



การผลิตแบบจำลองประมาณความสูงอาคารจากข้อมูลดาวเทียมแบบเปิดด้วยเทคนิคเกรเดียนต์บูสต์ที่ดึงแบบถดถอย

## BUILDING HEIGHT ESTIMATION PRODUCTION FROM OPEN SATELLITE IMAGERY BY GRADIENT BOOSTING REGRESSION TECHNIQUE

เทพชัย ศรีน้อย<sup>1\*</sup>, ถิรวัดน์ บรรณกุลพิพัฒน์<sup>2</sup> และไพศาล สันติธรรมนนท์<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>นิสิตมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<sup>2</sup>นักวิจัย, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<sup>3</sup>รองศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

\*Corresponding author, E-Mail: thepchairinoi@gmail.com

### บทคัดย่อ

ข้อมูลความสูงอาคารมีความสำคัญในการศึกษาสภาพแวดล้อมของเมือง การคำนวณปริมาณทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับเมือง ตลอดจนการทำแผนที่สามมิติและการนำไปใช้วิเคราะห์เชิงพื้นที่ต่างๆ วิธีการหนึ่งในการประมาณความสูงอาคารจำนวนมากในพื้นที่เมืองคือการใช้ข้อมูลดาวเทียมทั้งแบบเรดาร์และเชิงทัศน ซึ่งเปิดให้ดาวน์โหลดนำมาใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางการประมาณความสูงอาคารในพื้นที่ศึกษาเมืองกรุงเทพมหานคร ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้เทคนิคเกรเดียนต์บูสต์ที่ดึงแบบถดถอยในการทำแบบจำลอง โดยมีข้อมูลความสูงอาคารจากแบบจำลองระดับพื้นผิวจากผลผลิตของการทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับเป็นข้อมูลสร้างและทดสอบแบบจำลอง ผลการวิจัยพบว่าการใช้ข้อมูลผสมทั้งเรดาร์และเชิงทัศน ให้ความถูกต้องดีกว่าการใช้ข้อมูลเรดาร์หรือเชิงทัศนอย่างเดียว ผลการทดสอบแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลผสมด้วยเทคนิคเกรเดียนต์บูสต์ที่ดึง มีค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยที่ 11.726 เมตร ที่ความสูงอาคารไม่เกิน 100 เมตร กับมีค่า 7.915 เมตร ที่ความสูงอาคารไม่เกิน 50 เมตร วิธีการวิจัยนี้มีข้อจำกัดเรื่องสัมประสิทธิ์การทำนายมีค่าน้อย และยังไม่สามารถประมาณความสูงอาคารที่สูงมากได้ใกล้เคียงความเป็นจริง

คำสำคัญ: ข้อมูลดาวเทียมเชิงทัศน; ข้อมูลดาวเทียมเรดาร์; การประมาณความสูงอาคาร; แบบจำลองระดับ

### ABSTRACT

Building height data is crucial for urban environment studies, urban physical quantity calculations, three-dimensional mapping, and spatial analysis. This research focuses on estimating building heights in the Bangkok urban area using freely available RADAR and optical satellite imagery. The study employs gradient boosting regression techniques, leveraging building height data from a digital surface model obtained through unmanned aerial vehicle (UAV) mapping for model training and testing. Results indicate that combining RADAR and optical imagery yields higher accuracy than using a single type of imagery. The

Thepchai Srinoi<sup>1\*</sup>, Thirawat Bannakulpiphat<sup>2</sup> and Pisan Santitamnont<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Graduate Student, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

<sup>2</sup>Researcher, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

*gradient boosting regression model using mixed satellite imagery achieved RMSE of 11.726 meters for buildings under 100 meters and 7.915 meters for buildings under 50 meters. However, the method exhibits limitations, including a low coefficient of determination, making it challenging to accurately estimate the heights of very tall buildings.*

**KEYWORDS:** Optical Remote Sensing; RADAR Remote Sensing; Building Height Estimation; Elevation Model

## 1. บทนำ

ข้อมูลความสูงอาคารนับว่าเป็นหนึ่งในข้อมูลสำคัญในการทำชั้นข้อมูลภูมิสารสนเทศในประเทศ บ่งบอกถึงการกระจายตัว [1] และความหนาแน่นประชากรในบริเวณนั้น การบริโภครถยนต์พลังงาน [2] รูปแบบกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะในพื้นที่เมือง ซึ่งสามารถพบอาคารสูงจำนวนมากและมีความหนาแน่นมากในบริเวณหนึ่ง เพื่อใช้ประโยชน์จากที่ดินขนาดเล็กที่มีราคาแพง เป็นอย่างยิ่งได้ ผลที่ตามมาคือปัญหามลพิษภายในเมือง หรือ ปรากฏการณ์เกาะความร้อน [3]

ข้อมูลความสูงอาคาร สามารถคำนวณได้จากงานรังวัดทางตรีโกณมิติ การรังวัดบนภาพถ่ายจากอากาศยานขนาดใหญ่ การรังวัดจากหลายรูปที่ถ่ายมาจากอากาศยานไร้คนขับ การใช้เลเซอร์สแกนทางอากาศ การใช้แบบจำลองระดับพื้นผิวและพื้นภูมิประเทศในรูปแบบราสเตอร์กริดคำนวณความสูงอาคารได้เติมในข้อมูลอรรถาธิบายของรูปอาคาร แสดงผลเป็นแผนที่สามมิติอย่างง่ายได้ในรูปแบบรูปปิดที่มีการทำให้ขอบอาคารสูงขึ้นจากพื้นล่าง (Extruded Polygon)

ปัจจุบันมีการเผยแพร่ข้อมูลรูปรอยพิมพ์ฐานอาคารจำนวนมากทั้งจาก Microsoft [4] หรือ Google [5] เป็นผลงานจากการวิจัยสร้างแบบจำลองสักรูปอาคารจากข้อมูลดาวเทียมเชิงทัศนศาสตร์ความละเอียดสูงด้วยการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) เกิดเป็นข้อมูลรูปอาคารที่เปิดให้ใช้ได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย แต่ยังไม่มีความสูงอาคารแบบเปิด ซึ่งแบบจำลองระดับที่เผยแพร่อย่างแพร่หลายมักเป็นแบบจำลองระดับพื้นภูมิประเทศ (Digital Terrain Model) ปัจจุบันนี้เริ่มมีงานวิจัยการประมาณความสูงอาคารออกมาอย่างต่อเนื่อง เทคนิคที่ถูกใช้ทำการวิจัยเป็นการสร้างแบบจำลองการเรียนรู้ด้วยเครื่องกับข้อมูลดาวเทียมประกอบกับข้อมูลความสูงอาคาร เช่น การใช้เทคนิคป่าสุ่มแบบถดถอย (Random Forest Regression) กับข้อมูลดาวเทียมเรดาร์วิจัยประมาณความสูงอาคารในบางรัฐของสหรัฐอเมริกา [6] ต่อมาเพิ่มข้อมูลดาวเทียมเชิงทัศนศาสตร์มาประมาณความสูงอาคารด้วยในงานวิจัยระดับทวีปยุโรป จีน และสหรัฐอเมริกา [7] เนื่องจากข้อมูลดาวเทียมความละเอียดระดับสิบเมตร สามารถเข้าถึงได้ง่ายทางอินเทอร์เน็ตจึงเกิดเป็นงานวิจัยประมาณความสูงอาคารที่ความละเอียดจุดภาพระดับสิบเมตร วิจัยโดยใช้เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนแบบถดถอย (Support Vector Machine Regression) ในประเทศเยอรมนี [8] และเทคนิคป่าสุ่มแบบถดถอยในประเทศจีน [9] ผลลัพธ์ปลายทางคือแบบจำลองความสูงของอาคารในรูปแบบราสเตอร์กริดการประมาณค่า

