

การทดลองประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของ
ต้นแสมทะเลเบื้องต้นด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน
Preliminary Experiment on Above-Ground Biomass
Estimation of *Avicennia marina* Using Terrestrial Laser
Scanning Technique

ธนีสร์ อินทรรัตน์* และชัยโชค ไวกาษา

ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Thanisorn Intarat* and Chaichoke Vaiphasa

Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Phayathai Road, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330

บทคัดย่อ

ป่าชายเลนเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนที่สำคัญและมีประสิทธิภาพมากกว่าป่าบกประเภทอื่น การประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ใช้ประมาณปริมาณคาร์บอน สำหรับพื้นที่อนุรักษ์ โดยเฉพาะพื้นที่ป่าชายเลน จำเป็นต้องใช้วิธีการที่ไม่ต้องตัดต้นไม้ในพื้นที่ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) มาทดลองประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (AGB) เบื้องต้น โดยสุ่มเลือกต้นแสมทะเล [*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.] ซึ่งเป็นพันธุ์ไม้ที่โดดเด่นในพื้นที่ศึกษาจำนวน 4 ต้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) 18.81, 26.57, 20.24 และ 14.03 เซนติเมตร ตามลำดับ วิธีการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเริ่มจากการหาปริมาตรของลำต้นที่ได้จากเครื่อง TLS แล้วนำไปคูณกับความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ ค่าที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากสมการอัลโลเมตรี การประมาณค่าพบว่ามวลชีวภาพของต้นแสมทะเลตัวอย่างมีค่า 108.58 ± 14.34 , 336.78 ± 44.28 , 160.65 ± 21.32 และ 42.46 ± 5.79 กิโลกรัมต่อต้น ตามลำดับ ต้นแสมทะเลตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกมากกว่า 20 เซนติเมตร ให้ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเลที่นำมาเปรียบเทียบ โดยมีความแตกต่างอยู่ร้อยละ 8 ผลการประมาณมีแนวโน้มแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากเครื่อง TLS สามารถนำมาใช้ประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยไม่ต้องตัดต้นไม้ได้

คำสำคัญ : เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน; มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน; ต้นแสมทะเล

Abstract

Mangrove acts as an important carbon sequestration and effectively yields greater amount of carbon in comparison to other terrestrial forests. Above-ground biomass (AGB) estimation is an index

to estimate the above-ground carbon content. In protected areas, especially mangrove forest reserves, it requires non-destructive AGB estimation methods. This study introduces a terrestrial laser scanning techniques (TLS) to preliminary estimate the AGB of *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. Four samples were selected by random sampling method with diameter at breast height (DBH) 18.81, 26.57, 20.24, and 14.03 centimeters, respectively. The TLS was used to collect the volume of the tree stems that was next multiplied by a wood specific density value (WSD) to retrieve the estimated AGB. Then, the estimated AGB values were compared with the results derived from referenced allometric equations. The TLS estimation revealed 108.58 ± 14.34 , 336.78 ± 44.28 , 160.65 ± 21.32 , and 42.46 ± 5.79 kilograms/tree, respectively. It was found that the TLS estimation of samples containing DBH ≥ 20 centimeters agreed with the results generated from the reference allometric equations which revealed 8 % difference. Thus, this can be concluded that the TLS method has a tendency to be an effective non-destructive mean for estimating the AGB.

Keywords: terrestrial laser scanner; above-ground biomass; *Avicennia marina*

1. ความสำคัญของปัญหา

ป่าชายเลนมีความสำคัญต่อพื้นที่ชายฝั่งทะเล ให้คุณประโยชน์แก่มนุษย์หลายด้าน เช่น การเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญบริเวณชายฝั่ง เป็นเขตเพาะเลี้ยงอนุบาลสัตว์น้ำ ช่วงปรับสมดุลชายฝั่งระหว่างพื้นดินกับพื้นน้ำ เป็นแหล่งทรัพยากรไม้เพื่อประโยชน์ด้านการดำรงชีวิต และเป็นพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อเศรษฐกิจ (Hirata *et al.*, 2014; Jachowski *et al.*, 2013) ความสำคัญอีกประเภทหนึ่งของป่าชายเลน คือ การเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนที่สำคัญ และสามารถกักเก็บปริมาณคาร์บอนได้มากกว่าป่าประเภทอื่น โดยมีค่าปริมาณการกักเก็บมากกว่า 1 ตันต่อเฮกแตร์ ขณะที่ป่าประเภทอื่นสามารถเก็บกักปริมาณคาร์บอนได้ต่ำกว่า 400 กิโลกรัมต่อเฮกแตร์ (Donato *et al.*, 2011) ต้นไม้จะดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศมาเก็บไว้ตามส่วนประกอบต่าง ๆ ของต้นไม้ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Vashum, 2012) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากปริมาณของมวลชีวภาพของต้นไม้แต่ละต้น การมีข้อมูลดังกล่าว ช่วยให้สามารถวางแผนบริหารจัดการพื้นที่

