Figure 7 Location of biomass and carbon storage study sites in Thailand

2) วิธีการศึกษา

2.1) การเก็บข้อมูลภาคสนาม

(1) ในแต่ละพื้นที่ศึกษา วางแปลงตัวอย่างขนาด 40x40 ม. แต่ละแปลงทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกและความสูงของต้นไม้ทุกต้นในแปลงตัวอย่าง

(2) คัดเลือกต้นไม้ในแปลงทดลอง จำนวน 3-10 ต้น ที่มีค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกแตกต่างกันและเป็นตัวแทนของต้นไม้ในหมู่ไม้นั้น ต้นที่เลือกเป็นตัวอย่างจะต้องมีลักษณะตามปกติ กล่าวคือ เรือนยอดหรือลำต้นไม่ถูกทำลายหรือมีสภาพผิดปกติ เช่น เรือนยอดหัก หรือ ลำต้นคดงอ เป็นต้น ตัวอย่างต้นไม้ที่เลือกมีจำนวน 86 ต้น

(3) ทำการตัดต้นไม้ และทำการวัดค่าต่างๆ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) เส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับพื้นดิน (D_0) และความสูง

(4) ทำการแยกส่วนต่างๆ ของต้นไม้ ได้แก่ ลำต้น กิ่ง และใบ ออก ทำการชั่งน้ำหนักทั้งหมดเป็นน้ำหนักสดในพื้นที่ และทำการเก็บตัวอย่างแต่ละส่วนประมาณร้อยละ 0.5 ของทั้งหมดนำไปที่ห้องปฏิบัติการ เพื่อทำการอบที่อุณหภูมิ 85°C จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ ทำการชั่งน้ำหนักแห้ง หาค่าความชื้นของแต่ละส่วนของตัวอย่าง และคำนวณหาค่าน้ำหนักแห้งทั้งหมดของส่วนต่างๆ ต่อไป

(5) จากต้นไม้ตัวอย่าง 81 ต้น ทำการเก็บมวลชีวภาพใต้ดินเพียง 56 ต้น เนื่องจากข้อจำกัดบางประการในพื้นที่ทำการขุดรากโดยใช้ทั้งแรงงานคนและเครื่องจักรพยายามขุดรากให้ออกมาให้มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ จากตัวอย่างรากทั้งหมดใช้วิธีการเดียวกับส่วนเหนือพื้นดิน คือ ชั่งน้ำหนักสด (หลังจากที่ทำความสะอาดหรือแยกดินออกให้หมด) เก็บตัวอย่างเพื่อนำไปอบหาความชื้น และคำนวณหาน้ำหนักแห้งของรากทั้งหมดต่อไป

(6) ความหนาแน่นของเนื้อไม้เป็นตัวแปรที่สำคัญค่าหนึ่งสำหรับการพัฒนาสมการแอลโลเมตริกสำหรับการประมาณมวลชีวภาพของป่าไม้ โดยเฉพาะในป่าเขตร้อน (Chave *et.al.*, 2005, 2014; Kenzo *et.al.*, 2009b) เพื่อตรวจสอบค่าความหนาแน่นของเนื้อไม้สักว่าจะมีความแตกต่างกันระหว่างพื้นที่หรืออายุ ทำการเก็บตัวอย่าง (wood core) โดยใช้ increment borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.15 มิลลิเมตร (Mattoson, Sweden) เจาะลำต้นส่วนตรงระดับความสูงเพียงอก และส่วนรากขนาดใหญ่ที่ระดับประมาณ 20 เซนติเมตรเหนือพื้นดินของต้นไม้ตัวอย่างแต่ละต้น หลังจากที่ได้ตัวอย่างชิ้นไม้ทำการแยกส่วนที่เป็นกระพี้และส่วนแก่นออกจากกันโดยสังเกตจากสี นำมาอบเพื่อหาน้ำหนักแห้ง ทำการวัดขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางส่วนปลายทั้งสองด้านและความยาวเพื่อนำมาคำนวณหาปริมาตรและหาความหนาแน่นของเนื้อไม้ (น้ำหนักส่วนปริมาตร) ต่อไป

2.2) การวิเคราะห์ข้อมูล

(1) ทดลองสร้างสมการแอลโลเมตริก โดยใช้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) และความสูง (H) เป็นตัวแปรอิสระ จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า สมการ Power-form ($y=a^x \cdot b$ โดย y คือ น้ำหนักแห้งของแต่ละส่วน x คือค่าขนาด a และ b คือ coefficients) เป็นรูปแบบสมการที่ง่ายและเป็นมาตรฐาน (Ogawa *et.al.*, 1961; Buvaneshwaran *et.al.*, 2006) ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้สมการ Power-form เพื่อหาสมการสำหรับการประมาณค่าน้ำหนักแห้งของแต่ละส่วน โดยใช้ตัวแปรอิสระ 3 ค่า ได้แก่ DBH (cm), H (m) และ $DBH^2 \times H$ ($cm^2 \cdot m$) ส่วนน้ำหนักแห้งใต้พื้นดินหรือราก (W_R) ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับพื้นดิน (D_0) ด้วย

(2) ทำการทดสอบ onw-way analysis of variance (ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความหนาแน่นของเนื้อไม้ในแต่ละพื้นที่ที่ทำการศึกษา โดยใช้ Turkey's HSD test ($p < 0.05$) ค่าทางสถิติของแต่ละสมการแอลโลเมตริกทดสอบโดยใช้ the coefficient of determination (R^2) การทดสอบทางสถิติทั้งหมดใช้โปรแกรมสำเร็จรูป JMP (version 9.0; SAS)

ผลการศึกษา

1. การพัฒนาเทคนิคในการประเมินผลผลิตของพื้นที่สวนป่าสักจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมด้านพื้นที่

จากชุดข้อมูลทั้งหมด 52 ชุด ในพื้นที่สวนป่าของเอกชนและสวนป่าขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ใน 3 จังหวัด ได้แก่ หนองบัวลำภู อุตรดิตถ์ และเลย ในชุดข้อมูลประกอบด้วยตัวแปรจำนวน 19 ตัวแปร โดยแบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ 1) กลุ่มข้อมูลแบบต่อเนื่อง (continuous) ซึ่งแสดงเป็นตัวเลข และสามารถนำมาใช้ในการคำนวณได้เลย 2) กลุ่มข้อมูลแบบจัดลำดับ (ordinal) ซึ่งอาจแสดงทั้งในแบบตัวเลขที่นำไปใช้ในการคำนวณได้เลย หรือหากเป็นตัวอักษรจะถูกจัดเรียงลำดับก่อนนำไปใช้ในการคำนวณ 3) กลุ่มที่มีอิสระต่อกัน (nominal) ซึ่งแสดงในรูปลักษณะนาม

ตัวแปรในการศึกษานี้มีทั้งหมด 19 ตัวแปร แบ่งออกเป็น ผลผลิตภาพของพื้นที่ (site productivity) คุณสมบัติทางเคมีของดิน ปัจจัยด้านพื้นที่ และปัจจัยด้านการจัดการ ตัวแปรต่างๆ ประกอบด้วย ชั้นคุณภาพพื้นที่ (site index: SI) ใช้แสดงแทนค่าผลผลิตภาพของพื้นที่สวนป่าสัก ตัวแปรกลุ่มแบบ ordinal ประกอบด้วย การใส่ปุ๋ย การใช้พื้นที่ก่อนปลูกสักเคยปลูกมันสำปะหลังหรือข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (ถ้าใช้คือ 1 และไม่ใช่คือ 0) ตัวแปรกลุ่มข้อมูลแบบ nominal ได้แก่ ทิศด้านลาด (แบ่งออกเป็น 9 ค่า ได้แก่ 8 ทิศ และพื้นที่ราบ) และชั้นความลึกของดิน (แบ่งออกเป็น 0-20 เซนติเมตร และ 40-60 เซนติเมตร) (Table 1)

Table 1 List of variable on data set

Site productivity		Soil chemical factor		Terrain factor		Management factor	
Variable	Remarks	Variable	Remarks	Variable	Remarks	Variable	Remarks
SI/ (Site index)	meter	Depth class	0-20cm, 40-60cm	Slope	deg.	Fertilizer	1(yes), 0(no)
		pH	-	Elevation	meter	Cassava	1(yes), 0(no)
		OM	%	AzimuthCD	Flat, N, NE, E, SE, S, SW, W, NW	Maize	1(yes), 0(no)
		N	Total N %				
		P	ppm.				
		K	ppm.				
		Na	ppm.				
		Ca	ppm.				
		Mg	ppm.				
		CEC	meq/100g				
		EC	EC 1:5				
		BS	%				

1) ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์

1.1) ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตภาพของพื้นที่กับปัจจัยต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตภาพของพื้นที่ที่ใช้ค่าชั้นคุณภาพของพื้นที่ (SI) กับคุณสมบัติทางเคมีของดินที่ถูกแบ่งออกเป็น ของดินชั้นบน (0-20 เซนติเมตร) และดินชั้นล่าง (40-60 เซนติเมตร) ผลการศึกษาแสดงว่าค่าสหสัมพันธ์ของ Mg, Ca, CEC, OM และ Na ในดินชั้นบนมีค่าความสัมพันธ์เท่ากับ 0.318 ($p < 0.01$), 0.301 ($p < 0.01$), 0.260 ($p = 0.069$), 0.206 ($p = 0.152$) และ -0.209 ($p = 0.146$) ตามลำดับ โดย Na แสดงค่าความสัมพันธ์ในทางลบเล็กน้อย ส่วนตัวแปรอื่นๆ จะมีความสัมพันธ์ในทางบวกเล็กน้อย ในดินชั้นล่าง ค่าสหสัมพันธ์ของ Ca, Na, N, and OM เท่ากับ 0.243 ($p = 0.092$), -0.241 ($p = -0.100$), 0.233 ($p = 0.112$) และ 0.223 ($p = 0.127$) ซึ่งความสัมพันธ์แสดงเหมือนกับดินชั้นบน (Figure 8) จากการศึกษพบว่าไม่มีค่าคุณสมบัติของดินตัวแปรใดที่มีความสัมพันธ์อย่างมากกับ SI และเนื่องจากค่า Ca, OM และ Na จะแสดงค่าความสัมพันธ์กับ SI ในดินชั้นบนและชั้นล่าง ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่าง CEC และ Mg กับ SI จะพบเฉพาะในดินชั้นบน แสดงว่าคุณสมบัติทางเคมีของดินชั้นบนมีผลต่อผลผลิตภาพของพื้นที่เด่นชัดกว่าในดินชั้นล่าง

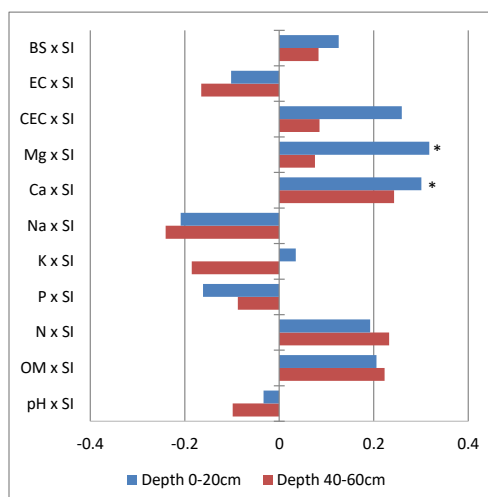


Figure 8 Correlations of soil chemical properties with SI by soil depth class (*: $p < 0.05$)

ตัวแปร ความลาดชัน และการใส่ปุ๋ย จะมีค่าความสัมพันธ์กับ SI เท่ากับ 0.259 ($p=0.07$) และ 0.223 ($p=0.12$) ตามลำดับ ในขณะที่ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ความสูง พื้นที่ราบ การใช้พื้นที่ก่อนการปลูกสั้ก (มันสำปะหลังหรือข้าวโพด) ไม่ได้แสดงค่าความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับ SI แต่อย่างใด (Figure 9)

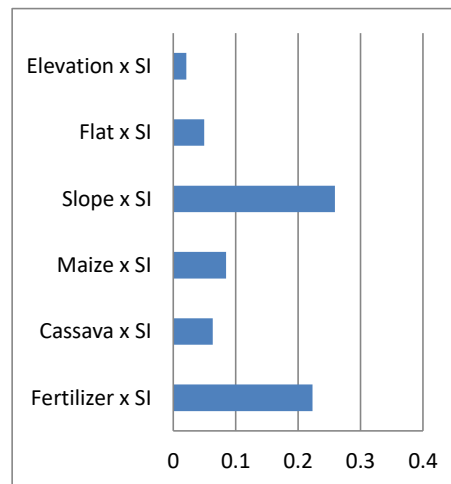


Figure 9 Correlations of terrain and management factors with SI (*: $p < 0.05$)

ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆกับ SI สามารถแสดงได้ดังนี้

SI: Mg(+:topsoil), Ca(+), CEC(+:topsoil), OM(+), Na(-), N(-: subsoil), Slope(+), Fertilizing(+)

โดย

++++ or ----: extremely strong correlation +++ or ---: strong correlation,

++ or --: correlation, + or -: weak correlation,

+ แสดง ความสัมพันธ์เชิงบวก - แสดง ความสัมพันธ์เชิงลบ

topsoil : พบความสัมพันธ์เฉพาะในดินชั้นบน subsoil : พบความสัมพันธ์เฉพาะ

ในดินชั้นล่าง

ไม่แสดง : พบความสัมพันธ์ทั้งในดินชั้นบนและชั้นล่าง

1.2) ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางเคมีของดิน

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเคมีของดิน แสดงใน Figure 10 ซึ่งพบว่า ค่า CEC ในดินชั้นบน มีความสัมพันธ์อย่างมากกับ Ca (0.824, $p<0.01$) และ Mg (0.716, $p<0.01$) ส่วนในดินล่างมีค่าความสัมพันธ์เท่ากับ 0.586 ($p<0.05$) และ 0.364 ($p<0.05$) ตามลำดับ และยังมีความสัมพันธ์กับ N ด้วยเช่นกัน 0.614 ($p<0.01$) และ 0.642 ($p<0.01$) ในดินชั้นบนและดินชั้นล่างตามลำดับ ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับ CEC สามารถแสดงได้ดังนี้

CEC: Ca(+++:topsoil), Mg(+++:topsoil), OM(++), N(++), Ca(++:subsoil), Mg(++:subsoil).

ค่า OM พบว่ามีค่าความสัมพันธ์กับ N ในดินชั้นบนและชั้นล่าง เท่ากับ 0.9995 ($p<0.01$) และ 0.9975 ($p<0.01$) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับ CEC และ Ca ในดินทั้งสองชั้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.620 ($p<0.01$) และ 0.491 ($p<0.01$) ในดินชั้นบน และ 0.654 ($p<0.01$) และ 0.585 ($p<0.01$) ในดินชั้นล่างตามลำดับ ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับ OM สามารถแสดงได้ดังนี้

OM: N(+++), CEC(++), Ca(++), Mg(++:topsoil).

