

การประมาณค่ามวลชีวภาพต้นเสมททะเลด้วยเทคนิคสแกนพื้นผิวเลเซอร์ภาคพื้นดิน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Estimating Above Ground Biomass of *Avicennia marina* using TLS Surface  
Reconstruction Techniques



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy in Geomatic Engineering

Department of Survey Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณค่ามวลชีวภาพต้นแสมทะเลด้วยเทคนิคสแกน พื้นผิวเลเซอร์ภาคพื้นดิน
โดย	น.ส.สุกัญญา เชยโพธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระพงศ์ เกิดสิน)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา)	
.....	กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญาตา)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ เหมือนพงษ์)	

สุกัญญา เขยโพธิ์ : การประมาณค่ามวลชีวภาพต้นแสมทะเลด้วยเทคนิคสแกนพื้นผิวเลเซอร์ภาคพื้นดิน. ( Estimating Above Ground Biomass of Avicennia marina using TLS Surface Reconstruction Techniques) อ.ที่  
 ปรึกษาหลัก : อ. ดร.ชัยโชค ไวกาษา

มวลชีวภาพเหนือพื้นดินเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ป่า การประมาณค่ามวลชีวภาพด้วยวิธีการดั้งเดิมนั้นมีความถูกต้องแม่นยำไม่มากนักจำเป็นต้องตัดต้นไม้เพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพให้มีความแม่นยำที่ดีขึ้น แต่ในทางปฏิบัติทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินที่ให้ข้อมูลพอยท์คลาวด์ความละเอียดสูงเพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพโดยไม่ตัดต้นไม้จึงถูกนำมาทดสอบในการศึกษานี้ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกตั้งใจทำเพื่อทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือเริ่มจากทดสอบการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ทดสอบจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับมวลชีวภาพจากการตัดต้นไม้โดยรวบรวมข้อมูลพอยท์คลาวด์จากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินในแปลงทดสอบ (สวนยูคาลิปตัส) และใช้วิธีการสร้างพื้นผิวใหม่สามวิธีคือ วิธี Quantitative structure models (QSM) , วิธี Poisson surface reconstruction (PSR) และวิธี Screen Poisson surface reconstruction (SPSR) สร้างแบบจำลองเชิงปริมาตรของต้นไม้ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับค่ามวลชีวภาพอ้างอิงที่ได้จากวิธีการแทนที่น้ำ วิธี SPSR ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุด มีค่า RMSE เท่ากับ 0.64 กิโลกรัม (ร้อยละ 7.02) ในขณะที่วิธี PSR มีค่า RMSE เท่ากับ 0.76 กิโลกรัม (ร้อยละ 8.41) วิธี QSM มีผลลัพธ์ที่แม่นยำต่ำที่สุด โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 1.36 กิโลกรัม (ร้อยละ 14.25) จากผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่ามวลชีวภาพจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินมีค่าต่ำกว่ามวลชีวภาพอ้างอิงไม่เกินร้อยละ 15 และเป็นครั้งแรกในการทดสอบวิธี SPSR กับตัวอย่างต้นไม้จริง

ส่วนที่สองเป็นการนำเครื่องมือไปทดสอบกับสถานการณ์จริงเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของค่ามวลชีวภาพต้นไม้ป่าชายเลนจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับค่ามวลชีวภาพจากสมการอัลโลเมตริก โดยนำเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินเก็บข้อมูลต้นแสมทะเลในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ซึ่งไม่สามารถตัดต้นไม้เพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพอ้างอิงได้ ดังนั้นจึงเลือกสมการอัลโลเมตริกที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 5 สมการเพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพอ้างอิงของต้นแสมทะเล ผลการศึกษาพบว่ามวลชีวภาพจาก TLS ทั้งสามวิธีมีค่าคลาดเคลื่อนสูงเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับสมการป่าชายเลนทั่วไป มีค่าเฉลี่ยของ RMSE เท่ากับ 69.22 กิโลกรัม ในขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับสมการที่สร้างจากข้อมูลของต้นแสมทะเลเช่นเดียวกับพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ มีค่าเฉลี่ยของ RMSE เท่ากับ 43.98 กิโลกรัม ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความชัดเจนของส่วนบนต้นไม้ไม่มีค่าต่ำ ผู้วิจัยขอเสนอการเพิ่มความสูงของตำแหน่งตั้งเครื่อง TLS และเป้าอ้างอิงจะช่วยให้การเก็บข้อมูลส่วนบนมีรายละเอียดที่ชัดเจนขึ้น ส่งผลให้การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธีการสร้างพื้นผิวใหม่มีความถูกต้องสูงขึ้นตามไปด้วย ผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าค่ามวลชีวภาพจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถสร้างแบบจำลองเชิงปริมาตรเพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพของต้นไม้ในแปลงปลูกขยายผลไปสู่พื้นที่อนุรักษ์ด้วยวิธีที่ไม่ตัดทำลายต้นไม้และมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

สาขาวิชา            วิศวกรรมสำรวจ  
 ปีการศึกษา        2564

ลายมือชื่อนิสิต .....  
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6171463321 : MAJOR GEOMATIC ENGINEERING

KEYWORD: Biomass, Eucalyptus, Avicennia marina

Sukunya Choeipo : Estimating Above Ground Biomass of Avicennia marina using TLS Surface Reconstruction Techniques. Advisor: CHAICHOKE VAIPHASA, Ph.D.

Above ground biomass is needed for assessing forest carbon storage. Traditional allometric approaches generally gain moderate accuracies and require destructive sampling that is sometimes impractical. As an alternative to the traditional approaches, terrestrial laser scanners (TLS) gather accurate data without destroying the tree samples. Thanks to precision and speed of the TLS instrument that provide sufficient details of three dimensional point cloud. This study was divided in two parts. The first part was to preliminary test the capability of the methodology under a relatively controlled conditions. The TLS point data were collected from a test plot (a eucalyptus plantation), and three surface reconstruction algorithms, Quantitative structure models (QSM), Poisson surface reconstruction (PSR), and Screen Poisson surface reconstruction (SPSR) respectively, were applied to build volumetric models of sample trees. It is notable that this is the first study to test the SPSR method on real tree samples. The results were then compared with the reference values measured by a water replacement method. The SPSR approach yielded the most accurate results (RMSE 0.64 kg. or 7.02%). While the PSR method gained an RMSE of 0.76 kg. (8.41%). The QSM method had the worst results with an RMSE of 1.36 kg. (14.25%).

The second part of the study was to apply the proposed methodology to a real world scenario. The TLS instrument was used for collecting the data from an *Avicennia marina* mangrove conservation area. Since destructive sampling was not allowed in the study area, the results of the TLS method were compared to five published allometric models without cutting any tree sample. The comparison showed that the above-ground biomass calculated from the three reconstruction approaches was rather different from the generic mangrove model. The mean RMSE was as large as 69.22 kg. The situation was improved when comparing the results with a species specific model, the *Avicennia marina* mangrove model. The mean RMSE was changed to 43.98 kg. The cause of the errors was mainly the occlusion at the upper section of the tree. It is suggested that the problem can be solved by increasing the height of the reference targets. The outcome of this work confirms the potential of the TLS instrument for AGB estimation in both natural and man-made scenarios.

Field of Study: Geomatic Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ ความรู้  
ประสบการณ์และมุมมองแนวคิดด้านงานวิจัย ซึ่งมีคุณค่าต่อผู้วิจัย อย่างมาก

ขอบพระคุณ พ่อ แม่ และทุกคนในครอบครัวที่คอยสนับสนุนในทุกๆด้านด้วยดีตลอดมา

ขอบพระคุณ ผศ.ดร.วีระพงศ์ เกิดสิน ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
ศ. ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ผศ.ดร.ธีทัต เจริญกมลัญญาตา กรรมการสอบ และ ผศ. ดร. พรเทพ  
เหมือนพงษ์ กรรมการภายนอก มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ พร้อมทั้งแนวคิดที่ทำให้วิทยานิพนธ์  
ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ ที่ให้ความรู้อันมีคุณค่า

ขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนค่าเล่าเรียน บริษัทที่อปคอนอินสทรูเมนต์ (ไทย  
แลนด์) ที่ให้การสนับสนุน เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินและการประมวลผลข้อมูล ศูนย์ศึกษา  
ธรรมชาติกองทัพบก (บางปู) เฉลิมพระเกียรติ 72 พรรษา ที่อนุญาตใช้ พื้นที่ศึกษา

ขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง Ph.D. Survivor และชาววิศวกรรมสำรวจ จุฬาฯ ทุกท่านที่เป็นกำลังใจ  
และ เกื้อกูลกันในทุกด้าน

สุกัญญา เชยโพธิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	18
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	19
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	19
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	20
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.1 การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน.....	21
2.1.1 มวลชีวภาพ.....	21
2.1.2 การประมาณค่ามวลชีวภาพของต้นไม้.....	22
2.1.3 การวัดโครงสร้างทางกายภาพของต้นไม้.....	23
2.2 การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน.....	25
2.2.1 การสร้างพื้นผิวใหม่จากพอยท์คลาวด์.....	27

2.2.2	พื้นผิวแบบ Explicit และ Implicit.....	27
2.2.3	พื้นผิวจากการ Interpolated และการ Approximated .....	28
2.2.4	พื้นผิวแบบ Anisotropic และ Isotropic .....	28
2.2.5	การสร้างพื้นผิวใหม่จากวิธี Poisson .....	29
2.2.6	การสร้างพื้นผิวใหม่จากวิธี Screen Poisson (Screen Poisson surface reconstruction, SPSR).....	37
2.2.7	การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากค่าปริมาตรของลำต้น .....	42
2.2.8	การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี Qualitative surface model (QSM).....	42
2.3	การหาปริมาตรวัตถุด้วยการแทนที่น้ำ (Water replacement) .....	50
2.4	การวัดค่าคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ .....	54
2.4.1	การแพร่ของค่าคลาดเคลื่อน .....	54
2.4.2	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ .....	55
2.4.3	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อน .....	56
บทที่ 3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	57
3.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน.....	57
3.1.1	วิธี Qualitative surface model (QSM) .....	57
3.1.2	วิธี Poisson surface reconstruction (PSR) .....	58
3.1.3	วิธี Screen Poisson surface reconstruction (SPSR).....	58
3.1.4	วิธีสมการอัลโลเมตริก .....	59
3.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการหาปริมาตรด้วยการแทนที่น้ำ .....	62
บทที่ 4	วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	64
4.1	พื้นที่ศึกษา .....	64
4.2	การเก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ( Terrestrial laser scan , TLS ) .....	66



4.2.1	พื้นที่ทดสอบ.....	67
4.2.2	พื้นที่ป่าชายเลนเขตร้อน .....	72
4.3	การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน .....	77
4.3.1	วิธี Qualitative surface model (QSM) .....	77
4.3.2	วิธี Poisson surface reconstruction (PSR) .....	81
4.3.3	วิธี Screen Poisson surface reconstruction (SPSR).....	83
4.3.4	วิธีแบบจำลองอัลโลเมตริก.....	84
4.4	การตรวจสอบความถูกต้องผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน.....	85
4.4.1	การประมาณค่าคลาดเคลื่อน.....	85
4.4.2	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ .....	86
4.4.3	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อน .....	88
บทที่ 5	ผลการดำเนินงานวิจัย.....	89
5.1	ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ .....	89
5.1.1	ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิง .....	89
5.1.2	ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Qualitative surface model (QSM).....	92
5.1.3	ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Poisson surface reconstruction (PSR) .....	95
5.1.4	ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Screen Poisson surface reconstruction (SPSR).....	98
5.1.5	ผลการตรวจสอบความถูกต้องจากการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ .....	101
5.2	ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อน .....	105
5.2.1	ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงโดยใช้แบบจำลองอัลโลเมตริก ....	105

5.2.2 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Qualitative surface model (QSM)..... 108

5.2.3 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Poisson surface reconstruction (PSR) ..... 111

5.2.4 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Screen Poisson surface reconstruction (SPSR)..... 113

5.2.5 ผลการตรวจสอบความถูกต้องจากการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อน..... 116

บทที่ 6 สรุปผล อภิปรายและข้อเสนอแนะ..... 121

6.1 สรุปผล อภิปรายและข้อเสนอแนะงานวิจัยสำหรับผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ ..... 121

6.2 สรุปผล อภิปรายและข้อเสนอแนะงานวิจัยสำหรับผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อน ..... 123

ภาคผนวก..... 127

บรรณานุกรม..... 135

ประวัติผู้เขียน..... 145

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน Topcon รุ่น GLS 2000 .....	66
ตารางที่ 5.1 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธีแทนที่น้ำ .....	90
ตารางที่ 5.2 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี QSM.....	93
ตารางที่ 5.3 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี PSR.....	96
ตารางที่ 5.4 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี SPSR .....	99
ตารางที่ 5.5 แสดงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงและมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสคำนวณด้วยวิธี QSM ,PSR และSPSR.....	102
ตารางที่ 5.6 แสดงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวมของต้นผสมทะเลจากแบบจำลองอ้างอิงทั้ง 5 สมการ .....	106
ตารางที่ 5.7 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นผสมทะเลจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี QSM .....	109
ตารางที่ 5.8 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นผสมทะเลจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี PSR.....	112
ตารางที่ 5.9 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นผสมทะเลจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี SPSR.....	114
ตารางที่ 5.10 การเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ประมาณค่าจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิง .....	117

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 แสดงตำแหน่งการวัดความ DBH ที่ระดับต่าง ๆ ของต้นไม้ที่มีลักษณะพิเศษ และพื้นที่ที่มีความลาดชัน.....	24
ภาพที่ 2.2 แสดง พอยท์คลาวด์ที่นำเข้า (จุดสีดำ) และการกำหนดระดับความลึกของ Octree .....	31
ภาพที่ 2.3 แสดงผลการคำนวณ Vector field จากพอยท์คลาวด์ .....	32
ภาพที่ 2.4 แสดงผลการคำนวณโดยใช้ฟังก์ชัน Indicator (คำนวณ Divergence).....	32
ภาพที่ 2.5 แสดงผลการคำนวณจากสมการ Poisson .....	33
ภาพที่ 2.6 แสดงผลการแยกพื้นผิวแบบ Iso-surface .....	33
ภาพที่ 2.7 แสดงการแบ่ง เซลล์ ส่วนย่อย ๆ แบบสามมิติ ด้วยวิธีการเดียวกัน ในระดับที่ต่างกัน ...	35
ภาพที่ 2.8 แสดงการแบ่งเซลล์ ส่วนย่อย ๆ ในแบบสองมิติ .....	35
ภาพที่ 2.9 แสดง Anisotropic ที่เป็นไปได้ (เซลล์ถูกแบ่งในทิศทางที่ต้องการเท่านั้น).....	36
ภาพที่ 2.10 แสดง โครงสร้างข้อมูลแบบต้นไม้ ( Tree data structure ) หรือ Octree .....	37
ภาพที่ 2.11 แสดงพื้นผิวใหม่ของรูปปั้นเดวิด (ส่วนหัว) เปรียบเทียบ (a) วิธี PSR ดั้งเดิม (b) วิธี SPSR และ (c) ภาพตัดขวางเปรียบเทียบการสร้างพื้นผิวบริเวณดวงตา.....	40
ภาพที่ 2.12 แสดงค่าคลาดเคลื่อนในการสร้างพื้นผิวใหม่ของแบบจำลอง Anchor ด้วยวิธี PSR , Wavelet และ SPSR .....	41
ภาพที่ 2.13 แสดงหลักการคำนวณจุดเริ่มต้น.....	43
ภาพที่ 2.14 แสดงการเกิดช่องว่างระหว่างเซกเมนต์.....	45
ภาพที่ 2.15 แสดงการเติมช่องว่างระหว่างเซกเมนต์ ในลักษณะ Parent และส่วนขยาย (Extension) .....	47
ภาพที่ 2.16 แสดงการเติมช่องว่างระหว่าง เซกเมนต์ ในลักษณะ Parent – Child.....	48
ภาพที่ 2.17 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของวัตถุเมื่อ (a) ชั่งวัตถุในอากาศ และ (b) ชั่งวัตถุในน้ำ50	
ภาพที่ 2.18 แรงดันเนื่องจากของเหลวที่กระทำต่อวัตถุ.....	51

ภาพที่ 2.19 แสดงแรงพุงตัวของวัตถุ.....	52
ภาพที่ 2.20 แสดงวัตถุลอย (บางส่วนของวัตถุจมในของเหลว).....	53
ภาพที่ 2.21 แสดงวัตถุลอยปริ่มของเหลว หรือ วัตถุลอยในของเหลว.....	54
ภาพที่ 4.1 แสดงแผนภูมิการเก็บข้อมูลภาคสนาม.....	64
ภาพที่ 4.2 แสดงพื้นที่ทดสอบและพื้นที่ป่าชายเลนเขตร้อน.....	65
ภาพที่ 4.3 แสดงการใช้รหัสสำหรับต้นยูคาลิปตัสจากแปลงทดสอบ.....	67
ภาพที่ 4.4 แสดงจุดตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินและเป้าอ้างอิงในแปลงทดสอบ (ยูคาลิปตัส) .....	68
ภาพที่ 4.5 แสดงตำแหน่งตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ตำแหน่งที่ 1 ถึง 4 เพื่อเก็บรายละเอียด ต้นไม้ในแปลงทดสอบ.....	69
ภาพที่ 4.6 แสดงพอยท์คลาวด์จากตำแหน่งตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ตำแหน่งที่ 1 ถึง 4	70
ภาพที่ 4.7 แสดงผลการแปลงพอยท์คลาวด์เป็นจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว.....	71
ภาพที่ 4.8 (a) จุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยวถูกแยกข้อมูลออกเป็นแต่ละกอ (b) ลบจุดพิกัดสามมิติส่วนที่ ไม่ใช่ลำต้นของต้นไม้ตัวอย่างออก (c) ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติที่พร้อมนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ขั้น ต่อไป.....	72
ภาพที่ 4.9 (a) พื้นที่เก็บข้อมูลต้นไม้ตัวอย่างตั้งอยู่บริเวณฝั่งคลองตรงข้ามสะพานแขวน (b) พื้นที่ ศึกษาเป็นบริเวณที่ต้นเสมททะเลขึ้นเจริญเติบโตรวมกันเป็นกลุ่มและมีสภาพดินแห้ง สามารถเข้าพื้นที่ เก็บข้อมูลได้.....	73
ภาพที่ 4.10 การตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน เพื่อเก็บข้อมูล พอยท์คลาวด์ต้องให้สามารถเก็บ ข้อมูลเป้าอ้างอิงได้ 2 สถานีเป็นอย่างน้อยต่อการสแกน 1 ครั้ง สถานีเป้าอ้างอิง มีจำนวน 2 เป้า ต่อหนึ่งสถานี.....	74
ภาพที่ 4.11 (a) ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติของตัวอย่าง AM05 ที่ได้จากสถานีเครื่องสแกนเลเซอร์ ภาคพื้นดิน 1 และ (b) สถานีเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน 2.....	75
ภาพที่ 4.12 (a) การนำจุดพิกัดสามมิติ 2 ชุด ประมวลผลเพื่อรวมข้อมูล (b) ผลจากการแปลงข้อมูล เป็นจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว.....	76

ภาพที่ 4.13 (a , b) จุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยวถูกลบข้อมูลที่ไม่ว่าจำเป็นต่อการประมวลผล (c) ลบจุดพิกัดสามมิติออกจนเหลือแต่ลำต้นของต้นไม้ตัวอย่าง พร้อมนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ขั้นต่อไป ที่มา กฤษณาน,2561 .....	77
ภาพที่ 4.14 (a) แสดงพอยท์คลาวด์ส่วนลำต้นและ (b) แสดงเซกเมนต์ย่อย .....	78
ภาพที่ 4.15 (a , b) แสดงค่าเฉลี่ยของพอยท์คลาวด์ตามแนวยาวและแนวขวาง.....	78
ภาพที่ 4.16 (a) แสดงค่าเฉลี่ยของพอยท์คลาวด์ส่วนบน (b) แสดงค่าเฉลี่ยของ พอยท์คลาวด์ส่วนล่าง (c) แสดงเส้นเชื่อมต่อจุดค่าเฉลี่ยของส่วนล่างและกลาง (d) เส้นเชื่อมต่อจุดค่าเฉลี่ยของส่วนล่าง กลางและบน (e) แสดงรัศมีและความสูงของเซกเมนต์ย่อย.....	79
ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟวิเคราะห์ความเร็วของลำต้น.....	80
ภาพที่ 4.18 แสดงความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของเซกเมนต์ย่อย .....	80
ภาพที่ 4.19 แสดงการปรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด .....	81
ภาพที่ 4.20 แสดงขั้นตอนพื้นฐานในอัลกอริทึมการสร้างพื้นผิวใหม่แบบ Poisson.....	82
ภาพที่ 4.21 แสดง (a) พอยท์คลาวด์ของต้นไม้ทดสอบ (b) พื้นผิวใหม่จากวิธี Poisson .....	82
ภาพที่ 4.22 (a) พอยท์คลาวด์ต้นไม้ทดสอบ (b) พื้นผิวใหม่ของต้นไม้ทดสอบจากวิธี Screen Poisson.....	83
ภาพที่ 4.23 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงออกจาก พอยท์คลาวด์สามมิติ .....	84
ภาพที่ 4.24 (a) แสดงลำต้นไม้ทดสอบตัดเป็นท่อน ความยาวท่อนละ 0.80 เมตรและ (b) แสดงการชั่งน้ำหนักท่อนไม้ด้วยความละเอียด 0.01 กิโลกรัม .....	87
ภาพที่ 4.25 แสดงการนำท่อนไม้มาแทนที่น้ำในตู้ทดสอบ .....	87
ภาพที่ 5.1 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน วิธี QSM,PSR และ SPSR.....	104
ภาพที่ 5.2 แผนภูมิเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิง.....	119

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ระบบนิเวศชายฝั่งโดยเฉพาะป่าชายเลน เป็นระบบนิเวศที่สำคัญที่มีประโยชน์อย่างกว้างขวาง ในการกักเก็บคาร์บอนในบรรยากาศ (Lee and Kim, 2006) และสามารถกักเก็บปริมาณคาร์บอน ได้มากกว่าป่าประเภทอื่นโดยมีค่าปริมาณการกักเก็บมากกว่า 1,100 เมกกะกรัมต่อเฮกแตร์ (AM ha<sup>-1</sup>) ขณะที่ป่าประเภทอื่นสามารถเก็บกักปริมาณคาร์บอนได้น้อยกว่า 400 เมกกะกรัมต่อเฮกแตร์ (Adame et al., 2013; Donato et al., 2011) จากคุณสมบัติที่ดีของระบบนิเวศชายฝั่งนำไปสู่แนวคิดในการรวมระบบนิเวศชายฝั่งทะเลเข้าสู่บัญชีคาร์บอนของประเทศ ดังนั้นความแม่นยำเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งกับการประมาณมวลชีวภาพ (Biomass) สำหรับพื้นที่กักเก็บคาร์บอนเหนือพื้นดิน (Gibbs et al., 2007)

มวลชีวภาพคือส่วนของเนื้อเยื่อที่เกิดจากการสังเคราะห์แสงและมีหน้าที่ต่อการเจริญเติบโตของพืชหรือหมู่ไม้ในขณะใดขณะหนึ่งและนิยมวัดออกมาในรูปน้ำหนักแห้ง หรือน้ำหนักแห้งปราศจากน้ำ (Chapman, 1986) โดยมีค่าเป็นน้ำหนักต่อหน่วยของพืช เช่น กิโลกรัม/ต้น หรือต่อหน่วยพื้นที่ , กิโลกรัม/ไร่ หรือ ต้น/เฮกแตร์ การหาปริมาณโดยวิธีดั้งเดิมจำเป็นต้องตัดต้นไม้ส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินเป็นท่อนๆ นำไปอบแห้งเพื่อชั่งน้ำหนักแล้วจึงคำนวณความหนาแน่นจำเพาะของไม้แต่ละชนิด การคัดเลือกไม้ตัวอย่างใช้ต้นไม้จำนวนมากเพื่อให้ครอบคลุมขนาดช่วงความโตและชนิดของต้นไม้ในป่าแบบต่าง ๆ ซึ่งต้องใช้จำนวนคน เวลา อุปกรณ์และงบประมาณค่อนข้างสูง อีกทั้งถูกจำกัดพื้นที่ศึกษาเช่น เขตอุทยานแห่งชาติและเขตอนุรักษ์พันธุ์สัตว์ป่า ที่ไม่สามารถตัดต้นไม้ได้ ดังนั้นจึงมีความพยายามสร้างความสัมพันธ์อัลโลเมตริกของพืชพรรณเพื่อลดข้อจำกัดเหล่านี้

การประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในพื้นที่ป่าโดยใช้ความสัมพันธ์อัลโลเมตริก มาจากแนวคิดที่ว่า การเจริญเติบโตของอวัยวะส่วนใดส่วนหนึ่งของสิ่งมีชีวิตจะเป็นสัดส่วนกับอวัยวะอีกส่วนหนึ่ง (Huxley, 1925) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในด้านนิเวศวิทยาของป่าไม้ครั้งแรก โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพของใบต่อต้น (WL) กับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (Diameter at breast height ,DBH) (D) และค่าคงที่ของต้นไม้แต่ละสายพันธุ์ (a,b) (Satoo,

1965) ต่อมามีการพัฒนาสมการเพื่อหามวลชีวภาพของลำต้น กิ่ง ใบและรากของต้นไม้ (Y) กับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (D) และค่าคงที่ของต้นไม้แต่ละสายพันธุ์ (a,b) (Saito and Shidei, 1973) เป็นที่น่าสังเกตว่าตัวแปรอิสระที่ใช้มีเพียงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกเพียงค่าเดียว ซึ่งต่อมาพบว่าการใช้ความสูงทั้งหมดของต้นไม้ (h) เป็นตัวแปรอิสระร่วมกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกยกกำลังสอง ( $D^2$ ) ในรูปของปริมาตรพาราโบลิก คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกยกกำลังสองคูณความสูงทั้งหมดของต้นไม้ ( $h \cdot D^2$ ) การประมาณค่ามวลชีวภาพส่วนของลำต้น กิ่ง ใบ และรากมีความถูกต้องมากขึ้น อีกทั้งยังใช้ในการประมาณปริมาตรของต้นไม้ได้อีกด้วย ผลการพัฒนาสมการจากความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ถูกใช้มาจนถึงปัจจุบัน (Owers et al., 2018)

การวัดความเจริญเติบโตของต้นไม้ส่วนใหญ่จะวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกและความสูงของต้นไม้ ซึ่งการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกในป่าธรรมชาติ ถ้าเป็นพื้นที่ค่อนข้างเรียบหรือมีความลาดชันไม่มาก ต้นไม้มีลักษณะเป็นลำต้นเดี่ยว (Single stem) และไม่มีพุ่มพองจะทำการตรวจวัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกได้ง่าย แต่ในทางปฏิบัติไม่ได้เป็นเช่นนั้นเนื่องจากต้นไม้อาจมีลักษณะพิเศษที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการกำหนดการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกหรือที่ตำแหน่ง 1.30 เมตร จึงมีการปรับเปลี่ยนเพื่อให้เหมาะสมและเป็นมาตรฐานเดียวกัน การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกปกติจะใช้เทปวัดซึ่งค่าที่อ่านได้จะเป็นค่าเส้นรอบวงที่ความสูงเพียงอก (Girth at breast height, GBH) ถ้าต้นไม้มีขนาดเล็กจะใช้คาลิเปอร์ในการวัด (Liang et al., 2016) ความสูงของต้นไม้วัดจากพื้นดินจนถึงด้านบนของเรือนยอดโดยใช้คลินอมิเตอร์ (Clinometer) ในป่าไม้ผลัดใบการวัดความสูงจากพื้นดินผ่านทรงพุ่มหลายชั้นที่มีใบหนาแน่นทำให้การมองเห็นเรือนยอดหรือจุดสูงสุดของต้นไม้มีความไม่แน่นอน หากเป็นไปได้ควรวัดอย่างน้อยสามครั้งจากตำแหน่งการวัดที่แตกต่างกัน (Hopkinson et al., 2004)

ในพื้นที่ที่พืชพรรณอยู่รวมกันแบบหนาแน่นการเข้าถึงเพื่อวัดขนาดของลำต้นและความสูงทำได้ยาก จากความก้าวหน้าด้านการรับรู้จากระยะไกล เช่น เทคโนโลยีการสำรวจด้วยเลเซอร์หรือไลดาร์ (Light detection and ranging, LIDAR) ที่เริ่มใช้ตั้งแต่ช่วงกลางทศวรรษ 1980 การใช้งานของไลดาร์สำหรับการวัดพื้นที่ป่าด้วยการติดตั้งบนอากาศยาน ตัวอย่างเช่น การวิจัยโดยใช้ไลดาร์เพื่อการสำรวจชนิดป่า (Schreier et al., 1985) การประมาณปริมาตรไม้ที่ขายได้ (Maclean and Martin, 1984) การใช้ข้อมูลไลดาร์เพื่อการจำแนกลักษณะของทรงพุ่ม (Nelson et al., 1984) ผลลัพธ์แสดงในรูปแบบการจำแนกพื้นที่ของป่าไม้แต่ละชนิดเท่านั้น การประมาณความสูงของต้นไม้โดยใช้ไลดาร์



พบว่าไลดาร์ที่ติดตั้งบนอากาศยานมีแนวโน้มที่จะประมาณความสูงของต้นไม้ต่ำกว่าความสูงจริง (Lim et al., 2003) เนื่องจากเลเซอร์ทะลุผ่านทรงพุ่มของต้นไม้ลงสู่พื้นดินได้ยาก ข้อมูลบางส่วนขาดหายไป การประมาณความสูงโดยอัตโนมัติจึงเกิดความคลาดเคลื่อน

ทางเลือกที่เป็นไปได้สำหรับการประมาณขนาดของลำต้นและความสูงของต้นไม้คือการใช้ไลดาร์ที่ติดตั้งบนพื้นดิน (Terrestrial LIDAR) เพื่อช่วยประมาณค่าส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ การประมวลผลแบบอัตโนมัติเพื่อแยกต้นไม้ที่สนใจออกจากแปลงตัวอย่าง การคำนวณความสูงที่อยู่บนพื้นฐานการเชื่อมต่อเวกเตอร์ต่ำสุดและสูงสุดจากการสะท้อนของเลเซอร์จากต้นไม้แต่ละต้น แต่ยังคงพบข้อผิดพลาดจากระดับความเข้มของสัญญาณและสัญญาณรบกวนทำให้การระบุจุดต่ำสุด สูงสุดของต้นไม้มีความไม่แน่นอน ปริมาตรของต้นไม้ถูกคำนวณจากสมการอัลโลเมตริกโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกและความสูงที่วัดได้จากจุดพิกัด 3 มิติ (พอยท์คลาวด์) และใช้รูปทรงกระบอกที่ปรับให้พอดีกับจุดพิกัดสามมิติของเส้นรอบวงเพื่อสร้างแบบจำลองส่วนลำต้นของต้นไม้ที่ถูกแบ่งออกเป็นชิ้นๆ ที่ดำเนินการโดย (Hopkinson et al., 2004; Watt and Donoghue, 2005) นักวิจัยหลายท่านพยายามสร้างแบบจำลองดิจิทัลของความสูงของภูมิประเทศ (Digital terrain model, DTM) จากจุดพิกัด 3 มิติเพื่อใช้เป็นเส้นฐานสำหรับการกำหนดระยะ 1.30 เมตร จากโคนต้นไม้เพื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (Bienert et al., 2010; Brolly and Király, 2009; Tansey et al., 2009) การทดลองเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้สนโดยใช้ไลดาร์ภาคพื้นดินพบว่าข้อมูลความสูงจากไลดาร์และการวัดในพื้นที่จริงมีความใกล้เคียงกัน มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1 เซนติเมตร สำหรับการวัดจากโคนต้นถึงระดับความสูงเพียงอก ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 2 เซนติเมตร สำหรับการวัดจากระดับความสูงเพียงอกถึงเรือนยอดที่มีความสูงประมาณ 13 เมตร (Henning and Radtke, 2006; Maas et al., 2008) และการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกให้ค่า Root mean square error (RMSE) เท่ากับ 1.48 เซนติเมตร สำหรับการสแกนหลายครั้งและ 1.80 – 3.25 เซนติเมตร สำหรับการสแกนครั้งเดียว (Maas et al., 2008)

ด้วยเหตุนี้การใช้เทคนิคการสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial laser scan, TLS) ประยุกต์ใช้ในงานด้านป่าไม้เพิ่มมากขึ้นเพื่อช่วยกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญของต้นไม้ เช่น ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกเพื่อสร้างแบบจำลองการประมาณมวลชีวภาพของต้นไม้ด้วยวิธีที่ไม่ทำลาย (Holopainen et al., 2011; Intarat and Vaiphasa, 2020) การเก็บข้อมูลที่รวดเร็วมีความละเอียดสูงในรูปแบบจุดพิกัด 3 มิติ ที่สามารถเพิ่มหรือลดจำนวนจุดให้สอดคล้องกับ

ลักษณะของโครงสร้างพืชพรรณ ข้อมูลภาพของวัตถุถูกบันทึกเพื่อช่วยในการแสดงรูปร่างแบบ 3 มิติ ให้ผู้ใช้จำแนกข้อมูลได้ง่ายและคำนวณพารามิเตอร์สำหรับการสร้างแบบจำลองอัลโลเมตริกที่แม่นยำ และรวดเร็วมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม (Liang et al., 2016; Mengesha et al., 2015; Newnham et al., 2015; Olsoy et al., 2014)

การประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้จากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ใช้การสร้างแบบจำลองพื้นผิวใหม่ด้วยวิธีแบบจำลองโครงสร้างเชิงปริมาณ (Quantitative structure models ,QSM) วิธี QSM คำนวณปริมาตรจากการใช้รูปทรงกระบอกที่เป็นตัวแทนของลำต้น , กิ่ง ก้าน เปรียบเทียบกับมวลชีวภาพในสนามและมวลชีวภาพจากสมการอัลโลเมตริกที่ได้จากการตัดต้น ยูคาลิปตัสในป่าประเทศออสเตรเลียพบว่า มวลชีวภาพที่คำนวณจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ด้วยวิธี QSM มีค่าสูงกว่ามวลชีวภาพในสนามที่ร้อยละ 9.68 และร้อยละ 33.21 จากการคำนวณด้วยสมการอัลโลเมตริก (Calders et al., 2015) แบบจำลองการสร้างพื้นผิวใหม่จากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน สำหรับพืชพรรณได้รับการทดสอบเพื่อกำหนดรูปแบบที่ดีที่สุดสำหรับการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีโครงสร้างซับซ้อน การศึกษาก่อนหน้าใช้วิธี QSM หรือรูปทรงเรขาคณิตที่คล้ายกัน (Feliciano et al., 2014; Ishak et al., 2015) เพื่อจำลองชิ้นส่วนแต่ละชิ้นของต้นไม้อย่างเหมาะสม โดยคาดว่า การสร้างพื้นผิวใหม่แบบ Poisson (Poisson surface reconstruction , PSR) (Kazhdan et al., 2006) มีพื้นฐานการสร้างพื้นผิวใหม่ด้วยข่ายสามเหลี่ยมไม่สม่ำเสมอ (Triangulated irregular network, TIN) จากจุดพิกัด 3 มิติที่สามารถปรับให้ใกล้เคียงกับพื้นผิวจริงมากที่สุด (Buck et al., 2019) เพื่อคำนวณมวลชีวภาพได้แม่นยำมากกว่าวิธี QSM โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อโครงสร้างต้นไม้มีความซับซ้อน ผลลัพธ์จากการทดสอบพบว่า การประมาณมวลชีวภาพจากแบบจำลองพื้นผิวใหม่วิธี QSM และวิธี PSR มีค่าสูงกว่ามวลชีวภาพจากสมการอัลโลเมตริก เนื่องจากวิธี PSR ยังไม่สามารถสร้างข่ายสามเหลี่ยมในส่วนที่ไม่มีข้อมูลจุดพิกัด เช่น พื้นที่หลุมขนาดเล็ก ๆ ได้อย่างสมบูรณ์ ปริมาตรที่คำนวณได้จึงมีค่ามากกว่าปริมาตรจริง (Owers et al., 2018)

การนำคุณสมบัติที่ดีของฟังก์ชันอื่น ๆ ช่วยในการสร้างพื้นผิวใหม่บนพื้นฐานจากวิธี PSR เช่น การนำฟังก์ชัน Signed distance ( Signed distance function, SDF ) ปรับจุดพิกัดแบบ Unorganized เพื่อให้เรขาคณิตหรือทอพอโลยีขอบเขตของวัตถุมีตำแหน่งที่ถูกต้องยิ่งขึ้น (Hoppe et al., 1992) ฟังก์ชัน Radial Basis ( Radial Basis function, RBF ) เพื่อสร้างพื้นผิวใหม่จากจุดพิกัด 3 มิติแบบ nonuniform ที่เต็มไปด้วยหลุมเล็ก ๆ ให้พื้นผิวใหม่ที่เรียบและซ่อมแซมข่ายสามเหลี่ยมที่

ไม่สมบูรณ์ (Carr et al., 2001) ฟังก์ชัน Compact support radial basis (Compact support radial basis function, CSRBF) เพื่อจัดการความหลากหลายของความหนาแน่นของจุดในพื้นที่ที่มองไม่เห็นและถูกบดบัง โดยการกำหนดการวนซ้ำป้อนกลับ (Loop feedback) ตรวจสอบจากส่วนโค้งในพื้นที่เล็ก ๆ (Local curvature) เพื่อเปลี่ยนแบบจำลองพื้นผิวใหม่ ให้สามารถเติมหลุมได้ดีขึ้น และมีการจัดการหน่วยความจำ, การคำนวณที่เร็วขึ้น (Morel et al., 2018) การใช้ Neumann boundary conditions เพื่อปรับเรขาคณิตของจุดพิกัดที่มีความถี่ต่ำ มีสัญญาณรบกวนหรือพื้นที่ที่จุดพิกัดขาดหายไปโดยใช้การคำนวณแบบมัลติกริด เพื่อสร้างข่ายของพื้นผิวใหม่ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงพื้นผิวจริงมากขึ้น เรียกวิธีการสร้างพื้นผิวใหม่วิธีนี้ว่า Screen Poisson (Screen Poisson surface reconstruction, SPSR) ผลลัพธ์จากวิธีนี้ให้ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าวิธี Poisson ดั้งเดิม (Kazhdan et al., 2006) โดยทดสอบกับแบบจำลองจากเกณฑ์มาตรฐานการสร้างพื้นผิวใหม่ของ Berger (Berger et al., 2013) แต่ใช้เวลาในการประมวลผลลดลง (Chiu et al., 2019) การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างพื้นผิวใหม่เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับต้นไม้หลากหลายสายพันธุ์ ถูกพัฒนาจากผู้ทำวิจัยดังต่อไปนี้ (Buck et al., 2019; Muumbe et al., 2021; Owers et al., 2018; Takoudjou et al., 2018) และจากฐานข้อมูลงานวิจัย Scopus ผู้วิจัยพบว่า วิธี Screen Poisson ยังไม่ถูกนำมาใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ประเภทใด ๆ มาก่อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นครั้งแรกที่จะทดสอบและเปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นว่า วิธี Screen Poisson ใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ได้อย่างถูกต้อง โดยเริ่มจากการเก็บต้นไม้จริงจากแปลงปลูกมาทดสอบ ขยายผลไปสู่การทดสอบต้นไม้ในเขตพื้นที่อนุรักษ์ และผลลัพธ์จากวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการพื้นที่ป่าไม้ได้จริง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อทดสอบการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ทดสอบจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับมวลชีวภาพจากการตัดต้นไม้

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ป่าชายเลนเขตร้อนจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากสมการอัลโลเมตริก

### 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1.3.1 พอยท์คลาวด์จากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถนำมาสร้างพื้นผิวใหม่เพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ในแปลงทดสอบได้อย่างถูกต้องเช่นเดียวกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงที่ได้จากการแทนที่ด้วยน้ำ

1.3.2 วิธีการสร้างพื้นผิวใหม่จากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ป่าชายเลนเขตร้อนได้ใกล้เคียงกับค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากสมการอัลโลเมตริก โดยการใช้การเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากทั้งสองวิธี

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ การทดสอบการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ทดสอบจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับมวลชีวภาพจากการตัดต้นไม้และการเปรียบเทียบความถูกต้องของการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ป่าชายเลนเขตร้อนจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากสมการอัลโลเมตริก

ขั้นตอนแรกทำการเก็บข้อมูลต้นไม้ทดสอบจากแปลงปลูกต้นยูคาลิปตัสในพื้นที่ บ้านบุ ตำบลตลาด อำเภอมือง จังหวัดนครราชสีมา ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ใช้การสแกนแบบ Multi-scan นำ พอยท์คลาวด์สร้างพื้นผิว โดยเลือกใช้วิธี PSR, วิธี SPSR เพื่อคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและเลือกใช้วิธี QSM ที่ใช้รูปทรงเรขาคณิตปรับให้พอดีกับส่วนของลำต้นหรือกิ่งก้านแล้วคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน ทดสอบความถูกต้องของผลการคำนวณมวลชีวภาพจาก 3 วิธีกับมวลชีวภาพจริงจากการตัดต้นไม้ทดสอบโดยใช้วิธีการแทนที่ด้วยน้ำ (Water displacement)

ขั้นตอนที่สองเลือกพันธุ์ไม้ป่าชายเลนเขตร้อนในพื้นที่ศึกษา ณ ศูนย์ศึกษาระบบนิเวศป่าพรุ (บางปู) เฉลิมพระเกียรติ 72 พรรษา มหาราชินี ตำบลบางปู อำเภอมือง จังหวัดสมุทรปราการ พันธุ์ไม้ที่เลือกใช้คือ ต้นแสมทะเล (*Avicennia marina*) เก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินในส่วนของ Airborne และ Mobile laser scanner จะไม่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ข้อมูลพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการสแกนนำมาสร้างพื้นผิวใหม่เพื่อคำนวณมวลชีวภาพ แม้ว่าวิธีการสร้างพื้นผิวมีหลากหลายวิธีที่น่าสนใจแต่ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้วิธี PSR และวิธี SPSR เท่านั้น อีกหนึ่งวิธีที่เลือกใช้คือ วิธี QSM เป็นการเลือกรูปทรงเรขาคณิตเป็นตัวแทนของลำต้น กิ่งก้าน สร้างแบบจำลองของ

ต้นไม้ ซึ่งสามารถคำนวณมวลชีวภาพได้เช่นกัน นำผลการคำนวณจากทั้ง 3 วิธีนี้เปรียบเทียบกับค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากสมการอัลโลเมตริกเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่ต้องการศึกษาเพิ่มเติมเลือกใช้วิธีการเก็บข้อมูลที่มีโดยไม่ตัดทำลายต้นไม้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้วิธีการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยเทคนิคสแกนพื้นผิวเลเซอร์ภาคพื้นดินที่ปรับปรุงความถูกต้องสูงขึ้นและเหมาะสมกับต้นไม้ป่าชายเลนเขตร้อนในพื้นที่ประเทศไทย

1.5.2 ได้ข้อมูลที่สำคัญของพื้นที่ป่าไม้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ นำไปสู่การบริหารจัดการพื้นที่ป่าไม้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

##### 2.1.1 มวลชีวภาพ

มวลชีวภาพ หมายถึง ปริมาณของสิ่งมีชีวิตทั้งหมดที่ปรากฏอยู่ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งของสถานะการณใด ๆ มวลชีวภาพอาจวัดได้ในรูปแบบของน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง น้ำหนักอินทรีย์ สารที่ไม่รวมถึงน้ำหนักซีเล้า น้ำหนักคาร์บอนแคลอรี หรือหน่วยอื่น ๆ ซึ่งอาจเป็นประโยชน์สำหรับวัตถุประสงค์ของการเปรียบเทียบโดยอาจมีหน่วยเป็น กรัมต่อตารางเมตร กิโลกรัมต่อเฮกแตร์หรือในรูปพลังงานซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลแคลอรี ให้ความหมายนี้โดย Odum (Odum, 1971) ในขณะเดียวกัน Ovington ให้ความหมายไว้ว่า มวลของสิ่งมีชีวิตที่ปรากฏอยู่ในระบบนิเวศต่อหน่วยพื้นที่ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งของสถานะการณใด ๆ มวลของสิ่งมีชีวิตนี้ประกอบด้วยมวลของพืชสีเขียวที่สร้างขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยรวมทั้งสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ที่อาศัยอยู่ในระบบนิเวศ (Ovington, 1962) แต่โดยทั่วไปนิยมหาออกมาในรูปแบบของน้ำหนักแห้งซึ่งมีหน่วยเป็นตันต่อเฮกแตร์ (Ogawa and Asia, 1965)

