

Chulalongkorn University

Chula Digital Collections


Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2022

การประยุกต์ใช้ระบบอากาศยานไร้คนขับเพื่อการตรวจสอบด้วยสายตาของสะพาน
คอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การรังวัดด้วยภาพถ่าย

बारखन मल्लिर्दन
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>

 Part of the [Civil Engineering Commons](#), and the [Construction Engineering and Management Commons](#)

Recommended Citation

มลลิ์दन, बारखन, "การประยุกต์ใช้ระบบอากาศยานไร้คนขับเพื่อการตรวจสอบด้วยสายตาของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การรังวัดด้วยภาพถ่าย" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6541.
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6541>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การประยุกต์ใช้ระบบอากาศยานไร้คนขับเพื่อการตรวจสอบด้วยสายตาของสะพานคอนกรีตเสริม
เหล็กภายใต้การรังวัดด้วยภาพถ่าย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Application of Unmanned Aerial Vehicle System to Visually Inspect Reinforced
Concrete Bridges Base On Photogrammetry



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ระบบอากาศยานไร้คนขับเพื่อการตรวจสอบ ด้วยสายตาของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การ รังวัดด้วยภาพถ่าย
โดย	นายบวรชนก มณีรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิต ปานสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุตม์ งามโขนก)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิต ปานสุข)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนะชัย ทองโถม)

บวรชนก มณีรัตน์ : การประยุกต์ใช้ระบบอากาศยานไร้คนขับเพื่อการตรวจสอบด้วย
 สายตาของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การรังวัดด้วยภาพถ่าย. (Application of
 Unmanned Aerial Vehicle System to Visually Inspect Reinforced Concrete
 Bridges Base On Photogrammetry) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและนำเสนอการใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวี (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ในการตรวจสอบด้วยตาเปล่าของสะพาน (Bridge Visual Inspection) เพื่อใช้ในการทดแทนการตรวจสอบแบบดั้งเดิม โดยใช้หลักเกณฑ์ตามคู่มือตรวจสอบสะพานภายใต้การดูแลกรมทางหลวงชนบทซึ่งทางสำนักก่อสร้างสะพานระบบการบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System : BMMS) โดยทำการศึกษาค้นหาจำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control Point: GCP) ในที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า ส่วนบนของสะพานเริ่มมีค่าคงที่เมื่อจุดควบคุมภาพถ่ายตั้งแต่ 6 จุด ส่วนข้างของสะพานเริ่มมีค่าคงที่เมื่อจุดควบคุมภาพถ่ายตั้งแต่ 4 จุด และส่วนเสาตอม่อเริ่มมีค่าคงที่เมื่อจุดควบคุมภาพถ่ายตั้งแต่ 4 จุด ทำการเปรียบเทียบพิกัดและระยะแต่ละองค์ประกอบของสะพานจากระนาบออร์โธกับพื้นที่จริง พบว่ามีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.42 ใกล้เคียงกับพื้นที่ความเป็นจริง รวมไปถึงทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ขนาดความเสียหายที่ได้จากระนาบออร์โธ (Orthoplane) กับพื้นที่จริง โดยแบ่งขนาดความเสียหายได้ 3 ส่วน ได้แก่ ความเสียหายขนาดเล็ก มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 21.87 ความเสียหายขนาดกลาง เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 19.55 และ ความเสียหายขนาดใหญ่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 0.832 จากผลการศึกษาพบว่าสามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการใช้อากาศยานไร้คนขับตรวจสอบสะพานเป็นแนวทางในการตรวจสอบด้วยตาเปล่าของสะพาน ได้อย่างมีคุณภาพ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6372067421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Unmanned Aerial Vehicle, Bridge Visual Inspection, Bridge
Maintenance Management System, Ground Control Point,
Orthoplane

Bowonchanok Maneerat : Application of Unmanned Aerial Vehicle System
to Visually Inspect Reinforced Concrete Bridges Base On Photogrammetry .

Advisor: Assoc. Prof. WITHIT PANSUK, Ph.D.

This research studies and presents the use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology in Bridge Visual Inspection. Using the criteria according to the bridge inspection manual is under the supervision of the Department of Highways, the Bureau of Bridge Construction has a Bridge Maintenance Management System (BMMS). The study was conducted to determine the appropriate number of Ground Control Points (GCP). The outcomes demonstrate the upper part of bridge, lateral part and the pier portion become stable at 6,4,4 or more GCPs in comparison respectively. The coordinates and distances of each element of the bridge from the Orthoplane to real space. The average error percentage was found to be 1.42 percent, close to the actual area. Comparing the damage size results obtained from the Orthoplane with the real space by dividing the size of the damage into 3 parts: Small damage, medium damage and Hugh damage show on the percentage of error accounting for 21.87, 19.55 and 0.83 percent respectively. The results have shown that the data obtained from this research can be used as a guideline for using unmanned aerial vehicles to inspect bridges. Guidelines for Visual Inspection of Bridges are quality.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุตม์ งามโชนง ประธานกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์, รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนะชัย ทองโถม คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่มอบความรู้และคำแนะนำรวมถึงการสนับสนุนงานวิจัยในด้านต่างๆ กระทั่งงานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าสำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.พชร เครือวิทย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ แนะนำแนวทาง เสนอแนะ แนวคิด ปรับปรุงแก้ไขปัญหาต่างๆ ปฏิบัติงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ บริษัท อินฟรา พลัสจำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์อากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้ในการตรวจสอบสะพาน

ขอขอบคุณ แขวงทางหลวงราชบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการบินอากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจสอบสะพานธนบุรี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และนิสิตประจำภาคสาขาโยธาและภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือทั้งด้านความรู้และอุปกรณ์ รวมไปถึงการขออนุญาตสถานที่ในการปฏิบัติงานวิจัยนี้

ท้ายที่สุดข้าพเจ้าขอขอบคุณกัลยาณมิตรในทุกช่วงวัยทั้งหลายและที่ขาดไม่ได้คือครอบครัวที่ให้การสนับสนุนด้วยดีตลอดมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บวรชนก มณีรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
2.1 ความสำคัญและแนวทางการตรวจสอบสะพาน.....	1
2.1.1 การตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Visual Inspection).....	2
2.1.2 การให้คะแนนและประเมินความเสียหายสะพานของกรมทางหลวง พ.ศ.2549	3
2.1.3 การให้คะแนนและประเมินความเสียหายสะพานของกรมทางหลวง พ.ศ.2555	4
2.2 ประเภทความเสียหายของสะพาน	6
2.2.1 การเสื่อมสภาพของสะพานคอนกรีต	6
2.2.1.1 รอยแตก (Cracking).....	6
2.2.1.2 การหลุดล่อน (Spalling).....	11
2.2.2 การเสื่อมสภาพของผิวทางแอสฟัลต์ (Wearing Surface)	11

2.2.3 การเชื่อมสภาพของรอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint)	12
2.3 กล้องถ่ายภาพดิจิทัลสำหรับงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ	13
2.4 การวางแผนการบิน (Flight Planning)	14
2.5 จุดควบคุมภาพถ่าย (Ground control point)	17
2.5.1 หลักการคำนวณหาค่าระดับจากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณ GPS	17
2.5.2 TGM2017 (Thailand Geoid Model 2017)	18
2.6 การรังวัดแบบจลนในทันที (Real-time kinematic survey: RTK)	19
2.7 การประมวลผลรูปถ่าย	20
2.7.1 การสร้างแบบจำลองสามมิติแบบจุดเมฆ (Structure from motion: SFM)	20
2.7.2 การสร้างออร์โธ (Orthophoto)	21
2.8 การตรวจสอบความถูกต้องของภาพออร์โธ	22
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
2.9.1 การวางแผนการบิน	23
2.9.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	27
2.9.3 การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับในตรวจสอบสะพาน	30
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	34
3.1 ตำแหน่งที่ตั้งสะพานและรูปแบบโครงสร้างสะพาน	35
3.2 การรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน	36
3.2.1 การรังวัดพิกัดของจุดอ้างอิง	36
3.2.2 รังวัดค่าพิกัดของจุดที่เห็นเด่นชัดบนพื้นผิวสะพาน	37
3.3 การจัดทำเอกสารอธิบายข้อมูลของจุด Marking ส่วนข้างของสะพาน	38
3.4 การวางแผนการบิน	39
3.4.1 ประเภทของอากาศยานไร้คนขับ	39
3.4.1.1 อากาศยานไร้คนขับรุ่น DJI Phantom 4 Pro V2	39

3.4.1.2	อากาศยานไร้คนขับรุ่น Skydio 2	40
3.4.2	การประมาณเส้นทางการบินอัตโนมัติโดย โปรแกรม DJI GS Pro.....	40
3.4.3	ประมาณเส้นทางการบินจากหน้าจอจริง.....	41
3.4.3.1	การประมาณเส้นทางการบินด้านข้างของสะพาน	41
3.4.3.2	การประมาณเส้นทางการบินเสาดม่อและกำแพงดม่อของสะพาน.....	42
3.4.3.3	การประมาณเส้นทางการบินส่วนใต้ห้องของสะพาน	43
3.5	การเก็บข้อมูลหน้าจอจริง.....	44
3.5.1	การกำหนดรหัสขึ้นส่วน.....	44
3.5.2	วิธีการตรวจสอบความเสียหายและขนาดความเสียหายภายนอกของสะพาน.....	45
3.6	การหาระยะแต่ละส่วนของสะพาน	46
3.7	การประมวลผลข้อมูล	48
3.8	การหาจำนวนและรูปแบบการจัดวางจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสม	49
3.9	การหาความกว้างหรือปริมาณความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพานและระยะแต่ละขึ้นส่วนของสะพานของภาพออร์โธรี	49
3.10	การสอบเทียบระยะแต่ละขึ้นส่วนของสะพานและการตรวจสอบความเสียหายของสะพานจากภาพระนาบออร์โธรีกับค่าที่วัดจากพื้นที่จริง.....	50
3.11	การตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นของสะพานตามมาตรฐานกรมทางหลวง	50
บทที่ 4	ผลการศีกษา	51
4.1	ตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่าย	51
4.2	ตำแหน่งสะพานระดัและตำแหน่งจุดอ้างอิง	56
4.3	ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ	57
4.3.1	ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับส่วนบนของสะพาน	57
4.3.1.1	ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับรูปแบบการแบ่งสัดส่วน.....	57
4.3.1.2	ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับรูปแบบพื้นปลา	59

4.3.2 ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับส่วนข้างของสะพาน	62
4.3.3 ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับส่วนเสาตอม่อที่ 1	65
4.4 การกำหนดรหัสชิ้นส่วน	69
4.5 ผลการตรวจสอบความเสียหายพื้นผิวคอนกรีตเชิงตัวเลข	74
4.5.1 รอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก	74
4.5.2 การหลุดหล่อนของคอนกรีตเสริมเหล็ก	76
4.5.3 รอยแตกร้าวของรอยต่อผิวทางแอสฟัลต์	81
4.5.4 ระยะเคลื่อนขยายตัวรอยต่อเพื่อขยาย	81
4.5.5 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของผิวทางแอสฟัลต์	82
4.6 ผลการตรวจสอบของสะพานจากการตรวจสอบหลัก (Principle Inspection).....	86
4.6.1 โครงสร้างส่วนบน.....	86
4.6.2 โครงสร้างส่วนล่าง.....	93
4.6.3 ส่วนประกอบรอง	98
4.6.4 ผลการประเมินสภาพความเสียหายหลัก.....	103
4.7 การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบระยะของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากโปรแกรม QGIS กับขนาดพื้นที่ทำงานจริง	103
4.8 การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบรูปแบบความเสียหายต่าง ๆ ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ	106
4.8.1 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของรอยแตกร้าวรอยแตกร้าวบนผิวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ.....	107
4.8.2 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะเคลื่อนขยายรอยต่อทางเท้าจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ	109
4.8.3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความกว้างและความยาวของการหลุดหล่อนของคอนกรีตภายนอกสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ.....	110

4.9 ความสามารถและข้อจำกัดในการตรวจสอบสะพานด้วยอากาศยานไร้คนขับ	113
4.9.1 การบินสำรวจสะพานด้วยอากาศยานไร้คนขับ	113
4.9.2 การประมวลผลภาพถ่ายแต่ละชิ้นส่วนของสะพานจากอากาศยานไร้คนขับ	114
4.9.3 การวัดขนาดความเสียหายจากการประมวลผลอากาศยานไร้คนขับ	117
บทที่ 5 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ	118
5.1 สรุปผลการวิจัย	118
5.2 ข้อเสนอแนะ	120
ภาคผนวก ก การประมวลผลภาพด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft Metashape	121
ภาคผนวก ข เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายแต่ละชิ้นส่วนกรมทางหลวง	131
ภาคผนวก ค การกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ	140
ภาคผนวก ง การวัดความเสียหายต่าง ๆ หน่วยงาน	171
ภาคผนวก จ รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนบุรี	183
บรรณานุกรม	200
ประวัติผู้เขียน	204

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายโครงสร้างสะพานกรมทางหลวง พ.ศ.2549 [11]	3
ตารางที่ 2 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายโครงสร้างสะพานกรมทางหลวง พ.ศ.2555 [2]	5
ตารางที่ 3 สรุปปัญหาและสาเหตุการเกิดรอยแตกร้าวไม่เชิงโครงสร้าง (Non-structural Cracks) [13]	9
ตารางที่ 4 ระดับความเสียหายของโครงสร้างสะพานคอนกรีตจําแนกตามความกว้างรอยร้าว [2] ...	10
ตารางที่ 5 เกณฑ์การประเมินผลของการหลุดหล่อนของโครงสร้างสะพานคอนกรีต [14]	11
ตารางที่ 6 ระดับความเสียหายเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์จําแนกตามความกว้างของรอยร้าว [15]	12
ตารางที่ 7 เปอร์เซนต์ความเสียหายของพื้นที่หน้าตัดผิวทางแอสฟัลต์ [2]	12
ตารางที่ 8 ชนิดของกล้องดิจิทัลที่ใช้สำหรับการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ [9]	14
ตารางที่ 9 RMSE ของแต่ละทิศทางตาม GCP ต่าง ๆ ในตัวอย่างที่ 1 และ 2 [6]	30
ตารางที่ 10 แสดงตัวอย่างการกำหนดชื่อชิ้นส่วนและสัญลักษณ์ด้วยย่อบริเวณต่าง ๆ [2]	44
ตารางที่ 11 แนวทางการวัดปริมาณความเสียหายด้วยโปรแกรม QGIS	50
ตารางที่ 12 แสดงค่าพิกัดของจุด Marking ส่วนบนของสะพาน ทั้ง 22 จุด	53
ตารางที่ 13 แสดงค่าพิกัดของจุด Marking ส่วนข้างของสะพาน ทั้ง 17 จุด	54
ตารางที่ 14 แสดงค่าพิกัดของจุด Marking ส่วนบนของสะพาน ทั้ง 14 จุด	55
ตารางที่ 15 แสดงค่าพิกัดของจุดอ้างอิง	56
ตารางที่ 16 ตำแหน่งและการจัดวางรูปแบบการแบ่งสัดส่วนของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบส่วนบนของสะพาน	57
ตารางที่ 17 ผลการประมวลผลหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันรูปแบบการแบ่งสัดส่วนส่วนบนของสะพาน	58