เมื่อพิจารณาถึงค่าการใส่ปุ๋ย พบว่า Mg, CEC, Na และ EC ในดินชั้นบนมีค่าความสัมพันธ์ไม่มากนัก โดยมีค่าเท่ากับ 0.416 ($p<0.05$), 0.317 ($p<0.05$), -0.307 ($p<0.05$), และ -0.292 ($p<0.05$) ตามลำดับ และในดินชั้นล่างมีค่าความสัมพันธ์เท่ากับ 0.321 ($p<0.1$), -0.281 ($p<0.1$), -0.267 ($p<0.1$) และ -0.260 ($p<0.1$) (Figure 11) ซึ่งความสัมพันธ์จะแสดงชัดเจนในดินชั้นบนมากกว่าดินชั้นล่าง การใช้พื้นที่เพื่อปลูกมันสำปะหลังก่อนการทำสวนสักรักก็แสดงค่าความสัมพันธ์เชิงบวกเช่นกัน (0.729, $p<0.05$) ในทางตรงกันข้ามกับการใช้พื้นที่เพื่อปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะแสดงความสัมพันธ์เชิงลบ (-0.336, $p<0.05$) (Figure 12) ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ กับ Fertilizer สามารถแสดงได้ดังนี้

Fertilizer: Mg(++:topsoil), CEC(+:topsoil), Na(-:topsoil), EC(-:topsoil), Cassava(+++),
Maize(-).

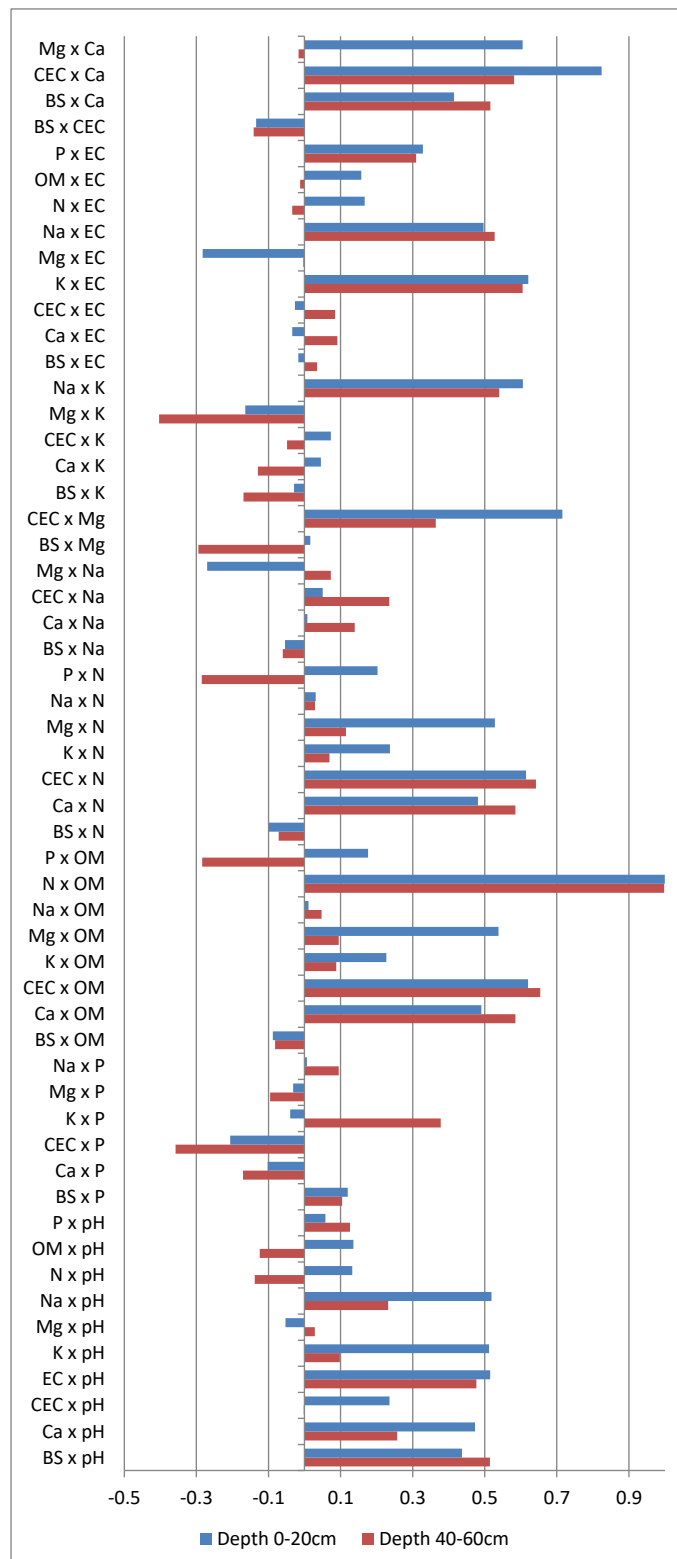


Figure 10 Correlation coefficients among soil chemical factors by soil depth class

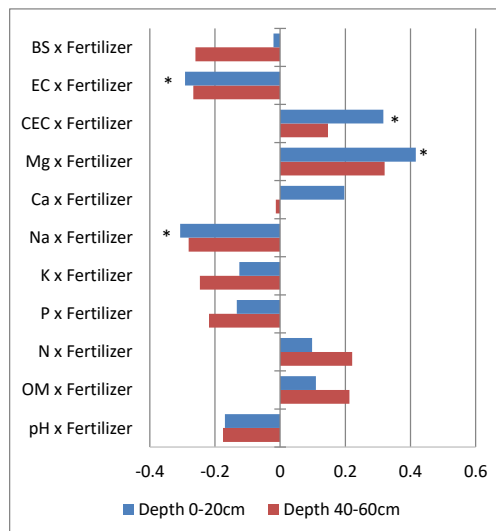


Figure 11 Correlations of soil chemical properties with *Fertilizer* by soil depth class
(*: $p < 0.05$)

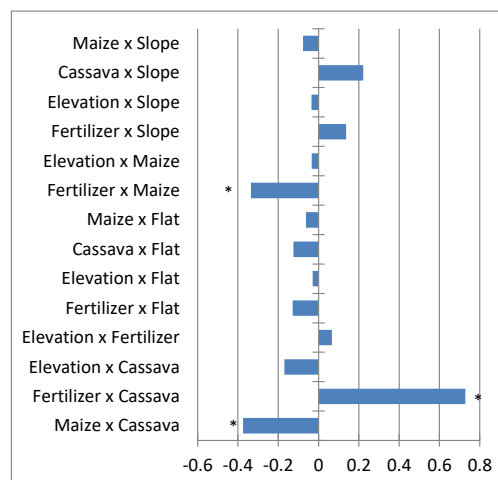


Figure 12 Correlation coefficients among Terrain and Management factors (*: $p < 0.05$)

2) รูปแบบสมการสำหรับการประเมินผลผลิตภาพของพื้นที่สำหรับการปลูกสัก

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แสดงว่าคุณสมบัติของดินชั้นบนจะมีผลต่อ SI ชัดเจนกว่าในดินชั้นล่าง ดังนั้นในการสร้างสมการสำหรับการประเมินผลผลิตภาพของพื้นที่สำหรับการปลูกสักในครั้งนี้จึงเลือกเฉพาะคุณลักษณะในที่ดินชั้นบน ในการวิเคราะห์โดยโมเดลเชิงเส้นโดยนัยทั่วไป (Generalized Linear Model :GLM) โดยใช้ตัวแปรต้นได้แก่ ความลาดชัน Ca Mg OM Na การใส่ปุ๋ย รวมทั้งตัวแปรคือ pH และ ทิศด้านลาด ซึ่งตั้งสมมติฐานว่าจะมีผลต่อผลผลิตภาพของพื้นที่ในรูปแบบไม่ใช่เชิงเส้น (non-linear) เข้าไปด้วย และตัวแปรตามคือ SI โดยใช้ค่า Chi-square ซึ่งเป็นสถิติที่เหมาะสมและรูปแบบจะต้องมีค่า AIC (Akaike's Information Criterion) น้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์ Chi-square โดยทดลองสร้างรูปแบบใน 6 กรณี (Con1-Con6) โดยการตัดตัวแปรที่มีค่า Chi-square น้อยที่สุดออก รูปแบบ Con6 ซึ่งมีตัวแปรเพียง 3 ตัว ได้แก่ ความลาดชัน ทิศด้านลาด และ Ca จะให้ค่า AIC ต่ำที่สุด จากผลการวิเคราะห์พบว่า การใส่ปุ๋ย Mg OM pH และ Na ไม่มีผลต่อ SI แต่ค่าความลาดชัน ทิศด้านลาด และ Ca มีผลต่อค่า SI (Table 2) จากการวิเคราะห์ด้วย Prediction Profiler ที่เส้นทึบแสดงผลของค่าของตัวแปรต้นที่มีต่อตัวแปรตาม และค่าความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ที่แสดงในรูปเส้นประกรณีข้อมูลแบบต่อเนื่อง และ error bar ในกรณีข้อมูลแบบจัดกลุ่ม Figure 13 แสดงให้เห็นว่าทุกค่า นอกจาก ความลาดชัน ทิศด้านลาด และ Ca ค่าการทำนายจะแสดงเกือบจะเป็นเส้นตรงกับแกน Y หรือค่า SI นั่นเอง

Table 2 Results of GLMs

Case		<i>Slope</i>	<i>AzimuthCD</i>	<i>Ca</i>	<i>Na</i>	<i>pH</i>	<i>OM</i>	<i>Mg</i>	<i>Fertilizer</i>	<i>AIC</i>	<i>R</i> ²	<i>RMS</i>
Con1	Chi-square	3.993	10.193	6.825	0.152	0.164	0.070	0.070	0.041	282.23	0.485	2.65
	p	0.046	0.252	0.009	0.697	0.686	0.791	0.792	0.839			
Con2	Chi-square	4.244	10.262	6.785	0.116	0.170	0.066	0.051		277.42	0.485	2.65
	p	0.039	0.247	0.009	0.733	0.680	0.798	0.821				
Con3	Chi-square	4.982	11.036	9.575	0.454	0.119	0.032			280.83	0.494	2.63
	p	0.026	0.200	0.002	0.500	0.730	0.858					
Con4	Chi-square	5.243	11.306	16.908	0.423	0.144				276.74	0.494	2.64
	p	0.022	0.185	<.0001	0.515	0.705						
Con5	Chi-square	5.149	11.355	21.311	1.038					273.00	0.493	2.64
	p	0.023	0.182	<.0001	0.308							
Con6	Chi-square	7.445	11.739	20.276						270.36	0.482	2.67
	p	0.006	0.163	<.0001								

p: probability of chi-square, *R*² determination coefficient adjusted for the degrees of freedom

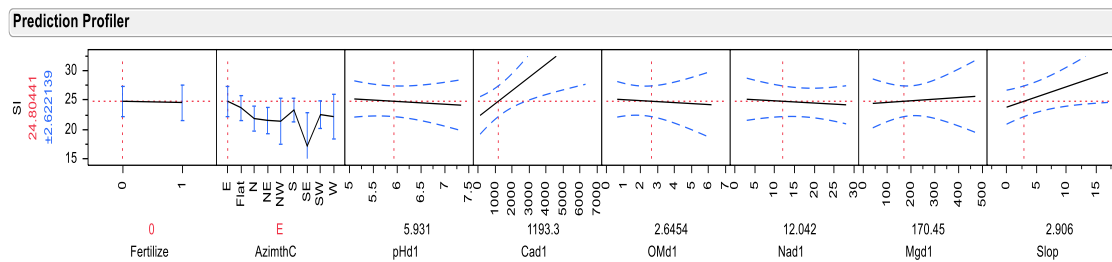


Figure 13 Profile traces of the GLM Con1

จาก Table 2 ในทุกรูปแบบจะมีค่า R^2 ต่ำกว่า 0.5 นั้นอาจเนื่องมาจากข้อมูลที่เก็บในแปลงศึกษามีบางค่าแสดงต่างจากค่าปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางเคมีของดินอาจไม่ใช่ค่าปกติเนื่องจากผลของการทำการเกษตร เป็นต้น เพื่อลดความผิดปกติของค่าจึงได้ปรับค่าตัวแปรต้นทั้ง 6 ค่าออกเป็นช่วง เช่น ค่าความลาดชัน ถูกจัดเป็น $\leq 2\%$, $\leq 5\%$, $\leq 12\%$, $\leq 20\%$, $\leq 35\%$ และ $< 35\%$ ตามการจัดชั้นความลาดชันของการจัดดินของกรมพัฒนาที่ดิน ส่วนตัวแปรอื่นๆ ก็ถูกจัดออกเป็น 4-5 ชั้นด้วยเช่นกัน (Table 3)

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า GLM โดยแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ ได้แก่ Cat1-Cat5 โดยการตัดตัวแปรที่มีค่า Chi-square น้อยที่สุดออกก่อนตามลำดับ ค่าที่ได้จะมีค่า R^2 สูงกว่าการวิเคราะห์โดยไม่ได้ทำการปรับค่าเป็นช่วง และทำให้เส้น Prediction Profiler แสดงค่าแตกต่างจากการวิเคราะห์แบบแรกด้วยเช่นกัน (Table 4 และ Figure 13) จากผลการวิเคราะห์ Cat5 จะให้ค่า R^2 สูง (0.805) และมี AIC น้อยที่สุด (270.5) และแสดงลำดับความสำคัญของตัวแปร 4 ตัวแปร คือ $SlopeCD > CaCD > AzimuthCD > NaCD$ ค่าทิศด้านลาดที่ส่งผลทางบวกต่อ SI ได้แก่ S, SW, E and NE อย่างไรก็ตามต้องมีการเก็บตัวอย่างที่มากขึ้นเพื่อลดปัจจัยอื่นที่มากกระทบเพื่อให้ผลของทิศด้านลาดชัดเจนมากยิ่งขึ้น

Table 3 Categorized variables from continuous type

Soil chemical factor		Terrain factor	
Variable	Remarks	Variable	Remarks
<i>pHCD</i>	5 - 5.5	<i>SlopeCD</i>	A ($\leq 2\%$, 1.2 deg.)
	5.5 - 6		B ($\leq 5\%$, 2.9 deg.)
	6 - 6.5		C ($\leq 12\%$, 6.8 deg.)
	6.5 - 7		D ($\leq 20\%$, 11.3 deg.)
	7 -		E ($\leq 35\%$, 19.3 deg.)
<i>OMCD</i>	0 - 1%		F ($> 35\%$, 19.3 deg.)
	1 - 2		
	2 - 3		
	3 -		
<i>NaCD</i>	0 - 7.5ppm.		
	7.5 - 12.5		
	12.5 - 17.5		
	17.5 - 22.5		
	22.5 -		
<i>CaCD</i>	0 - 500ppm.		
	500 - 1000		
	1000 - 1500		
	1500 - 2000		
	2000 -		
<i>MgCD</i>	0 - 100ppm.		
	100 - 200		
	200 - 300		
	300 -		

Table 4 Results of GLMs using categorized explanatory variables

Case		<i>SlopeCD</i>	<i>AzimuthCD</i>	<i>CaCD</i>	<i>NaCD</i>	<i>OMCD</i>	<i>MgCD</i>	<i>Fertilizer</i>	<i>pHCD</i>	AIC	R ²	RMS
Cat1	Chi-square	39.966	32.642	16.768	26.825	4.357	5.937	2.250	5.146	392.85	0.698	2.03
	p	<.0001	<.0001	0.002	<.0001	0.225	0.115	0.134	0.273			
Cat2	Chi-square	37.977	31.583	28.603	24.887	8.445	4.423	1.026		326.37	0.840	1.48
	p	<.0001	0.000	<.0001	<.0001	0.038	0.219	0.311				
Cat3	Chi-square	37.498	30.667	28.155	26.404	7.567	4.254			314.21	0.837	1.49
	p	<.0001	0.000	<.0001	<.0001	0.056	0.235					
Cat4	Chi-square	39.238	33.173	35.793	24.180	4.612				288.57	0.822	1.56
	p	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.203						
Cat5	Chi-square	40.012	31.391	37.700	22.158					270.50	0.805	1.63
	p	<.0001	0.000	<.0001	0.000							

p: probability of chi-square, R² : determination coefficient adjusted for the degrees of freedom