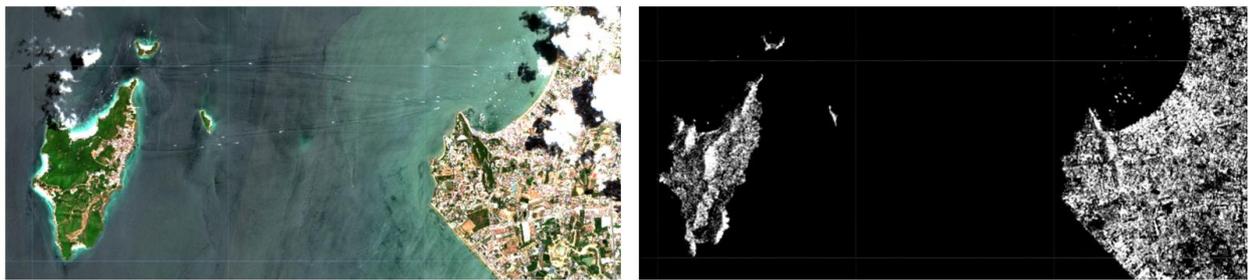
สำหรับประเทศไทยนั้น การผลิตแบบจำลองระดับพื้นผิวภายในเมือง เพื่อได้มาซึ่งความสูงของอาคาร สามารถทำได้จากโครงการระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบจำลอง 3 มิติ แบบเสมือนจริง ด้วยระบบการถ่ายภาพจากอากาศยานไร้คนขับ หน่วยงานการไฟฟ้านครหลวง ภายในพื้นที่เขตปทุมวัน เขตวัฒนาและคลองเตย เป็นโครงการวิจัยร่วมกับคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลผลิตที่ได้มีทั้งข้อมูลภาพออร์โธโกราฟีที่ความละเอียดจุดภาพ 5 เซนติเมตร แบบจำลองระดับพื้นผิว ข้อมูลพอยต์คลาวด์และผลผลิตสามมิติอื่นๆ ซึ่งส่งเสริมการทำแผนที่สามมิติภายในเมือง [10] เป็นแหล่งข้อมูลความสูงอาคารเติมเข้ากับข้อมูลรูปอาคารตัวอย่าง ประกอบกับการเข้าถึงข้อมูลดาวเทียมทั้งเชิงทัศนศาสตร์และเรดาร์เพื่อทำการวิจัยสร้างแบบจำลองประมาณความสูงอาคารภายในพื้นที่เมืองกรุงเทพมหานคร ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้ด้วยเครื่อง โดยได้นำเสนอเทคนิคเกรเดียนต์บูสต์ตั้งแบบ

ถดถอย (Gradient Boosting Regression) ซึ่งเป็นการสร้างต้นไม้ตัดสินใจทำงานองเดียวกับป่าสุ่ม แต่มีแนวคิดการปรับปรุงต้นไม้ใหม่ จากความผิดพลาดของต้นไม้ก่อนหน้า เป็นทางเลือกใหม่ในการสร้างแบบจำลอง

## 2. ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.1 ข้อมูลดาวเทียม (Satellite imagery)

ข้อมูลดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัยประกอบไปด้วยข้อมูลดาวเทียมเชิงทัศน (Optical Satellite Imagery) และข้อมูลดาวเทียมเรดาร์ (RADAR Satellite Imagery) ตัวอย่างแสดงความแตกต่างของภาพจากข้อมูลทั้งสองชนิด แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพจากข้อมูลดาวเทียมเชิงทัศน เซนทิเนล-2 (ซ้าย) และภาพจากข้อมูลดาวเทียมเรดาร์ เซนทิเนล-1 (ขวา)

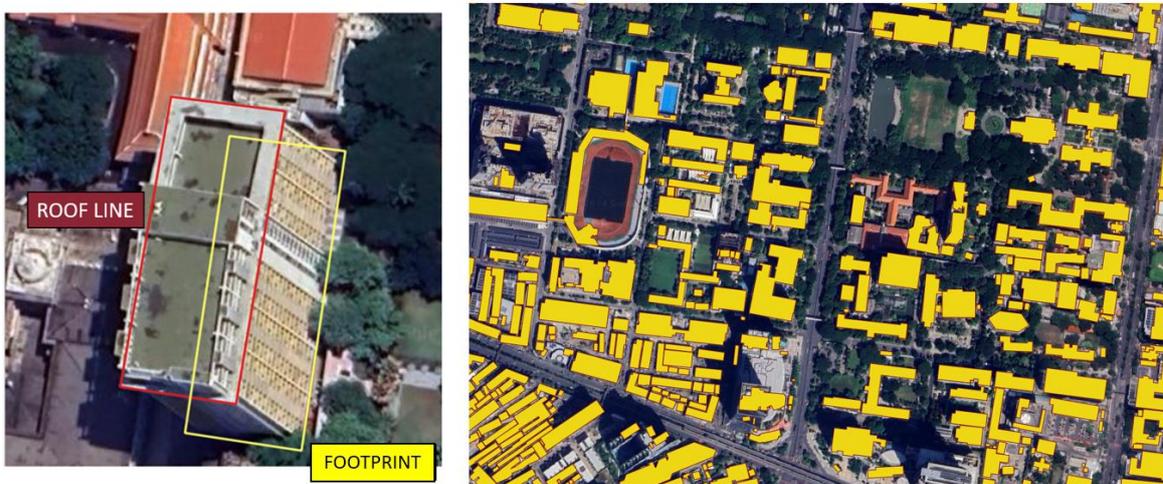
ข้อมูลดาวเทียมเชิงทัศน เป็นการบันทึกข้อมูลบนพื้นโลกที่ได้สะท้อนกลับมาจากดวงอาทิตย์ที่ตามองเห็นและอินฟราเรด ลักษณะเดียวกับตามนุษย์ หรือกล้องถ่ายภาพทั่วไป ต้องพึ่งพาพลังงานแสงอาทิตย์ในการส่องมายังพื้นโลก และวัตถุแต่ละชนิดมีสัดส่วนพลังงานการสะท้อนในแต่ละความยาวคลื่น ส่วนหนึ่งสะท้อนมายังตัวรับรู้ ทำการบันทึกพลังงาน แปลงเป็นภาพดิจิทัล ทำการตรวจแก้ทางเรขาคณิต ทางรังสี การเน้นภาพ นำไปใช้ประโยชน์ทั้งการแปลตีความวัตถุ การติดตามการเปลี่ยนแปลง การจำแนกวัตถุและประมาณค่าบนภาพ ในพื้นที่กว้างกว่าการใช้ภาพถ่ายจากอากาศยาน

ข้อมูลดาวเทียมเรดาร์ เป็นการติดตั้งเสาอากาศบนดาวเทียม ระบบนี้สามารถสร้างพลังงานเองได้ ปล่อยพลังงานในทิศทางและโพลาไรเซชัน (Polarization) แบบเฉพาะในรูปแบบคลื่นก้อง กระทบวัตถุที่มีพื้นผิวและการนำไฟฟ้าที่แตกต่าง ส่วนหนึ่งสะท้อนกลับมายังเสาอากาศ ทำการบันทึกข้อมูล การพัฒนาเพิ่มความละเอียดในแนวเดียวกับการโคจรของระบบเรดาร์ด้วยเทคนิคดอปเปลอร์ ซึ่งความแตกต่างของความถี่ที่รับได้ สามารถบอกตำแหน่งใกล้เคียงของวัตถุได้เป็นที่มาของระบบดาวเทียมเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture RADAR) ข้อมูลที่ได้สามารถใช้ประโยชน์เหมือนข้อมูลเชิงทัศน โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีแสงอาทิตย์น้อย อันเป็นผลของฤดูกาล บริเวณละติจูดสูง หรือพื้นที่ซึ่งมักพบการปกคลุมเมฆ ฝน โดยเฉพาะบริเวณละติจูดต่ำ

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลดาวเทียมเชิงทัศนจากดาวเทียมเซนทิเนล-2 (Sentinel-2) แบบผ่านการตรวจแก้ชั้นบรรยากาศ จำนวน 6 รูปที่ปราศจากเมฆในวันที่ วันที่ 1 มกราคม, 16 เมษายน, 20 มิถุนายน, 18 ตุลาคม, 22 พฤศจิกายน และ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2565 และข้อมูลดาวเทียมเรดาร์จากดาวเทียมเซนทิเนล-1 (Sentinel-1) บันทึกในช่วงคลื่น C Band เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดตรวจแก้แบบ Ground Range Detection ทุกต้นเดือนใน พ.ศ. 2565 เลือกทั้งภาพจากวงโคจรขาขึ้น (Ascending) และขาลง (Descending) ดาวน์โหลดภาพทั้งหมดผ่านระบบ Google Earth Engine