ตารางที่ 18 ตำแหน่งและการจัดวางรูปแบบพื้นปลาของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบส่วนบนของสะพาน.....	60
ตารางที่ 19 ผลการประมวลผลหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันรูปแบบพื้นปลาส่วนบนของสะพาน	61
ตารางที่ 20 ตำแหน่งและการจัดวางจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบส่วนข้างของสะพาน	63
ตารางที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันส่วนข้างของสะพาน	64
ตารางที่ 22 ตำแหน่งและการจัดวางจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบส่วนเสาต่อม่อที่ 1	65
ตารางที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันส่วนเสาต่อม่อที่ 1	67
ตารางที่ 24 ผลการตรวจระดับความเสียหายของการแตกร้าวของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก	76
ตารางที่ 25 ผลการตรวจระดับความเสียหายของการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก	78
ตารางที่ 26 ผลการตรวจระดับความเสียหายของการแตกร้าวรอยต่อผิวทางแอสฟัลต์ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก	81
ตารางที่ 27 ผลการตรวจสอบระยะเคลื่อนขยายรอยต่อเพื่อขยายของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก	82
ตารางที่ 28 เพอร์เซ็นต์การสูญเสียหน้าตัดของผิวทางบริเวณเชิงลาดที่ 2	83
ตารางที่ 29 ตัวอย่างผลการประเมินการตรวจสอบหลักของโครงสร้างส่วนบน	87
ตารางที่ 30 ตัวอย่างผลการประเมินการตรวจสอบหลักของโครงสร้างส่วนล่าง.....	94
ตารางที่ 31 ตัวอย่างผลการประเมินการตรวจสอบหลักของโครงสร้างส่วนประกอบรอง	99
ตารางที่ 32 ผลการประเมินสภาพการใช้งานของสะพาน 2 ช่วงของสะพาน.....	103
ตารางที่ 33 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะของชิ้นส่วนส่วนบนของสะพานที่ได้จากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ	104
ตารางที่ 34 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของรอยแตกร้าวบนผิวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ	108
ตารางที่ 35 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะเคลื่อนขยายรอยต่อทางเท้าจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ	109
ตารางที่ 36 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความกว้างและความยาวของการหลุดหล่อนของคอนกรีตภายนอกสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ	112

ตารางที่ 37 ระยะเวลาโดยเฉลี่ยในการบินสำรวจแต่ละส่วนของโครงสร้างของสะพานธนารักษ์.....	113
ตารางที่ 38 ความครบถ้วนและข้อจำกัดในการประมวลผลภาพถ่ายแต่ละชิ้นส่วนของสะพานจาก อากาศยานไร้คนขับ.....	116
ตารางที่ 39 ความสามารถและข้อจำกัดในการตรวจสอบความเสียหายด้วยอากาศยานไร้คนขับ ...	117
ตารางที่ 40 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายชิ้นส่วนของโครงสร้างส่วนบน	131
ตารางที่ 41 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายชิ้นส่วนของโครงสร้างส่วนล่าง.....	134
ตารางที่ 42 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายของทางเท้า.....	136
ตารางที่ 43 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายของรอยต่อเพื่อขยาย.....	137
ตารางที่ 44 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์.....	138
ตารางที่ 45 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายของแผ่นรองรับคาน	139
ตารางที่ 46 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P01	183
ตารางที่ 47 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P02.....	184
ตารางที่ 48 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P03.....	185
ตารางที่ 49 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P04.....	186
ตารางที่ 50 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P05.....	187
ตารางที่ 51 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P06.....	188
ตารางที่ 52 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P07.....	189
ตารางที่ 53 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P08.....	190
ตารางที่ 54 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P09.....	191
ตารางที่ 55 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P10.....	192
ตารางที่ 56 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P11.....	193
ตารางที่ 57 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P12.....	194
ตารางที่ 58 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P13.....	195
ตารางที่ 59 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P14.....	196

ตารางที่ 60 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราม 8 จุด P15.....	197
ตารางที่ 61 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราม 8 จุด P16.....	198
ตารางที่ 62 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราม 8 จุด P17	199



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 ระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพาน [2]	2
รูปที่ 2 แสดงการตรวจสอบโครงสร้างสะพานโดยใช้รถกระเช้าพิเศษ.....	2
รูปที่ 3 แสดงการควบคุมการจราจรบนท้องถนน [2]	3
รูปที่ 4 รอยแตกจากการดัด (Flexure Cracks) [11].....	7
รูปที่ 5 รอยแตกจากการเฉือน (Shear Cracks) [11]	7
รูปที่ 6 ชนิดของการแตกร้าว ประเภท Non Structural Crack [12].....	8
รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างของลักษณะรอยร้าวไม่เชิงโครงสร้าง (Non-structural Cracks) [13]	8
รูปที่ 8 แผนภาพแสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการคำนวณ [17]	15
รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างรูปแบบการบินแบบทั่วไปและรูปแบบการบินแบบกริดตามลำดับ [9].....	16
รูปที่ 10 รูปแบบการบินแบบทั่วไป และการกำหนดส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนเกย (Sidelap) [18].....	16
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือทรางรี และความสูงออร์โทเมตริก [21]	18
รูปที่ 12 Thailand Geoid Model 2017 (TGM2017) [21]	19
รูปที่ 13 การสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพหลายมุมมอง [24].....	20
รูปที่ 14 กระบวนการสร้างแบบจำลองจุดก้อนเมฆสามมิติ (3D Point Cloud) [23].....	21
รูปที่ 15 ภาพตัวอย่างเปรียบเทียบ Orthophoto กับ True Orthophoto [25].....	21
รูปที่ 16 รูปแบบการบิน [7]	23
รูปที่ 17 ระยะการบินและการถ่ายภาพ [7]	24
รูปที่ 18 ตัวอย่างกรอบมูรูภาพรอบสะพานจากการสำรวจ [10]	25
รูปที่ 19 ตัวอย่างเชิงคุณภาพของเส้นทางการบินที่มีความเอียงก้องต่างกัน [10]	25
รูปที่ 20 การคำนวณ GSD ในระยะทางต่ำสุดและสูงสุดของกล้องไปยังวัตถุ [27].....	26

รูปที่ 21 ภาพจำลองด้านล่างของดาตไฟฟ้าสะพานบนหลักค้ำยันตะวันตก	27
รูปที่ 22 ภาพออร์โธที่สร้างจากภาพถ่ายระดับความสูง 50 เมตร ของเทียวบิน RTK-GNSS UAV ที่ ซ้อนทับด้วยวิธีการบิน 50 เมตร สามเหลี่ยมสีแดงที่มีตัวเลขระบุถึง GCP [8].....	28
รูปที่ 23 การประมาณการ RMSE ของ UAV ที่กำหนดรูปทรงเรขาคณิตของถนน (โดยใช้พารามิเตอร์ คุณภาพสูง) เทียบกับความจริงภาคพื้นดินของ TLS [8].....	28
รูปที่ 24 ระดับความสูงของการถ่ายภาพทางอากาศและเส้นทางของเขื่อนโดยใช้ UAV [6]	29
รูปที่ 25 แบบจำลองสามมิติและการกระจาย GCP บนเขื่อน [6].....	29
รูปที่ 26 ผลลัพธ์ในการประมวลผลภาพระนาบออร์โธส่วนบนของสะพาน [3].....	32
รูปที่ 27 (a) รูปโดรน (b) การติดตามข้อมูล (c) การประมาณความยาวและความกว้างของรอยร้าว [3]	32
รูปที่ 28 การประเมินความเสียหายและปริมาตรของอิฐที่เกิดการแตกร้าว : (a) ข้อมูลภาพถ่าย	33
รูปที่ 29 ผังการทำงาน	34
รูปที่ 30 สะพานธนรัชต์	35
รูปที่ 31 แผนที่ตำแหน่งสะพานธนรัชต์	35
รูปที่ 32 ตำแหน่งจุดอ้างอิงที่ใช้ในการรังวัดส่วนข้างและส่วนเสาตอม่อที่ 1 ของสะพาน.....	36
รูปที่ 33 ตำแหน่งจุดอ้างอิงที่ใช้ในการรังวัดส่วนบนของสะพาน	37
รูปที่ 34 การรังวัดหาค่าพิกัดของจุดอ้างอิงด้วยวิธีการรังวัดดาวเทียมแบบจลนในทันที	37
รูปที่ 35 ตัวอย่างการติดเป้าจุดควบคุมภาพถ่ายส่วนบนของสะพาน และ เสาตอม่อที่ 1	38
รูปที่ 36 การรังวัดค่าพิกัดของจุดที่เห็นเด่นชัดบนพื้นผิวสะพาน	38
รูปที่ 37 ตัวอย่างเอกสารอธิบายข้อมูลของจุด Marking ส่วนข้างของสะพาน.....	39
รูปที่ 38 โดรนรุ่น DJI Phantom 4 Pro V2.0	40
รูปที่ 39 โดรนรุ่น Skydio 2.....	40
รูปที่ 40 การปรับค่า DJI GS Pro	41
รูปที่ 41 ตัวอย่างเส้นทางการบินด้านข้างของสะพาน	42
รูปที่ 42 ตัวอย่างเส้นทางการบินกำแพงตอม่อและการซ้อนทับ (Overlap).....	42

รูปที่ 43 ตัวอย่างเส้นทางการบินกำแพงตอม่อและการส่วนเกย (Sidelap).....	43
รูปที่ 44 ตัวอย่างเส้นทางการบินใต้ท้องสะพาน.....	43
รูปที่ 45 จำนวนบริเวณต่าง ๆ ของสะพานพระราชวัง.....	44
รูปที่ 46 การวัดขนาดความเสียหายเสาตอม่อตัวที่ 1.....	46
รูปที่ 47 การวัดขนาดรอยต่อทางเดินเท้า.....	46
รูปที่ 48 เส้นทางการตรวจสอบระยะแต่ละส่วนของสะพานฝั่งตลาดราชบุรี.....	47
รูปที่ 49 เส้นทางการตรวจสอบระยะแต่ละส่วนของสะพานของสะพานฝั่งค่ายภาณุรังษี.....	47
รูปที่ 50 เส้นทางการตรวจสอบระยะแต่ละส่วนของสะพานส่วนกลางของสะพาน.....	48
รูปที่ 51 กระบวนการประมวลผลโปรแกรม Agisoft Metashape.....	48
รูปที่ 52 จุดที่เห็นเด่นชัดส่วนบนของสะพาน.....	51
รูปที่ 53 จุดที่เห็นเด่นชัดส่วนข้างของสะพาน.....	51
รูปที่ 54 จุดที่เห็นเด่นชัดส่วนเสาตอม่อที่ 1.....	52
รูปที่ 55 ตำแหน่งของสะพานพระราชวัง และ ตำแหน่งของจุดอ้างอิง.....	56
รูปที่ 56 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่ แตกต่างกันรูปแบบการแบ่งสัดส่วนส่วนบนของสะพาน.....	59
รูปที่ 57 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่ แตกต่างกันรูปแบบพื้นปลาส่วนบนของสะพาน.....	61
รูปที่ 58 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่ แตกต่างกันส่วนข้างของสะพาน.....	64
รูปที่ 59 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่ แตกต่างกันส่วนเสาตอม่อที่ 1.....	68
รูปที่ 60 ตัวอย่างแบบจำลองสามมิติของสะพานพระราชวังบริเวณ ช่วงสะพานที่ 1 และ 2.....	69
รูปที่ 61 แบบสะพานด้านบนที่มองด้านบนบริเวณ ช่วงสะพานที่ 1 และ 2.....	70
รูปที่ 62 แบบสะพานด้านบนที่มองด้านล่างบริเวณ ช่วงสะพานที่ 1 และ 2.....	70
รูปที่ 63 แบบสะพานด้านข้างฝั่งซ้าย.....	71

รูปที่ 64 แบบสะพานด้านข้างฝั่งขวา	71
รูปที่ 65 แบบสะพานด้านล่างเสาตอม่อ 1	72
รูปที่ 66 ส่วนหน้าของเสาตอม่อ 2.....	73
รูปที่ 67 ส่วนหลังของเสาตอม่อ 2.....	73
รูปที่ 68 ตำแหน่งการแตกร้าวของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนข้างของสะพานฝั่งรถไฟ	74
รูปที่ 69 ตำแหน่งการแตกร้าวของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนเสาตอม่อที่ 1.....	75
รูปที่ 70 ตำแหน่งการแตกร้าวของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนบนของสะพาน	75
รูปที่ 71 ตำแหน่งการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนข้างของสะพานฝั่งแม่น้ำ	76
รูปที่ 72 ตำแหน่งการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนข้างของสะพานฝั่งรถไฟ	76
รูปที่ 73 ตำแหน่งการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนบนของสะพาน	77
รูปที่ 74 ตำแหน่งการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนเสาตอม่อที่ 1	77
รูปที่ 75 ตำแหน่งการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนเสาตอม่อที่ 2	77
รูปที่ 76 ตำแหน่งการแตกร้าวรอยต่อผิวทางแอสฟัลต์ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก	81
รูปที่ 77 ตำแหน่งการตรวจสอบระยะเคลื่อนขยายรอยต่อเพื่อขยายของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก..	81
รูปที่ 78 ตำแหน่งความเสียหายบนพื้นที่หน้าตัดผิวทางแอสฟัลต์บริเวณส่วนเชิงลาดสะพานที่ 2 ของ สะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	82
รูปที่ 79 ตัวอย่างตำแหน่งระยะส่วนบนของสะพาน 34 จุด.....	103
รูปที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของชิ้นส่วนส่วนบนของสะพานที่ได้จากภาคสนามกับภาพถ่าย อากาศยานไร้คนขับ	106
รูปที่ 81 ตัวอย่างการวัดขนาดรอยแตกร้าวทั้ง 6 จุด บนชิ้นส่วนฐานรากบริเวณเสาตอม่อที่ 1.....	107
รูปที่ 82 ตัวอย่างตำแหน่งรอยแตกร้าวบนชิ้นส่วนฐานรากบริเวณเสาตอม่อที่ 1	107
รูปที่ 83 ความสัมพันธ์ระหว่างรอยแตกร้าวบนผิวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและ ภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ	108
รูปที่ 84 ตัวอย่างตำแหน่งระยะเคลื่อนขยายรอยต่อทางเท้า 14 จุด	109