นอกจากนี้ยังมีผู้ให้ความหมายแตกต่างกันออกไปอีกหลายท่าน เช่น Brown ให้ความหมายของมวลชีวภาพไว้ว่า มวลชีวภาพ คือปริมาณของสารอินทรีย์ในส่วนที่มีชีวิตทั้งหมดในพืชสังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการสังเคราะห์แสงที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานเคมีที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์โดยนำธาตุอาหารมาจากดินและอากาศมาใช้ ซึ่งสารอินทรีย์จะเปลี่ยนเป็นมวลชีวภาพซึ่งวัดออกมาเป็นน้ำหนักแห้งต่อหน่วยพื้นที่ (Brown, 1997) จากคำนิยามและความหมายข้างต้นสามารถสรุปความหมายได้ว่า มวลชีวภาพหมายถึงปริมาณของสารอินทรีย์ในส่วนของสิ่งมีชีวิตทั้งหมดที่พืชสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งของสถานะการณใด ๆ ที่สามารถวัดออกมาได้ในรูปของน้ำหนักสด (Fresh weight) น้ำหนักแห้ง (Dry weight) น้ำหนักปราศจากซีเล้า (Ash free dry weight) หรือน้ำหนักคาร์บอน (Carbon weight) โดยมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อหน่วยของพืช เช่น ต่อดัน หรือต่อหน่วยพื้นที่ (พชร, 2559)

คาร์บอนไดออกไซด์ถูกกักเก็บในต้นไม้ในรูปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อจากส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ ทั้งส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน เช่น ลำต้น กิ่ง ใบและส่วนที่อยู่ใต้พื้นดินเช่น รากไม้ การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในพืชมีวิธีการวิเคราะห์หลากหลายวิธี เช่นการนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของคาร์บอน (Carbon content) โดยใช้เครื่อง CN Corder MT 700 ด้วยวิธี Dumas ความเข้มข้นของคาร์บอนในตัวอย่างที่วัดได้มีหน่วยเป็นร้อยละของน้ำหนักแห้ง (Percent carbon by dry weight) และสามารถประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนจากค่ามวลชีวภาพโดยการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพของไม้ชนิดต่างๆ จากข้อมูลมวลชีวภาพและความเข้มข้นของคาร์บอนในส่วนต่างๆ โดยสร้างสมการคำนวณการกักเก็บคาร์บอนแยกเป็นรายต้นและวิเคราะห์รวมเป็นการกักเก็บคาร์บอนในมวลชีวภาพต่อหน่วยพื้นที่ (Gogoi et al., 2022; Samal et al., 2022; Trephattanasuwan et al., 2009)

### 2.1.2 การประมาณค่ามวลชีวภาพของต้นไม้

วิธีการประมาณค่ามวลชีวภาพ แบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ

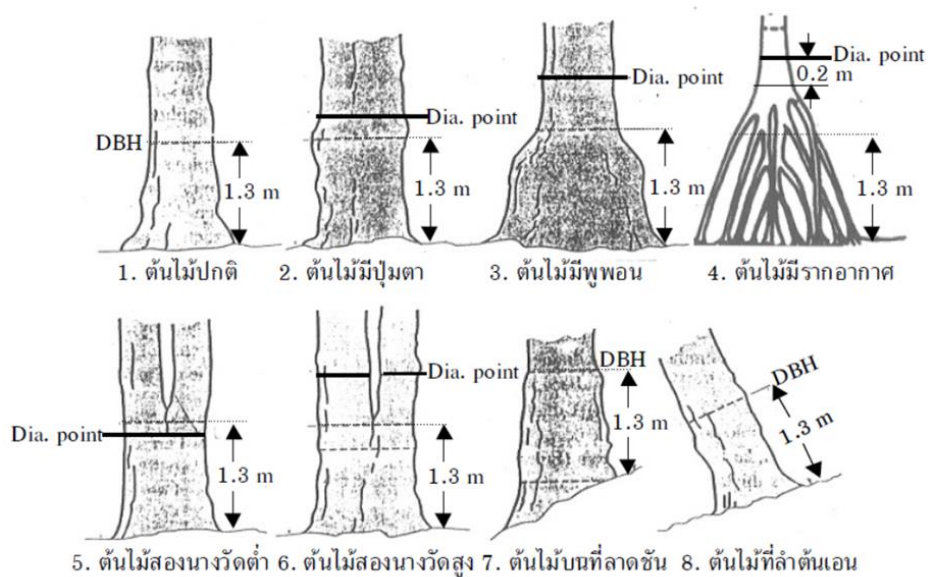
2.1.2.1 การประมาณค่ามวลชีวภาพโดยการตัดต้นไม้ตัวอย่างที่ต้องการศึกษาในพื้นที่ทั้งหมดเพื่อนำมาชั่งน้ำหนักสดและอบแห้งเพื่อหาค่าน้ำหนักแห้งที่คงที่โดยการเปรียบเทียบกับน้ำหนักสด ซึ่งการประมาณค่ามวลชีวภาพวิธีนี้ มีขั้นตอนที่ยุ่งยาก ใช้แรงงานผู้ตรวจวัดจำนวนมากงบประมาณสูง แต่มีข้อดีคือค่ามวลชีวภาพแม่นยำสูง

2.1.2.2 การประมาณค่ามวลชีวภาพจริงโดยใช้ต้นไม้ที่มีขนาดเฉลี่ย โดยการตัดฟันต้นไม้ตัวอย่างที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเฉลี่ยจากการสำรวจ ความสูงและขนาดเส้นรอบวงเพื่อชั่งน้ำหนักสด อบแห้ง และเปรียบเทียบการประมาณค่ามวลชีวภาพจริง ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือลดการตัดฟันต้นไม้ตัวอย่าง เวลา งบประมาณและแรงงานได้อย่างมาก แต่มีข้อเสียคือค่ามวลชีวภาพที่ได้จะมีความแม่นยำลดลง

2.1.2.3 การประมาณค่ามวลชีวภาพโดยสมการแอลโลเมตริก เป็นวิธีการทางอ้อมเพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพของจากส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ เช่น ลำต้น กิ่ง ใบ ราก แบบรายต้น มีหน่วยเป็นหน่วยน้ำหนัก เช่น กรัม, กิโลกรัม และรวมมวลชีวภาพรายต้นในพื้นที่แปลงตัวอย่างเป็นมวลชีวภาพของแปลงตัวอย่าง มีหน่วยเป็นหน่วยน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ เช่น กรัมต่อตารางเมตร , กิโลกรัมต่อไร่ โดยใช้ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกหรือเส้นรอบวง สร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ในรูปแบบพาวเวอร์ฟังก์ชัน (Komiyama et al., 2008) ดังแสดงในสมการที่ 2.1







ภาพที่ 2.1 แสดงตำแหน่งการวัดความ DBH ที่ระดับต่าง ๆ ของต้นไม้ที่มีลักษณะพิเศษ และพื้นที่ที่มีความลาดชัน  
ที่มา (ชิงชัย, 2546)

จากภาพที่ 2.1 การวัดขนาด DBH ของต้นไม้ที่มีลักษณะพิเศษสามารถจำแนกได้เป็น 8 ชนิด คือ

- 1) ต้นไม้ที่มีลักษณะลำต้นปกติและขึ้นอยู่ในพื้นที่ราบ ตำแหน่งที่วัดจะตรงกับ 1.30 เมตร หรือ DBH
- 2) ต้นไม้ที่มีลักษณะลำต้นมีปุ่มมีปมตรงกับ 1.30 เมตร การวัดอาจจะเลื่อนขึ้นหรือลงเพื่อหลบปุ่มปมของต้นไม้โดยให้ใกล้กับตำแหน่ง 1.30 เมตร มากที่สุด
- 3) ต้นไม้ที่มีพูพอนมากจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงตำแหน่งวัดขึ้นสูงเป็นพิเศษ จะพบมากในป่าที่มีต้นไม้ขนาดใหญ่ บางกรณีอาจจะต้องวัดตรงตำแหน่งที่สูงกว่า 3.00 เมตร เพื่อหลบพูพอน
- 4) ต้นไม้ที่มีรากอากาศเช่นไม้โกงกางจะวัดเหนือคอราก 0.20 เมตร
- 5) ต้นไม้ที่แตกนางตรงตำแหน่ง 1.30 เมตร จะวัดต่ำลงมาประมาณ 1.00-1.20 เมตร เพื่อให้ได้ค่าลำต้นเพียงค่าเดียว
- 6) ต้นไม้ที่แตกนางตรงระดับต่ำ หรือแตกนางใกล้ 1.30 เมตร และไม่สามารถวัดตรงตำแหน่งระดับต่ำได้เนื่องจากการพอกของเนื้อไม้โตเกินปกติ ก็จะใช้วัดค่าเป็น 2 ลำต้น หรืออาจ

มากกว่า 2 ลำต้นก็ได้ ถ้าต้นไม้มีการแตกนางเป็นพุ่มเหมือนต้นไม้ในป่าพรุที่มีลักษณะลำต้นเป็น 3-4 นาง ซึ่งเป็นการพัฒนาลำต้นเพื่อช่วยพยุงลำต้นไม่ให้ล้ม

7) ต้นไม้ที่ขึ้นอยู่บนที่ลาดชันสูงจะวัดตำแหน่ง 1.30 เมตร ด้านบนของความลาดชัน

8) ต้นไม้ที่มีลักษณะลำต้นที่เอนให้วัดตำแหน่ง 1.30 เมตร ด้านเอนออกไป

ส่วนการวัดความสูงของต้นไม้ทำได้ยากกว่าการวัด DBH เพราะต้องใช้เครื่องมือและอาศัยความชำนาญมากกว่า จึงจะได้ค่าที่มีความถูกต้อง เครื่องมือที่ใช้วัดความสูงของต้นไม้มักจะไม่ใช้ไม้วัดความสูง (Measuring Pole) ที่ทำจากพลาสติกหรืออลูมิเนียมสามารถชักขึ้นที่ละท่อนต่อ ๆ กันไป วัดความสูงได้ไม่เกิน 15 เมตร ถ้ามีความสูงมากกว่าจำเป็นต้องใช้ Haga hypsometer หรือ Suunto clinometer การวัดความสูงต้นไม้ในป่าธรรมชาติที่มีเรือนยอดซ้อนทับกันจะมีความแม่นยำน้อย เนื่องจากมองเห็นยอดของต้นไม้ไม่ชัดเจน (ชิงชัย, 2546)

## 2.2 การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน

เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial laser scanner: เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน) เป็นอุปกรณ์เลเซอร์ที่ใช้ระบบ LiDAR สำหรับการวัดระยะทางและมุมที่ให้ความแม่นยำผ่านกลไกการตรวจวัดลำแสงช่วงที่ตามองเห็น (Optical beam detection) เพื่อทำการสร้างพอยท์คลาวด์แบบสามมิติของพื้นผิววัตถุเป้าหมาย มีสองเทคนิคหลักที่ใช้ในการวัดค่าระยะทาง ได้แก่ Phase shift (PS) และ Time-of-flight (TOF) ซึ่งในปัจจุบัน เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน จะใช้เทคนิค TOF เป็นมาตรฐาน โดยหลักการทำงานจะทำการบันทึกสัญญาณ Backscatter ที่สะท้อนกลับมาถึงเครื่องรับ ซึ่งสามารถรับสัญญาณได้ทั้งแบบ One return และ Multi-return โดยแบบหลังจะให้ปริมาณพอยท์คลาวด์ที่หนาแน่นเมื่อเทียบกับแบบแรก (Calders et al., 2015) การสแกนในแต่ละครั้งสามารถเก็บค่า พอยท์คลาวด์จำนวนมาก ระยะเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับจำนวนจุดต่อพื้นที่ของการเก็บข้อมูล เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน มีผู้ผลิตออกสู่ตลาดหลายบริษัท เช่น Topcon, FARO, Leica system, GeoSystem ฯลฯ สามารถทำการวัดได้มากที่สุดกว่า 1 ล้านจุดต่อวินาทีที่ระยะ 100 – 300 เมตร โดยมีความแม่นยำระดับมิลลิเมตร และทำการบูรณาการค่าสีหลักแดง เขียว น้ำเงิน (Red green blue, RGB) ที่ได้จากการถ่ายภาพเป้าหมายใส่ค่าให้กับพอยท์คลาวด์ในการเก็บข้อมูลต้นไม้ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน สำหรับการศึกษาด้านป่าไม้ Maas และคณะ (2008) ได้แนะนำถึงความต้องการขั้นต่ำของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน เชิงเทคนิค ไว้ดังนี้

1) ระยะทางต่ำสุดในการเก็บข้อมูลจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ถึงเป้าหมายจะต้องมีระยะทางไม่ต่ำกว่า 50 เมตร สำหรับต้นไม้ที่มีความสูงมากกว่า 40 เมตร ภายในรัศมี 12 – 15 เมตร จากจุดตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน

2) จำนวนจุดการสแกนขั้นต่ำต้องไม่ต่ำกว่า 10,000 จุดต่อวินาที หรือ 625,000 จุดต่อวินาที ในปัจจุบัน

3) ค่าขอบเขตการมองเห็น (Field of view) แบบ Hemisphere (แนวนอน 360 องศา แนวตั้งที่เปิดมุมมองได้ตั้งแต่ 80 ถึง 135 องศา)

4) ค่าความละเอียดของจุดต้องมีขนาดไม่เกิน 10 มิลลิเมตร (Maas et al., 2008)

ค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดส่วนใหญ่เกิดจากการทำงานในสนาม ได้แก่ สภาพอากาศ และสิ่งแวดล้อม คุณสมบัติของเป้าหมาย และเรขาคณิตที่คำนวณจากข้อมูลการสแกน ส่วนค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน มีค่าน้อยมาก ซึ่งในการทำงานจะไม่นำค่าคลาดเคลื่อนในส่วนนี้มาคิดในงานวิจัย (Feliciano et al., 2014) Liang และคณะ (2016) ได้แนะนำวิธีการเก็บข้อมูลพอยท์คลาวด์จากพื้นที่ตัวอย่าง (Sample plot) สามารถทำได้ 3 วิธี ได้แก่

1) Single scan mode ตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ไว้กลางพื้นที่ตัวอย่าง แล้วสแกนแบบ Full field of view (เช่น  $360 \times 310$  องศา) ข้อมูลที่ได้จากการสแกนจะถูกเก็บเป็น Single scan พอยท์คลาวด์ปัญหาที่มักเกิดขึ้นจากการวิธีนี้ คือ วัตถุที่กีดขวางการสแกน (Occlusion effect)

2) Multi-scan mode ดำเนินการสแกนหลายครั้งทั้งพื้นที่ด้านใน และด้านนอกของพื้นที่ตัวอย่าง เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณข้อมูลพอยท์คลาวด์จากนั้นทำการรวมพอยท์คลาวด์โดยการ Register อ้างอิงจากตำแหน่งของเป้าอ้างอิง (Referenced target) ที่ตั้งอยู่ด้านนอกพื้นที่ศึกษา ทำให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำ แต่ใช้เวลาในการทำงานมากขึ้น

3) Multi-single scan mode เป็นการผสมทั้งสองวิธีข้างต้นเข้าด้วยกัน โดยการทำงานจะคล้ายกับ Multi-scan mode โดยทำการสแกนทั้งด้านใน และด้านนอกพื้นที่ตัวอย่าง แต่จะไม่ใช้เป้าอ้างอิง โดยจะทำการ Register ค่าอ้างอิงในระดับพีเจอร์ การสแกนข้อมูลต้นไม้ในพื้นที่อ้างอิง โดยแต่ละการสแกน จะใช้ต้นไม้ตัวอย่างเป็นเป้าหมายอ้างอิง ไปในตัว ซึ่งจะช่วยลดปัญหาวัตถุที่กีดขวาง และเวลาในการทำงาน แต่อาจประสบปัญหาในการรวมข้อมูล Single พอยท์คลาวด์เนื่องมาจากความ

คลาดเคลื่อนจากสิ่งแวดล้อม และเป่าอ้างอิง เช่น ลมที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของต้นไม้ตัวอย่าง ควรทำการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาที่เหมาะสม (Liang et al., 2016)

### 2.2.1 การสร้างพื้นผิวใหม่จากพอยท์คลาวด์

Khatamian และ Arabnia, (2016) พบว่าการสร้างพื้นผิวขึ้นมาใหม่นั้นเป็นกระบวนการของการดึงแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุจริงจากข้อมูลนำเข้าซึ่งเก็บข้อมูลโดยอุปกรณ์สแกนเนอร์ 3 มิติ ข้อมูลนำเข้ามักอยู่ในรูปของจุดที่กระจกระบายในพื้นที่ 3 มิติ จุดเหล่านี้อาจเป็นแบบไม่มีโครงสร้างหรือมีโครงสร้าง สำหรับแบบไม่มีโครงสร้างข้อมูลของจุดที่ให้ไว้คือพิกัดของจุดในขณะที่ทำการเก็บข้อมูล สำหรับชุดจุดที่มีโครงสร้างมีข้อมูลเพิ่มเติม เช่น เรขาคณิตของจุด (เช่นการเชื่อมต่อบางส่วนกับจุดอื่น ๆ หรือเวกเตอร์ที่มาจากค่าพิกัดของจุดอย่างน้อย 3 จุด) หรือทอพอโลยี (เช่น รูปร่างโดยรวมที่อาจพอดี เช่น ทรงกระบอก , ทรงกลม ฯลฯ ) จากนั้นใช้วิธีการที่เหมาะสมในการสร้างพื้นผิวใหม่ พื้นผิวที่สร้างใหม่มักจะอยู่ในรูปแบบสามเหลี่ยม เช่น จุดเชื่อมต่อในรูปแบบของรูปสามเหลี่ยมที่มีการแบ่งขอบหรือจุดยอด เป้าหมายของกระบวนการคือการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุจริงที่สามารถมองเห็นได้ ความจำเป็นต้องมีขั้นตอนการประมวลผลล่วงหน้าก่อนการสร้างพื้นผิวใหม่เพื่อขจัดสัญญาณรบกวน , กรองจุดที่ไม่ต้องการออก , ลดความซับซ้อนของข้อมูลที่ป้อนเข้าและเพื่อแบ่งส่วนข้อมูลดั้งเดิมที่ตั้งเป็นกลุ่มที่เป็นตัวแทนของวัตถุจริง ประเภทข้อมูลนำเข้าที่แตกต่างกันสามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีการสร้างใหม่และผลลัพธ์อาจเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับวิธีการที่เลือกและชนิดข้อมูล

การแสดงพื้นผิวที่เกิดจากวิธีการเหล่านี้สามารถแบ่งกว้าง ๆ ออกเป็น 2 แบบคือ Explicit และ Implicit โดยจัดประเภทพื้นผิวที่สร้างขึ้นใหม่และสอดคล้องกับวิธีการที่ผลิตพื้นผิวดังกล่าว (Khatamian and Arabnia, 2016)

### 2.2.2 พื้นผิวแบบ Explicit และ Implicit

Digne และคณะ (2014) ได้อธิบายพื้นผิวแบบ Explicit ว่าเป็นการกำหนดตำแหน่งที่แม่นยำของพื้นผิวหมายความว่าความเป็นตัวแทนแบบ Explicit ของพื้นผิวที่สร้างขึ้นใหม่จากพอยท์คลาวด์ที่สแกนจากวัตถุจริงในรูปแบบสามเหลี่ยมจุดเหล่านี้คือจุดยอดของสามเหลี่ยมหรือวางบนสามเหลี่ยมของพื้นผิว มีพื้นผิวแบบ Explicit ที่แตกต่างกันสองแบบคือแบบพารามิเตอร์และแบบสามเหลี่ยม พื้นผิวพารามิเตอร์เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบดั้งเดิมที่ครอบคลุมส่วนใดส่วนหนึ่งของจุดวิธีแบบดั้งเดิมคือ B-Spline, NURBS, พื้นราบ, ทรงกลมและ ทรงรี พื้นผิวพารามิเตอร์คือการจำกัด

ทอพอโลยีด้วยแบบจำลองเริ่มต้นซึ่งนั่นคือพื้นผิวที่ซับซ้อนไม่สามารถเป็นตัวแทนอย่างง่ายของวัตถุ และอาจต้องการใช้วิธีดั้งเดิมช่วยในการสร้างพื้นผิวด้วย (Digne et al., 2014)

พื้นผิวแบบสามเหลี่ยมเป็นรูปแบบที่เข้าใจง่ายที่สุดสำหรับการแสดงพื้นผิว โดยพื้นผิวที่เชื่อมต่อเป็นรูปสามเหลี่ยมซึ่งสร้างจากจุดนำเข้าโดยใช้จุดที่ใกล้ที่สุดของจุดที่ต้องการเชื่อมต่อ การแทนค่าแบบสามเหลี่ยมของพื้นผิวเรียกว่าพื้นผิวแบบ Simplicial เช่นเดียวกับ Hoppe (Hoppe et al., 1992)

Dinh และคณะ (2001) พบว่าพื้นผิวแบบ Implicit ถูกกำหนดโดยฟังก์ชัน เช่น ฟังก์ชัน marching cube (Lorensen and Cline, 1987) , ฟังก์ชันพื้นฐานสมมาตรแบบเรเดียล (Radial symmetric basis functions) (Turk and O'Brien, 2002) ความสมมาตรนี้เป็นปัญหาเมื่อพื้นผิวมีมุมหรือขอบ จึงไม่สามารถแสดงพื้นผิวที่ซับซ้อนได้ดีพอ (Dinh et al., 2001)

### 2.2.3 พื้นผิวจากการ Interpolated และการ Approximated

Khatamian และ Arabnia (2016) ให้นิยามคำว่า " Interpolated " ใช้สำหรับพื้นผิวที่อาจได้รับข้อมูลนำเข้าที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือมีหลุมที่ไม่ต้องการ (ข้อมูลที่หายไป) เนื่องจากความทึบแสง พื้นผิวที่ถูกสร้างใหม่จากการ Interpolated เป็นส่วนย่อยของจุดนำเข้าที่อยู่บนพื้นผิว ซึ่งแก้ไขความผิดปกติที่มีอยู่ในข้อมูลที่ได้รับ ในทางกลับกันพื้นผิวจากการ Approximated คือการแสดงพื้นผิวซึ่งอาจไม่มีจุดใดอยู่บนพื้นผิวนั้นเลย พื้นผิวนั้นเป็นเพียงการประมาณขอบเขตของทอพอโลยีของชุดข้อมูลนำเข้าพื้นผิวที่ชัดเจนเกือบทั้งหมดถือเป็นพื้นผิวแบบสอดแทรกจากจุดนำเข้าที่อยู่บนพื้นผิว พื้นผิวแบบ Implicit มักจะถูกประมาณว่าเป็นวิธีการสร้างพื้นผิวใหม่ที่เกี่ยวข้องกับการลดพลังงานหรือการผสมของฟังก์ชันที่เหมาะสม (Khatamian and Arabnia, 2016)

### 2.2.4 พื้นผิวแบบ Anisotropic และ Isotropic

Khatamian และ Arabnia (2016) อธิบายคุณลักษณะของพื้นผิวแบบ Isotropy หรือ anisotropy ว่าเป็นลักษณะที่สอดคล้องกันกับทอพอโลยีของพื้นผิวแบบจำลองนี้เรียกว่า Isotropic เมื่อพื้นผิวมีความเรียบมากโดยไม่มีขอบหรือมุมที่แหลมคม ในความเป็นจริง Isotropy อ้างถึงชุดของ Features ที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ต่างกัน เช่น พื้นผิว Isotropic ที่มี Features เป็นค่าเดียวกันเมื่อวัดในทิศทางต่าง ๆ กัน ในส่วนของแบบจำลอง Anisotropic เป็นแบบจำลองที่มีลักษณะ Anisotropic อย่างน้อยหนึ่งรายการ นั่นคือ คุณสมบัติ Anisotropic จะแตกต่างกันเมื่อวัดในทิศทางที่ต่างกัน ระยะทางระหว่างจุดที่มีขอบคมและมุมเป็นลักษณะ Anisotropic ของพื้นผิว

เนื่องจากระยะทางของจุดตามขอบแตกต่างกันไปด้วยระยะทางที่เข้ามาถึงขอบ (Khatamian and Arabnia, 2016)

### 2.2.5 การสร้างพื้นผิวใหม่จากวิธี Poisson

Lim และ Haron (2014) กล่าวว่า การสร้างพื้นผิวใหม่จากวิธี Poisson คือการสร้างพื้นผิวแบบฟังก์ชัน Implicit ที่ปรับพื้นผิวใหม่ให้มีรายละเอียดโดยรวมไปจนถึงรายละเอียดส่วนเล็กน้อยมีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นผิวเดิมมากที่สุด (Bolitho et al., 2009; Li et al., 2010) ซึ่งเริ่มต้นจากงานวิจัยของ Kazhdan และคณะ (2006) และ Li และคณะ (2010) พวกเขาถือว่าอัลกอริทึมการสร้างพื้นผิวใหม่จากวิธี Poisson จะพิจารณาข้อมูลทั้งหมดในคราวเดียวและด้วยเหตุนี้จึงเป็นวิธีแก้ปัญหาสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างพื้นผิวที่เรียบมากได้เหมือนกับฟังก์ชันพื้นฐานในแนวรัศมี (Radial function) ในขณะที่เดียวกันสามารถทำการปรับข้อมูล ปิดรูที่พื้นผิวด้วยการเติมและปรับแต่งแบบจำลองที่มีอยู่ (Kazhdan et al., 2006; Li et al., 2010)

Maiti และ Chakravarty (2016) ศึกษาการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการสร้างพื้นผิวใหม่ 3 มิติจากพื้นผิวเดิมที่แตกต่างกัน โดยหลังจากนำเข้าพอยท์คลาวด์สามมิติแล้ว จะมีการสร้างพื้นผิว Watertight สามมิติที่อยู่เหนือพอยท์คลาวด์ตามมาด้วย พอยท์คลาวด์แต่ละจุดจะต้องมีค่าพิกัดในสามมิติ (X,Y,Z) และค่าปกติของพื้นผิว ( $n_x, n_y, n_z$ ) ค่าปกติของพื้นผิวที่อยู่ในแต่ละจุดของพอยท์คลาวด์ถูกคำนวณจากค่าพิกัดสามมิติโดยใช้ Principal component analysis (PCA) PCA ใช้เพื่อค้นหา Eigenvector ของจุดในพอยท์คลาวด์ที่อยู่เหนือขึ้นไปอีกระดับจากพื้นที่ใกล้เคียง (Local neighborhood)

การสร้างพื้นผิววิธี Poisson นั้นมีเป้าหมายที่จะสร้าง Watertight สามมิติจากพอยท์คลาวด์ด้วยการลดความแตกต่างระหว่างทิศทางปกติของพื้นผิวที่สร้างใหม่และจุดสามมิติในพอยท์คลาวด์อัลกอริทึมอธิบายไว้ในรายละเอียดของขั้นตอนพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในอัลกอริทึมการสร้างพื้นผิวใหม่วิธี Poisson มีดังนี้

#### 2.2.5.1 ขั้นตอนการสร้างพื้นผิว

1) ฟังก์ชัน Indicator สามมิติของ  $x$  ถูกกำหนดในพื้นที่สามมิติเพื่อให้ค่าคือ 1 ภายในพื้นผิว (พื้นผิวที่จะสร้างใหม่) และ 0 ที่จุดนอกของพื้นผิว ฟังก์ชัน Indicator นี้มีการประมาณสำหรับการสร้างพื้นผิว Watertight แสดงสมการคณิตศาสตร์ในสมการที่ 2.3

$$x(p) = \begin{cases} 1 & \text{if } p \in M \\ 0 & \text{if } p \notin M \end{cases} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $x(p)$  คือ ฟังก์ชัน Indicator สามมิติของ  $x$   
 $p$  คือ พอยท์คลาวด์  
 $M$  คือ พื้นผิวใหม่

2) Gradient ของฟังก์ชัน Indicator เป็นเขตเวกเตอร์ เนื่องจาก  $x$  เป็นฟังก์ชันแบบต่อเนื่อง  $\nabla x$  นั้นไม่ใช่ 0 ที่จุดใกล้พื้นผิวเนื่องจากพื้นที่เหล่านั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $x$  (ค่าของ  $x$  คือ 1 ภายในพื้นผิวและ 0 ภายนอกพื้นผิว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของ  $x$  เกิดขึ้นใกล้พื้นผิวเท่านั้น)

3) ที่จุดที่  $\nabla x$  มีค่าไม่เป็น 0 ค่าของ  $\nabla x$  จะพบว่ามีค่าเท่ากับเวกเตอร์ปกติของพื้นผิวของจุดเหล่านั้น ดังนั้นเวกเตอร์ปกติของจุดตัวอย่างสามารถนำไปเป็นตัวอย่างของ  $\nabla x$

4) ดังนั้นเมื่อหาฟังก์ชัน Indicator  $x$  ที่มีค่า Gradient  $\nabla x$  ที่เหมาะสมที่สุดกับสนามเวกเตอร์  $V$  ที่กำหนดโดย พอยท์คลาวด์ จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\nabla x = \vec{V} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\nabla x$  คือ Gradient ของฟังก์ชัน Indicator  $x$   
 $\vec{V}$  คือ สนามเวกเตอร์  $V$

5) ในการแปลงสมการที่ 2.4 เป็นสมการ Poisson มาตรฐาน Divergence ถูกนำไปใช้กับตัวแปรทั้งสองด้านของสมการ เมื่อความแตกต่างของ Gradient คือ Laplacian การค้นหาฟังก์ชัน  $x$  ซึ่ง Laplacian เท่ากับ Gradient ของสนามเวกเตอร์  $\vec{V}$  ( $\nabla \cdot \vec{V}$ ) เป็นฟังก์ชันที่แสดงถึงพื้นผิวปกติที่แต่ละจุดของ พอยท์คลาวด์จะได้สมการทางคณิตศาสตร์แสดงในสมการที่ 2.5

$$\Delta x \equiv \nabla \cdot \nabla x = \nabla \cdot \vec{V} \quad (2.5)$$

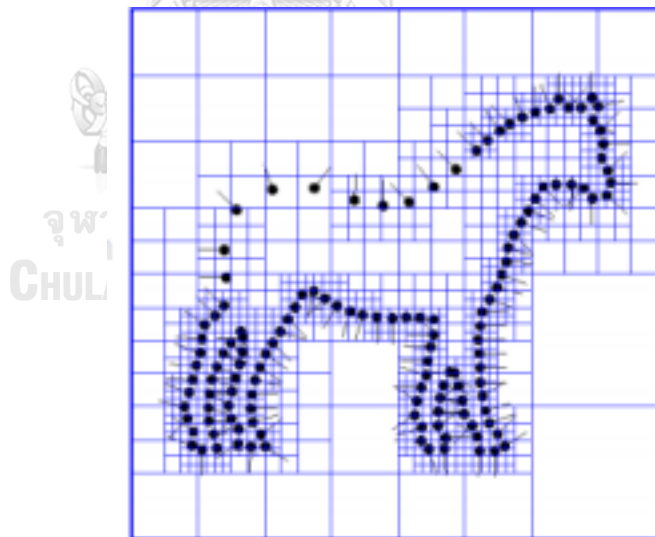
เมื่อ  $\Delta x$  คือ ฟังก์ชัน Indicator  $x$   
 $\nabla$  คือ Gradient  
 $\nabla x$  คือ Gradient ของฟังก์ชัน Indicator  $x$

$\vec{V}$  คือ สนามเวกเตอร์  $V$

ในการแก้สมการ Poisson ฟังก์ชัน Indicator จำเป็นต้องแสดงในแบบ 3 มิติ ตามนิยามของฟังก์ชัน Indicator ค่าของ  $x$  จะถูกตั้งบริเวณใกล้พื้นผิวเนื่องจากต้องการหาพื้นผิว 3 มิติใกล้พอยท์คลาวด์ตั้งที่สามารถตีความได้ว่าค่าของฟังก์ชันอยู่ห่างจากพื้นผิวเป็น 0 การปรับตัวเชิงพื้นที่ของ Octree ใช้แทนฟังก์ชัน Indicator  $x$  แต่ละ Node ของ Octree จะเก็บค่าของ  $x$  ที่จุดต่างๆ บนพื้นผิวที่สร้างขึ้นใหม่

พื้นผิวใหม่ถูกแยกออกมาด้วยฟังก์ชัน Indicator โดยใช้อัลกอริทึม Marching cubes และระดับของ Octree ที่กำหนดไว้ล่วงหน้าจะถูกนำมาใช้ในการจัดเก็บพอยท์คลาวด์ เมื่อพอยท์คลาวด์ถูกแบ่งเข้าไปในกริดแบบ Voxel ที่แบ่งย่อยตามระดับของ Octree หลังจาก Marching cubes วนครบรอบระดับของ Octree แล้ว Watertight สามมิติจะถูกสร้างขึ้นโดยการ Interpolate พอยท์คลาวด์ที่อยู่ระหว่างจุดยอดของ Cube

จากชั้นตอนต่าง ๆ เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นสามารถอธิบายในแบบสองมิติ ด้วยภาพที่ 2.2 ถึงภาพที่ 2.6

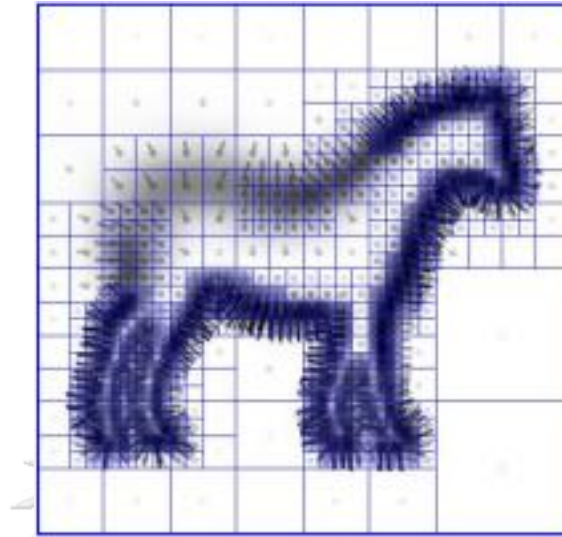


ภาพที่ 2.2 แสดง พอยท์คลาวด์ที่นำเข้า (จุดสีดำ) และการกำหนดระดับความลึกของ Octree ที่มา Kazhdan และคณะ (2006)

จากภาพที่ 2.2 เมื่อนำเข้าพอยท์คลาวด์แล้ว กำหนดระดับของ Octree ซึ่งระดับ Octree นี้ ขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิววัตถุเดิมมีความหยาบ ละเอียด มากน้อยเพียงใด เช่น พื้นผิวเดิมมีความละเอียดมาก มีลวดลายมาก ต้องการให้พื้นผิวใหม่มีความละเอียดเหมือนพื้นผิวเดิมควร

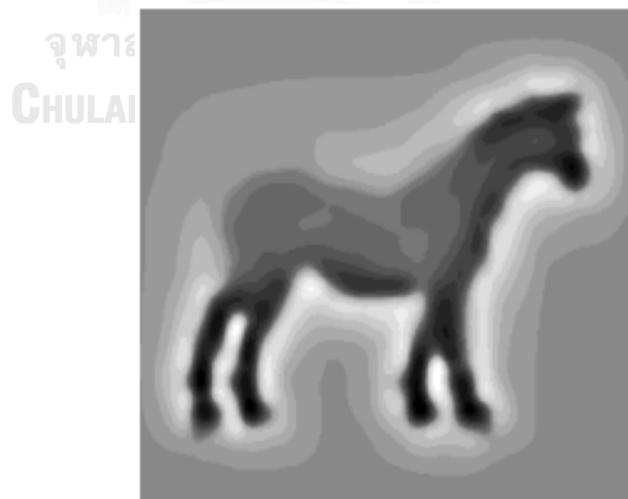


กำหนดระดับ Octree ด้วยตัวเลขสูง ในทำนองเดียวกันหากต้องการความละเอียดน้อยควรกำหนดระดับ Octree ด้วยตัวเลขต่ำจากนั้นเริ่มคำนวณ Vector field ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงผลการคำนวณ Vector field จากพอยท์คลาวด์  
ที่มา Kazhdan และคณะ (2006)

จากภาพที่ 2.3 เมื่อ พอยท์คลาวด์แต่ละจุดถูกคำนวณ Vector field แล้ว จะเริ่มปรากฏขอบเขตของพื้นผิวสามมิติบางส่วนขึ้นมา เพื่อแยกส่วนวัตถุและไม่ใช่วัตถุต่อไปโดยใช้ Divergence ของฟังก์ชัน Indicator ช่วยในการแยก ดังแสดงในภาพที่ 2.4



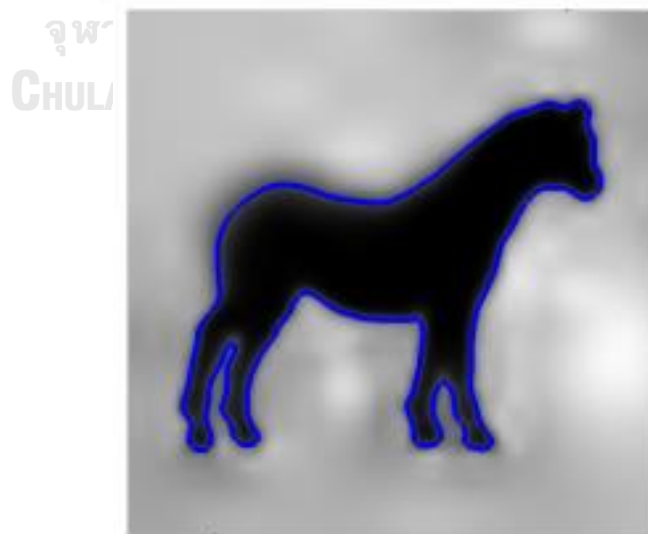
ภาพที่ 2.4 แสดงผลการคำนวณโดยใช้ฟังก์ชัน Indicator (คำนวณ Divergence)  
ที่มา Kazhdan และคณะ (2006)

จากภาพที่ 2.4 Divergence จากฟังก์ชัน Indicator แสดงในลักษณะ คล้ายเส้นชั้นความสูงซึ่งข้อมูลที่ปรากฏในขอบเขตแต่ละเส้นมีค่าต่างกัน จากนั้นใช้สมการ Poisson ช่วยในการแยกพื้นผิวของวัตถุ ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แสดงผลการคำนวณจากสมการ Poisson  
ที่มาจาก Kazhdan และคณะ (2006)

จากภาพที่ 2.5 พื้นผิวของวัตถุที่แสดงด้วยสีเข้ม(สีดำ) ถูกแยกออกจาก ส่วนอื่นที่แสดงด้วยสีที่อ่อนกว่า(สีเทา) ผลการคำนวณจากสมการ Poisson นำมาแยกพื้นผิววัตถุเป็น สามมิติในลักษณะ Iso-surface ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 แสดงผลการแยกพื้นผิวแบบ Iso-surface  
ที่มาจาก Kazhdan และคณะ (2006)

การสร้างพื้นผิวจากวิธี Poisson ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายตัว เช่น คุณภาพของการสร้างพื้นผิว, เวลาที่ใช้ในการคำนวณ ฯลฯ ซึ่งได้รับผลกระทบจากพารามิเตอร์ควบคุมเหล่านี้

### 2.2.5.2 พารามิเตอร์สำหรับการสร้างพื้นผิว

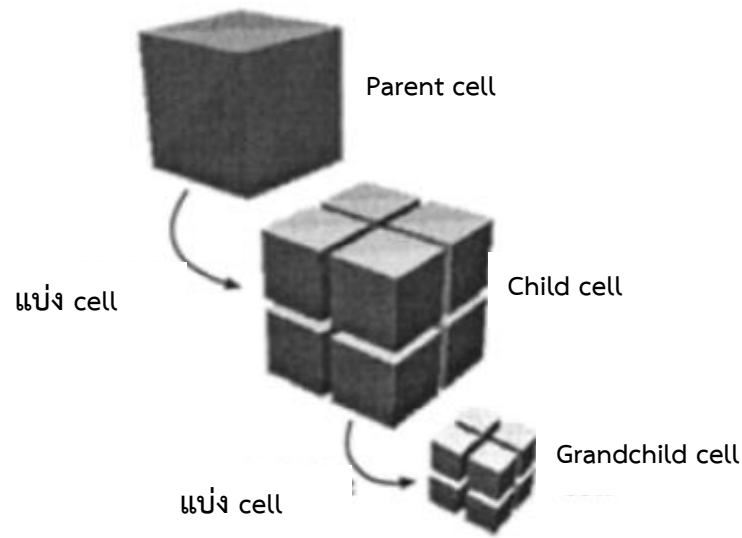
1) Octree depth เป็นความลึกของ Octree ซึ่งใช้ในระหว่างกระบวนการการสร้างพื้นผิวใหม่ ความลึก Octree ที่ระดับ D สร้างข่ายสามเหลี่ยมแบบสามมิติมีความละเอียด  $2D \times 2D \times 2D$  เมื่อความลึกของ Octree เพิ่มขึ้นความละเอียดของ Watertight ก็เพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้หน่วยความจำก็เพิ่มขึ้นอย่างมากเช่นกัน ค่าเริ่มต้นของความลึก Octree ใช้ในการสร้างพื้นผิว Poisson คือ Octree

2) Samples per node กำหนดจำนวนจุดที่น้อยที่สุดในแต่ละ Node ของ Octree โดยอัลกอริทึม Marching cubes ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนจำนวนจุดที่สูงกว่านั้นจะถูกกำหนดใน Octree เพื่อให้พื้นผิวถูกแก้ไขโดยใช้จุดเหล่านั้นทั้งหมด ซึ่งส่งผลกับสัญญาณรบกวนในพื้นผิวสามมิติที่สร้างขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อข้อมูลพอยท์คลาวด์ที่ไม่มีสัญญาณรบกวนและมีความถูกต้อง ตัวเลข 1-5 อาจถูกกำหนดให้กับตัวแปรนี้

3) Surface offsetting พารามิเตอร์นี้ระบุถึงค่าการแก้ไขเกณฑ์สำหรับการสร้างพื้นผิวใหม่ ค่า 1 หมายถึงไม่มีการแก้ไข  $< 1$  ใช้สำหรับการหักล้างภายในและค่า  $> 1$  ใช้สำหรับการหักล้างจากภายนอก (Maiti and Chakravarty, 2016)

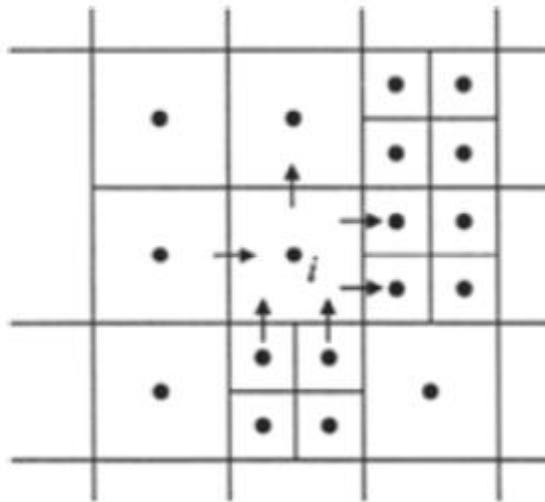
### 2.2.5.3 รายละเอียดของ Octree

Ogawa (2003) อธิบายโครงสร้างของ Octree ว่า วิธีการปรับข่าย Cartesian โดยเริ่มจากข่ายสี่เหลี่ยม (Rectangular mesh) ที่เราเรียกว่า เซลล์ ถูกแบ่งย่อยไปเรื่อย ๆ เมื่อต้องการความละเอียดสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.7 และภาพที่ 2.8 แสดงลักษณะของเซลล์ที่ถูกแบ่งออกในสองมิติ



ภาพที่ 2.7 แสดงการแบ่ง เซลล์ ส่วนย่อย ๆ แบบสามมิติ ด้วยวิธีการเดียวกัน ในระดับที่ต่างกัน  
ที่มา (Ogawa, 2003)