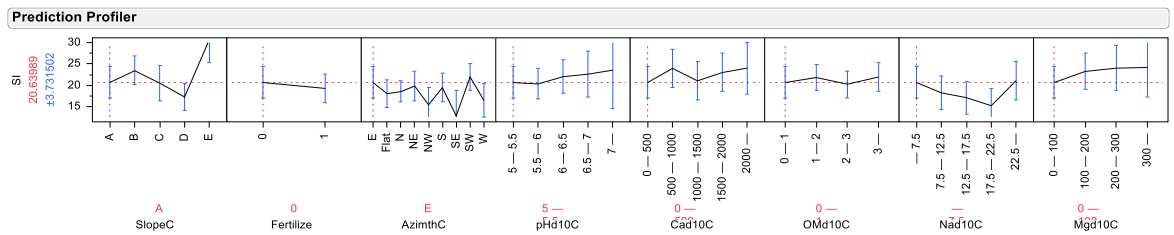


Figure 14 Profile traces of the GLM Cat1

ค่าการประมาณ SI โดยรูปแบบ Cat5 ซึ่งให้ค่า concordance rate สูงที่สุด คือร้อยละ 62.0

($p < 0.0001$) (Figure 14) สมการที่ได้คือ

$$SI' = \exp (3.1541194 + \sum \beta_i), i=1,2,3,4 \dots\dots\dots (1)$$

ค่า β_i แสดงค่า i ตาม Table 5 และ Figure 15

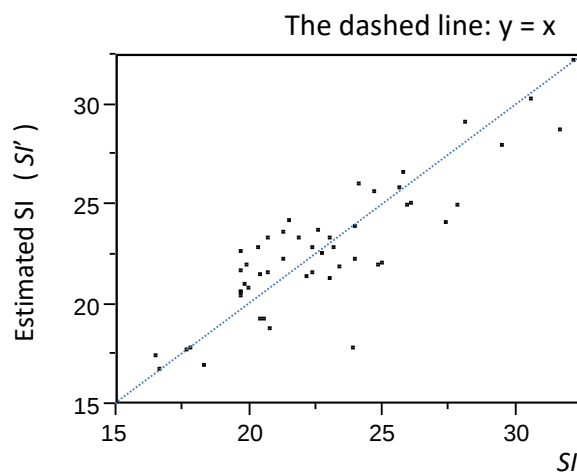


Figure 15 Relationship between the SI and the estimated SI (SI') by the Eq. 1

Table 5 Parameters of site productivity estimation model

Variable	Category	β_i
<i>SlopeCD</i>	A:0-2%	-0.14998
	B:2-5%	-0.01189
	C:5-12%	-0.09420
	D:12-20%	-0.18006
	E:20-35%	0.43613
	F:35%-	-
<i>AzimuthCD</i>	NW	-0.20104
	N	0.03013
	NE	0.09660
	E	0.11203
	SE	-0.21793
	S	0.07219
	SW	0.15425
	W	-0.08809
	Flat	0.04187
<i>CaCD</i>	0-500ppm	-0.21125
	500-1000	0.04139
	1000-1500	-0.04704
	1500-2000	0.09464
	2000-	0.12226
<i>NaCD</i>	-7.5ppm	0.04172
	7.5-12.5	0.00863
	12.5-17.5	-0.02771
	17.5-22.5	-0.14763
	22.5-	0.12500

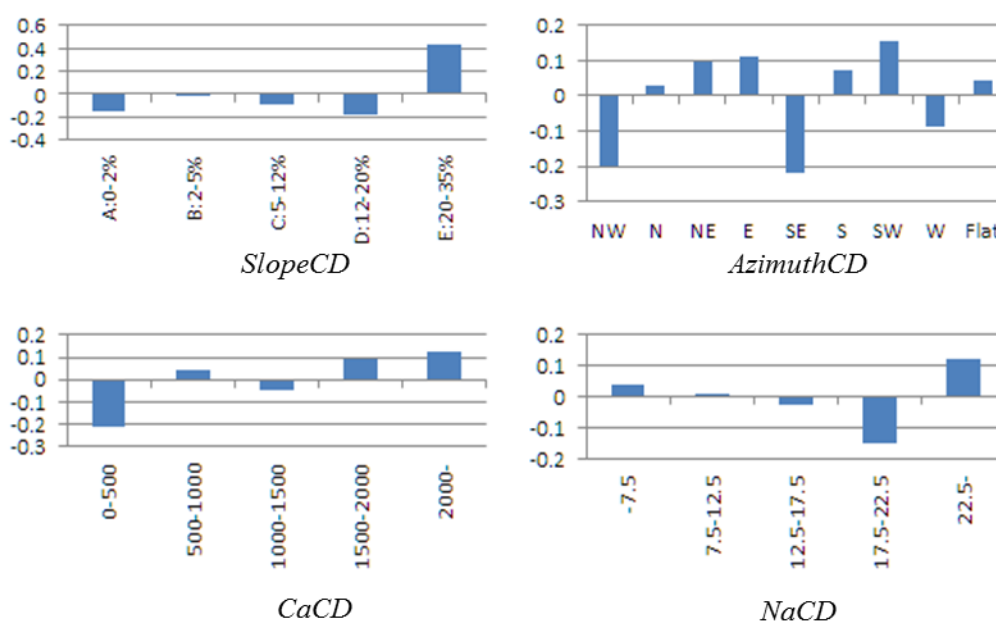


Figure 16 Bar graph of parameter values of the prediction model

2. การพัฒนาเทคนิคในการติดตามและประเมินปริมาตรไม้ของสวนป่าสักในพื้นที่ขนาดใหญ่โดยการสำรวจระยะไกล

1) การประมาณความสูงของไม้เด่น

1.1) การสร้างรูปแบบของพื้นที่

Figure 16 แสดงให้เห็นว่าสวนป่าสักในพื้นที่ศึกษาจะอยู่กระจ่ายกันอยู่ร่วมกับพื้นที่ทำการเกษตร เครื่องมือของเส้นทางหรือถนนมีแนวโน้มจะถูกพัฒนาจะติดกับขอบเขตของสวนป่าสักด้วยเช่นกัน การวัดลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ปลูกสักหรือพื้นที่ผิวนวนป่าโดยตรงในช่วงต้นของฤดูแล้งทำได้ยากเนื่องจากยังมีใบสักในภาพถ่ายทำให้ไม่มีพื้นที่ว่างสำหรับการวัดพื้นผิวนวนป่า จะทำได้เพียงบริเวณที่มีช่องว่างขนาดเล็กเท่านั้น ดังนั้นต้องทำการตรวจสอบตำแหน่งของพื้นผิวในบริเวณรอบพื้นที่สวนป่าสักแทน และทำการตรวจสอบจากภาพที่ถ่ายเมื่อสักไม่มีใบอีกครั้ง

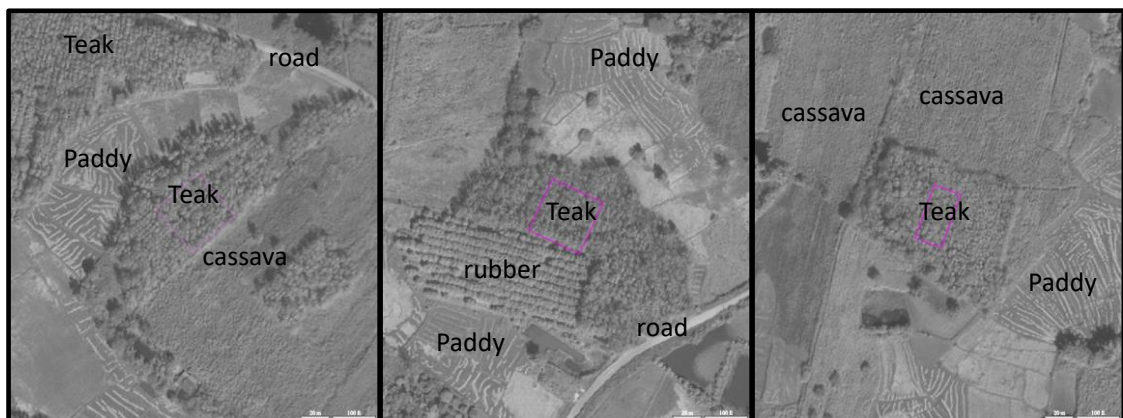


Figure 17 Examples of teak plantations location (the rectangular polygon indicates the location of the survey plot)

1.2) การประมาณความสูงของไม้เด่น

จากการสำรวจภาคสนาม สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประมาณความสูงของไม้เด่น (eDTHpq) กับความสูงของไม้เด่นจากการวัดจริงในพื้นที่ (sDTH) ($R^2 = 0.53$ to 0.75) ดังแสดงใน Figure 17 จากผลการศึกษาพบว่าบางแปลงมีการประมาณค่าสูงหรือต่ำเกินจากค่าความเป็นจริง เนื่องจากพื้นผิวดินโดยรอบสวนสักมีความแตกต่างจากพื้นที่ภายในสวนป่าสัก เช่น พื้นผิวนวนป่าที่ทำการตรวจสอบอยู่พื้นที่ราบแต่สวนสักอยู่ในพื้นที่เชิงเขา ทำให้

ค่าการประมาณความสูงของไม้เด่นสูงกว่าความเป็นจริง ความคลาดเคลื่อนที่เกิดแบ่งออกเป็น ความคลาดเคลื่อนจากการตีความความสูงของเรือนยอดและความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการสร้างรูปแบบเพื่อประมาณพื้นที่ผิว โดยการประมาณพื้นที่ผิวจะมีผลมากเมื่อพื้นที่โดยรอบที่ทำการตรวจวัดมีต้นไม้หรือพืชพรรณปกคลุม นอกจากนี้พื้นที่ที่มีสภาพขรุขระจะทำให้การประเมินความสูงของต้นไม้ทำให้ลำบากกว่าพื้นที่เรียบหรือค่อนข้างเรียบ

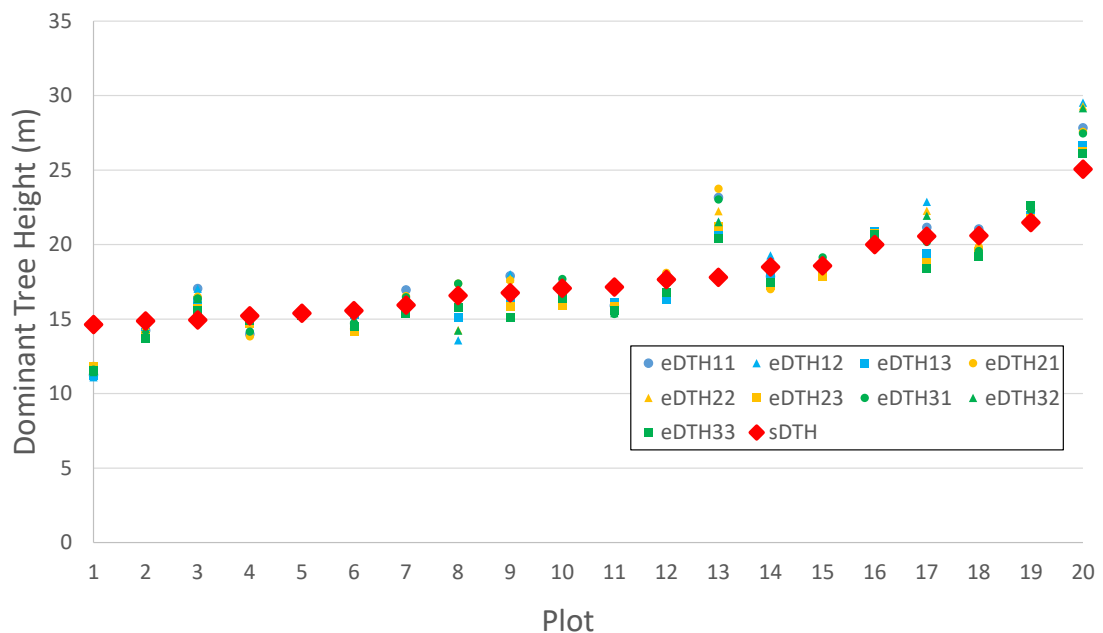


Figure 18 Distributions of the estimated DTH (eDTHpq is the result of each setting (p, q) of measurement) and the field surveyed DTH (sDTH) in each setting

2) การประมาณปริมาตรของหมู่ไม้

2.1) ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของเรือนยอดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) และปริมาตร

ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของเรือนยอดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกได้จากการตรวจวัดข้อมูลการเติบโตของต้นสักในแปลงทดลองที่มีความหลากหลายในเรื่องระยะปลูก เช่น 2x2 เมตร 2x3 เมตร 2x4 เมตร และ 4x4 เมตร ข้อมูลนี้รวมทั้งการควบคุมความหนาแน่นโดยการตัดขยายระยะและแปลงที่ไม่ได้ทำการควบคุมความหนาแน่นร่วมกัน และนำเสนอเป็นสมการ ดังแสดงใน Figure 18 และนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเรือนยอดกับปริมาตรต่อไป (Figure 19) ซึ่งยังไม่มีการศึกษาหาสมการสำหรับการ

ประมาณปริมาตรโดยเฉพาะประมาณจากความกว้างของเรือนยอดด้วยการเก็บข้อมูลในพื้นที่อย่างละเอียดเช่นนี้มาก่อน การประมาณปริมาตรด้วยการใช้ความกว้างเรือนยอดนี้ทำให้สะดวกเนื่องจากใช้เพียงตัวแปรเดียว แต่ความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นเนื่องจากไม่ได้นำปัจจัยด้านพื้นที่และความสูงของต้นไม้มาร่วมพิจารณาด้วย เพื่อให้เกิดความถูกต้องมากขึ้น ควรมีการพัฒนาการประมาณปริมาตรต้นไม้ด้วยการวัดความสูงของต้นไม้และประเมินชั้นคุณภาพของพื้นที่จากปัจจัยแวดล้อมต่างๆ เพิ่มขึ้น

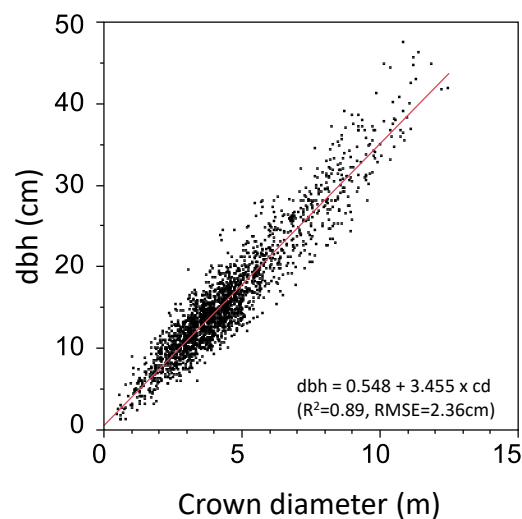


Figure 19 Relationship between crown diameter and DBH

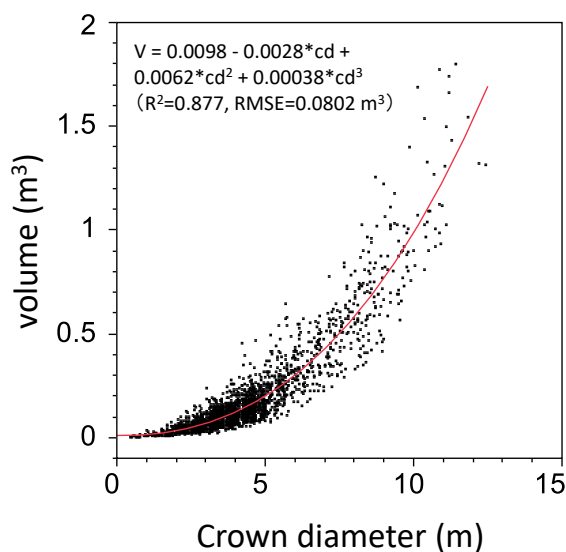


Figure 20 Relationship between crown diameter and volume

2.2) การตรวจวัดเรือนยอดของต้นไม้รายต้นและการประมาณปริมาตรหมู่ไม้

ตัวอย่างการจับคู่ระหว่างขนาดเรือนยอดจากภาพถ่ายกับ template ของเรือนยอดขนาดต่างๆ แสดงดัง Figure 20 โดยขนาดของเรือนยอดของสักขึ้นกับการเติบโตและการจัดการ อย่างไรก็ตามความผันแปรของขนาดเรือนยอดสามารถตรวจจับได้ด้วยการใช้ template ที่สร้างขึ้น โดยไม่ต้องเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆ

ผลของการประมาณปริมาตรไม้ แสดงใน Figure 21 ซึ่งในแปลงที่สักมีอายุน้อย (เช่นในแปลงที่ 22, 58, 59, และ 67) ปริมาตรที่ได้มีแนวโน้มจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ทำให้การประมาณปริมาตรโดยรวมสูงกว่าความเป็นจริงด้วย โดยเฉพาะในแปลงที่มีจำนวนต้นไม้มาก

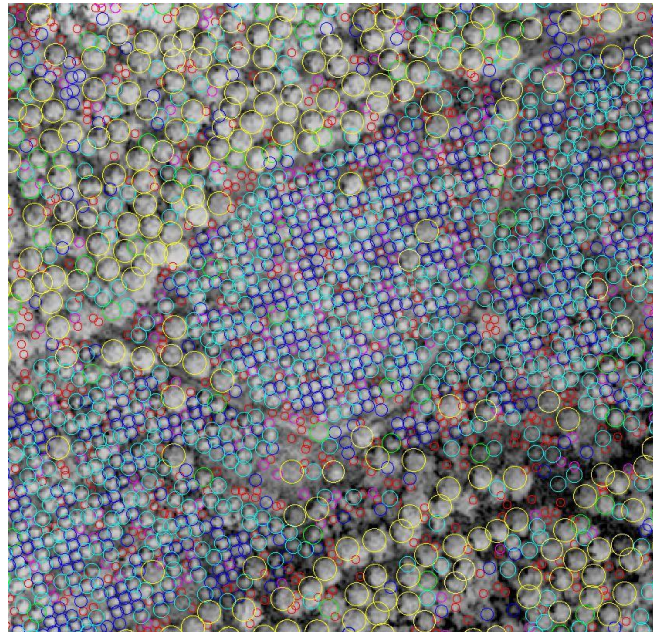


Figure 21 Individual teak crown detection using multiple size crown template matching

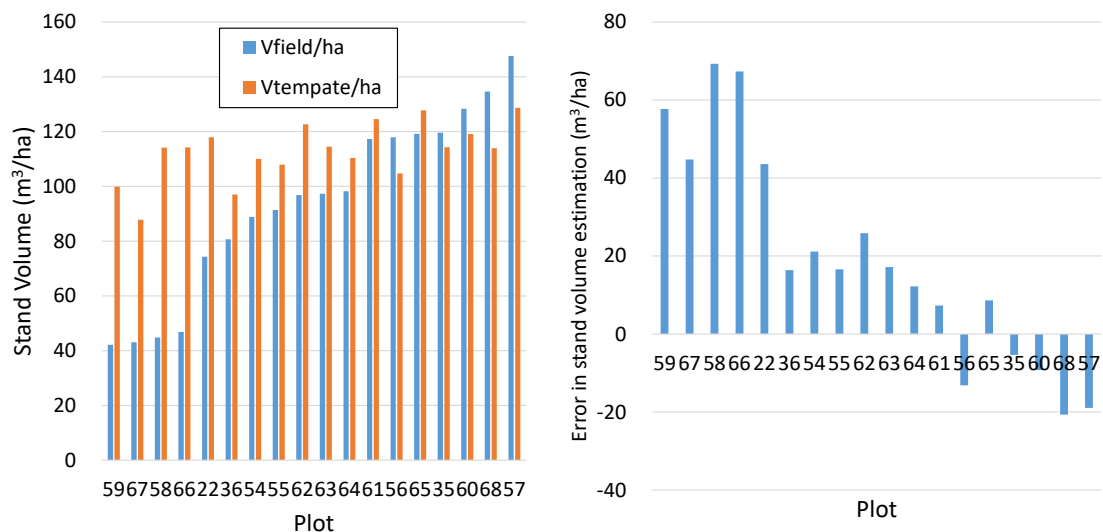


Figure 22 Stand volume estimated by the developed method (left) and the error (right)

3. บทบาทของการเก็บกักคาร์บอนในสวนป่าสัก

1) ลักษณะของต้นสักในพื้นที่ศึกษา

ในพื้นที่ศึกษาทั้งหมดต้นสักในแปลงตัวอย่างมีค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกอยู่ในช่วง 6.3–31.3 เซนติเมตร และความสูงอยู่ในช่วง 4.3–22.6 เมตร ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกและความสูงจะแตกต่างกันแม้ว่าจะมีอายุเท่ากันก็ตาม ตัวอย่างเช่นในสวนป่าทองพิกุล (TPP) และสวนป่าน้ำหมี (NM) ซึ่งมีอายุ 33 ปี เท่ากัน ความหนาแน่นของหมู่ไม้มีค่าตั้งแต่ 163–1,106 ต้น/เฮกตาร์ เนื่องจากอายุและปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ระยะปลูกตั้งแต่เริ่มต้น การตัดขยายระยะและอัตราการตายของต้นไม้ในสวนป่า เมื่อพิจารณาถึงชั้นคุณภาพของพื้นที่จากความสูงของไม้เด่น (Vacharanglura, 2012) พบว่าพื้นที่ศึกษาอยู่ในชั้นคุณภาพพื้นที่ที่ 12–28 จากต้นไม้ตัวอย่างที่ทำการเก็บข้อมูลจำนวน 81 ต้น พบว่า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกและความสูงอยู่ในช่วง 3.0–43.9 เซนติเมตร และ 2.9–26.7 เมตร ตามลำดับ (Table 6)

Table 6 Stand age, site index value, planted spacing, initial and present tree density, sample numbers for above-ground and below-ground biomass, mean diameter at breast height (DBH), and tree height in each plot.

Research Site		Age [year]	Site Index	Planted spacing [m]	Initial tree density [trees.ha ⁻¹]	Present tree density [trees.ha ⁻¹]	n AGB	n BGB	Mean DBH [cm]	Mean Height [m]
<i>West Thailand</i>										
Kanchanaburi Province										
Dan Makham Tia District (NP)	13°49'N, 99°26'E	20	21	2 × 4	1250	825	5	5	14.9 ± 3.7	14.9 ± 1.9
Thong Pha Phum District (KKV1)	14°52'N, 98°40'E	27	28	4 × 4	625	513	5		24.0 ± 6.5	21.5 ± 4.0
Thong Pha Phum District (KKV2)	14°52'N, 98°40'E	21	22	4 × 4	625	431	6	6	20.8 ± 6.5	15.8 ± 3.4
Thong Pha Phum District (KKV3)	14°50'N, 98°40'E	10	25	4 × 4	625	481	5	5	10.3 ± 4.5	10.1 ± 4.4
Thong Pha Phum District (KKV4)	14°50'N, 98°40'E	14	32	4 × 4	625	506	5	5	19.8 ± 4.0	19.5 ± 3.5
Thong Pha Phum District (TPP)	14°38'N, 98°36'E	33	24	4 × 4	625	256	5	5	31.3 ± 5.2	22.6 ± 2.1
<i>North-east Thailand</i>										
Khon Kaen Province										
Ban Had District (BH)	16°15'N, 102°47'E	6	12	4 × 4	625	275	7	7	6.3 ± 2.4	4.3 ± 1.8
Loei Province										
Na Duang District (ND)	17°35'N, 102°01'E	31	23	2 × 8	600	163	5	5	34.7 ± 5.2	21.5 ± 2.7
Nong Bua Lam Phu Province										
Muang Nong Bua Lam Phu District (NE 17°12'N, 102°17'E)		21	10	2.5 × 2.5	1600	950	5	5	8.3 ± 2	6.5 ± 2.0
Suwannakhuha District (SK)	17°33'N, 102°16'E	15	27	2 × 3	1650	306	8		15.8 ± 4	16.8 ± 2.8
<i>Central Thailand</i>										
Lop Buri Province										
Chai Badan District (CB)	15°19'N, 101°10'E	11	27	3 × 3	1089	594	5	3	17.2 ± 2.2	16.2 ± 1.1
Khok Charoen District (KC)	15°26'N, 100°52'E	19	27	3 × 3	1089	688	5		19.0 ± 3.5	19.3 ± 2.0
<i>North Thailand</i>										
Uttaradit Province										
Muang Uttaradit District (DD)	17°41'N, 100°17'E	10	25	4 × 4	625	613	5	5	15.2 ± 2.6	14.3 ± 1.2
Muang Uttaradit District (UT)	17°38'N, 100°5'E	5	28	2 × 4	1250	1106	5	5	10.2 ± 1.9	11.6 ± 1.5
Thong Sean Khan District (DKT)	17°35'N, 100°13'E	12	21	2 × 4	1250	606	5	5	11.6 ± 1.6	11.7 ± 1.1
Thong Sean Khan District (NM)	17°32'N, 100°27'E	33	14	2 × 3	1650	575	5	5	15.1 ± 3.1	12.9 ± 1.5
Thong Sean Khan District (TSK)	17°32'N, 100°16'E	19	22	2 × 4	1250	756	10	5	15.8 ± 4.3	15.0 ± 2.7
Total							96	71		

2) สมการแอลโลเมตริก

ผลการศึกษาเมื่อนำข้อมูลมวลชีวภาพของส่วนต่างๆ มาสร้างสมการแอลโลเมตริกกับตัวแปรทั้งสามตัว ได้แก่ DBH H และ DBH²×H ให้ค่าทางสถิติ $p < 0.01$ และเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่า การใช้ตัวแปร DBH จะให้ค่าความสัมพันธ์ (R^2) สูงที่สุดและค่าใกล้เคียงกับการใช้ตัวแปร DBH²×H ส่วนสมการที่ใช้ตัวแปร H ตัวแปรเดียวจะให้ค่าต่ำที่สุด

การประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน สมการแอลโลเมตริกสำหรับประมาณใบ (W_L) จะมีค่า R^2 ต่ำกว่า ($R^2 = 0.33 - 0.55$) สมการที่ใช้ประมาณส่วนลำต้น (W_S , $R^2 = 0.90 - 0.98$) และกิ่ง (W_B , $R^2 = 0.71 - 0.94$) สมการที่ใช้ประมาณส่วนเหนือพื้นดินทั้งหมด คือ รวมส่วนที่เป็นใบ ลำต้นและกิ่ง (W_{Top}) ที่ใช้ตัวแปรทั้งสามก็มีค่า R^2 สูงเช่นกัน กล่าวคือ DBH, DBH²×H

และ H มีค่า R^2 เท่ากับ 0.99, 0.98 และ 0.85 ตามลำดับ (Figure 22) สำหรับการประมาณมวลชีวภาพใต้ดิน (W_{Top}) แสดงค่า R^2 สูงที่สุดเมื่อใช้ตัวแปร DBH ส่วนสมการโดยใช้ค่าตัวแปร D_0 , $\text{DBH}^2 \times H$ และ H มีค่าต่ำกว่า ($R^2 = 0.69\text{--}0.73$) (Table 7)

มีหลายการศึกษาที่ใช้ค่า $\text{DBH}^2 \times H$ เป็นตัวแปรในสมการ (Hase and Foelster, 1983; ซิงชัยและกันตินันท์, 2546) ในขณะที่ Watanabe *et.al.* (2009) รายงานว่าปริมาณน้ำฝนมีผลต่อความสูงและมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของสักทำให้ต้นสักมีความสูงแตกต่างกัน แม้ว่าจะมีขนาดความโตเท่ากันก็ตาม อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาในครั้งนี้พบอย่างชัดเจนว่าตัวแปร DBH ตัวเดียวมีความสัมพันธ์กับค่ามวลชีวภาพสูง แม้ว่าสักที่มีขนาดความโตเท่ากันจะมีความสูงแตกต่างกันก็ตาม จากผลของการศึกษาในครั้งนี้ยืนยันว่าความสัมพันธ์ระหว่าง H ต่อ DBH และอัตราส่วนระหว่าง W_B และ W_{Top} เป็นไปในทางลบ ทำให้ต้นสักที่มีความสูงมากกว่าจะมี W_B น้อยกว่าต้นสักที่มีความสูงต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกัน ต้นสักที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้น W_{Top} จะมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าต้นไม้อายุที่ขนาดความโตเท่ากันแต่มีความสูงแตกต่างกัน ในการศึกษาอื่นก็มีการรายงานว่าตัวแปร DBH มีความสัมพันธ์กับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของสักเช่นกัน (Negi *et.al.*, 1995; Ola-Adams, 1993; Pérez Cordero and Kanninen, 2003) นอกจากนี้ยังมีการรายงานการศึกษาในต้นไม้ในเขตร้อนชนิดอื่นๆ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Basuki, 2009; Kenzo *et.al.*, 2009a, Kenzo *et.al.*, 2009b) สำหรับมวลชีวภาพใต้ดิน (W_R) นั้น ตัวแปร DBH ก็ให้ค่าความสัมพันธ์กับมวลชีวภาพสูงกว่า $\text{DBH}^2 \times H$ หรือ D_0 แต่การที่จะทำการวัด D_0 ในต้นสักที่มีขนาดใหญ่ให้มีความถูกต้องสูงนั้นทำได้ยาก เนื่องจากโคนต้นจะมีการพัฒนาของพูพอนทำให้มีรอยบวมบริเวณชิดพื้นดิน ดังนั้นควรใช้ตัวแปร DBH ในการประมาณ W_R ด้วยเช่นกัน

จากการวิเคราะห์ค่าความชันของเส้นสมการแต่ละเส้นที่ได้จากในแต่ละพื้นที่ศึกษาพบว่าไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.0001$) ทำให้สมการที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประมาณมวลชีวภาพของสักที่มีอายุน้อย (น้อยกว่า 33 ปี) ทั่วทั้งประเทศไทยได้ แม้ว่าจะมีความแตกต่างกันในเรื่องชั้นคุณภาพพื้นที่ ระยะเวลาปลูก และภูมิภาคก็ตาม