อนุรักษ์ในด้านของการควบคุม และเพิ่มปริมาณของต้นไม้ในแต่ละปี ในงานวิจัยที่ผ่านมา การตรวจวัดมวลชีวภาพต้นไม้โดยทั่วไปนิยมใช้อยู่ 2 วิธี วิธีการแรกเป็นการเก็บตัวอย่างในพื้นที่ศึกษาเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ (destructive sampling) ซึ่งจำเป็นต้องตัดส่วนประกอบของต้นไม้ ได้แก่ ใบ กิ่ง ลำต้น ราก และดิน (Njana, *et al.*, 2016) ซึ่งไม่เหมาะสมกับพื้นที่อนุรักษ์ เช่น พื้นที่ป่าชายเลน วิธีการที่สองเป็นการตรวจวัดมวลชีวภาพโดยไม่ตัดต้นไม้ (non-destructive sampling) ใช้วิธีการหาความสัมพันธ์ของมวลชีวภาพกับส่วนประกอบของต้นไม้ พารามิเตอร์ที่นิยมใช้ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (diameter at breast height, DBH) และความสูงของต้นไม้ (Komiyama, *et al.*, 2005; Kenzo *et al.*, 2009; Vashum, 2012; Chave *et al.*, 2014; Ostadhashemi, *et al.*, 2014) วิธีดังกล่าว จะใช้การวัดค่าพารามิเตอร์ แล้วนำมาคำนวณทางสถิติเพื่อสร้างสมการอัลโลเมตรีแสดงความสัมพันธ์ และใช้เป็นตัวแทนในการคำนวณมวลชีวภาพ

อย่างไรก็ตามวิธีการประมาณมวลชีวภาพทั้ง

สองวิธีนี้ใช้กำลังคนและเวลาในการเก็บข้อมูลค่อนข้างมาก รวมถึงการสิ้นเปลืองงบประมาณที่ใช้ในการสำรวจเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ โดยเฉพาะพื้นที่ป่าชายเลนที่เข้าถึงเป้าหมายได้อย่างยากลำบาก จึงได้มีการนำเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงมาประยุกต์เพื่อทำนายมวลชีวภาพ เช่น การศึกษาของ Chan และคณะ (2013) และ Pham และ Yoshino (2017) ที่ได้ใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมมาสร้างตัวแปรด้วยค่าการสะท้อนแสง (reflectance) จากเรือนยอดของต้นไม้ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม และสมการอัลโลเมตรี ในส่วนการใช้ข้อมูลพารามิเตอร์เพื่อนำมาคำนวณสร้างสมการอัลโลเมตรี จำเป็นต้องเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของต้นไม้ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน หรือ Terrestrial laser scanner (TLS) (Feliciano *et al.*, 2014; Calders *et al.*, 2015; Hackenberg *et al.*, 2015; Olagoke *et al.*, 2016; Olschofsky *et al.*, 2016) เป็นอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูล โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นจุดพิคกสามมิติ (point cloud) จากนั้นวัดค่าพารามิเตอร์จากจุดพิคกสามมิติ เพื่อคำนวณหาปริมาตรของต้นไม้ และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณร่วมกับพารามิเตอร์อื่น ๆ เพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ และประสบผลสำเร็จเป็นอย่างดี แสดงให้เห็นว่า TLS เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้การเก็บข้อมูลของต้นไม้มีประสิทธิภาพ แต่จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยในประเทศ ยังไม่พบการนำเครื่อง TLS มาใช้เก็บข้อมูลต้นไม้ป่าชายเลน ดังนั้นการทดลองนำเครื่อง TLS มาใช้ในการเก็บข้อมูลต้นไม้ป่าชายเลน เป็นการช่วยยืนยันถึงประสิทธิภาพ และเพิ่มความเชื่อมั่นของเครื่องมือในการทำงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองนำเครื่อง TLS มาใช้เก็บข้อมูลต้นแสมทะเล [*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.] (Am) โดยเก็บข้อมูลจุด

พิคกสามมิติของลำต้นแสมทะเลแบบรายต้น (individual tree modelling) ด้วยเครื่อง TLS และประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินเบื้องต้นของต้นแสมทะเล โดยแบ่งลำต้นของต้นไม้ออกเป็นท่อนตรง (stem segmentation) และนำมาคำนวณปริมาตรของลำต้น (stem) ร่วมกับค่าความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ (wood specific density, WSD) ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้หลังจากประมาณการแพร่ความคลาดเคลื่อน (uncertainty propagation) จะนำไปเปรียบเทียบกับค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่คำนวณจากสมการอัลโลเมตรีสำหรับต้นแสมทะเลของ Comley และ McGuinness (2005) และสมการอัลโลเมตรีต้นไม้ป่าชายเลนทั่วไปของ Komiyama และคณะ (2005) ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ถูกคาดหวังว่าจะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเก็บข้อมูลภาคสนามเพื่อใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพของต้นไม้ป่าชายเลนร่วมกับสมการอัลโลเมตรีของต้นแสมทะเลในพื้นที่ศึกษา และอาจใช้ประยุกต์เพื่อประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในเขตพื้นที่ป่าอนุรักษ์ทุกประเภทต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