## 2.2 ข้อมูลรอยพิมพ์ฐานอาคาร (Building Footprint Data)

ข้อมูลรอยพิมพ์ฐานอาคาร (Building Footprint Data) แสดงถึงการปกคลุมพื้นดินของรูปอาคาร แตกต่างจากเส้นขอบหลังคา (Roof Line) ซึ่งเป็นวัตถุที่เห็นได้จากข้อมูลดาวเทียม หรือภาพถ่ายทางอากาศ เนื่องจากเรขาคณิตของการบันทึกภาพถ่ายมุมสูง ส่วนภาพแปรตามความสูงจากพื้นดิน พบว่าขอบหลังคาบกับรอยพิมพ์ฐานอาคารไม่ตรงกัน การใช้ภาพถ่ายออร์โธแท้จริง (True Orthophoto) ที่ผ่านการตัดแก้ภาพด้วยข้อมูลองค์ประกอบการวางตัวของภาพจากการทำถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ แบบจำลองสามมิติ คำนวณย้อนสร้างภาพถ่ายออร์โธ ทำให้มาตราส่วนคงที่เหมือนกับแผนที่ทั่วไป ขอบหลังคาและรอยพิมพ์ฐานอาคารตรงกัน ถ้าลอกลายจากรูปที่ยังไม่ตัดแก้ ข้อมูลแรกเป็นเส้นขอบหลังคา ต้องเลื่อนลงมายังฐานอาคารภายหลัง แสดงดังรูปที่ 2 (ซ้าย)

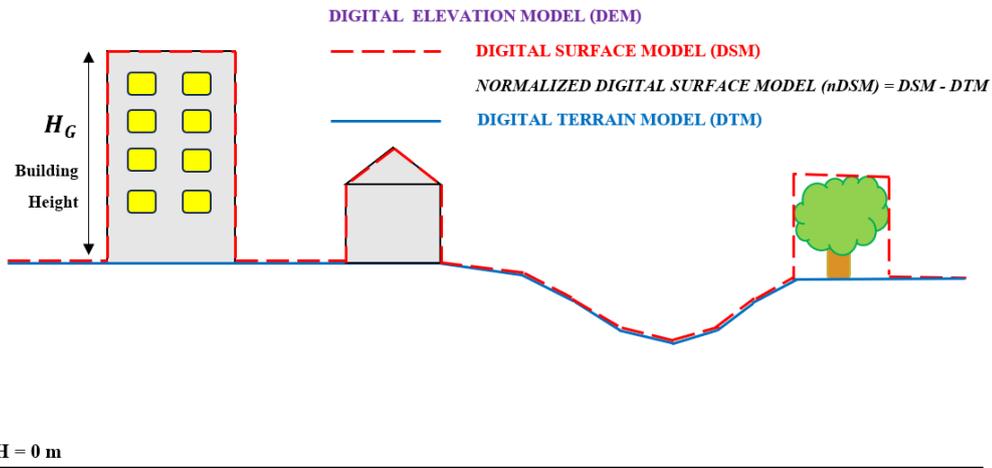


รูปที่ 2 ความแตกต่างของเส้นขอบหลังคา (Roof Line) รอยพิมพ์ฐานอาคาร (Footprint) ซ้อนทับบนภาพถ่ายดาวเทียม Google Earth (ซ้าย) และ ตัวอย่างรอยพิมพ์ฐานอาคารของ Microsoft บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ขวา)

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลรอยพิมพ์ฐานอาคารจากการสัปดาห์บนภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูงด้วยการเรียนรู้เชิงลึกของ Microsoft Global Building Footprint ซึ่งเผยแพร่เป็นแหล่งแรก ปัจจุบันในประเทศไทยสามารถทำการดาวน์โหลดข้อมูลรายจังหวัดในรูปแบบของ Geopackage ซึ่งมีชั้นรูปปีอาคาร และจุดศูนย์กลางทางเรขาคณิตแบบเซนทรอยด์ของรูปอาคาร [11] ตัวอย่างข้อมูลในพื้นที่บางส่วนของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 2 (ขวา)

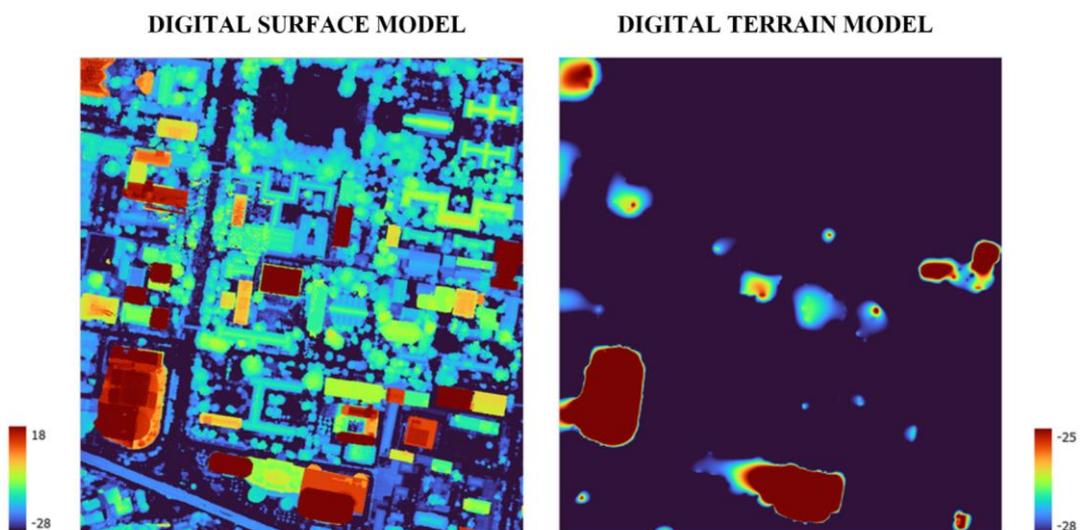
## 2.3 แบบจำลองระดับพื้นผิว (Digital Surface Model)

แบบจำลองระดับพื้นผิว (Digital Surface Model : DSM) เป็นข้อมูลบอกระดับของสิ่งปกคลุมพื้นภูมิประเทศ แตกต่างจากแบบจำลองระดับพื้นภูมิประเทศ (Digital Terrain Model : DTM) ซึ่งบอกเพียงค่าระดับของพื้นภูมิประเทศ ทั้งสองเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองระดับเชิงเลข (Digital Elevation Model : DEM) เป็นผลผลิตของการทำแผนที่ด้วยอากาศยานซึ่งบอกข้อมูลค่าพิกัดทางตั้งในพื้นที่งาน แนวทางการคำนวณความสูงอาคารทำได้จากการนำค่าระดับจากแบบจำลองระดับพื้นผิวลบกับแบบจำลองระดับพื้นภูมิประเทศ แบบจำลองระดับที่ได้จากการลบกันดังกล่าวเรียกว่าแบบจำลองระดับพื้นผิวแบบนอร์มอลไลซ์ (Normalized Digital Surface Model : nDSM) ภาพแสดงความแตกต่างของแบบจำลองระดับแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบของแบบจำลองระดับเชิงเลข

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลแบบจำลองระดับพื้นผิวอ้างอิงที่ความละเอียดจุดภาพ 6 เซนติเมตร ประกอบกับสมมติระนาบระดับพื้นภูมิประเทศที่ค่าระดับเหนือทรวงรี -30 เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของค่าระดับของจุดควบคุมภาพถ่ายทางอากาศพื้นดินที่ใช้ในการคำนวณค่าสามเหลี่ยมทางอากาศ (การใช้ค่าระดับเหนือทรวงรีเนื่องจากเป็นค่าระดับที่คำนวณได้จากการรังวัดพิกัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม การแปลงเป็นค่าระดับเหนือน้ำทะเลปานกลาง สามารถทำได้ด้วยการใช้แบบจำลองจีโอยด์ของประเทศไทย) การเลือกใช้ระนาบระดับดังกล่าวเป็นผลจากข้อจำกัดของแบบจำลองระดับพื้นภูมิประเทศในพื้นที่เมืองที่เต็มไปด้วยสิ่งปกคลุมดินหนาแน่น โดยเฉพาะอาคารสูง แสดงดังรูปที่ 4 กระบวนการผลิตแบบจำลองมักให้ผลผิดพลาด บริเวณที่แทนที่ด้วยอาคารสูงชัน แบบจำลองระดับพื้นภูมิประเทศประมาณค่าระดับสูงเกินไป บริเวณนั้นเป็นเหมือนเนินที่ล้อมด้วยพื้นดินข้างอาคาร งานวิจัยนี้ทำในพื้นที่เล็กประมาณ 9.5 ตารางกิโลเมตร ซึ่งค่าระดับพื้นดินมีความใกล้เคียงกัน ตลอดจนผลลัพธ์ปลายทางซึ่งมีความสูงอาคารที่ประมาณได้นั้นมีความถูกต้องในระดับเมตร จึงเลือกใช้วิธีดังกล่าว



รูปที่ 4 แบบจำลองระดับพื้นผิว (ซ้าย) และระดับพื้นภูมิประเทศ (ขวา) ในบริเวณอาคารสูงหนาแน่น

### 3. วิธีการที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมข้อมูลดาวเทียม

ข้อมูลดาวเทียมที่จัดเตรียมทั้งหมดทำการแยกแบนด์ดาวเทียมดังตารางที่ 1 โดยของดาวเทียมเซนทิเนล-2 ได้คำนวณดัชนีภาพถ่ายเพิ่มเติมได้แก่ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) และ Normalized Difference Built-up Index (NDBI) ดัชนีทั้งสามนี้เป็นดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนในช่วงอินฟราเรดซึ่งในช่วงคลื่นแสดงถึงความร้อนหรือเงาที่เกิดขึ้นในพื้นที่เมือง

ตารางที่ 1 แบนด์ดาวเทียมที่ใช้สร้างแบบจำลอง

ดาวเทียม (รูปแบบข้อมูลช่วงคลื่นดาวเทียม)	แบนด์ดาวเทียม
เซนทิเนล-1 (เรดาร์)	Backscatter VV และ Backscatter VH
เซนทิเนล-2 (เชิงทัศน)	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8A, 11, 12, NDVI, MNDWI และ NDBI

การค้นภาพตลอดหนึ่งปี เนื่องจากข้อมูลการสะท้อนของอาคารซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับจากตัวรับรู้ช่วงคลื่นเชิงทัศนสามารถแปรเปลี่ยนได้ตามฤดูกาล อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของมุมเคลิลินชันของดวงอาทิตย์ในแต่ละเดือน ส่งผลให้มุมสูงที่เวลาบันทึกภาพมีความแตกต่างกัน และส่งผลต่อข้อมูลเกี่ยวกับเงาในบริเวณอาคารสูง ความแตกต่างนี้ไม่เกี่ยวกับข้อมูลการสะท้อนที่ได้รับจากตัวรับรู้ช่วงคลื่นเรดาร์ ซึ่งพื้นที่เมืองซึ่งมีอาคารทรงเหลี่ยม สูงชัน ส่งเสริมการสะท้อนกลับในภาพเรดาร์ โดยเฉพาะอาคารที่อยู่ริมถนนซึ่งสามารถเกิดการสะท้อนสองครั้งกลับไปยังเสาอากาศ

แต่ละชุดแบนด์นั้นประกอบด้วยข้อมูลจากช่วงเวลาที่หลากหลาย ทำการคำนวณค่าทางสถิติแบบค่าเฉลี่ยเลขคณิต และคำนวณเปอร์เซ็นต์ไทล์ 10 25 50 75 90 เป็นตัวแทนข้อมูลในแบนด์นั้น

#### 3.2 การเตรียมข้อมูลรูปอาคาร

นำข้อมูลรูปอาคารที่ดาวน์โหลดได้ คัดกรองเฉพาะ ข้อมูลในพื้นที่ศึกษา จากนั้นทำการสกัดข้อมูลในแบนด์ดาวเทียมและแบบจำลองระดับพื้นผิว ด้วยการคำนวณค่า zonal statistics แบบมัธยฐาน เนื่องจากรูปอาคารครอบคลุมข้อมูลราสเตอร์หลายจุดภาพจึงต้องมีการคำนวณก่อนเติมเข้าตารางอรรถาธิบายของรูปอาคาร การเลือกมัธยฐานเป็นตัวแทนข้อมูลในแต่ละแบนด์หรือข้อมูลจากแบบจำลองระดับพื้นผิว เพื่อลดผลกระทบของค่านอกเกณฑ์ (outlier) โดยเฉพาะจากแบบจำลองระดับความละเอียดสูงซึ่งสามารถพบค่าความสูงที่ผิดจากข้อมูลส่วนใหญ่ได้ ประการหนึ่งคือรูปอาคารที่ได้ไม่ได้ตรงกับบริเวณอาคารชัดเจน แต่ยังคงครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของอาคาร

ความสูงที่ได้จากแบบจำลองระดับพื้นผิวเป็นความสูงเหนือทรงรีของขอบหลังคาอาคาร ต้องลบกับความสูงเหนือทรงรีของระนาบพื้นดินสมมติที่ -30 เมตร ได้เป็นความสูงของอาคารเหนือพื้นดินสมมติ จากนั้นกรองข้อมูลอาคารเลือกข้อมูลที่มีความสูงตั้งแต่ 3 – 100 เมตร งานวิจัยนี้สมมติว่าอาคารสูง 1 ชั้นมีความสูง 3 เมตร เหนือพื้นดิน อาคารซึ่งสูงน้อยกว่า 3 เมตร ไม่นำเข้าสร้างแบบจำลอง ส่วนข้อมูลที่สูงกว่า 100 เมตร มีจำนวนน้อย และสามารถลดความถูกต้องของแบบจำลองได้มาก

### 3.3 การสร้างแบบจำลอง

เมื่อเตรียมข้อมูลที่มีทั้งลักษณะเด่นจากแบนด์ดาวเทียมและผลลัพธ์จากความสูงอาคารที่คำนวณได้ แบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก นำเข้าสอนเพื่อสร้างแบบจำลอง (Training Data) ร้อยละ 70 ส่วนที่สอง ใช้ตรวจสอบแบบจำลองหลังสร้างแล้ว (Validation Data) ร้อยละ 10 และส่วนสุดท้ายใช้ทดสอบแบบจำลองปลายทาง (Testing Data) ร้อยละ 20

นำข้อมูลสร้างแบบจำลองเข้าทำแบบจำลอง โดยค้นหาไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameter) ที่เหมาะสมกับข้อมูล แสดงตารางที่ 2 ร่วมกับการทำตรวจสอบแบบไขว้ (Cross Validation) เท่ากับ 5 ได้ชุดคุณลักษณะของแบบจำลอง สามารถตรวจสอบแบบจำลองได้ จากนั้นนำชุดคุณลักษณะของแบบจำลองมาสร้างราสเตอร์กริดของการประมาณความสูงอาคารแล้วนำรูปอาคารที่เก็บไว้มาทดสอบแบบจำลอง