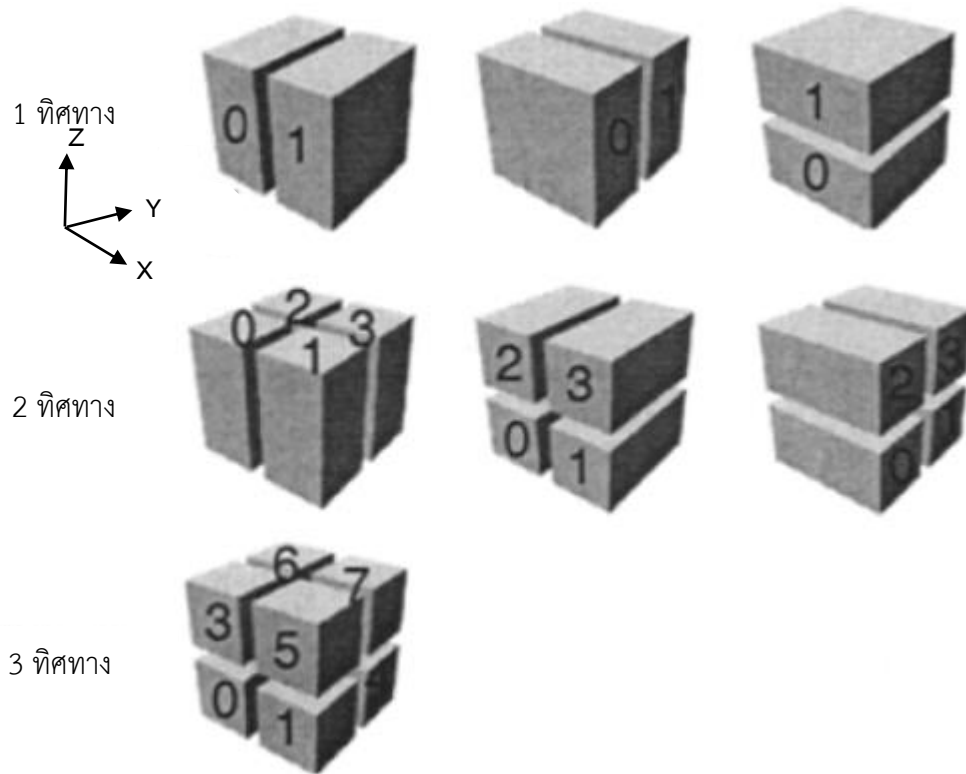
จากภาพที่ 2.7 แสดงการแบ่ง เซลล์ ย่อย ๆ แบบสามมิติ เริ่มจาก Parent เซลล์ จำนวน 1 เซลล์ ถูกแบ่งย่อยเป็น Child เซลล์ จำนวน 8 เซลล์ และแต่ละ Child เซลล์ ถูกแบ่งย่อยเป็น Grand Child เซลล์ จำนวน 8 เซลล์



ภาพที่ 2.8 แสดงการแบ่งเซลล์ ส่วนย่อย ๆ ในแบบสองมิติ  
ที่มา (Ogawa, 2003)

จากภาพที่ 2.8 การแบ่งเซลล์ย่อยในแบบสองมิติตามที่ผู้ใช้ กำหนด การปรับแต่งแบบ Isotropic จะเพิ่มจำนวนของตาข่ายโดยไม่จำเป็น เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับ

ปัญหาของเลเยอร์ขอบเขต เนื่องจากเซลล์ ถูกแยกไม่เพียงแต่ไปในทิศทางตามเลเยอร์ขอบเขต แต่ยังคงอยู่ในทิศทางปกติด้วย ดังนั้นการปรับแต่ง Anisotropic จึงมีประสิทธิภาพในการลดการใช้หน่วยความจำ ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดง Anisotropic ที่เป็นไปได้ (เซลล์ถูกแบ่งในทิศทางที่ต้องการเท่านั้น)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Ogawa, 2003)

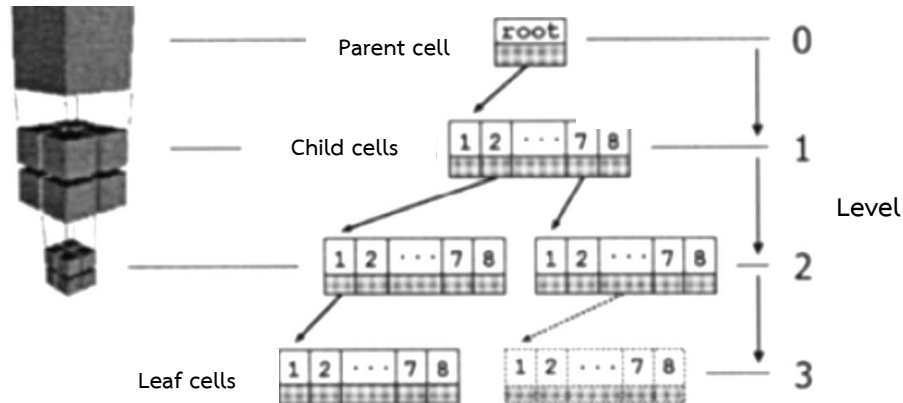
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากภาพที่ 2.9 แสดง Anisotropic ที่เป็นไปได้ นั่นคือรูปแบบเซลล์แบ่งย่อยตามที่ใช้กำหนด โดยเซลล์ถูกแบ่งในทิศทางที่ต้องการเท่านั้น เช่น 1, 2 หรือ 3 ทิศทาง

เซลล์ที่ถูกแบ่งย่อยจะถูกจัดระเบียบด้วยโครงสร้างข้อมูลแบบต้นไม้ (Tree data structure) ที่แสดงในภาพที่ 2.10 เซลล์ทั้งหมดถูกสร้างขึ้นจาก เซลล์ ที่ใหญ่ที่สุด (Parent cell or root cell) และมันอยู่ที่ด้านบนของโครงสร้างข้อมูลแบบต้นไม้ Child เซลล์ เชื่อมโยงกับ Parent เซลล์ ดังนั้น เซลล์ 1 เซลล์ สามารถเข้าถึง เซลล์ ไต ๆ จากที่ใดก็ได้ในเส้นทาง โครงสร้างข้อมูลแบบต้นไม้ เมื่อเซลล์ถูกแบ่งย่อยแบบ Isotropic 8 เซลล์ ย่อยถูกสร้างขึ้นใน 3 มิติ จากนั้นข้อมูลแบบต้นไม้จะถูกเรียกว่าเป็นข้อมูล “Octree” เมื่อ เซลล์ ถูกแบ่งย่อยในทิศทาง N

จำนวนของ Child เซลล์ คือ  $2^N$  และทำให้ Tree ถูกเรียกว่า tree  $2^N$ -tree หรือ N-d tree Leaf เซลล์ ที่อยู่ด้านล่างของ Tree มีบทบาทสำคัญในตัว Flow solver

การแบ่ง cell ย่อย ๆ โครงสร้างข้อมูลแบบต้นไม้ ( Tree data structure ) หรือ Octree



ภาพที่ 2.10 แสดง โครงสร้างข้อมูลแบบต้นไม้ ( Tree data structure ) หรือ Octree ที่มา (Ogawa, 2003)

จากภาพที่ 2.10 แสดงการแบ่งเซลล์ที่ Level 0 เรียกว่า Parent เซลล์ จากนั้นแบ่งออกเป็น Child เซลล์ ที่ระดับ 1 และแบ่งเซลล์จาก Child เซลล์ ที่ระดับ 1 เป็น Child เซลล์ ที่ระดับ 2 จนถึงระดับสุดท้ายจากการกำหนด Octree ที่เรียกว่า Leaf เซลล์ เฉพาะ Leaf เซลล์ เท่านั้นที่ใช้สำหรับการคำนวณการ Flow ยกเว้นเมื่อใช้วิธี Multigrid ในการปรับแต่ง เซลล์ หรือการทำให้หยาบมากขึ้น มีเพียง Leaf เซลล์ เท่านั้นที่จะถูกแบ่งย่อยหรือลบออก (Ogawa, 2003)

## 2.2.6 การสร้างพื้นผิวใหม่จากวิธี Screen Poisson (Screen Poisson surface reconstruction, SPSR)

Kazhdan และ Hoppe (2013) ศึกษาการสร้างพื้นผิวใหม่แบบ Screen Poisson (SPSR) โดยเริ่มจากวิธี Poisson (PSR) เดิมของ Kazhdan และ คณะ (2006) ว่าเป็นที่รู้จักกันดีมาก่อนแล้ว เทคนิคสำหรับการสร้างพื้นผิว Watertight จากตัวอย่างพอยท์คลาวด์ที่ได้จากเครื่องสแกนสามมิติ เทคนิค Poisson มีความยืดหยุ่นต่อข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนและการ Register ที่คลาดเคลื่อนได้ดี และมีแนวโน้มที่จะปรับพื้นผิวใหม่ให้ราบเรียบเกินจริง (Alliez et al., 2007; Berger et al., 2011; Calakli and Taubin, 2011; Digne et al., 2011; Manson et al., 2008) โดยคิดค้นอัลกอริทึม

จากวิธี PSR ไปสู่อัลกอริทึมเพื่อรวมข้อจำกัดทางตำแหน่งบนพื้นฐานจากเทคนิคการสร้างพื้นผิวของ Calakli และ Taubin (2011) ซึ่งเป็นวิธีที่มีความถูกต้องของข้อมูลเพื่อใช้สำหรับการ “Screen” ร่วมกับสมการ Poisson ในการสร้างพื้นผิวใหม่ ส่วน “Screen” จะสอดคล้องกับข้อจำกัดการสร้างพื้นผิวใหม่แบบ Iso surface จาก พอยท์คลาวด์ที่นำเข้า วิธีการที่เสนอนี้มีความแตกต่างจากการ Screen แบบดั้งเดิมของสมการ Poisson ในการที่ตำแหน่งและข้อจำกัดของ Gradient ถูกนิยามด้วยชนิดของโดเมนที่แตกต่างกัน ในขณะที่ Gradient จำเป็นต้องอยู่ในพื้นที่สามมิติและค่าตำแหน่งมาจาก พอยท์คลาวด์ที่นำเข้ามาเท่านั้น ดังนั้นการบูรณาการด้วย “Screen” ร่วมกับสมการ Poisson โดยใช้โครงสร้างแบบ Multigrid เป็นต้นแบบเพื่อแก้ปัญหาาระบบเชิงเส้น (Linear system) โดยไม่เสียเวลาหรือพื้นที่อย่างมีนัยสำคัญ

การสร้างพื้นผิววิธี PSR ขึ้นอยู่กับการสังเกตค่า Normal field ของขอบเขตของแข็ง สามารถจำแนกได้เป็น Gradient ของฟังก์ชัน Indicator ของของแข็ง ดังนั้นเมื่อได้รับชุดของจุดข้อมูลถูกสุ่มตัวอย่างขอบเขต Watertight สามารถปรับได้โดย (1) การปรับเปลี่ยนจุดตัวอย่างเข้าไปข้างในสนามเวกเตอร์ต่อเนื่องในสามมิติ (2) การหาฟังก์ชันสเกลาร์ที่มี Gradient ที่ดีที่สุดตรงกับสนามเวกเตอร์และ(3) การสกัด Iso surface ที่เหมาะสม ซึ่งวิธี SPSR จะพิจารณาในส่วนที่ (2)

### 2.2.6.1 ฟังก์ชันสเกลาร์ที่เหมาะสม

โดยกำหนดให้สนามเวกเตอร์  $\vec{V} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$  เพื่อคำนวณหาฟังก์ชันสเกลาร์  $X : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  minimizing จะได้สมการที่ 2.6

$$E(X) = \int \|\nabla_x(p) - \vec{V}(p)\|^2 dp \quad (2.6)$$

เมื่อ  $E(X)$  คือ ฟังก์ชันสเกลาร์ของ  $X$

$\nabla_x(p)$  คือ Gradient ของฟังก์ชัน Indicator  $x$  ของจุดนำเข้า

$\vec{V}(p)$  คือ สนามเวกเตอร์  $V$  ของจุดนำเข้า

ใช้สูตร Euler-Lagrange ค่าที่น้อยที่สุดได้จากการคำนวณด้วยสมการ Poisson จะได้สมการที่ 2.7

$$\Delta x = (\nabla \cdot \vec{V}) \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\Delta x$  คือ ฟังก์ชัน Indicator  $x$

$\nabla$  คือ Gradient

$\vec{V}$  คือ สนามเวกเตอร์  $V$

### 2.2.6.2 System discretization

จากสูตรของ Galerkin ใช้เพื่อเปลี่ยนเข้าสู่ระบบ Finite-dimension (Fletcher, 1984) เริ่มจาก  $\{B_1, \dots, B_N\} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  ถูกนำมาใช้ในฟังก์ชัน B-spline นำไปสู่ Discretization ดังสมการที่ 2.8

$$(\Delta_x, B_i)_{[0,1]^3} = (\nabla \cdot \vec{V}, B_i)_{[0,1]^3} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.8)$$

เมื่อ  $(\dots)_{[0,1]^3}$  คือ ค่ามาตรฐานที่อยู่ภายในพื้นที่ของฟังก์ชัน (ปริมาณของสเกลาร์และ ปริมาณเวกเตอร์) ในหน่วยลูกบาศก์

แก้สมการด้วยฟังก์ชันพื้นฐาน  $X(p) = \sum_{i=1}^N x_i B_i(p)$

คำนวณค่าคงที่  $x_i$  เพื่อแก้สมการ โดยใช้สมการเชิงเส้น  $Ax = b$  จะได้สมการที่ 2.9

$$A_{ij} = (\nabla B_i, \nabla B_j)_{[0,1]^3} \quad \text{และ} \quad b_i = (\vec{V}, \nabla B_i)_{[0,1]^3} \quad (2.9)$$

### 2.2.6.3 ข้อกำหนดของการรวมจุด (Incorporating point constraints)

จากสมการที่ 2.6 ชุดข้อมูลจุดที่นำเข้า  $(p)$  ถูกกำหนดค่าน้ำหนัก (Weights  $w$ ) จะได้  $w : P \rightarrow \mathbb{R}^{\geq 0}$  เพิ่ม Energy ในสมการที่ 2.6 จะได้สมการที่ 2.10

$$E(X) = \int \|\nabla_x(p) - \vec{V}(p)\|^2 d_p + \frac{\alpha \cdot \text{Area}(p)}{\sum_{p \in P} w(p)} \sum_{p \in P} w(p) X^2(p) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าน้ำหนักที่ช่วยปรับ Gradient และปรับ Values ให้เหมาะสม

$\text{Area}(p)$  คือ พื้นที่ของการสร้างพื้นผิวใหม่

$w(p)$  คือ ค่าน้ำหนักต่อจุดตัวอย่าง (ในที่นี้กำหนดเท่ากับ 1)

จากสมการที่ 2.10 จัดรูปสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.11

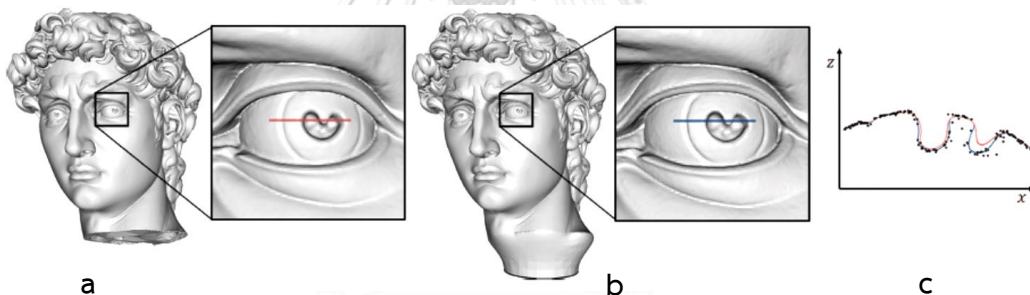
$$E(X) = (\vec{V} - \nabla_x, \vec{V} - \nabla_x)_{[0,1]^3} + \alpha(X, X)_{(w,P)} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $(\dots)_{(w,P)}$  คือ Bilinear ที่สมมาตร มีค่าเป็นบวกและมีรูปแบบในพื้นที่ของฟังก์ชันค่อนข้างชัดเจน ในหน่วยลูกบาศก์



เพื่อแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการ Screen ดังแสดงในภาพที่ 2.11 การเปรียบเทียบผลของการสร้างพื้นผิวใหม่จากวิธี PSR แบบดั้งเดิมและวิธี SPSR โดยนำ พอยท์คลาวด์จำนวน 11.4 ล้านจุด จากการสแกนปฏิมากรรม David ของ Michelangelo พบว่า การสร้างพื้นผิวใหม่ทั้งสองวิธี ถูกคำนวณจาก Octree ที่ระดับ 10 สอดคล้องกับความละเอียด Voxel ที่มีประสิทธิภาพ  $1024^3$  การ Screen จะสร้างรูปแบบที่ดีขึ้นจากข้อมูลนำเข้า (ตามภาพพื้นผิวภาพตัดขวางแสดงภาพตัวอย่างใกล้เคียง) แม้ว่าการสร้างพื้นผิวใหม่ทั้งสองวิธีจะมีความซับซ้อนที่คล้ายกัน (6.8 และ 6.9 ล้านข่ายสามเหลี่ยม ตามลำดับ) และต้องการเวลาในการประมวลผลที่เท่า ๆ กัน (230 และ 272 วินาทีตามลำดับ)

ดังนั้นการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง Octree และการใช้ Multigrid เพื่อลดความซับซ้อนของเวลาในการคำนวณด้วยสมการ Poisson จาก Log-linear ถึง Linear จากจำนวนพอยท์คลาวด์นำเข้า และยังแสดงให้เห็นการจัดลำดับความสำคัญของกลุ่มจุดที่ช่วยให้พื้นผิวจากวิธี SPSR อยู่บน Linear เดียวกัน



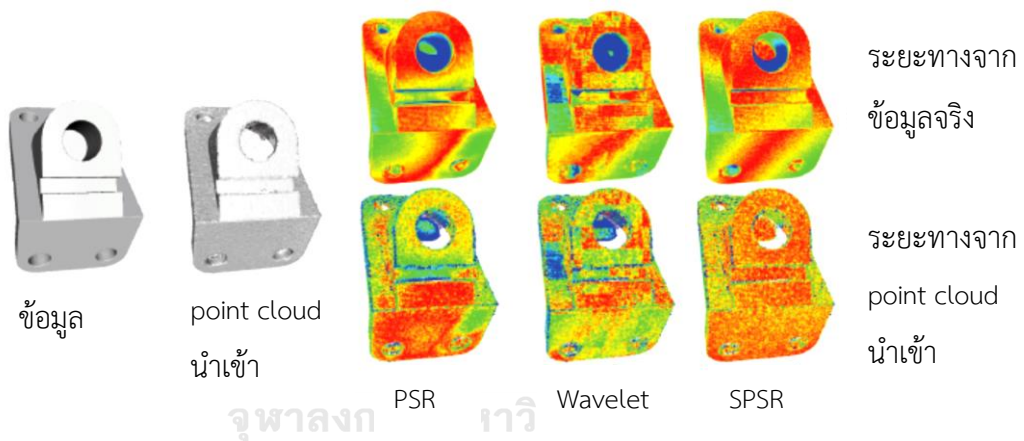
ภาพที่ 2.11 แสดงพื้นผิวใหม่ของรูปปั้นเดวิด (ส่วนหัว) เปรียบเทียบ (a) วิธี PSR ดั้งเดิม (b) วิธี SPSR และ (c) ภาพตัดขวางเปรียบเทียบการสร้างพื้นผิวบริเวณดวงตา  
ที่มา (Kazhdan and Hoppe, 2013)

จากภาพที่ 2.11 การเปรียบเทียบพื้นผิวจากวิธี Poisson และ Screen Poisson จากพอยท์คลาวด์ของรูปปั้นเดวิด เส้นสีแดง คือพื้นผิวสร้างจากวิธี Poisson เส้นสีน้ำเงิน คือพื้นผิวสร้างจากวิธี Screen Poisson สังเกตว่าเส้นสีน้ำเงินเป็นพื้นผิวที่มีระยะใกล้กับข้อมูลพอยท์คลาวด์มากกว่าเส้นสีแดง พื้นผิวที่เหมาะสมของวิธี SPSR จากวิธีของ Nehab และคณะ (2005) ซึ่งเหมาะสมกับตำแหน่งและข้อจำกัดปกติไปพร้อมกันซึ่งนำไปสู่วิธี SPSR อัลกอริทึมที่เหมาะสมจากการสมมุติโดเมนพาราเมตริกสองมิติ เช่น ระนาบราบหรือข่ายสามเหลี่ยม ที่ถูกสร้างขึ้น ตำแหน่งและข้อจำกัดที่ได้รับมาจากแหล่งอื่นทั้งสองถูกกำหนดไว้ในโดเมนสองมิตินี้ ในทางตรงกันข้ามการสร้างพื้นผิววิธี PSR ในโดเมนสองมิตียังไม่ทราบค่าเริ่มต้น ดังนั้นเป้าหมายคือการอนุมาณฟังก์ชัน Indicator

$x$  แทนที่จะเป็นฟังก์ชันพาราเมตริก ด้วยสิ่งเหล่านี้จึงนำไปสู่การแก้ปัญหาในรูปแบบผสมระหว่างข้อจำกัดที่ได้รับมาจากแหล่งอื่น (Laplacian) ถูกกำหนดไว้ในสามมิติและข้อจำกัดทางตำแหน่งที่ถูกกำหนดในชุดตัวอย่าง พอยท์คลาวด์ใกล้เคียงโดเมนสองมิติที่ยังไม่ทราบค่า (Newnham et al., 2015)

Kazhdan และ Hoppe (2013) แสดงตัวอย่างของการประเมินอัลกอริทึม SPSR ใช้การเปรียบเทียบความถูกต้องของพื้นผิวใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นกับวิธีการสร้างพื้นผิวใหม่วิธีอื่น ๆ วิธีที่นำมาใช้เปรียบเทียบประกอบด้วย 1) วิธี PSR ของ Kazhdan และคณะ (2005) และ 2) วิธี Wavelet ของ Manson และคณะ (2008) การตรวจสอบความถูกต้องของพื้นผิวใหม่นี้ ใช้เกณฑ์มาตรฐานของ Berger และคณะ (2013) เพื่อประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง Anchor

ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบแสดงในภาพที่ 2.12 ค่าคลาดเคลื่อนในการสร้างพื้นผิวใหม่ของแบบจำลอง Anchor จากการสแกนพื้นผิวจำนวน 210,000 จุด โดยใช้ Octree ระดับ 9



ภาพที่ 2.12 แสดงค่าคลาดเคลื่อนในการสร้างพื้นผิวใหม่ของแบบจำลอง Anchor ด้วยวิธี PSR , Wavelet และ SPSR

ที่มา (Kazhdan and Hoppe, 2013)

จากภาพที่ 2.12 ค่าคลาดเคลื่อนแสดงโดยใช้ระดับสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน โดยสีแดงหมายถึงค่าคลาดเคลื่อนต่ำและสีน้ำเงินหมายถึงค่าคลาดเคลื่อนสูง แถวบนสุดแสดงระยะห่างจากพื้นผิวที่สร้างขึ้นใหม่ไปยังข้อมูลจริง (Ground truth) และแถวด้านล่างแสดงระยะห่างจาก พอยท์คลาวด์ที่นำเข้าไปยังพื้นผิวที่สร้างขึ้นใหม่ วิธี SPSR จะสร้างพื้นผิวที่มีค่าคลาดเคลื่อนต่ำสังเกตจากภายในหลุมทรงกระบอกที่มีสีน้ำเงินน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ ดังนั้นการสร้างพื้นผิวใหม่วิธี SPSR จึงสะท้อนถึงความสามารถในการคาดการณ์การสร้างพื้นผิวใหม่ในพื้นที่ที่ข้อมูลขาดหายไปได้ดี

หากพิจารณาถึงความเหมาะสมของการสร้างพื้นผิวใหม่ไปยังจุดจุดนำเข้า (พิจารณา แอวล่างของภาพที่ 2.12) วิธี SPSR สร้างพื้นผิวได้ถูกต้องมากกว่าวิธี PSR และวิธี Wavelet โดยสังเกตจากพื้นที่สีแดงของวิธี SPSR มีพื้นที่มากที่สุดจากทั้งสามวิธี (Kazhdan and Hoppe, 2013)

### 2.2.7 การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากค่าปริมาตรของลำต้น

Ribeiro และคณะ ศึกษาการประมาณค่ามวลชีวภาพและคาร์บอนของต้นยูคาลิปตัส ในพื้นที่ตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศบราซิล ต้นยูคาลิปตัสจำนวน 23 ต้น ถูกนำมาประมาณค่ามวลชีวภาพจากอัตราส่วนมวลชีวภาพ (Biomass ratios ,  $Br_i$ ) ของกิ่งก้าน ใบและรากของต้นไม้คำนวณได้จากน้ำหนักตัวอย่างแบบแห้ง (Dry weights ,  $Dw_i$ ) หากรดด้วย น้ำหนักตัวอย่างแบบสด (Fresh weights ,  $Fw_i$ ) ของแต่ละตัวอย่าง ( $i^{th}$ ) อัตราส่วนมวลชีวภาพที่นำมาคูณกับผลรวมของน้ำหนักสดของต้นไม้ตัวอย่างแต่ละต้นที่ถูกชั่งในสนาม ( $F_i$ ) หน่วยเป็นกิโลกรัม จะได้ค่ามวลชีวภาพในสนาม ( $B_i$ ) และมวลชีวภาพทั้งหมดของลำต้นและเปลือกไม้ ( $B_i$ ) คำนวณโดยการคูณปริมาตรลำต้นและเปลือกไม้ ด้วยค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพื้นฐานของไม้ (Basic density of wood ,BDW) และเปลือกไม้ (Basic density of bark , BDB) ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$B_i = V_i \cdot (BDW \text{ or } BDB) \quad (2.12)$$

เมื่อ	$B_i$	คือ มวลชีวภาพทั้งหมดของลำต้นและเปลือกไม้ (กิโลกรัม)
	$V_i$	คือ ปริมาตรของลำต้นหรือเปลือกไม้ (ลูกบาศก์เมตร)
	$BDW, BDB$	คือ ความหนาแน่นพื้นฐานของไม้,เปลือกไม้ ตามลำดับ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) (Ribeiro et al., 2015)

### 2.2.8 การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน

ด้วยวิธี Qualitative surface model (QSM)

#### 2.2.8.1 แนวคิดการประมวลผล

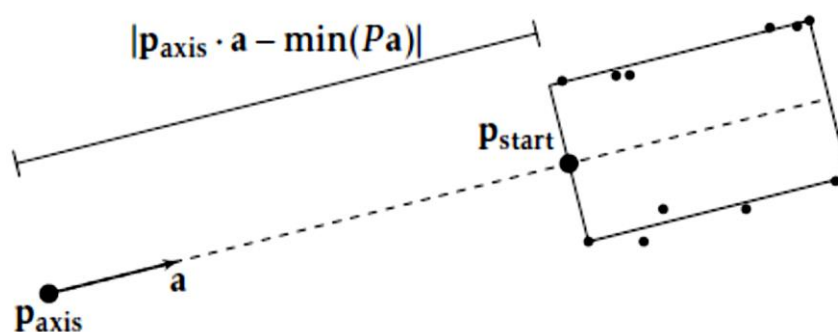
Raunonen และคณะ (2013) อธิบายหลักการประมวลผลของวิธี QSM นี้ว่า วิธี QSM ใช้หลักการแบ่งเป็นเซทย่อยตามลำดับ เริ่มจาก พอยท์คลาวด์แบ่งเป็น Component แบ่งเป็น เซกเมนต์ แบ่งเป็น Region และพิจารณาความต่อเนื่องจากความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดกัน (Neighbor relation) ของ พอยท์คลาวด์การแบ่งส่วนย่อยเริ่มจากส่วนฐานของต้นไม้ (โคนต้น) แล้วแบ่งส่วนต่อเนื่องขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงปลายยอด ในส่วนของกิ่งก้านใช้หลักการแบ่งส่วนเช่นเดียวกันกับ

ลำดับ แต่ส่วนที่ถูกแบ่งจะตรวจสอบเพื่อหาความต่อเนื่อง หากส่วนที่พิจารณาไม่เชื่อมต่อกันจะมีการตรวจสอบเพิ่มเติมว่าส่วนนั้นเป็นจุดเริ่มต้นของกิ่งใหม่หรือบางส่วนของส่วนปัจจุบัน การแบ่งส่วนของกิ่งใหม่จะกลายเป็นส่วนฐานและถูกแบ่งไปเรื่อย ๆ จนถึงปลายกิ่งซึ่งจะถูกเก็บเป็นอีกหนึ่งชั้นข้อมูล (Layer) นอกจากการใช้ความสัมพันธ์ที่ใกล้ชิดกัน แล้วความสัมพันธ์ของขนาดขึ้นส่วนที่ถูกแบ่งจำเป็นต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วย ความถูกต้องและความหนาแน่นของ พอยท์คลาวด์ที่สแกนและขนาดของชุดข้อมูลที่กำหนดขีดจำกัดการแยกส่วนย่อย เช่น ถ้าการสแกน พอยท์คลาวด์นั้นมีระยะห่างของ พอยท์คลาวด์เท่ากับความกว้างของช่องว่างระหว่างกิ่งไม้ที่ขนานกันและอยู่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นกิ่งทั้งสองจะถูกรวมเข้าเป็นกิ่งเดียวกัน นอกจากนี้ถ้าความหนาแน่นของ พอยท์คลาวด์แสดงด้วยจุดที่เล็กมากจนระยะห่างระหว่างจุดที่ใกล้ที่สุดมีขนาดเท่ากับช่องว่างระหว่างกิ่งจึงทำให้การแยกกิ่งไม่สามารถทำได้และสุดท้ายคือกิ่งที่มีขนาดเล็กมากจะถูกรวมกับข้อมูลกิ่งอื่นจนไม่สามารถแยกเป็นส่วนย่อยได้ (Raumonen et al., 2013)

### 2.2.8.2 การคำนวณจุดเริ่มต้น (Computing the start point)

Åkerblom และคณะ (2012) ได้อธิบายว่า จุดเริ่มต้น ( $P_{start}$ ) คำนวณจากรยะห่างระหว่างจุดที่อยู่บนแกน ( $P_{axis}$ ) และค่าที่น้อยที่สุดของพอยท์คลาวด์ ( $P$ ) บนแกน  $a$  ดังแสดงในภาพที่ 2.13 โดยใช้สมการที่ 2.13

$$P_{start} = P_{axis} - (P_{axis} \cdot a - \min(Pa)) \cdot a \quad (2.13)$$



ภาพที่ 2.13 แสดงหลักการคำนวณจุดเริ่มต้น  
ที่มา (Åkerblom, 2012)

จากภาพที่ 2.13 การคำนวณจุดเริ่มต้นของทรงกระบอกโดยเริ่มคำนวณจากรยะห่างระหว่างจุดที่อยู่บนแกนและค่าที่น้อยที่สุดของพอยท์คลาวด์บนแกน  $a$

### 2.2.8.3 การประมาณความสูงของทรงกระบอก

คำนวณจากค่าผลต่างระหว่างค่าที่มากที่สุดของ พอยท์คลาวด์ที่อยู่บนแกน  $a$  กับค่าที่น้อยที่สุดของพอยท์คลาวด์ที่อยู่บนแกน  $a$  ดังแสดงในสมการที่ 2.14

$$h = \max(Pa) - \min(Pa) \quad (2.14)$$

เมื่อ  $h$  คือ ความสูงของทรงกระบอก

$Pa$  คือ พอยท์คลาวด์ที่อยู่บนแกน  $a$

### 2.2.8.4 การคำนวณรัศมีที่ใหญ่ที่สุดของต้นไม้ (Maximum tree radius)

รัศมีของต้นไม้ ( $r_{tree}$ ) ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดค่าเฉลี่ยแต่ละ Region เทียบกับขนาดของต้นไม้ ความสูง ( $h$ ) วัดจากระดับพื้นและระยะทาง ( $d$ ) ที่วัดจากจุดค่าเฉลี่ยของลำต้นวัดตั้งฉากกับแกนของลำต้น รัศมีที่ใหญ่ที่สุดของต้นไม้จะถูกคำนวณเทียบกับรัศมีที่ใหญ่ที่สุดของลำต้น ( $r_{trunk}$ ) ของส่วนแรกซึ่งก็คือ สมมุติว่าเป็นจุดเริ่มต้นของลำต้น ดังแสดงในสมการที่ 2.15

$$r_{tree}(h, d) = r_{trunk} f(d)g(h) \quad (2.15)$$

เมื่อ  $f(\cdot)g(\cdot): \mathbb{R}^+ \rightarrow [0,1]$  คือ ฟังก์ชันที่สร้างสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับขนาดรัศมี เช่น

$$f(x) = \begin{cases} y_2 & , d \leq x_1 \\ y_1 & , d \geq x_2 \\ (y_2 - y_1)e^{-a\left(\frac{d}{r_{crown}} - x_1\right)} + y_1 & , otherwise \end{cases} \quad \text{หรือ} \quad g(h) = z_2 - (z_2 - z_1) \frac{h}{h_{tree}}$$

เมื่อ  $\mathbb{R}^+$  คือ Euclidean space ( เมตริกขนาด 3x3 :  $x, y, z$ )

$r_{crown}$  คือ ค่าประมาณรัศมีเรือนยอดของต้นไม้

$h_{tree}$  คือ ค่าประมาณความสูงของต้นไม้

$x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$  และ  $a$  คือ พารามิเตอร์

### 2.2.8.5 การประมาณค่ารัศมีของเซกเมนต์ที่ใหญ่ที่สุด (Maximum segment radius estimate)

คำนวณค่า  $r_{seg}$  สำหรับแต่ละ เซกเมนต์ตามค่ารัศมีที่พอดีในแต่ละ Region หากความแปรปรวนของค่ารัศมีมีค่ามากจะใช้การกำหนดค่ารัศมีขนาดต่ำสุดเป็นตัวกำหนดขีดจำกัด ดังแสดงในสมการที่ 2.16

$$r > (1 + p_1)r_{tree}(h, d), \quad (2.16a)$$

$$r > (1 + p_2)r_{seg}, \quad (2.16b)$$

$$r > (1 + p_3)r_{prev} \wedge \frac{r_{prev}}{r_{seg}} > p_4, \quad (2.16c)$$

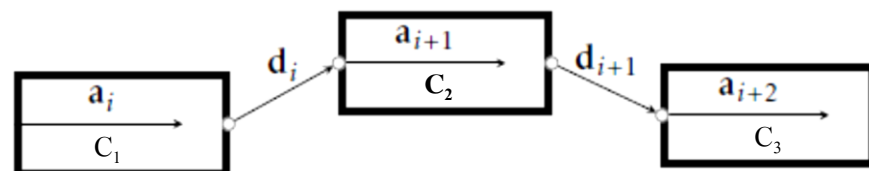
เมื่อ  $p_i, i \in \{1,2,3,4\}$  คือ เกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดขนาดของรัศมี

$r_{prev}$  คือ ค่ารัศมีของเซกเมนต์ก่อน

หลังจากการสร้างทรงกระบอกแต่ละเซกเมนต์แล้ว แต่ละเซกเมนต์จะถูกตรวจสอบหาข้อผิดพลาดและแก้ไขหากจำเป็น จากนั้นอัลกอริทึมจะค้นหาช่องว่างระหว่างเซกเมนต์และเพิ่มทรงกระบอกให้มีความต่อเนื่อง

### 2.2.8.6 การเติมช่องว่างระหว่างเซกเมนต์ (Filling gaps in a segment)

ช่องว่างระหว่างเซกเมนต์เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างเซกเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยที่เซกเมนต์เหล่านั้นควรแสดงส่วนของกิ่งก้านที่สแกนมาจากต้นไม้ นั่นคือทรงกระบอกมีขนาดรัศมีที่ต่อเนื่องกันไปจากรัศมีขนาดใหญ่ค่อย ๆ ลดขนาดรัศมีเล็กลง รัศมีและทิศทางของแกนไม่ควรเปลี่ยนแปลงมากเกินไประหว่างเซกเมนต์ที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งใช้เงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ตรวจสอบได้



ภาพที่ 2.14 แสดงการเกิดช่องว่างระหว่างเซกเมนต์

ที่มา (Åkerblom, 2012)

จากภาพที่ 2.14 ให้  $C_i, C_{i+1}, C_{i+2}$  เป็นสามทรงกระบอกที่ต่อเนื่องกันในแกน  $a_i, a_{i+1}, a_{i+2}$  ตามลำดับ ให้เวกเตอร์  $d_i$  คือค่าต่างจากจุดสิ้นสุดของทรงกระบอก  $C_i$  ถึงจุดเริ่มต้นของทรงกระบอก  $C_{i+1}$  และเวกเตอร์  $d_{i+1}$  คือค่าต่างจากจุดสิ้นสุดของทรงกระบอก  $C_{i+1}$  ถึงจุดเริ่มต้นของทรงกระบอก  $C_{i+2}$  ความยาวของ  $\|d_i\|$  และ  $\|d_{i+1}\|$  ถูกใช้สำหรับการเติมช่องว่างระหว่างเซกเมนต์กรณีที่มีรัศมีของทรงกระบอกที่อยู่ตรงกลางมีขนาดใหญ่ขึ้นอาจเนื่องมาจากการแยกกิ่งก้านไปสองทางทำให้เกิดการบิดเบี้ยว การปรับรัศมีในกรณีนี้โดยเฉลี่ยรัศมีของทรงกระบอกก่อนหน้าและทรงกระบอกถัดไป (รัศมีที่มีขนาดใกล้เคียงกัน) โดยพิจารณาเงื่อนไข ดังแสดงในสมการที่ 2.17

$$\alpha(a_i, a_{i+1}) \wedge \alpha(a_{i+1}, a_{i+2}) \quad \text{มีขนาดเล็ก} \quad (2.17a)$$

$$\alpha(a_i, d_i) \wedge \alpha(a_{i+2}, d_{i+1}) \quad \text{มีขนาดใหญ่} \quad (2.17b)$$

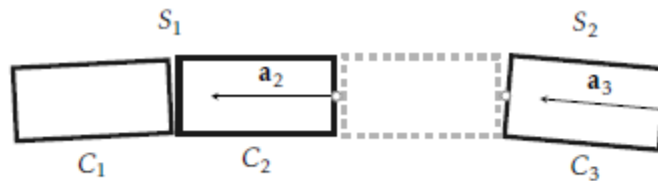
สมการที่ (2.17a) ทำให้มั่นใจได้ว่าในความเป็นจริงแล้วทรงกระบอกมีทิศทางแกนที่คล้ายกันส่วนสมการที่ (2.17b) ระบุว่าจุดสิ้นสุดของทรงกระบอกแรกไม่ตรงกับจุดเริ่มต้นของทรงกระบอกที่สองและเหมือนกันสำหรับทรงกระบอกที่สองและที่สาม

ในการแก้ไขปัญหาการจัดตำแหน่งและช่องว่างระหว่างทรงกระบอก โดยเพิ่มความยาวของทรงกระบอก  $C_i$  ตามความยาวของระยะ  $d_i$  ในทิศทางของ  $a_i$  จากนั้นจุดเริ่มต้นของทรงกระบอก  $C_{i+1}$  จะถูกย้ายไปยังจุดสิ้นสุดใหม่ของกระบอกแรก  $C_i$  ความยาวของทรงกระบอกกลางถูกคำนวณใหม่เพื่อให้ทรงกระบอกยาวจนถึงจุดเริ่มต้นของทรงกระบอกที่สาม ดังแสดงในสมการที่ 2.18

$$\text{new } C_i = a_i \cdot d_i \quad \text{และ} \quad \text{new } C_{i+1} = a_{i+1} \cdot d_{i+1} \quad (2.18)$$

ในส่วนที่ช่องว่างระหว่างทรงกระบอกเกิดจากเซกเมนต์ ที่แตกต่างกัน ซึ่งในขั้นตอนการตรวจสอบไม่ชัดเจนว่าทรงกระบอกนั้นควรเป็น Parent ของทรงกระบอกแรกในเซกเมนต์หรือเป็นทรงกระบอกที่มีอยู่ก่อนแล้ว ในระหว่างกระบวนการเมื่อเติมช่องว่างระหว่างเซกเมนต์ทรงกระบอกคู่บนนั้นโดยไม่มี Parent ให้พิจารณา สมมติฐานคือทรงกระบอกอาจไม่มี Parent เนื่องจากทรงกระบอกหายไปโดยที่ Parent ยังคงอยู่ อาจเกิดจากช่องว่างจากการสแกนหรือจากผลการสร้างทรงกระบอกที่เหมาะสมล้มเหลวเป้าหมายของกระบวนการคือเพิ่มทรงกระบอกเข้าไปในชุดทรงกระบอกในลักษณะที่ทำให้ความสัมพันธ์สมบูรณ์มากขึ้นการเติมช่องว่างระหว่างเซกเมนต์ แบ่งออกเป็นสองลักษณะตามความเป็นไปได้ คือ

1) Parent และส่วนขยาย (Extension) เกิดจากทรงกระบอกหายไปในช่วงกลางของเซกเมนต์ สิ่งนี้ทำให้เกิดเซกเมนต์ ที่ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนแยกเป็น  $s_1$  และ  $s_2$  ดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แสดงการเติมช่องว่างระหว่างเซกเมนต์ ในลักษณะ Parent และส่วนขยาย (Extension) ที่มา (Åkerblom, 2012)

จากภาพที่ 2.15 ทรงกระบอกใหม่จะเป็นส่วนขยายจากส่วนสุดท้ายของทรงกระบอก  $C_3$  จากส่วนของ  $S_2$  และ Parent ของส่วนแรกจาก ทรงกระบอก  $C_2$  จากส่วนของ  $S_1$  ทั้งสองส่วนที่เพิ่มมาถูกรวมเป็นทรงกระบอกเดียวกัน ซึ่งสามารถใช้สมการที่ 2.19 พิจารณาเงื่อนไขเหล่านี้ถ้าเป็นจริงจะไม่มีส่วนขยายเกิดขึ้น

$$\angle(a_{ext}, a_{can}) \quad \text{มีขนาดเล็กและมีค่าเป็นบวก} \quad (2.19a)$$

$$|r_{ext} - r_{can}| \quad \text{มีขนาดเล็ก} \quad (2.19b)$$

$$\|P_{ext} - q_{can}\| \quad \text{มีขนาดไม่ใหญ่หรือเล็กเกินไป} \quad (2.19c)$$

$$\angle(a_{ext}, P_{ext} - q_{can}) \quad \text{มีขนาดเล็ก} \quad (2.19d)$$

$$a_{ext} \cdot P_{ext} > a_{ext} \cdot q_{ext} \quad (2.19e)$$

เมื่อ  $C_{ext}$  คือ ทรงกระบอกส่วนขยายที่ไม่มี Parent ในแกน  $a_{ext}$ , จุดเริ่มต้นของส่วนขยาย ( $P_{ext}$ ), รัศมีของส่วนขยาย ( $r_{ext}$ ), และ จุดสิ้นสุดส่วนขยาย ( $q_{ext}$ )

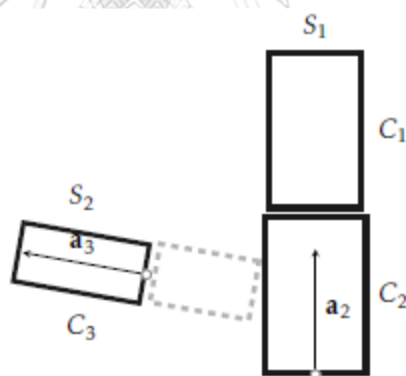
$C_{can}$  คือ ทรงกระบอกที่ต้องการสร้าง (Candidate) ที่มีคุณสมบัติ  $a_{can}$ ,  $P_{can}$ ,  $r_{can}$  และ จุดสิ้นสุด ( $q_{can}$ )

จากเงื่อนไขแรก (2.19a) ทำให้มั่นใจว่าทรงกระบอกทั้งสองมีทิศทางที่คล้ายกัน และค่าที่เป็นบวกทำให้มั่นใจได้ว่าทิศทางนั้นไม่ใกล้เคียงกับสิ่งที่ตรงกันข้าม เงื่อนไขที่สอง (2.19b) ส่วนอื่น ๆ ที่อยู่นอกทรงกระบอกที่เล็กกว่าหรือใหญ่กว่าทรงกระบอกที่ขยายออกมา ( $C_{ext}$ ) เงื่อนไขที่สาม (2.19c) จำกัด ระยะห่างระหว่าง Parent และส่วนขยาย หากระยะทางมีขนาดใหญ่มากกว่าสิ่งที่อาจ



เติมด้วยความยาวปกติของทรงกระบอก, ทรงกระบอกที่ต้องการสร้างจะมี Parent ที่ไม่ถูกต้อง ในทางกลับกันถ้าระยะทางมีขนาดเล็ก ไม่จำเป็นต้องมีทรงกระบอกเพิ่มเติม หากเงื่อนไขทั้งหมด เป็นจริงความสัมพันธ์ Parent และส่วนขยาย สามารถเป็นไปได้ เพื่อค้นหาเฉพาะทรงกระบอกที่มีการ จัดตำแหน่งอยู่ใกล้กับทรงกระบอกที่ระบุ ต้องใช้เงื่อนไขที่สี่ (2.19d) เนื่องจากระยะทาง  $\|P_{ext} - q_{can}\|$  ไม่สามารถเป็นไปได้ ขนาดของมุม  $\angle(a_{ext}, P_{ext} - q_{can})$  จะมีขนาดใหญ่ขึ้นหากการจัด ตำแหน่งไม่ถูกต้อง ความไม่เท่ากันในเงื่อนไขที่ห้า (2.19e) ทำให้มั่นใจได้ว่าทรงกระบอกที่ต้องการ สร้างนั้นอยู่ด้านข้างของกระบอกที่กำหนดให้ เงื่อนไขนี้ต้องการจุดสิ้นสุดของทรงกระบอกที่ต้องการ สร้างที่อยู่ด้านหลังจุดเริ่มต้นของทรงกระบอกที่กำหนดในทิศทางแกนของทรงกระบอกส่วนขยาย ( $a_{ext}$ )