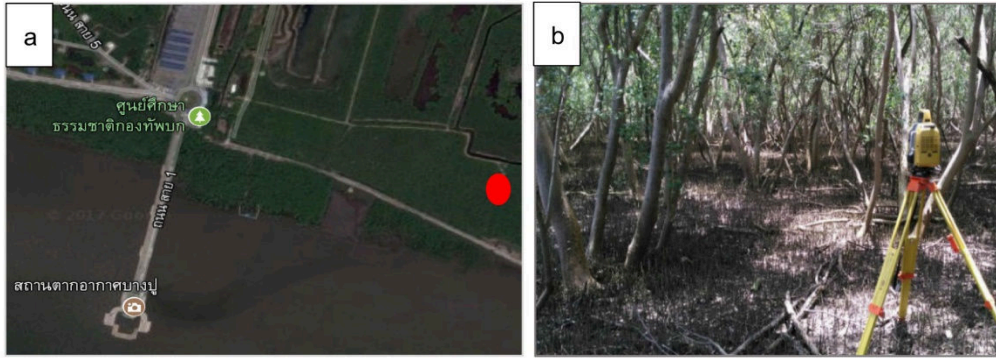
2. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ที่ศูนย์ศึกษาธรรมชาติกองทัพบก (บางปู) เฉลิมพระเกียรติ 72 พรรษามหาราชินี ตำบลบางปู อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ บริเวณโดยรอบเป็นชุมชนเมือง และเขตอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 1a มีต้นแสมทะเลเป็นพันธุ์ไม้ป่าชายเลนที่โดดเด่นในพื้นที่ นอกจากนี้ยังพบต้นโกงกางใบเล็ก (*Rhizophora apiculate* Blume) โกงกางใบใหญ่ (*Rhizophora mucronata* Poir) และต้นแสมขาว (*Avicennia alba* Blume) อยู่โดยรอบ

การเดินทางเข้าถึงจุดสแกนตัวอย่างค่อนข้างลำบากเนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นดินเลน และต้นแสมทะเลเจริญเติบโตขึ้นเป็นกลุ่มอย่างหนาแน่น

จำเป็นต้องเลือกตัวอย่างต้นแสมทะเลที่อยู่ติดกับคันดินที่ทอดขนานไปกับลำคลองที่ขุดขึ้น นอกจากนี้ยังต้องคำนวณวันที่เข้าไปเก็บข้อมูลให้สอดคล้องกับระดับน้ำขึ้นน้ำลง เพื่อให้พื้นที่ตั้งเครื่อง TLS มีความ

ความแห้ง สามารถลงไปสแกนตัวอย่างได้ (รูปที่ 1b) งานวิจัยนี้ ได้เก็บข้อมูลภาคสนามในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560 ช่วงเวลา 09:00-15:00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่สามารถเข้าถึงพื้นที่ศึกษาได้อย่างสะดวก



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาริเวณศูนย์ศึกษารวมชาติกองทัพบก บางปู จุดสีแดงในภาพคือบริเวณที่ทดลองสแกนตัวอย่างต้นไม้เพื่อคำนวณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (ภาพจาก Google map) (a) และสภาพพื้นที่ศึกษาที่เป็นดินเลน และมีต้นแสมทะเลขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น (b)

ตารางที่ 1 สมบัติของเครื่อง TLS Topcon รุ่น GLS 2000

สมบัติ	รายละเอียด
คลาสเลเซอร์	3R (ปลอดภัยต่อดวงตา)
ขอบเขตการมองเห็น (FOV)	แนวนอน (360°) แนวตั้ง (270°)
ระยะการเก็บข้อมูล	210 เมตร
ความละเอียดการสแกน	ขนาดจุด (4 มิลลิเมตร) ระยะห่างจุด (3.1 มิลลิเมตร)
อัตราการสแกน	120,000 จุดต่อวินาที
น้ำหนัก	10 กิโลกรัม
ช่วงคลื่น	Near Infrared (1,064 มิลลิเมตร)
อุปกรณ์พิเศษ	กล้องถ่ายภาพในตัว หน้าจอสัมผัส

3. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

อุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูลเป็นเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินที่ท็อปคอน รุ่น จีแอลเอส 2000 (Topcon GLS2000) ได้รับความอนุเคราะห์จาก

บริษัท ทีโอปคอนอินสตรูเมนต์ (ไทยแลนด์) มีรายละเอียดเชิงเทคนิคดังแสดงในตารางที่ 1 ผ่านสมบัติขั้นพื้นฐานของอุปกรณ์ตามที่ Maas และคณะ (2008) ได้กำหนดไว้

ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติที่ได้จากการสแกนนำมาประมวลผลเพื่อสร้างเป็นจุดพิกัดสามมิติพหุ

(multiple point cloud) ด้วยซอฟต์แวร์สแกน มาสเตอร์ (scan master software) ที่มาพร้อมกับ เครื่อง TLS การรวมข้อมูลให้เป็นจุดพิกัดสามมิติ เชิงเดี่ยว (single point cloud) และวัดค่าพารามิเตอร์ ของต้นไม้จากจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยวด้วย ซอฟต์แวร์รหัสเปิดคลาวด์คอมแพร์ (cloud compare software) ซึ่งดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ <http://www.danielgm.net/cc> ในการคำนวณผลทางสถิติของ ค่าพารามิเตอร์ที่วัดจะใช้ซอฟต์แวร์เปิดจีโอเอ็นยู- ออกเทฟ (GNU Octave) ดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ <https://www.gnu.org/software/octave>