ตารางที่ 2 ไฮเปอร์พารามิเตอร์สำหรับการสร้างแบบจำลองแบบเกรเดียนต์บустติ้งแบบถดถอย

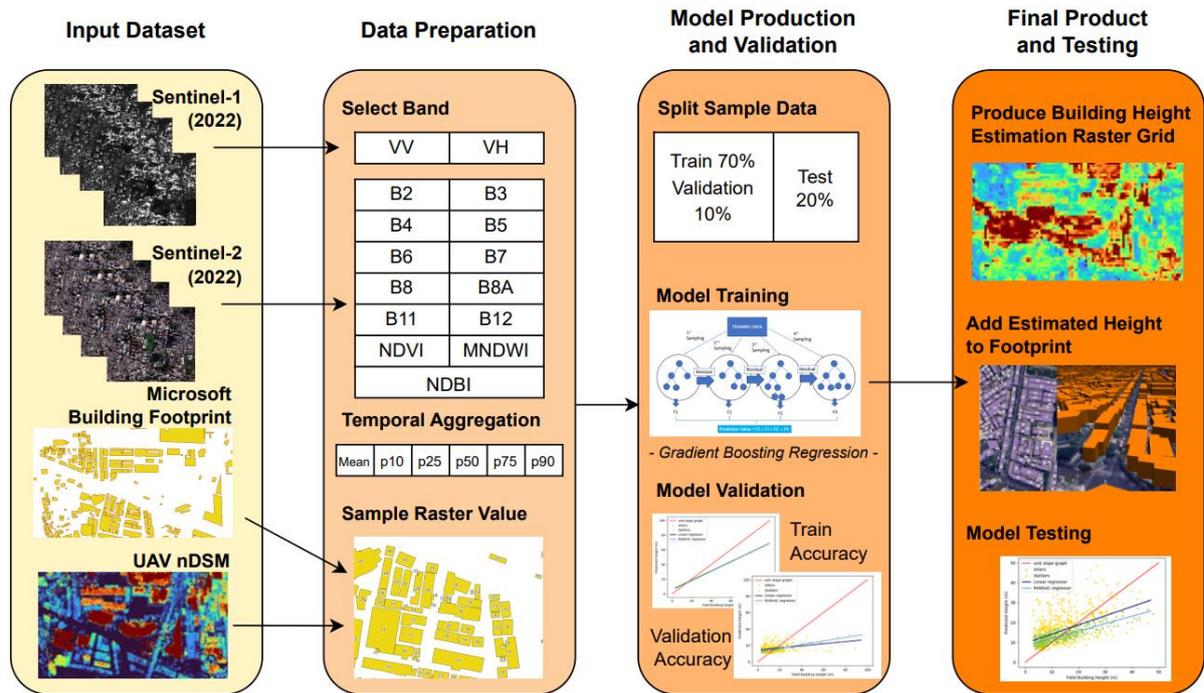
ไฮเปอร์พารามิเตอร์	ชุดตัวเลือกค่าพารามิเตอร์
max_depth จำนวนความลึกสูงสุดในแผนภูมิต้นไม้	100, 200, 300, 400, 500, None
max_features จำนวน features ที่ใช้หาการแตกกิ่งที่ดีที่สุด	0.3, 1.0, 'sqrt', 'log2'
n_estimators จำนวนขั้นการบустติ้ง	100, 250, 500, 600, 750, 1000
learning_rate พารามิเตอร์บอกการลดลงของอัตราการเรียนรู้ของแต่ละขั้น	1, 0.5, 0.25, 0.1, 0.05, 0.01

การประเมินผลแบบจำลองสนใจค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error : RMSE) และสัมประสิทธิ์การทำนายค่า (Coefficient of Determination :  $R^2$ ) ของข้อมูลความสูงจากการประมาณเทียบกับความสูงอ้างอิงที่เป็นผลเฉลยช่วงความสูงที่ทดสอบโดยทั่วไปพิจารณาที่ความสูง 3 – 100 เมตร และท้ายสุด พิจารณาที่ความสูงไม่เกิน 50 เมตร เพื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์การวิจัยที่มีก่อนหน้านี้ และเป็นช่วงที่คาดว่าพบได้ในการประมาณความสูงของอาคารที่ไม่ทราบความสูงในพื้นที่เมือง อาคารที่สูงมากกว่านี้มักเป็นอาคารพิเศษ ซึ่งควรระวังวัดด้วยวิธีที่ละเอียดกว่าแล้วเติมข้อมูลภายหลัง แผนภาพวิธีการวิจัยโดยสรุปแสดงดังรูปที่ 5

### 4. ผลการศึกษาวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดสอบเมื่อเลือกใช้ชุดแบนด์ทำแบบจำลองที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3 โคนมีการทดสอบทั้งจากข้อมูลสอนเพื่อสร้างแบบจำลอง ข้อมูลตรวจสอบแบบจำลอง และข้อมูลทดสอบแบบจำลอง การทดสอบด้วยข้อมูลสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินการเข้ากันได้ดีเกินไปของแบบจำลองกับข้อมูลทำแบบจำลอง (Overfitting)

การใช้ข้อมูลเรดาร์อย่างเดียวให้ RMSE เมื่อวัดจากข้อมูลทดสอบหรือตรวจสอบแบบจำลองเป็น 2 – 3 เท่าของผลจากการวัดที่ข้อมูลสอนเพื่อสร้างแบบจำลอง แต่เมื่อใช้ข้อมูลเชิงทัศนกับข้อมูลผสมพบว่าข้อมูลตรวจสอบหรือทดสอบให้ RMSE สูงกว่าข้อมูลสร้างแบบจำลองมาก แสดงถึงการที่แบบจำลองเข้ากันได้ดีกับข้อมูลสร้างแบบจำลอง แต่ค่า RMSE ของการทดสอบนั้นสูงกว่าข้อมูลสอนเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้ค่าน้อยกว่าการใช้ข้อมูลเรดาร์อย่างเดียว ประมาณ 2 เมตร



รูปที่ 5 แผนภาพการทำวิจัยประมาณความสูงอาคาร

ตารางที่ 3 ผลการประเมินแบบจำลองการสร้างด้วยข้อมูลอาคารความสูงไม่เกิน 100 เมตร

ประเภท ชุดข้อมูล	ผลการประเมินจาก ข้อมูลสอนเพื่อสร้าง แบบจำลอง		ผลการประเมินจาก ข้อมูลตรวจสอบ แบบจำลอง		ผลการประเมินจาก ข้อมูลทดสอบ แบบจำลอง	
	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	R <sup>2</sup>
เรดาร์	5.342	0.866	13.656	0.153	13.749	0.076
เชิงทัศน	0.035	1.000	11.434	0.406	11.948	0.302
ผสม	0.008	1.000	11.427	0.407	11.726	0.328

การใช้ข้อมูลผสมทำแบบจำลองให้ผลลัพธ์ดีกว่าการใช้ข้อมูลประเภทเดียวทำแบบจำลอง โดยการใช้ข้อมูลเชิงทัศนอย่างเดียวทำแบบจำลองให้ผลลัพธ์ดีกว่าการใช้ข้อมูลเรดาร์อย่างเดียวทำแบบจำลอง คาดว่าจำนวนแบนด์ที่ใช้ทดสอบมีส่วนที่ทำให้ผลดีกว่า ซึ่งจำนวนแบนด์เชิงทัศนใช้มากกว่าจำนวนแบนด์ของเรดาร์ ทั้งนี้ผลที่ได้ต่างกันประมาณ 2 เมตร

ตารางที่ 4 ผลการประเมินแบบจำลองซึ่งสร้างด้วยข้อมูลอาคารความสูงไม่เกิน 100 เมตร โดยวัดที่ความสูงไม่เกิน 50 เมตร

ข้อมูลเรดาร์		ข้อมูลเชิงทัศน		ข้อมูลผสม	
RMSE (m)	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	R <sup>2</sup>
8.681	-0.030	8.244	0.071	7.915	0.144