รูปที่ 85 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนขยายรอยต่อทางเท้าจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศ ยานไร้คนขับ.....	110
รูปที่ 86 ตัวอย่างการวัดขนาดความกว้างและความยาวการหลุดล่อนทั้ง 2 จุด	111
รูปที่ 87 ตัวอย่างตำแหน่งการหลุดล่อนทั้ง 2 จุด บนชิ้นส่วนทางเท้าที่ 2 ชิ้นส่วนที่ 7	111
รูปที่ 88 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความยาวของการหลุดล่อนของคอนกรีตภายนอก สะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ	112
รูปที่ 89 ตัวอย่างการถ่ายภาพด้านบนทางฝั่งซ้ายและขวาของสะพานธนบุรี.....	115
รูปที่ 90 ตัวอย่างการประมวลผลระนาบออร์โธส่วนบนของสะพานธนบุรี.....	115
รูปที่ 91 การนำข้อมูลภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับใส่ในซอฟต์แวร์	121
รูปที่ 92 แก้ไขความผิดพลาดของภาพถ่ายจากการของอากาศยานไร้คนขับจากกล้อง Rolling shutter.....	121
รูปที่ 93 คำสั่ง Align Photo เพื่อสร้างแบบจำลองจุดก้อนเมฆแบบห่าง	122
รูปที่ 94 คำสั่ง Gradual Selection ทำการลบจุดก้อนเมฆที่มีการฟุ้งกระจาย	122
รูปที่ 95 การนำเข้าข้อมูลพิกัดจุดควบคุมภาพและตั้งค่าพิกัด Coordutuiate System เป็น WGS 84 / UTM 47N TGM2017.....	123
รูปที่ 96 คำสั่ง Filter Photos by Markers.....	124
รูปที่ 97 คำสั่ง Build Dense Cloud.....	125
รูปที่ 98 คำสั่ง Filter by Select Confidence Range ทำการลบจุดก้อนเมฆหนาแน่นที่มีการฟุ้ง กระจาย.....	126
รูปที่ 99 คำสั่ง Build Mesh และ Build Texture.....	127
รูปที่ 100 แบบจำลองตาข่าย (Mesh Model).....	127
รูปที่ 101 ตัวอย่างการกำหนดค่าคำสั่ง Build DEM แต่ละส่วนของสะพาน.....	128
รูปที่ 102 แบบจำลองความสูงส่วนบนของสะพาน	129
รูปที่ 103 ภาพระนาบออร์โธส่วนบนของสะพาน.....	129
รูปที่ 104 วิธีการแก้ไขภาพระนาบออร์โธ	130

รูปที่ 105 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานโดยการไม่มีจุดควบคุมภาพถ่าย	140
รูปที่ 106 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งสัดส่วน 1 ส่วน โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Portion 1: P1)	141
รูปที่ 107 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งสัดส่วน 2 ส่วน โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 2: P2)	142
รูปที่ 108 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งสัดส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 10 จุด (Portion 4 type 1: P4(1))	143
รูปที่ 109 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งสัดส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 14 จุด (Portion 4 type 2: P4(2))	144
รูปที่ 110 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งสัดส่วน 5 ส่วน โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 12 จุด (Portion 5: P5)	145
รูปที่ 111 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 22 จุด (FULL)	146
รูปที่ 112 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งพื้นปลา 3 จุด รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 3 จุด (Zigzag 3 type 1: Z3 (1))	147
รูปที่ 113 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งพื้นปลา 3 จุด รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 3 จุด (Zigzag 3 type 2: Z3 (2)).....	148
รูปที่ 114 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งพื้นปลา 4 จุด รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Zigzag 4 type 1: Z4 (1)).....	149
รูปที่ 115 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งพื้นปลา 4 จุด รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Zigzag 4 type 2: Z4 (2)).....	150
รูปที่ 116 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งพื้นปลา 6 จุด รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Zigzag 6 type 1: Z6 (1)).....	151
รูปที่ 117 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งพื้นปลา 6 จุด รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Zigzag 6 type 2: Z6 (2)).....	152
รูปที่ 118 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งพื้นปลา 11 จุด รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 11 จุด (Zigzag 11 type 1: Z11 (1))	153

รูปที่ 119 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งพื้นปลา 11 จุด รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 11 จุด (Zigzag 11 type 2: Z11 (2))	154
รูปที่ 120 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานโดยการไม่มีจุดควบคุมภาพถ่าย	155
รูปที่ 121 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 2 ส่วน โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Portion 2: P2)	156
รูปที่ 122 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 4 type 1: P4(1)).....	157
รูปที่ 123 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 4 type 2: P4(2)).....	158
รูปที่ 124 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 6 ส่วน รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 8 จุด (Portion 6 type 1: P6 (1)).....	159
รูปที่ 125 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 6 ส่วน รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 8 จุด (Portion 6 type 2: P6 (2)).....	160
รูปที่ 126 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 8 ส่วน โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 9 จุด (Portion 8: P8)	161
รูปที่ 127 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 17 จุด (FULL)	162
รูปที่ 128 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 โดยไม่มีจุดควบคุมภาพถ่าย	163
รูปที่ 129 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 การแบ่งมุม 4 จุด รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Edge 4 type 1: E4 (1)).....	164
รูปที่ 130 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 การแบ่งมุม 4 จุด รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Edge 4 type 1: E4 (2)).....	165
รูปที่ 131 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 การแบ่งสัดส่วน 1 ส่วน โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 1: P1)	166
รูปที่ 132 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 การแบ่งสัดส่วน 2 ส่วน รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 2 type 1: P2 (1))	167

รูปที่ 155 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 เสาดอม่อที่ 5.....	180
รูปที่ 156 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 เสาดอม่อที่ 4.....	181
รูปที่ 157 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 เสาดอม่อที่ 3.....	181
รูปที่ 158 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 เสาดอม่อที่ 2.....	182
รูปที่ 159 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 เสาดอม่อที่ 1.....	182



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โครงสร้างสะพานนับเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่ขับเคลื่อนเศรษฐกิจในประเทศไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยส่วนใหญ่สะพานในประเทศไทยเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงทำให้การตรวจสอบและบำรุงรักษาเป็นประจำเพื่อช่วยป้องกันความเสียหายที่ส่งผลต่อสภาพทัศนียภาพ อีกทั้งการเพิ่มอายุการใช้งานของสะพาน โดยทั่วไปวิธีการตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Visual Inspection) เป็นวิธีการประเมินขั้นแรกของการตรวจสอบโครงสร้าง [1] ซึ่งต้องอาศัยกำลังคนในการเข้าถึงเพื่อตรวจสอบสภาพความเสียหายจึงเป็นหน้าที่ของวิศวกรที่ต้องเป็นผู้ตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์ และประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม [2] โดยวิธีการดังกล่าวอาจเป็นความอันตรายต่อผู้ตรวจสอบ ต้นทุนสูง ใช้เวลานาน [3] รวมไปถึงความซับซ้อนในการรวบรวมข้อมูลหากเป็นสะพานขนาดใหญ่ ด้วยความสามารถในการเข้าถึงของอากาศยานไร้คนขับหรือโดรน ในรูปแบบจำลองสามมิติในการตรวจสอบความเสียหาย เป็นอีกตัวเลือกหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มความปลอดภัย ลดระยะเวลาในการตรวจสอบ และลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิม [4] ดังนั้นการนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้เป็นเครื่องมือเป็นอีกหนึ่งวิธีในการตรวจสอบสะพานที่เหมาะสม

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการตรวจสอบความเสียหายของสะพาน โดยใช้อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ทดแทนวิธีการตรวจสอบดั้งเดิมไม่ว่าจะเป็นตรวจสอบเป็นประจำ และการตรวจสอบฉุกเฉินที่จะต้องทำการเข้าถึงพื้นที่ในการตรวจสอบความเสียหาย [5] ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ตรวจสอบ ซึ่งอากาศยานไร้คนขับถือได้ว่าเป็นเครื่องมือที่นิยมอย่างแพร่หลาย ในด้านการตรวจสอบ เช่น การตรวจสอบเขื่อน [6] การตรวจสอบอาคาร [7] การตรวจสอบถนน [8] รวมไปถึงการตรวจสอบสะพาน ด้วยความสามารถของอากาศยานไร้คนขับในการสร้างแบบจำลองสามมิติ ด้วยหลักการ Photogrammetry ช่วยในการสำรวจและประมวลผลเป็นแบบจำลองจุดก้อนเมฆ (Point Cloud) เพื่อสร้างภาพระนาบออร์โธ (Orthophane) ที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลองนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็น ความสูงในการบิน การทับซ้อนของภาพ ความครบถ้วนของภาพที่ถ่าย รวมไปถึงจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control Point: GCP) ที่ช่วยในการปรับแก้ค่าพิกัดของภาพถ่ายให้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้นและจุดตรวจสอบ (Check point: CP) ที่ช่วยในการตรวจสอบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล [9] อย่างไรก็ตามจุดควบคุมภาพถ่ายนั้นยังมีจุดบกพร่องในส่วน

จำนวนและตำแหน่งที่เหมาะสม รวมไปถึงระยะเวลาในการดำเนินการรังวัด ซึ่งค่อนข้างใช้เวลานาน แม้จะรับประกันผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น [10] เพื่อใช้ในการประมวลผลและตรวจสอบในการสร้างภาพออร์โธแต่ละส่วนของสะพานให้มีความถูกต้องเชิงพิกัด

เพื่อศึกษาคุณภาพในการระนาบออร์โธแต่ละชิ้นส่วนของสะพานจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหาย ผู้วิจัยจึงได้นำเสนออากาศยานไร้คนขับที่มีขายตามท้องตลาดเพื่อให้ผู้ตรวจสอบสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีของอากาศยานไร้คนขับเป็นแนวทางในการตรวจสอบสะพานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทราบถึงความสามารถและข้อจำกัดในการใช้อากาศยานไร้คนขับในการตรวจสอบสะพานด้วยตาเปล่า และ ทราบถึงวิธีการประมวลผลภาพระนาบออร์โธจากภาพอากาศยานไร้คนขับที่มีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ในการสำรวจและตรวจสอบสะพาน โดยทำการรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบมีการกระจายตัวทั่วทั้งพื้นที่การตรวจสอบ ทำการประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายโดยการศึกษาตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่มีผลต่อความถูกต้องและเหมาะสมเพื่อลดระยะเวลาในการดำเนินการตรวจสอบสะพานในครั้งถัดไป จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้มาประมวลผลภาพระนาบออร์โธเพื่อเปรียบเทียบระยะของชิ้นส่วนต่าง ๆ และความเสียหายของโครงสร้างสะพานกับพื้นที่จริงที่สามารถเข้าถึงได้ เพื่อทราบถึงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองและความเสียหายที่วัดจากภาพออร์โธเทียบกับพื้นที่จริง ทดแทนการตรวจสอบแบบดั้งเดิม มีความรวดเร็ว ลดอันตรายต่อผู้ตรวจสอบ ลดเวลา ลดกำลังคนและลดความซับซ้อนในการเก็บรวบรวมข้อมูล

1.2 วัตถุประสงค์

1. ทราบถึงความสามารถและข้อจำกัดของการตรวจสอบสะพานด้วยตาเปล่าจากอากาศยานไร้คนขับ
2. ศึกษาวิธีการหาตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสมในการประมวลผลสร้างภาพออร์โธในการตรวจสอบสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก
3. เปรียบเทียบความถูกต้องระยะชิ้นส่วนของสะพานที่วัดได้จากภาคสนามและจากภาพออร์โธที่ได้จากการประมวลผลอากาศยานไร้คนขับ
4. ตรวจสอบและทำการเปรียบเทียบความเสียหายของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากภาคสนามและจากภาพออร์โธที่ได้จากการประมวลผลอากาศยานไร้คนขับ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษา สะพานธนบุรี อยู่ในสังกัดแขวงทางหลวงราชบุรี เป็นพื้นที่ตัวอย่างในการสร้างภาพแบบจำลองสามมิติในการตรวจสอบความเสียหายของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก
2. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบทั้งหมด 53 จุด โดยแบ่ง เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนบนของสะพาน 22 จุด ส่วนข้างของสะพาน 17 จุด และส่วนเสาดม่อ 14 จุด ในการสร้างภาพระนาบออร์โธที่มีประสิทธิภาพ เพื่อใช้ในการสำรวจและตรวจสอบความเสียหายของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก
3. พิจารณาการตรวจสอบสะพานโดยใช้เกณฑ์การจัดลำดับสภาพโครงสร้างสะพานของคู่มือการตรวจสอบสะพานกรมทางหลวง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความสามารถและข้อจำกัดในการตรวจสอบสะพานด้วยตาเปล่าจากประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ
2. ทราบถึงกระบวนการในการหาจำนวนและตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสมการสร้างแบบจำลองสามมิติที่มีความถูกต้องเชิงพิกัดในการตรวจสอบสะพาน
3. สามารถตรวจสอบและเปรียบเทียบของความเสียหายที่ได้รับการตรวจสอบด้วยอากาศยานไร้คนขับกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง
4. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการใช้อากาศยานไร้คนขับตรวจสอบสะพานเป็นแนวทางในการตรวจสอบสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญและแนวทางการตรวจสอบสะพาน

การตรวจสอบสะพานเป็นส่วนหนึ่งของระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการระบุความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพาน ผู้ตรวจสอบต้องมีความรู้และความเข้าใจถึงวิธีการตรวจสอบและพฤติกรรมของสะพาน เนื่องจากการตรวจสอบจำเป็นที่จะต้องใช้เวลา บุคลากร รวมไปถึงเครื่องมือในการตรวจสอบซึ่งในบางครั้งอาจมีจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนการตรวจสอบ โดยการวางแผนการตรวจสอบถือว่าเป็นขั้นตอนแรกในระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพาน ซึ่งในแต่ละหน่วยงานของประเทศไทยมีความแตกต่างกันไม่มากนักขึ้นอยู่กับ ลักษณะทางกายภาพของสะพาน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ปริมาณและลักษณะของการจราจรที่สะพานต้องแบกรับ ความสามารถในการเข้าถึง ตลอดจนข้อจำกัดทางด้านงบประมาณในแต่ละหน่วยงานและบุคลากร เป็นต้น การตรวจสอบสะพานสามารถจำแนกได้ 3 ลักษณะตามความถี่ในการตรวจสอบ [2] ดังนี้

1.การตรวจสอบปกติ (Routine Inspection) เป็นการตรวจสอบตามช่วงระยะเวลาที่กำหนด เช่น การตรวจสอบประจำเดือน หรือการตรวจสอบประจำปี เป็นต้น ไม่จำเป็นต้องใช้บุคลากรที่มีทักษะด้านสะพานสูงมากนักแต่ควรตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ทราบถึงสภาพโครงสร้างของสะพานในแต่ละช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อให้ติดตามซ่อมแซมหากเกิดความเสียหายได้ทันเวลาที่ โดยทั่วไปเป็นการทดสอบกายภาพข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) เป็นส่วนใหญ่

2.การตรวจสอบหลัก (Principle Inspection) เป็นการตรวจสอบแบบละเอียดโดยใช้วิศวกรที่มีทักษะและประสบการณ์สูงขึ้นควรทำการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอในวงรอบที่ยาวกว่าการตรวจสอบปกติ โดยจะทำการเข้าถึงพื้นที่ที่เสียหายเพื่อติดตามและตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นของแต่ละชิ้นส่วนต่าง ๆ

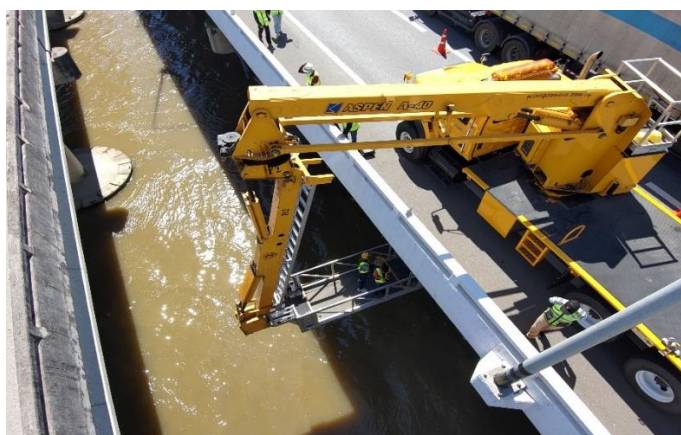
3.การตรวจสอบพิเศษ (Special Inspection) เป็นการตรวจสอบเพิ่มเติมภายหลังที่ ทราบว่าสะพานเกิดความเสียหายขึ้น เป็นการตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดความเสียหาย ติดตามการขยายตัว ของความเสียหาย หรือประเมินความสามารถของสะพานอย่างละเอียด เป็นต้น การตรวจสอบพิเศษใน บางกรณีเป็นวิธีเฉพาะ มีข้อควรระวังและเทคนิควิธีการที่ละเอียดซับซ้อน จำเป็นจะต้องตรวจสอบโดย ผู้เชี่ยวชาญพิเศษเท่านั้น