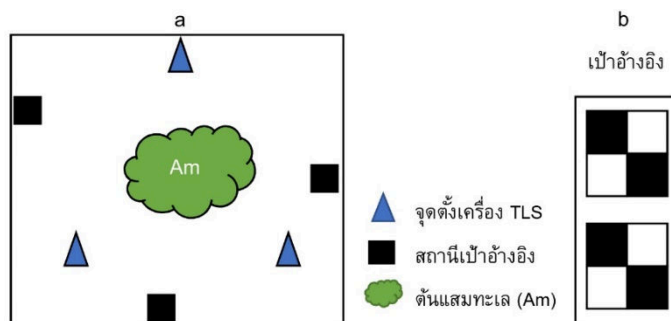
4. การเก็บข้อมูลต้นแสมทะเลด้วยเครื่อง TLS

พื้นที่ศึกษาเป็นป่าชายเลน ได้รับอิทธิพล จากน้ำขึ้นน้ำลง พื้นดินเลนส่วนใหญ่จึงมีความนุ่ม ส่งผลให้มีความยากลำบากในการตั้งเครื่อง TLS จากข้อจำกัดดังกล่าว ได้เจาะจงกำหนดพื้นที่เก็บ ข้อมูลต้นแสมทะเลตัวอย่างที่สามารถเข้าถึงได้ พื้นดินเลนมีความแน่น และแข็งแรงสำหรับการตั้ง เครื่อง TLS ต้นแสมทะเลในพื้นที่เก็บข้อมูลมีจำนวน 20 ต้น ที่มีลักษณะทางกายภาพของลำต้นใกล้เคียง กัน ด้วยข้อจำกัดทางด้านงบประมาณ ได้เลือกกลุ่ม ตัวอย่างเบื้องต้นแบบสุ่ม (random sampling) มา จำนวน 4 ต้น โดยให้ชื่อแทนต้นแสมทะเลตัวอย่าง

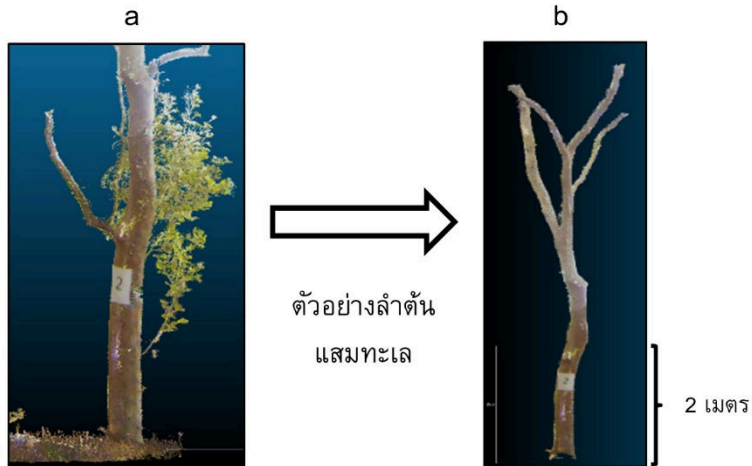
ได้แก่ Am-01, Am-02, Am-03 และ Am-04 ตาม ลำดับ คิดเป็นร้อยละ 20 ของต้นแสมทะเลในพื้นที่ เก็บข้อมูล จากนั้นสแกนเก็บข้อมูลต้นไม้ทีละต้น โดยกำหนดสถานีตั้งเครื่อง TLS เพื่อบันทึกข้อมูล จุดพิกัดสามมิติจำนวน 3 จุด ให้อยู่ตรงข้ามกัน และสามารถเห็นเป้าอ้างอิง (tile point) ได้เหมือนกันทั้งสองจุดที่ตั้งเครื่อง TLS (รูปที่ 2) สแกนข้อมูลจุด พิกัดสามมิติจุดละ 1 ครั้ง โดยในแต่ละคู่ภาพต้อง สามารถบันทึกเป้าอ้างอิงได้ไม่ต่ำกว่า 4 เป้า แล้ว วัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (diameter at breast height, DBH) ของกลุ่มตัวอย่าง ต้นแสมทะเลที่ได้จากการสุ่ม

นำจุดพิกัดสามมิติที่ได้จากการบันทึกมาต่อ รวมกันด้วยการกำหนดพิกัด (register) ให้เป็นจุด พิกัดสามมิติเชิงเดี่ยวโดยใช้ค่าจากเป้าอ้างอิง กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.08 เมตร (Feliciano *et al.*, 2014) ดังรูปที่ 3a ตัดจุดพิกัดสาม มิติที่ไม่ใช่ลำต้นออกจากข้อมูลให้เหลือเพียงลำต้น ของต้นแสมทะเล (รูปที่ 3b)

แบ่งตัดลำต้นของต้นแสมทะเลออกเป็นท่อน โดยพิจารณาจากความตรงของลำต้น ถ้าหากลำต้น มีความโค้งตามธรรมชาติ ให้ตัดขอยออกให้แต่ละ ท่อนมีลำต้นตรงมากที่สุด และนำเข้าสู่กระบวนการ วัดค่าพารามิเตอร์เพื่อคำนวณหาปริมาตรของลำต้น แสมทะเลแต่ละท่อน



รูปที่ 2 การตั้งเครื่อง TLS เพื่อเก็บข้อมูล จุดพิกัดสามมิติ (a) และสถานีเป้าอ้างอิง (มีจำนวน 2 เป้า ต่อหนึ่ง สถานี) (b)



รูปที่ 3 ข้อมูลที่ได้จากการกำหนดพิกัด (register) ภาพเป็นจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว (a) และตัวอย่างลำต้น แซมทะเลหลังจากการตัดข้อมูลจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยวให้เหลือเพียงแค่ส่วนลำต้น (b)