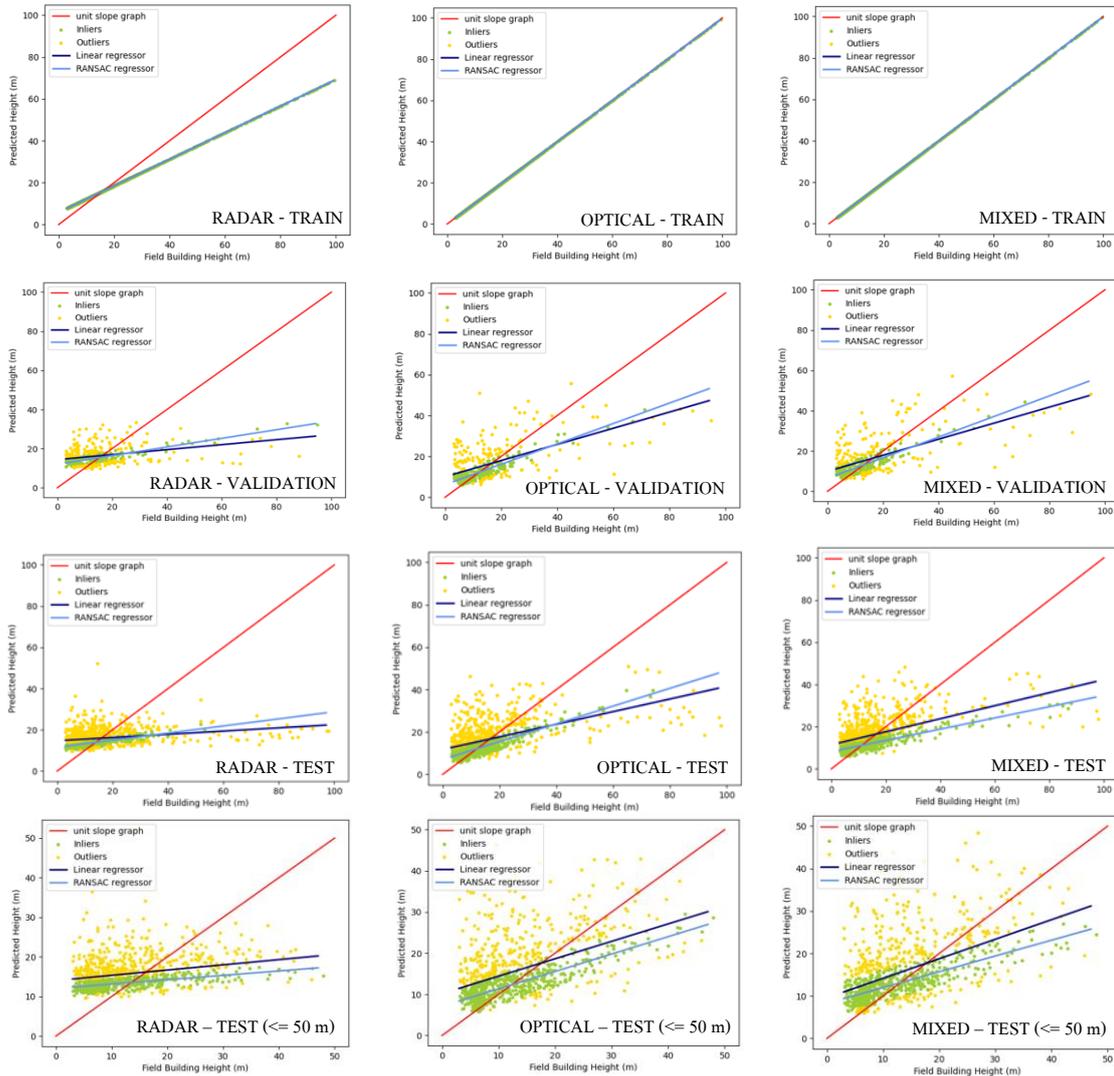
การใช้ข้อมูลผสมทั้งเรดาร์และเชิงทัศนียภาพในการทำแบบจำลองให้ RMSE จากการทดสอบปลายทางอยู่ที่ 11.726 เมตร โดยมีค่า  $R^2$  0.328 ผลการทดสอบแบบจำลองปลายทางด้วยข้อมูลความสูงไม่เกิน 50 เมตร ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า RMSE อยู่ในช่วง 7 – 9 เมตร เทคนิคที่สร้างจากข้อมูลผสมให้ RMSE อยู่ที่ 7.915 เมตร ที่  $R^2$  เท่ากับ 0.144 ทั้งนี้การใช้ข้อมูลผสมให้ผลลัพธ์ดีกว่าข้อมูลเชิงทัศนียภาพอย่างเดียวและข้อมูลเรดาร์อย่างเดียว ซึ่งยังคงสอดคล้องกับกรณีช่วงความสูงก่อนหน้า

ข้อจำกัดที่พบได้จากการศึกษากราฟการกระจายของความสูงจากการประมาณเทียบกับความสูงอ้างอิงจากแบบจำลองระดับพื้นผิว จากรูปที่ 6 ซึ่งพบได้เช่นกันกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ทั้งในเยอรมันและจีน นั่นคือ แบบจำลองประมาณอาคารได้สูงเกินไปในอาคารที่ความสูงน้อย แต่ประมาณได้ต่ำเกินไปในอาคารที่ความสูงมาก แบบจำลองไม่สามารถประมาณได้ถูกต้องที่อาคารสูงชันมาก ทุกกราฟการกระจายได้แสดงเส้นตรง 3 เส้น คือเส้นตรงสีแดง แสดงแนวที่ความชันเป็นหนึ่ง เป็นแนวที่ข้อมูลความสูงที่ประมาณได้ (Predicted Height) จากแบบจำลองกับข้อมูลอ้างอิง (เสมือนว่าวัดจากในพื้นที่จริง Field Building Height) เส้นตรงสีน้ำเงิน เข้มมาจากการทำการถดถอยเชิงเส้นของความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ประมาณได้กับข้อมูลอ้างอิง สร้างจากทุกข้อมูล และเส้นตรงสีฟ้า มาจากการทำการถดถอยเชิงเส้นของความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ประมาณได้กับข้อมูลอ้างอิง สร้างจากข้อมูลที่ผ่านการกรองว่าเป็นกลุ่มค่าในเกณฑ์ (Inliers) แสดงด้วยจุดสีเขียว ด้วยเทคนิคการกรองค่านอกเกณฑ์ (Outliers) ซึ่งแสดงด้วยจุดสีเหลือง ออกจากกลุ่มข้อมูลทั้งหมด ด้วยอัลกอริทึมของ Random Sample Consensus (RANSAC) พบว่าการทดสอบด้วยข้อมูลทดสอบนั้นให้กราฟการกระจายที่มีจุดที่เป็นค่านอกเกณฑ์มาก สอดคล้องกับ  $R^2$  ที่มีค่าน้อย

ความแตกต่างของแบบจำลองระดับพื้นผิวแบบนอร์มอลไลซ์จากอากาศยานไร้คนขับ ที่ความละเอียดจุดภาพ 6 เซนติเมตร กับแบบจำลองประมาณความสูงที่สร้างจากแบบจำลองเรียนรู้เชิงเส้นตัวบัพที่ดิ่ง แต่ใช้ชุดข้อมูลแบนด์ความถี่ต่างกัน ที่ความละเอียดจุดภาพ 10 เมตร แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าผลลัพธ์จากเรดาร์และเชิงทัศนียภาพมีความแตกต่างกันมาก ส่วนข้อมูลผสมต่างกับเชิงทัศนียภาพเล็กน้อย ข้อมูลดาวเทียมสามารถบอกได้ว่ากลุ่มของอาคารสูงหนาแน่นอยู่ที่บริเวณใดได้ แต่ข้อจำกัดที่ความละเอียดจุดภาพหลักสิบเมตรทำให้ไม่สามารถแยกขอบอาคารที่ชัดเจน