2) Parent – Child เกิดจากทรงกระบอกแรกของเซกเมนต์ นั้นหายไปดัง แสดงในภาพที่ 2.16 เซกเมนต์  $S_2$  ไม่มี Parent เซกเมนต์ และทรงกระบอก  $C_3$  ไม่มีทรงบอที่เป็น Parent ทรงกระบอกใหม่จะเป็น Child ของทรงกระบอก  $C_2$  และเป็น Parent ของทรงกระบอก  $C_3$  ความสัมพันธ์ของเซกเมนต์ ทั้งสองถูกอัปเดตด้วย



ภาพที่ 2.16 แสดงการเติมช่องว่างระหว่าง เซกเมนต์ ในลักษณะ Parent – Child  
ที่มา (Åkerblom, 2012)

จากภาพที่ 2.16 ทรงกระบอกแรกของเซกเมนต์นั้นหายไป เซกเมนต์  $S_2$  ไม่มี Parent เซกเมนต์ และทรงกระบอก  $C_3$  ไม่มีทรงบอที่เป็น Parent การเติมช่องว่างระหว่าง เซกเมนต์ในลักษณะ Parent – Child ทรงกระบอกใหม่จะเป็น Child ของทรงกระบอก  $C_2$  และเป็น Parent ของทรงกระบอก  $C_3$

กำหนด  $C_{chd}$  คือ ทรงกระบอกที่ไม่มี Parent และไม่พบในลักษณะที่

1) Parent และส่วนขยาย แม้ว่าทรงกระบอกไม่ได้เป็นส่วนขยายของทรงกระบอกใด ๆ แต่ก็ยัง

สามารถเป็น Child ได้ นั่นคือทรงกระบอก  $C_{chd}$  เป็นทรงกระบอกแรกในส่วนของ Child ส่วนอื่น ๆ เริ่มต้นด้วยการค้นหาทรงกระบอกที่ต้องการสร้างจากเงื่อนไข ดังแสดงในสมการที่ 2.20 ทรงกระบอก  $C_{can}$  เป็นทรงกระบอกที่ต้องการสร้างอย่างเหมาะสมหากมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้เป็นจริง

$$r_{chd} < r_{can} , \quad (2.20a)$$

$$\alpha(a_{chd}, a_{can}) \quad \text{มีขนาดใหญ่} , \quad (2.20b)$$

$$d(C_{can}, P_{chd}) \quad \text{มีขนาดไม่ใหญ่หรือเล็กเกินไป} , \quad (2.20c)$$

$$a_{chd} \cdot P_{can} < a_{chd} \cdot P_{chd} \wedge a_{chd} \cdot q_{can} < a_{chd} \cdot P_{chd} \quad (2.20d)$$

จากสมการที่ 2.20a ความไม่เท่ากัน ระบุว่ารัศมีของ Parent จะต้องมีขนาดใหญ่กว่ารัศมีของ Child เงื่อนไขที่สองสมการ 2.20b บอกว่าแกนของทรงกระบอกทั้งสองไม่ควรขนานกันเกินไป จะต้องมีมุมขนาดใหญ่พอระหว่าง Child และ Parent เงื่อนไขที่สามสมการที่ 2.20c หมายถึงทรงกระบอกที่ต้องการสร้างต้องอยู่ใกล้กับทรงกระบอก Child เงื่อนไขสุดท้ายสมการที่ 2.20d ทรงกระบอกที่ต้องการสร้างทั้งหมดอยู่ด้านหลังทรงกระบอก Child ในทิศทางแกนของกระบอก Child

เมื่อทรงกระบอกทั้งหมดที่ไม่มี Parent ได้รับการประมวลผลแล้วจะมีการเติมช่องว่างให้สมบูรณ์ รูปแบบทรงกระบอกที่ถูกปรับปรุงอาจเป็นครั้งสุดท้ายที่สามารถเป็นไปได้เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ในขั้นต่อไป (Åkerblom, 2012)

### 2.2.8.7 การคำนวณปริมาตรทรงกระบอก

Åkerblom และคณะ (2012) ได้แนะนำการคำนวณปริมาตรจากรูปทรงกระบอกที่ถูกแบ่งเป็นส่วน ๆ จากสมการที่ 2.21

$$V = \sum_{i=1}^N \pi h_i r_i^2 \cdot p(i) \quad (2.21)$$

เมื่อ	$V$	คือ	ปริมาตรทรงกระบอก (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	$N$	คือ	จำนวนทรงกระบอก
	$h_i$	คือ	ความสูงของทรงกระบอกแต่ละชิ้น (เซนติเมตร)
	$r_i$	คือ	รัศมีของทรงกระบอกแต่ละชิ้น (เซนติเมตร)

$p(i)$  คือ ค่าคงที่เท่ากับ 1 เมื่อ  $(i)$  เป็นส่วนของลำต้น และมีค่าคงที่เท่ากับ 0 เมื่อ  $(i)$  เป็นส่วนอื่น ๆ

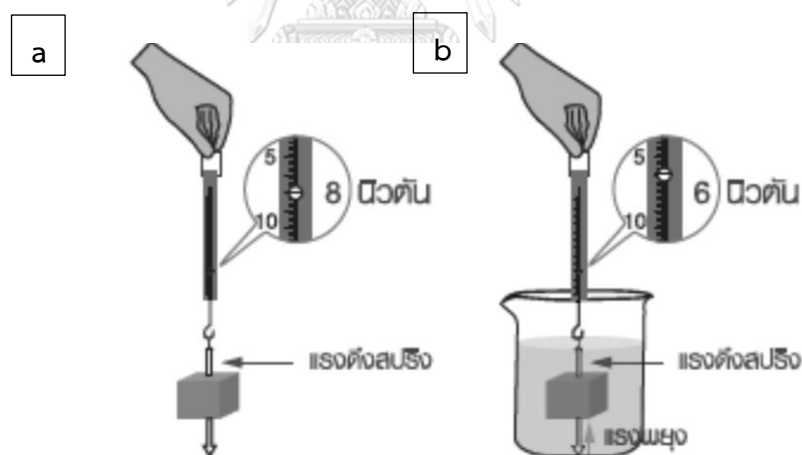
การกำหนดค่า  $p(i)$  เลือกใช้การกำหนดขนาดของรัศมีเพื่อแยกทรงกระบอกของลำต้นและกิ่งก้าน โดยกำหนดค่ารัศมีต่ำสุด ( $r_{min}$ ) ได้เช่นกัน โดยใช้เงื่อนไขจากสมการที่ 2.22

$$p(i) = \begin{cases} 1, & r_i > r_{min} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2.22)$$

ในส่วนของการคำนวณปริมาตรของกิ่งและส่วนของลำต้นที่มีรัศมีขนาดใหญ่กว่าสามารถกำหนดค่ารัศมีน้อยที่สุดได้ (Åkerblom, 2012)

### 2.3 การหาปริมาตรวัตถุด้วยการแทนที่น้ำ (Water replacement)

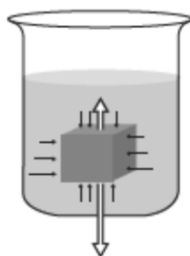
สารไม่ว่าจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ล้วนต้องการที่อยู่ หรือการครองที่ ในกรณีที่ช่องแข็งอยู่ในของเหลวจะเกิดแรงดันจากของเหลวกระทำกับวัตถุส่วนที่จม แรงดังกล่าวเป็นสาเหตุทำให้การชั่งน้ำหนักวัตถุในของเหลวน้อยกว่าเมื่อชั่งในอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของวัตถุเมื่อ (a) ชั่งวัตถุในอากาศ และ (b) ชั่งวัตถุในน้ำที่มา (สสวท, 2563) หน้า 39-40

จากภาพที่ 2.17 a เมื่อชั่งน้ำหนักของวัตถุในอากาศมีมวล 8 นิวตันและนำวัตถุนั้นชั่งน้ำหนักในน้ำ ดังภาพ b มวลของวัตถุจะมีน้ำหนักเท่ากับ 6 นิวตัน ซึ่งน้อยกว่าการชั่งวัตถุในอากาศ

พิจารณากรณีวัตถุจมอยู่ในของเหลวทั้งก้อน ดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 แรงดันเนื่องจากของเหลวที่กระทำต่อวัตถุ  
ที่มา (สสวท, 2563) หน้า 39-40

จากภาพที่ 2.18 ที่ของเหลวระดับเดียวกันจะมีแรงเนื่องจากของเหลวกระทำต่อวัตถุขนาดเท่ากันในทิศตั้งฉากกับผิวของวัตถุ นั่นคือ แรงเนื่องจากของเหลวที่กระทำต่อวัตถุในแนวระดับเดียวกันทางด้านซ้ายและด้านขวาของวัตถุมีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้าม แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุในแนวระดับจึงเป็นศูนย์ ในทำนองเดียวกัน แรงเนื่องจากของเหลวที่กระทำต่อวัตถุในแนวระดับเดียวกันทางด้านหน้าและด้านหลังของวัตถุมีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้าม แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุในแนวระดับจึงเป็นศูนย์ ส่วนแรงเนื่องจากของเหลวที่กระทำต่อวัตถุในแนวตั้งที่บริเวณผิวด้านบนและผิวด้านล่างจะมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากอยู่ในความลึกต่างกัน ที่บริเวณผิวด้านล่างจะอยู่ในของเหลวที่มีความลึกมากกว่า จึงถูกแรงดันเนื่องจากของเหลวกระทำมากกว่าบริเวณผิวด้านบนที่อยู่ในของเหลวที่มีความลึกน้อยกว่า ทำให้ขนาดของแรงที่กระทำต่อวัตถุด้านล่างมีขนาดมากกว่าแรงที่กระทำต่อวัตถุด้านบน แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุจึงอยู่ในทิศทางขึ้น เมื่อรวมแรงที่ของเหลวกระทำต่อวัตถุทั้งหมดจะได้แรงลัพธ์ที่มีทิศทางขึ้น เรียกแรงนี้ว่า แรงพยุง (Buoyant force:  $F_B$ )

จากภาพที่ 2.17 (b) ถ้าวัตถุอยู่นิ่งในน้ำ แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน จะได้สมการที่ 2.23

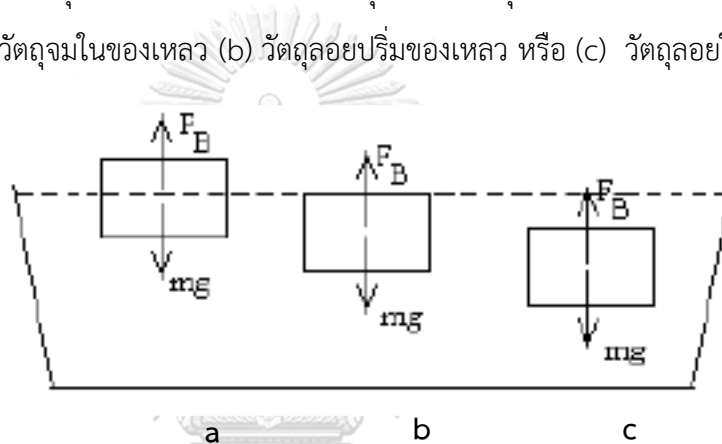
$$\text{แรงพยุง} = \text{น้ำหนักวัตถุที่ชั่งในอากาศ} - \text{น้ำหนักวัตถุที่ชั่งในของเหลว (กิโลกรัม)} \quad (2.23)$$

นักปราชญ์ชาวกรีกชื่อ อาร์คิมิดีส (Archimedes) ได้ศึกษาเกี่ยวกับขนาดของแรงที่เกิดขึ้นในของเหลวที่กระทำต่อวัตถุที่จมอยู่ในของเหลว และสรุปเป็นหลักการเกี่ยวกับแรงพยุงได้ คือ “น้ำหนักวัตถุส่วนที่หายไปเมื่อชั่งในของเหลว จะเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรวัตถุส่วนที่จม” นั่นคือสมการที่ 2.24 และ 2.25

$$\text{แรงพยุง} = \text{น้ำหนักของของเหลวที่ถูกวัตถุแทนที่ (กิโลกรัม)} \quad (2.24)$$

$$\text{หรือ } \text{แรงพยุง} = \text{น้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุในส่วนที่จม (กิโลกรัม)} \quad (2.25)$$

เมื่อนำวัตถุต่าง ๆ ไปวางในของเหลว จะพบว่า วัตถุบางชนิดจมลงในของเหลวทั้งก้อน แต่บางชนิดจมบางส่วนและมีบางส่วนลอยพ้นผิวของของเหลว เมื่อวัตถุเหล่านั้นอยู่ในของเหลวจะมีแรงพยุงกระทำอยู่เสมอ วัตถุที่จมในของเหลวแสดงว่าน้ำหนักของวัตถุมากกว่าแรงพยุงในของเหลว และวัตถุที่ลอยในของเหลวแสดงว่าแรงพยุงในของเหลวมีค่าเท่ากับน้ำหนักของวัตถุ การเพิ่มแรงพยุงสามารถทำได้โดยการทำให้วัตถุแทนที่ของเหลวมีปริมาตรมากขึ้นเป็นผลทำให้วัตถุลอยในของเหลวได้ เช่น ดินน้ำมันซึ่งเป็นวัตถุที่จมน้ำ แต่เมื่อนำมาปั้นเป็นวัตถุที่มีที่ว่างตรงกลาง ทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้น เมื่อวางบนผิวน้ำจะแทนที่น้ำได้มากขึ้น แรงพยุงจึงเพิ่มขึ้น ทำให้ดินน้ำมันลอยน้ำได้ เรือที่ทำด้วยเหล็กสามารถลอยน้ำได้ก็ด้วยเหตุผลเดียวกัน ลักษณะแรงพยุงตัวของวัตถุ ดังแสดงในภาพที่ 2.19 โดย (a) วัตถุลอยบางส่วนของวัตถุจมในของเหลว (b) วัตถุลอยบริมของเหลว หรือ (c) วัตถุลอยในของเหลว



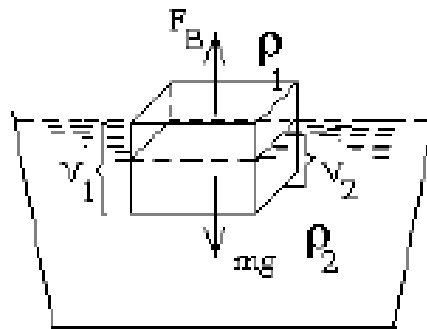
ภาพที่ 2.19 แสดงแรงพยุงตัวของวัตถุ

ที่มา (สสวท, 2563) หน้า 39-40

จากภาพที่ 2.19 (a) ถ้าวัตถุที่ลอยในของเหลวบางส่วนแสดงว่าแรงพยุงในของเหลวมีค่ามากกว่าน้ำหนักของวัตถุ (b) ถ้าวัตถุที่ลอยในของเหลวทั้งหมดแสดงว่าแรงพยุงในของเหลวมีค่าเท่ากับน้ำหนักของวัตถุ และ (c) ถ้าวัตถุที่จมในของเหลวแสดงว่าน้ำหนักของวัตถุมากกว่าแรงพยุงในของเหลว

จากหลักการของอาร์คิมิดีส

- 1) กรณีวัตถุลอย นั่นคือบางส่วนของวัตถุจมในของเหลว ดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 แสดงวัตถุลอย (บางส่วนของวัตถุจมในของเหลว)

ที่มา (สสวท, 2563) หน้า 39-40

จากภาพที่ 2.20 เมื่อวัตถุลอยแสดงว่าแรงพยุงมีค่ามากกว่าน้ำหนักของวัตถุจึงทำให้วัตถุนั้นไม่จมในของเหลวทั้งหมด ซึ่งสามารถคำนวณน้ำหนักของวัตถุและแรงพยุง จากสมการที่ 2.26 และ 2.27

$$\text{น้ำหนักของวัตถุ (กิโลกรัม)} \quad W = mg = \rho_1 g V_1 \quad (2.26)$$

$$\text{แรงพยุง (กิโลกรัม)} \quad F_B = \rho_2 g V_2 \quad (2.27)$$

จากหลักการสมดุล

$$\text{แรงลง (กิโลกรัม)} = \text{แรงขึ้น (กิโลกรัม)}$$

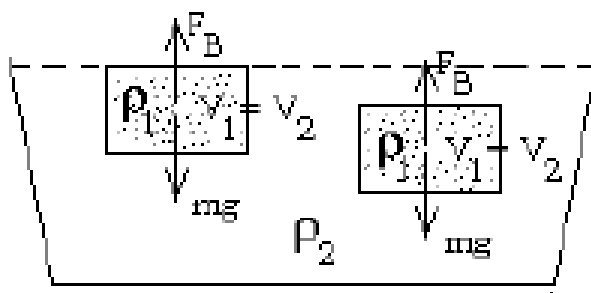
$$mg = F_B$$

$$\rho_1 g V_1 = \rho_2 g V_2$$

ดังนั้น

$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \quad (\text{กิโลกรัม}) \quad (2.28)$$

2) กรณีวัตถุลอยปริ่มของเหลว หรือ วัตถุลอยในของเหลว ดังแสดงในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 แสดงวัตถุลอยปริ่มของเหลว หรือ วัตถุลอยในของเหลว

ที่มา (สสวท, 2563) หน้า 39-40

จากภาพที่ 2.21 เมื่อวัตถุลอยปริ่มของเหลวหรือวัตถุลอยในของเหลว แสดงว่าแรงพยุงในของเหลวมีค่าเท่ากับน้ำหนักของวัตถุ สามารถคำนวณน้ำหนักของวัตถุและแรงพยุงได้ จากสมการที่ 2.29

$$\rho_1 g V_1 = \rho_2 g V_2 \quad (\text{กิโลกรัม}) \quad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.29

$$\text{ปริมาตรของวัตถุ } (V_1) = \text{ปริมาตรส่วนที่จมน } (V_2)$$

$$\text{จะได้} \quad \rho_1 = \rho_2 \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$V$  คือ ปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่ (ลูกบาศก์เมตร)

$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง)

$F_B$  คือ แรงพยุง (นิวตัน)

$W$  คือ น้ำหนักของวัตถุ (กิโลกรัม)

## 2.4 การวัดค่าคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์

### 2.4.1 การแพร่ของค่าคลาดเคลื่อน

เพื่อเป็นการลดความไม่แน่นอนของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ การปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนของค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินสามารถหาได้จากสมการการแพร่ของค่า

คลาดเคลื่อน (Feliciano et al., 2014) โดยคำนวณค่าคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของลำต้น ดังสมการที่ 2.31 และค่าคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม ดังสมการที่ 2.32

$$\frac{\delta AGB_{stem}}{|AGB_{stem}|} = \sqrt{2 \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta WSD}{WSD}\right)^2} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก

$WSD$  คือ ความหนาแน่นจำเพาะของไม้

$$\delta AGB_{Total} = \sqrt{(\delta AGB_{stem})^2 + (\delta AGB_{canopy})^2} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $\delta AGB_{stem}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพของลำต้น

$\delta AGB_{canopy}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพของเรือนยอด

#### 2.4.2 มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ

ค่าคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์สามารถทำได้ด้วยการเปรียบเทียบค่าประมาณมวลชีวภาพจากปริมาตรอ้างอิงของต้นไม้ทดสอบกับผลการคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน โดยใช้ข้อมูลของต้นไม้ในแปลงทดสอบ อ้างอิงด้วย Root mean square error: RMSE (Olagoke et al., 2016) ดังสมการที่ 2.33

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (AGB_{water\ displacement} - AGB_{TLS})^2}{n}} \quad (2.33)$$

เมื่อ  $AGB_{water\ displacement}$  คือ ค่าประมาณมวลชีวภาพที่ได้จากการตัดต้นไม้ในแปลงทดสอบไปแทนที่น้ำ (กิโลกรัม)

$AGB_{TLS}$  คือ ค่าประมาณมวลชีวภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (กิโลกรัม)



### 2.4.3 มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อน

ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์สามารถทำได้ด้วยการเปรียบเทียบค่าประมาณมวลชีวภาพจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน กับค่าประมาณมวลชีวภาพที่ได้จากสมการอัลโลเมตริก อ้างอิงด้วย Root mean square error: RMSE (Olagoke et al., 2016) ดังสมการที่ 2.34

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (AGB_{allometry} - AGB_{TLS})^2}{n}} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $AGB_{allometry}$  คือ ค่าประมาณมวลชีวภาพที่ได้จากสมการอัลโลเมตริก (กิโลกรัม)

$AGB_{TLS}$  คือ ค่าประมาณมวลชีวภาพที่ได้จากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (กิโลกรัม)



## บทที่ 3

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

##### 3.1.1 วิธี Qualitative surface model (QSM)

Raumonen และคณะ (2013) นำเสนอวิธีการใหม่สำหรับการประมาณปริมาตรของลำต้น กิ่งก้านที่รวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำจากข้อมูล พอยท์คลาวด์ที่เก็บรายละเอียดจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน แบบจำลองที่นำรูปทรงกระบอก (QSM) ปรับให้พอดีกับขนาดของลำต้น กิ่งก้านในแต่ละส่วนเพื่อนำมาคำนวณปริมาตรของต้นไม้จึงถูกสร้างขึ้นและต้นไม้ 3 สายพันธุ์ในประเทศฟินแลนด์ถูกนำมาทดสอบกับแบบจำลองนี้ ผลการประมาณปริมาตรมีค่าใกล้เคียงกับปริมาตรจริงสาเหตุของความคลาดเคลื่อนบางส่วนเกิดจากการตรึงค่าพิกัด การเคลื่อนไหวของต้นไม้ขณะทำการสแกนเนื่องจากลมซึ่งสามารถควบคุมและกำจัดออกไปได้ กิ่งก้านที่มีขนาดเท่ากับความละเอียดของการสแกนที่ประมาณ 1 เซนติเมตรทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนด้วยเช่นกัน หากเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณปริมาตรด้วยวิธีอื่น ๆ วิธี QSM ยังคงให้ความสะดวกและได้ผลลัพธ์ที่ยอมรับได้ (Raumonen et al., 2013)

Calders และคณะ (2015) ศึกษาการประมาณค่ามวลชีวภาพของต้นยูคาลิปตัสที่ประเทศออสเตรเลียด้วยวิธีการไม่ตัดต้นไม้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ถูกใช้เก็บข้อมูลทางกายภาพของต้นไม้ โดยเลือกต้นไม้ตัวอย่างทั้งหมด 65 ต้น วิธีการเพื่อประมาณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอนั้นเลือกใช้วิธี Least square circular fitting ส่วนวิธีการประมาณค่าความสูงของต้นไม้ใช้ความต่างระหว่าง พอยท์คลาวด์ที่สูงที่สุด และต่ำที่สุด จากนั้นประมาณค่าปริมาตรของลำต้นด้วยวิธี QSM และนำค่าปริมาตรของลำต้นมาคำนวณร่วมกับค่าความหนาแน่นพื้นฐานเพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพของต้นไม้ และสร้างสมการอัลโลเมตริก ค่ามวลชีวภาพที่ได้จากงานวิจัยถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่ามวลชีวภาพที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (จากการตัดต้นไม้) พบว่า ค่ามวลชีวภาพที่คำนวณจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน มีค่าสูงกว่าค่ามวลชีวภาพจากห้องปฏิบัติการ ที่ร้อยละ 9.68 ซึ่งให้ผลดีกว่าค่ามวลชีวภาพที่ได้จากสมการอัลโลเมตริก ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่ร้อยละ 36.57 – 29.85 (Calders et al., 2015)

### 3.1.2 วิธี Poisson surface reconstruction (PSR)

Kazhdan และคณะ (2006) แสดงวิธีการสร้างพื้นผิวสามมิติจาก พอยท์คลาวด์ด้วยสมการ Poisson จากแนวคิดที่ว่า พอยท์คลาวด์สามมิติที่นำเข้ามาเป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีความแตกต่างของสนามเวกเตอร์ส่วนที่เป็นวัตถุกับไม่ใช่วัตถุ ดังนั้นการหาฟังก์ชันที่แยกส่วนวัตถุและไม่ใช่วัตถุออกจากกันจึงถูกคำนวณขึ้น (Indicator function) อีกทั้งยังพิจารณาาร่วมกับแนวโน้มของฟังก์ชันที่แยกส่วน (Indicator gradient) แล้วจึงสร้าง Watertight จาก พอยท์คลาวด์เป็นพื้นผิวใหม่ที่ถูกปรับให้คล้ายกับพื้นผิวเดิมมากที่สุดมีการทดสอบกับ พอยท์คลาวด์จากประติมากรรมที่เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการทดสอบเพื่อสร้างพื้นผิว เช่น รูปปั้นมังกร , กระจต่าย , พระพุทธรูป , รูปปั้นเดวิด เป็นต้น ความละเอียด (Resolution) ที่ปรากฏบนพื้นผิวถูกกำหนดจากระดับความลึกของ Octree นั่นคือวัตถุที่มีพื้นผิวซับซ้อน ตื้น-ลึกสลับกันไป มีรายละเอียดเล็ก ๆ น้อย ๆ จำนวนมากควรใช้ Octree ที่มีค่าสูง เมื่อนำพื้นผิวที่สร้างจากวิธี Poisson เปรียบเทียบกับวิธี Volumetric Range Image Processing (VRIP) พบว่ารอยย่นของวัตถุมีความคมชัดมากกว่า และบางส่วนของ พอยท์คลาวด์ที่มีความถี่สูงมีการปรับระดับความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างให้มีความราบเรียบต่อเนื่องกับพื้นที่ส่วนอื่นอีกด้วย (Kazhdan et al., 2006)

### 3.1.3 วิธี Screen Poisson surface reconstruction (SPSR)

Kazhdan และคณะ (2013) ได้ทำการวิจัยเพื่อปรับปรุงการสร้างพื้นผิวที่สร้าง watertight จากกลุ่ม พอยท์คลาวด์ของวิธี Poisson โดยเพิ่มคณิตศาสตร์พื้นฐานเพื่อ Screen ข้อมูลที่ไม่ต้องการก่อนเข้าสู่ขั้นตอนสร้างพื้นผิวด้วยวิธี Poisson ที่มีก่อนหน้านี้ เรียกวิธีนี้ว่า Screen Poisson จากหลักการ Screen ข้อมูลนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการประมวลผลและปรับปรุงพื้นผิวที่มีความราบเรียบเกินจริงให้เกิดความคมชัด แยกออกเป็นส่วนๆ ได้ดีขึ้น เพราะวิธี Poisson เดิม ใช้พอยท์คลาวด์ที่นำเข้าทั้งหมดผ่านขั้นตอนต่าง ๆ และสร้างพื้นผิวในครั้งเดียว ไม่แยกส่วนเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนหรือกำจัดข้อมูลที่มีความถี่สูง- ต่ำ มากเกินไปออกก่อน จำเป็นต้องใช้เวลาในการประมวลผลพอควร ฟังก์ชัน Smooth Signed Distance (SSD) ของ Calakli และ Taubin (2011) ถูกนำมาเป็นฟังก์ชัน Screen ในการวิจัยนี้พอยท์คลาวด์จากกลุ่มตัวอย่างประติมากรรมรูปแบบมาตรฐานต่าง ๆ มีจำนวนไม่เท่ากันถูกประมวลผลเพื่อสร้างพื้นผิวจาก 3 วิธี คือ วิธี Wavelet ของ Manson และคณะ (2008) , วิธี Poisson และวิธี Screen Poisson เปรียบเทียบความถูกต้องโดยใช้ค่า RMSE พบว่า วิธี Screen Poisson ให้ความแม่นยำที่คิดว่าทั้งสองวิธี พิจารณาบริเวณขอบของวัตถุ

พบว่า วิธี Wavelet สร้างขอบที่มีความแม่นยำน้อยที่สุด และวิธี Poisson สร้างขอบที่ปรับเรียบเกินจริง (Kazhdan and Hoppe, 2013)

### 3.1.4 วิธีสมการอัลโลเมตริก

#### 3.1.4.1 วิธีของ Komiyama

Komiyama และคณะ (2005) ได้เก็บตัวอย่างพันธุ์ไม้ป่าชายเลนที่จังหวัด พังงา ตราด สตูล และระนอง ในประเทศไทย และที่เมืองฮัลมาฮีรา ประเทศอินโดนีเซีย จำนวน 104 ตัวอย่าง จาก 10 สายพันธุ์ นำข้อมูลความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกสร้างเพื่อสร้างสมการอัลโลเมตริกแบบทั่วไปสำหรับต้นไม้ที่มีภูมิภาคเขตร้อน ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.1 (Komiyama et al., 2005)

$$W_{top} = 0.251\rho D^{2.46} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $W_{top}$  คือ ค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

$D$  คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)

Komiyama และคณะ (2008) ได้รวบรวมสมการอัลโลเมตริกของพันธุ์ไม้ป่าชายเลนในประเทศไทย ซึ่งให้ข้อมูลที่สำคัญเพื่อใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของพันธุ์ไม้ป่าชายเลนโดยไม่ตัดต้นไม้ สำหรับข้อแนะนำการใช้สมการอัลโลเมตริกแบบทั่วไป (Komiyama et al., 2008)

#### 3.1.4.2 วิธีของ Comley

Comley และ McGuinness (2005) ศึกษาเกี่ยวกับพันธุ์ไม้ป่าชายเลนที่ประเทศออสเตรเลีย และพบว่างานวิจัยที่เกี่ยวกับด้านป่าชายเลนจะเน้นที่ความหลากหลายทางสายพันธุ์ ในขณะที่มวลชีวภาพของต้นไม้ป่าชายเลนยังมีการศึกษาไม่มากนัก จึงได้เริ่มเก็บข้อมูลเพื่อหามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน และใต้ดิน รวมถึงสร้างความสัมพันธ์อัลโลเมตริกของต้นไม้ป่าชายเลนจำนวน 4 พันธุ์ ได้แก่ ต้นแสมทะเล (*Avicennia marina*) ต้นพังกาหัวสุมดอกแดง (*Bruguiera exaristata*) ต้นโปรง (*Ceriops australis*) และ ต้นโกงกางทะเล (*Rhizophora stylosa*) ในการเลือกตัวอย่างต้นไม้ จะเลือกต้นที่มีความสมบูรณ์ และสามารถเข้าถึงเพื่อขุด และถอนต้นไม้ได้ ต้นไม้ที่นำมาใช้เป็น

ตัวอย่างต้องมีความสูงไม่ต่ำกว่า 1.30 เมตร โดยมีตัวอย่างต้นแสมทะเล 11 ต้น ต้นพังกาหัวสุมดอกแดง 9 ต้น ต้นโปรง 12 ต้น และต้นโกงกางทะเล 6 ต้น แต่ละต้นจะวัดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางความสูงเพียงอก (DBH) ซึ่งร้อยละ 70 ของต้นไม้ตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกมากกว่า 22 เซนติเมตรขึ้นไป ในกรณีของต้นแสมทะเล การหาน้ำหนักสด (Fresh weights) จะแบ่งส่วนของตัวอย่างออกเป็น ใบ ก้าน ลำต้น แยกซัง และนำเข้าสู่ห้องทดลองเพื่อหาน้ำหนักแห้ง (Dry weights) โดยการอบที่อุณหภูมิ 70 – 80 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักมีความเสถียร ต่อมา หาความสัมพันธ์เพื่อสร้างสมการอัลโลเมตริก ระหว่างลอกการิทึมของน้ำหนักแห้งกับลอกการิทึมของเส้นผ่านศูนย์กลางความสูงเพียงอก จากการศึกษา พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นแสมทะเลมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่  $r^2 = 0.82$  สามารถสร้างสมการอัลโลเมตริกของต้นแสมทะเลได้ ดังสมการที่ 3.2 (Comley and McGuinness, 2005)

$$W_{top} = 0.308 DBH^{2.11} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $W_{top}$  คือ ค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)  
 $DBH$  คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)

### 3.1.4.3 วิธี Laongmanee

Laongmanee (2011) ได้ศึกษาความเหมาะสมของจุดภาพ และดัชนีพืชพรรณที่นำไปใช้วิเคราะห์ดัชนีพื้นที่ใบ รวมถึงการทดสอบเทคนิคต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการประมาณค่ามวลชีวภาพในพื้นที่ป่าชายเลน ตัวอย่างต้นไม้ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางความสูงเพียงอกต่ำกว่า 15 เซนติเมตร โดยผลการศึกษาที่ได้พบว่า รายละเอียดของจุดภาพจากภาพถ่ายดาวเทียมที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ดัชนีพื้นที่ใบ โดยดัชนีที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ ได้แก่ TCT-GVI , EVI และ NDVI โดยมีค่า  $r^2 = 0.824$  , 0.817 และ 0.800 ตามลำดับ ในส่วนการประมาณค่ามวลชีวภาพ ดัชนีที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง ได้แก่ EVI , NDVI และ TCT-GVI โดยมีค่า  $r^2$  0.540 , 0.500 และ 0.460 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ปรับสมการอัลโลเมตริกแบบทั่วไปของ Komiyama et al. (2005) ให้มีความเหมาะสมกับต้นแสมทะเลในพื้นที่ศึกษา ดังสมการที่ 3.3 (Laongmanee, 2011)

$$W_{top} = 0.251\rho D^{2.24} \quad (3.3)$$

เมื่อ	$W_{top}$	คือ ค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
	$\rho$	คือ ค่าความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	$D$	คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)

#### 3.1.4.4 วิธีของ Patil

Patil และคณะ (2014) ได้ประมาณค่ามวลชีวภาพของต้นแสมทะเล พื้นที่ศึกษาเมืองมูไบ ประเทศอินเดีย ด้วยการปรับปรุงแบบจำลองมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน เพื่อประมาณค่าคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับภูมิภาค การประมาณค่ามวลชีวภาพใช้วิธีการสองวิธี ได้แก่ วิธีการประมาณค่ามวลชีวภาพโดยตรง ด้วยการตรวจวัดค่าคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN) ของต้นแสมทะเล และวิธีการประมาณค่าทางอ้อม จากแบบจำลองมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่สร้างจากการเก็บข้อมูลจากตัวอย่าง 110 ตัวอย่าง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางความสูงเพียงอกระหว่าง 14 – 21 เซนติเมตร จำนวน 75 ตัวอย่าง จากนั้น ประมาณค่าคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่ตัวอย่าง และสร้างแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์จากค่าประมาณด้วยวิธีการ Kriging แบบจำลองมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ได้รับการปรับปรุง แสดงในสมการที่ 3.4 โดยมีค่า  $r^2 = 0.94$  (Patil et al., 2014)

$$W_{top} = 0.3404 DBH^{2.0273} \quad (3.4)$$

เมื่อ	$W_{top}$	คือ	ค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
	$DBH$	คือ	ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)

#### 3.1.4.5 วิธีของ กฤษณาน

Intarat and Vaiphasa (2019) ได้ใช้ตัวอย่างต้นไม้ป่าชายเลนเขตร้อนพันธุ์แสมทะเล (*Avicennia marina*) ในพื้นที่ตำบลบางปู อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ เก็บรายละเอียดตัวอย่างจำนวน 30 ต้น ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน นำมาคำนวณปริมาตรของลำต้นโดยแยกออกเป็นท่อนตามบริเวณที่มีรูปทรงแบบ Frustum of paraboloid จะได้ปริมาตรของลำต้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.03-0.53 ลูกบาศก์เมตร จากนั้นนำปริมาตรของลำต้นคูณกับความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ (600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ผลลัพธ์ที่ได้คือค่ามวลชีวภาพลำต้น การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลได้จากการนำมวลชีวภาพลำต้นคูณค่าสัมประสิทธิ์การ

ปรับแก้เรือนยอด (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) ผลจากการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางความสูงเพียงอกที่ได้จากการวัดในภาคสนาม ถูกนำมาใช้สร้างแบบจำลองมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเล โดยใช้ความสัมพันธ์แบบยกกำลังได้แบบจำลองตั้งสมการที่ 3.5 (Intarat and Vaiphasa, 2020; กฤษฎาณ, 2561)

$$AGB_{t1s} = 0.0274 DBH^{2.862} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $AGB_{t1s}$  คือ มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเล (กิโลกรัม)

$DBH$  คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)

### 3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการหาปริมาตรด้วยการแทนที่น้ำ

Rabier และคณะ (2006) ทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาค pellets และ briquettes จำนวน 15 ตัวอย่าง โดยใช้วิธี Stereometric วัดขนาดของตัวอย่างละเอียดถึง 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักด้วยความละเอียด 0.0001 กรัม วัดซ้ำอย่างน้อยสองครั้งสำหรับตัวอย่างแต่ละชิ้นและใช้วิธี Hydrostatic ด้วยการแทนที่ตัวอย่างในน้ำบริสุทธิ์ (เคลือบพาราฟินและไม่เคลือบพาราฟินบนตัวอย่าง) และในน้ำที่มีส่วนผสมของสารลดฟองอากาศ สารลดแรงตึงผิวรอบผิวตัวอย่าง (ตัวอย่างไม่เคลือบพาราฟิน) ผลการทดสอบพบว่า วิธี Stereometric นั้นไม่ค่อยดีนัก มีความแปรปรวนที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับวิธี Hydrostatic การแทนที่ในน้ำไม่ว่าตัวอย่างจะเคลือบพาราฟินหรือไม่มีการเคลือบมีผลลัพธ์ที่คล้ายกัน การทดสอบแบบทำซ้ำหลายๆ ครั้ง (ISO 5725.2) พบว่า ปริมาณของพาราฟินมีปริมาณค่อนข้างน้อย ไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับปริมาตรของตัวอย่างแต่ละชิ้น (Rabier et al., 2006)

Yip และคณะ (2012) ศึกษาการประเมินปริมาณเต้านมอย่างแม่นยำสำหรับการศึกษาเปรียบเทียบปริมาตรมาตรฐาน (การวัดชิ้นงานจากผู้ป่วยมะเร็งเต้านมด้วยการแทนที่ของน้ำโดยตรง) ด้วยเทคนิคการสแกนด้วยเลเซอร์ 3 มิติ การวัดปริมาตรโดยตรงของเนื้อเยื่อเต้านมจากการการผ่าตัดมะเร็งเต้านมโดยใช้วิธีแทนที่น้ำสามารถอธิบายได้ว่าเป็น “ปริมาตรมาตรฐาน” เป็นเกณฑ์ที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดปริมาตรเต้านมเฉพาะผู้ป่วยที่ถูกตัดเต้านมออกเท่านั้น ผลลัพธ์พบว่าจากการวัด 39 หน้าอกในผู้หญิง 30 คน แสดงให้เห็นว่ามีค่าความสัมพันธ์ที่ดี (ค่าสหสัมพันธ์แบบ Pearson:  $r = 0.95, P < 0.001$ ) ระหว่าง ปริมาตรการสแกนก่อนผ่าตัดและปริมาตรของ

มะเร็งเต้านมที่ทดสอบจากการแทนที่ด้วยน้ำ แต่มีแนวโน้มว่าปริมาตรจากการสแกนมากกว่าปริมาตรของมะเร็งเต้านม (Yip et al., 2012)

Robert และคณะ (2019) ได้ทำงานวิจัยโดยใช้วิธีประยุกต์การแทนที่น้ำ (Modified water displacement method, MWDM) และใช้ควบคู่กับวิธีเรขาคณิต (Geometry method, GEM), วิธีการล้น (Overflow method, OFM) และวิธีการแทนที่น้ำ (Water displacement method, WDM) สำหรับการหาปริมาตรทั้งก้อนของของแข็งที่มีรูพรุน (Porous solid) จากการทดสอบกับข้อมูลที่ได้จากวิธี Suspension / Buoyancy (SBM) ที่ใช้เป็นมาตรฐานพบว่าวิธีการ MWDM มีความถูกต้องและความแม่นยำสูงมาก จากความสามารถในการทำซ้ำซึ่งเป็นที่ยอมรับในการทดสอบทั่ว ๆ ไป เทคนิคการแทนที่น้ำนี้คุ้มค่าและง่ายต่อการใช้งาน สามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุที่มีลักษณะทางกายภาพได้หลากหลายรูปแบบโดยไม่ต้องใช้ต้นทุนสูงและอุปกรณ์ที่ซับซ้อน (Robert et al., 2019)





## บทที่ 4

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ การทดสอบการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ทดสอบจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับมวลชีวภาพจากการตัดต้นไม้และการเปรียบเทียบความถูกต้องของการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ป่าชายเลนเขตร้อนจากการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับแบบจำลองมวลชีวภาพดั้งเดิม แผนการดำเนินงานเก็บข้อมูลภาคสนาม ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงแผนภูมิการเก็บข้อมูลภาคสนาม

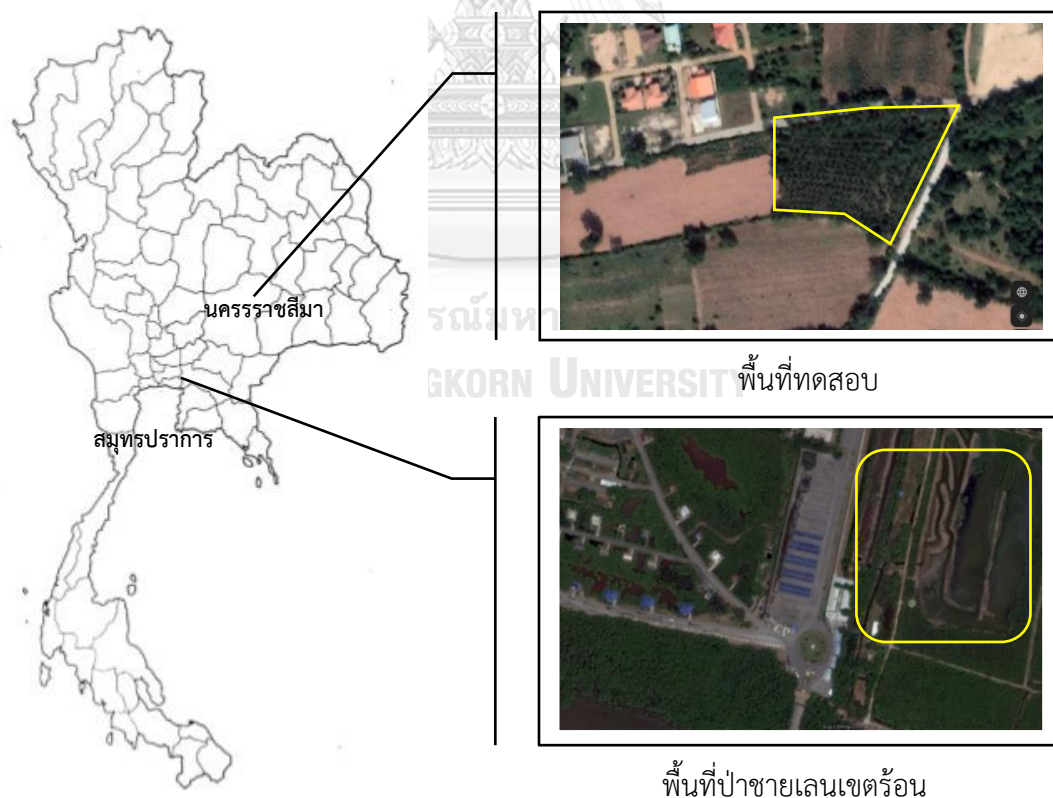
จากภาพที่ 4.1 การเก็บข้อมูลภาคสนามของพื้นที่ศึกษาดำเนินงานเป็นสองส่วนคือ เก็บข้อมูลในพื้นที่ทดสอบแปลงปลูกต้นยูคาลิปตัสและพื้นที่ป่าชายเลนเขตร้อน

#### 4.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาส่วนแรกเลือกใช้พื้นที่ทดสอบที่สามารถตัดต้นไม้เพื่อนำมาคำนวณมวลชีวภาพได้อย่างสะดวก เลือกใช้พื้นที่แปลงปลูกต้นยูคาลิปตัส จากแปลงปลูกในพื้นที่ บ้านบุ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา มีระยะปลูก 2.5X3.5 เมตร จำนวน 4 แถว แถวละ 4 กอ กลุ่มตัวอย่างเป็นไม้ที่เกิดจากการไถหน่อหลังจากตัดต้นหลักแล้วประมาณ 1 ปี ลักษณะเป็นกอ แต่ละกอมีลำต้นประมาณ 2-5 ลำต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 4.5 – 12.0 เซนติเมตร ความสูงอยู่ในช่วง 6.0-10.0 เมตร เกษตรกรใช้ประโยชน์เพื่อเป็นไม้ใช้สอย ทำรั้ว เสื่อ ใช้ในการก่อสร้างต่าง ๆ ลำต้นที่มีขนาดเล็กใช้ทำฟืน เมาถ่าน ถ่านไม้ยูคาลิปตัสใช้เป็นเชื้อเพลิงดีไฟได้ดีและมีขี้เถ้าน้อย ส่วนต้นที่มีลำ

ต้นไม้ตรงเกษตรกรจะตัดส่งโรงงานเพื่อแปรรูปและสับทำชิ้นไม้สับนำส่งไปจำหน่ายให้กับโรงงานเยื่อกระดาษทั้งในประเทศและต่างประเทศ พื้นที่แปลงทดสอบแสดงในภาพที่ 4.2