รูปที่ 1 ระบบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพาน [2]

2.1.1 การตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Visual Inspection)

การตรวจสอบด้วยตาเปลานั้นเป็นวิธีการประเมินขั้นแรกของการตรวจสอบโครงสร้างแต่ถือได้ว่ามีความสำคัญมากที่สุดขั้นตอนหนึ่งก่อนที่จะทำการประเมินเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำยิ่งขึ้น โดยประสิทธิภาพในการตรวจสอบจะขึ้นอยู่กับดุลพินิจความรู้ความสามารถและประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบเพื่อบ่งบอกถึงความเสี่ยงของโครงสร้างโดยภาพรวม [1] อย่างไรก็ตามการตรวจสอบด้วยตาเปล่าสามารถตรวจสอบวัสดุหรือพื้นผิวที่สามารถเข้าถึงและมองเห็นได้ เช่น รอยแตกร้าว การหลุดล่อน คราบสนิม และอื่น ๆ โดยการตรวจสอบด้วยตาเปล่าของสะพานนั้นจะต้องอาศัยกำลังคนในการเข้าถึงหากต้องวัดความเสี่ยงที่เกิดขึ้น เช่น การโรยตัว การไชรถ กระเซา การใช้นั่งร้าน การนั่งเรือ เป็นต้น รวมไปถึงการควบการจราจรเพื่อทำการสำรวจความเสี่ยงของสะพาน [2]



รูปที่ 2 แสดงการตรวจสอบโครงสร้างสะพานโดยใช้รถกระเช้าพิเศษ



รูปที่ 3 แสดงการควบคุมการจราจรบนท้องถนน [2]

2.1.2 การให้คะแนนและประเมินความเสียหายสะพานของกรมทางหลวง พ.ศ.2549

คู่มือ การตรวจสอบ วิเคราะห์และประเมินกำลังรับน้ำหนักของสะพาน (Bridge Inspection Analysis and Evaluation Manual) พ.ศ. 2549 โดยกรมทางหลวง ผลการตรวจสอบของสะพานจะถูกแสดงโดยคะแนนที่ให้ในการตรวจสอบแต่ละชิ้นส่วนของสะพาน ซึ่งประกอบไปด้วย ชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น พื้นสะพาน ตอม่อสะพาน และ ชิ้นส่วนอื่น ๆ ตามที่ต้องการจะตรวจสอบ หลักการให้คะแนนในการตรวจสอบแต่ละชิ้นส่วนของสะพานนั้น มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในบทต่าง ๆ ในคู่มือเล่มนี้ โดยทั่วไปแล้วจะมีการจัดกลุ่มตามลักษณะสภาพของสะพาน โดยให้คะแนนที่ได้จากการสำรวจหลักการทั่วไปในการให้คะแนนการประเมินสภาพของสะพานและ ชิ้นส่วนของสะพานที่ได้รับการตรวจสอบสภาพด้วยตาเปล่า [11]

ตารางที่ 1 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายโครงสร้างสะพานกรมทางหลวง พ.ศ.2549 [11]

ระดับสภาพ	สภาพ	สภาพโครงสร้าง
9	ดีมาก	เหมือนใหม่
7	ดี	มีปัญหาเพียงเล็กน้อย
5	ดีปานกลาง	ชิ้นส่วนบางส่วนมีการชำรุด มีสภาพโดยรวมดี พอใช้
3	ทรุดโทรม	ชิ้นส่วนมีความเสียหายมากและมีผลกระทบต่อโครงสร้างหลัก อาจจำเป็นต้องปิดสะพาน เว้นแต่จะได้รับการ ตรวจสอบโดยละเอียดจนกว่าจะได้รับการแก้ไข

ระดับสภาพ	สภาพ	สภาพโครงสร้าง
1	วิกฤต	ชิ้นส่วนของสะพานได้ชำรุดอย่างสิ้นเชิง สะพานมีการเคลื่อนย้ายจากตำแหน่งเดิมอย่างเห็นได้ชัด ต้องทำการปิดสะพานถ้าได้รับการแก้ไขแล้วอาจเปิดให้ใช้งานเบาๆ ได้
0	วิบัติ	ชิ้นส่วน ไม่อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้เลย มีสภาพพังทลายเกินกว่าจะแก้ไขได้

2.1.3 การให้คะแนนและประเมินความเสียหายสะพานของกรมทางหลวง พ.ศ.2555

คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพาน โครงการศึกษาและพัฒนาระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน พ.ศ.2555 จัดทำโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยในแต่ละชิ้นส่วนของสะพานจะมีเกณฑ์การจัดลำดับและลักษณะความเสียหายที่แตกต่างกัน ผู้ตรวจสอบจะต้องเข้าถึงเพื่อทำการบันทึกภาพแต่ละชิ้นส่วนสะพานเพื่อเก็บไว้เป็นประวัติสภาพการใช้งานเมื่อสะพานมีอายุต่าง ๆ กัน และ ทำการประเมินสภาพชิ้นส่วนแต่ละประเภทของในแต่ละบริเวณ และ จำแนกระดับของการบำรุงรักษา โดยมีเกณฑ์การจัดลำดับสภาพโครงสร้างสะพานของกรมทางหลวงแสดงในตารางที่ 2 นำผลที่ได้มาสรุปผลการใช้งานไม่ว่าจะเป็น โครงสร้างส่วนบน โครงสร้างส่วนล่าง และ ส่วนประกอบรอง และทำการสรุปผลและการบันทึกข้อมูลเพื่อประเมินสภาพโดยรวมปัจจุบัน (Overall Condition Rating: OCR) โดยเลือกคะแนนในส่วนที่น้อยที่สุดที่ส่งผลต่อการใช้งานในการพิจารณาการบำรุงรักษา ซึ่งรูปแบบการเสียหายของโครงสร้างส่วนบน โครงสร้างส่วนล่าง และ ส่วนประกอบรอง [2] ดังนี้

1. โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) ประกอบไปด้วย พื้นสะพาน (Deck) คานตามยาว (Girder) ค้ำยันตามยาว (Diaphragm) และอื่น ๆ ทำหน้าที่ถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกทุกลงสู่ส่วนล่าง โดยสภาพความเสียหายทั่วไปในโครงสร้างส่วนบนที่ควรพิจารณาในเรื่องของรอยแตก (Cracks) หรือการหลุดล่อน (Spalls) ของคอนกรีต การชำรุดเสียหายดังกล่าวนี้ เป็นตัวบ่งชี้ ว่าเกิดความเสียหายของโครงสร้าง และอาจทำให้สิ่งแปลกปลอมไม่ว่าจะเป็นน้ำหรือสิ่งสกปรกสามารถแทรกซึมเข้าไปทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิมได้

2. โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) ประกอบไปด้วย เสาตอม่อ (Pier) ฐานราก (Footing) และ อื่น ๆ ทำหน้าที่ถ่ายเทน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างส่วนบนลงไปสู่พื้นดิน โดยจะมี 2 รูปแบบคือ ตอม่อริมฝั่ง (Abutments) และฐานรองรับระหว่างช่วงความยาวสะพาน (Intermediate Supports)

รูปความเสียหายโดยทั่วไปมีหลายสาเหตุไม่ว่าจะเป็น การเยื้องศูนย์ของเสา และการหลุดล่อนของคอนกรีตเนื่องจากความชื้นพื้นที่โดยรอบเข้าสู่ช่องเปิดรอยต่อต่าง ๆ

3. ส่วนประกอบรอง (Secondary Components) เป็นชิ้นส่วนในการช่วยเสริมในการรับน้ำหนักที่กระทำต่อสะพาน อีกทั้งประโยชน์อื่นในการใช้สอยสะพานของสะพาน ไม่ว่าจะเป็น รอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint) ผิวทาง (Wearing Surface) และ อื่น ๆ โดยความเสียหายที่มักพบเกิดจากการใช้งาน หรือการชน

ตารางที่ 2 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายโครงสร้างสะพานกรมทางหลวง พ.ศ.2555 [2]

ระดับสภาพ	สภาพ	สภาพโครงสร้าง
5	ดีมาก	- สภาพโครงสร้างดีหรือใหม่
4	ดีพอใช้	- สภาพพอใช้ในเกณฑ์ดี - โครงสร้างส่วนที่รับแรงหรือส่วนที่สำคัญมีสภาพอยู่ในเกณฑ์ดี พิจารณาซ่อมบำรุงปกติ - โครงสร้างส่วนที่ไม่รับแรงหรือส่วนที่ไม่สำคัญมีสภาพอยู่ในเกณฑ์พอใช้ พิจารณาซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลา
3	พอใช้	- สภาพพอใช้ที่ต้องพิจารณาซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลา - โครงสร้างส่วนที่รับแรงหรือส่วนที่สำคัญ มีสภาพอยู่ในเกณฑ์พอใช้ พิจารณาซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลา - โครงสร้างส่วนที่ไม่รับแรงหรือส่วนที่ไม่สำคัญมีสภาพอยู่ในเกณฑ์พอใช้ พิจารณาซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลา
2	ชำรุด	- สภาพชำรุดที่ต้องพิจารณาซ่อมแซมหรือการบำรุงพิเศษ - โครงสร้างส่วนที่รับแรงหรือส่วนที่สำคัญ มีสภาพชำรุดที่ต้องพิจารณาซ่อมแซมหรือการบำรุงพิเศษ - โครงสร้างส่วนที่ไม่รับแรงหรือส่วนที่ไม่สำคัญต้องดำเนินการซ่อมแซมให้กลับคืนสู่สภาพเดิม
1	วิกฤต	- สภาพชำรุดที่ต้องพิจารณาซ่อมแซมอย่างเร่งด่วนหรือต้องทำการบูรณะ - โครงสร้างส่วนที่รับแรงหรือส่วนที่สำคัญ มีสภาพชำรุดเสียหายมากที่ต้องดำเนินการ ซ่อมแซมอย่างเร่งด่วนหรือต้องทำการบูรณะ - โครงสร้างส่วนที่ไม่รับแรงหรือส่วนที่ไม่สำคัญต้องดำเนินการซ่อมแซมให้

ระดับสภาพ	สภาพ	สภาพโครงสร้าง
		กลับคืนสู่ สภาพเดิม
0	วิบัติ	- สภาพชำรุดเสียหายมาก ต้องทุบสะพานทิ้งและก่อสร้างใหม่

2.2 ประเภทความเสียหายของสะพาน

โดยชิ้นส่วนของสะพานแต่ละส่วนนั้นจะมีวัสดุที่แตกต่างกัน และมีรูปแบบความเสียหายที่แตกต่างกัน โดยมีลักษณะความเสียหายหลักๆ ดังนี้

2.2.1 การเสื่อมสภาพของสะพานคอนกรีต

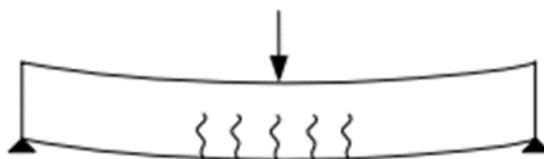
ความเสื่อมสภาพของสะพานคอนกรีต จะมีหลายรูปแบบโดยส่วนใหญ่ลักษณะการเสื่อมสภาพที่ส่งผลต่อการรับน้ำหนักของสะพานมี ดังนี้

2.2.1.1 รอยแตก (Cracking)

สาเหตุการเกิดรอยแตกร้าว แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

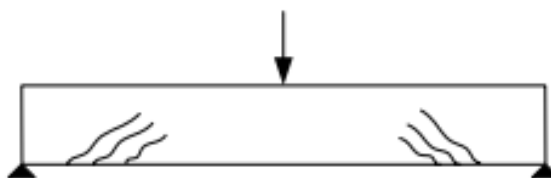
1. รอยแตกเชิงโครงสร้าง (Structural Crack) คือ รอยแตกร้าวจากสาเหตุการเกิดรอยแตกเชิงโครงสร้างเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น การแตกร้าวจากการออกแบบไม่ถูกต้อง การใช้วัสดุก่อสร้างไม่มีคุณภาพและการก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน อีกทั้งรอยแตกเชิงโครงสร้างยังมีสาเหตุมาจาก Stresses ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) และถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

(1) รอยแตกจากการดัด (Flexure Cracks) จะมีลักษณะอยู่ในแนวตั้ง (Vertical) และเริ่มแตกจากบริเวณที่เกิดแรงดึงสูงสุด (Maximum Tension Zone) หรือเกิดโมเมนต์สูงสุด (Maximum Moment Trussing) แล้วแผ่ไปยังส่วนที่เกิดแรงอัด (Compression Zone) ณ จุดกึ่งกลางช่วงของชิ้นส่วน จะพบรอยแตกจากการดัดได้ที่ด้านล่างของชิ้นส่วนซึ่งเป็นส่วนถูกดัด หรือ มี Flexure Stresses สูงสุด ถ้าเป็น Continuous Member ก็ให้ตรวจสอบด้านบนของ Members ที่อยู่ด้านบนของ Pier



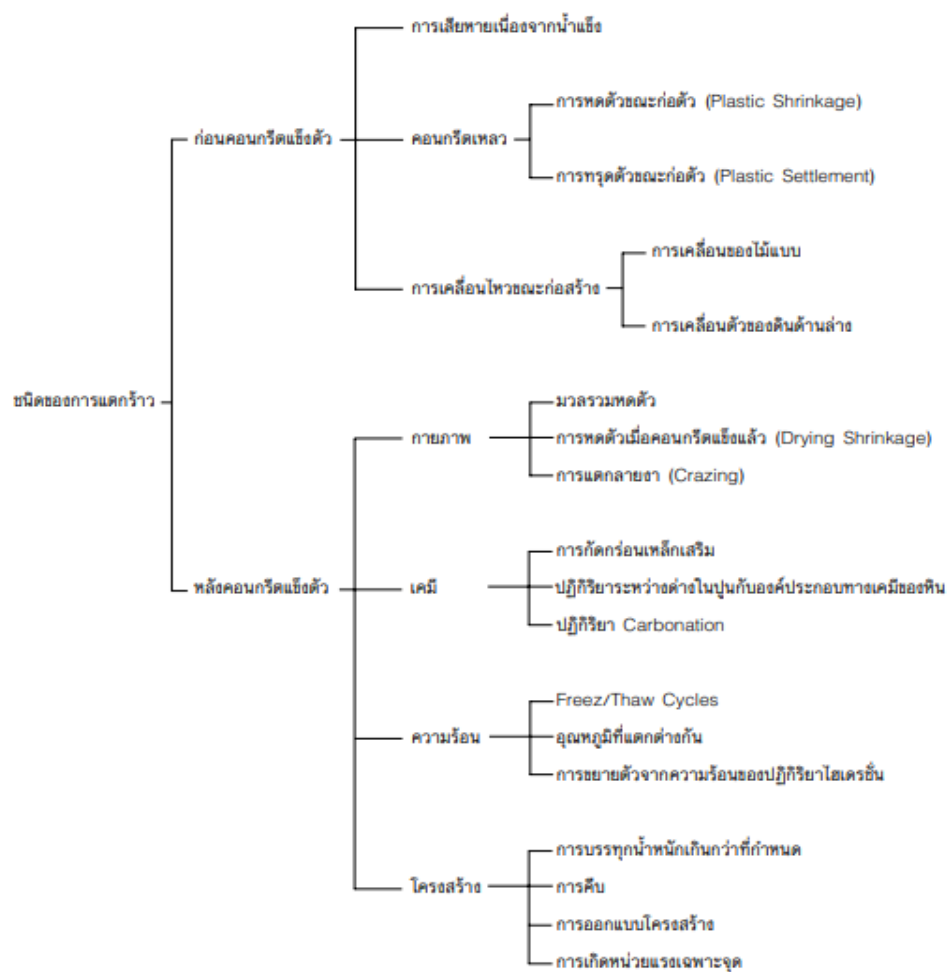
รูปที่ 4 รอยแตกจากการดัด (Flexure Cracks) [11]