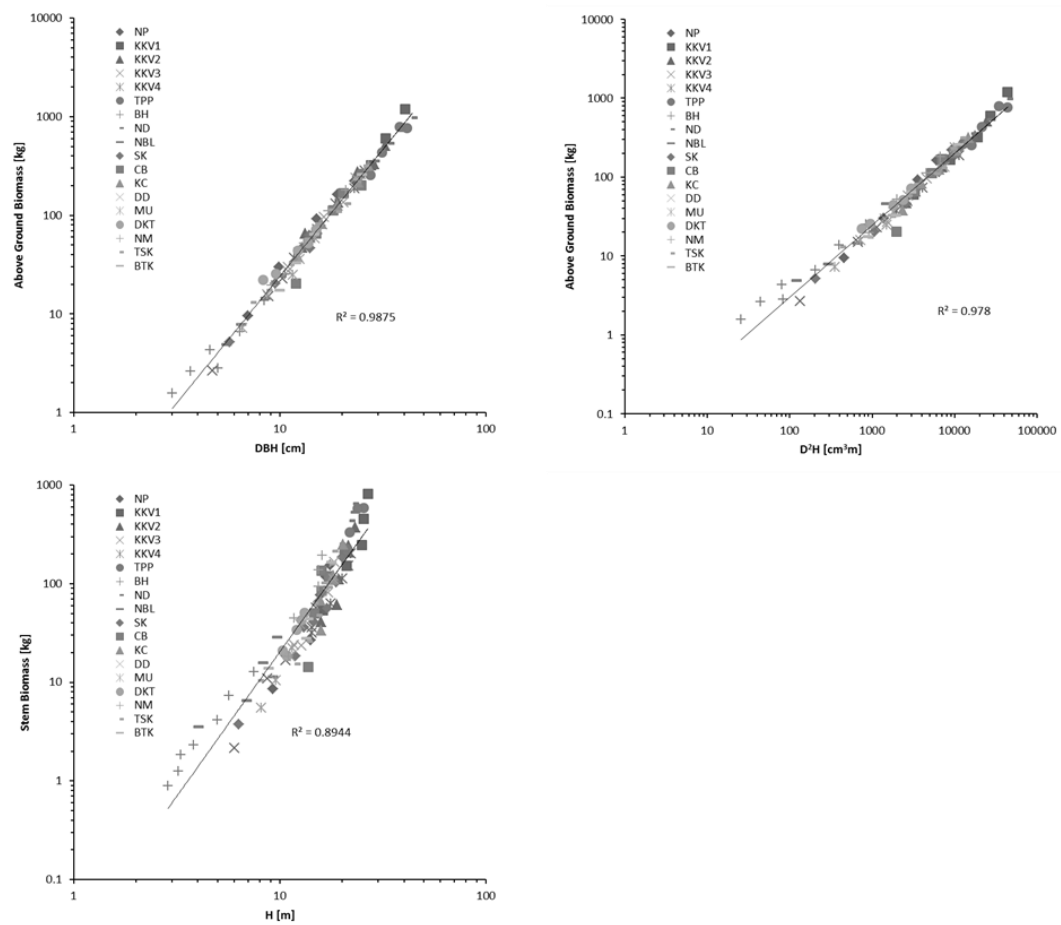


Figure 23 Relationship between DBH, $DBH^2 \times H$, H, and above-ground biomass

Table 7 Equation to estimate above- and below-ground biomass, used species, study site, mean annual precipitation (MAP, mm y⁻¹), and mean annual temperature (MAT, °C)

	Species	Study Site	Equation	MAP (mm y ⁻¹)	MAT (°C)
Present Study	<i>Tectona grandis</i>	Thailand (7 Provinces)	AGB = 0.0649 × DBH ^{2.5715} BGB = 0.0461 × DBH ^{2.1839}	1200 - 1650	27
Viriyabunch and Peawsa-ad (2003)	<i>Tectona grandis</i>	Thailand (4 Provinces)	AGB = 0.0346 × D ² H ^{0.9501}	-	-
Negi, et. al (1995)	<i>Tectona grandis</i>	India (Uttar Pradesh))	AGB = 0.0982 × DBH ^{2.5873} BGB = 0.0241 × DBH ^{2.45322}	1300-1650	-
Buveneswaran, et. al (2006)	<i>Tectona grandis</i>	India (Tamil nasu)	<Southern Tamil Nadu> AGB = 0.0904 × DBH ^{2.551} BGB = 0.097 × DBH ^{2.023} <Western Tamil Nadu > AGB = 0.0785 × DBH ^{2.578} BGB = 0.185 × DBH ² - 3.747 × DBH + 51.498	1100	31-38
Kraenzel et. al. (2003)	<i>Tectona grandis</i>	Panama (Panama Province)	Log (AGB) = -1.042 + 2.575 Log (DBH) Log (BGB) = -1.671 + 2.399 Log (DBH)	2300 - 3000	23 - 30
Purwanto and Shiba (2005)	<i>Tectona grandis</i>	Indonesia (East Java)	D _B = 0.9258 × DBH ^{0.9524} W _L = 0.0660 × (D _B) ^{2,0.8759} (1) W _B = 0.0058 × D ² H ^{1.0380} (2) W _S = 0.0287 × D ² H ^{0.9586} (3) AGB = (1) + (2) + (3)	1900	28.8
Perez Cordero and Kanninen (2003)	<i>Tectona grandis</i>	Costa Rica (4 States)	Log ₁₀ (AGB) = -0.815 + 2.382 Log ₁₀ (DBH)	1659 - 4107	25.9 - 27.1

3) ความผันแปรของความหนาแน่นของเนื้อไม้

ความหนาแน่นของเนื้อไม้สักที่เก็บจากส่วนของลำต้นในแปลงทดลองมีค่าเฉลี่ยของส่วนแก่นอยู่ระหว่าง 0.49±0.04 ถึง 0.59±0.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และส่วนกระพี้อยู่ระหว่าง 0.47±0.05 ถึง 0.60±0.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนที่เก็บตัวอย่างจากส่วนรากพบค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นส่วนแก่นอยู่ระหว่าง 0.50±0.02 ถึง 0.65±0.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และส่วนกระพี้อยู่ระหว่าง 0.50±0.04 ถึง 0.68±0.10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยในแปลงที่สักมีอายุมาก เช่น ในแปลงสวนป่านาดวง จังหวัดเลย อายุ 31 ปี (ND) จะมีค่าสูงกว่าแปลงที่สักมีอายุน้อย เช่น ในแปลงเกริงกระเวีย จังหวัดกาญจนบุรี อายุ 10 ปี (KKV3) จากผลการเปรียบเทียบค่าทางสถิติของความหนาแน่นของเนื้อไม้ในพื้นที่ศึกษาทั้งหมดพบว่าไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แม้ว่าจะมีความแตกต่างกันในเรื่องอายุของสักก็ตาม (ANOVA; F=2.09, p=0.073) แต่พบว่าความหนาแน่นของเนื้อไม้ส่วนรากของสัก

ที่มีอายุน้อยมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของเนื้อไม้ส่วนรากของสักที่มีอายุมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ANOVA; $F=4.17$, $p<0.0001$)

ความหนาแน่นของเนื้อไม้เป็นค่าทำนายที่สำคัญค่าหนึ่งของการประมาณมวลชีวภาพในป่าดั้งเดิมและป่าชั้นรองในเขตร้อน (Chave *et.al.*, 2005, 2014; Kenzo *et.al.*, 2009a, 2009b) ผลจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าความหนาแน่นของเนื้อไม้สักในพื้นที่ศึกษาทั้ง 12 สวนป่า แสดงความแตกต่างกันเล็กน้อย และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของความหนาแน่นของเนื้อไม้ส่วนที่เป็นแก่นและกระพี้ ซึ่งตรงตามรายงานที่กล่าวว่าสักอายุน้อยไม่ได้มีความหนาแน่นของเนื้อไม้และความแข็งแรง ด้อยกว่าสักอายุมาก (Sanwo, 1987; Wanneg *et.al.*, 2014) ส่วน Anish *et.al.* (2015) ได้รายงานว่าลักษณะไม้ เช่น ร้อยละของแก่น สีของแก่น และความถี่ของ vessel ในไม้สักที่โตเร็วกว่าโตช้าจะไม่มี ความแตกต่างกัน ดังนั้นแม้ว่าพื้นที่ศึกษาทั้งหมดจะมีความแตกต่างกันในเรื่องสภาพสิ่งแวดล้อม อัตราการเติบโต และระยะปลูก แต่ความแตกต่างกันเล็กน้อยของความหนาแน่นของเนื้อไม้ตัวอย่างทำให้สมการแอลโลเมตริกที่พัฒนาขึ้นในแต่พื้นที่ศึกษามีความคล้ายคลึงกัน

4) มวลชีวภาพของหมู่ไม้และการเก็บกักคาร์บอน

สมการแอลโลเมตริกที่ได้จากการศึกษาที่จะนำมาใช้ในการประมาณมวลชีวภาพของหมู่ไม้ ในพื้นที่ศึกษา (Table 7) ได้แก่

$$W_{TOP} = 0.0647 \text{ DBH}^{2.5715} \quad (1)$$

$$W_R = 0.0453 \text{ DBH}^{2.1839} \quad (2)$$

เมื่อทำการคำนวณหามวลชีวภาพเหนือพื้นดินและใต้ดินรายต้นในแปลงและนำมา รวมกัน จากนั้นทำการคำนวณต่อพื้นที่ 1 เฮกเตอร์ ผลปรากฏว่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินมีค่าอยู่ระหว่าง 2.5–133.5 ตัน/เฮกเตอร์ และมวลชีวภาพส่วนใต้ดินมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8–27.5 ตัน/เฮกเตอร์ (Table 8 และ Table 9) ซึ่งมวลชีวภาพที่ได้จากสมการในการศึกษาครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าการประมาณจากสมการที่มีการศึกษาอื่นๆ โดยสมการที่ทำการศึกษาในประเทศอื่นๆ จะมีค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินสูงกว่า 1.25–1.61 เท่า ส่วนมวลชีวภาพใต้ดินที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าผลจากการศึกษาโดย Buveneswaran *et.al.* (2006) และ Negi *et.al.* (1995) แต่มีค่าสูงกว่าการศึกษาโดย Kraenzel *et.al.* (2003) ซึ่งสมการเหล่านี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากการศึกษาในประเทศอินเดีย ปานามา อินโดนีเซีย และคอซตาริกา ในขณะที่มวลชีวภาพจากการใช้สมการที่

พัฒนาขึ้นในประเทศไทย โดย ชิงชัยและกันดินันท์ (2546) ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจาก 8 สวนป่า ใน 4 จังหวัด (สุโขทัย กาญจนบุรี เชียงใหม่ และลำปาง) มีค่าสูงกว่าจากการศึกษาครั้งนี้ 1.06 เท่า ซึ่งข้อมูลไม่ได้รวมถึงสวนป่าสักที่มีอายุน้อยกว่า 10 ปี Chave *et.al.* (2005) ได้รายงานไว้ว่าการพัฒนาสมการรูปแบบ regression ควรทำการวัดต้นไม้ที่มีขนาดตั้งแต่เล็กถึงใหญ่ การที่มวลชีวภาพจากการศึกษาของ ชิงชัยและกันดินันท์ (2546) สูงกว่าเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากการขาดข้อมูลต้นสักจากสวนป่าที่มีอายุน้อย อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ก็มีความแตกต่างจากผลของการศึกษาครั้งนี้้นน้อยกว่าผลของการศึกษาในประเทศอื่นๆ

Table 8 Estimated above-ground biomass in each research plot using equations from the present study and other studies

Above-ground Biomass [ton.ha ⁻¹]																	
	NP	KKV1	KKV2	KKV3	KKV4	TPP	BH	ND	NBL	SK	CB	KC	DD	UT	DKT	NM	TSK
Present Study	62.6	135.3	81.0	17.2	76.7	122.7	2.6	100.9	16.6	27.4	59.7	32.8	45.6	30.0	22.5	43.8	68.5
Viriyabuncha and Peawsa-ad (2003)	69.0	155.2	76.2	18.3	92.3	124.6	1.8	90.2	13.0	32.9	66.1	112.0	48.4	34.0	23.7	42.0	72.9
Perez Cordero and Kanninen (2003)	56.6	163.6	104.6	24.8	101.4	129.7	4.1	120.6	25.6	37.5	81.7	123.8	63.6	45.0	33.1	60.8	93.5
Buvaneswaran, <i>et. al.</i> (2006) (west)	77.1	167.2	100.0	21.2	94.7	151.8	3.2	124.9	20.4	33.8	73.6	114.5	56.1	36.9	27.7	53.9	84.5
Buvaneswaran, <i>et. al.</i> (2006) (south)	82.2	176.1	105.7	22.8	100.4	159.1	3.5	130.6	22.1	36.0	8.5	121.6	60.0	39.8	29.8	57.6	89.9
Kraenzel <i>et. al.</i> (2003)	88.4	191.5	114.6	24.3	108.5	173.7	3.6	142.9	23.5	38.8	84.4	131.2	64.4	42.3	31.8	61.6	96.8
Purwanto and Shiba (2005)	90.0	207.4	101.1	23.9	121.7	168.2	2.4	122.3	17.3	43.1	86.4	147.1	63.1	44.0	30.7	55.0	95.5
Negi <i>et. al.</i> (1995)	99.0	215.8	128.9	27.2	121.9	196.2	4.0	161.6	26.1	43.5	94.6	147.3	72.1	47.2	35.4	69.3	108.5

Table 9 Estimated below-ground biomass in each research plot using equations from the present study and other studies

Below-ground Biomass [ton.ha ⁻¹]																	
	NP	KKV1	KKV2	KKV3	KKV4	TPP	BH	ND	NBL	SK	CB	KC	DD	UT	DKT	NM	TSK
Present Study	15.3	27.4	17.2	4.6	16.7	23.1	0.8	18.3	4.9	6.6	143.0	21.1	11.4	8.7	6.1	10.8	16.3
Buvaneswaran, <i>et. al.</i> (2006) (west)	32.4	38.9	26.3	17.4	26.7	30.8	10.0	24.3	32.4	12.8	25.3	34.0	23.5	36.7	20.3	22.4	31.7
Buvaneswaran, <i>et. al.</i> (2006) (south)	20.1	33.2	21.2	6.2	21.5	27.0	1.3	21.1	7.3	8.5	18.5	26.7	15.0	12.2	8.6	14.2	21.1
Kraenzel <i>et. al.</i> (2003)	12.7	25.1	15.4	3.6	14.9	22.1	0.6	17.9	3.7	5.5	12.0	18.2	9.3	6.5	4.8	8.9	13.7
Negi <i>et. al.</i> (1995)	16.7	34.0	20.6	4.7	19.8	30.1	0.8	24.5	4.7	7.2	15.8	24.1	12.2	8.4	6.2	11.7	18.1

การแปลงค่าเพื่อประเมินการเก็บกักคาร์บอนในไม้สักโดยทั่วไปจะแปลงค่าโดยการ
ใช้ค่า conversion factor เท่ากับ 0.50 (Hiratsuka *et.al.*, 2005) เนื่องจากปริมาณคาร์บอนอยู่
ในช่วงร้อยละ 45–52 ของน้ำหนักแห้งของไม้สัก (Kraenzel *et.al.*, 2003; Jha, 2005, Meunpong
et.al., 2010) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ default value ของ IPCC (2006) ซึ่งกำหนดให้ปริมาณ
คาร์บอนสะสมในมวลชีวภาพมีค่าร้อยละ 47 ของน้ำหนักแห้ง (คณะวนศาสตร์, 2554) การเก็บ
กักคาร์บอนในส่วนเหนือพื้นดินกับส่วนใต้ดินของสวนป่าสักในการศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 1.2–63.6
ตัน/เฮกแตร์ และ 0.4–14.2 ตัน/เฮกแตร์ ตามลำดับ Table 10 แสดงค่ามวลชีวภาพและการเก็บ
กักคาร์บอนของสักในการศึกษาครั้งนี้และในการศึกษาอื่นๆ ในประเทศไทย