พื้นที่ศึกษาส่วนที่สองใช้พื้นที่ป่าชายเลนเขตร้อนจากพื้นที่ศูนย์ศึกษาธรรมชาติกองทัพบก (บางปู) เฉลิมพระเกียรติ 72 พรรษา มหาราชินี ตำบลบางปู อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ อยู่ในเขตชุมชนเมืองและอุตสาหกรรมบางปู โดยพื้นที่ดังกล่าวใช้เป็นสถานที่พักผ่อนให้แก่ทหาร และกองทุนสัตว์ป่าโลก (World Wide Fun: WWF) ประเทศไทย เป็นผู้จัดการโครงการรวมถึงการพัฒนาพื้นที่จากพื้นที่นาทุ่งทั้งร้างถูกลักลอบเข้ามาใช้ประโยชน์อย่างไม่ถูกต้อง พันธุ์ไม้ป่าชายเลนเขตร้อนที่โดดเด่นในพื้นที่ศึกษา คือ ต้นแสมทะเล (*Avicennia marina*) โดยมีช่วงอายุที่ต่างกันออกไป ลักษณะพื้นที่เป็นตะกอนปากแม่น้ำ ได้รับอิทธิพลโดยตรงจากน้ำขึ้น น้ำลงจากอ่าวไทย พื้นที่ได้รับการปรับปรุง ขุดลอกคลอง และพัฒนาเส้นทางศึกษาธรรมชาติ ทั้งสร้างสะพานไม้ และแนวถนนคอนกรีต โดยสภาพพื้นที่ปัจจุบันมีสภาพใกล้เคียงกับป่าชายเลนธรรมชาติ (Intarat and Vaiphasa, 2019) พื้นที่ป่าชายเลนเขตร้อนแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แสดงพื้นที่ทดสอบและพื้นที่ป่าชายเลนเขตร้อน

จากภาพที่ 4.2 ภาพด้านขวาบนแสดงพื้นที่แปลงปลูกต้นยูคาลิปตัส จากแปลงปลูกในพื้นที่บ้านบุ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และภาพด้านขวาล่าง พื้นที่ป่าชายเลนเขตร้อนจากพื้นที่ศูนย์ศึกษาธรรมชาติกองทัพบก (บางปู) เฉลิมพระเกียรติ 72 พรรษา มหาราชินี ตำบลบางปู อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ

#### 4.2 การเก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ( Terrestrial laser scan , TLS )

การเก็บข้อมูลจะใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ของ Topcon รุ่น GLS2000 มีรายละเอียดคุณสมบัติเชิงเทคนิคที่ผ่านความต้องการขั้นต่ำในการทำงานเก็บข้อมูลต้นไม้ในป่า (Maas et al., 2008) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และซอฟต์แวร์ MAGNET Collage สำหรับการประมวลผลข้อมูลพอยท์คลาวด์ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทที่อปคอนอินสทรูเมนต์ (ไทยแลนด์)

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน Topcon รุ่น GLS 2000

คุณสมบัติ	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
ช่วงคลื่น	Near Infrared (1,064 มิลลิเมตร)
อุปกรณ์พิเศษ	กล้องถ่ายภาพในตัวและหน้าจอสัมผัส
น้ำหนัก	10 กิโลกรัม

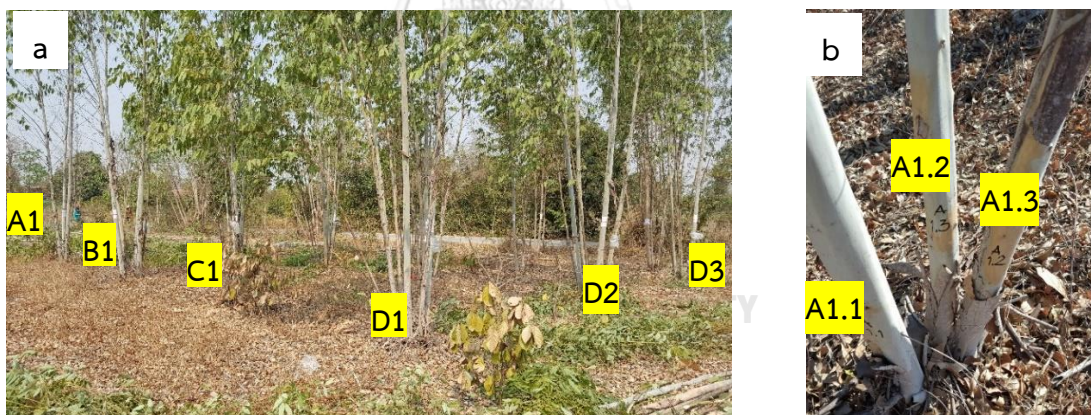
จากตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน Topcon รุ่น GLS 2000 ประกอบด้วย คลาสเลเซอร์ 3R ที่ปลอดภัยต่อดวงตา ขอบเขตการมองเห็น แนวนอน 360 องศา แนวตั้ง 270 องศา ระยะการเก็บข้อมูลไม่เกิน 210 เมตร ความละเอียดการสแกน ขนาดจุด 4

มิลลิเมตร ระยะห่างจุด 3.1 มิลลิเมตร ต่อ 10 เมตร อัตราการสแกน 120,000 จุดต่อวินาที ใช้ช่วงคลื่น Near Infrared 1,064 มิลลิเมตร มีอุปกรณ์พิเศษคือกล้องถ่ายภาพในตัวและหน้าจอสัมผัส มีน้ำหนัก 10 กิโลกรัม

#### 4.2.1 พื้นที่ทดสอบ

##### 4.2.1.1 เลือกต้นไม้ตัวอย่าง

ต้นยูคาลิปตัสในแปลงทดสอบ ที่ปลูกด้วยระยะห่างประมาณ 2.5x3.5 เมตร จำนวน 4 แถว แต่ละแถวมี 4 กอ ลักษณะเป็นกอเกิดจากการการตัดต้นหลักออกเพื่อนำไปใช้งานแล้วปล่อยให้แตกหน่อ ตัดแต่งให้เหลือเพียงกอละ 2-5 ลำต้น เพื่อลำต้นเจริญเติบโตได้เหมาะสมในการใช้งานด้านต่าง ๆ ต้นไม้ตัวอย่างอายุประมาณ 2 ปี จำนวน 41 ลำต้น โดยกำหนดรหัสเรียงตามแถวจาก A-D ในแต่ละแถวมีจำนวน 4 กอ ใช้รหัสเป็นตัวเลข 1-4 เช่น แถว A กอที่ 1 ใช้รหัส A1 ดังแสดงในภาพที่ 4.3 a ในกอ A1 มี 3 ลำต้น ใช้ตัวเลข 1-3 ตามหลังจุดทศนิยม เช่น ใช้รหัส A1.1 แทนลำต้นที่ 1 ใช้รหัส A1.2 แทนลำต้นที่ 2 และ ใช้รหัส A1.3 แทนลำต้นที่ 3 ดังแสดงในภาพที่ 4.3 b จากนั้นเก็บข้อมูลจุดพิกัดสามมิติต้นไม้กลุ่มต้นไม้ตัวอย่างด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน



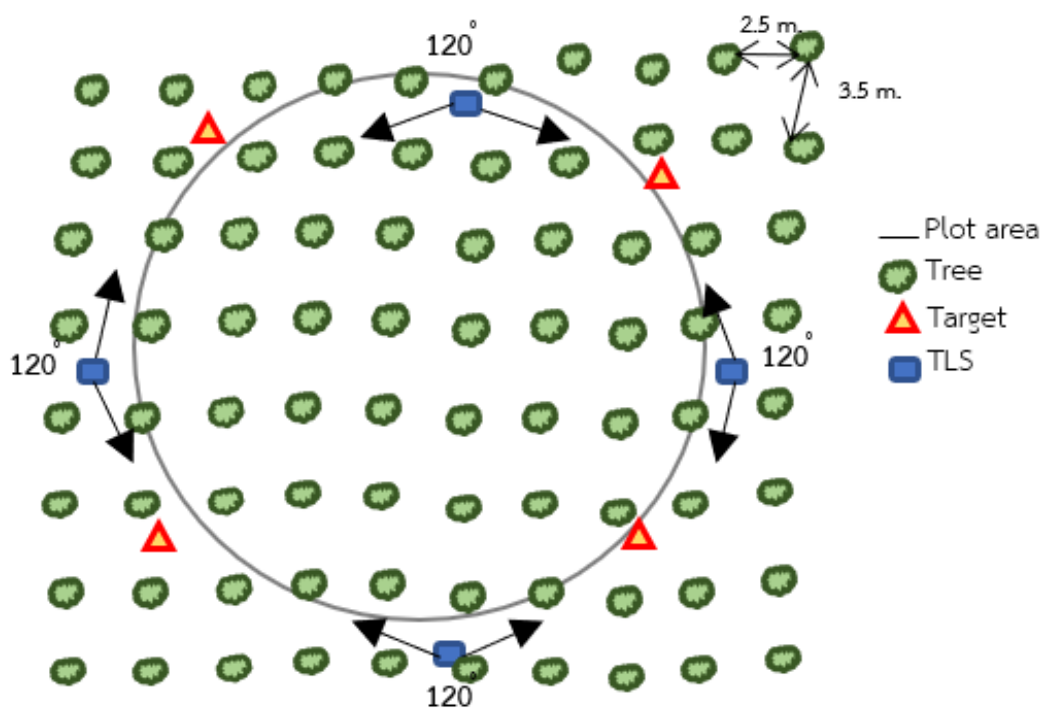
ภาพที่ 4.3 แสดงการใช้รหัสสำหรับต้นยูคาลิปตัสจากแปลงทดสอบ

จากภาพที่ 4.3 a แสดงการใช้รหัสเรียงตามแถวจาก A-D และตัวเลข 1-4 แทนจำนวนกอในแต่ละแถว เช่น แถว A กอที่ 1 ใช้รหัส A1 , แถว B กอที่ 1 ใช้รหัส B1 , แถว C กอที่ 1 ใช้รหัส C1 , แถว D กอที่ 1 ใช้รหัส D1 , แถว D กอที่ 2 ใช้รหัส D2 และแถว D กอที่ 3 ใช้รหัส D3 ภาพที่ 4.3 b แสดงการใช้รหัสสำหรับแต่ละลำต้นที่เกิดจากกอเดียวกัน โดยใช้ตัวเลขตามหลังจุดทศนิยม เช่น ใน

กอ A1 มี 3 ลำต้น ใช้รหัส A1.1 แทนลำต้นที่ 1 ใช้รหัส A1.2 แทนลำต้นที่ 2 และ ใช้รหัส A1.3 แทนลำต้นที่ 3

#### 4.2.1.2 เลือกตำแหน่งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินและเป้าอ้างอิง

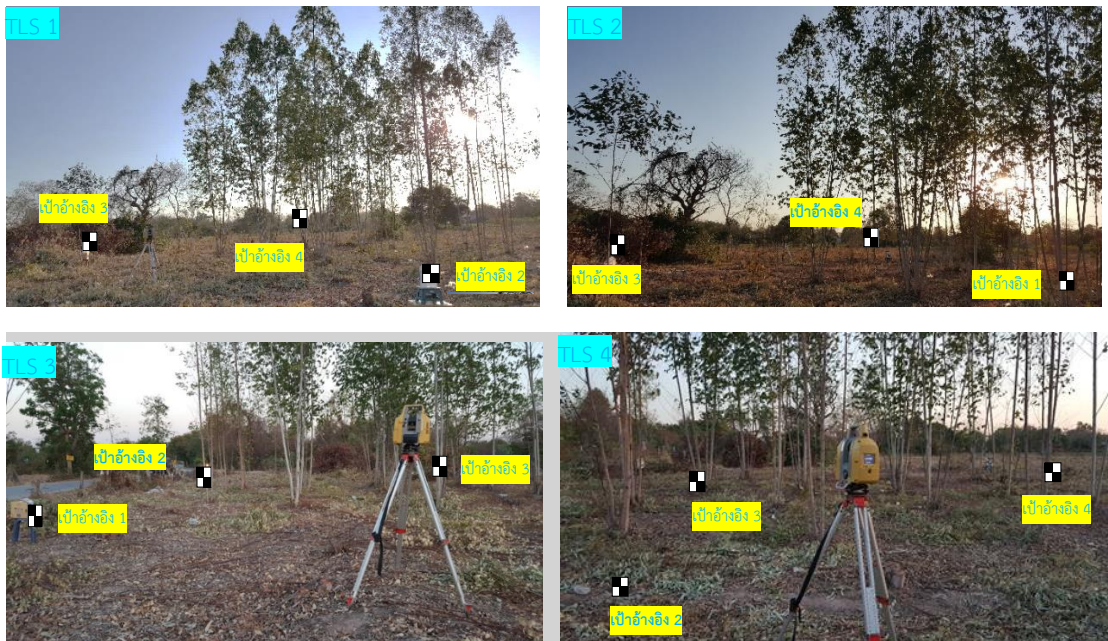
การปลูกต้นยูคาลิปตัสในแปลงทดสอบมีการปลูกด้วยระยะห่างระหว่างแถวและกอที่สม่ำเสมอเพื่อสะดวกในการบำรุงรักษา การกำจัดวัชพืชออกจากแปลงปลูกอย่างสม่ำเสมอทำให้สภาพพื้นที่ในแปลงทดสอบมีสภาพโล่ง มีการบดบังน้อย ตำแหน่งเป้าอ้างอิงเลือกตั้งเป้าที่มุมทั้ง 4 มุมของกลุ่มตัวอย่าง ตำแหน่งตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน อยู่ระหว่างเป้าอ้างอิง 2 เป้า ดังแสดงในภาพที่ 4.4 , 4.5 และ 4.6 โดยในแต่ละครั้งของการสแกนต้องเก็บข้อมูลเป้าอ้างอิงอย่างน้อย 3 เป้า การเก็บข้อมูลในแปลงทดสอบนี้ตั้งเครื่องมือจำนวน 4 ครั้ง ใช้เป้าอ้างอิง 4 เป้า



ภาพที่ 4.4 แสดงจุดตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินและเป้าอ้างอิงในแปลงทดสอบ (ยูคาลิปตัส)

จากภาพที่ 4.4 การตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ที่อยู่ระหว่างจุดตั้งเป้าอ้างอิง 2 เป้า เพื่อเก็บตำแหน่งของเป้าไม่น้อยกว่า 3 เป้าและเก็บข้อมูลของต้นไม้ได้อย่างสมบูรณ์ในทุก ๆ ด้าน





ภาพที่ 4.5 แสดงตำแหน่งตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ตำแหน่งที่ 1 ถึง 4 เพื่อเก็บรายละเอียดต้นไม้ในแปลงทดสอบ

จากภาพที่ 4.5 ตำแหน่งการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ตำแหน่งที่ 1 ถึง 4 ที่สามารถเก็บตำแหน่งของเป้าอ้างอิงได้ไม่น้อยกว่า 3 เป้า และ เก็บรายละเอียดของต้นไม้ทดสอบจากแปลงปลูกได้อย่างสมบูรณ์ ตำแหน่งการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ตำแหน่งที่ 1 แสดงในภาพด้านซ้ายบน ตำแหน่งการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ตำแหน่งที่ 2 แสดงในภาพด้านขวาบน ตำแหน่งที่ 3 แสดงในภาพด้านซ้ายล่าง และตำแหน่งการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ตำแหน่งที่ 4 แสดงในภาพด้านขวาล่าง



ภาพที่ 4.6 แสดงพอยท์คลาวด์จากตำแหน่งตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ตำแหน่งที่ 1 ถึง 4

จากภาพที่ 4.6 พอยท์คลาวด์ของต้นยูคาลิปตัสในแปลงทดสอบจากการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ตำแหน่งที่ 1 แสดงในภาพด้านซ้ายบน พอยท์คลาวด์จากตำแหน่งที่ 2 แสดงในภาพด้านขวาบน พอยท์คลาวด์จากตำแหน่งที่ 3 แสดงในภาพด้านซ้ายล่าง และพอยท์คลาวด์จากตำแหน่งที่ 4 แสดงในภาพด้านขวาล่าง

#### 4.2.1.3 Register ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติพหุ (Multiple point cloud) ให้เป็นจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว (Single point cloud)

วิธีการ Register จะใช้เป้าหมายอ้างอิงจากพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการสแกนในภาพที่ 4.6 เพื่อ Merge ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติ และคำนวณค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของระยะทางในแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ระหว่างเป้าหมายแต่ละเป้าหมาย โดยค่า RMSE ไม่ควรเกิน 0.08 เมตร (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014) จากนั้น Merge ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติทั้งหมดและแปลงให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว ดังแสดงในภาพที่ 4.7





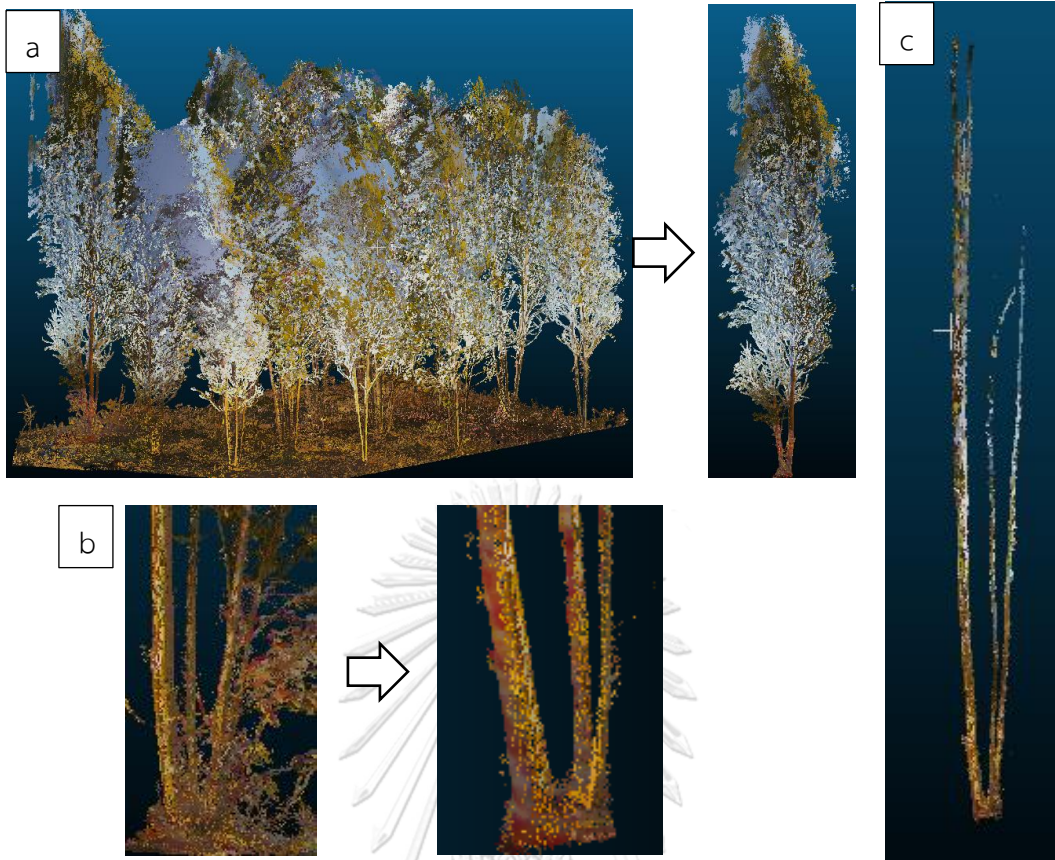
ภาพที่ 4.7 แสดงผลการแปลงพอยท์คลาวด์เป็นจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว

จากภาพที่ 4.7 เป็นข้อมูลจุดพิกัดสามมิติที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน จำนวน 4 สถานี เมื่อนำมา Register และรวมข้อมูลเพื่อแปลงข้อมูลให้เป็นจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว ชุดข้อมูลจุดพิกัดทั้ง 4 ชุด จะถูกรวมต่อกันอ้างอิงจากเป้าหมายอ้างอิง งานวิจัยนี้ การ Register ถูกกำหนดให้มีค่า RMSE ของระยะทางในแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ระหว่างคู่ของเป้าอ้างอิงต่ำกว่า 0.01 เมตร หากค่า RMSE มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด จะต้องเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผลใหม่

#### 4.2.1.4 เลือกจุดพิกัดสามมิติสำหรับการประมวลผลข้อมูล

เนื่องจากจุดพิกัดอ้างอิงเชิงเดี่ยวที่ได้จากการ Register และ Merge นั้น มีข้อมูลอื่น ๆ ที่ไม่ได้นำมาใช้ในการประมวลผลรวมอยู่ จำเป็นต้องลบออก เหลือเพียงข้อมูลส่วนลำต้น ดังแสดงในภาพที่ 4.8





ภาพที่ 4.8 (a) จุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยวถูกแยกข้อมูลออกเป็นแต่ละกอ (b) ลบจุดพิกัดสามมิติของต้นไม้ตัวอย่างในส่วนที่ไม่เกี่ยวข้อง เช่น ใบ ก้านขนาดเล็ก ที่แสดงในภาพที่ 4.8 b ให้เหลือเพียงส่วนลำต้นดังภาพที่ 4.8 c เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ขั้นต่อไป

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาพที่ 4.8 (a) จุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยวถูกแยกข้อมูลออกเป็นแต่ละกอ

จากนั้นลบจุดพิกัดสามมิติของต้นไม้ตัวอย่างในส่วนที่ไม่เกี่ยวข้อง เช่น ใบ ก้านขนาดเล็ก ที่แสดงในภาพที่ 4.8 b ให้เหลือเพียงส่วนลำต้นดังภาพที่ 4.8 c เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการในขั้นตอนต่อไป

#### 4.2.2 พื้นที่ป่าชายเลนเขตร้อน

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เน้นการเก็บข้อมูลลำต้นของต้นไม้ป่าชายเลนเขตร้อน พันธุ์เสมทะเล (*Avicennia marina*) เลือกทำการเก็บข้อมูลด้วยวิธี Individual tree modelling ใช้วิธีเก็บข้อมูลแบบ Multi-scan เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดสิ่งกีดขวาง โดย พอยท์คลาวด์ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจะถูกนำเข้าสู่การประมวลผลเพื่อทำการรวมข้อมูลพอยท์คลาวด์ให้เป็นข้อมูล 3 มิติ ดังนี้

#### 4.2.2.1 กำหนดพื้นที่เก็บตัวอย่างข้อมูลแบบเจาะจง

สภาพพื้นที่ตัวอย่างโดยทั่วไปมีสภาพเป็นพื้นดินเลนมีความแน่นในขณะที่ย่ำลง สามารถตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินได้ และลักษณะทางภาพของต้นไม้มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งพื้นที่เก็บข้อมูลต้นไม้ในศูนย์ศึกษาธรรมชาติกองทัพบกบางปูที่สามารถเดินทางเข้าถึงได้ พบอยู่บริเวณฝั่งคลองตรงข้ามสะพานแขวนบางปู (ภาพที่ 4.9) โดยบริเวณดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่ต้นเสมหะเลเจริญเติบโต ขึ้นอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม และมีพื้นดินที่แข็ง สามารถนำเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินและเป่าอ่างอิง ไปตั้งสถานีเก็บข้อมูลเพื่อดำเนินงานวิจัยได้



ภาพที่ 4.9 (a) พื้นที่เก็บข้อมูลต้นไม้ตัวอย่างตั้งอยู่บริเวณฝั่งคลองตรงข้ามสะพานแขวน (b) พื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณที่ต้นเสมหะเลขึ้นเจริญเติบโตรวมกันเป็นกลุ่มและมีสภาพดินแห้ง สามารถเข้าพื้นที่เก็บข้อมูลได้

ที่มา (กฤษณญาณ, 2561)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

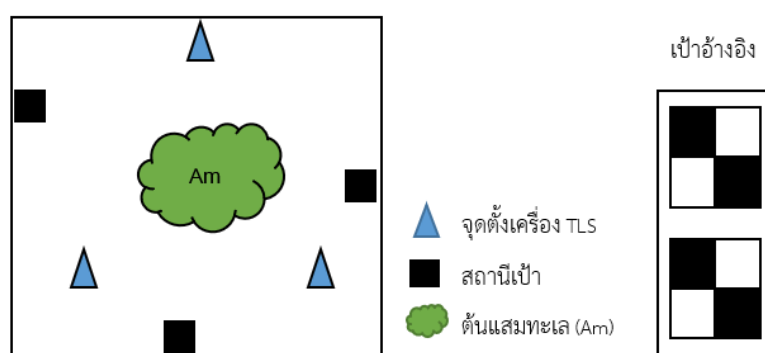
จากภาพที่ 4.9 a, b ต้นเสมหะเลบริเวณฝั่งคลองตรงข้ามสะพานแขวนในพื้นที่ศูนย์ศึกษาธรรมชาติกองทัพบก (บางปู) ที่กำลังเจริญเติบโตเป็นกลุ่มแต่ยังมีความหนาแน่นไม่มากนัก พื้นดินมีสภาพแข็งเพียงพอสำหรับตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน และเป่าอ่างอิงเพื่อเก็บรายละเอียดได้

#### 4.2.2.2 เลือกกลุ่มตัวอย่างในการเก็บข้อมูลแบบสุ่ม (Random sampling)

ใช้การสุ่มต้นไม้ตัวอย่างเพื่อเก็บข้อมูลจำนวน 32 ต้น โดยกำหนดให้ต้นไม้ตัวอย่างมีรหัส AM01 – AM32 และเก็บข้อมูลจุดพิกัดสามมิติต้นไม้ตัวอย่างทุกต้นด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน

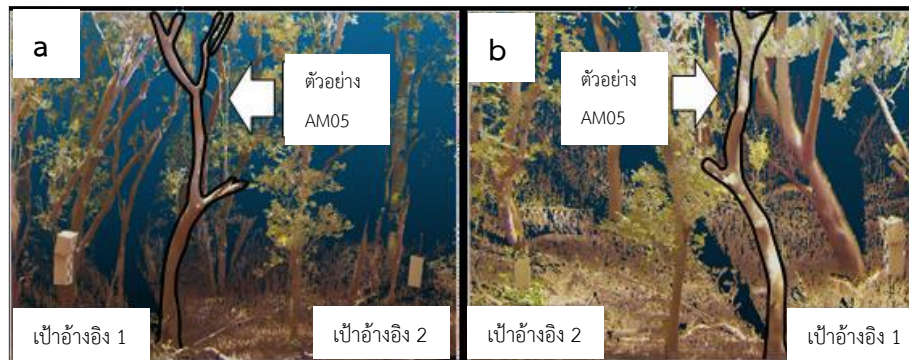
#### 4.2.2.3 ตั้งสถานีเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน และเป้าอ้างอิง

สแกนตัวอย่างเพื่อเก็บข้อมูลจุดพิกัดสามมิติของต้นแสมทะเลแบบรายต้น ในแต่ละครั้งของการสแกน ต้องสามารถเก็บข้อมูลเป้าหมายอ้างอิงได้จำนวนอย่างน้อย 4 เป้าหมาย ดังแสดงในภาพที่ 4.10 สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เป้าหมายอ้างอิงจำนวน 2 สถานี โดยแต่ละสถานีมีเป้าหมายอ้างอิงจำนวน 2 เป้า ตัวอย่างจุดพิกัดสามมิติของต้นไม้ตัวอย่าง AM 05 แสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.10 การตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน เพื่อเก็บข้อมูล พอยท์คลาวด์ต้องให้สามารถเก็บข้อมูลเป้าอ้างอิงได้ 2 สถานีเป็นอย่างน้อยต่อการสแกน 1 ครั้ง สถานีเป้าอ้างอิง มีจำนวน 2 เป้า ต่อหนึ่งสถานี  
ที่มา กฤษญาณ,2561

จากภาพที่ 4.10 การตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ที่อยู่ระหว่างจุดตั้งเป้าอ้างอิงแบบเป้าคู่ 2 สถานี เพื่อเก็บตำแหน่งของเป้าไม่น้อยกว่า 3 เป้าและเก็บรายละเอียดของต้นแสมทะเลได้อย่างสมบูรณ์ในทุก ๆ ด้าน จำนวนของการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน อาจจะเป็นไปได้ที่มีจำนวนน้อยกว่าการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ในพื้นที่ทดสอบเนื่องจากสภาพพื้นดิน การถูกบดบังด้วยพืชพันธุ์ไม้พุ่มเตี้ยที่เติบโตโดยธรรมชาติ ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นอุปสรรคสำหรับงานสนาม



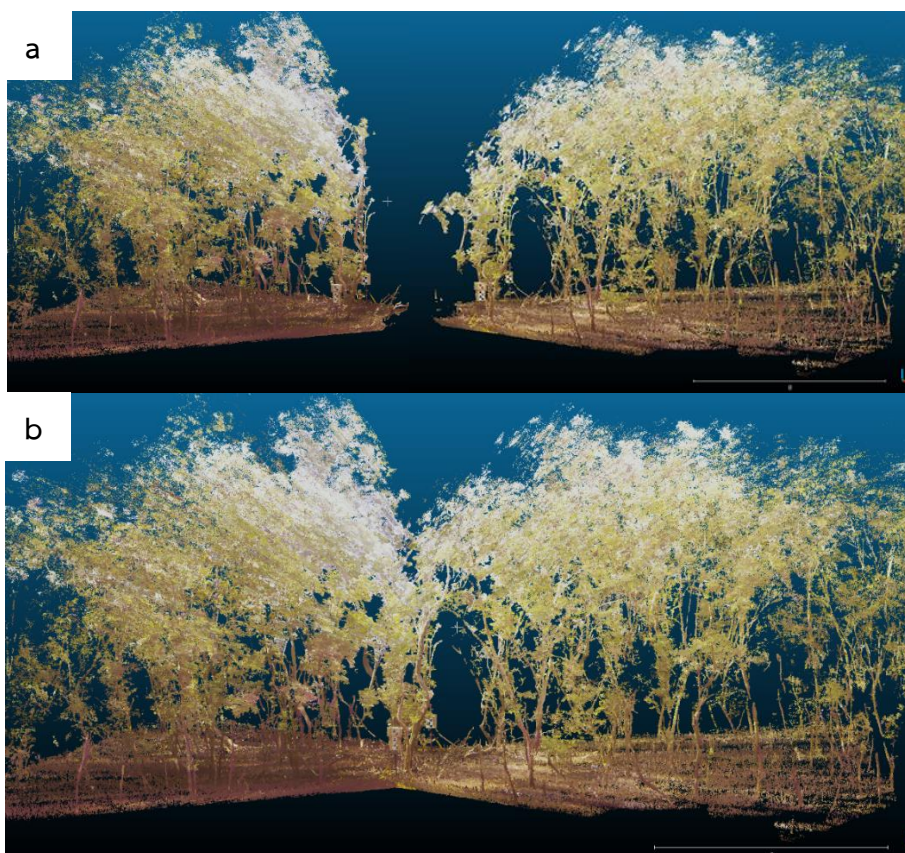
ภาพที่ 4.11 (a) ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติของตัวอย่าง AM05 ที่ได้จากสถานีเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน 1 และ (b) สถานีเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน 2  
ที่มา กฤษฎาณ, 2561

จากภาพที่ 4.11 แสดงตัวอย่างพอยท์คลาวด์ของต้นแสมทะเลตัวอย่างหมายเลข AM05 จากสถานีเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน จำนวน 2 สถานี ตั้งอยู่สถานีละฝั่งของต้นไม้ตัวอย่าง และมีสถานีเป้าอ้างอิงจำนวน 2 สถานี (สถานีละ 2 เป้า) ในการสแกนข้อมูลต้นไม้ จะหมุนเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ให้ครอบคลุมสถานีเป้าหมายอ้างอิง และต้นไม้ตัวอย่าง

#### 4.2.2.4 Register ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติพหุ (Multiple point cloud) ให้เป็นจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว (Single point cloud)

วิธีการ Register จะใช้เป้าหมายอ้างอิงในข้อมูลที่ได้จากการสแกนเพื่อ Merge ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติ และคำนวณค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของระยะทางในแกน x y และ z ระหว่างเป้าอ้างอิงแต่ละเป้า โดยค่า RMSE ไม่ควรเกิน 0.08 เมตร (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014) จากนั้น Merge ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติทั้งหมดและแปลงให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว ดังภาพที่ 4.12



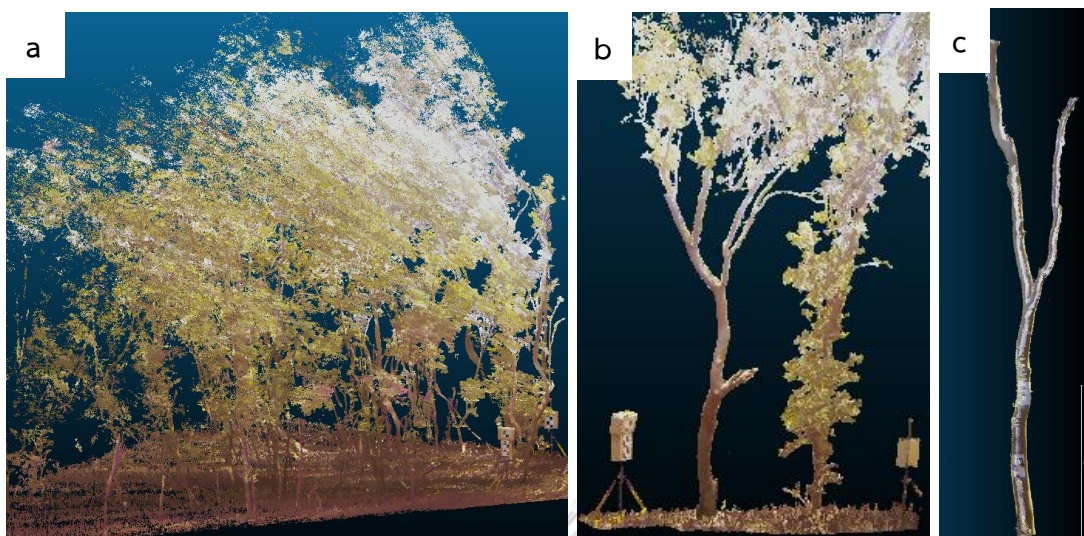


ภาพที่ 4.12 (a) การนำจุดพิกัดสามมิติ 2 ชุด ประมวลผลเพื่อรวมข้อมูล (b) ผลจากการแปลงข้อมูล เป็นจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว  
ที่มา กฤษฎาณ,2561

จากภาพที่ 4.12 a แสดงข้อมูลจุดพิกัดสามมิติที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่อง สแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน จำนวน 2 สถานี และ ภาพที่ 4.12 b แสดงการนำข้อมูลจุดพิกัดสามมิติมา Register และรวมข้อมูลเพื่อแปลงข้อมูลให้เป็นจุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว ชุดข้อมูลจุดพิกัดทั้ง 2 ชุด จะ ถูกรวมต่อกันอ้างอิงจากเป้าอ้างอิง โดยงานวิจัยนี้ การ Register ถูกกำหนดให้มีค่า RMSE ของ ระยะทางในแกน x y และ z ระหว่างคู่ของเป้าอ้างอิงต่ำกว่า 0.01 เมตร หากค่า RMSE มีค่ามากกว่า ค่าที่กำหนด จะต้องเก็บข้อมูลเพื่อประมวลผลใหม่

#### 4.2.2.5 เลือกจุดพิกัดสามมิติสำหรับการประมวลผลข้อมูล

เนื่องจากจุดพิกัดอ้างอิงเชิงเดี่ยวที่ได้จากการ Register และ Merge นั้น มี ข้อมูลอื่น ๆ ที่ไม่ได้นำมาใช้ในการประมวลผลรวมอยู่ จำเป็นต้องลบออก เหลือเพียงข้อมูลส่วนลำต้น ดังแสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 (a , b) จุดพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยวถูกลบข้อมูลที่ไม่จำเป็นต่อการประมวลผล (c) ลบจุดพิกัดสามมิติออกจนเหลือแต่ลำต้นของต้นไม้ตัวอย่าง พร้อมนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ขั้นต่อไป  
ที่มา กฤษญาณ,2561

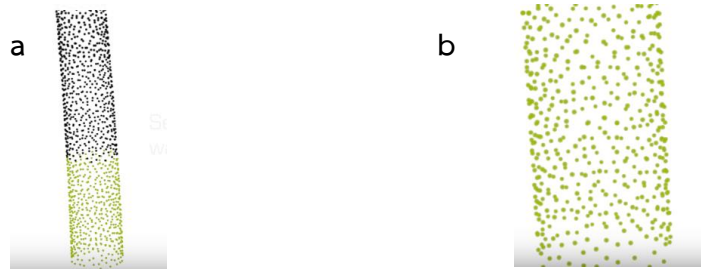
ภาพที่ 4.13 a , b แสดงข้อมูลจุดพิกัดสามมิติที่ไม่จำเป็นต่อการประมวลผล จะถูกลบออก ให้เหลือเพียงต้นไม้ตัวอย่าง จากนั้นลบจุดพิกัดสามมิติของต้นไม้ตัวอย่างในส่วนที่เป็นองค์ประกอบที่ไม่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ เช่น ใบ ก้านขนาดเล็ก และภาพที่ 4.13 c แสดงข้อมูลจุดพิกัดสามมิติส่วนลำต้นของต้นไม้ตัวอย่าง เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการในขั้นตอนต่อไป

#### 4.3 การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

##### 4.3.1 วิธี Qualitative surface model (QSM)

QSM เป็นแบบจำลองของโครงสร้างไม้ของต้นไม้ที่ใช้อธิบายคุณสมบัติทางเรขาคณิตและปริมาตร รวมถึงคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น จำนวนกิ่งก้านทั้งหมด ลำดับของกิ่งก้าน ความสัมพันธ์ของลำต้นกับขนาดและความยาวของกิ่งก้าน หลักการของวิธี QSM จะใช้รูปทรงพื้นฐานทางเรขาคณิตเช่น ทรงกระบอก ซึ่งทรงกระบอกถูกเลือกใช้งานเนื่องจากมีลักษณะคล้ายกับลำต้นของต้นไม้และเป็นตัวเลือกที่ให้ผลการประมาณปริมาตรใกล้เคียงกับปริมาตรจริงมากที่สุด

- จากพอยท์คลาวด์ส่วนลำต้น เลือกพอยท์คลาวด์ที่ละชั้นจนได้ความสูงที่ต้องการ ที่เรียกว่า เซกเมนต์ย่อยซึ่งจะสร้างทรงกระบอกให้พอดีกับเซกเมนต์ย่อยนี้ ดังแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 (a) แสดงพอยท์คลาวด์ส่วนลำต้นและ (b) แสดงเชกเมนต์ย่อย

ที่มา <https://github.com/InverseTampere/TreeQSM>

จากภาพที่ 4.14 a แสดงพอยท์คลาวด์ส่วนลำต้นที่ประกอบด้วยเชกเมนต์ย่อยที่ถูกแบ่งจากขนาดของลำต้นที่มีขนาดแตกต่างกัน

- เริ่มคำนวณค่าเฉลี่ยของพอยท์คลาวด์ ค่าเฉลี่ยที่ได้จะอยู่ใกล้กับแกนของทรงกระบอก ดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 (a , b) แสดงค่าเฉลี่ยของพอยท์คลาวด์ตามแนวยาวและแนวขวาง

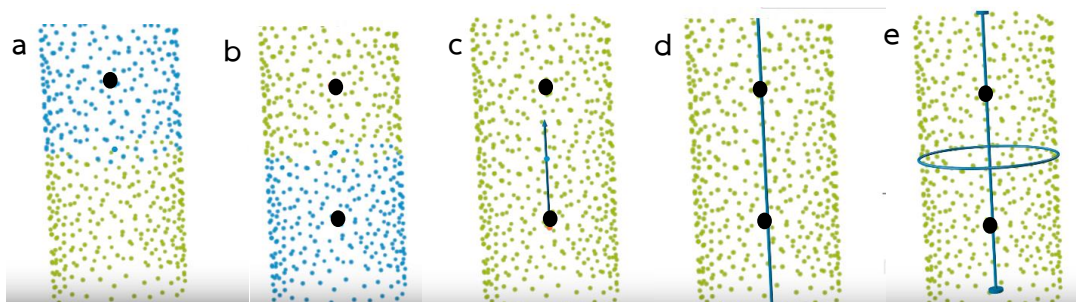
ที่มา <https://github.com/InverseTampere/TreeQSM>

จากภาพที่ 4.15 ผลจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของพอยท์คลาวด์ตามแนวยาวและแนวขวางเพื่อใช้เป็นแนวอ้างอิงการเรียงเชกเมนต์ย่อยที่ประกอบเป็นส่วนลำต้น

- คำนวณค่าเฉลี่ยของพอยท์คลาวด์ส่วนบนและส่วนล่างของเชกเมนต์ย่อย ดังแสดงในภาพที่

4.16





ภาพที่ 4.16 (a) แสดงค่าเฉลี่ยของพอยท์คลาวด์ส่วนบน (b) แสดงค่าเฉลี่ยของ พอยท์คลาวด์ ส่วนล่าง (c) แสดงเส้นเชื่อมต่อจุดค่าเฉลี่ยของส่วนล่างและกลาง (d) เส้นเชื่อมต่อจุดค่าเฉลี่ยของ ส่วนล่าง กลางและบน (e) แสดงรัศมีและความสูงของเซกเมนต์ย่อย

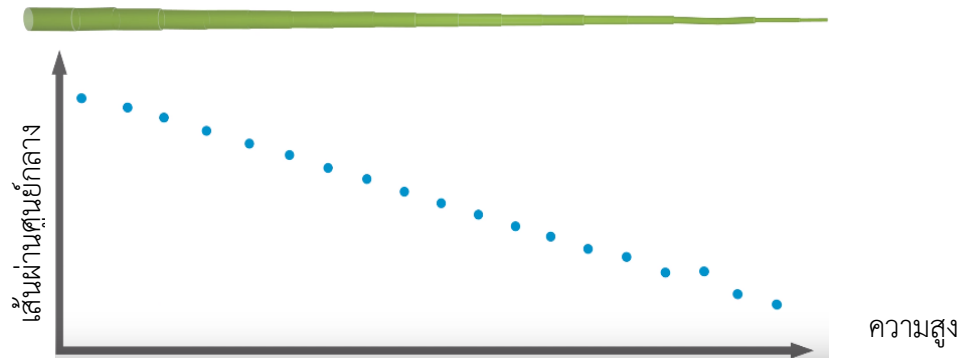
ที่มา <https://github.com/InverseTampere/TreeQSM>

จากภาพที่ 4.16 a แสดงค่าเฉลี่ยของพอยท์คลาวด์ส่วนบน b แสดงการลากเส้นเชื่อมต่อจุด ค่าเฉลี่ยของส่วนล่าง กลางและส่วนบนของเซกเมนต์ย่อยไปตามทิศทางของแกน ดังแสดงในภาพที่ 4.16 c, d ระยะทางเฉลี่ยรอบ ๆ เส้นแกนให้ค่ารัศมี ส่วนความสูงของทรงกระบอกคำนวณจาก ค่าเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดของพอยท์คลาวด์ในเซกเมนต์ย่อยนั้น ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.16 e ผลของ การคำนวณจะได้ทรงกระบอกเริ่มต้น

- ขั้นตอนสุดท้ายในการปรับทรงกระบอกให้พอดีกับเซกเมนต์ย่อยใช้การทำซ้ำและพิจารณาค่า คลาดเคลื่อนจาก Least-squares แล้วนำมาปรับทรงกระบอกให้พอดีมากที่สุด

การวิเคราะห์พฤติกรรมของเซกเมนต์ย่อย เช่น การวิเคราะห์ความเร็วของลำต้น จากค่าเส้น ผ่านศูนย์กลางและความสูงตามลำดับของเซกเมนต์ย่อยนำมาพลอตกราฟเพื่อวิเคราะห์ความเร็ว ดัง แสดงในภาพที่ 4.17

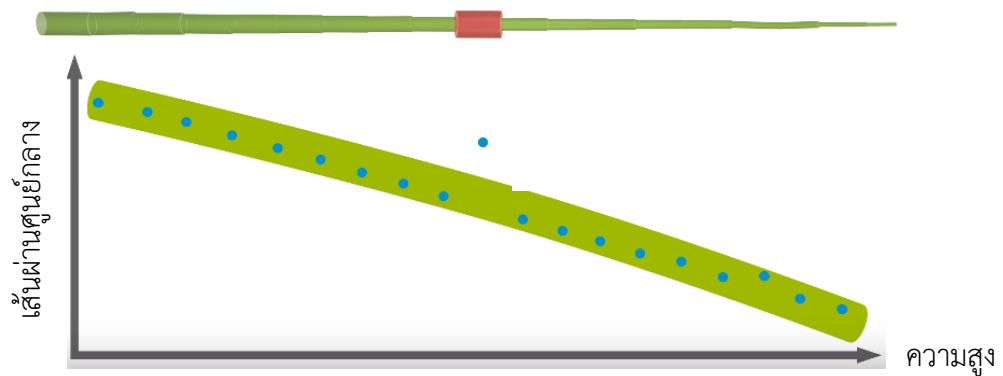




ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟวิเคราะห์ความเกี่ยวข้องของลำต้น