(2) รอยแตกจากการเฉือน (Shear Cracks) เป็นรอยแตกในแนวเฉียง ที่มักจะเกิดขึ้นที่เอวคาน (Web) โดยปกติแล้วจะพบรอยแตกนี้ ได้ที่บริเวณใกล้กับ แผ่นรองสะพาน (Bearing) และรอยแตกจะเริ่มที่ด้านล่างของ Member นั้นและขยายต่อในแนวเฉียง ไปยังด้านบนของ Member

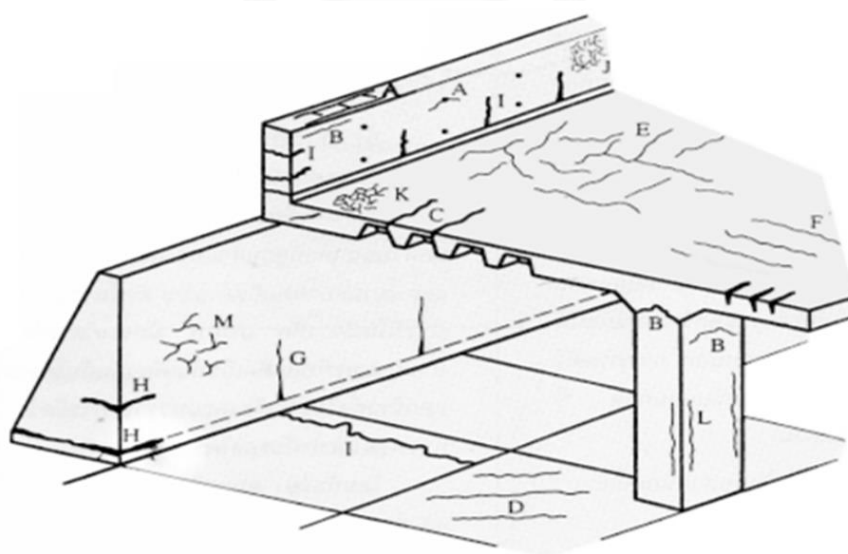


รูปที่ 5 รอยแตกจากการเฉือน (Shear Cracks) [11]

2. รอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกเชิงโครงสร้าง (Non-Structural Crack) คือ ชนิดของการแตกร้าวประเภทนี้มักจะมีขนาดเล็กและไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของชิ้นส่วน แต่อย่างไรก็ตามรอยแตกเหล่านี้จะเป็นช่องทางให้น้ำหรือสิ่งสกปรกอื่น ๆ เข้าไปได้ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาที่ร้ายแรงในภายภาคหน้าได้ โดยรอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกเชิงโครงสร้างอาจเกิดจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น รอยแตกเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature Cracks) รอยแตกเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage Cracks) การหดตัวของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งรอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกเชิงโครงสร้างสามารถจำแนกตามเวลาที่เกิดโดยสรุปไว้ได้ดังรูปที่ 6 แสดงให้เห็นภาพรวมดังรูปที่ 7 และ ตารางที่ 3



รูปที่ 6 ชนิดของการแตกร้าว ประเภท Non Structural Crack [12]



รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างของลักษณะรอยร้าวไม่เชิงโครงสร้าง (Non-structural Cracks) [13]

ตารางที่ 3 สรุปปัญหาและสาเหตุการเกิดรอยแตกร้าวไม่เชิงโครงสร้าง (Non-structural Cracks)

[13]

ชนิดของการแตกร้าว	ตำแหน่ง	บริเวณที่พบบ่อย ๆ	สาเหตุหลัก	สาเหตุรอง	แนวทางการแก้ไข	เวลาที่เกิด
รอยแตกเนื่องจาก การทรุดตัวถาวร (Plastic Settlement)	A	เกิดบริเวณส่วนลึก ของหน้าตัด	น้ำส่วนเกิน เช่น Bleeding	แห้งเร็วไป	ลด Bleeding	10 นาที ถึง 3 ชั่วโมง
	B	ด้านบนของเสา				
	C	Trough and waffle slaps				
รอยแตกที่เกิดจาก การหดตัว (Plastic Shrinkage)	D	ถนนและพื้น	แห้งอย่างรวดเร็ว	การ Bleeding เกิดซ้ำ	ปรับปรุงวิธีการบ่ม ช่วงต้น ๆ	30 นาที ถึง 6 ชั่วโมง
	E	พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก				
	F	พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก				
รอยแตกที่เกิดจากความร้อนภายในเนื้อคอนกรีต (Early Thermal Contraction)	G	กำแพงหนาๆ	ความร้อนมากเกินไป	การลดอุณหภูมิ อย่างรวดเร็ว	ลดความร้อนหรือ ป้องกัน ความร้อน สูญไป	1 ถึง 2 วัน หรือ 3 สัปดาห์
	H	พื้นหนาๆ	อุณหภูมิแตกต่างกัน			
รอยแตกเนื่องจาก การหดตัว (Long-term Drying)	I	พื้นและกำแพง หนาๆ	แนวตอมืด	การหดตัวมากบ่มไม่ดี	ลดน้ำ ปรับปรุงวิธีบ่ม	ใช้เวลาหลาย สัปดาห์ หรือ เป็น เดือน
รอยแตกแบบ ร้าวแห (Crazing)	J	Fair Faced concrete	ไม่แบบไม่เหมาะสม	ใช้ปูนมากไป	ปรับปรุงวิธีการบ่ม	1 ถึง 7 วัน หรือ

ชนิดของการ แตกร้าว	ตำแหน่ง	บริเวณที่พบบ่อย ๆ	สาเหตุ หลัก	สาเหตุ รอง	แนว ทางแก้ไข	เวลาที่เกิด
	K	พื้น	ปาด แต่งหน้า มาก เกินไป	บ่มไม่ดี	และการ แต่งผิว	มากกว่า
รอยแตก เนื่องจาก เหล็ก เสริมถูกกัด กร่อน (Corrosion of Reinforcement)	L	เสาและคาน	ระยะหุ้ม น้อย	คอนกรีต คุณภาพ ต่ำ	ขจัด ต้นเหตุ	มากกว่า 2 ปี
	M	คอนกรีต สำเร็จรูป	มีเกลือ คลอไรด์ มากเกินไป			
Alkali Aggregate Reaction	N	ที่เปียกชื้น	ใช้หินทำปฏิกิริยาหรือ ปูนที่เป็นต่างมาก เกินไป		ขจัด ต้นเหตุ	มากกว่า 5 ปี

อย่างไรก็ตามลักษณะรอยร้าวของสะพานคอนกรีตไม่ว่าจะเป็นตำแหน่ง และทิศทางของรอยร้าว เป็นตัวบ่งบอกสภาพปัจจุบันของสะพานโดยต้องใช้วิศวกรหรือผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบ โดยผู้ตรวจสอบต้องบันทึกข้อมูลรอยแตกทุกรอยที่สามารถมองเห็นได้ไม่ว่าจะเป็น ความกว้างของรอยแตก ความยาวของรอยแตก และตำแหน่งของรอยแตก เป็นต้น โดยสามารถจำแนกขนาดความกว้างรอยร้าวได้ดังตารางที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4 ระดับความเสียหายของโครงสร้างสะพานคอนกรีตจำแนกตามความกว้างรอยร้าว [2]

ระดับความ เสียหาย	ลักษณะความเสียหาย	ความกว้างของรอย แตกร้าว
ไม่เสียหาย	รอยร้าวขนาดเส้นผม (Hairline Crack) อยู่ในเกณฑ์ดีพอใช้ พิจารณาการซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลา	< 1.6 mm
ขนาดเล็ก	รอยแตกขนาดเล็กไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานของโครงสร้าง อยู่ในเกณฑ์พอใช้ พิจารณาการซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลา	1.6-3.2 mm
ขนาดกลาง	รอยแตกเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม อยู่ในเกณฑ์ชำรุด ในส่วนของโครงสร้างส่วนรับแรงพิจารณาการซ่อมแซมหรือบำรุงพิเศษ และ ในส่วนของชิ้นส่วนที่ไม่ได้รับแรงต้องดำเนินการซ่อมแซมให้กลับคืนสู่สภาพเดิม	3.2-4.8 mm

ระดับความเสียหาย	ลักษณะความเสียหาย	ความกว้างของรอยแตก
ขนาดใหญ่	รอยแตกขนาดใหญ่เนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม อยู่ในเกณฑ์วิกฤต ในส่วนของโครงสร้างส่วนรับแรงพิจารณาการซ่อมแซมอย่างเร่งด่วนหรือต้องทำการบูรณะ และในส่วนของชั้นส่วนที่ไม่ได้รับแรงต้องดำเนินการซ่อมแซมให้กลับคืนสู่สภาพเดิม	> 4.8 mm

2.2.1.2 การหลุดล่อน (Spalling)

การหลุดล่อนของคอนกรีตบริเวณผิวโครงสร้าง สาเหตุเกิดจากการที่เหล็กเสริมเป็นสนิมหรือการเกิดแรงเสียดทานจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน โดยส่วนใหญ่แล้วเมื่อมีคอนกรีตเกิดการหลุดล่อน อาจเห็นเหล็กเสริมได้ ผู้ตรวจสอบต้องระบุตำแหน่งของรอบชำรุด รวมไปถึงขนาดของพื้นที่ที่เสียหาย โดยระดับความเสียหายของการหลุดล่อนของคอนกรีตสามารถแยกระดับได้ [2] ดังนี้

ตารางที่ 5 เกณฑ์การประเมินผลของการหลุดล่อนของโครงสร้างสะพานคอนกรีต [14]

ระดับความเสียหาย	ความลึกและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของการหลุดล่อน
ปกติ	สภาพดี ไม่มีความเสียหาย
พอใช้	ความลึกการหลุดล่อนน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 150 มิลลิเมตร
ชำรุด	ความลึกการหลุดล่อนมากกว่า 25 มิลลิเมตร หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 150 มิลลิเมตร
วิกฤต	เกิดความเสียหายในระดับเกินกว่าระดับชำรุด จึงจำเป็นต้องตรวจสอบความสามารถในการใช้งาน หรือ ความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นส่วนหรือโครงสร้างโดยรวม

2.2.2 การเสื่อมสภาพของผิวทางแอสฟัลต์ (Wearing Surface)

สาเหตุการเกิดความเสียหายกับผิวทางแอสฟัลต์ ที่มักพบคือ การใช้วัสดุหรือการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ที่ไม่ได้มาตรฐาน และความเสียหายที่เกิดจากการใช้งาน อีกทั้งการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว โดยสามารถแบ่งรอยแตกของผิวทางแอสฟัลต์ได้ 8 รูปแบบ [15] ดังนี้

1. รอยแตกหนังจระเข้ (Alligator Crack)
2. รอยแตกตามขอบ (Edge Crack)
3. รอยแตกสะท้อน (Reflection Crack)

4. รอยแตกเป็นตาราง หรือรอยแตกจากการหดตัว (Block Crack or Shrinkage Crack)
5. รอยแตกเลื่อนไถล (Slippage Crack)
6. รอยแตกตรงขอบรอยต่อ (Edge Joint Crack)
7. รอยแตกระหว่างช่องจราจร (Lane Joint Crack)
8. รอยแตกการขยายคันทาง (Widening Crack)

โดยผู้ตรวจสอบจะต้องทำการวัดปริมาณความเสียหายให้ครอบคลุมพื้นที่ที่เสียหาย ไม่ว่าจะเป็น ความยาว(เมตร) ความกว้างของรอยร้าว และ ระดับความเสียหาย ซึ่งระดับความเสียหายของรอยแตกมี 3 ระดับแสดงในตารางที่ 6 อีกทั้งระบุเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของพื้นที่ที่เสียหายต่อพื้นที่ที่สำรวจเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ความเสียหายต่อพื้นที่ที่สำรวจแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ระดับความเสียหายเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์จำแนกตามความกว้างของรอยร้าว [15]

ระดับความเสียหาย	ความกว้างของรอยร้าว
เล็กน้อย	รอยแตกที่มีความกว้างไม่เกิน 3 มิลลิเมตร หรือมีรอยบิ่นกระเทาะกว้างไม่เกิน 6 มิลลิเมตร
ปานกลาง	รอยแตกที่มีความกว้างระหว่าง 3-6 มิลลิเมตร หรือมีรอยบิ่นกระเทาะกว้างไม่เกิน 19 มิลลิเมตร
สูง	รอยแตกที่มีความกว้างระหว่าง 6 มิลลิเมตร หรือมีรอยบิ่นกระเทาะกว้างมากกว่า 19 มิลลิเมตร

ตารางที่ 7 เปอร์เซนต์ความเสียหายของพื้นที่หน้าตัดผิวทางแอสฟัลต์ [2]

ระดับความเสียหาย	เปอร์เซนต์ความเสียหายของพื้นที่หน้าตัด
ปกติ	สภาพดี ไม่มีความเสียหาย
พอใช้	สภาพพอใช้ มีความเสียหายน้อยกว่าร้อยละ 20 ของพื้นที่ผิว
ชำรุด	สภาพชำรุด มีความเสียหายระหว่างร้อยละ 20-50 ของพื้นที่ผิว
วิกฤต	สภาพชำรุด มีความเสียหายมากกว่าร้อยละ 50 ของพื้นที่ผิว

2.2.3 การเสื่อมสภาพของรอยต่อเพื่อขยาย (Expansion Joint)

รอยต่อเพื่อขยายมีหน้าที่รองรับการยืดและหดตัวของพื้น อีกทั้งยังเป็นตัวปิดช่องว่างระหว่างส่วนพื้นกับกำแพงตอม่อ รวมไปถึงความสามารถในการป้องกันน้ำ เศษขยะและฝุ่นละออง ง่ายต่อการทำความสะอาดบำรุงรักษา และยังช่วยให้พาหนะขับเคลื่อนได้อย่างนุ่มนวลระหว่างข้อต่อ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนขยายตัวคือ การยืดหดตัวของคอนกรีต (Concrete Shrinkage) การคืบ (Creep) และ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal Effect) โดยในการตรวจสอบรอยต่อเพื่อขยายผู้

ตรวจสอบต้องทำการบันทึกความกว้างของรอยต่อที่เหมาะสม อีกทั้งบันทึกอุณหภูมิในช่วงเวลาที่ตรวจ โดยการจำแนกชนิดของรอยต่อเพื่อการขยายจากระยะการเคลื่อนขยายตัวสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท [16] ดังนี้