จากรายงานพบว่าสักจะมีแหล่งกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติมาจากประเทศอินเดีย
และพม่าเป็นหลัก (Keogh, 1979; Verhaegen *et.al.*, 2010) แต่จากการวิเคราะห์โครงการทาง
พันธุกรรมต่อมาพบว่าสักในประเทศไทยมีลักษณะต่างจากอินเดีย (Fofana *et.al.*, 2009) ดังนั้น
ความแตกต่างทางพันธุกรรมอาจมีผลต่อคุณสมบัติของเนื้อไม้และโครงสร้างของต้นไม้และอาจ
ส่งผลทำให้สมการที่ได้แตกต่างกัน รวมทั้งความแตกต่างของสภาพอากาศและสภาพพื้นที่ก็
อาจจะมีผลต่อการเติบโตและปริมาณมวลชีวภาพของสัก เมื่อทำการประมาณมวลชีวภาพของ
สวนสักควรเลือกสมการที่ถูกพัฒนาขึ้นจากภูมิภาคที่มีสภาพอากาศและฐานพันธุกรรม
ใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการเก็บกักคาร์บอนของส่วนเหนือพื้นดินและส่วนใต้ดิน
กับการเก็บกักคาร์บอนทั้งหมดพบว่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 76–85 และ ร้อยละ 15–24
ตามลำดับ โดยการเก็บกักคาร์บอนส่วนใต้ดินจะมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาอื่นๆ ที่ทำใน
ประเทศไทย (Hiratsuka *et.al.*, 2005) แต่มีบางการศึกษาที่มีค่าต่ำกว่า (Jha, 2015) ทั้งนี้อาจ
เนื่องจากการใช้วิธีการเก็บรากที่แตกต่างกัน เช่น เก็บจากดินที่ขุดเป็น block หรือการใช้วิธีการหา
สัดส่วนของ root:shoot ของ Mokany *et.al.* (2006) การศึกษายังพบอีกว่าต้นสักที่มีขนาดเล็ก
จะมีร้อยละสัดส่วนของการเก็บกักคาร์บอนส่วนใต้ดินต่อทั้งหมดสูงกว่าต้นสักที่มีขนาดใหญ่ ซึ่ง
เป็นไปในทางเดียวกับการศึกษาอื่นๆ ในเขตร้อนและเขตอบอุ่น (Cairns *et.al.*, 1997; Mokany
et.al., 2006; Kenzo *et.al.*, 2010; Jha, 2015)

Table 10 Estimated above and below ground biomass [ton.ha⁻¹] and above and below ground carbon stock [ton ha⁻¹] of teak plantation in various sites in Thailand.

Research Site	Age	Stand density [trees ha ⁻¹]	Mean DBH [cm]	Mean Height [m]	Above ground Biomass [ton ha ⁻¹]	Below ground Biomass [ton ha ⁻¹]	Above ground C stock [ton ha ⁻¹]	Below ground C stock [ton ha ⁻¹]	Sources
<i>West Thailand</i>									
Kanchanaburi Province									
Dan Makham Tia District (NP)	20	825	14.9	14.9	62.6	15.3	31.3	7.7	present study
Thong Pha Phum District (KKV1)	27	513	24.6	22.1	135.3	27.4	67.7	13.7	present study
Thong Pha Phum District (KKV2)	21	431	20.8	16.1	81.0	17.2	40.5	8.6	present study
Thong Pha Phum District (KKV3)	10	481	10.3	10.3	17.2	4.6	8.6	2.3	present study
Thong Pha Phum District (KKV4)	14	506	19.8	19.5	76.7	16.7	38.4	8.4	present study
Thong Pha Phum District (TPP)	33	256	31.3	22.6	122.7	23.1	61.4	11.6	present study
Prachuap Khiri Khan Province									
Kui Buri District	15		11.8	13.4	92.9	30.2	43.7	13.8	Muengpong <i>et al.</i> (2010)
<i>North-east Thailand</i>									
Khon Kaen Province									
Ban Had District (BH)	6	275	5.1	4.3	2.6	0.8	1.3	0.4	present study
Loei Province									
Na Duang District (ND)	31	163	34.8	21.5	100.9	18.3	50.5	9.2	present study
Nong Bua Lamphu Province									
Muang Nong Bua Lam Phu District (NBL)	21	950	8.3	6.5	16.6	4.9	8.3	2.5	present study
Suwannakhuha District (SK)	15	306	16.0	16.4	27.4	6.6	13.7	3.3	present study
<i>Central Thailand</i>									
Lopburi Province									
Chai Badan District (CB)	11	594	17.2	16.2	59.7	14.3	29.9	7.2	present study
Khok Charoen District (KC)	19	688	19.0	19.3	92.8	21.1	46.4	10.6	present study
<i>North Thailand</i>									
Uttaradit Province									
Muang Uttaradit District (DD)	10	613	15.2	14.3	45.6	11.4	22.8	5.7	present study
Muang Uttaradit District (UT)	5	1106	10.8	10.6	30.0	8.7	15.0	4.4	present study
Thong Sean Khan District (DKT)	12	606	11.6	11.7	22.5	6.1	11.3	3.1	present study
Thong Sean Khan District (NM)	33	575	15.1	12.9	43.8	10.8	21.9	5.4	present study
Thong Sean Khan District (TSK)	19	756	15.8	15.0	68.5	16.3	34.3	8.2	present study
Lampang Province									
Mae Mo District	17	844	14.4		71.1	18.2	35.5	9.1	Hiratsuka <i>et al.</i> (2005)
Mae Mo District	22	544	18.4		82.4	16.4	41.2	8.2	Hiratsuka <i>et al.</i> (2005)

สรุปผลและวิจารณ์ผล

1. การพัฒนาเทคนิคในการประเมินผลผลิตของพื้นที่สวนป่าสักจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมด้านพื้นที่

จากการศึกษาผลของปัจจัยแวดล้อม ประกอบด้วยคุณสมบัติทางเคมีของดิน ลักษณะทางกายภาพและการจัดการพื้นที่ที่มีผลต่อผลผลิตภาพของพื้นที่ของสวนป่าสัก โดยใช้ค่าชั้นคุณภาพพื้นที่ (site index, SI) ซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลการเติบโตของสักในพื้นที่

คุณสมบัติของดินได้ทำการเก็บตัวอย่างดินชั้นบน ความลึก 0-20 เซนติเมตร และดินชั้นล่าง ที่ความลึก 40-60 เซนติเมตร พบว่าดินชั้นบนแสดงผลต่อผลผลิตภาพของพื้นที่อย่างชัดเจนมากกว่าดินชั้นล่าง ค่า Ca และ OM แสดงความสัมพันธ์ทางบวกไม่มากนัก Na แสดงความสัมพันธ์ทางลบต่อชั้นคุณภาพพื้นที่ทั้งในดินชั้นบนและดินชั้นล่าง ในขณะที่ พบความสัมพันธ์ทางบวกที่ไม่สูงมากนักระหว่าง CEC และ Mg กับชั้นคุณภาพพื้นที่เฉพาะในดินชั้นบนเท่านั้น ความลาดชันและการใส่ปุ๋ยแสดงความสัมพันธ์เชิงบวกที่ไม่สูงกับชั้นคุณภาพพื้นที่ด้วยเช่นกัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย GLM ซึ่งใช้ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรงของค่า pH และทิศด้านลาด กับค่าชั้นคุณภาพพื้นที่ ได้ทำการจัดค่าออกเป็นช่วงๆ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากค่าปกติของข้อมูลอันเกิดจากการจัดการพื้นที่ การวิเคราะห์ให้ผลออกมาว่า ปัจจัย 4 ค่าที่ส่งผลต่อชั้นคุณภาพพื้นที่ ได้แก่ $Slope > Ca > Azimuth > Na$ ตามลำดับ ซึ่งอาจรวมถึง OM และ Mg ที่สามารถนำมาใช้ในการประเมินค่าชั้นคุณภาพพื้นที่ ทิศของด้านลาดชันได้แก่ ทิศใต้ ตะวันออกเฉียงใต้ ตะวันออก และทิศตะวันออกเฉียงเหนือ แสดงค่าเชิงบวกกับชั้นคุณภาพพื้นที่ ดังนั้นการเลือกพื้นที่เพื่อการปลูกด้วยการประเมินทิศทางของด้านลาดชันควรให้การพิจารณาเป็นพิเศษ

2. การพัฒนาเทคนิคในการติดตามและประเมินปริมาตรไม้ของสวนป่าสักในพื้นที่ขนาดใหญ่โดยการสำรวจระยะไกล

จากการศึกษาเพื่อพัฒนาเทคนิคในการติดตามและประเมินปริมาตรไม้ของสวนป่าในพื้นที่ขนาดใหญ่โดยการสำรวจระยะไกล ที่ได้ทำการศึกษาที่สวนป่าสักในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พบว่าระบบการสำรวจระยะไกลสามารถนำมาใช้เพื่อติดตามและประเมินปริมาตรไม้ของสวนป่าสักในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ โดยการจำแนก ความสูงของไม้เด่นในพื้นที่จากความแตกต่างระหว่างความสูงของเรือนยอดกับระดับความสูงของพื้นที่

และจำแนกขนาดของเรือนยอดและนำมาประมาณปริมาตรรายต้นมาสร้างความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม และจึงนำมาใช้ประมาณปริมาตรของหมู่ไม้ แม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนคือมีแนวโน้มค่าจะสูงกว่าความเป็นจริงโดยเฉพาะในสวนสักที่มีอายุน้อยและมีความหนาแน่นมาก แต่วิธีการประมาณโดยใช้การสำรวจระยะไกลจะมีข้อได้เปรียบในด้านการลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการสำรวจภาคสนามในกรณีที่ต้องการข้อมูลจากพื้นที่ขนาดใหญ่

3. บทบาทของการเก็บกักคาร์บอนในสวนป่าสัก

จากการศึกษาบทบาทของการเก็บกักคาร์บอนในสวนป่าสัก พบว่าจากการเก็บข้อมูลสักที่มีอายุน้อย (5–33 ปี) จาก 14 พื้นที่สวนป่า สมการแอลโลเมตริกที่พัฒนาเพื่อใช้ประมาณมวลชีวภาพสักทั้งส่วนต่างๆ ได้แก่ ลำต้น ใบ และกิ่ง รวมทั้งส่วนเหนือพื้นดินทั้งหมด และส่วนใต้ดินหรือราก สามารถใช้ตัวแปรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) เพียงตัวแปรเดียวและเมื่อนำมาคำนวณหาการเก็บกักคาร์บอนในสวนป่าสักที่ทำการศึกษาคั้งนี้พบว่ามี การเก็บกักคาร์บอนในส่วนเหนือพื้นดินเท่ากับ 1.3–67.7 ตัน/เฮกแตร์ และส่วนใต้ดินเท่ากับ 0.4–13.7 ตัน/เฮกแตร์ ตามลำดับ

สมการที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ตัวแปรคือ DBH เพียงตัวแปรเดียวนี้นำไปใช้ในการประมาณมวลชีวภาพของสักได้แม้ว่าจะอยู่ในพื้นที่ที่มีชั้นคุณภาพของพื้นที่หรือสภาพภูมิอากาศแตกต่างกันเพื่อความสะดวกสำหรับเกษตรกรหรือประชาชนทั่วไปที่ทำการวัดความสูงของต้นสักได้ยาก เนื่องจากขาดเครื่องมือวัดและค่าที่ได้ อาจมีความถูกต้องน้อย

ข้อเสนอแนะ

1. การพัฒนาเทคนิคการประเมินผลผลิตพื้นที่สวนป่าไม้สักจากปัจจัยแวดล้อมด้านพื้นที่

จากผลการศึกษาแสดงว่าการเลือกพื้นที่ปลูกสักควรเลือกในพื้นที่ที่มีความลาดชันจะดีกว่า เนื่องจากในพื้นที่ลุ่มส่วนใหญ่อาจเกิดน้ำท่วมหรือประสบกับปัญหาด้านการระบายน้ำที่ไม่ดี ซึ่งทำให้ต้นสักมีการเติบโตที่ไม่ดีนัก นอกจากนี้ยังควรเลือกพื้นที่ที่มีปริมาณแคลเซียมมากเพียงพอ มีความลาดชันในทิศตะวันออกเฉียงใต้หรือทิศใต้ ซึ่งมีผลต่อการรับแสงของต้นไม้ รวมถึงพื้นที่ควรมีปริมาณโซเดียมต่ำ

รูปแบบการประเมินค่าคุณภาพของพื้นที่ที่สามารถใช้ปัจจัยแวดล้อม 4 ตัว ได้แก่ ความลาดชัน ทิศด้านลาด แคลเซียม และโซเดียม โดยค่าความลาดชันและทิศด้านลาด สามารถสังเกตและคัดเลือกได้ง่าย ส่วนปริมาณแคลเซียมและโซเดียมนั้นต้องใช้การวิเคราะห์ค่าในห้องปฏิบัติการซึ่งไม่ใช่วิธีการที่สามารถทำได้โดยทั่วไปและใช้เวลา ในการศึกษาต่อไปควรทำการศึกษาเพื่อหาค่าอื่นที่สามารถใช้ประเมินค่าแคลเซียมและโซเดียมได้ในทางอ้อม นอกจากนี้ควรทำการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมให้ได้ชุดข้อมูลที่มีปริมาณมากขึ้น เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าปกติ และให้ค่าที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

2. การพัฒนาเทคนิคในการติดตามและประเมินปริมาณไม้ (growing stock) ของสวนป่าไม้สักในพื้นที่ขนาดใหญ่โดยการสำรวจระยะไกล

การประมาณปริมาตรของสักในสวนป่าโดยการใช้การประมาณจากขนาดของเรือนยอดมีแนวโน้มค่าที่ได้จะสูงเกินความเป็นจริง การลดความคลาดเคลื่อน วิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้คือการใส่ข้อมูลความสูง ดังนั้นการวัดความสูงของต้นไม้และการนำข้อมูลจากการประเมินคุณภาพของพื้นที่จากแผนที่มาใช้ในการพิจารณาร่วมกับการแปลตีความจากภาพถ่ายทางอากาศหรือภาพถ่ายดาวเทียม ควรมีการพัฒนาในอนาคต เพื่อให้การประเมินปริมาตรมีความถูกต้องมากขึ้น รวมทั้งควรมีการศึกษาและเก็บข้อมูลเพิ่มเติมในพื้นที่ที่มีความลาดชันหรือสวนป่าสักที่ปลูกในพื้นที่เนินเขาเพื่อนำมาปรับปรุงการประมาณค่าความสูงของต้นสักให้มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

3. บทบาทของสวนป่าไม้สักต่อการเก็บกักคาร์บอน

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ศึกษาสักที่อายุน้อย คือ 5–33 ปี Bhat *et.al.* (2001) ได้รายงานว่ สักอายุน้อยและสักอายุ 50–60 ปี จะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านกายวิภาคของเนื้อไม้ และคุณสมบัติของเนื้อไม้จะเปลี่ยนหลังการปลูกสักประมาณ 20–25 ปี แม้ว่าจากการศึกษาค้นคว้านี้ไม่พบความแตกต่างในด้านความหนาแน่นของเนื้อไม้ระหว่างสักที่มีอายุมากกว่า 30 ปี กับช่วงอายุอื่นๆ แต่ควรมีการเก็บตัวอย่างความหนาแน่นของเนื้อไม้สักที่อายุมากกว่า 30 ปี ให้มากขึ้น เพื่อยืนยันในเรื่องความแตกต่างของความหนาแน่นของเนื้อไม้สักระหว่างไม้สักที่อายุน้อยกับไม้สักอายุเกินกว่า 30 ปี นอกจากนี้การเก็บตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ทราบว่าสมการที่ถูกพัฒนาขึ้นจากการศึกษาค้นคว้านี้สามารถนำไปใช้ในการประมาณมวลชีวภาพและการเก็บกักคาร์บอนในสวนป่าสักที่มีอายุมาก (มากกว่า 33 ปี) และสักที่ขึ้นในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างจากการศึกษาค้นคว้านี้ได้หรือไม่อีกด้วย เพื่อให้สามารถนำสมการที่ได้ไปใช้ในการประเมินการเก็บกักคาร์บอนในไม้สักได้ทุกพื้นที่ทั่วประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