5. การคำนวณปริมาตรของลำต้นและการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

วัดค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านบนของท่อนไม้ตัวอย่าง (D_T) เส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างของท่อนไม้ตัวอย่าง (D_B) และความสูงของท่อนไม้ตัวอย่าง (h) ก่อนนำมาคำนวณปริมาตรของลำต้นด้วยสมการสมาลีเยน (Smalian's formula) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$V = \frac{(A_T + A_B)}{2} \times h = \frac{(\frac{\pi D_T^2}{4} + \frac{\pi D_B^2}{4})}{2} \times h \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของท่อนไม้ตัวอย่าง A_T และ A_B คือ พื้นที่หน้าตัดของส่วนบนและส่วนล่างของท่อนไม้ตัวอย่าง ใช้ซอฟต์แวร์คลาวด์คอมพิวเตอร์ในการประมาณค่าการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูง วัดค่าพารามิเตอร์แต่ละค่าจำนวน 5 ครั้ง เพื่อหาความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative error) ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณการแพร่ความคลาดเคลื่อนรวมปริมาตรทั้งหมดจะได้ปริมาตรโดยรวมของลำต้นแซมทะเล

ประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยการนำปริมาตรของลำต้นที่ได้จากการคำนวณมาคูณกับ

ค่าประมาณความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ (wood specific density, WSD) จาก Njana และคณะ (2016) ที่มีค่า 0.60 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อย่างไรก็ตาม เครื่อง TLS ยังมีข้อจำกัดในการวัดเรือนยอด (canopy measurement) ที่ยังมีความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากความสูงของต้นแซมทะเลที่มีความสูงมากกว่าองศาของการสแกน (มากกว่า 67.50° วัดจากแนวราบที่ระดับเครื่อง TLS ขึ้นไปยังยอดไม้) และระยะเส้นสายตา (line-of-sight) ระหว่างเครื่อง TLS กับกิ่งก้านของเรือนยอดที่ถูกบดบังจากพุ่มไม้ การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของเรือนยอดนั้น สามารถแก้ไขด้วยการประมาณค่าช่วงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของเรือนยอดที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 30 ของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยรวม (Komiyama *et al.*, 2008; Feliciano *et al.*, 2014) ดังนั้นการปรับแก้ค่าประมาณเรือนยอด (canopy correction) จะประมาณค่าที่ร้อยละ 20 ± 10 ของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินลำต้นที่ได้จากเครื่อง TLS โดยคูณค่า 1.25 เข้าไปในผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่อง TLS

6. การประมาณการแพร่ความคลาดเคลื่อน

การทำงานในสนามและประมาณค่าของแต่ละพารามิเตอร์ ได้แก่ การคำนวณปริมาตรของลำต้น การคำนวณความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ และการปรับแก้ค่าประมาณเรือนยอด จะมีความคลาดเคลื่อนรวมอยู่ ส่วนความคลาดเคลื่อนของการวัดจากเครื่อง TLS จะไม่นำมาคิดรวมเนื่องจากความคลาดเคลื่อนที่ได้มีค่าต่ำมาก โดยเครื่อง TLS ถูกตั้งค่าความห่างระหว่างจุด point cloud ที่ 3.10 มิลลิเมตร ต่อ 10 เมตร ให้ผลความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าร้อยละ 0.03

ความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงซ้ำกันค่าละ 5 ครั้ง ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5 ได้ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่างร้อยละ 0.13 ถึง 4.68 (ค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 1.66) และความคลาดเคลื่อนของความสูงอยู่ระหว่างร้อยละ 0.11 ถึง 2.59 (ค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0.69) ความคลาดเคลื่อนของความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้มีค่าร้อยละ 8.33 (Njana *et al.*, 2016) และการปรับแก้ค่าประมาณเรือนยอดมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 10.00 (Feliciano *et al.*, 2014)

การประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม (AGB_{Total}) สามารถทำได้โดยการคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของลำต้นรวมกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของเรือนยอดตั้งสมการที่ 2

$AGB_{Total} = AGB_{Stem} + AGB_{Canopy}$ (2)
เมื่อ AGB_{Stem} คือ มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของลำต้นที่ได้จากการคำนวณปริมาตรร่วมกับความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ และ AGB_{Canopy} คือ มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของเรือนยอดที่ได้จากการปรับแก้

ดังนั้นการประมาณการแพร่ความคลาดเคลื่อนสามารถทำได้โดยการแพร่ความคลาดเคลื่อน

ของพารามิเตอร์ที่วัดเข้าไปในมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากการคำนวณ โดยความคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินลำต้น (δAGB_{Stem}) สามารถหาได้จากสมการที่ 3 และความคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม (δAGB_{Total}) สามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$\frac{\delta AGB_{Stem}}{|AGB_{Stem}|} = \sqrt{2 \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\delta WSD}{WSD}\right)^2} \quad (3)$$

$$\delta AGB_{Total} = \sqrt{(\delta AGB_{Stem})^2 + (\delta AGB_{Canopy})^2} \quad (4)$$

เมื่อ $\frac{\delta D}{D}$, $\frac{\delta H}{H}$, $\frac{\delta WSD}{WSD}$ แทนความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง และความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ และ δAGB_{Canopy} คือ ความคลาดเคลื่อนของการปรับแก้เรือนยอด