1. รอยต่อสำหรับการเคลื่อนขยายตัวเล็กน้อย (Small Movement Joint) รอยต่อสำหรับการเคลื่อน ขยายตัวน้อยกว่า 50 มิลลิเมตร ซึ่งรอยต่อที่เป็นที่นิยมใช้งานคือ การซีลยางปิดร่องรอยต่อพื้นทาง (Elastomeric Compression Seals) เป็นต้น

2. รอยต่อสำหรับการเคลื่อนขยายตัวขนาดปานกลาง (Medium Movement Joint) รอยต่อสำหรับการเคลื่อน ขยายตัวอยู่ระหว่าง 50 - 130 มิลลิเมตร ซึ่งรอยต่อที่นิยมใช้งานคือ รอยต่อแบบรางโลหะซีลปิดร่องรอยต่อพื้นทางด้วยแถบยาง (Strip Seal Joint) เป็นต้น

3. รอยต่อสำหรับการเคลื่อนขยายตัวขนาดใหญ่ (Large Movement Joint) รอยต่อสำหรับการเคลื่อนขยายตัวมากกว่า 130 มิลลิเมตร ซึ่งรอยต่อประเภทนี้ที่นิยมใช้งานคือ รอยต่อแบบแผ่นเหล็กฟันปลา (Steel Finger Joint) และรอยต่อแบบคานเหล็ก แยกส่วน (Modular Joint) เป็นต้น

2.3 กล้องถ่ายภาพดิจิทัลสำหรับงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ

กล้องถ่ายภาพดิจิทัลสำหรับติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในการสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศ โดยในปัจจุบันกล้องดิจิทัลมีให้เลือกใช้หลากหลาย โดยเทคโนโลยีในปัจจุบันภาพถ่ายที่มีคุณภาพเพียงพอต่อการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งการศึกษาข้อมูลจำเพาะที่จำเป็นต่อการถ่ายภาพทางอากาศจึงเป็นส่วนที่จำเป็นในการเลือกใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัล เนื่องจากกล้องดิจิทัลมีผลโดยตรงต่อความถูกต้องเชิงตำแหน่งของการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ ไม่ว่าจะเป็น ประเภทของเซ็นเซอร์ ชนิดของเลนส์ ขนาดของ เซนเซอร์ เป็นต้น ดังนั้นในมาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรมมาตรฐานจะแบ่งประเภทกล้องดิจิทัลตามความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูล สามารถแบ่งประเภทของกล้องดิจิทัลแต่ละประเภทจะเป็นไปดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ชนิดของกล้องดิจิทัลที่ใช้สำหรับการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ [9]

ประเภทของกล้อง ถ่ายภาพ	ประเภทของชัตเตอร์	ชนิดของเลนส์	ขนาด ของ เซนเซอร์	ค่าความ ละเอียดของ ภาพถ่าย	การรังวัด พิกัด ภาพถ่าย
Consumer grade	Rolling Shutter	N/A	< 1"	< 16 MP	DGPS
Professional grade	global Shutter	Prime Lens	≥ 1"	≥ 16 MP	DGPS
Survey grade	global Shutter	Prime Lens	≥ 1"	≥ 16 MP	PPK/RTK

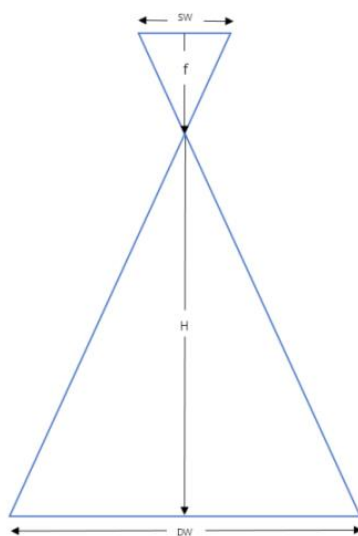
2.4 การวางแผนการบิน (Flight Planning)

การวางแผนการบินเพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการตรวจสอบสะพาน คำนี้ถึงความละเอียดและความถูกต้องของข้อมูลที่ต้องการ หากความสูงในการบินต่ำความละเอียดจุดก็จะสูง ทำให้จำนวนภาพที่ถ่ายและระยะเวลาในการบินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งต้องทำการกำหนดความสูงที่เหมาะสมกับความละเอียดที่ต้องการสำหรับการตรวจสอบสะพาน อีกทั้งการกำหนดส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนเกย (Sidelap) เพื่อที่จะไม่ให้เกิดช่องโหว่ระหว่างการบินและครอบคลุมพื้นที่ทับซ้อนในการจับคู่รูปภาพในการประมวลผลสร้างแบบจำลองสามมิติ โดยรูปแบบและรายละเอียดการคำนวณแสดงดังนี้

1. ค่าความละเอียดจุด (Ground Sample Distance: GSD) คือระยะที่บอกขนาดของตัวอย่างบนพื้นดินคิดที่ 1 จุดภาพ (pixel) เช่น GSD เท่ากับ 5 ซม. หมายถึงว่าขนาดจุดภาพหนึ่งพิกเซลมีขนาดเท่ากับ 5 ซม. บนพื้นดิน สามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$GSD = (\text{pixel size}/\text{Focal length}) * \text{Distance to Object} \quad (1)$$

2. ความสูงในการบินในระดับที่ต่ำจะได้ความละเอียดของภาพถ่ายสูง โดยข้อมูลเชิงตำแหน่งที่ได้จะมีความถูกต้องมากขึ้น แต่ต้องใช้เวลาบินนานขึ้นเพื่อให้ได้ภาพที่มีส่วนซ้อนและส่วนเกยเท่าเดิม ทำให้จำนวนภาพที่ถ่ายเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการประมวลผล สามารถคำนวณได้ดังสมการนี้



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการคำนวณ [17]

$$H = (GSD \times f \times IW) / (SW \times 100) \quad (2)$$

เมื่อ H (Flight Height) คือ ความสูงการบินเหนือจุดขึ้นบิน หน่วยเมตร

GSD (Ground Sample Distance) คือ ระยะพื้นที่ต่อพิกเซลหน่วย เซนติเมตรต่อพิกเซล

SW (Sensor Width) คือ ระยะด้านกว้างของเซนเซอร์ หน่วยมิลลิเมตร

f (Focal Length) คือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์หน่วยมิลลิเมตร

IW (Image Width) คือ จำนวนพิกเซลด้านกว้างหน่วยพิกเซล

จากสมการที่ 1 สามารถหาระยะพื้นที่จริงจากภาพถ่ายหนึ่งใบได้จากสมการ

$$DW = (GSD \times IW) / 100 \quad (3)$$

เมื่อ DW (Distance Width) คือ ระยะพื้นที่ต่อหนึ่งภาพหน่วยเมตร

GSD (Ground Sample Distance) คือ ระยะพื้นที่ต่อพิกเซลหน่วยเซนติเมตรต่อพิกเซล

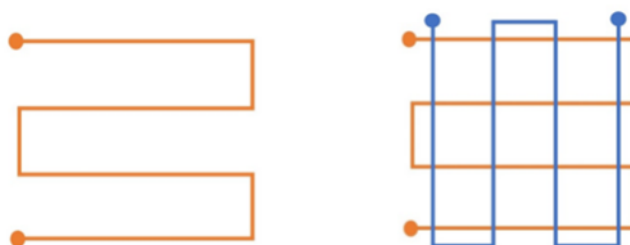
IW (Image Width)

คือ จำนวนพิกเซลด้านกว้างหน่วย

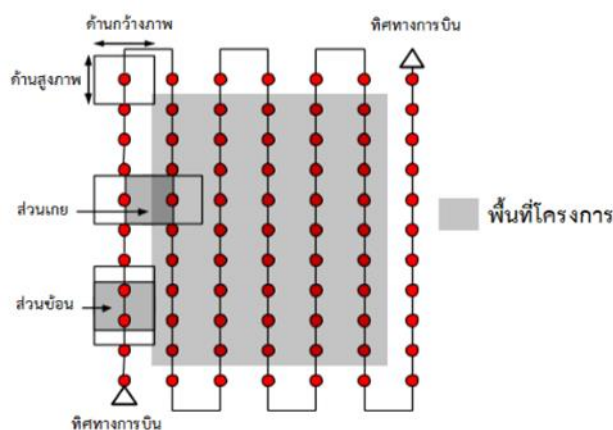
พิกเซล

3. อีกทั้งการกำหนดส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนเกย (Sidelap) เพื่อที่จะไม่ให้เกิดช่องโหว่ระหว่างการบินและครอบคลุมพื้นที่ที่ทับซ้อนในการจับคู่รูปภาพในการประมวลผลสร้างแบบจำลองสามมิติ โดยมาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม ระบุไว้ว่า “จะต้องกำหนดส่วนซ้อนและส่วนเกยไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 และ 60 ตามลำดับ”

4. โดยรูปแบบการบินเป็นอีกหนึ่งปัจจัยในการวางแผนการบินเพื่อโครงข่ายมีความแข็งแรงและลดจำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย โดยทั่วไปจะกำหนดให้บินถ่ายในลักษณะบล็อกสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยสามารถเลือกรูปแบบการบินได้ 2 แบบคือ รูปแบบการบินแบบทั่วไปและรูปแบบการบินแบบกริด



รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างรูปแบบการบินแบบทั่วไปและรูปแบบการบินแบบกริดตามลำดับ [9]



รูปที่ 10 รูปแบบการบินแบบทั่วไป และการกำหนดส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนเกย (Sidelap)

2.5 จุดควบคุมภาพถ่าย (Ground control point)

จุดควบคุมภาพถ่ายมีความสำคัญต่อคุณภาพเชิงตำแหน่งใช้สำหรับการตรึงภาพถ่ายหรือตัดแก้ภาพถ่ายให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น คำนวณค่าองค์ประกอบภายนอกของภาพและค่าการวางตัวของภาพถ่าย ซึ่งต้องมีลักษณะเห็นได้เด่นชัดบนภาพ มีการกระจายตัวอย่างที่เพียงพอครอบคลุมบริเวณที่ตรวจสอบ อีกทั้งตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาพถ่ายต้องเป็นไปตามการแบ่งประเภทกล้องถ่ายภาพและความถูกต้องเชิงตำแหน่งของพิกัดจุดถ่ายภาพ ซึ่งตำแหน่งและความถูกต้องของพิกัดจุดควบคุมภาพถ่ายระบบนำทางด้วยดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite System) โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณเพื่อแสดงผลหรือพิกัดตำแหน่งที่ตัวรับสัญญาณตั้งอยู่ ซึ่ง GPS (Global positioning system) เป็นระบบหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาของ GNSS โดยค่าพิกัดในระบบพิกัดภูมิประเทศเป็นศูนย์กลางที่ทำให้สามารถจัดภาพให้มีความสัมพันธ์อ้างอิงกับพื้นภูมิประเทศ [19] แบ่งออกเป็น

1. จุดควบคุมทางราบ (Horizontal Control Point) ระบบพิกัดอ้างอิงในระบบพิกัดภูมิประเทศ พิกัดทางราบ ได้แก่ ระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ละติจูด, ลองจิจูด (ϕ, λ) และระบบพิกัดกริด UTM Easting, Northing (N, E)

2. จุดควบคุมทางตั้ง (Vertical Control Point) ระบบพิกัดอ้างอิง ในระบบพิกัดภูมิประเทศ พิกัดทางตั้ง ได้แก่ ระดับสูงเหนือพื้นอ้างอิง เช่น ระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level: MSL) เป็นต้น

2.5.1 หลักการคำนวณหาค่าระดับจากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณ GPS

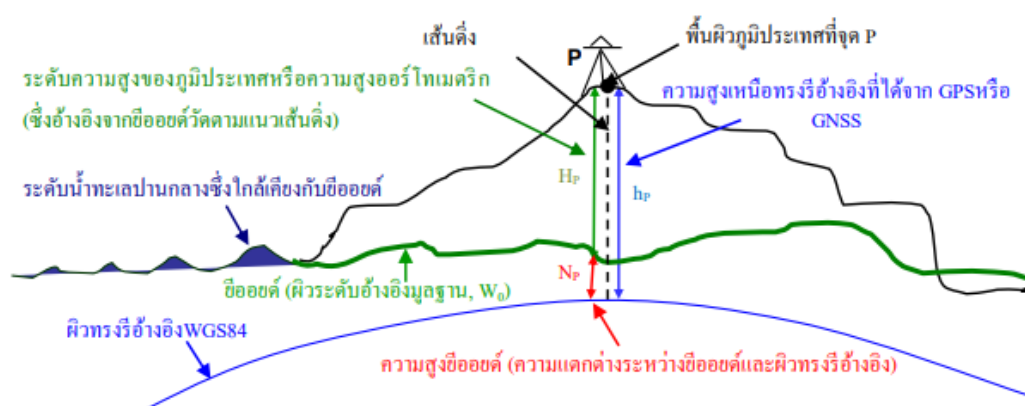
ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการหาค่าระดับจากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS คือ ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง หรือความสูงออร์โทเมตริก ซึ่งต้องทราบค่าความต่างระหว่างพื้นผิวทรีและพื้นผิวอีลอยด์ (Geoid-ellipsoid separation: N) แสดงออกมาเป็นสมการที่ 4 จากสมการข้างต้นจะพบว่าค่าความถูกต้องของค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลางหรือความสูงออร์โทเมตริกจะขึ้นอยู่กับค่าความถูกต้องของค่าความสูงเหนือทรีที่ได้จากงานรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณ GPS และค่าความถูกต้องของการหาค่า N มีความถูกต้องในการหาค่าความสูงเหนือทรีในระดับ 1-2 ppm. ทั้งนี้ในการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในการทำงานรังวัดระดับของประเทศไทย จำเป็นต้องใช้แบบจำลองอีลอยด์ของพิภพภาคพื้นดิน (Global geoid model) เข้ามาเป็นตัวช่วยในการทำงาน ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยมีการนำแบบจำลอง อีลอยด์ของพิภพภาคพื้นดิน (Global geoid model) มาใช้ในงานรังวัดระดับคือ EGM 1996, EGM2008 และ TGM2017 โดยให้ค่าความถูกต้องอยู่ในระดับเซนติเมตร [20]

$$H_p = h_p - N_p \quad (4)$$

โดยที่ H_p คือความสูงออร์โทเมตริก (Orthometric Height)

h_p คือความสูงเหนือทรงรีอ้างอิง (Ellipsoidal Height)