- เจษฎา เหลืองแจ่ม. 2551. โครงการปลูกป่า CDM. กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ
- ชิงชัย วิริยะบัญชา และ กันดินันท์ ผิวสอาด. 2548. การประมาณผลผลิตด้านปริมาตรของลำต้นและมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของสวนป่าไม้สัก. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.
- ทศพร วัชรานุกร, ชิงชัย วิริยะบัญชา และ กันดินันท์ ผิวสอาด. 2548. การประเมินปริมาณการสะสมของคาร์บอนในต้นไม้ ในสวนป่าเพื่อการอุตสาหกรรมในประเทศไทย, น. 137–157. ใน รายงานการประชุม การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทางด้านป่าไม้ “ศักยภาพของป่าไม้ในการสนับสนุนพิธีสารเกียวโต”, 4–5 สิงหาคม 2548 ณ โรงแรมมารวย การ์เด็น. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.
- ทศพร วัชรานุกร, ชาโตริ อธิบาชี, อิวาโอะ โนะตะ, วรพรรณ หิมพานต์, วิโรจน์ ครองกิจศิริ และดุสิต กมลพาณิชย์. 2554. ตารางผลผลิตของสวนป่าไม้สักในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด พันธุ์ พับลิชชิง, กรุงเทพฯ.
- ศูนย์วิจัยป่าไม้. 2539. การสำรวจและประเมินผลผลิตในสวนป่าองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้, คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สมเกียรติ จันทรไฟแสง. 2535. ผลผลิตของสวนป่าไม้สัก. น. 375–403 ใน การสัมมนา 50 ปี สวนสักห้วยทาก เฉลิมพระเกียรติ 60 พรรษามหาราชนิ. 5–8 สิงหาคม 2535, โรงแรมเวียงทอง จังหวัดลำปาง, กรมป่าไม้, องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้, บริษัทไม้อัดไทย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ JICA, กรุงเทพฯ.
- สุวิทย์ อ่องสมหวัง. 2538. ความรู้พื้นฐานระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์. ส่วนวิเคราะห์ทรัพยากรป่าไม้. สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.
- Abduelmula, A., M.L.M, Bastos and J.A. Gonçalves. 2015. High–Accuracy Satellite Image Analysis and Rapid DSM Extraction for Urban Environment Evaluations (Tripoli–Libya). Int. J. of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering 9(3): 661–666
- Anish, M.C., E.V. Anoop, R. Vishnu, B. Sreejith and C.M. Jijeesh. 2015. Effect of growth rate on wood quality of teak (*Tectona grandis* L.f.): a comparative study of teak grown under differing site quality. *J. Indian Acad. Wood Sci.* 12: 81–88.

- Asner, G.P., J. Mascaro, H.C. Muller-Landau, G. Vieilledent, R. Vaudry, M. Rasamoelina, J.S. Hall, and M. van Breugel. 2012. A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. *Oecologia* 168(4): 1147–1160
- Astrium. 2012. Pléiades imagery– User Guide. Astrium GEO-Information Services, France, 118pp.
- Basuki, T.M., P.E. Van Laake, A.K. Skidmore and Y.A. Hussin. 2009. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *For. Ecol. Manag.* 257: 1684–1694.
- Bermejo, I., I. Cañellas and A.S. Miguel. 2004. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 189 (1–3), 97–110. Available Source : <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.031>, November 4, 2015.
- Bhat, K.M., P.B. Priya and P. Rugmini. 2001. Characterisation of juvenile wood in teak. *Wood Sci. Tech.* 34: 517–32.
- Boonkird, S. A., E. C. M.Fernandes and P. K. R. Nair. 1985. Forest villages: an agroforestry approach to rehabilitating forest land degraded by shifting cultivation in Thailand. *Agroforestry Systems*, 2 (2), 87–102.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change in tropical forests. A primer. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 55pp.
- Buvaneswaran, C, M. George, D. Perez, and M. Kanninen. 2006. Biomass of teak plantations in Tamil Nadu, India and Costa Rica compared. *J. Trop. For. Sci.* 18: 195–197
- Cairns, M.A., S. Brown, E.H. Helmer and G.A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: 1–11
- Chave, J, C. Andalo, S. Brown, M.A. Cairns, J.Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J.P. Lescure, B.W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra and T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145: 87–99.

- Chave, J., M. Réjou-Méchain, A. Búrquez, E. Chidumayo, M.S. Colgan, W.B.C. Delitti, A. Duque, T. Eid, P.M. Fearnside, R.C. Goodman, M. Henry, A. Martínez-Yrizar, W.A. Mugasha, H.C. Muller-Landau, M. Mencuccini, B.W. Nelson, A. Ngomanda, E.M. Nogueira, E. Ortiz-Malavassi, R. Pélissier, P. Ploton, C.M. Ryan, J.G. Saldarriaga, and G. Vieilledent. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Change Biol.* 20: 3177–3190.
- Clutter, J.L., J.C. Fortson, L.V. Pienaar, G.H. Brister and R.L. Bailey. 1983. Timber management: A quantitative approach. John Wiley & Sons. New York. p 333.
- Cohen, W.B., and Goward, S.N. 2004. Landsat's Role in Ecological Applications of Remote Sensing. *Bioscience* 54(6):535–545
- Culvenor, D.S. 2003. Extracting individual tree information: A survey of techniques for high spatial resolution imagery. In: *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies*, edited by Wulder, M.A., Franklin, S.E., the Kluwer Academic Publishers, pp.255–277.
- Drake, J.B., R.O. Dubayah, R.G. Knox, D.B. Clark, and J. Blair. 2002. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. *Remote Sens Environ* 81: 378–392
- FAO. 2001. Forest resource assessment, 2000. *Forestry Paper 140*. FAO, Rome.
- Fofana, I.J., D. Ofori, M. Poitel and D. Verhaegen. 2009. Diversity and genetic structure of teak (*Tectona grandis* L.f.) in its natural range using DNA microsatellite markers. *New Forests* 37: 175–195.
- Foody, G. M., Boyd, D. S., & Cutler, M. E. J. (2003). Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 85(4), 463–474. Available Source: [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00039-7](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00039-7), November 4, 2015.
- Giachetti, A. 2000. Matching techniques to compute image motion. *Image and Vision Computing*, 18 (3), 247–260.

- Gougeon, F.A. 1995. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21(3): 274–284.
- Hall, R. J., R.S. Skakun, E. J. Arsenault and B.S. Case. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management*, 225 (1–3), 378–390. Available Source: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.014>, November 4, 2015.
- Hase, H and H. Foelster. 1983. Impact of plantation forestry with teak (*Tectona grandis*) on the nutrient status of young alluvial soils in west Venezuela. *For. Ecol. Manag.* 6: 33–57.
- Hayashi, C. 1950. On the quantification of qualitative data from the mathematico-statistical point of view. *Annals of the Inst. of Statistical Mathematics*. 2:35–47.
- Hayashi, C. 1952. On the prediction of phenomena from qualitative data and the quantification of qualitative data from the mathematico-statistical point of view. *Annals of the Inst. of Statistical Mathematics*. 3:69–98.
- Hirata, Y., N.Furuya, M.Suzuki, and H.Yamamoto. 2008. Estimation of stand attributes in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands from single tree detection using small-footprint airborne LiDAR data. *Journal of Forest Planning* 13:303–309.
- Hiratsuka M., C. Viriyabuncha, K. Peawsa-ad, S. Janmahasatien, A. Sato, Y. Nakayama, C. Matsunami, Y. Osumi and Y. Morikawa. 2005. Tree biomass and soil carbon in 17- and 22-year-old stands of teak (*Tectona grandis* L.f.) in northern Thailand. *TROPICS* 14: 377–382.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X., and Maltamo, M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29:1339–1366.
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). 2001. *Climate change 2001*. Cambridge University Press, Cambridge.

- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. International Panel on Climate Change. IGES, Japan. อ้างโดย คณะวนศาสตร์. 2554. คู่มือศักยภาพของพรรณไม้สำหรับส่งเสริม ภายใต้โครงการกลไกการพัฒนาที่สะอาดภาคป่าไม้. อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ. 88 หน้า
- Ishibashi S., M. Sakai, I. Noda, T. Vacharangkura, V. Krongkitsiri, D. Kamolpanit, and W. Himmapan. 2010. Yield Prediction Table on *Tectona grandis* (Teak) in Northeast Thailand (Revised edition). RFD-JIRCAS Joint Research Project, Bangkok.
- Jacobsen K. and H. Topan H. 2015. DEM generation with short base length Pleiades triplet. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci vol. XL-3/W2, p. PIA15+HRIGI15
- Jha K.K. 2005. Storage and flux of organic carbon in young *Tectona grandis* plantations in moist deciduous forest. *Ind. For.* 131: 647–659.
- Jha K.K. 2015. Carbon storage and sequestration rate assessment and allometric model development in young teak plantations of tropical moist deciduous forest, India. *J. For. Res. – China*. 26: 589–604.
- Kajisa, T., T. Murakami, N. Mizoue, F. Kitahara, and S. Yoshida. 2008. Estimation of stand volumes using the k-nearest neighbors method in Kyushu, Japan. *Journal of Forest Research*, 13 (4), 249–254. Available Source: <http://doi.org/10.1007/s10310-008-0077-5>, November 4, 2015.
- Kanninen, M., D. Pérez, M. Montero, and E. Viquez. 2004. Intensity and timing of the first thinning of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica: results of a thinning trial. *Forest Ecology and Management*, 203 (1–3), 89–99. Available Source: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.054>, November 4, 2015.
- Kaosa-ard, A. 1989. Teak (*Tectona grandis* Linn. f): Its natural distribution and related factors. *nat. Hist. Bull. Siam Soc.* 29: 55–74.
- Karizumi, N. 1974. Mechanism and function of tree root in the process of forest production. II. Root biomass and distribution in stands. *Bull. Gov. For. Exp. Sta.* 267: 1–94.

- Ke, Y., and L. J. Quackenbush. 2011. A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (17), 4725–4747. Available Source: <http://doi.org/10.1080/01431161.2010.494184>, November 4, 2015.
- Kenzo, T., R. Furutani, D. Hattori, J.J. Kendawang, S. Tanaka, K. Sakurai, I. Ninomiya. 2009a. Development of allometric relationships for accurate estimation of above- and below-ground biomass in tropical secondary forests in Sarawak, Malaysia. *J. Trop. Ecol.* 25: 371–386.
- Kenzo, T., R. Furutani, D. Hattori, J.J. Kendawang, S. Tanaka, K. Sakurai, I. Ninomiya. 2009b. Allometric equations for accurate estimation of above-ground biomass in logged-over tropical rainforests in Sarawak, Malaysia. *J. For. Res.* 14: 365–372.
- Kenzo, T., T. Ichie, D. Hattori, J.J. Kendawang, K. Sakurai and I. Ninomiya. 2010. Changes in above-and belowground biomass in early successional tropical secondary forests after shifting cultivation in Sarawak, Malaysia. *For. Ecol. Manag.* 260: 875–882.
- Keogh, R.M. 1979. Does teak have a future in tropical America? *Unasylva* 31(126): 13–19.
- Koonkhunthod, N. 2007. Evaluation of forest rehabilitation potential by teak plantation based on soil properties in Northern Thailand. 101 pp, Thesis of Kochi University.
- Koonkhunthod, N., K. Sakurai and S. Tanaka. 2007. Estimation of site quality index of teak by using soil properties in Northern Thailand. Proceedings of the International Symposium on Forest Soils and Ecosystem Health, Noosa, Australia, August 19–23, 2007.
- Kozlowski, T.T. and S.G. Pallardy. 1997. Physiology of Woody Plant. 2nd ed. Academic Press, San Diego. 411 p.
- Kraenzel, M., A.Castillo, T.Moore and C. Potvin. 2003. Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. *For. Ecol. Manag.* 173: 213–225.
- Larsen, M. and M. Rudemo. 1998. Optimizing templates for finding trees in aerial photographs. *Pattern Recognition Letters*, 19 (12), 1153–1162.

- Lu, D. 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (7), 1297–1328. Available Source: <http://doi.org/10.1080/01431160500486732>, November 5, 2015.
- Lu, D., P. Mausel, E. Brondizio, and E. Moran. 2004. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, 198 (1–3), 149–167. Available Source: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.048>, November 5, 2015.
- Lucman, A., Honzak, M., Lucas, R. and Baker, J. 1998. Tropical forest biomass density estimation using JERS-1 SAR – Seasonal variation, confidence limits, and application image mosaics, *Remote Sensing of Environment*. 63(2):126–139
- Luckman, A., Baker J., Kuplich T.M., Yanasse C.d.C.F., Frery A.C. 1997. A Study of the Relationship between Radar Backscatter and Regenerating Tropical Forest Biomass for Spaceborne SAR Instruments. *Remote Sensing of Environment*, 60(1):1–13
- Mahannop, N. 2004. The Development of Forest Plantations in Thailand. In Enters T, Durst PB (eds) What Does It Take?: The Role of Incentives in Forest Plantation Development in Asia and the Pacific. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand, pp 211–236
- Mäkelä, H., & Pekkarinen, A. (2004). Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. *Forest Ecology and Management*, 196 (2–3), 245–255. Available Source: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.049>, November 5, 2015.
- Marod, D., U.Kutintar, H.Tanaka, T.Nakashizuka. 2002. The effects of drought and fire on seed and seedling dynamics in a tropical seasonal forest in Thailand. *Plant Ecol.* 161: 41–57.
- Meunpong, P., C.Wachrinrat, B.Thaiutsa, M.Kanzaki and K. Meekaew. 2010. Carbon pools of indigenous and exotic tree species in a forest plantation, Prachuap Khiri Khan, Thailand. *Kasetsart J. (Natural Science)* 44: 1044–1057.
- MicroImages. 2013. Surface Modeling (tutorial). MicroImages, Inc., Raymond, Nebraska, USA, 28 pp.