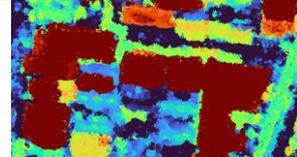
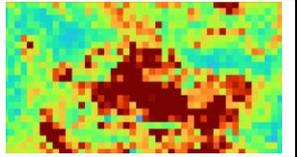
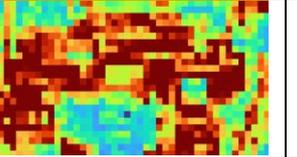
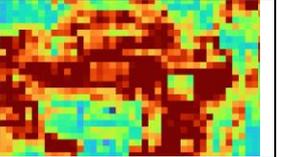
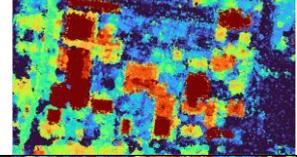
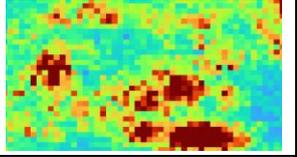
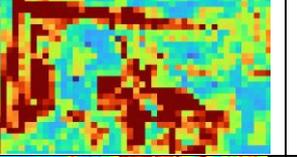
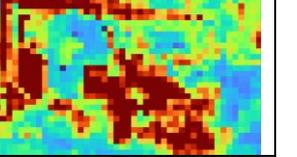
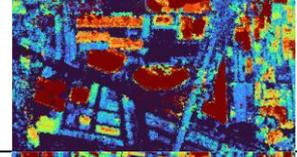
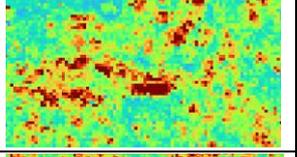
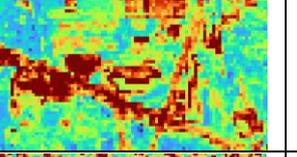
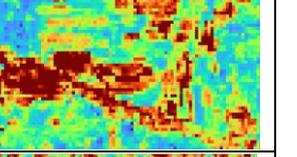
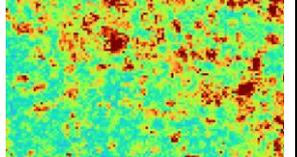
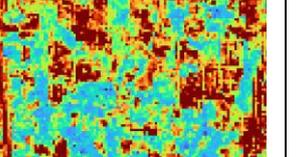
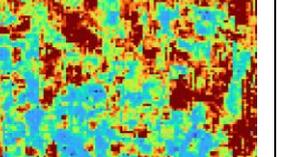
ผลลัพธ์แบบจำลองประมาณความสูงอาคารในรูปแบบกริดยังไม่สามารถใช้เป็นแบบจำลองประมาณระดับพื้นผิวได้ เนื่องจากข้อมูลนำเข้ามีเพียงความสูงอาคาร ยังไม่รวมสิ่งปกคลุมดินอื่นๆ เช่น พื้นดิน ต้นไม้ พื้นน้ำ จากการคำนวณสหสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่นำมาใช้ทำแบบจำลองเทียบกับความสูงอาคาร แสดงดังกราฟแท่งรูปที่ 7 พบว่าตัวแปรดัชนีน้ำ MNDWI กับข้อมูลแบนด์อินฟราเรด มีสหสัมพันธ์กับความสูงอาคารอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น

ผลจากกราฟแท่งดังกล่าว สอดคล้องกับผลลัพธ์แบบจำลองแบบเรสโตร์กริดที่ได้ เมื่อใช้ข้อมูลเชิงทัศนียภาพทำแบบจำลองพบว่าบริเวณพื้นน้ำมีความสูงมากผิดปกติ แสดงดังตารางที่ 6 การใช้เรสโตร์กริดประมาณความสูงต้องมีการปิดส่วนที่ไม่ใช่อาคารออกไป ตลอดจนการเติมข้อมูลความสูงอาคารที่ใกล้แหล่งน้ำ นั้นสามารถให้ค่าความสูงที่มากขึ้นจริงได้ เป็นข้อจำกัดของการใช้ข้อมูลเชิงทัศนียภาพสร้างแบบจำลอง เมื่อได้แบบจำลองประมาณความสูงแล้วสามารถนำไปใช้เติมค่าความสูงให้กับข้อมูลรูปอาคาร เพื่อแสดงผลเป็นแผนที่สามมิติอย่างง่ายได้ ดังวิธีการแสดงผลความสูงอาคารเบื้องต้นที่สุดเป็นการทำ Extruded Polygon ตลอดจนการพัฒนา Smart City, Digital Twin, Metaverse และการทำแอนิเมชันหรือเกมส์ที่เกี่ยวข้องกับเมือง ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 8 เนื่องจากความผิดพลาดอยู่ในระดับเมตร พบว่าอาคารริมถนน (รูปที่ 8 ทางขวา) มีความสูงไม่เท่ากันเมื่อแสดงผลสามมิติผ่านซอฟต์แวร์ระบบเปิด QGIS ดังนั้นวิธีดังกล่าวจึงเหมาะสมเป็นการประมาณเพื่อการใช้งานเบื้องต้นในพื้นที่กว้าง

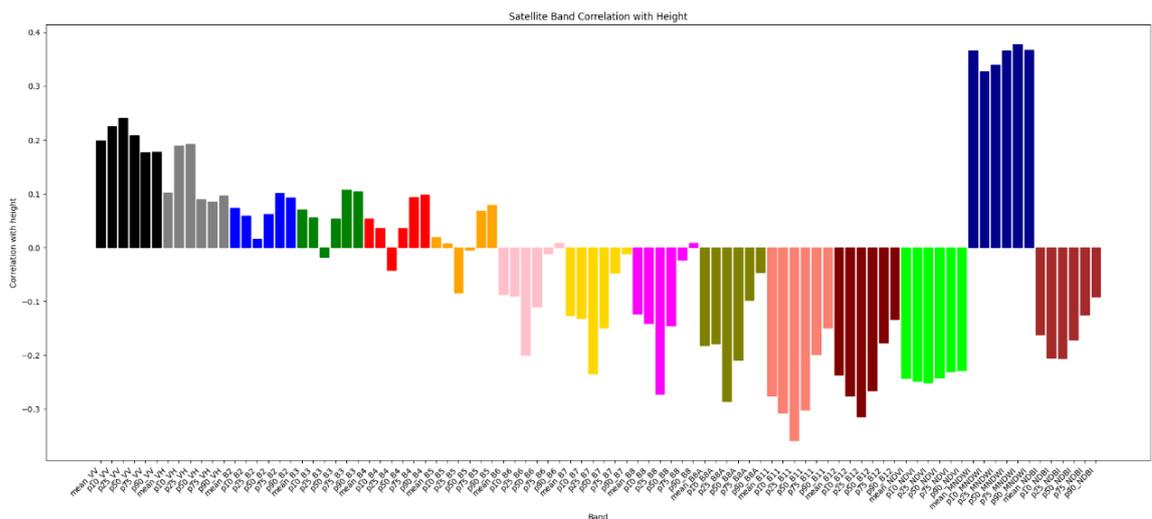


รูปที่ 6 การกระจายของความสูงจากแบบจำลองเทียบกับค่าอ้างอิง เมื่อวัดจากข้อมูลสอนแบบจำลอง (แถวที่ 1) ข้อมูลตรวจสอบแบบจำลอง (แถวที่ 2) ข้อมูลทดสอบแบบจำลองที่ความสูงไม่เกิน 100 เมตร (แถวที่ 3) และที่ความสูงไม่เกิน 50 เมตร (แถวที่ 4) กับชุดข้อมูลแบนด์ดาวเทียมเรดาร์อย่างเดียว (คอลัมน์ซ้าย) ข้อมูลดาวเทียมเชิงทัศนียภาพอย่างเดียว (คอลัมน์กลาง) และ ข้อมูลผสมทั้งเรดาร์และเชิงทัศนียภาพ (คอลัมน์ขวา)

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบแบบจำลองประมาณความสูงอาคารจากเกรเดียนต์บูสต์ที่ตั้งใช้ชุดช่วงคลื่นดาวเทียมต่างกัน