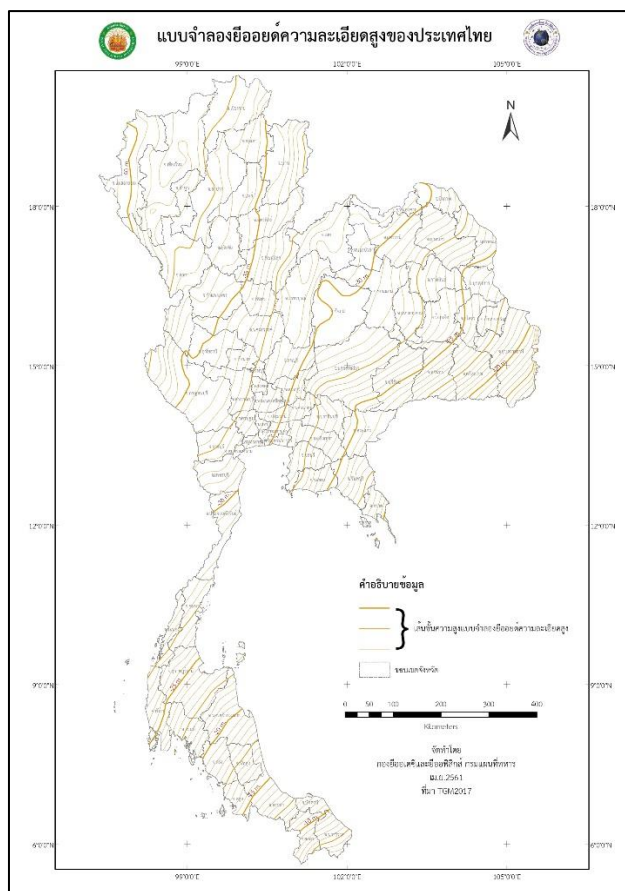
N_p คือ ความสูงยิอออยด์ (Geoid Height) หรือ ค่าความแตกต่างระหว่างพื้นผิวยิอออยด์และพื้นผิวทรงรีตามแนวเส้นดิ่งที่พุ่งผ่านจุด P



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือทรงรี และความสูงออร์โทเมตริก [21]

2.5.2 TGM2017 (Thailand Geoid Model 2017)

TGM2017 (Thailand Geoid Model 2017) เป็นแบบจำลองยิอออยด์ ท้องถิ่นความละเอียดสูงที่อ้างอิงผิวระดับบริเวณประเทศไทย ถูกพัฒนาโดยกรมแผนที่ทหารร่วมกับมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยปรับปรุงการคำนวณจาก EGM2008 โดยในการพัฒนาระยะแรกมีชื่อแบบจำลองว่า THAI12H ที่มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง ± 50 ซม. ต่อมาได้มีการปรับปรุงแบบจำลอง และได้เผยแพร่แบบจำลองยิอออยด์ ล่าสุดในปี 2017 ชื่อว่า TGM17 โดยปรับปรุงจากการคำนวณ EGM2008 ร่วมกับค่าความสูงยิอออยด์จากหอดูดาว GPS และ หอดูดาวจำนวน 206 สถานีของกรมแผนที่ทหาร และแบบจำลองชนิดความโน้มถ่วงพิภพ CMU0701 จากการวัดภาคพื้นดิน 3,947 สถานี ความละเอียดของกริดมีขนาด $3'' \times 3''$ หรือประมาณ 90ม. x 90ม. แสดงในรูปที่ 12 ซึ่งแบบจำลองความละเอียดสูง TGM 2017 ให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งโดยปกติที่ 10 ซม. ในพื้นที่ทั่วไป และให้ 2-5 ซม. ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล [21]



รูปที่ 12 Thailand Geoid Model 2017 (TGM2017) [21]

2.6 การรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real-time kinematic survey: RTK)

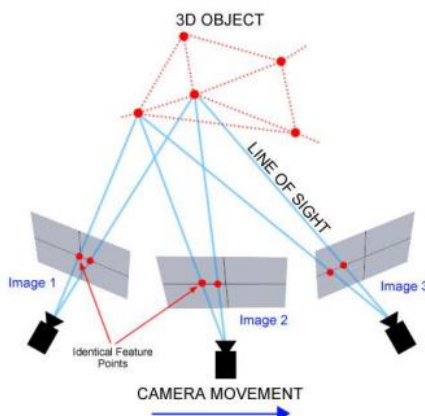
การรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real-time kinematic survey: RTK) เป็นวิธีการความคล้อยคลึงกับวิธีการรังวัดแบบจลน์ (Kinematic survey) คือวิธีการหาตำแหน่งในขณะที่เครื่องรับสัญญาณเคลื่อนที่ เป็นวิธีการที่ทำให้หาตำแหน่งของจุดจำนวนมากได้อย่างรวดเร็วโดยมีความถูกต้องอยู่ระดับเซนติเมตรจำกัดในการรังวัดแบบจลน์อยู่กับการปฏิบัติที่ยุ่งยากและลำบากต่อการทำงาน โดยระยะเส้นฐานที่น่าเชื่อถือจะอยู่ที่ 10 ถึง 15 กิโลเมตร โดย RTK มีข้อดีในการรังวัดที่รวดเร็วแต่มีข้อจำกัดในเรื่องความถูกต้องแม่นยำ โดยจะลดลงเมื่อระยะเส้นฐานระหว่างสถานีฐานกับสถานีผู้ใช้เพิ่มมากขึ้น ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งจะถูกวางไว้ในตำแหน่งที่รู้ค่าแน่นอนตลอดเวลาเป็นสถานีหลัก (Base station) ส่วนเครื่องรับที่สองคือสถานีเคลื่อนที่ (Rover station) ทั้งสองสถานีจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง ความถูกต้องที่ได้จะอยู่ในระดับ 1 ถึง 5 เซนติเมตร สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร [22]

2.7 การประมวลผลรูปถ่าย

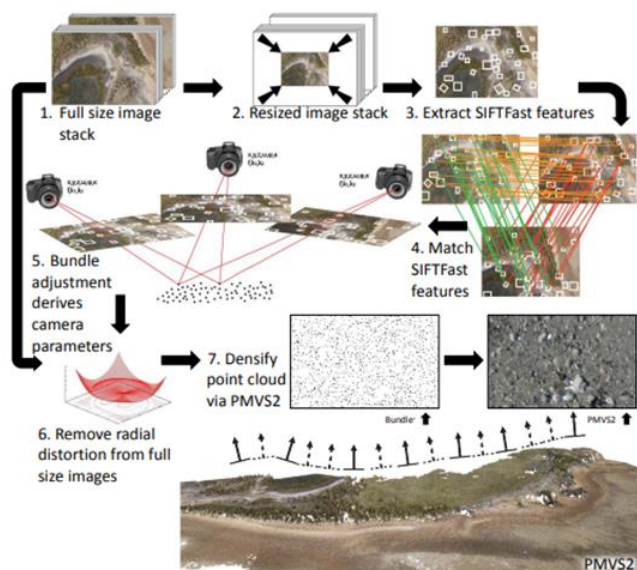
การประมวลผลภาพถ่ายที่ได้จากกาสำรวจจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อให้ได้แบบจำลองสามมิติตลอดจนการสร้างภาพออร์โธที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น มีกระบวนการดังนี้

2.7.1 การสร้างแบบจำลองสามมิติแบบจุดเมฆ (Structure from motion: SFM)

กระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายหลายภาพที่ทับซ้อนกัน โดยอาศัยข้อมูลภาพถ่ายในหลาย มุมมองจำนวนมาก ซึ่งคือการติดตามจุดบนภาพในตำแหน่งที่แตกต่างกันของจุดนั้นในแต่ละภาพ (Multi-view stereo) ซึ่งจะสร้างเป็นกลุ่มจุด (Point cloud) เพื่อบอกตำแหน่งของวัตถุขึ้นมา โดยภาพถ่ายที่ได้ของอากาศยานไร้คนขับนั้นจะมีจุดเด่นของภาพ หรือ Key point คือจุดที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่าย ซึ่งข้อมูลจุดที่ได้นี้จะเป็ข้อมูลจุดสำคัญ จะแสดงถึงลักษณะเฉพาะของข้อมูล เช่น สี รูปร่างของข้อมูล เป็นต้น โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในการหา Key point ที่ใช้ส่วนใหญ่ คือ Scale Invariant Feature Transform หรือ SIFT [23] ใช้ในการจับคู่ภาพถ่ายอัตโนมัติเพื่อสร้าง Tie Points และการโยงยึดค่าพิกัดด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย โดยจุดโยงยึด (Tie point) ใช้สำหรับเชื่อมจุดภาพ แล้วไปสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation, AT) อัตโนมัติเพื่อคำนวณหาค่าองค์ประกอบการจัดเรียงภายนอกของภาพ (Exterior Orientation : EO) ซึ่งในปัจจุบันการประมวลผลโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจะใช้วิธีการคำนวณปรับแก้ของบล็อกแบบลำแสง (Bundle Block Adjustment) เพื่อสร้าง Tie points โดย Bundle Block Adjustment เป็นวิธีคำนวณหาค่าองค์ประกอบที่ไม่ทราบค่าโดยค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ได้แก่ พารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกของภาพถ่ายทุกภาพในบล็อก และ ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดโยงยึดผลลัพธ์ที่ได้จะออกเป็นแบบจำลองจุดก้อนเมฆสามมิติ (3D Point Cloud) [9]



รูปที่ 13 การสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายหลายมุมมอง [24]



รูปที่ 14 กระบวนการสร้างแบบจำลองจุดก้อนเมฆสามมิติ (3D Point Cloud) [23]

2.7.2 การสร้างออร์โธ (Orthophoto)

การนำภาพมาประมวลผลแก้ไขและขจัดความผิดเพี้ยนทางลักษณะเรขาคณิตของวัตถุทั้งหมด โดยใช้ Surface model ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลของวัตถุที่อยู่เหนือพื้นดิน หรือ DSM (Digital Surface Model) ซึ่งภาพ True Orthophoto สามารถนำไปใช้งานในด้านวิศวกรรม ตั้งแต่การนำไปผลิตแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ หรือการนำไปใช้เพื่อผลิตแผนที่ภูมิประเทศ ดังนั้นภาพ True Orthophoto จะต้องมีความคมชัด และไม่ผิดปกติกินกว่าการนำไปใช้งาน [25] โดยการสร้างภาพออร์โธ อาศัยภาพถ่ายดิจิทัลพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายใน และพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกของภาพในการคำนวณค่าพิกัดบนภาพถ่ายโดยใช้สมการร่วมเส้นและทำการคำนวณย้อนรอบรังสี การหาค่าพิกัดภาพถ่ายดิจิทัล ค่าความสว่างของจุดภาพ และการเกิดจุดภาพที่แก้ไขความคลาดเคลื่อน โดยทำการคำนวณวนซ้ำจนครบทุกจุดภาพบนภาคพื้นดินที่ต้องการ เพื่อให้ได้ภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธ [26]



รูปที่ 15 ภาพตัวอย่างเปรียบเทียบ Orthophoto กับ True Orthophoto [25]

2.8 การตรวจสอบความถูกต้องของภาพออร์โธ

ในกรณีที่พื้นที่โครงการมีขนาดใหญ่ควรทำการตรวจสอบคุณภาพด้วยจุดตรวจสอบเพิ่มเติม โดยจุดตรวจสอบต้องมีความถูกต้องเชิงตำแหน่งเท่ากับจุดควบคุมภาพถ่าย โดยไม่นำจุดตรวจสอบไปใช้ในการประมวลผลร่วมกับจุดควบคุมภาพถ่าย โดยในการตรวจสอบความถูกต้องของภาพออร์โธเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหายของสะพานจำเป็นต้องทราบความถูกต้องของภาพออร์โธในระนาบนั้น ๆ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีประสิทธิภาพและถูกต้องเหมาะสมกับงาน โดยการนำค่าพิกัดของจุดที่ได้จากการประมวลผลมาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงที่ทราบคำนวณความแตกต่างโดยใช้การคำนวณรากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบเฉลี่ยในแต่ละแกนนั้น ๆ เพื่อประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของค่าพิกัดที่ได้จากการปรับแก้ และทราบถึงกระจายตัวของจุดควบคุมภาพถ่ายมีคุณภาพและให้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องเหมาะสมของภาพออร์โธ โดยจุดตรวจสอบ (Check Point: CP) ใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของภาพถ่าย ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องทางพิกัดโดยการวิเคราะห์ผลข้อมูลทำให้ทราบค่าพิกัดที่มีความถูกต้องยอมรับได้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$RMSE_x = \sqrt{\sum (X_{data\ i} - X_{chrck\ i})^2 / n} \quad (5)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\sum (Y_{data\ i} - Y_{chrck\ i})^2 / n} \quad (6)$$

$$RMSE_z = \sqrt{\sum (Z_{data\ i} - Z_{chrck\ i})^2 / n} \quad (7)$$

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (8)$$

$$RMSE_t = \sqrt{RMSE_r^2 + RMSE_z^2} \quad (9)$$

โดย $RMSE_x$ คือ ค่า Root Mean Square Error ทางแกน x

$RMSE_y$ คือ ค่า Root Mean Square Error ทางแกน y

$RMSE_z$ คือ ค่า Root Mean Square Error ทางแกน z

$RMSE_r$ คือ ค่า Root Mean Square Error ทางราบ

$RMSE_t$ คือ ค่า Root Mean Square Error โดยรวม

n คือ จำนวนจุด GCP หรือ CP ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด

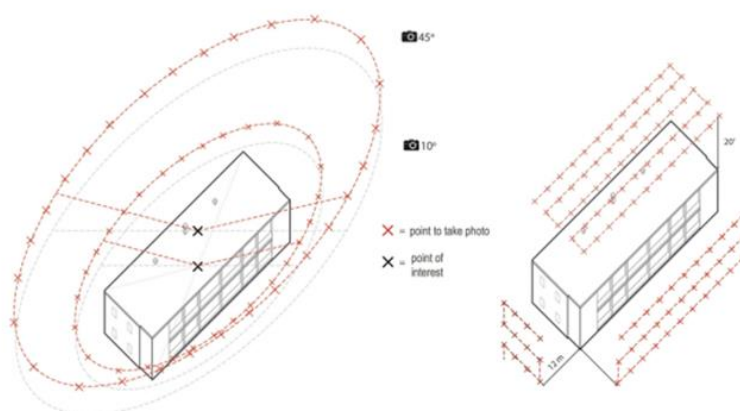
Xdata i, Ydata i และ Zdata i คือ ค่าพิกัด x, y และ z ตามลำดับ ที่ได้จากการประมวลผลด้วยภาพ

Xchrck i, Ychrck i และ Zchrck i คือ ค่าพิกัด x, y และ z ตามลำดับ ที่ได้จากการรังวัดสนาม

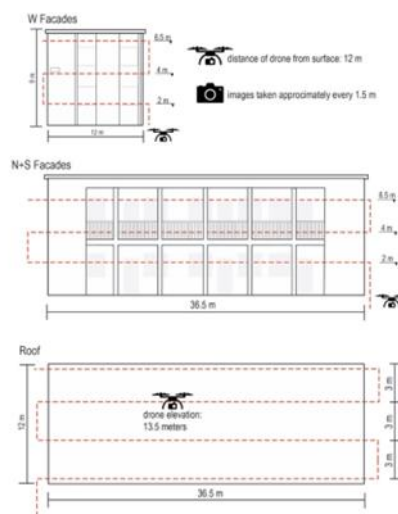
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การวางแผนการบิน