- Mokany, K., R.J. Raison and A.S. Prokushkin. 2006. Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes. *Glob. Change Biol.* 12: 84–96.
- Negi, M.S., V.N. Tandon and H.S. Rawat. 1995. Biomass and nutrient distribution in young teak (*Tectona grandis*) plantation in Tarai Region of Uttar Pradesh. *Indian For.* 121: 455–463.
- Niiyama, K., T. Kajimoto, Y. Matsuura, T. Yamashita, N. Matsuo, Y. Yashiro, A. Ripin, A.P. Kassim, N.S. Noor. 2010. Estimation of root biomass based on excavation of individual root systems in a primary dipterocarp forest in Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *J. Trop. Ecol.* 26: 271–284.
- Nishizawa, M., Y. Mashima, and K. Kawabata. 1965. Estimations Method of Site Index by Quantification. Bulletin of the Government Forest Experiment Station, No176, 54pp. (In Japanese with English summary)
- Nishizawa, M. and I. Mashimo. 1966. *Chiishisuuniyoru rinchiseisaannryokuno hakarikata* (How to estimate forest land productivity using site index). Forestry Science and Technology Institute, 53pp, Tokyo. 1966.6 (In Japanese)
- Noda, I., T. Suzuki, M. Okabayashi and C. Cha-umplo. 2004. Profitability analysis of teak plantations management for small scale farmers in the Northeast of Thailand. 53 pp, JICA study report.
- Noda, I., and W. Himmaphan. 2014. Effects of Silvicultural Alternatives on Model-Based Financial Evaluation of Teak (<i>Tectona grandis> L.) Farm Forestry Management for Small-Scale Farmers in Northeast Thailand. *Open Journal of Forestry*, 04 (05), 558–569. Available Source: <http://doi.org/10.4236/ojf.2014.45060>, November 5, 2015.
- Noda, I., W. Himmaphan, S. Sukchan, W. Wichienopparat and T. Vacharangkura. 2015. Effects of soil and terrain factors on teak plantation growing in northeast region, Thailand, *In*: Abstract: Workshop on Improvement of Utilization Techniques of Forest Resources to Promote Sustainable Forestry in Thailand. RFD–JIRCAS Joint Research Project, Dec.15, 2015. Bangkok, Thailand, pp.10–11.

- Nwoboshi, L.C. 1983. Growth and nutrient requirements in a teak plantation age series in Nigeria. I. Linear growth and biomass production. *For. Sci.* 29: 159–165.
- Oechel, W.C. and Vourlitis, G.L. 1994. The effect of climate change on land–atmosphere feedback in arctic tundra regions. *Tree* 9, 324–329.
- Office of Environmental Policy and Planning OEPP. 2000. Thailand’s National Greenhouse Gas Inventory 1994. Ministry of Science, Technology and Environment. Bangkok. 118 p.
- Ogawa, H., K.Yoda and T. Kira. 1961. Preliminary survey on the vegetation of Thailand. *Nat. Life Southeast Asia* 1: 21–157.
- Ola-Adams, B.A. 1993. Effects of spacing on biomass distribution and nutrient content of *Tectona grandis* Linn.f. (teak) and *Terminalia superba* Engl. & Diels. (afara) in south–western Nigeria. *For. Ecol.Manag.* 58: 299–319.
- Palanisamy, K., M. Hegde, and J.S.Yi. 2009. Teak (*Tectona grandis* Linn. f.): A Renowned Commercial Timber Species. *Journal of Forest Science*, 25 (1), 1–24.
- Pandey, D. and C. Brown. 2000. Teak: a global overview. *Unasylva* 51 (201), pp 3–13
- Pérez Cordero, L.D. and M. Kanninen. 2003. Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantation in Costa Rica. *J. Trop. For. Sci.* 15: 199–213.
- Phien, H.N., A.Arbbabhirama, and A.Sunchindah. 1980. Rainfall distribution in northeastern Thailand. *Hydrological Sciences Journal* 25: 167–182.
- Prasad, R. and G.P. Mishra. 1984. Standing biomass of various plant parts in selected tree species of dry deciduous teak forest in M.P. *Indian For.* 110: 765–782.
- Prasong, T. and S. Taweek. 2004. Identification of Teak Plantation Area Using Remote Sensing Technique in Pasak Watershed. *Journal of Remote Sensing and GIS Association of Thailand (RESGAT) 2004 Vol. 5 No. 3.*
- Powell, S. L., W.B. Cohen, S.P. Healey, R.E. Kennedy, G.G. Moisen, K.B. Pierce, and J.L. Ohmann. 2010. Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time–series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 114(5), 1053–1068. Available Source: <http://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.018>, November 5, 2015.

- Purwanto, R.H. and M. Shiba. 2005. Allometric equations for estimating above ground biomass and leaf area of planted teak (*Tectona grandis*) forests under agroforestry management in East Java, Indonesia. *For. Res. Kyoto*. 76: 1–8.
- Ripple, W. J., S. Wang, D.L. Isaacson and D.P. Paine. 1991. A preliminary comparison of Landsat Thematic Mapper and SPOT-I HRV multispectral data for estimating coniferous forest volume. *International Journal of Remote Sensing*, 12(9), 1971–1977. Available Source: <http://doi.org/10.1080/01431169108955230>, November 5, 2015.
- Ritchie, M., J. Zhang, and T. Hamilton. 2012. Effects of stand density on top height estimation for ponderosa pine. *Western J. Appl For* 27(1): 18–24
- Sakurai, K., C. Yamada, T. Tulaphitak, K. Junthotai, C. Wacharintarat, S. Teejuntuk, and P. Sahunalu, 2002. Evaluation of site quality index for teak plantation in Thailand. In: *Proceedings of the 17th WCSS, Bangkok, Thailand*. p350–1~350–7.
- Sanwo, S.K. 1987. The characteristics of the crown formed and stem formed wood in plantation grown teak (L.f.) in Nigeria. *J. Inst. Wood Sci*. 11: 85–88.
- Sharp, A. and N. Nakagoshi. 2006. Rehabilitation of degraded forests in Thailand: policy and practice. *Landscape and Ecological Engineering* 2(2): 139–146
- Singh, A.K., V.N. Pandey, and K.N. Misra. 1980. Stand composition and phytomass distribution of a tropical deciduous teak (*Tectona grandis*) plantation of India. *J. Jap. For. Soc.* 62: 128–137.
- Sirmacek, B., H. Taubenbock, P. Reinartz, M. Ehlers. 2012. Performance Evaluation for 3-D City Model Generation of Six Different DSMs From Air- and Spaceborne Sensors. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 5(1): 59–70
- Sprugel, D.G. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* 64: 209–210.
- Steininger, M. K. 2000. Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), 1139–1157.

- Sukchan, S., and I.Noda. 2012. Improvement of soil suitability mapping for teak plantations in Northeast Thailand. *In*: Noda I, Vacharangkura T, Himmaman W (eds.) Approach to Sustainable Forestry of Indigenous Tree Species in Northeast Thailand. (JIRCAS Working Report No.74), JIRCAS, Tsukuba, Japan, pp. 27–32.
- Suzuki, T. 2004. Final report of long-term chief adviser for the Reforestation and Extension Project in the Northeast of Thailand Phase II. 107pp, JICA. (in Japanese)
- Takada, K. 1980. Suuryoukarironn: Shinrinhen oyo (Quantification methods applied to forest science). *Suuryoukagaku* 204:40–44. (In Japanese)
- Takahashi, M., K. Hirai, P. Limtong, C. Leungvutivirong, S.Panuthai, S.Suksawang, S.Anusontpornperm and D. Marod. 2011. Topographic variation in heterotrophic soil respiration in a tropical seasonal forest in Thailand. *Soil Sci. Plant Nut.* 57: 452–465.
- Tanaka, N., T.Hamazaki, T.Vacharangkura. 1998. Distribution, growth and site requirements of teak. *Japan agricultural research quarterly (JARQ)* 32: 65–77.
- Tanaka, Y. 1979. Review of the methods of quantification. *Environmental Health Perspectives* 32:113–123.
- Taweek, S., & Thammapala, P. (2005). *Expert classification technique for mapping teak plantation areas in Thailand*. Available Source: http://info.asprs.org/publications/proceedings/pecora16/Taweek_s.pdf, November 5, 2015.
- Teraoka, Y., T.Masutani, and M.Imada. 1991. Estimating Site Index of Sugi and Hinoki from Topographical Factors on Maps for Forest Management. *Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ* 45, 125–133. (in Japanese)
- Thaiutsa, B., L. Puangchit, C. Yarwudhi, C. Wacharinrat and S. Kobayashi. 1999. Coppicing ability of Teak (*Tectona grandis*) after thinning. In Kobayashi, S., Turnbull, J.W., Toma, T., Mori, T., Majid, N.M.N.A. (Eds) *Proceedings of the workshop on the rehabilitation of degraded tropical forest ecosystem, Bogor, Indonesia*. Pp. 149–156.

- Ragland, J.L., and L. Boopuckdee. 1988. Fertilizer Responses in Northeast Thailand: Nutrient and pH Buffering Capacities. *Thai Journal of Soil and Fertilizer* 10: 134–147.
- UNFCCC. 2008. Report of the Conference of the Parties on its thirteenth session, held in Bali from 3 to 15 December 2007. Addendum, Part 2. Document FCCC/CP/2007/6/Add.1. UNFCCC, Bonn
- Vacharangkura, T. 2012. Variable density yield model for teak plantations. *In: Noda I, Vacharangkura T, Himmaman W (eds.) Approach to Sustainable Forestry of Indigenous Tree Species in Northeast Thailand. (JIRCAS Working Report No.74), JIRCAS, Tsukuba, Japan, pp. 33–40.*
- Verhaegen, D., I.J. Fofana, Z.A. Logossa and D. Ofori D. 2010. What is the genetic origin of teak (*Tectona grandis* L.) introduced in Africa and Indonesia? *Tree Genet Genom* 6: 717–733.
- Vijarnsorn, P, and C. Jongpakdee. 1979. General soil map of Thailand. Land Development Department, ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand.
- Wanneng, P.X., B. Ozarska and M.S. Daian. 2014. Physical properties of *Tectona grandis* grown in Laos. *J. Trop. For. Sci.* 26: 389–396.
- Watanabe, Y., T. Masunaga, E. Owusu–Sekyere, M.M. Buri, O.I. Oladele and T. Wakatsuki. 2009. Evaluation of growth and carbon storage as influenced by soil chemical properties and moisture on teak (*Tectona grandis*) in Ashanti region, Ghana. *J. Food Agric. Environ.* 7: 640–645.
- Wongwiwatchai, C. and K. Paisanchoen. 2002. Soil and Nutrient Management of Some Major Field Crops in the Korat Basin of Northeast Thailand. *Natural Resource Management Issues in the Korat Basin of Northeast Thailand* 127–136.
- Bermejo, I., Cañellas, I., & Miguel, A. S. (2004). Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 189 (1–3), 97–110.
<http://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.031>

- Boonkird, S. A., Fernandes, E. C. M., & Nair, P. K. R. (1985). Forest villages: an agroforestry approach to rehabilitating forest land degraded by shifting cultivation in Thailand. *Agroforestry Systems*, 2(2), 87–102.
- Foody, G. M., Boyd, D. S., & Cutler, M. E. J. (2003). Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 85(4), 463–474. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00039-7](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00039-7)
- Giachetti, A. (2000). Matching techniques to compute image motion. *Image and Vision Computing*, 18 (3), 247–260.
- Hall, R. J., Skakun, R. S., Arsenault, E. J., & Case, B. S. (2006). Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management*, 225 (1–3), 378–390. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.014>
- Kajisa, T., Murakami, T., Mizoue, N., Kitahara, F., & Yoshida, S. (2008). Estimation of stand volumes using the k-nearest neighbors method in Kyushu, Japan. *Journal of Forest Research*, 13(4), 249–254. <http://doi.org/10.1007/s10310-008-0077-5>
- Kanninen, M., Pérez, D., Montero, M., & Viquez, E. (2004). Intensity and timing of the first thinning of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica: results of a thinning trial. *Forest Ecology and Management*, 203 (1–3), 89–99. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.054>
- Kaosa-ard, A. (1981). Teak (*Tectona grandis* Linn. f): its natural distribution and related factors. *Nat. His. Bulletin Siam. Soc*, 29, 55–74.
- Ke, Y., & Quackenbush, L. J. (2011). A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (17), 4725–4747. <http://doi.org/10.1080/01431161.2010.494184>
- Larsen, M., & Rudemo, M. (1998). Optimizing templates for finding trees in aerial photographs. *Pattern Recognition Letters*, 19 (12), 1153–1162.

- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (7), 1297–1328.
<http://doi.org/10.1080/01431160500486732>
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, 198 (1–3), 149–167.
<http://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.048>
- Mäkelä, H., & Pekkari, A. (2004). Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. *Forest Ecology and Management*, 196 (2–3), 245–255. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.049>
- Noda, I., & Himmaman, W. (2014). Effects of Silvicultural Alternatives on Model-Based Financial Evaluation of Teak (<i>Tectona grandis</i> L.) Farm Forestry Management for Small-Scale Farmers in Northeast Thailand. *Open Journal of Forestry*, 04 (05), 558–569.
<http://doi.org/10.4236/ojf.2014.45060>
- Palanisamy, K., Hegde, M., & Yi, J.-S. (2009). Teak (*Tectona grandis* Linn. f.): A Renowned Commercial Timber Species. *Journal of Forest Science*, 25 (1), 1–24.
- Pandey, D., Brown, C., & others. (2000). Teak: a global overview. *UNASYLVA-FAO*, 3–13.
- Pérez, D., & Kanninen, M. (2005). Effect of thinning on stem form and wood characteristics of teak (*Tectona grandis*) in a humid tropical site in Costa Rica. *Silva Fennica*, 39(2), 217–225.
- Powell, S. L., Cohen, W. B., Healey, S. P., Kennedy, R. E., Moisen, G. G., Pierce, K. B., & Ohmann, J. L. (2010). Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 114(5), 1053–1068.
<http://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.018>

- Ripple, W. J., Wang, S., Isaacson, D. L., & Paine, D. P. (1991). A preliminary comparison of Landsat Thematic Mapper and SPOT-I HRV multispectral data for estimating coniferous forest volume. *International Journal of Remote Sensing*, 12(9), 1971–1977. <http://doi.org/10.1080/01431169108955230>
- Sharp, A., & Nakagoshi, N. (2006). Rehabilitation of degraded forests in Thailand: policy and practice. *Landscape and Ecological Engineering*, 2(2), 139–146. <http://doi.org/10.1007/s11355-006-0009-5>
- Steininger, M. K. (2000). Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), 1139–1157.
- Taweessuk, S., & Thammapala, P. (2005). *Expert classification technique for mapping teak plantation areas in Thailand*. Retrieved from http://info.asprs.org/publications/proceedings/pecora16/Taweessuk_s.pdf
- Yu, X., J. Hyypä, A. Kukko, M. Maltamo and H. Kaartinen. 2006. Change detection techniques for canopy height growth measurements using airborne laser scanner data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72 (12), 1339–1348.
- Zheng, G., J.M. Chen, Q.J. Tian, W.M. Ju, and X.Q. Xia. 2007. Combining remote sensing imagery and forest age inventory for biomass mapping, *Journal of Environmental Management* 85:616–623.
- Zhou, Z., K. Liang, D.Xu, Y.Zhang, G.Huang, and H.Ma. 2012. Effects of calcium, boron and nitrogen fertilization on the growth of teak (*Tectona grandis*) seedlings and chemical property of acidic soil substrate. *New Forests* 43: 231–243. doi:10.1007/s11056-011-9276-6
- Ziegler, A.D., J. Phelps, J.Q. Yuen, E.L. Webb, D. Lawrence, J.M. Fox, T.B. Bruun, S.J. Leisz, C.M. Ryan, W. Dressler, O. Mertz, U. Pascual, C. Padoch, and L.P. Koh. 2012. Carbon outcomes of major land-cover transitions in SE Asia: great uncertainties and REDD+ policy implications. *Global Change Biol.* 18: 3087–3099.

ภาพประกอบ

การพัฒนาเทคนิคในการประเมินผลผลิตของพื้นที่สวนป่าสัก
จากปัจจัยสิ่งแวดล้อมด้านพื้นที่



การพัฒนาเทคนิคในการติดตามและประเมินปริมาณไม้ของสวนป่าไม้สัก
ในพื้นที่ขนาดใหญ่โดยการสำรวจระยะไกล



การศึกษาบทบาทการเก็บกักคาร์บอนของสวนป่าไม้สัก



การเก็บข้อมูลมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน



การเก็บข้อมูลมวลชีวภาพใต้ดิน