ที่มา <https://github.com/InverseTampere/TreeQSM>

จากภาพที่ 4.17 การวิเคราะห์ความเกี่ยวข้องของลำต้น โดยใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง เรียงลำดับจากเซกเมนต์ย่อย จุดความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเรียงต่อกันเป็นเส้น ต้นไม้ที่เติบโตตามธรรมชาติ เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือค่อนข้างตรงเป็นแนวเฉียงจากด้านบนซ้ายเฉียงลงด้านล่างขวา กรณีเกิดความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของเซกเมนต์ย่อยใด ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.18

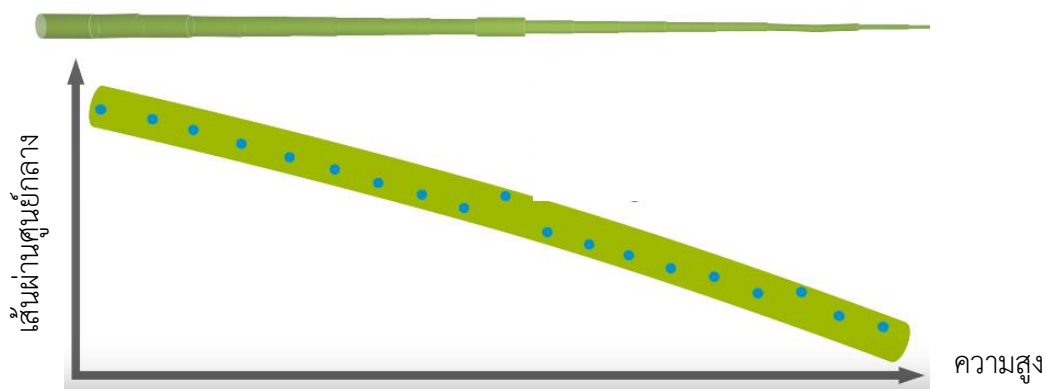


ภาพที่ 4.18 แสดงความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของเซกเมนต์ย่อย

ที่มา <https://github.com/InverseTampere/TreeQSM>

จากภาพที่ 4.18 จุดความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของเซกเมนต์ย่อยที่เกิดความคลาดเคลื่อนจะอยู่นอกแนวเส้นตรงของเส้นกราฟความเกี่ยวข้อง

การปรับความคลาดเคลื่อนจากกราฟความเร็วโดยใช้ Low degree Polynomial ที่เหมาะสมเพื่อกำหนดขอบเขตและปรับความคลาดเคลื่อนนั้นให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 แสดงการปรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด  
ที่มา <https://github.com/InverseTampere/TreeQSM>

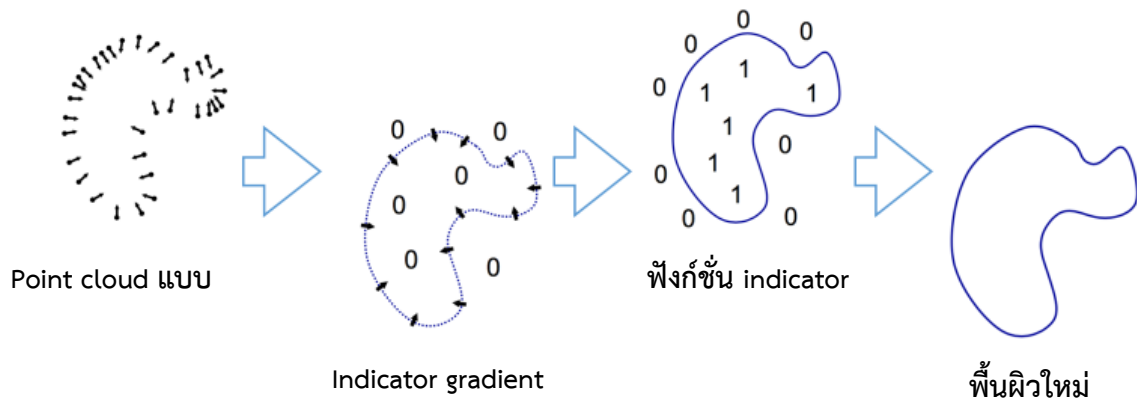
จากภาพที่ 4.19 การปรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยใช้ Low degree Polynomial ที่เหมาะสมให้ความคลาดเคลื่อนอยู่ในขอบเขตที่กำหนด (พื้นที่สีเขียว)

#### 4.3.2 วิธี Poisson surface reconstruction (PSR)

การสร้างพื้นผิว Poisson คือการปรับข้อมูลพื้นผิวใหม่ให้พอดีกับข้อมูลนำเข้าจากการสแกน การเติมข้อมูลให้กับพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นหลุมและการ Remeshing ของแบบจำลองที่มีอยู่ โดยมีเป้าหมายที่จะสร้างข่ายสามเหลี่ยม (Watertight) สามมิติจากพอยท์คลาวด์ กล่าวโดยสรุปคือการสร้างพื้นผิว Poisson ในกรอบการทำงานด้วยฟังก์ชัน Implicit เริ่มจากการคำนวณฟังก์ชัน Indicator สามมิติ (กำหนดเป็น 1 สำหรับจุดที่อยู่ภายในและ 0 สำหรับจุดที่อยู่นอกแบบจำลอง) จากนั้นสร้างพื้นผิวใหม่โดยการสกัด Iso-surface ที่เหมาะสม ความสัมพันธ์ระหว่างจุดที่มีทิศทาง (Oriented points) กับฟังก์ชัน Indicator เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง โดยทั่วไปฟังก์ชัน Indicator จะเป็นค่าคงที่ยกเว้นจุดที่อยู่ใกล้พื้นผิว การปรับค่า Octree ในซอฟต์แวร์ใช้แทนฟังก์ชัน Indicator โดยที่แต่ละ Node ของ Octree จะเก็บค่าของ พอยท์คลาวด์ที่จุดต่าง ๆ บนพื้นผิวที่สร้างขึ้น

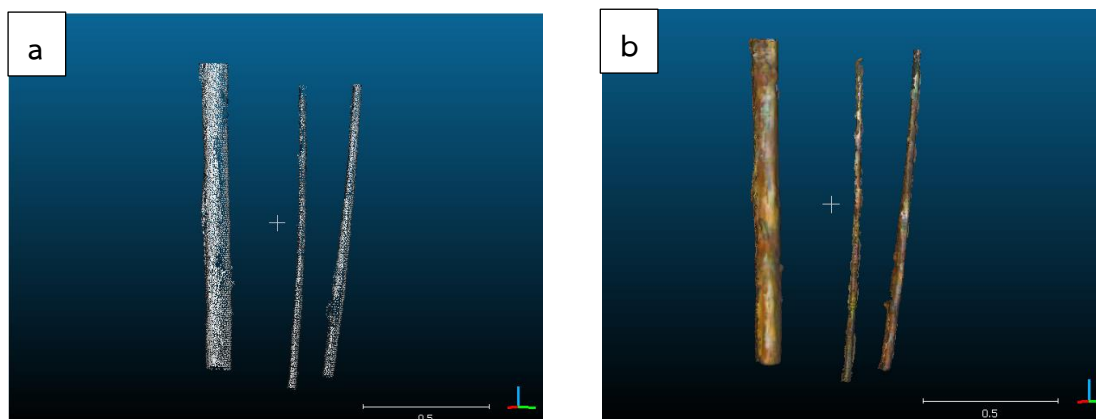
พื้นผิวที่สร้างขึ้นใหม่ถูกดึงออกมาจากฟังก์ชัน Indicator โดยใช้อัลกอริทึม Marching cubes หลังจาก Marching cubes วนครบรอบของ Octree แล้ว ข่ายสามเหลี่ยมสามมิติถูกสร้างขึ้น

โดยการ Interpolating จุดระหว่าง Cube ที่จุดยอด ข่ายสามเหลี่ยมสามมิติที่สร้างขึ้นโดยอัลกอริทึม Marching cubes จะถูกเก็บไว้ใน Octree สรุปลงขั้นตอนพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในอัลกอริทึมการสร้างพื้นผิวใหม่แบบ Poisson แสดงในภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 แสดงขั้นตอนพื้นฐานในอัลกอริทึมการสร้างพื้นผิวใหม่แบบ Poisson ที่มา (Kazhdan et al., 2006)

จากภาพที่ 4.20 ขั้นตอนการสร้างพื้นผิววิธี Poisson จากข้อมูลพอยท์คลาวด์นำเข้าพิจารณา Indicator gradient แล้วจึงคำนวณฟังก์ชัน Indicator สามมิติ (กำหนดเป็น 1 สำหรับจุดที่อยู่ภายในและ 0 สำหรับจุดที่อยู่นอกแบบจำลอง) พื้นผิวที่สร้างใหม่ถูกดึงออกมาจากฟังก์ชัน Indicator และนำมาสร้างพื้นผิวกับต้นไม้ทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 แสดง (a) พอยท์คลาวด์ของต้นไม้ทดสอบ (b) พื้นผิวใหม่จากวิธี Poisson

จากภาพที่ 4.21 แสดงการนำพอยท์คลาวด์ส่วนลำต้นของต้นไม้ทดสอบใช้โปรแกรมรหัสเปิด Cloud compare สร้างพื้นผิวด้วยวิธี Poisson เพื่อใช้คำนวณปริมาตร

#### 4.3.3 วิธี Screen Poisson surface reconstruction (SPSR)

เทคนิคการสร้างพื้นผิวแบบ Poisson มีความยืดหยุ่นต่อพอยท์คลาวด์ที่มีสัญญาณรบกวนและมีความผิดพลาดจากการตรวจจับอีกทั้งพื้นผิวใหม่ที่สร้างขึ้นถูกปรับให้ราบเรียบเกินจริง การขาดหายไปบางส่วนของพอยท์คลาวด์ ทำให้การสร้างข่ายสามมิติไม่ต่อเนื่องจึงเกิดหลุมขึ้น ดังนั้นวิธี Screen Poisson จึงปรับอัลกอริทึมบางส่วนของวิธี Poisson ดั้งเดิมโดยเพิ่มอัลกอริทึม Smooth signed distance (SSD) ของ Calakli และ Taubin (Calakli and Taubin, 2011) เพื่อปรับบริเวณขอบของพื้นผิวให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นและเติมส่วนหลุมให้สมบูรณ์ โดยทดสอบการสร้างพื้นผิวใหม่ด้วยวิธี Poisson , Screen Poisson และเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งของทั้งสองวิธีด้วยกราฟ จากกราฟเปรียบเทียบพบว่าวิธี Screen Poisson สร้างพื้นผิวใหม่ใกล้เคียงกับ พอยท์คลาวด์มากกว่าวิธี Poisson (Kazhdan and Hoppe, 2013) และภาพที่ 4.22 แสดงพื้นผิวใหม่ของต้นไม้ทดสอบจากวิธี Screen Poisson



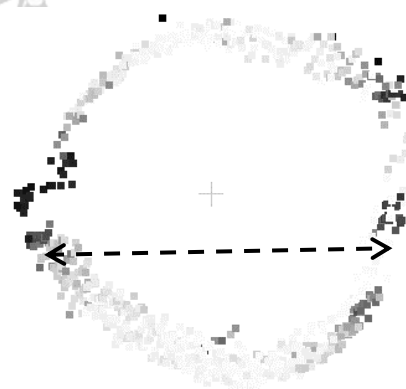
ภาพที่ 4.22 (a) พอยท์คลาวด์ต้นไม้ทดสอบ (b) พื้นผิวใหม่ของต้นไม้ทดสอบจากวิธี Screen Poisson

จากภาพที่ 4.22 แสดงการนำพอยท์คลาวด์ส่วนลำต้นของต้นไม้ทดสอบใช้โปรแกรมรหัสเปิด MeshLab สร้างพื้นผิวด้วยวิธี Screen Poisson เพื่อใช้คำนวณปริมาตร

#### 4.3.4 วิธีแบบจำลองอัลโลเมตริก

แบบจำลองอัลโลเมตริกถูกสร้างขึ้นด้วยความสัมพันธ์แบบยกกำลัง (Sileshi, 2014) ที่ประกอบด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกและค่าความหนาแน่นจำเพาะของไม้ ดังแสดงในสมการที่ 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 และสมการที่ 3.5 เพื่อใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของพันธุ์ไม้ป่าชายเลนเขตร้อน การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกจากพอยท์คลาวด์สามมิติดำเนินการเช่นเดียวกับการวัดโครงสร้างทางกายภาพของต้นไม้ในหัวข้อ 2.1.3 ด้วยกระบวนการวัดซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.23 เพื่อพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดและนำค่าที่ได้จากการวัดคูณกับความหนาแน่นจำเพาะของไม้พันธุ์แสมทะเล ซึ่งเป็นค่าคงที่มีค่า 0.60 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Njana et al., 2016) เพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินส่วนลำต้นของต้นแสมทะเลแต่ละต้น และปรับแก้ค่ามวลชีวภาพเรือนยอด โดยการนำมวลชีวภาพเหนือพื้นดินส่วนลำต้นคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้เรือนยอดซึ่งเป็นค่าคงที่มีค่า 1.25 (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) จากนั้นคำนวณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวมด้วยการรวมค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินส่วนลำต้นและมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ปรับแก้ค่ามวลชีวภาพเรือนยอดแล้ว

วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก



ภาพที่ 4.23 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกจากพอยท์คลาวด์สามมิติ

จากภาพที่ 4.23 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกของต้นแสมทะเลจากพอยท์คลาวด์สามมิติ โดยเริ่มวัดจากโคนต้นเหนือพื้นดิน วัดขึ้นตามความสูงของต้นไม้ที่ระยะความสูงประมาณ 1.30 เมตรและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจำนวน 5 ครั้ง

#### 4.4 การตรวจสอบความถูกต้องผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

##### 4.4.1 การประมาณค่าคลาดเคลื่อน

###### 4.4.1.1 แหล่งของการเกิดค่าคลาดเคลื่อน

ในการวัดค่าพารามิเตอร์เพื่อนำมาประมาณค่ามวลชีวภาพในแต่ละขั้นตอนนั้น จะมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นรวมอยู่ด้วย ดังนี้

1) ค่าคลาดเคลื่อนจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้ตั้งค่าความละเอียด (Resolution) ของการสแกน (ความห่างระหว่างจุดพิกัดสามมิติ) ที่ 3.1 มิลลิเมตร ต่อ 10 เมตร ส่งผลให้การวัดแต่ละครั้งมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ที่  $\frac{0.003}{\sqrt{3}}$  โดยที่  $\sqrt{3}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อน มาตรฐานของอุปกรณ์ดิจิทัล ค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะมีค่าประมาณร้อยละ 0.17 ซึ่งเป็นค่าที่น้อย มากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแหล่งอื่น งานวิจัยนี้จึงไม่นำค่าคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์มาใช้ ในการประมาณการแพร่ค่าคลาดเคลื่อน

2) ค่าคลาดเคลื่อนของการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกของต้นแสมทะเลจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ต้นไม้ตัวอย่างแต่ละต้นดำเนินการวัดซ้ำต้นละ 5 ครั้ง (หัวข้อ 4.4.4) มีค่าคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกของต้นแสมทะเลระหว่างร้อยละ 0.15 – 0.86

3) ค่าคลาดเคลื่อนจากค่าความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ เป็นค่าที่ได้จากการทบทวนเอกสาร โดยค่าคลาดเคลื่อนจากความหนาแน่นจำเพาะเนื้อไม้ของต้นยูคาลิปตัส มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 7.70 (De Lima Melo et al., 2016) และค่าคลาดเคลื่อนจากความหนาแน่นจำเพาะเนื้อไม้ของต้นแสมทะเล มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 8.33 (Njana et al., 2016)

4) ค่าคลาดเคลื่อนจากการปรับแก้เรือนยอด เป็นค่าที่ได้จากการทบทวนเอกสาร มีค่าร้อยละ 10 (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020)

#### 4.4.1.2 การแพร่ของค่าคลาดเคลื่อน

1) การแพร่ค่าคลาดเคลื่อนมวลชีวภาพลำต้น เป็นการประมาณค่าคลาดเคลื่อนที่ได้จากการคำนวณมวลชีวภาพของลำต้น ประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (วัดซ้ำ 5 ครั้ง) และความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ ดังสมการที่ 2.33

$$\frac{\delta AGB_{stem}}{|AGB_{stem}|} = \sqrt{2 \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta WSD}{WSD}\right)^2} \quad (2.33)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)

$WSD$  คือ ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อไม้ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

2) การแพร่ค่าคลาดเคลื่อนมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน ประมาณค่าโดยการนำค่าการแพร่ค่าคลาดเคลื่อนคำนวณร่วมกับค่าคลาดเคลื่อนจากการปรับแก้เรือนยอด (ร้อยละ 10) (Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) ดังสมการที่ 2.34

$$\delta AGB_{Total} = \sqrt{(\delta AGB_{stem})^2 + (\delta AGB_{canopy})^2} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $\delta AGB_{stem}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพของลำต้น

$\delta AGB_{canopy}$  คือ ค่าคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพของเรือนยอด

#### 4.4.2 มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ

หลังจากการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ในขั้นตอนที่ 4.2.1 เสร็จสิ้นแล้ว ตัดต้นไม้ทดสอบจากโคนต้นเหนือพื้นดิน ทำการเก็บข้อมูลด้วยวิธีตัดลำต้นไปแทนที่น้ำ (Water displacement) โดยตัดลำต้นออกเป็นท่อน ความยาวท่อนละ 0.80 เมตร ซึ่งน้ำหนักแต่ละท่อนด้วยความละเอียด 0.01 กิโลกรัม ดังแสดงในภาพที่ 4.24 จากนั้นนำไปแทนที่น้ำในตู้ทดสอบขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 0.44x0.90x0.45 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.25 สุกท้ายจึงคำนวณปริมาตรอ้างอิงของต้นไม้ทดสอบแต่ละต้นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในหัวข้อ 4.3 โดยใช้ข้อมูลของต้นไม้ในพื้นที่ทดสอบ เปรียบเทียบความถูกต้องโดยใช้ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)





ภาพที่ 4.24 (a) แสดงลำต้นไม้ทดสอบตัดเป็นท่อน ความยาวท่อนละ 0.80 เมตรและ  
(b) แสดงการชั่งน้ำหนักท่อนไม้ด้วยความละเอียด 0.01 กิโลกรัม

จากภาพที่ 4.24 ลำต้นไม้ทดสอบหมายเลข D4.3 ตัดเป็นท่อน ยาวท่อนละ 0.80 เมตร ชั่งน้ำหนักแต่ละท่อนด้วยความละเอียด 0.01 กิโลกรัม และนำไปแทนที่น้ำในตู้ทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4.25



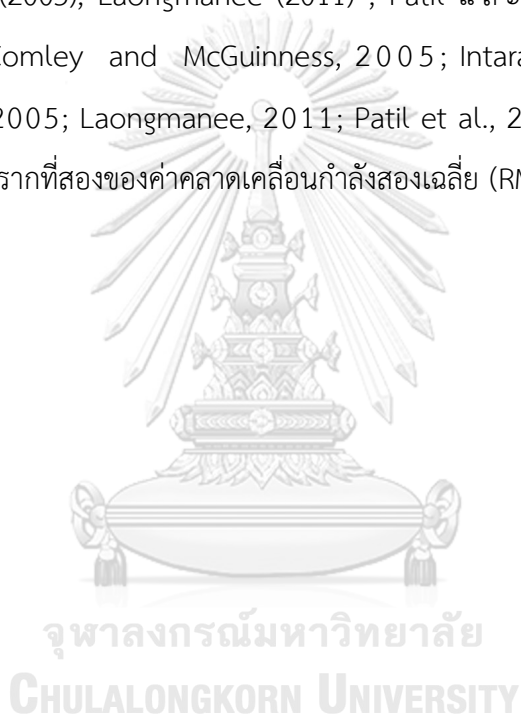
ภาพที่ 4.25 แสดงการนำท่อนไม้มาแทนที่น้ำในตู้ทดสอบ

จากภาพที่ 4.25 ตู้ทดสอบขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 0.44x0.90x0.45 เมตร บรรจุน้ำกลั่นและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดระดับความสูงของน้ำในตู้ทดสอบก่อนและหลังการนำท่อนไม้มาแทนที่น้ำ



#### 4.4.3 มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อน

โดยทั่วไปการตรวจสอบความถูกต้องจะนำผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเปรียบเทียบกับค่ามวลชีวภาพจากต้นแสมทะเลในพื้นที่ศึกษาด้วยวิธีการตัดต้นไม้ อย่างไรก็ตามไม่พบรายงานหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่ามวลชีวภาพในพื้นที่ศึกษามาก่อน งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงจากการทบทวนเอกสาร บทความวิจัย ที่ศึกษาการประมาณค่ามวลชีวภาพแบบตัดต้นไม้และได้รับการยอมรับในการประมาณค่ามวลชีวภาพต้นแสมทะเล (กฤษฎาณ ,2561) ได้แก่ แบบจำลองมวลชีวภาพต้นแสมทะเลจาก Komiyama และคณะ (2005), Comley and McGuinness (2005), Laongmanee (2011) , Patil และ ค ณ ะ (2014), Intarat and Vaiphasa (2019) (Comley and McGuinness, 2005; Intarat and Vaiphasa, 2019; Komiyama et al., 2005; Laongmanee, 2011; Patil et al., 2014) จากนั้น เปรียบเทียบความถูกต้องโดยใช้ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)



## บทที่ 5

### ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการรายงานผลการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ แสดงในหัวข้อที่ 5.1 ส่วนที่สองเป็นผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อน แสดงในหัวข้อที่ 5.2

#### 5.1 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ใช้ต้นยูคาลิปตัสคามาเลกุลเลนซิสจากแปลงปลูก จำนวน 41 ลำต้น (ใช้รหัส A1.1 - D4.3 แทนต้นไม้ตัวอย่าง) เป็นกลุ่มตัวอย่างที่ถูกตัดเพื่อใช้ประมาณค่าปริมาตรอ้างอิงด้วยการแทนที่น้ำและประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน กลุ่มตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงออก ระหว่าง 3.45 – 9.80 เซนติเมตร ความสูงอยู่ระหว่าง 5.05 - 11.70 เมตร ผลลัพธ์จากการดำเนินงานมีดังนี้

##### 5.1.1 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิง

###### 5.1.1.1 ผลการประมาณค่าปริมาตรของลำต้น

ปริมาตรของต้นยูคาลิปตัส จำนวน 41 ต้น คำนวณจากการตัดต้นยูคาลิปตัสไปแทนที่น้ำ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 5.1 ปริมาตรของลำต้นมีค่าระหว่าง 0.005 – 0.027 ลูกบาศก์เมตร โดยต้นยูคาลิปตัสที่มีปริมาตรมากที่สุดคือ D4.3 มีปริมาตรลำต้น 0.027 ลูกบาศก์เมตร และต้นยูคาลิปตัสที่มีปริมาตรน้อยที่สุดคือ B3.2 มีปริมาตรลำต้น 0.005 ลูกบาศก์เมตร

###### 5.1.1.2 ค่าความหนาแน่นจำเพาะของต้นยูคาลิปตัส

ค่าความหนาแน่นจำเพาะของต้นยูคาลิปตัสจากการทบทวนเอกสาร มีค่า 486.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (De Lima Melo et al., 2016) ค่าคลาดเคลื่อนจากความหนาแน่นจำเพาะของต้นไม้ มีค่าร้อยละ 7.70

###### 5.1.1.3 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพลำต้น

นำปริมาตรของลำต้นที่ได้จากการแทนที่น้ำคูณกับความหนาแน่นจำเพาะเนื้อไม้ (486.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) แสดงในตารางที่ 5.1 ต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพลำต้นมากที่สุด

คือ D4.3 มีมวลชีวภาพลำต้น 13.22 กิโลกรัม และต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพลำต้นน้อยที่สุดคือ B3.2 มีมวลชีวภาพลำต้น 2.49 กิโลกรัม

#### 5.1.1.4 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม

นำค่ามวลชีวภาพลำต้นของต้นยูคาลิปตัสมาปรับแก้ค่ามวลชีวภาพเรือนยอด ด้วยการคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้เรือนยอด (1.25) (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัส แสดงในตารางที่ 5.1 โดยที่ต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินมากที่สุดคือ D4.3 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 16.52 กิโลกรัม และต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินน้อยที่สุดคือ B3.2 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 3.11 กิโลกรัม

#### 5.1.1.5 ผลการประมาณการแพร่ค่าคลาดเคลื่อน

ค่าคลาดเคลื่อนจากความหนาแน่นจำเพาะของต้นไม้ มีค่าร้อยละ 7.70 การแพร่ค่าคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพลำต้น มีค่าร้อยละ 10.89 เมื่อนำค่าคลาดเคลื่อนของการปรับแก้เรือนยอด ร้อยละ 10 แพร่รวมเข้าไปในการคำนวณ ส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนรวมมีค่าร้อยละ 14.78 ตารางที่ 5.1 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธีแทนที่น้ำ

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ความสูง (เมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
1	A1.1	8.87	7.17	0.02	8.78	2.20	10.98
2	A1.2	8.49	5.84	0.01	6.82	1.70	8.52
3	A1.3	8.83	6.55	0.02	8.14	2.04	10.18
4	A2.1	8.09	5.40	0.01	6.01	1.50	7.51
5	A2.2	9.19	7.14	0.02	11.05	2.76	13.81
6	A3.1	9.03	7.24	0.02	10.62	2.66	13.28
7	A3.2	8.73	5.95	0.01	6.87	1.72	8.59
8	B1.1	9.19	6.50	0.02	8.76	2.19	10.95

ตารางที่ 5.1 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธีแทนที่น้ำ (ต่อ)

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ความสูง (เมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
9	B1.2	8.55	5.74	0.01	7.17	1.79	8.97
10	B1.3	7.59	5.29	0.01	5.39	1.35	6.74
11	B1.4	9.30	6.55	0.02	10.70	2.68	13.38
12	B2.1	8.92	5.84	0.02	9.03	2.26	11.29
13	B2.2	8.95	6.33	0.02	8.69	2.17	10.86
14	B2.3	7.75	4.58	0.01	5.27	1.32	6.58
15	B3.1	8.83	6.24	0.02	9.23	2.31	11.54
16	B3.2	7.05	4.41	0.01	2.49	0.62	3.11
17	B3.3	7.21	5.66	0.01	4.69	1.17	5.86
18	B4.1	9.37	6.56	0.02	7.48	1.87	9.35
19	C1	9.13	6.93	0.02	10.74	2.69	13.43
20	C2.1	8.76	6.08	0.01	7.02	1.75	8.77
21	C2.2	6.78	4.00	0.01	5.88	1.47	7.35
22	C2.3	9.93	7.44	0.03	12.62	3.16	15.78
23	C2.4	6.89	3.45	0.01	3.75	0.94	4.69
24	C3	8.44	5.69	0.02	7.59	1.90	9.49
25	C4.1	9.41	5.91	0.02	7.40	1.85	9.25
26	C4.2	8.44	4.34	0.01	4.30	1.07	5.37
27	D1.1	8.53	5.77	0.01	6.81	1.70	8.51
28	D1.2	6.13	3.96	0.01	2.65	0.66	3.31
29	D1.3	6.35	4.68	0.01	3.26	0.82	4.08
30	D1.4	9.07	6.38	0.02	9.73	2.43	12.17
31	D2.1	8.66	5.83	0.01	6.30	1.58	7.88
32	D2.2	9.63	6.50	0.02	12.12	3.03	15.15

ตารางที่ 5.1 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธีแทนที่น้ำ(ต่อ)

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ความสูง (เมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
33	D2.3	9.57	6.72	0.02	10.88	2.72	13.60
34	D2.4	8.89	5.31	0.02	7.56	1.89	9.45
35	D2.5	7.58	4.62	0.01	5.07	1.27	6.34
36	D3.1	6.97	4.58	0.01	3.55	0.89	4.44
37	D3.2	9.12	6.20	0.02	10.28	2.57	12.84
38	D3.3	7.00	4.20	0.01	3.43	0.86	4.28
39	D4.1	5.05	3.57	0.01	2.52	0.63	3.15
40	D4.2	7.25	4.31	0.01	3.88	0.97	4.85
41	D4.3	11.70	9.88	0.03	13.22	3.30	16.52

### 5.1.2 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Qualitative surface model (QSM)

#### 5.1.2.1 ผลการคำนวณปริมาตรของลำต้น

ปริมาตรของต้นยูคาลิปตัสรายต้นคำนวณจากพอยคลาวด์ที่เก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน นำพอยคลาวด์ส่วนลำต้นของแต่ละตัวอย่างคำนวณปริมาตรด้วยโปรแกรมรหัสเปิด TreeQSM ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 5.2 ปริมาตรของลำต้นมีค่าระหว่าง 0.01 – 0.03 ลูกบาศก์เมตร โดยต้นยูคาลิปตัส D4.3 มีปริมาตรมากที่สุดเท่ากับ 0.03 ลูกบาศก์เมตร และต้นยูคาลิปตัส D1.3 มีปริมาตรน้อยที่สุดเท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์เมตร

### 5.1.2.2 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพลำต้น

นำปริมาตรของลำต้นที่คำนวณได้คูณกับความหนาแน่นจำเพาะของต้นยูคาลิปตัส (486.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) แสดงในตารางที่ 5.2 ต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพลำต้นมากที่สุดคือ D4.3 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 14.07 กิโลกรัม และต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพลำต้นน้อยที่สุดคือ D1.3 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 2.29 กิโลกรัม

### 5.1.2.3 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม

นำค่ามวลชีวภาพลำต้นของต้นยูคาลิปตัสมาปรับแก้ค่ามวลชีวภาพเรือนยอดด้วยการคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้เรือนยอด (1.25) (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัส แสดงในตารางที่ 5.2 โดยที่ต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินมากที่สุดคือ D4.3 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 17.59 กิโลกรัม และต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินน้อยที่สุดคือ D1.3 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 2.86 กิโลกรัม

ตารางที่ 5.2 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี QSM

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
1	A1.1	0.02	8.59	2.15	10.74
2	A1.2	0.01	6.22	1.56	7.78
3	A1.3	0.02	7.48	1.87	9.35
4	A2.1	0.01	5.61	1.40	7.02
5	A2.2	0.03	12.41	3.10	15.51
6	A3.1	0.02	11.48	2.87	14.35
7	A3.2	0.02	7.69	1.92	9.61
8	B1.1	0.02	9.10	2.27	11.37
9	B1.2	0.01	6.96	1.74	8.70
10	B1.3	0.02	8.59	2.15	10.74

ตารางที่ 5.2 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี QSM (ต่อ)

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
11	B1.4	0.01	7.17	1.79	8.97
12	B2.1	0.02	9.51	2.38	11.89
13	B2.2	0.02	9.55	2.39	11.94
14	B2.3	0.02	7.39	1.85	9.23
15	B3.1	0.01	4.10	1.02	5.12
16	B3.2	0.02	8.26	2.06	10.32
17	B3.3	0.01	3.81	0.95	4.76
18	B4.1	0.01	6.05	1.51	7.57
19	C1	0.01	5.95	1.49	7.44
20	C2.1	0.02	12.00	3.00	15.00
21	C2.2	0.01	6.05	1.51	7.56
22	C2.3	0.01	4.67	1.17	5.84
23	C2.4	0.02	10.42	2.60	13.02
24	C3	0.01	4.83	1.21	6.04
25	C4.1	0.02	8.42	2.11	10.53
26	C4.2	0.02	7.69	1.92	9.62
27	D1.1	0.01	2.49	0.62	3.12
28	D1.2	0.02	7.62	1.90	9.52
29	D1.3	0.01	3.66	0.92	4.58
30	D1.4	0.00	2.29	0.57	2.86
31	D2.1	0.02	8.66	2.17	10.83
32	D2.2	0.02	7.50	1.87	9.37
33	D2.3	0.02	10.61	2.65	13.27
34	D2.4	0.02	9.90	2.47	12.37

ตารางที่ 5.2 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี QSM (ต่อ)

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
35	D2.5	0.008	4.129	1.032	5.161
36	D3.1	0.009	4.590	1.147	5.737
37	D3.2	0.020	9.695	2.424	12.119
38	D3.3	0.005	2.459	0.615	3.074
39	D4.1	0.007	3.481	0.870	4.351
40	D4.2	0.006	2.703	0.676	3.379
41	D4.3	0.029	14.068	3.517	17.586

### 5.1.3 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Poisson surface reconstruction (PSR)

#### 5.1.3.1 ผลการคำนวณปริมาตรของลำต้น

ปริมาตรของต้นยูคาลิปตัสรายต้นคำนวณจากพอยคลาวด์ที่เก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน นำพอยคลาวด์ส่วนลำต้นของแต่ละตัวอย่างคำนวณปริมาตรด้วยโปรแกรมรหัสเปิด CloudCompare ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 5.3 ปริมาตรของลำต้นมีค่าระหว่าง 0.01 – 0.03 ลูกบาศก์เมตร โดยต้นยูคาลิปตัส D4.3 มีปริมาตรมากที่สุดเท่ากับ 0.03 ลูกบาศก์เมตร และต้นยูคาลิปตัส B3.2 มีปริมาตรน้อยที่สุดเท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์เมตร

#### 5.1.3.2 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพลำต้น

นำปริมาตรของลำต้นที่คำนวณได้คูณกับความหนาแน่นจำเพาะเนื้อไม้ (486.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) แสดงในตารางที่ 5.3 ต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพลำต้นมากที่สุดคือ D4.3 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 12.16 กิโลกรัม และต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพลำต้นน้อยที่สุดคือ B3.2 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 2.87 กิโลกรัม



### 5.1.3.3 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม

นำค่ามวลชีวภาพลำต้นของต้นยูคาลิปตัสมาปรับแก้ค่ามวลชีวภาพเรือนยอด ด้วยการคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้เรือนยอด (1.25) (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัส แสดงในตารางที่ 5.3 โดยที่ต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินมากที่สุดคือ D4.3 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 15.21 กิโลกรัม และต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินน้อยที่สุดคือ B3.2 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 3.58 กิโลกรัม

ตารางที่ 5.3 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี PSR

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
1	A1.1	0.02	7.89	1.97	9.86
2	A1.2	0.02	7.38	1.85	9.23
3	A1.3	0.02	8.19	2.05	10.24
4	A2.1	0.01	7.10	1.78	8.88
5	A2.2	0.02	10.17	2.54	12.72
6	A3.1	0.02	10.33	2.58	12.91
7	A3.2	0.01	6.06	1.51	7.57
8	B1.1	0.02	7.91	1.98	9.89
9	B1.2	0.01	6.65	1.66	8.32
10	B1.3	0.01	4.81	1.20	6.01
11	B1.4	0.02	10.43	2.61	13.03
12	B2.1	0.02	9.47	2.37	11.84
13	B2.2	0.02	9.46	2.37	11.83
14	B2.3	0.01	5.89	1.47	7.36
15	B3.1	0.02	10.01	2.50	12.52
16	B3.2	0.01	2.87	0.72	3.58

ตารางที่ 5.3 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี PSR (ต่อ)

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือ พื้นดิน (กิโลกรัม)
17	B3.3	0.01	4.46	1.11	5.57
18	B4.1	0.02	7.93	1.98	9.92
19	C1	0.02	12.04	3.01	15.05
20	C2.1	0.01	7.00	1.75	8.75
21	C2.2	0.01	5.65	1.41	7.06
22	C2.3	0.02	11.77	2.94	14.72
23	C2.4	0.01	4.36	1.09	5.45
24	C3	0.02	8.00	2.00	10.01
25	C4.1	0.02	7.39	1.85	9.24
26	C4.2	0.01	4.88	1.22	6.11
27	D1.1	0.01	6.00	1.50	7.50
28	D1.2	0.01	2.98	0.74	3.72
29	D1.3	0.01	3.25	0.81	4.06
30	D1.4	0.02	9.28	2.32	11.59
31	D2.1	0.01	5.48	1.37	6.85
32	D2.2	0.02	11.75	2.94	14.68
33	D2.3	0.02	11.08	2.77	13.85
34	D2.4	0.02	7.50	1.87	9.37
35	D2.5	0.01	5.92	1.48	7.39
36	D3.1	0.01	3.81	0.95	4.76
37	D3.2	0.02	10.55	2.64	13.19

ตารางที่ 5.3 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี PSR (ต่อ)

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
38	D3.3	0.01	3.97	0.99	4.96
39	D4.1	0.01	2.93	0.73	3.66
40	D4.2	0.01	4.39	1.10	5.48
41	D4.3	0.02	12.16	3.04	15.20

#### 5.1.4 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Screen Poisson surface reconstruction (SPSR)

##### 5.1.4.1 ผลการคำนวณปริมาตรของลำต้น

ปริมาตรของต้นยูคาลิปตัสรายต้นคำนวณจากพอยคลาวด์ที่เก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน นำพอยคลาวด์ส่วนลำต้นของแต่ละตัวอย่างคำนวณปริมาตรด้วยโปรแกรมรหัสเปิด MeshLab ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 5.4 ปริมาตรของลำต้นมีค่าระหว่าง 0.01 – 0.03 ลูกบาศก์เมตร โดยต้นยูคาลิปตัส D4.3 มีปริมาตรมากที่สุดเท่ากับ 0.03 ลูกบาศก์เมตร และต้นยูคาลิปตัส B3.2 มีปริมาตรน้อยที่สุดเท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์เมตร

##### 5.1.4.2 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพลำต้น

นำปริมาตรของลำต้นที่คำนวณได้คูณกับความหนาแน่นจำเพาะเนื้อไม้ (486.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) แสดงในตารางที่ 5.4 ต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพลำต้นมากที่สุดคือ D4.3 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 12.22 กิโลกรัม และต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพลำต้นน้อยที่สุดคือ B3.2 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 2.49 กิโลกรัม

### 5.1.4.3 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม

นำค่ามวลชีวภาพลำต้นของต้นยูคาลิปตัสมาปรับแก้ค่ามวลชีวภาพเรือนยอด ด้วยการคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้เรือนยอด (1.25) (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัส แสดงในตารางที่ 5.4 โดยที่ต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินมากที่สุดคือ D4.3 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 15.27 กิโลกรัม และต้นยูคาลิปตัสที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินน้อยที่สุดคือ B3.2 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 3.11 กิโลกรัม

ตารางที่ 5.4 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี SPSR

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
1	A1.1	0.02	7.85	1.96	9.82
2	A1.2	0.01	6.92	1.73	8.65
3	A1.3	0.02	8.69	2.17	10.86
4	A2.1	0.01	6.48	1.62	8.11
5	A2.2	0.02	10.17	2.54	12.72
6	A3.1	0.02	10.65	2.66	13.31
7	A3.2	0.02	7.35	1.84	9.18
8	B1.1	0.02	7.92	1.98	9.90
9	B1.2	0.01	6.85	1.71	8.56
10	B1.3	0.01	5.38	1.35	6.73
11	B1.4	0.02	10.63	2.66	13.28
12	B2.1	0.02	8.38	2.10	10.48
13	B2.2	0.02	9.30	2.32	11.62
14	B2.3	0.01	5.27	1.32	6.59
15	B3.1	0.02	7.84	1.96	9.80

ตารางที่ 5.4 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี SPSR (ต่อ)

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือ พื้นดิน (กิโลกรัม)
16	B3.2	0.01	2.49	0.62	3.11
17	B3.3	0.01	4.69	1.17	5.86
18	B4.1	0.02	7.41	1.85	9.26
19	C1	0.02	9.92	2.48	12.40
20	C2.1	0.01	7.02	1.75	8.77
21	C2.2	0.01	6.15	1.54	7.68
22	C2.3	0.02	11.67	2.92	14.59
23	C2.4	0.01	3.75	0.94	4.68
24	C3	0.02	7.96	1.99	9.95
25	C4.1	0.01	6.74	1.69	8.43
26	C4.2	0.01	4.29	1.07	5.37
27	D1.1	0.02	7.32	1.83	9.15
28	D1.2	0.01	2.65	0.66	3.31
29	D1.3	0.01	3.26	0.82	4.08
30	D1.4	0.02	10.00	2.50	12.50
31	D2.1	0.01	6.30	1.58	7.88
32	D2.2	0.02	11.52	2.88	14.40
33	D2.3	0.02	10.36	2.59	12.95
34	D2.4	0.01	7.03	1.76	8.79
35	D2.5	0.01	4.97	1.24	6.21
36	D3.1	0.01	3.56	0.89	4.45
37	D3.2	0.02	10.29	2.57	12.87

ตารางที่ 5.4 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยวิธี SPSR (ต่อ)

ลำดับ	ต้นยูคาลิปตัส	ปริมาตร (ลูกบาศก์เมตร)	มวลชีวภาพลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
38	D3.3	0.01	3.92	0.98	4.90
39	D4.1	0.01	2.52	0.63	3.15
40	D4.2	0.01	3.86	0.96	4.82
41	D4.3	0.03	12.22	3.05	15.27

#### 5.1.5 ผลการตรวจสอบความถูกต้องจากการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ

การตรวจสอบความถูกต้องของค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ โดยใช้มวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงของต้นยูคาลิปตัสที่แสดงในตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสที่คำนวณด้วยวิธี QSM ,PSR และSPSR ที่แสดงในตารางที่ 5.2 , 5.3 และ5.4 ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสที่คำนวณด้วยวิธี QSM ,PSR และSPSR ดังแสดงในตารางที่ 5.5 และภาพที่ 5.1 มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสที่คำนวณด้วยวิธี SPSR มีค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินใกล้เคียงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงมากที่สุด มีค่า RMSE เท่ากับ 0.64 กิโลกรัม มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสที่คำนวณด้วยวิธี PSR มีค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินใกล้เคียงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงลำดับถัดมา มีค่า RMSE เท่ากับ 0.76 กิโลกรัม และมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสที่คำนวณด้วยวิธี QSM มีค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินใกล้เคียงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงน้อยที่สุด มีค่า RMSE เท่ากับ 1.36 กิโลกรัม

ตารางที่ 5.5 แสดงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงและมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัส  
คำนวณด้วยวิธี QSM ,PSR และSPSR

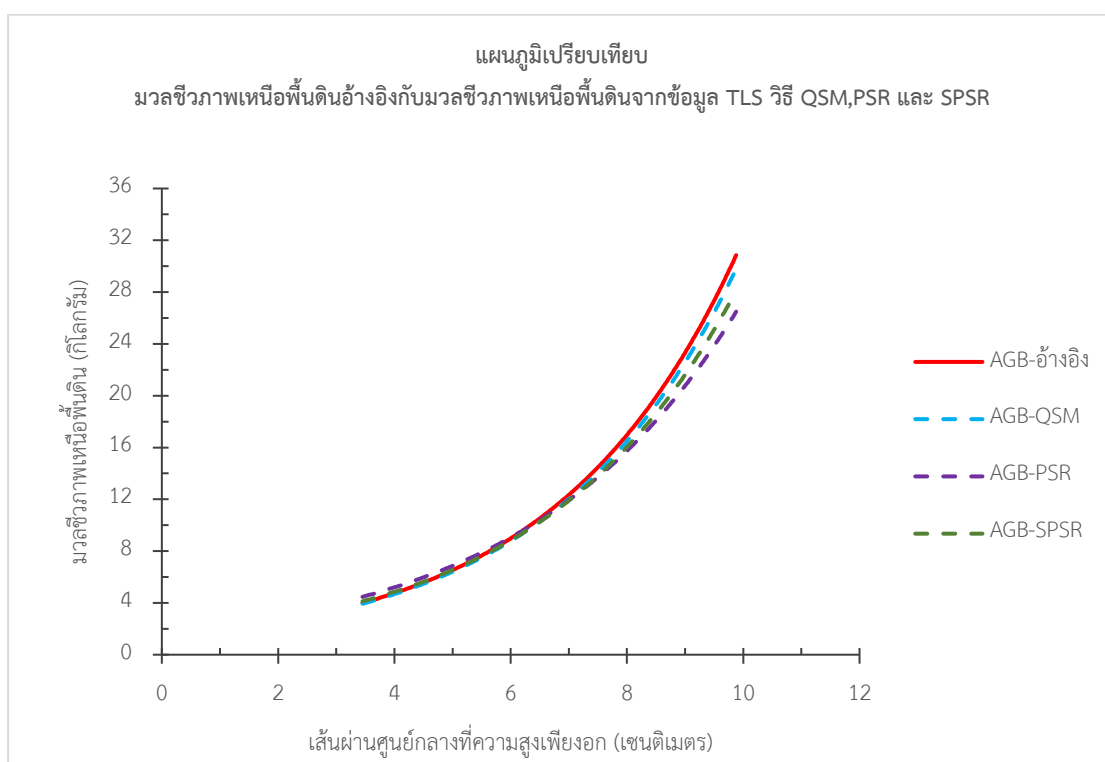
ลำดับ	ต้นยูคา ลิปตัส	มวลชีวภาพเหนือ พื้นดินอ้างอิง (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือ พื้นดินคำนวณ ด้วยวิธี QSM (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือ พื้นดินคำนวณ ด้วยวิธี PSR (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือ พื้นดินคำนวณ ด้วยวิธี SPSR (กิโลกรัม)
1	A1.1	10.98	10.74	9.86	9.82
2	A1.2	8.52	7.78	9.23	8.65
3	A1.3	10.18	9.35	10.24	10.86
4	A2.1	7.51	7.02	8.88	8.11
5	A2.2	13.81	15.51	12.72	12.72
6	A3.1	13.28	14.35	12.91	13.31
7	A3.2	8.59	9.61	7.57	9.18
8	B1.1	10.95	11.37	9.89	9.90
9	B1.2	8.97	8.70	8.32	8.56
10	B1.3	6.74	8.97	6.01	6.73
11	B1.4	13.38	11.89	13.03	13.28
12	B2.1	11.29	11.94	11.84	10.48
13	B2.2	10.86	9.23	11.83	11.62
14	B2.3	6.58	5.12	7.36	6.59
15	B3.1	11.54	10.32	12.52	9.80
16	B3.2	3.11	4.76	3.58	3.11
17	B3.3	5.86	7.57	5.57	5.86
18	B4.1	9.35	7.44	9.92	9.26
19	C1	13.43	15.00	15.05	12.40
20	C2.1	8.77	7.56	8.75	8.77
21	C2.2	7.35	5.84	7.06	7.68