7. ผลการทดลอง

7.1 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม และค่าความคลาดเคลื่อนรวม

ต้นผสมทะเลตัวอย่างทั้ง 4 ต้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางความสูงเพียงอก 18.81, 26.57, 20.24 และ 14.03 เซนติเมตร ตามลำดับ ได้แสดงผลที่ได้จากการคำนวณปริมาตร มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน และมวลชีวภาพจากการค่าปรับแก้เรือนยอดจำนวน 4 ตัวอย่างในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของลำต้นที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามปริมาตรของลำต้น โดย Am-01 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินลำต้น 86.87 ± 7.47 กิโลกรัมต่อต้น Am-02 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินลำต้น 269.43 ± 23.17 กิโลกรัมต่อต้น Am-03 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินลำต้น 128.59 ± 11.18 กิโลกรัมต่อต้น และ Am-04 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินลำต้น 33.97 ± 3.16 กิโลกรัมต่อต้น ค่ามวลชีวภาพที่ได้จากค่าการปรับแก้เรือนยอดของแต่ละต้นมีค่า 21.72 ± 2.17 , 67.36 ± 6.74 , 32.13 ± 1.12 และ 8.49 ± 0.85 กิโลกรัมต่อต้นตามลำดับ

ตารางที่ 2 ปริมาตรและมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลต้นแสมทะเล จำนวน 4 ตัวอย่าง

ตัวอย่างต้นแสมทะเล	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพของลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพของเรือนยอด (กิโลกรัม)
Am-01	0.14	86.87±7.47	21.72±2.17
Am-02	0.53	269.43±23.17	67.36±6.74
Am-03	0.21	128.59±11.18	32.13±1.12
Am-04	0.06	33.97±3.16	8.49±0.85

ความคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม (สมการที่ 4) ได้จากการคำนวณการแพร่ความคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินลำต้น (สมการที่ 3) และเรือนยอด (Njana *et al.*,

2016) แสดงในตารางที่ 3 การแพร่ความคลาดเคลื่อนส่งผลให้ได้ความคลาดเคลื่อนรวมต้นแสมตัวอย่างแต่ละต้นมีค่าร้อยละ 13.21, 13.15, 13.27 และ 13.64 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 การแพร่ความคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (แสดงค่าเป็นร้อยละ)

ตัวอย่างต้นแสมทะเล	ค่าคลาดเคลื่อนเส้นผ่านศูนย์กลาง	ค่าคลาดเคลื่อนค่าความสูง	ค่าคลาดเคลื่อนความกว้างจำเพาะ	การแพร่ค่าคลาดเคลื่อนของลำต้น	ค่าปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเรือนยอด	ความคลาดเคลื่อนรวมของมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน
Am-01	0.63	1.55	8.33	8.64	10.00	13.21
Am-02	0.66	1.60	8.33	8.54	10.00	13.15
Am-03	0.63	1.76	8.33	8.72	10.00	13.27
Am-04	0.71	2.83	8.33	9.27	10.00	13.64

ตารางที่ 4 มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากเครื่อง TLS เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการอัลโลเมตรี (กิโลกรัมต่อต้น)

ตัวอย่างต้นแสมทะเล	เส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากเครื่อง TLS	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเล (Comley and McGuinness, 2005)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นไม้ป่าชายเลนทั่วไป (Komiyama <i>et al.</i> , 2005)
Am-01	18.81	108.58±14.34	150.41	205.37
Am-02	26.57	336.78±44.28	311.85	480.56
Am-03	20.24	160.65±21.32	175.59	254.19
Am-04	14.03	42.46±5.79	81.07	103.24

หลังจากการปรับแก้ค่าการแพร่ความคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยรวมแล้ว การประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวมของต้นแสมทะเลตัวอย่างทั้ง 4 ต้น มีค่า 108.58 ± 14.34 , 336.78 ± 44.28 , 160.65 ± 21.32 และ 42.4 ± 5.79 กิโลกรัมต่อต้น ตามลำดับ

7.2 ผลการเปรียบเทียบมวลชีวภาพกับสมการอัลโลเมตรี

โดยสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเล (AGB_{Am}) ของ Comley และ McGuinness (2005) และสมการอัลโลเมตรีต้นไม้ป่าชายเลนทั่วไป (AGB_{Common}) ของ Komiyama และคณะ (2005) เป็นสมการอัลโลเมตรีที่ใช้สำหรับประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเล และต้นไม้ป่าชายเลนหลายชนิดที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง นอกจากนี้สมการอัลโลเมตรีดังกล่าวได้สร้างจากการเก็บข้อมูลต้นไม้ป่าชายเลนในพื้นที่เขตร้อน รวมถึงในประเทศไทย จึงได้นำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากเครื่อง TLS ในสมการที่ 5 และสมการที่ 6 ตามลำดับ ผลที่ได้จากการใช้สมการอัลโลเมตรีเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่อง TLS แสดงในตารางที่ 4

$$AGB_{Am} = 0.308 \times D^{2.11} \quad (5)$$

$$AGB_{Common} = 0.251 \times \rho \times D^{2.46} \quad (6)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นแสมทะเล และ ρ คือ ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ จากตารางที่ 4 มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลตัวอย่างทั้ง 4 ต้น ที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเลของ Comley และ McGuinness (2005) มีค่า 150.41, 311.85, 175.59 และ 81.07 กิโลกรัมต่อต้นตามลำดับ และมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นไม้ป่าชายเลนทั่วไปของ Komiyama และคณะ (2005) มีค่า 205.37, 480.56, 254.19 และ 103.24 กิโลกรัมต่อต้น ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผล

การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากการทดลอง พบว่า มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลตัวอย่างที่ Am-02 และ Am-03 มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเล (ค่าในวงเล็บ) โดยมีค่า 336.78 ± 44.28 (311.85) และ 160.65 ± 21.32 (175.59) กิโลกรัมต่อต้น ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนรวม เมื่อพิจารณาความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นแสมทะเลตัวอย่าง พบว่ามีค่ามากกว่า 20 เซนติเมตร โดยมีค่า 26.57 และ 20.24 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนต้นแสมทะเลตัวอย่างที่ Am-01 และ Am-04 มีค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเล (ค่าในวงเล็บ) โดยมีค่า 108.58 ± 14.34 (150.41) และ 42.46 ± 5.79 (81.27) กิโลกรัมต่อต้นต่ำกว่าค่าที่ได้จากสมการ 41.83 และ 38.61 กิโลกรัมต่อต้น ตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบผลการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีป่าชายเลนทั่วไป พบว่าผลที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีป่าชายเลนทั่วไปอยู่ 96.79, 143.78, 93.54 และ 60.78 กิโลกรัมต่อต้น ตามลำดับ ซึ่งค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ต่างกันนั้น มีค่ามากกว่าช่วงความคลาดเคลื่อนรวมของต้นแสมทะเลทุกตัวอย่าง

8. อภิปรายและสรุปผล

ผลการทดลองที่ได้ พบว่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลตัวอย่างที่ Am-02 และ Am-03 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเล (Comley and McGuinness, 2005) ซึ่งสมการดังกล่าวเป็นสมการที่สร้างขึ้นเฉพาะสำหรับการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเล อย่างไรก็ตาม ต้นแสมทะเล

ตัวอย่างที่ Am-01 และ Am-04 มีค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่คลาดเคลื่อนจากค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเล เมื่อพิจารณาถึงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกพบว่าสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเลที่ใช้ตัวอย่างต้นแสมทะเลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกมากกว่า 20 เซนติเมตร ในการสร้างสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเลเป็นจำนวนร้อยละ 72.88 ของตัวอย่างทั้งหมด ดังนั้น ค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากการเก็บข้อมูลต้นแสมทะเลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกมากกว่า 20 เซนติเมตร ขึ้นไป มีแนวโน้มจะมีค่าใกล้เคียงกับค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเล ซึ่งตัวอย่างต้นแสมทะเลที่ Am-02 และ Am-03 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก 26.57 และ 20.24 เซนติเมตร ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจึงมีค่าใกล้เคียงกับสมการดังกล่าว ในขณะที่ตัวอย่างต้นแสมทะเลที่ Am-01 และ Am-04 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก 18.81 และ 14.03 เซนติเมตร ส่งผลให้มีค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่คลาดเคลื่อนจากสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเล

เมื่อนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับสมการอัลโลเมตรีต้นไม้ป่าชายเลนทั่วไป (Komiyama *et al.*, 2005) พบว่าค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลตัวอย่างทุกต้นมีความคลาดเคลื่อนจากค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นไม้ป่าชายเลนทั่วไปค่อนข้างมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากสมการดังกล่าวเป็นสมการอัลโลเมตรีสำหรับการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ป่าชายเลนหลายชนิด ได้แก่ ต้นโกงกางใบเล็ก โกงกางใบใหญ่ แสมขาว เป็นต้น นอกจากนี้ตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการ (รวมทุกสายพันธุ์ที่เก็บตัวอย่างในประเทศไทย) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกระหว่าง 5.00 ถึง 48.90 เซนติ

เมตร เมื่อพิจารณาเฉพาะสายพันธุ์ที่ใกล้เคียงกับต้นแสมทะเล พบว่าในการสร้างสมการดังกล่าวได้ใช้ต้นแสมขาวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกระหว่าง 5.00 ถึง 14.10 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าที่แตกต่างจากเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นแสมทะเลตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ (ค่าอยู่ระหว่าง 14.03 ถึง 26.57 เซนติเมตร) ผลการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากการทดลองจึงมีค่าคลาดเคลื่อนกับผลที่ได้จากสมการอัลโลเมตรีต้นไม้ป่าชายเลนทั่วไป

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่อง TLS สามารถนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลต้นแสมทะเล เพื่อนำค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลไปใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยไม่ต้องตัดต้นไม้ จากการทดลองพบว่าต้นแสมทะเลตัวอย่างทั้ง 4 ต้น มีค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม 108.58 ± 14.34 , 336.78 ± 44.28 , 160.65 ± 21.32 และ 42.46 ± 5.79 กิโลกรัมต่อต้น ตามลำดับ โดยมีค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินใกล้เคียงกับสมการอัลโลเมตรีต้นแสมทะเลของ Comley and McGuinness (2005) สำหรับต้นแสมทะเลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกมากกว่า 20 เซนติเมตรขึ้นไป