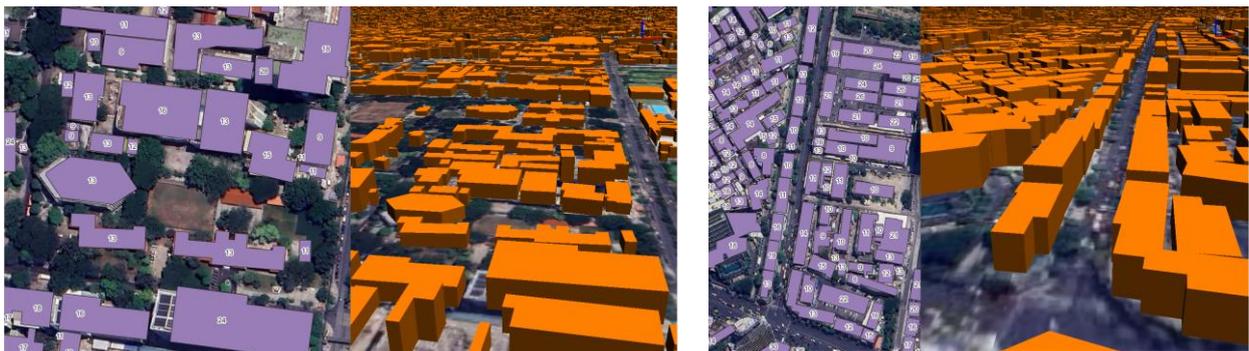
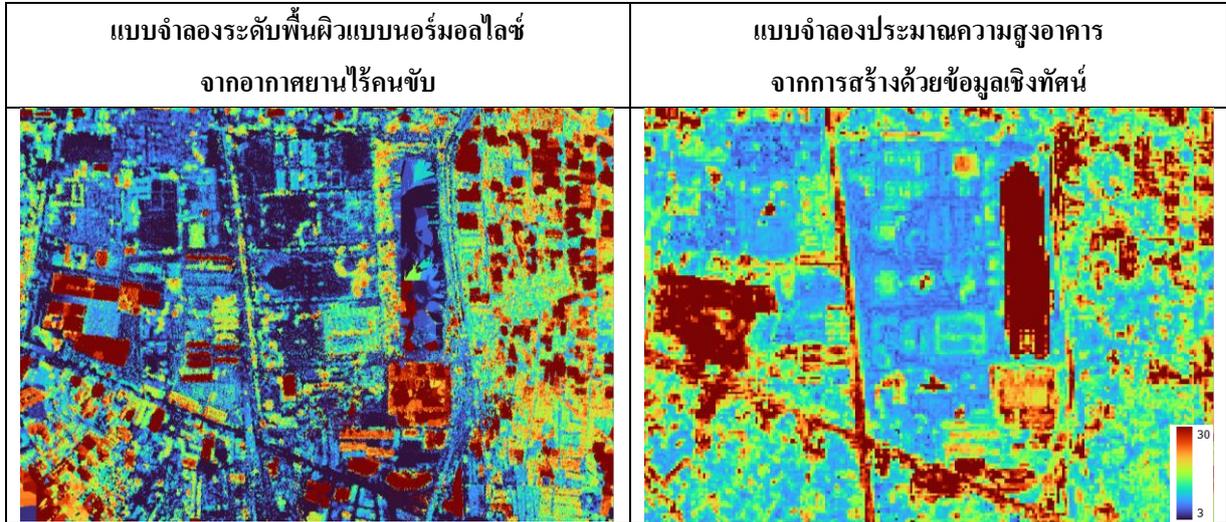
แบบจำลองระดับพื้นผิวแบบ นอร์มอลไลซ์ จาก ยู เอ วี	ข้อมูลเรดาร์อย่างเดียว	ข้อมูลเชิงทัศนศาสตร์อย่างเดียว	ข้อมูลผสม (ข้อมูลเรดาร์ + เชิงทัศน)
			
			
			
			

แบบจำลองประมาณความสูงสร้างจากชุดข้อมูลความสูงไม่เกิน 100 เมตร ผ่านแบบจำลองเรียนรู้เกรเดียนต์บูสต์ตั้งแบบลดอคย ความสูงที่แสดงวัดเทียบพื้นดินสมมติที่ความสูงเหนือทงรี -30 เมตร



รูปที่ 7 ค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรทำแบบจำลองเทียบกับความสูงอาคาร

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบแบบจำลองระดับพื้นผิวแบบนอร์มอลไลซ์จากอากาศยานไร้คนขับกับแบบจำลองประมาณความสูงอาคารจากข้อมูลดาวเทียมเชิงทัศนั บริเวณสระน้ำใกล้ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์



รูปที่ 8 การเติมข้อมูลความสูงอาคารเพื่อการแสดงผลในแผนที่สามมิติแบบ Extruded Polygon

ข้อมูลดาวเทียมควรผ่านการตรวจแก้มากกว่าเดิม และคำนวณปรับภาพเพื่อเน้นส่วนที่เป็นบริเวณอาคารก่อน ข้อมูลดาวเทียมเรดาร์ควรหาแหล่งอื่นเพิ่มเติมจากที่ดาวเทียมเซนทิเนล-1 มี และสามารถนำแหล่งข้อมูลดาวเทียมอื่น ที่มีสทสัมพันธ์กับความสูงอาคารมาเสริมสร้างแบบจำลองให้ถูกต้องยิ่งขึ้น นอกจากนี้ค่าความีวิธีการปรับปรุงวิธีการวิจัยได้หลายแบบ เช่น การยัดระยะเวลาค้นภาพดาวเทียม เพื่อเพิ่มข้อมูลดาวเทียมโดยเฉพาะเชิงทัศนัซึ่งหาภาพไร้เมฆได้น้อยในหนึ่งปี การเปลี่ยนเทคนิคการเรียนรู้เพื่อสร้างแบบจำลอง การเลือกใช้แบบจำลองเรียนรู้เชิงลึก การขยายพื้นที่ศึกษาและเพิ่มจำนวนข้อมูลอาคารนำเข้าแบบจำลอง เบื้องต้นการเติมข้อมูลความสูงอ้างอิงสามารถนำวิธีนับจำนวนอาคารแล้วแปลงเป็นความสูงอาคารได้

#### ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ การไฟฟ้านครหลวง สำหรับผลผลิตโครงการทำแผนที่สามมิติในกรุงเทพมหานคร ขอขอบพระคุณ ทีมงานเบื้องหลังงานวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ และคุณฉัตรวิวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์ สำหรับการตรวจสอบคุณภาพและประมวลผลข้อมูลต้นน้ำสำหรับการทำงานวิจัยครั้งนี้ และที่สำคัญ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.กฤษัญญา อินทร์รัตน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสนอแนะการใช้เทคนิคการถอดแบบใหม่ให้กับผู้เขียน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Alahmadi, M., Atkinson, P., Martin, D. Estimating the spatial distribution of the population of riyadh, saudi arabia using remotely sensed built land cover and height data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2013, 41, pp. 167–176. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2013.06.002> [Accessed 20 February 2024].
- [2] Resch, E., Bohne, R.A., Kvamsdal, T., Lohne, J. Impact of urban density and building height on energy use in cities. *Energy Procedia*, 2016, 96, pp. 800–814. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.142> [Accessed 20 February 2024].
- [3] Perini, K., Magliocco, A. Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2014, 13, pp. 495–506. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003> [Accessed 20 February 2024].
- [4] Microsoft Bing Maps. Worldwide building footprints derived from satellite imagery: GitHub, 2022. Available from: <https://github.com/microsoft/GlobalMLBuildingFootprints#will-there-be-more-data-coming-for-other-geographies> [Accessed 20 February 2024].
- [5] W. Sirko, S. Kashubin, M. Ritter, A. Annkah, Y.S.E. Bouchareb, Y. Dauphin, D. Keyzers, M. Neumann, M. Cisse, J.A. Quinn. Continental-scale building detection from high resolution satellite imagery. arXiv:2107.12283, 2021.
- [6] Li, X., Zhou, Y., Gong, P., Seto, K.C., Clinton, N. Developing a method to estimate building height from sentinel-1 data. *Remote Sensing of Environment*. 2020, 240, 111705. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111705> [Accessed 20 February 2024].
- [7] Li, M., Koks, E., Taubenböck, H., van Vliet, J. Continental-scale mapping and analysis of 3d building structure. *Remote Sensing of Environment*. 2020, 245, 111859. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111859> [Accessed 20 February 2024].
- [8] D. Frantz, F. Schug, A. Okujeni, C. Navacchi, W. Wagner, S. van der Linden, P. Hostert. National-scale mapping of building height using sentinel-1 and sentinel-2 time series. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 252, Article 112128, Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112128> [Accessed 20 February 2024].
- [9] Wan-Ben Wu, Jun Ma, Ellen Banzhaf, Michael E. Meadows, Zhao-Wu Yu, Feng-Xiang Guo, Dhritiraj Sengupta, Xing-Xing Cai, Bin Zhao, A first chinese building height estimate at 10 m resolution (cnbh-10 m) using multi-source earth observations and machine learning. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 291, 113578, ISSN 0034 4257, Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113578> [Accessed 20 February 2024].
- [10] Bannakulpiphat, T., and Santitamont, P. New era of mapping products from uav-based oblique camera system. In: *The 5<sup>th</sup> International Conference on Civil and Building Engineering Informatics*, Bangkok, July 2023, pp. 231-236
- [11] Santitamont, P. Research on Thai building modelling: GitHub, 2022. Available [https://github.com/phisan-chula/Thai\\_Bldg\\_Model](https://github.com/phisan-chula/Thai_Bldg_Model) [Accessed 20 February 2024]