ตารางที่ 5.5 แสดงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงและมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสที่  
คำนวณด้วยวิธี QSM ,PSR และSPSR (ต่อ)

ลำดับ	ต้นยูคา ลิปตัส	มวลชีวภาพเหนือ พื้นดินอ้างอิง (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือ พื้นดินคำนวณ ด้วยวิธี QSM (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือ พื้นดินคำนวณ ด้วยวิธี PSR (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพเหนือ พื้นดินคำนวณ ด้วยวิธี SPSR (กิโลกรัม)
22	C2.3	15.78	13.02	14.72	14.59
23	C2.4	4.69	6.04	5.45	4.68
24	C3	9.49	10.53	10.01	9.95
25	C4.1	9.25	9.62	9.24	8.43
26	C4.2	5.37	3.12	6.11	5.37
27	D1.1	8.51	9.52	7.50	9.15
28	D1.2	3.31	4.58	3.72	3.31
29	D1.3	4.08	2.86	4.06	4.08
30	D1.4	12.17	10.83	11.59	12.50
31	D2.1	7.88	9.37	6.85	7.88
32	D2.2	15.15	13.27	14.68	14.40
33	D2.3	13.60	12.37	13.85	12.95
34	D2.4	9.45	8.83	9.37	8.79
35	D2.5	6.34	5.16	7.39	6.21
36	D3.1	4.44	5.74	4.76	4.45
37	D3.2	12.84	12.12	13.19	12.87
38	D3.3	4.28	3.07	4.96	4.90
39	D4.1	3.15	4.35	3.66	3.15
40	D4.2	4.85	3.38	5.48	4.82
41	D4.3	16.52	17.59	15.20	15.27
		RMSE (กิโลกรัม)	1.35	0.76	0.64
		(ร้อยละ)	14.92	8.41	7.02



จากตารางที่ 5.5 ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงเมื่อเปรียบเทียบกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน พบว่า วิธี SPSR มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงมากที่สุด มีค่า RMSE เท่ากับ 0.64 กิโลกรัม (ร้อยละ 7.02) ตามด้วย วิธี PSR ที่ให้ค่า RMSE เท่ากับ 0.76 กิโลกรัม (ร้อยละ 8.41) และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี QSM พบว่ามีค่า RMSE เท่ากับ 1.35 กิโลกรัม (ร้อยละ 14.92) ได้แสดงผลการเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ด้วยวิธี QSM ,PSR และวิธี SPSR ในรูปแบบแผนภูมิดังภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน วิธี QSM,PSR และ SPSR

จากตารางที่ 5.5 และภาพที่ 5.1 เมื่อพิจารณาค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกของต้นยูคาลิปตัส พบว่า มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกมีขนาดต่ำกว่า 6 เซนติเมตร มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากวิธี SPSR มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงมากที่สุด แสดงเป็นเส้นประสีเขียวในภาพที่ 5.1 มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ที่

มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกมีขนาด 6 - 10 เซนติเมตร มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากวิธี QSM มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงมากที่สุด แสดงเป็นเส้นประสีฟ้าในภาพที่

5.1

## 5.2 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อน

งานวิจัยส่วนที่สองนี้ใช้ต้นไม้ป่าชายเลนเขตร้อน พันธุ์แสมทะเล (*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh) จากพื้นที่ศูนย์ศึกษาระบบนิเวศกึ่งบก (บางปู) จำนวน 32 ลำต้น (ใช้รหัส AM01 – AM32 แทนต้นไม้ตัวอย่าง) ที่ได้จากการสุ่มเป็นกลุ่มตัวอย่าง เก็บข้อมูลสนามด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินเพื่อใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน กลุ่มตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกระหว่าง 5.22 ถึง 26.38 เซนติเมตร และมีความสูงอยู่ระหว่าง 6.13 ถึง 13.52 เมตร ผลลัพธ์จากการดำเนินงานมีดังนี้

### 5.2.1 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงโดยใช้แบบจำลองอัลโลเมตริก

การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อนเป็นวิธีการประมาณค่าแบบไม่ตัดต้นไม้ จากการทบทวนเอกสารไม่พบค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินในพื้นที่ศึกษา ดังนั้นการเปรียบเทียบความถูกต้องเลือกใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ได้รับการตีพิมพ์และเป็นที่ยอมรับของ Komiyama และคณะ (2005) ในสมการที่ 3.1 , Comley และ McGuinness (2005) ในสมการที่ 3.2 , Laongmanee (2011) ในสมการที่ 3.3 , Patil และคณะ (2014) ในสมการที่ 3.4 และ Intarat and Vaiphasa (2019) ในสมการที่ 3.5 โดยสมการที่ 3.1-3.4 สร้างขึ้นจากการเก็บตัวอย่างแบบตัดต้นไม้แล้วนำมาประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน ส่วนสมการที่ 3.5 สร้างขึ้นจากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินแล้วนำมาประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

$$W_{top} = 0.251\rho D^{2.46} \quad (3.1)$$

$$W_{top} = 0.308 DBH^{2.11} \quad (3.2)$$

$$W_{top} = 0.251\rho D^{2.24} \quad (3.3)$$

$$W_{top} = 0.3404 DBH^{2.0273} \quad (3.4)$$

$$AGB_{tls} = 0.0274 DBH^{2.862} \quad (3.5)$$

### 5.2.1.1 ผลการประมาณการแพร่ค่าคลาดเคลื่อน

ค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดประกอบด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกและความหนาแน่นจำเพาะของต้นไม้ มีค่าร้อยละ 0.51 และ 8.33 ตามลำดับ การแพร่ค่าคลาดเคลื่อนของมวลชีวภาพลำต้น มีค่าร้อยละ 8.36 เมื่อนำค่าคลาดเคลื่อนของการปรับแก้เรือนยอดแพร่รวมเข้าไปในการคำนวณ ส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนรวมมีค่าร้อยละ 13.03

พิจารณาค่าคลาดเคลื่อนมวลชีวภาพรวมแยกรายต้นจากแบบจำลองอัลโลเมตริกทั้ง 5 สมการ ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แสดงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวมของต้นแสมทะเลจากแบบจำลองอ้างอิงทั้ง 5 สมการ

ต้นไม้ ตัวอย่าง	เส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ ความสูงเพียง อก (เซนติเมตร)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม (กิโลกรัม)				
		Komiyama และคณะ (2005)	Comley และ McGuinness (2005)	Laongmanee (2011)	Patil และคณะ (2014)	Intarat and Vaiphasa (2019)
AM01	18.95 ±0.14	209.29 ±27.27	152.86 ±19.92	109.56 ±14.28	132.46 ±17.26	124.24 ±16.19
AM02	26.38 ±0.21	472.24 ±61.53	307.21 ±40.03	229.87 ±29.95	259.02 ±33.75	320.21 ±41.72
AM03	20.20 ±0.13	244.90 ±31.91	174.92 ±22.79	126.42 ±16.47	150.77 ±19.65	149.16 ±19.44
AM04	14.15 ±0.08	102.02 ±13.29	82.54 ±10.75	56.95 ±7.42	73.27 ±9.55	53.85 ±7.02
AM05	20.58 ±0.08	256.39 ±33.41	181.94 ±23.71	131.81 ±17.17	156.58 ±20.40	157.34 ±20.50
AM06	11.14 ±0.07	56.65 ±7.38	49.83 ±6.49	33.33 ±4.34	45.12 ±5.88	27.16 ±3.54
AM07	15.34 ±0.13	124.44 ±16.21	97.87 ±12.75	68.25 ±8.89	86.30 ±11.24	67.86 ±8.84
AM08	12.96 ±0.09	82.19 ±10.71	68.57 ±8.93	46.78 ±6.10	61.32 ±7.99	41.88 ±5.46
AM09	10.62 ±0.07	50.36 ±6.56	45.05 ±5.87	29.95 ±3.90	40.95 ±5.34	23.69 ±3.09
AM10	10.55 ±0.08	49.55 ±6.46	44.42 ±5.79	29.51 ±3.84	40.40 ±5.26	23.24 ±3.03
AM11	14.83 ±0.09	114.51 ±14.92	91.13 ±11.87	63.27 ±8.24	80.58 ±10.50	61.60 ±8.03
AM12	5.22 ±0.04	8.78 ±1.14	10.07 ±1.31	6.10 ±0.79	9.70 ±1.26	3.10 ±0.40

ตารางที่ 5.6 แสดงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวมของต้นแสมทะเลจากแบบจำลองอ้างอิงทั้ง 5 สมการ  
(ต่อ)

ต้นไม้ ตัวอย่าง	เส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ ความสูงเพียง อก (เซนติเมตร)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม (กิโลกรัม)				
		Komiyama และคณะ (2005)	Comley และ McGuinness (2005)	Laongmanee (2011)	Patil และคณะ (2014)	Intarat and Vaiphasa (2019)
AM13	14.67 ±0.05	111.49 ±14.53	89.07 ±11.61	61.75 ±8.05	78.83 ±10.27	59.71 ±7.78
AM14	17.16 ±0.07	163.96 ±21.36	123.99 ±16.16	87.73 ±11.43	108.32 ±14.11	93.53 ±12.19
AM15	17.95 ±0.10	183.16 ±23.87	136.34 ±17.77	97.04 ±12.64	118.67 ±15.46	106.39 ±13.86
AM16	9.14 ±0.03	34.81 ±4.54	32.82 ±4.28	21.40 ±2.79	30.21 ±3.94	15.42 ±2.01
AM17	8.43 ±0.06	28.53 ±3.72	27.67 ±3.61	17.85 ±2.33	25.64 ±3.34	12.23 ±1.59
AM18	15.11 ±0.06	119.90 ±15.62	94.80 ±12.35	65.97 ±8.60	83.70 ±10.91	64.98 ±8.47
AM19	15.65 ±0.11	130.72 ±17.03	102.09 ±13.30	71.37 ±9.30	89.87 ±11.71	71.85 ±9.36
AM20	13.95 ±0.08	98.51 ±12.84	80.09 ±10.44	55.17 ±7.19	71.18 ±9.28	51.70 ±6.74
AM21	15.34 ±0.07	124.44 ±16.21	97.87 ±12.75	68.25 ±8.89	86.30 ±11.24	67.86 ±8.84
AM22	11.68 ±0.04	63.64 ±8.29	55.06 ±7.17	37.06 ±4.83	49.66 ±6.47	31.10 ±4.05
AM23	10.32 ±0.07	46.93 ±6.12	42.40 ±5.53	28.08 ±3.66	38.64 ±5.03	21.82 ±2.84
AM24	15.98 ±0.07	137.60 ±17.93	106.68 ±13.90	74.79 ±9.74	93.76 ±12.22	76.28 ±9.94
AM25	12.37 ±0.05	73.29 ±9.55	62.15 ±8.10	42.14 ±5.49	55.79 ±7.27	36.65 ±4.78
AM26	9.95 ±0.09	42.90 ±5.59	39.26 ±5.12	25.88 ±3.37	35.88 ±4.68	19.66 ±2.56
AM27	12.31 ±0.02	72.42 ±9.44	61.52 ±8.02	41.69 ±5.43	55.24 ±7.20	36.15 ±4.71
AM28	15.87 ±0.08	135.28 ±17.63	105.14 ±13.70	73.64 ±9.60	92.45 ±12.05	74.78 ±9.74
AM29	11.96 ±0.04	67.46 ±8.79	57.88 ±7.54	39.08 ±5.09	52.10 ±6.79	33.28 ±4.34

ตารางที่ 5.6 แสดงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวมของต้นแสมทะเลจากแบบจำลองอ้างอิงทั้ง 5 สมการ (ต่อ)

ต้นไม้ ตัวอย่าง	เส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ ความสูงเพียง อก (เซนติเมตร)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม (กิโลกรัม)				
		Komiyama และคณะ (2005)	Comley และ McGuinness (2005)	Laongmanee (2011)	Patil และคณะ (2014)	Intarat and Vaiphasa (2019)
AM30	14.86 ±0.05	115.08 ±14.99	91.52 ±11.92	63.55 ±8.28	80.91 ±10.54	61.95 ±8.07
AM31	15.72 ±0.07	132.16 ±17.22	103.05 ±13.43	72.09 ±9.39	90.69 ±11.82	72.78 ±9.48
AM32	14.35 ±0.07	105.60 ±13.76	85.02 ±11.08	58.77 ±7.66	75.38 ±9.82	56.06 ±7.30

## 5.2.2 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Qualitative surface model (QSM)

### 5.2.2.1 ผลการคำนวณปริมาตรของลำต้น

ปริมาตรของต้นแสมทะเลรายต้นคำนวณจากพอยคลาวด์ที่เก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน นำพอยคลาวด์ส่วนลำต้นของแต่ละตัวอย่างคำนวณปริมาตรด้วยโปรแกรมรหัสเปิด TreeQSM ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 5.7 ปริมาตรของลำต้นมีค่าระหว่าง 0.01 – 0.54 ลูกบาศก์เมตร โดยต้นแสมทะเล AM2 มีปริมาตรมากที่สุดเท่ากับ 0.54 ลูกบาศก์เมตร และต้นแสมทะเล AM30 มีปริมาตรน้อยที่สุดเท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์เมตร

### 5.2.2.2 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพลำต้น

นำปริมาตรของลำต้นที่คำนวณได้คูณกับความหนาแน่นจำเพาะเนื้อไม้ (600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) แสดงในตารางที่ 5.7 ต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพลำต้นมากที่สุดคือ AM2 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 325.20 กิโลกรัม และต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพลำต้นน้อยที่สุดคือ AM30 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 3.87 กิโลกรัม

### 5.2.2.3 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม

นำค่ามวลชีวภาพลำต้นของต้นแสมทะเล มาปรับแก้ค่ามวลชีวภาพเรือนยอด ด้วยการคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้เรือนยอด (1.25) (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเล แสดงในตารางที่ 5.7 โดยที่ต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินมากที่สุดคือ AM2 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 406.50 กิโลกรัม และต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินน้อยที่สุดคือ AM30 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 4.83 กิโลกรัม

ตารางที่ 5.7 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี QSM

ต้นไม้ ตัวอย่าง	ความ สูง (เมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ ความสูง เพียงอก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เมตร)	มวลชีวภาพลำ ต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
AM01	7.81	20.33	0.15	88.20	22.05	110.25
AM02	8.73	25.73	0.54	325.20	81.30	406.50
AM03	9.11	16.34	0.22	129.60	32.40	162.00
AM04	7.56	9.25	0.06	38.35	9.59	47.93
AM05	7.24	13.24	0.31	187.20	46.80	234.00
AM06	6.71	10.70	0.10	62.10	15.53	77.63
AM07	6.65	15.31	0.12	72.42	18.11	90.53
AM08	6.46	13.71	0.05	30.76	7.69	38.45
AM09	7.89	10.61	0.11	66.18	16.55	82.73
AM10	6.94	10.48	0.02	11.11	2.78	13.88
AM11	7.24	15.86	0.13	78.36	19.59	97.95
AM12	10.48	5.07	0.01	6.13	1.53	7.67
AM13	7.04	15.36	0.06	34.58	8.64	43.22
AM14	6.58	18.00	0.04	25.98	6.50	32.48
AM15	7.47	18.40	0.05	30.01	7.50	37.52

ตารางที่ 5.7 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลจาก  
พอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี QSM (ต่อ)

ต้นไม้ ตัวอย่าง	ความสูง (เมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ ความสูง เพียงอก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เมตร)	มวลชีวภาพ ลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
AM16	8.64	9.41	0.03	17.09	4.27	21.36
AM17	6.87	8.26	0.02	9.09	2.27	11.36
AM18	6.29	15.04	0.04	21.46	5.36	26.82
AM19	7.33	19.93	0.07	39.07	9.77	48.84
AM20	3.46	10.37	0.01	7.24	1.81	9.05
AM21	8.24	15.49	0.11	63.84	15.96	79.80
AM22	4.94	11.85	0.03	15.24	3.81	19.05
AM23	7.59	10.51	0.04	23.27	5.82	29.09
AM24	6.31	19.53	0.04	22.17	5.54	27.71
AM25	6.15	12.04	0.02	9.35	2.34	11.69
AM26	4.90	10.27	0.01	6.14	1.53	7.67
AM27	7.00	12.14	0.02	14.57	3.64	18.22
AM28	5.01	16.41	0.04	24.40	6.10	30.50
AM29	5.48	12.03	0.02	13.19	3.30	16.49
AM30	4.22	15.53	0.01	3.87	0.97	4.83
AM31	4.73	19.78	0.04	21.84	5.46	27.30
AM32	5.71	15.10	0.01	7.70	1.93	9.63

### 5.2.3 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Poisson surface reconstruction (PSR)

#### 5.2.3.1 ผลการคำนวณปริมาตรของลำต้น

ปริมาตรของต้นแสมทะเลรายต้นคำนวณจากพอยคลาวด์ที่เก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน นำพอยคลาวด์ส่วนลำต้นของแต่ละตัวอย่างคำนวณปริมาตรด้วยโปรแกรมรหัสเปิด CloudCompare ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 5.8 ปริมาตรของลำต้นมีค่าระหว่าง 0.01 – 0.40 ลูกบาศก์เมตร โดยต้นแสมทะเล AM02 มีปริมาตรมากที่สุดเท่ากับ 0.40 ลูกบาศก์เมตร และต้นแสมทะเล AM30 มีปริมาตรน้อยที่สุดเท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์เมตร

#### 5.2.3.2 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพลำต้น

นำปริมาตรของลำต้นที่คำนวณได้คูณกับความหนาแน่นจำเพาะของต้นแสมทะเล (600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) แสดงในตารางที่ 5.8 ต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพลำต้นมากที่สุดคือ AM02 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 237.03 กิโลกรัม และต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพลำต้นน้อยที่สุดคือ AM30 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 4.39 กิโลกรัม

#### 5.2.3.3 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม

นำค่ามวลชีวภาพลำต้นของต้นแสมทะเลมาปรับแก้ค่ามวลชีวภาพเรือนยอดด้วยการคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้เรือนยอด (1.25) (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลแสดงในตารางที่ 5.8 โดยที่ต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินมากที่สุดคือ AM02 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 296.29 กิโลกรัม และต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินน้อยที่สุดคือ AM30 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 5.48 กิโลกรัม



ตารางที่ 5.8 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นเสมททะเลจาก  
พอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี PSR

ต้นไม้ ตัวอย่าง	ความสูง (เมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ ความสูงเพียง อก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เมตร)	มวลชีวภาพ ลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
AM01	7.55	18.12	0.14	83.78	20.95	104.73
AM02	8.41	26.90	0.40	237.03	59.26	296.29
AM03	8.95	18.76	0.21	123.37	30.84	154.22
AM04	7.31	12.08	0.06	37.47	9.37	46.83
AM05	7.11	15.12	0.06	36.46	9.11	45.57
AM06	6.52	16.22	0.11	64.22	16.06	80.28
AM07	6.38	15.96	0.12	73.72	18.43	92.15
AM08	6.16	16.92	0.05	32.04	8.01	40.05
AM09	7.84	11.72	0.12	70.65	17.66	88.31
AM10	6.83	15.48	0.01	8.96	2.24	11.20
AM11	7.01	16.96	0.13	79.65	19.91	99.56
AM12	10.19	8.29	0.01	5.75	1.44	7.19
AM13	6.79	15.24	0.05	32.26	8.06	40.32
AM14	6.35	19.72	0.04	26.73	6.68	33.41
AM15	7.29	17.94	0.05	31.93	7.98	39.91
AM16	8.46	12.94	0.02	13.52	3.38	16.91
AM17	6.75	14.69	0.02	9.10	2.28	11.38
AM18	5.97	15.43	0.04	24.86	6.21	31.07
AM19	7.12	16.84	0.06	37.85	9.46	47.32
AM20	3.38	14.19	0.01	8.94	2.23	11.17

ตารางที่ 5.8 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลจาก พอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี PSR (ต่อ)

ต้นไม้ ตัวอย่าง	ความสูง (เมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ ความสูงเพียง อก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เมตร)	มวลชีวภาพ ลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
AM21	8.04	18.52	0.11	63.96	15.99	79.95
AM22	4.74	15.06	0.07	40.01	10.00	50.02
AM23	7.39	14.51	0.04	21.39	5.35	26.74
AM24	6.24	16.38	0.04	21.91	5.48	27.39
AM25	5.88	18.10	0.02	9.16	2.29	11.45
AM26	4.84	10.96	0.01	5.91	1.48	7.39
AM27	6.87	16.90	0.02	14.50	3.63	18.13
AM28	4.83	20.30	0.04	24.86	6.21	31.07
AM29	5.37	15.40	0.02	14.64	3.66	18.30
AM30	4.10	15.03	0.01	4.39	1.10	5.48
AM31	4.53	16.38	0.04	22.31	5.58	27.89
AM32	5.61	14.62	0.01	6.63	1.66	8.29

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 5.2.4 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินด้วยวิธี Screen Poisson surface reconstruction (SPSR)

##### 5.2.4.1 ผลการคำนวณปริมาตรของลำต้น

ปริมาตรของต้นแสมทะเลรายต้นคำนวณจากพอยคลาวด์ที่เก็บข้อมูลด้วย เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน นำพอยคลาวด์ส่วนลำต้นของแต่ละตัวอย่างคำนวณปริมาตรด้วย โปรแกรมรหัสเปิด MeshLab ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 5.9 ปริมาตรของลำต้นมีค่าระหว่าง 0.01 – 0.35 ลูกบาศก์เมตร โดยต้นแสมทะเล AM02 มีปริมาตรมากที่สุดเท่ากับ 0.35 ลูกบาศก์เมตร และ ต้นแสมทะเล AM30 มีปริมาตรน้อยที่สุดเท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์เมตร

#### 5.2.4.2 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพลำต้น

นำปริมาตรของลำต้นที่คำนวณได้คูณกับความหนาแน่นจำเพาะเนื้อไม้ (583.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) แสดงในตารางที่ 5.9 ต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพลำต้นมากที่สุดคือ AM02 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 212.20 กิโลกรัม และต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพลำต้นน้อยที่สุดคือ AM30 มีมวลชีวภาพลำต้นเท่ากับ 3.42 กิโลกรัม

#### 5.2.4.3 ผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม

นำค่ามวลชีวภาพลำต้นของต้นแสมทะเลมาปรับแก้ค่ามวลชีวภาพเรือนยอด ด้วยการคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปรับแก้เรือนยอด (1.25) (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) มวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลแสดงในตารางที่ 5.9 โดยที่ต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินมากที่สุดคือ AM02 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 265.25 กิโลกรัม และต้นแสมทะเลที่มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินน้อยที่สุดคือ AM30 มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินเท่ากับ 4.27 กิโลกรัม

ตารางที่ 5.9 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี SPSR

ต้นไม้ ตัวอย่าง	ความสูง (เมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ ความสูง เพียงอก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เมตร)	มวลชีวภาพลำ ต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
AM01	7.72	19.36	0.18	106.64	26.66	133.29
AM02	8.54	23.32	0.35	212.20	53.05	265.25
AM03	9.06	19.16	0.23	136.56	34.14	170.70
AM04	7.34	14.95	0.02	14.12	3.53	17.65
AM05	7.10	17.08	0.09	53.31	13.33	66.63
AM06	6.62	14.98	0.11	63.94	15.99	79.93
AM07	6.56	16.58	0.16	96.73	24.18	120.91
AM08	6.24	16.34	0.05	31.27	7.82	39.09

ตารางที่ 5.9 แสดงปริมาณของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลจาก  
พอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี SPSR (ต่อ)

ต้นไม้ ตัวอย่าง	ความสูง (เมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ ความสูงเพียง อก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เมตร)	มวลชีวภาพ ลำต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
AM09	7.65	13.40	0.16	93.29	23.32	116.62
AM10	6.71	15.46	0.02	13.45	3.36	16.81
AM11	7.11	15.60	0.15	88.73	22.18	110.91
AM12	10.29	11.68	0.01	6.77	1.69	8.46
AM13	6.68	16.86	0.06	34.06	8.51	42.57
AM14	6.57	21.58	0.05	30.23	7.56	37.79
AM15	7.21	19.76	0.05	29.90	7.47	37.37
AM16	8.39	16.76	0.03	18.10	4.53	22.63
AM17	6.81	12.36	0.02	11.79	2.95	14.74
AM18	6.03	17.54	0.03	19.15	4.79	23.94
AM19	7.15	16.84	0.04	22.56	5.64	28.20
AM20	3.41	16.32	0.02	11.06	2.76	13.82
AM21	7.95	20.14	0.01	8.67	2.17	10.84
AM22	4.68	18.24	0.03	18.87	4.72	23.58
AM23	7.26	18.44	0.04	22.66	5.66	28.32
AM24	6.11	19.78	0.04	22.31	5.58	27.89
AM25	5.98	21.40	0.01	8.65	2.16	10.82
AM26	4.87	12.52	0.01	5.90	1.48	7.38

ตารางที่ 5.9 แสดงปริมาตรของลำต้นและค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นแสมทะเลจาก  
พอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี SPSR (ต่อ)

ต้นไม้ ตัวอย่าง	ความสูง (เมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ ความสูง เพียงอก (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เมตร)	มวลชีวภาพลำ ต้น (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เรือนยอด (กิโลกรัม)	มวลชีวภาพ เหนือพื้นดิน (กิโลกรัม)
AM27	7.16	20.78	0.02	13.29	3.32	16.61
AM28	5.01	23.30	0.04	25.96	6.49	32.46
AM29	5.27	18.30	0.03	15.24	3.81	19.05
AM30	4.19	19.58	0.01	3.42	0.85	4.27
AM31	4.63	21.60	0.04	21.35	5.34	26.69
AM32	5.49	18.30	0.01	6.28	1.57	7.84

### 5.2.5 ผลการตรวจสอบความถูกต้องจากการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่า ชายเลนเขตร้อน

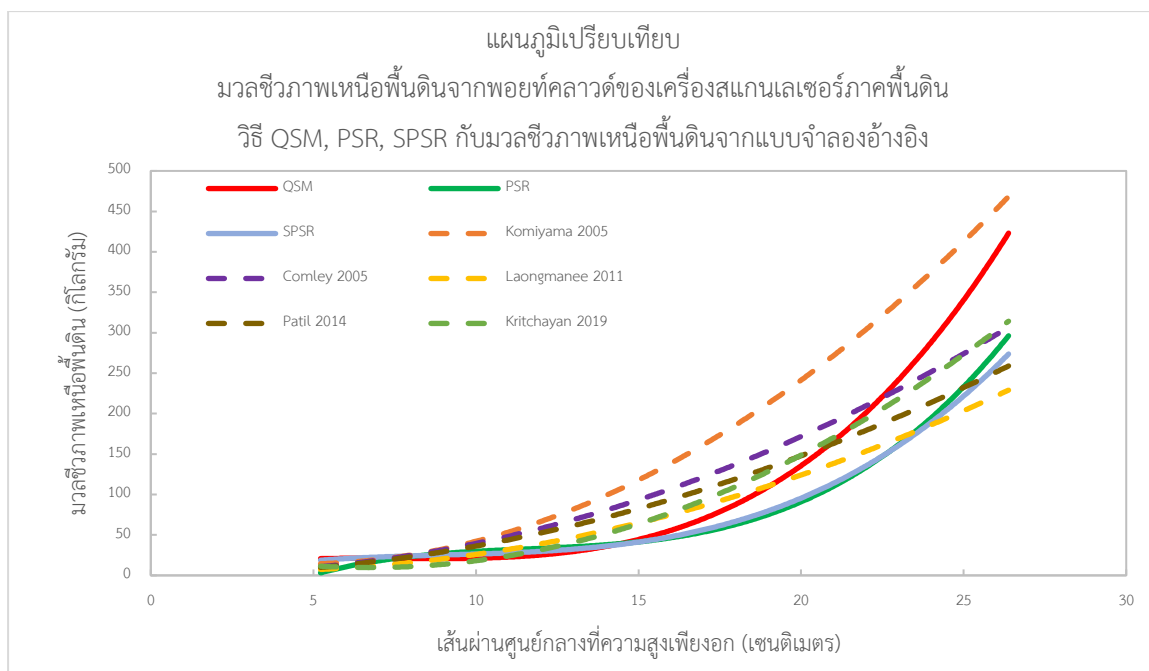
จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยไม่พบค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินในพื้นที่ศึกษา การเปรียบเทียบความถูกต้องจึงเลือกใช้แบบจำลองอัลโลเมตริกอ้างอิงที่ได้รับการตีพิมพ์และเป็นที่ยอมรับ โดยแบบจำลองอัลโลเมตริกอ้างอิงนี้สร้างขึ้นจากการเก็บตัวอย่างแบบตัดต้นไม้แล้วนำมาประมาณค่า มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน ดังแสดงในสมการที่ 3.1 – 3.4 และสร้างขึ้นจากการวัดขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินแล้วนำมาประมาณ ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน ดังแสดงในสมการที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับแบบจำลองอัลโลเม ตริกทั้ง 5 สมการ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก ดังแสดงในหัวข้อ 5.2.1 และค่า ความหนาแน่นจำเพาะของต้นไม้ (600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จึงถูกนำมาแทนค่าใน แบบจำลองอัลโลเมตริกอ้างอิง จากนั้นนำค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินเปรียบเทียบกับมวลชีวภาพเหนือ พื้นดินที่ประมาณค่าจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี QSM, PSR และวิธี SPSR เพื่อหาค่า RMSE แสดงผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินในตารางที่ 5.10 และ แผนภูมิผลการเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินในภาพที่ 5.2

ตารางที่ 5.10 การเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ประมาณค่าจากพอยท์คลาวด์ของเครื่อง  
สแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิง

ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอก (เซนติเมตร)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน			มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิง				
		วิธี QSM	วิธี PSR	วิธี SPSR	Komiya	Comley	Laongm	Patil	Intarat
					ma และคณะ (2005)	และ McGuinn ess (2005)	anee (2011)	และคณะ (2014)	and Vaiphasa (2019)
AM01	18.95	110.25	104.73	133.29	209.29	152.86	109.56	132.46	124.24
AM02	26.38	406.50	296.29	265.25	472.24	307.21	229.87	259.02	320.21
AM03	20.20	162.00	154.22	170.70	244.90	174.92	126.42	150.77	149.16
AM04	14.15	47.93	46.83	17.65	102.02	82.54	56.95	73.27	53.85
AM05	20.58	234.00	45.57	66.63	256.39	181.94	131.81	156.58	157.34
AM06	11.14	77.63	80.28	79.93	56.65	49.83	33.33	45.12	27.16
AM07	15.34	90.53	92.15	120.91	124.44	97.87	68.25	86.30	67.86
AM08	12.96	38.45	40.05	39.09	82.19	68.57	46.78	61.32	41.88
AM09	10.62	82.73	88.31	116.62	50.36	45.05	29.95	40.95	23.69
AM10	10.55	13.88	11.20	16.81	49.55	44.42	29.51	40.40	23.24
AM11	14.83	97.95	99.56	110.91	114.51	91.13	63.27	80.58	61.60
AM12	5.22	7.67	7.19	8.46	8.78	10.07	6.10	9.70	3.10
AM13	14.67	43.22	40.32	42.57	111.49	89.07	61.75	78.83	59.71
AM14	17.16	32.48	33.41	37.79	163.96	123.99	87.73	108.32	93.53
AM15	17.95	37.52	39.91	37.37	183.16	136.34	97.04	118.67	106.39
AM16	9.14	21.36	16.91	22.63	34.81	32.82	21.40	30.21	15.42
AM17	8.43	11.36	11.38	14.74	28.53	27.67	17.85	25.64	12.23
AM18	15.11	26.82	31.07	23.94	119.90	94.80	65.97	83.70	64.98
AM19	15.65	48.84	47.32	28.20	130.72	102.09	71.37	89.87	71.85
AM20	13.95	9.05	11.17	13.82	98.51	80.09	55.17	71.18	51.70
AM21	15.34	79.80	79.95	10.84	124.44	97.87	68.25	86.30	67.86
AM22	11.68	19.05	50.02	23.58	63.64	55.06	37.06	49.66	31.10

ตารางที่ 5.10 การเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ประมาณค่าจากพอยท์คลาวด์ของเครื่อง  
สแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิง (ต่อ)

ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลางที่ ความสูง เพียงอก (เซนติเมตร)	มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์ คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ ภาคพื้นดิน			มวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิง				
		วิธี QSM	วิธี PSR	วิธี SPSR	Komiya ma และ คณะ (2005)	Comley และ McGuinn ess (2005)	Laongm anee (2011)	Patil และคณะ (2014)	Intarat and Vaiphasa (2019)
AM23	10.32	29.09	26.74	28.32	46.93	42.40	28.08	38.64	21.82
AM24	15.98	27.71	27.39	27.89	137.60	106.68	74.79	93.76	76.28
AM25	12.37	11.69	11.45	10.82	73.29	62.15	42.14	55.79	36.65
AM26	9.95	7.67	7.39	7.38	42.90	39.26	25.88	35.88	19.66
AM27	12.31	18.22	18.13	16.61	72.42	61.52	41.69	55.24	36.15
AM28	15.87	30.50	31.07	32.46	135.28	105.14	73.64	92.45	74.78
AM29	11.96	16.49	18.30	19.05	67.46	57.88	39.08	52.10	33.28
AM30	14.86	4.83	5.48	4.27	115.08	91.52	63.55	80.91	61.95
AM31	15.72	27.30	27.89	26.69	132.16	103.05	72.09	90.69	72.78
AM32	14.35	9.63	8.29	7.84	105.60	85.02	58.77	75.38	56.06



ภาพที่ 5.2 แผนภูมิเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิง

จากตารางที่ 5.10 และภาพที่ 5.2 ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นเสมหะเลจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกระหว่าง 5.00 – 10.00 เซนติเมตร วิธี QSM (เส้นทึบสีแดง) และวิธี PSR (เส้นทึบสีเขียวเข้ม) มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิงของ Intarat และ Vaiphasa (2019) แสดงด้วยเส้นประสีเขียว มากที่สุด มีค่า RMSE เท่ากับ 7.08 กิโลกรัม (ร้อยละ 58.93) และ 6.52 กิโลกรัม (ร้อยละ 5.04) ตามลำดับ ในขณะที่วิธี SPSR (เส้นทึบสีม่วง) มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิงของ Laongmanee (2011) แสดงด้วยเส้นประสีเหลือง มีค่า RMSE เท่ากับ 138.95 กิโลกรัม (ร้อยละ 176.85)

ต้นเสมหะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกระหว่าง 10.00 – 15.00 เซนติเมตร ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินวิธี QSM (เส้นทึบสีแดง) วิธี PSR (เส้นทึบสีเขียวเข้ม) และวิธี SPSR (เส้นทึบสีม่วง) มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิงของ Intarat และ Vaiphasa (2019) แสดงด้วยเส้นประสีเขียว มากที่สุด มีค่า RMSE เท่ากับ 33.09 กิโลกรัม (ร้อยละ 95.48), RMSE เท่ากับ 34.34 กิโลกรัม (ร้อยละ 92.63) และ RMSE เท่ากับ 39.95 กิโลกรัม (ร้อยละ 109.38) ตามลำดับ



ต้นแสมทะเลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกระหว่าง 15.00 – 20.00 เซนติเมตร ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยต์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินวิธี QSM (เส้นทึบสีแดง) วิธี PSR (เส้นทึบสีเขียวเข้ม) และวิธี SPSR (เส้นทึบสีม่วง) มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิงของ Laongmanee (2011) แสดงด้วยเส้นประสีเหลือง มากที่สุด มีค่า RMSE เท่ากับ 39.18 กิโลกรัม (ร้อยละ 76.56), RMSE เท่ากับ 61.15 กิโลกรัม (ร้อยละ 121.00) และ RMSE เท่ากับ 72.32 กิโลกรัม (ร้อยละ 148.98) ตามลำดับ

ต้นแสมทะเลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกมากกว่า 20.00 เซนติเมตร ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยต์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินวิธี QSM (เส้นทึบสีแดง) มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิงของ Komiyama (2005) แสดงด้วยเส้นประสีส้มมากที่สุด มีค่า RMSE เท่ากับ 62.44 กิโลกรัม (ร้อยละ 23.34) วิธี PSR (เส้นทึบสีเขียวเข้ม) และวิธี SPSR (เส้นทึบสีม่วง) มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแบบจำลองอ้างอิงของ Laongmanee (2011) แสดงด้วยเส้นประสีเหลืองมากที่สุดมีค่า RMSE เท่ากับ 145.76 กิโลกรัม (ร้อยละ 183.89) และ RMSE เท่ากับ 163.80 กิโลกรัม (ร้อยละ 211.55) ตามลำดับ

## บทที่ 6

### สรุปผล อภิปรายและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้แบ่งการสรุปผล อภิปรายและข้อเสนอแนะงานวิจัยเป็นสองส่วน หัวข้อ 6.1 สำหรับผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ และหัวข้อ 6.2 สำหรับการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากป่าชายเลนเขตร้อน

#### 6.1 สรุปผล อภิปรายและข้อเสนอแนะงานวิจัยสำหรับผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากแปลงทดสอบ

การวิจัยนี้ทดสอบประสิทธิภาพของข้อมูลสามมิติจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินและความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนจากแบบจำลองการสร้างพื้นผิวใหม่ (Surface reconstruction model, SRM) (Kazhdan, 2005) ที่เป็นที่ยอมรับ 2 แบบจำลองนั้นคือวิธี Poisson และวิธี Screen poisson เพื่อประมาณปริมาตรของต้น ยูคาลิปตัสจำนวน 41 ต้น ผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีถูกเปรียบเทียบกับปริมาตรอ้างอิงด้วยวิธีไซโลเมตริก (Xylometry) จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา แบบจำลองการสร้างพื้นผิวใหม่วิธี Poisson ทั้งสองนี้ไม่เคยมีการทดสอบกับต้นไม้ที่มีลำต้นเดี่ยวและสูง เหมือนต้นยูคาลิปตัสมาก่อน ผลการทดลองพบว่าทั้งสองวิธีมีความแม่นยำที่ดีสำหรับต้นไม้ชนิดนี้ หลังจากปรับแก้ปริมาตรอย่างเป็นระบบที่ร้อยละ 20 เพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินพบว่า วิธี PSR และวิธี SPSR มีค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินต่ำกว่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิง แสดงด้วยค่า RMSE ที่ร้อยละ 7.54 และ 7.63 ตามลำดับ (ตารางที่ 5.5 และภาพที่ 5.1) วิธี Poisson ทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธี QSM แบบดั้งเดิม เนื่องจากวิธี QSM มีค่า RMSE ที่ร้อยละ 10.93 แสดงให้เห็นว่าวิธี Poisson สามารถสร้างพื้นผิวที่มีความซับซ้อนของต้นยูคาลิปตัสได้อย่างดีเนื่องจาก Poisson เป็นฟังก์ชันพื้นฐานที่แสดงรายละเอียดสามมิติจากข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวน (Kazhdan, 2005) ผลการทดลองนี้ยังสนับสนุนงานวิจัยที่ผ่านมาว่าต้นไม้แต่ละต้นมีความแตกต่างกันและควรใช้แบบจำลองเฉพาะสายพันธุ์ที่สามารถปรับแต่งให้มีความเหมาะสมเพื่อความแม่นยำสูงสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับพืชที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างพื้นผิวใหม่เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับต้นไม้หลากหลายสายพันธุ์ถูกพัฒนาจากผู้ทำวิจัยดังต่อไปนี้ (Buck et al., 2019; Muumbe et al., 2021; Owers et al., 2018; Takoudjou et al., 2018)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการสร้างพื้นผิวใหม่ในรูปแบบต่างๆ กับข้อมูลต้นยูคาลิปตัสยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา มีงานวิจัยของ Buck และคณะ (2019) (Buck et al.,

2019) เพียงงานวิจัยเดียวเท่านั้น โดย Buck ใช้ข่ายสามเหลี่ยมไม่สม่ำเสมอ (Triangulated irregular network, TIN) เป็นวิธีสร้างพื้นผิวใหม่ที่ปรับให้ใกล้เคียงกับพื้นผิวจริงมากที่สุด (Lim and Haron, 2014) โดยสร้างข่ายสามเหลี่ยมขนาดเล็กให้พอดีกับพื้นผิวดั้งเดิม จากนั้นคำนวณปริมาตรของต้นยูคาลิปตัสแต่ละต้นเปรียบเทียบกับปริมาตรอ้างอิงที่ประมาณค่าจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกโดยใช้คาลิปเปอร์วัดจากต้นไม้จริงในสนาม งานวิจัยของ Buck และงานวิจัยนี้สอดคล้องกันว่า ปริมาตรจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินประมาณค่าปริมาตรของต้นยูคาลิปตัสต่ำกว่าปริมาตรอ้างอิงจากวิธีไซโลเมตริกอย่างเห็นได้ชัดประมาณร้อยละ 20 ทำให้เราใช้ตัวคูณ 1.25 (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014; Intarat and Vaiphasa, 2020) ในขั้นตอนสุดท้ายของการคำนวณเพื่อปรับข้อผิดพลาดอย่างเป็นระบบนี้ ดังแสดงในภาพที่ 5.1 นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่สนับสนุนผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ต่ำกว่ามวลชีวภาพอ้างอิงซึ่งพบในการศึกษาต้นไม้ทรงสูง (Murphy, 2008; Saarinen et al., 2017) ในความเห็นของผู้ทำวิจัย ผลการประมาณค่าปริมาตรของต้นไม้ที่ต่ำกว่าปริมาตรอ้างอิงอาจเกิดจากต้นไม้ที่มีลำต้นเดี่ยวสูงเหล่านี้มีการบดบังสัญญาณเลเซอร์โดยกิ่งและใบในส่วนบนของต้นไม้ ควรทำการตรวจสอบเพิ่มเติมเพื่อยืนยันสมมติฐานนี้ เป็นที่น่าเสียดายที่ไม่สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ในเชิงปริมาณระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Buck ได้ เนื่องจากปริมาตรอ้างอิงมีรูปแบบการคำนวณแตกต่างกัน Buck ไม่ได้ใช้การประมาณปริมาตรอ้างอิงด้วยการแทนที่น้ำ แต่ใช้คาลิปเปอร์วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกไปแทนค่าในแบบจำลองอัลโลเมตริก อีกทั้งต้นยูคาลิปตัสตัวอย่างมีสายพันธุ์ที่แตกต่างกันด้วย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นมีวัตถุประสงค์เพียงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธี PSR และ SPSR ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับวิธีการสร้างพื้นผิวใหม่ด้วยวิธีอื่นๆ ที่มีการทดลองใช้ในปัจจุบันอีกหลากหลายวิธี เนื่องจากงบประมาณในการดำเนินงานภาคสนามมีงบประมาณจำกัดทำให้การเก็บข้อมูลของต้นไม้ตัวอย่างในสนามมีจำนวนน้อยเพียง 41 ต้น ส่งผลให้มีตัวอย่างไม่เพียงพอที่จะสนับสนุนทฤษฎีแนวโน้มนำเข้าสู่ศูนย์กลาง (Central limit theorem) กล่าวคือ ไม่สามารถสร้างตัวแปรทางสถิติที่เชื่อถือได้ ดังนั้นในอนาคตอันใกล้ การเก็บตัวอย่างต้นไม้จำนวนมากขึ้น ทดสอบทุกอย่างใหม่อีกครั้งและตรวจสอบส่วนบนของต้นไม้ที่มักพบการบดบังเป็นลำดับต่อไป แนวทางการทดสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธี PSR เนื่องจากคาดว่าวิธี PSR จะเกิดปัญหาการปรับพื้นผิวที่เรียบมากเกินไป (Kazhdan and Hoppe, 2013; Kazhdan et al., 2006) ไม่สอดคล้องกับพื้นผิวตามธรรมชาติของต้นไม้ภายใต้สภาวะที่มีการบดบังสูงที่เกิดกับต้นไม้ส่วนบน และคาดว่าพัฒนาวิธี SPSR ซึ่งเป็นอัลกอริธึมรุ่นต่อไปจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้มีประสิทธิภาพเพียงใด (Kazhdan and