9. ข้อเสนอแนะ

9.1 การเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้จากเครื่อง TLS กับสมการอัลโลเมตรี ควรเพิ่มสมการที่สร้างจากตัวอย่างต้นแสมทะเลที่มีช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียง และครอบคลุมตัวอย่างต้นแสมทะเลที่ใช้ในการทดลอง

9.2 การสร้างสมการอัลโลเมตรีของต้นแสมทะเลโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง TLS ควรเก็บข้อมูลจากต้นแสมทะเลตัวอย่างเพิ่มเติม โดยควรมีไม่ต่ำกว่า 5 ต้น (Feliciano *et al.*, 2014) เพื่อให้สมการอัลโลเมตรีมีค่าความถูกต้อง และมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริง

10. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก บริษัท ทีโอพีคอนอินสทรูเมนต์ (ไทยแลนด์) ทีโอพีคอนเคราะห้เครื่อง TLS ในการเก็บข้อมูลต้นแสมทะเล

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มูลนิธิสิ่งแวดล้อมศึกษา เพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน (ประเทศไทย) โดยคุณ สมปอง นาหอม และคณะ ที่ให้ความอนุเคราะห์ และอำนวยความสะดวกด้านพื้นที่ศึกษาที่ศูนย์ ศึกษารธรรมชาติกองทัพบก (บางปู) เฉลิมพระเกียรติ 72 พรรษา มหาราชินี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณวัชรโรตม์ พันโยธา และ คุณสุภาวดี เทียนปฐุ นิสิตปริญญาโท ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยในเรื่องการสำรวจและการ วิเคราะห์ข้อมูลต้นแสมทะเล

11. รายการอ้างอิง

Calders, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raunonen, P., Herold, M. and Kaasalainen, M., 2015, Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, *Meth. Ecol. Evol.* 6: 198-208.

Chan, N., Takeda, S., Suzuki, R. and Yamamoto, S., 2013, Establishment of allometric models and estimation of biomass recovery of swidden cultivation fallows in mixed deciduous forests of the Bago Mountains, Myanmar, *Forest Ecol. Manag.* 304: 427-436.

Chave, J., Rejou-Mechain, M., Burquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B. and Vieilledent, G., 2014, Improved allometric models to estimate the

aboveground biomass of tropical trees, *Global Change Biol.* 20: 3177-3190.

Comley, B.W.T. and McGuinness, K.A., 2005, Above- and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves. *Aust. J. Bot.* 53: 431-436.

Donato, D.C., Kauffman, J.B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M. and Kanninen, M., 2011, Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics, *Nat. Geosci.* 4: 293-297.

Feliciano, E.A., Wdowinski, S. and Potts, M.D., 2014, Assessing mangrove above-ground biomass and structure using terrestrial laser scanning: A case study in the Everglades National Park, *Wetlands* 34: 955-968.

Hackenberg, J., Wassenberg, M., Spiecker, H. and Sun, D.J., 2015, Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density, *Forests* 6: 1274-1300.

Hirata, Y., Tabuchi, R., Patanaponpaiboon, P., Pongpan, S., Yoneda, R. and Fujioka, Y., 2014, Estimation of aboveground biomass in mangrove forests using high-resolution satellite data, *J. Forest Res.* 19: 34-41.

Jachowski, N.R.A., Quak, M.S.Y., Friess, D.A., Duangnamon, D., Webb, E.L. and Ziegler, A.D., 2013, Mangrove biomass estimation in Southwest Thailand using machine learning, *Appl. Geograp.* 45, 311-321.

Kenzo, T., Ichie, T., Hattori, D., Itioka, T., Handa, C., Ohkubo, T. and Ninomiya, I., 2009,

- 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.
- Komiyama, A., Ong, J.E. and Pongparn, S., 2008, Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review, *Aquat. Bot.* 89: 128-137.
- Komiyama, A., Pongparn, S. and Kato, S., 2005, Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves, *J. Trop. Ecol.* 21: 471-477.
- Maas, H.G., Bienert, A., Scheller, S. and Keane, E., 2008, Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data, *Int. J. Remote Sensing* 29: 1579-1593.
- Njana, M.A., Meilby, H., Eid, T., Zahabu, E. and Malimbwi, R.E., 2016, Importance of tree basic density in biomass estimation and associated uncertainties: a case of three mangrove species in Tanzania, *Ann. Forest Sci.* 73: 1073-1087.
- Olagoke, A., Proisy, C., Feret, J.B., Blanchard, E., Fromard, F., Mehlig, U. and Berger, U., 2016, Extended biomass allometric equations for large mangrove trees from terrestrial LiDAR data, *Trees-Struct. Funct.* 30: 935-947.
- Olschofsky, K., Mues, V., and Kohl, M., 2016, Operational assessment of aboveground tree volume and biomass by terrestrial laser scanning, *Comput. Elect. Agric.* 127: 699-707.
- Ostadhashemi, R., Shahraji, T.R., Roehle, H. and Limaie, S.M., 2014, Estimation of biomass and carbon storage of tree plantations in northern Iran, *J. Forest Sci.* 60: 363-371.
- Pham, T.D. and Yoshino, K., 2017, Aboveground biomass estimation of mangrove species using ALOS-2 PALSAR imagery in Hai Phong City, Vietnam, *J. Appl. Remote Sensing* 11(2): 026010.
- T. Vashum, K., 2012, Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests: A review, *J. Ecosyst. Ecogr.* 2(4): 1000116.