Hoppe, 2013) แนวคิดการแบ่งต้นไม้ออกเป็นส่วนๆ และใช้วิธีสร้างพื้นผิวใหม่ที่แตกต่างกันในแต่ละส่วน พบได้จากงานวิจัยของ Owers และคณะ (2018) (Owers et al., 2018) ที่คาดว่าจะนำเสนอแนวทางในการสร้างแบบจำลองสามมิติของต้นไม้ยุคาลิปตัส

## 6.2 สรุปผล อภิปรายและข้อเสนอแนะงานวิจัยสำหรับผลการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากภาพถ่ายเลนเซอร์

การสร้างพื้นผิวใหม่จากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี SPSR ถูกนำมาทดสอบเพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ในแปลงปลูกแล้วขยายผลไปสู่ต้นเสมหะในพื้นที่อนุรักษ์ ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่ประมาณค่าจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินมีค่าต่ำกว่าค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงจากแบบจำลองอัลโลเมตริกที่แสดงในตารางที่ 5.10 ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลองภาพถ่ายเลนเซอร์ทั่วไป (Chave et al., 2004) ในขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลของต้นเสมหะเช่นเดียวกับพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ (Intarat and Vaiphasa, 2020) ดังแสดงในภาพที่ 5.2

วิธี PSR และวิธี SPSR มีพื้นฐานการสร้างพื้นผิวจากพอยท์คลาวด์ด้วยเทคนิคแบบตาข่าย (Mesh) หรือข่ายสามเหลี่ยมไม่สม่ำเสมอ (Triangulated irregular network, TIN) ที่ปรับให้มีความคล้ายกับพื้นผิวตามธรรมชาติของลำต้นได้ดีที่สุด วิธี SPSR ช่วยปรับปรุงตาข่ายของพื้นผิวที่ไม่สมบูรณ์ (Saptaji et al., 2021) ถูกนำมาทดสอบเพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นเสมหะดังแสดงในภาพที่ 5.2 ผลลัพธ์จากทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองอ้างอิงของ Intarat และ Vaiphasa (2019) (เส้นประสีเขียว) และ แบบจำลองอ้างอิงของ Laongmanee (2011) (เส้นประสีเหลือง) เนื่องจากขนาดของต้นเสมหะของทั้งสองพื้นที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน มีขนาดระหว่าง 5.00 – 27.00 เซนติเมตร โดยประมาณ ด้วยข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าอาจมีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของต้นเสมหะกับค่าต่างของมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน และจะชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้กับพื้นที่ศึกษาอื่นที่มีขนาดของต้นเสมหะแตกต่างกัน (Intarat and Vaiphasa, 2020; Laongmanee, 2011) ตัวอย่างเช่นแบบจำลองของ Patil และคณะ (2014) (เส้นประสีน้ำตาล) และแบบจำลองของ Comley และ McGuinness (2005) (เส้นประสีม่วง) ในภาพที่ 5.2 โดยแบบจำลองสร้างจากข้อมูลต้นเสมหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกขนาดประมาณ 17.50 – 38.50 เซนติเมตร และขนาดมากกว่า 20.00 เซนติเมตร ตามลำดับ ผลลัพธ์ของวิธี PSR และวิธี SPSR มี

ความใกล้เคียงน้อยที่สุดกับแบบจำลองอ้างอิงของป่าชายเลนทั่วไปที่สร้างโดย Komiyama และคณะ (2005) (เส้นประสีส้ม) ในภาพที่ 5.2 เนื่องจากแบบจำลองของป่าชายเลนทั่วไปถูกสร้างขึ้นจากต้นไม้หลากหลายสายพันธุ์ในป่าชายเลน ผลลัพธ์ที่ไม่ดีนี้ชี้ให้เห็นว่าอาจจำเป็นต้องใช้แบบจำลองอ้างอิงเฉพาะสายพันธุ์เพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินสำหรับนำมาเปรียบเทียบกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ส่วนค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินวิธี QSM มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Intarat และ Vaiphasa (2019) (เส้นประสีเขียว) และแบบจำลองอ้างอิงของ Laongmanee (2011) (เส้นประสีเหลือง) ค่าต่างของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากวิธี QSM มีค่าต่างมากที่สุดกับแบบจำลองของ Komiyama และคณะ (2005) (เส้นประสีส้ม) ในภาพที่ 5.2 เช่นเดียวกับกับวิธี PSR และวิธีSPSR ผลลัพธ์จากการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากทั้งสามวิธีที่ไปในทิศทางเดียวกันนี้พบในงานวิจัยของ Owers และคณะ (2018) ที่เปรียบเทียบวิธี QSM กับ วิธี PSR สำหรับประมาณปริมาตรของพีชพรรณชายฝั่งและพบว่าปริมาตรของพีชพรรณชายฝั่งจากทั้งสองวิธีมีความแม่นยำ (Owers et al., 2018)

ค่าคลาดเคลื่อนจากการ Register เพื่อ Merge ข้อมูลพอยท์คลาวด์จากตำแหน่งตั้งเครื่องมือต่างๆ ตำแหน่ง งานวิจัยนี้มีค่า RMSE เฉลี่ยเท่ากับ  $0.044 \pm 0.020$  เมตร ไม่เกินข้อกำหนดจากการทบทวนงานวิจัยของ Feliciano และคณะ (2014) ที่กำหนดให้ค่า RMSE ของระยะทางในแกน x , y และ z ระหว่างเป้าอ้างอิงแต่ละเป้า ควรมีค่า RMSE ไม่เกิน 0.08 เมตรนั้น (Buck et al., 2019; Feliciano et al., 2014) พอยท์คลาวด์ของลำต้นส่วนล่างจากโคนต้นจนถึงประมาณกึ่งกลางความสูงทั้งลำต้นที่มีโครงสร้างใหญ่และมีกิ่งก้านน้อย ผลการ Merge ให้ความชัดเจนสูง แต่ส่วนบนของต้นไม้ที่มีโครงสร้างเล็กและซ้อนทับกันของกิ่งก้านในเรือนยอด ผลการ Merge ให้ความชัดเจนต่ำ ผู้ทำวิจัยมีความเห็นว่าตำแหน่งของเป้าอ้างอิงซึ่งตั้งอยู่บนพื้นดิน มีความสูงจากพื้นประมาณ 1.00-1.50 เมตร อาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ส่วนล่างของต้นไม้ซึ่งอยู่ใกล้ตำแหน่งเป้าอ้างอิงมีความชัดเจนที่ดีกว่าส่วนบนของต้นไม้ที่อยู่ไกลจากตำแหน่งของเป้าอ้างอิงคล้ายกับหลักการต่อข้อมูลภาพแบบ 2 มิติ นั่นคือขนาดของวัตถุหรือระยะทางที่อยู่ใกล้จุดควบคุมภาคพื้นดินจะมีขนาดและระยะทางที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงในสนามมากที่สุด ดังนั้นในการต่อภาพแบบ 2 มิติ ให้มีคุณสมบัติเสมือนแผนที่มากที่สุด จึงกำหนดให้มีจุดควบคุมภาคพื้นดินกระจายทั่วทั้งภาพ แต่สำหรับการ Merge ข้อมูลพอยท์คลาวด์ โดยส่วนใหญ่ใช้เป้าอ้างอิงที่ตั้งบนพื้นดินที่มีความสูงไม่เกิน 2.00 เมตร ทำให้ส่วนบนของต้นไม้จากกึ่งกลางลำต้นจนถึงเรือนยอดที่มีความสูงมากกว่า 2.00 เมตรนั้นมีความชัดเจนลดลงตามความสูงที่

เพิ่มขึ้น

ผู้ทำวิจัยขอเสนอแนวทางแก้ไขคือ เพิ่มความสูงของเป่าอ้างอิงในแนวตั้งให้มีความสูง 1) ประมาณกึ่งกลาง และ 2) เท่ากับหรือสูงกว่าความสูงของต้นไม้ แต่การเพิ่มความสูงของเป่าอ้างอิงที่ระดับกึ่งกลางของต้นไม้อาจเกิดปัญหาการบดบังสำหรับพื้นที่ป่าที่มีความหนาแน่น ดังนั้นแนวทางที่เป็นไปได้มากที่สุดคือเพิ่มความสูงของเป่าอ้างอิงแนวตั้งที่มีความสูงมากกว่าเรือนยอดและเพิ่มความสูงของจุดตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน โดยใช้นั่งร้านหรือรถกระเช้า เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากความสูงของต้นไม้ที่มีความสูงมากกว่ามุมการสแกนในแนวตั้งของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินช่วยให้การเก็บข้อมูลส่วนบนของต้นไม้และเป่าอ้างอิงแนวตั้งให้มีรายละเอียดที่ดีขึ้น

มวลชีวภาพเหนือพื้นดินเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการประมาณค่าการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ป่า วิธีการดั้งเดิมในการประมาณค่ามวลชีวภาพที่แม่นยำนั้นนิยมใช้วิธีการตัดทำลายต้นไม้เพื่อนำไปวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แต่ไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ป่าอนุรักษ์ ด้วยเหตุนี้การนำเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินที่เก็บข้อมูลพอยท์คลาวด์ด้วยความละเอียดสูง ซึ่งให้รายละเอียดโครงสร้างของต้นไม้ได้ดี แม่นยำและรวดเร็ว เก็บข้อมูลต้นไม้ตัวอย่างจากแปลงทดสอบ ใช้วิธีสร้างพื้นผิวใหม่จากข้อมูลพอยท์คลาวด์วิธี QSM, PSR และวิธี SPSR ซึ่งวิธี SPSR เป็นวิธีที่ไม่เคยถูกใช้สำหรับการประมาณค่าปริมาตรของต้นไม้ชนิดใดมาก่อน เพื่อประมาณค่าปริมาตรแล้วนำมาเปรียบเทียบกับปริมาตรที่ประมาณค่าจากวิธีการแทนที่น้ำ แสดงค่าความถูกต้องด้วยค่า RMSE ผลลัพธ์พบว่า วิธี SPSR มีค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินใกล้เคียงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงมากที่สุด ตามด้วยวิธี PSR และวิธี QSM มีค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินใกล้เคียงมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงน้อยที่สุด จากนั้นนำวิธีการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินประยุกต์ใช้ในพื้นที่ป่าอนุรักษ์เพื่อเก็บข้อมูลต้นสมทะเลซึ่งเป็นต้นไม้ป่าชายเลนที่สำคัญสำหรับกักเก็บคาร์บอนแต่ไม่สามารถตัดต้นไม้เพื่อประมาณค่าปริมาตรอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลลัพธ์ได้ จึงเลือกแบบจำลองอัลโลเมตริกที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง จำนวน 5 แบบจำลองเพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงของต้นสมทะเล ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลองป่าชายเลนทั่วไป ในขณะที่ ค่าคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลของต้นสมทะเลเช่นเดียวกับพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการสร้างพื้นผิวใหม่ด้วยวิธี SPSR ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ใช้ประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ในแปลงทดสอบและต้นไม้ในพื้นที่อนุรักษ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สามารถใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการพื้นที่ป่าไม้ได้จริง

ผู้วิจัยแนะนำการทดลองใช้รูปแบบการคำนวณปริมาณของต้นแสมทะเลที่แม่นยำกว่าวิธีสมการอัลโลเมตริกเพื่อนำมาใช้เป็นปริมาณอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบปริมาณจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน เช่น วิธีแรก การใช้ Lidar Biomass Index (LBI) ซึ่งสร้างจากข้อมูลพอยท์คลาวด์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินเป็นกระบวนการประมาณค่ามวลชีวภาพที่มีประสิทธิภาพจากข้อมูลโครงสร้างต้นไม้แบบสามมิติ (Wang et al., 2021) วิธีที่สอง การนำอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles , UAV) ที่ให้ข้อมูลภาพสามมิติแบบ RGB สำหรับการประมาณค่ามวลชีวภาพ สามารถใช้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการสำรวจและตรวจสอบผลผลิตของต้นไม้ในแปลงปลูกที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ (ไม้สัก) (RINNAMANG et al., 2020) เป็นต้น



## ภาคผนวก

### PRECAUTIONS

#### Charging Battery

- Be sure to charge the battery within the charging temperature range.  
Charging temperature range: 0 to 40°C

#### Warranty policy for Battery

- Battery is an expendable item. The decline in retained capacity depending on the repeated charging/ discharging cycle is out of warranty.

#### Precautions concerning water and dust resistance

The instrument conforms to IP54 specifications for waterproofing and dust resistance when battery cover, connector cap and the Wide-angle camera lens cap of the instrument and are closed.

- Be sure to correctly attach the connector caps to protect the instrument from moisture and dust particles when the connector is not in use.
- Make sure that moisture or dust particles do not come in contact with the terminal or connectors. Operating the instrument with moisture or dust on the terminal or connectors may cause damage to the instrument.
- Make sure that the inside of the carrying case and the instrument are dry before closing the case. If moisture is trapped inside the case, it may cause the instrument to rust.
- If there is a crack or deformation in the rubber packing for the battery cover, stop using and replace the packing.
- To retain the waterproof property, it is recommended that you replace the rubber packing once every two years. To replace the packing, contact your local sales dealer.

#### The Lithium Battery

- The lithium battery is used to maintain the Calendar & Clock function. It can back up data for approximately 5 years of normal use and storage (Temperature = 20°, humidity = about 50%), but its lifetime may be shorter depending on circumstances.

#### The Levelling Base

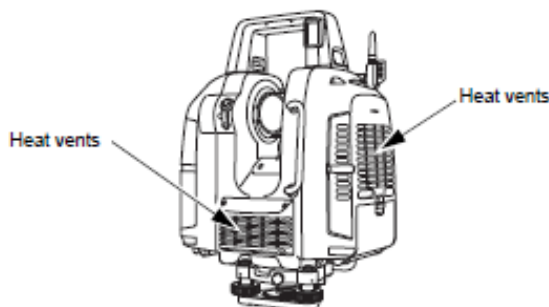
- Always use the levelling base provided.  
If the tribrach is installed incorrectly, the measuring precision could be effected. Occasionally check the adjusting screws on the tribrach. Make sure the base fixing lever is locked and the base fixing screws are tightened.

#### Tripod

- When mounting the instrument on a tripod, use a wooden tripod.  
Do not use a metallic tripod.

#### Heat Release

- To prevent malfunction caused by a temperature rise inside this instrument, heat vents are provided to release heat. Do not cover the vents when in use. When installing this instrument, keep the vents away from a wall.

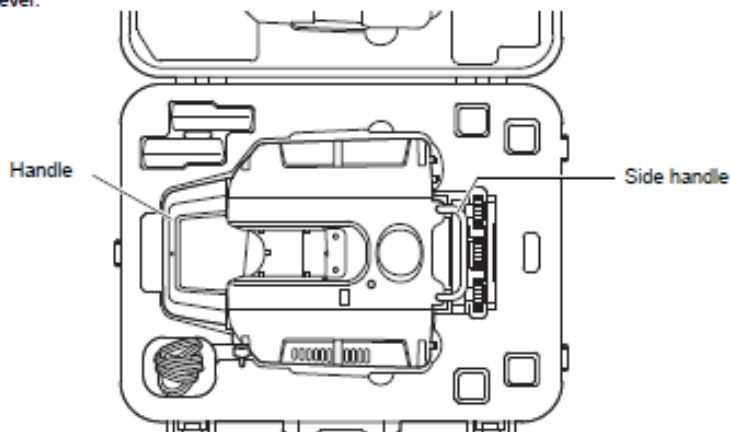




## PRECAUTIONS

### Removing the instrument

- When removing the instrument from the case, hold by the handle and side handle and pick it up while keeping it level.



### Other precautions

- **Effect of water drops**  
It may not be possible to measure if there are water drops on the glass of the scanner unit. Wipe off moisture completely. A wet object may not be measured.
- **When raining or snowing**  
When it is raining, snowing or foggy outside, please do not use the instrument to measure objects. Water drops and snowflakes will be recognized as 3D data.
- **Horizontally rotating part**  
Do not turn the horizontally rotating part and the scanner unit with your hands while the power is ON. If it has been turned by force, turn the power ON again. (Except when collimating)
- **Guarding the instrument against shocks**  
When transporting the instrument, provide some protection to minimize risk of shocks. Heavy shocks may cause the measurement to be faulty.
- **Sudden changes of temperature**  
Any sudden change of temperature to the instrument may result in a reduction of measuring distance range, i.e when taking the instrument out from a heated vehicle. Let instrument acclimate itself to ambient temperature.
- **Direct sunlight**  
Do not expose the instrument to direct sunlight for extended periods of time. When left in the sun for long periods, performance may be adversely affected, or if the inner temperature of the instrument may rise to an abnormally high level, the instrument may fail to operate.  
When measurements must be made in locations exposed to the sun and require high precision, protect from direct sunlight by using a sunshade for the instrument and tripod.
- **Battery level check**  
Confirm battery level remaining before operating.
- **Battery use**  
Always use four batteries as one set, and operate the instrument with batteries that have been charged and discharged the same number of times. Do not mix old and new batteries, or batteries that have been charged and discharged a different number of times.
- **Taking the battery out**  
It is recommended not to take the battery out during the power is on. Doing so may cause loss of data. Please do your assembling or taking the battery out after the power is off. Refer to Chapter "Replacing the Batteries during the power is ON" on page 25 if you need to replace the batteries during the power is on.

## PRECAUTIONS

### Maintenance

---

- Wipe off moisture completely if the instrument gets wet during survey work.
- Always clean the instrument before returning it to the case. The scanner unit, wide-angle camera lens and laser plummet window, etc. require special care. First, dust it off with the lens brush to remove tiny particles. Then, after providing a little condensation by breathing on the lens, wipe it with the wiping cloth.
- If the display is dirty, carefully wipe it with a soft, dry cloth. To clean other parts of the instrument or the carrying case, lightly moisten a soft cloth in a mild detergent solution. Wring out excess water until the cloth is slightly damp, then carefully wipe the surface of the unit. Do not use any alkaline cleaning solutions, alcohol, or any other organic solvents on the instrument or display.
- Store the instrument in a dry room where the temperature remains fairly constant.
- Check the tripod for loose fit and loose screws.
- If a foreign object is thought to be in the rotation section or the screw section of this instrument, or if a trace of water droplets or mold is found on the scanner unit, or the reflecting prism of the scanner, contact your local dealer.
- When the instrument is not used for a long time, check it at least once every 3 months.
- When removing the instrument from the carrying case, never pull it out by force. The empty carrying case should be closed to protect it from moisture.
- Check the instrument for proper adjustment periodically to maintain the instrument accuracy.

### Exporting this product (Relating EAR)

---

- This product is equipped with the parts/units, and contains software/technology, which are subject to the EAR (Export Administration Regulations). Depending on countries you wish to export or bring the product to, a US export license may be required. In such a case, it is your responsibility to obtain the license. The countries requiring the license as of May 2013 are shown below. Please consult the Export Administration Regulations as they are subject to change.

North Korea  
Iran  
Syria  
Sudan  
Cuba

URL for the EAR of the US: <http://www.bis.doc.gov/policiesandregulations/ear/index.htm>

### User

---

- This product is for professional use only!  
The user is required to be a qualified surveyor or have a good knowledge of surveying, in order to understand the user and safety instructions, before operating, inspecting or adjusting.
- Wear the required protectors (safety shoes, helmet, etc.) when operating.

### Exceptions from responsibility

---

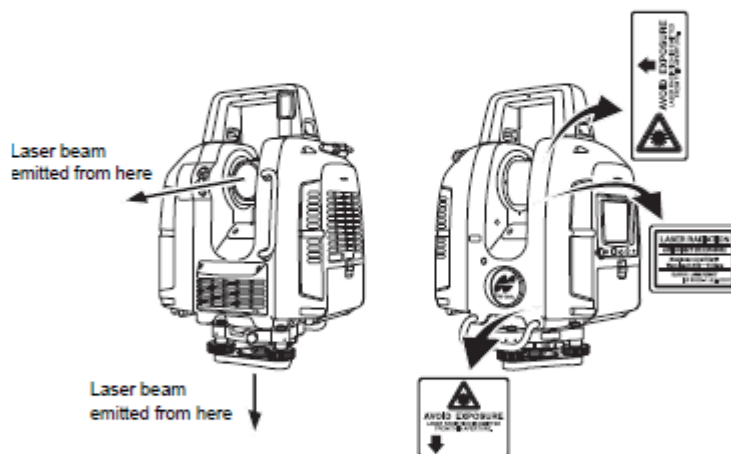
- The user of this product is expected to follow all operating instructions and make periodic checks (hardware only) of the product's performance.
- The manufacturer, or its representatives, assumes no responsibility for results of faulty or intentional usage or misuse including any direct, indirect, consequential damage, or loss of profits.
- The manufacturer, or its representatives, assumes no responsibility for consequential damage, or loss of profits due to any natural disaster, (earthquake, storms, floods etc.), fire, accident, or an act of a third party and/or usage under unusual conditions.
- The manufacturer, or its representatives, assumes no responsibility for any damage (change of data, loss of data, loss of profits, an interruption of business etc.) caused by use of the product or an unusable product.
- The manufacturer, or its representatives, assumes no responsibility for any damage, and loss of profits caused by usage different to that explained in the operator's manual.
- The manufacturer, or its representatives, assumes no responsibility for damage caused by incorrect operation, or action resulting from connecting to other products.

## LASER SAFETY INFORMATION

This instrument emits a laser beam while scanning or using a laser plummet.  
 The instrument is classified as the following class of Laser Product according to IEC Standard Publication 60825-1 Ed.2.0: 2007 and United States Government Code of Federal Regulation FDA CDRH 21CFR Part 1040.10 and 1040.11 (Complies with FDA performance standards for laser products except for deviations pursuant to Laser Notice No.50, dated June 24, 2007.)

Laser class of each mode is as follows.

Device		Laser class
Scanner unit	Range mode ("Detail" / "High Speed" / "Standard" / "Close" is selected.)	Class 3R
	Range mode ("Low Power" is selected.)	Class 1M
	Laser pointer	Class 3R
Laser Plummet		Class 3R



### Warning

- Use of controls or adjustments or performance of procedures other than those specified herein may result in hazardous radiation exposure.
- Never intentionally point the laser beam at another person. The laser beam is injurious to the eyes and skin. If an eye injury is caused by exposure to the laser beam, seek immediate medical attention from a licensed ophthalmologist.
- Do not look directly into the laser beam. Doing so could cause permanent eye damage.
- Do not stare at the laser beam. Doing so could cause permanent eye damage.
- Never look at the laser beam through a telescope, binoculars or other optical instruments. Doing so could cause permanent eye damage.

### Caution

- Perform checks at start of work and periodic checks and adjustments with the laser beam emitted under normal conditions.
- When the instrument is not being used, turn off the power.
- When disposing of the instrument, destroy the battery connector so that the laser beam cannot be emitted.

## LASER SAFETY INFORMATION

- Avoid setting the instrument at heights at which the path of the laser may strike pedestrians or drivers at head height. Operate the instrument with due caution to avoid injuries that may be caused by the visible laser beam unintentionally striking a person in the eye.
- Only those who have received training as per the following items shall use this product.
  - Read this manual for usage procedures for this product.
  - Hazardous protection procedures (read "LASER SAFETY INFORMATION")
  - Requisite protective gear (read "LASER SAFETY INFORMATION")
  - Accident reporting procedures (stipulate procedures beforehand for transporting the injured and contacting physicians in case there are laser-induced injuries).
- Persons working within the range of the laser beam are advised to wear eye protection which corresponds to the laser wavelength of the instrument being used.
- Areas in which the laser is used should be posted with a standard laser warning sign.
- When using the laser-pointer function, be sure to turn OFF the output laser after distance measurement is completed.

## SPECIFICATIONS

### Methods

Distance measurement : Pulse method  
 Angle measurement : Incremental method

### General

Size : 293 (W) x 152 (D) x 411.5 (H) mm  
 Weight : 10 kg (with battery, tribrach)  
 Instrument height : 226 mm (from the attaching surface of the tribrach to the center of the rotating mirror)  
 Operation temperature range : -5 °C to 45 °C  
 Storage temperature range : -20 °C to 60 °C  
 Protection against water and dust : IP54 (Based on the standard IEC60529) Dust-proof category 2

### Scanning Unit

Range of measurement *1)	Reflectivity	Range mode				
		Detail	High Speed	Low Power	Standard	Close
	9% reflection	-	-	-	-	40m
	18% reflection	40m	90m	90m	150m	-
	90% reflection	100m	210m	210m	350m	-
Measurement accuracy*1), *2) (90%) Reflected surface	Distance accuracy	3.5 mm ( $\sigma$ )	3.5 mm ( $\sigma$ )	4.0 mm ( $\sigma$ )	3.5 mm ( $\sigma$ )	3.5 mm ( $\sigma$ )
		(When measuring 1 - 90 m)	(When measuring 1 - 110 m)	(When measuring 1 - 110 m)	(When measuring 1 - 150 m)	(When measuring 1 - 40 m)
	Surface accuracy	2.0 mm ( $\sigma$ )	2.0 mm ( $\sigma$ )	2.0 mm ( $\sigma$ )	2.0 mm ( $\sigma$ )	2.0 mm ( $\sigma$ )
		(When measuring 1 - 90 m)	(When measuring 1 - 110 m)	(When measuring 1 - 110 m)	(When measuring 1 - 150 m)	(When measuring 1 - 40 m)

Angle (vertical) : 6°  
 Angle (horizontal) : 6°  
 Scanning data rate : Maximum of 120,000 points per second \*3)  
 Scanning density (resolving power)  
 Spot Size  
 Detail :  $\phi$ 7 mm or less in diameter (at 1 to 20 m) ( $1/e^2$ )  
 $\phi$ 4.1 mm or less in diameter (at 1 to 20 m) (FWHM)  
 High Speed / Low Power / Standard / Close  
 $\phi$ 19 mm or less in diameter (at 1 to 150 m) ( $1/e^2$ )  
 $\phi$ 11.2 mm or less in diameter (at 1 to 150 m) (FWHM)  
 Point increment : Minimum of 3.1 mm (at 10 m)  
 Maximum point number : V : 15,202 points / Line H: 20,268 points  
 Field-of-view (Per scan)  
 Horizontal : 360° (maximum)  
 Vertical : 270° (maximum)  
 Laser  
 Laser class : Class 3R (IEC EN60825-1)  
 Distance measurement laser : 50 mW or less for measuring the range of 1064 nm (invisible)  
 Laser pointer : 1 mW or less for measuring the range of 639 nm  
 Target scan  
 Target sheet  
 Size : 0.03m  
 Distance to the scanning target: 2-50m  
 Detection accuracy : 3° ( $\sigma$ ) (at 50 m)

## SPECIFICATIONS

Prism (Single prism)  
 Detection accuracy : 6" ( $\sigma$ ) (at 50 m)

\*1) Differs depending on weather condition and atmospheric stability.

\*2) Differs depending on the reflectivity and surface condition of the scanning target.

\*3) Differs depending on range mode.

### Camera Unit

Telescopic camera  
 Number of effective pixels : 5M pixels (2,592 × 1,944)  
 Field angle : 8.9° (V) × 11.9° (H)  
 Wide angle camera  
 Number of effective pixels : 5M pixels (2,592 × 1,944)  
 Field angle : Diagonal 170°

### Tilt Unit

Type : Liquid 2-axis tilt sensor  
 Correction unit : 1"  
 Range of compensation :  $\pm 6'$   
 Automatic compensator : ON (H/V)/OFF (selectable)  
 Tilt offset : Can be changed

### Display

Type : TFT-LCD 3.5 VGA  
 with a touch panel

### Card slot

Type : SD card  
 Standard : Supporting SD/SDHC memory card (SD 6MB/sec, SDHC Class 6 or greater is required)  
 Number of slots : 1

### Sensitivity of levels

Circular level : 10/2 mm  
 Electronic Circular levels : Graphic display range: 6' (inner circle)  
 Digital display range:  $\pm 6'$  30"

### Plummet

Laser  
 Laser class : Class3R (IEC EN60825-1)  
 Laser plummet : 1 mW or less for measuring the range of 639 nm  
 Image : Field of view 1° (Focus 1m)

### Power Supply

Power source : Rechargeable Li-ion battery BDC70 (4 batteries)  
 Working duration at 20 °C  
 BDC70 : about 2.5 hours / 4 batteries (continuous scanning)  
 External power source : 14 $\pm$ 1V (commercially available 12-volt lead car battery is enabled.)

### Battery (BDC70)

Nominal voltage : 7.2 V  
 Capacity : 5,240 mAh  
 Dimensions : 40 (W) × 70 (D) × 40 (H) mm  
 Weight : about 197 g

## SPECIFICATIONS

### Charger (CDC68A)

Input voltage	: AC100 to 240 V
Charging time per battery (at 25°C)	
BDC70	: about 5.5 hours (Charging can take longer than the times stated above when temperatures are either especially high or low.)
Charging temperature range	: 0 to 40 °C
Storage temperature range	: -20 to 65 °C
Size	: 94 (W) × 102 (D) × 36 (H) mm
Weight	: about 170 g

## บรรณานุกรม

- Adame, M. F., Kauffman, J. B., Medina, I., Gamboa, J. N., Torres, O., Caamal, J. P., . . . Herrera-Silveira, J. A. (2013). Carbon Stocks of Tropical Coastal Wetlands within the Karstic Landscape of the Mexican Caribbean. *PLoS ONE*, 8(2), 117-125.
- Åkerblom, M. (2012). Quantitative tree modeling from laser scanning data. (Master's Degree Programme in Science and Engineering). Tampere University of Technology, Finland. (55-62)
- Alliez, P., Cohen-Steiner, D., Tong, Y. and Desbrun, M. (2007). Voronoi-based variational reconstruction of unoriented point sets. Paper presented at the Symposium on Geometry processing, 39-48.
- Berger, M., Levine, J., Nonato, L. G., Taubin, G. and Silva, C. J. S. C. I. I. (2011). An end-to-end framework for evaluating surface reconstruction. 78-95.
- Berger, M., Levine, J. A., Nonato, L. G., Taubin, G. and Silva, C. T. (2013). A benchmark for surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, 32(2), 124-150.
- Bienert, A., Queck, R., Schmidt, A., Bernhofer, C. and Maas, H. G. (2010). Voxel space analysis of terrestrial laser scans in forests for wind field modeling. Paper presented at the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 92-97.
- Bolitho, M., Kazhdan, M., Burns, R. and Hoppe, H. (2009) Parallel poisson surface reconstruction. In: *Vol. 5875 LNCS. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (pp. 678-689).
- Brolly, G. and Király, G. (2009). Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 5, 119-130.
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer (Vol. 134): Food & Agriculture Org.
- Buck, A. L. B., Lingnau, C., Péllico, S., Machado, Á. M. L. and Martins-Neto, R. P. (2019). Stem modelling of Eucalyptus by terrestrial laser scanning. *Floresta e Ambiente*, 26.



- Calakli, F. and Taubin, G. (2011). SSD: Smooth signed distance surface reconstruction. Paper presented at the Computer Graphics Forum, 1993-2002.
- Calders, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raunonen, P., Herold, M., . . . Kaasalainen, M. (2015). Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(2), 198-208.
- Carr, J. C., Beatson, R. K., Cherrie, J. B., Mitchell, T. J., Fright, W. R., McCallum, B. C. and Evans, T. R. (2001). Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions: Association for Computing Machinery.
- Chapman, S. B. (1986). Production ecology and nutrient budgets. *Methods in plant ecology*. 2nd edition, 1-59.
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S. and Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359(1443), 409-420.
- Chiu, C.-Y., Pease, D. L., Fawkner, S., Dunn, M., Sanders, R. H. J. C. M. i. B., Imaging, B. E. and Visualization. (2019). Comparison of automated post-processing techniques for measurement of body surface area from 3D photonic scans. 7(2), 227-234.
- Comley, B. W. T. and McGuinness, K. A. (2005). Above- and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves. *Australian Journal of Botany*, 53(5), 431-436.
- De Lima Melo, L. E., Da Silva, J. R. M., Napoli, A., Lima, J. T., Trugilho, P. F. and Nascimento, D. F. R. (2016). Influence of genetic material and radial position on the anatomical structure and basic density of wood from *Eucalyptus* spp. and *Corymbia citriodora*. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, 44(111), 611-621.
- Digne, J., Cohen-Steiner, D., Alliez, P., De Goes, F. and Desbrun, M. (2014). Feature-preserving surface reconstruction and simplification from defect-laden point sets. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 48(2), 369-382.
- Digne, J., Morel, J. M., Souzani, C. M. and Lartigue, C. (2011). Scale space meshing of raw data point sets. Paper presented at the Computer Graphics Forum, 1630-1642.
- Dinh, H. Q., Turk, G. and Slabaugh, G. (2001). Reconstructing surfaces using anisotropic

- basis functions. Paper presented at the Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001, 606-613.
- 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. *Nature Geoscience*, 4(5), 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(5), 955-968.
- Gibbs, H. K., Brown, S., Nilsson, J. O. and Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental research letters*, 2(4), 045023.
- Gogoi, A., Ahirwal, J. and Sahoo, U. K. (2022). Evaluation of ecosystem carbon storage in major forest types of Eastern Himalaya: Implications for carbon sink management. *Journal of Environmental Management*, 302, 113972.
- Henning, J. G. and Radtke, P. J. (2006). Ground-based laser imaging for assessing three-dimensional forest canopy structure. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(12), 1349-1358.
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Kankare, V., Rätty, M., Vaaja, M., Liang, X., . . . Kaasalainen, S. (2011). Biomass estimation of individual trees using stem and crown diameter TLS measurements. Paper presented at the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 91-95.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C. and Treitz, P. (2004). Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(3), 573-583.
- Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J. and Stuetzle, W. (1992). Surface reconstruction from unorganized points: Association for Computing Machinery.
- Huxley, J. S. (1925). Constant differential growth-ratios and their significance [2]. *Nature*, 114(2877), 895-896.
- Intarat, K. and Vaiphasa, C. (2019). Remote sensing technique for mangrove studies: Tropical mangrove species classification with convolutional neural network and

tropical mangrove tree biomass modelling with terrestrial laser scanner.

Chulalongkorn University,

- Intarat, K. and Vaiphasa, C. (2020). Modeling Mangrove Above-Ground Biomass Using Terrestrial Laser Scanning Techniques: A Case Study of the *Avicennia marina* Species in the Bang Pu District, Thailand. *International journal of geoinformatics*, 16(2), 53-62.
- Ishak, N. I., Abu Bakar, M. A., Abdul Rahman, M. Z. A., Rasib, A. W., Kanniah, K. D., Meng Shin, A. L. and Razak, K. A. (2015). Estimating single tree stem and branch biomass using terrestrial laser scanning. *Jurnal Teknologi*, 77(26), 59-67.
- Kazhdan and Hoppe. (2013). Screened poisson surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, 32(3), 1-13.
- Kazhdan, M. (2005). Reconstruction of solid models from oriented point sets. Paper presented at the Proceedings of the third Eurographics symposium on Geometry processing, 73-es.
- Kazhdan, M., Bolitho, M. and Hoppe, H. (2006). Poisson surface reconstruction. Paper presented at the Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing.
- Khatamian, A. and Arabnia, H. R. J. J. o. I. P. S. (2016). Survey on 3D Surface Reconstruction. 12(3).
- Komiyama, A., Ong, J. E. and Pongpam, S. (2008). Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 128-137.
- Komiyama, A., Pongpam, S. and Kato, S. (2005). Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4), 471-477.
- Laongmanee, W. (2011). Remote sensing techniques for biomass estimation of mangrove plantation (Ph.D.). Chulalongkorn University, Bangkok. Retrieved from <http://doi.org/10.14457/CU.the.2011.643>
- Lee, C. and Kim, C. S. (2006). Gradient domain tone mapping of high dynamic range videos. Paper presented at the Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP, III461-III464.
- Li, X., Wan, W., Cheng, X. and Cui, B. (2010). An improved poisson surface

- reconstruction algorithm. Paper presented at the ICALIP 2010 - 2010 International Conference on Audio, Language and Image Processing, Proceedings, 1134-1138.
- Liang, X., Kankare, V., Hyyppä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., . . . Vastaranta, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63-77.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. and Flood, M. (2003). LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in physical geography*, 27(1), 88-106.
- Lim, S. P. and Haron, H. (2014). Surface reconstruction techniques: a review. *Artificial Intelligence Review*, 42(1), 59-78.
- Lorensen, W. E. and Cline, H. E. (1987). Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. Paper presented at the Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1987, 163-169.
- Maas, H. G., Bienert, A., Scheller, S. and Keane, E. (2008). Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5), 1579-1593.
- Maclean, G. A. and Martin, G. L. (1984). Merchantable timber volume estimation using cross-sectional photogrammetric and densitometric methods. *Canadian Journal of Forest Research*, 14(6), 803-810.
- Maiti, A. and Chakravarty, D. J. S. (2016). Performance analysis of different surface reconstruction algorithms for 3D reconstruction of outdoor objects from their digital images. 5(1), 932.
- Manson, J., Petrova, G. and Schaefer, S. (2008). Streaming surface reconstruction using wavelets. Paper presented at the Computer Graphics Forum, 1411-1420.
- Mengesha, T., Hawkins, M. and Nieuwenhuis, M. (2015). Validation of terrestrial laser scanning data using conventional forest inventory methods. *European Journal of Forest Research*, 134(2), 211-222.
- Morel, J., Bac, A. and Véga, C. (2018). Surface reconstruction of incomplete datasets: A novel Poisson surface approach based on CSRBF. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 74, 44-55.

- Murphy, G. (2008). Determining stand value and log product yields using terrestrial lidar and optimal bucking: a case study. *Journal of Forestry*, 106(6), 317-324.
- Muumbe, T. P., Baade, J., Singh, J., Schmullius, C. and Thau, C. (2021). Terrestrial Laser Scanning for Vegetation Analyses with a Special Focus on Savannas. *Remote Sensing*, 13(3), 507.
- Nelson, R., Krabill, W. and MacLean, G. (1984). Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 15(3), 201-212.
- Newnham, G. J., Armston, J. D., Calders, K., Disney, M. I., Lovell, J. L., Schaaf, C. B., . . . Danson, F. M. (2015). Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. *Current Forestry Reports*, 1(4), 239-251.
- 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. *Annals of Forest Science*, 73(4), 1073-1087.
- Odum, E. P. J. W. S. C. P.-L.-T. (1971). *Fundamental of Ecology* (Thrid Edition).
- Ogawa, H. J. N. and Asia, L. i. S. (1965). Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand (I) Structure and floristic composition. 4, 13-48.
- Ogawa, T. (2003). Parallelization of an Adaptive Cartesian Mesh Flow Solver Based on the 2N-tree Data Structure. In *Parallel Computational Fluid Dynamics 2002: New Frontiers and Multi-Disciplinary Applications* (pp. 441-448).
- Olsoy, P. J., Glenn, N. F., Clark, P. E. and Derryberry, D. R. (2014). Aboveground total and green biomass of dryland shrub derived from terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 88, 166-173.
- Ovington, J. (1962). Quantitative ecology and the woodland ecosystem concept. In *Advances in ecological research* (Vol. 1, pp. 103-192): Elsevier.
- Owers, C. J., Rogers, K. and Woodroffe, C. D. (2018). Terrestrial laser scanning to quantify above-ground biomass of structurally complex coastal wetland vegetation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 204, 164-176.
- Patil, V., Singh, A., Naik, N. and Unnikrishnan, S. (2014). Estimation of carbon stocks in *Avicennia marina* stand using allometry, CHN analysis, and GIS methods. *Wetlands*, 34(2), 379-391.

- Rabier, F., Temmerman, M., Böhm, T., Hartmann, H., Daugbjerg Jensen, P., Rathbauer, J., . . . Fernández, M. (2006). Particle density determination of pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 954-963.
- Raumonen, P., Kaasalainen, M., Markku, A., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., . . . Lewis, P. (2013). Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sensing*, 5(2), 491-520.
- Ribeiro, S. C., Soares, C. P. B., Fehrmann, L., Jacovine, L. A. G. and von Gadow, K. (2015). Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal eucalyptus trees in Southeast Brazil. *Revista Arvore*, 39(2), 353-363.
- RINNAMANG, S., SIRIRUEANG, K., SUPAVETCH, S. and MEUNPONG, P. (2020). Estimation of aboveground biomass using aerial photogrammetry from unmanned aerial vehicle in teak (*Tectona grandis*) plantation in Thailand. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(6).
- Robert, U. W., Etuk, S. E. and Agbasi, O. E. (2019). Bulk volume determination by modified water displacement method. *Iraqi Journal of Science*, 60(8), 1704-1710.
- Saarinen, N., Kankare, V., Vastaranta, M., Luoma, V., Pyörälä, J., Tanhuanpää, T., . . . Jaakkola, A. (2017). Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 123, 140-158.
- Saito, H. and Shidei, T. (1973). Studies on the Productivity and its Estimation Methodology in a Young Stand of *Cryptomeria japonica* d: Don. *Nihon Ringakkai Shi/Journal of the Japanese Forestry Society*, 55(2), 52-62.
- Samal, B., Singh, L. and Jhariya, M. K. (2022). Carbon storage, mitigation and sequestration potential of *Haldina cordifolia* and *Mitragyna parvifolia* in tropical dry deciduous environment of Chhattisgarh, India. *Ecological Engineering*, 175.
- Saptaji, K., Faizul, M. and Fakhri, A. (2021). Construction of low-cost 3D scanner using triangulation and Screened Poisson Surface Reconstruction techniques. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 062091.
- Satoo, T. (1965). Further Notes on the Method of Estimation of the Amount of Leaves

- of Forest Stands\*. THE JOURNAL OF THE JAPANESE FORESTRY SOCIETY, 47(5), 185-189.
- Schreier, H., Loughheed, J., Tucker, C. and Leckie, D. (1985). Automated measurements of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system. *International Journal of Remote Sensing*, 6(1), 101-446.
- Sileshi, G. W. (2014). A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and management*, 329, 237-254.
- Takoudjou, S., Ploton, P., Sonké, B., Hackenberg, J., Griffon, S., De Coligny, F., . . . Le Moguédec, G. (2018). Using terrestrial laser scanning data to estimate large tropical trees biomass and calibrate allometric models: A comparison with traditional destructive approach. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(4), 905-916.
- Tansey, K., Selmes, N., Anstee, A., Tate, N. J. and Denniss, A. (2009). Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(19), 5195-5209.
- Trephattanasuwan, P., Diloksumpun, S., Staporn, D. and Ratanakaew, J. (2009). Carbon storage in biomass of some tree species planted at the PuParn Royal Development Study Centre, Sakon Nakhon Province. Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, Bangkok, Thailand.
- Turk, G. and O'Brien, J. F. (2002). Modelling with implicit surfaces that interpolate. *ACM Transactions on Graphics*, 21(4), 855-873.
- Wang, Q., Pang, Y., Chen, D., Liang, X. and Lu, J. (2021). Lidar biomass index: A novel solution for tree-level biomass estimation using 3D crown information. *Forest Ecology and management*, 499.
- Watt, P. J. and Donoghue, D. N. M. (2005). Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 26(7), 1437-1446.
- Yip, J. M., Mouratova, N., Jeffery, R. M., Veitch, D. E., Woodman, R. J. and Dean, N. R. (2012). Accurate assessment of breast volume: a study comparing the volumetric gold standard (direct water displacement measurement of

mastectomy specimen) with a 3D laser scanning technique. *Annals of plastic surgery*, 68(2), 135-141.

กฤษฎาณ, อ. (2561). เทคนิคครีโมโทเซนซิงสำหรับการศึกษาป่าชายเลน: การจำแนกพันธุ์ไม้ป่าชายเลน เขตร้อนด้วยภาพถ่ายประสาทคอนโวลูชันและการสร้างแบบจำลองมวลชีวภาพของต้นไม้ป่าชายเลน เขตร้อนด้วยเครื่องแกนเลสเซอร์ภาคพื้นดิน. (ดุษฎีบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

ชิงชัย, ว. (2546). คู่มือการประมาณมวลชีวภาพของหมู่ไม้. , 14.

พชร, อ. (2559). สมการแอลโลเมตรีสำหรับการตรวจติดตามมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นโกงกางใบใหญ่ที่ปลูกร่วมกับหัวเชื้อราอัดเม็ด. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.,

สสวท, ส. (2563). การหาปริมาตรวัตถุด้วยการแทนที่น้ำ (*Water replacement*)(pp. 125).

Retrieved from <http://www.stemedthailand.org/wp-content/uploads/2016/04/S2-Teacher-M2.pdf>







จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวสุกัญญา เขยโพธิ์
วัน เดือน ปี เกิด	21 กุมภาพันธ์ 2519
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมโยธา) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล นครราชสีมา 2549 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมสำรวจ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	135 หมู่ 8 ตำบลบ้านโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
ผลงานตีพิมพ์	สุกัญญา เขยโพธิ์ และคณะ(2564) “การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือ พื้นดินของต้นยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคการสร้างพื้นผิวใหม่จากการสแกนด้วย เลเซอร์ภาคพื้นดิน” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 29 ฉบับที่ 6 (พฤศจิกายน ธันวาคม) 2564.