Tarek Rakha และ Alice Gorodetsky (2018) ได้ทำการตรวจสอบพลังงานความร้อนของสิ่งก่อสร้าง ใน Syracuse University โดยรวบรวมงานวรรณกรรมต่าง ๆ ในการใช้อากาศยานไร้คนขับในการตรวจสอบ อาคาร แผนการบิน และการสร้างแบบจำลองสามมิติ โดยขั้นตอนการบินใช้รูปแบบแถบและเกลียวแบบโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยวิธีแบบแถบมีการทับซ้อนกันอย่างน้อย 70% เหมาะสำหรับการเห็นภาพพลังงานของ สิ่งก่อสร้าง วิธีแบบเกลียวแบบโค้งมีการทับซ้อนกัน 95% เหมาะสำหรับการหลักการ Photogrammetry และการ สร้างแบบจำลองสามมิติ รวมไปถึงการนำเสนอระยะการบินและการถ่ายภาพ โดยระยะห่างจากผิวเป้าหมาย 12 เมตร ด้วยความกว้างของช่องที่เปลี่ยน 2-3 เมตร ถ่ายภาพทุก ๆ 1.5 เมตร ดังรูปที่ 17 สำหรับการสร้าง แบบจำลองสามมิติระดับความสูงที่มีประสิทธิภาพที่สุดคือ 2 เทาของความสูงอาคาร ควรเพิ่มความสูงทุก ๆ 1.5 เทาของเที่ยวบิน ระยะการทับซ้อนของภาพอย่างน้อย 70% และความถี่ในการจับภาพ 90-95% ซ้อนทับกัน จากนั้นภาพที่ได้จากการบินสร้างแบบจำลองโมเดลสามมิติโดยใช้ Pix4D ซึ่งได้ภาพคุณภาพดีที่สุดในโลกเคียงกับตัวอย่างมากที่สุด แต่ใช้เวลาานานที่สุด [7]

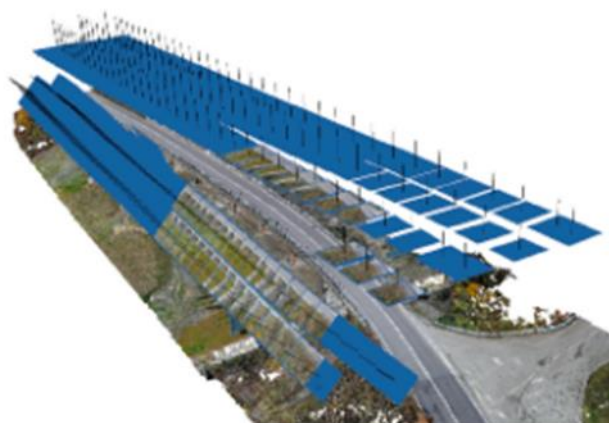


รูปที่ 16 รูปแบบการบิน [7]

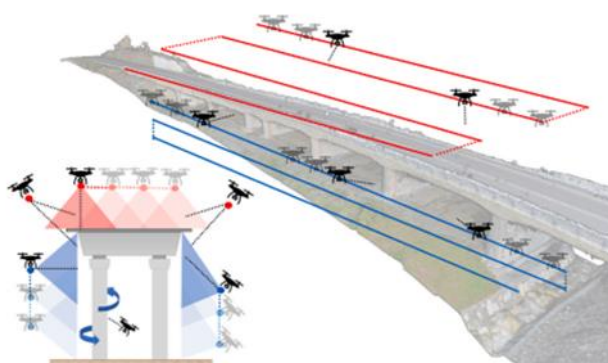


รูปที่ 17 ระยะการบินและการถ่ายภาพ [7]

M. Mandirola และ คณะ (2022) ได้นำเสนอแผนการบินในถ่ายภาพสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ใช้ในการตรวจสอบและประเมินความเสียหายของสะพาน ไม่ว่าจะเป็น การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมไปถึงการตรวจสอบปกติและจากภัยพิบัติ โดยส่วนบนของสะพานสามารถวางแผนด้วยซอฟต์แวร์วางแผนการบิน DJI Gs Pro (รูปที่ 19; เส้นสีแดง) เส้นทางการวางแผนการบินของโครงสร้างย่อย (รูปที่ 19; สีฟ้า) เทียบกับเส้นตรงที่ชี้ให้เห็นระดับความสูงด้านข้างของสะพานที่ระดับความสูงต่าง ๆ กัน และด้วยมุมกล้องเอียง (รวมถึงการวางองศาแนวกล้องขึ้นสำหรับการวางแผนสำรวจพื้นที่ใต้ท้องสะพาน) เพื่อแก้ไขด้านสิ่งแวดล้อมอาจส่งผลต่อการบินได้ไม่ว่าจะเป็น ลมกระโชก พื้นที่ GPS ไม่สามารถเข้าถึง พื้นที่แคบ เป็นต้น ควรรับประกันอย่างน้อย 70% ซึ่งอาจเป็นเพราะการใช้แอปวางแผนการบินอัตโนมัติ อีกทั้งคำนึงถึงความละเอียดจุดโดยระยะตัวอย่างพื้นเฉลี่ย (GSD) ประมาณ 1–1.5 ซม./พิกเซล ถือได้ว่าเหมาะสำหรับการตรวจสอบ รวมไปถึงแนะนำการเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธีการอ้างอิงทางภูมิศาสตร์โดยตรงโดยการใช้ข้อมูลที่สกัดโดย GNSS สำหรับการสร้างใหม่แบบจำลองเสมือนให้มีความถูกต้องเพียงพอ ด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control point: GCP) เป็นทางเลือกที่มีความแม่นยำกว่า ซึ่งค่อนข้างใช้เวลานาน แม้จะรับประกันผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดด้านเวลาที่อาจเกิดขึ้น และระดับความแม่นยำที่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบอย่างมีประสิทธิภาพ [10]

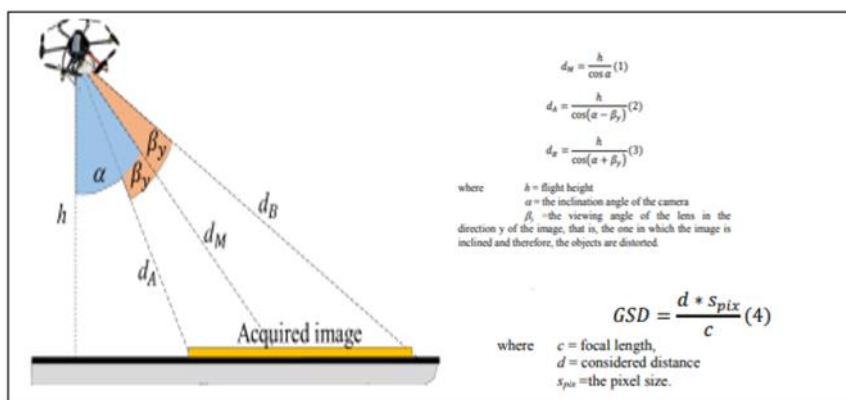


รูปที่ 18 ตัวอย่างกรอบมุมมองภาพรอบสะพานจากการสำรวจ [10]



รูปที่ 19 ตัวอย่างเชิงคุณภาพของเส้นทางการบินที่มีความเอียงกล้องต่างกัน [10]

Lingua และ คณะ (2017) ได้นำเสนอการถ่ายภาพเฉียงที่ได้มาจากระบบอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในการเข้าถึงพื้นที่ที่จำกัด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดและความรวดเร็ว และต้นทุนต่ำ ในส่วนของแผนการบินต้องพิจารณาค่าของภาพที่ทับซ้อนกันและต้องคำนึงถึงความละเอียดจุด (Ground Sample Distance: GSD) ต้องกำหนดมุมของแกนกล้องโดยคำนึงถึงความสูงของวัตถุ ความสูงของการบิน ชนิดของสิ่งกีดขวาง และ ตำแหน่งของรายละเอียดที่จะได้รับบนวัตถุ นอกจากนี้สำหรับวัตถุที่สูงจะต้องให้ความสนใจในการสำรวจชิ้นส่วนที่ใกล้ที่สุดและห่างไกลที่สุดที่มีความละเอียดจุดที่คล้ายกัน เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด ต้องพิจารณาระยะห่างจากภาพที่ถ่ายไว้ เพื่อให้การสร้างแบบจำลองสามมิติครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 20 [27]



รูปที่ 20 การคำนวณ GSD ในระยะทางต่ำสุดและสูงสุดของกล้องไปยังวัตถุ [27]

Ali Khaloo และคณะ (2015) ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างสะพานไม้ที่มีความยาว 85 เมตร โดยใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในการตรวจสอบเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับ แบบจำลอง 3 มิติที่เกิดจากการสแกนด้วยเลเซอร์ ในส่วนของการวางแผนบินได้ดำเนินการตามข้อกำหนดที่ จำเป็นสำหรับการสร้างแบบจำลอง 3 มิติที่มีความละเอียดสูง การกำหนดค่าการรับภาพทั้งในส่วนของการวาง ตำแหน่งกล้อง จำนวนภาพที่ถ่าย การซ้อนทับของภาพ และคุณภาพของภาพถ่าย เพื่อตอบสนองความต้องการด้านความแม่นยำของรูปทรงของสะพาน การวางแผนเส้นทางการบินอย่างละเอียดจึงถูกจัดทำขึ้นก่อนบินในแต่ละครั้ง โดยเส้นทางการบินทั้งหมด 22 เส้นทางได้รับการออกแบบเพื่อจับภาพความละเอียดสูงมากกว่า 2,000 ภาพ จากสะพานในระยะทางที่ต่างกันแปดจุดจากตัวสะพาน แต่ละเส้นทางได้รับการออกแบบเพื่อจับภาพ และ มุม ของแต่ละพื้นที่สะพานขึ้นใหม่โดยใช้มาตราส่วนความยาวที่หลากหลาย (ขนาดความคมชัดน้อยจนถึงขนาด พิกเซล) ตั้งแต่รูปทรงโดยรวมไปจนถึงรายละเอียดระดับละเอียดของบริเวณที่สำคัญและสนใจ โดยในส่วนของ การทับซ้อนได้ระบุไว้ว่าเปอร์เซ็นต์การทับซ้อน 90% ในแนวนอนและ 60% ในทิศทางแนวตั้ง ซึ่งภาพซ้อนทับ กันสูงและเที่ยวบินในระดับความสูงต่ำหลายเที่ยวบินเพื่อให้ได้ Ground sample distance (GSD) ขนาดเล็ก ภาพที่ถ่ายนั้นต้องเพิ่มความละเอียดให้สูงสุดและลดการเสื่อมของภาพเนื่องจากการเคลื่อนไหวของกล้อง เพื่อ สร้างโมเดลที่มีความละเอียดสูง ระยะห่างระหว่าง UAV และสะพานนั้นได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ รวมถึง ขอบเขตการมองเห็นของกล้อง ความละเอียดของเซ็นเซอร์ และความปลอดภัยของโดรน คำแนะนำโดยผู้สังเกตการณ์คือการใช้วิทยุและท่าทางแขน/มือเพื่อช่วยบังคับ UAV รักษาระยะห่างที่ปลอดภัยจากสะพาน และ เพื่อให้คนบังคับโดรนทราบเมื่อใดควรหยุดและเริ่มเส้นทางการบินต่อ โดรนจะไม่บินผ่านด้านในของโครงถักเนื่องจากอาจทำให้โดรนขาดสัญญาณ GPS และชนกับชิ้นส่วนของสะพานได้ ภาพบริเวณสะพานดังกล่าวจึง ถ่ายโดยผู้ตรวจสอบโดยใช้กล้อง Nikon D800E (ความละเอียด 36.3 ล้านพิกเซล) กับ Nikon Nikkor AF-S 50 มม. และเลนส์ Micro-Nikkor 105 มม. เพื่อนำภาพเหล่านี้รวมเข้ากับภาพที่ถ่ายผ่าน UAV ทำ

การเสริมโมเดล point cloud ด้วยความแม่นยำและความละเอียดโมเดล ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โดรนในการตรวจสอบ สามารถใช้ในการวัดการโก่งตัว การเปลี่ยนแปลงแคมเบอร์ของสะพาน หรือการเสียรูปและการบิดเบือนอื่น ๆ ของสะพานโครงถักนี้ [28]



(ก)

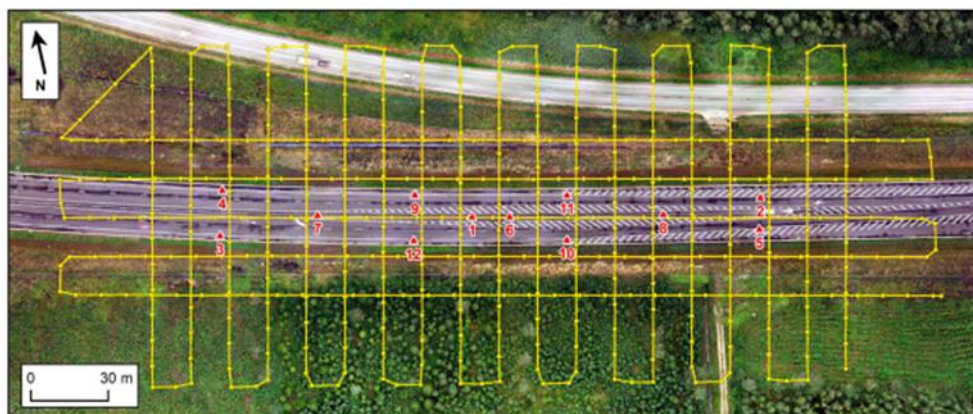
(ข)

(ค)

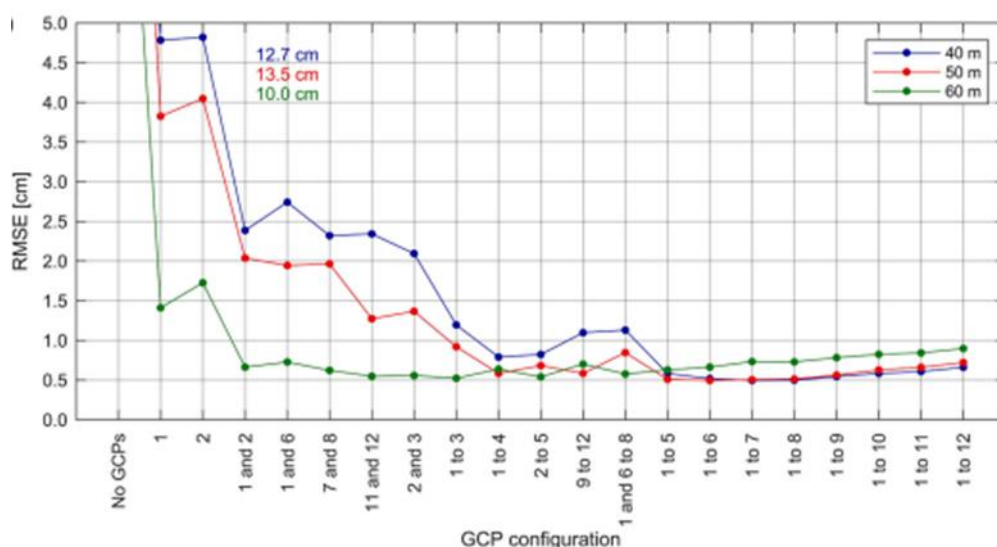
รูปที่ 21 ภาพจำลองด้านล่างของดาดฟ้าสะพานบนหลักค้ำยันตะวันตก
(ก) ภาพภาคสนาม (ข) โมเดล 3D LIDAR (ค) แบบจำลอง 3 มิติจากโดรน [28]

2.9.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

Sander Varbla และ คณะ (2021) ได้ทำการตรวจสอบการเสียรูปหรือการทรุดของถนนพื้นที่ 9,000 ตร.ม. โดยประมาณ โดยวิธีการสำรวจแบบทั่วไปมักจะใช้เวลาและแรงงานมาก และอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อผู้สำรวจ ตรวจสอบความผิดปกติของโครงสร้างถนนที่สามารถระบุได้โดยการสำรวจโดยใช้โดรนจากระดับความสูง 40, 50 และ 60 เมตร กำหนดค่าจุดควบคุมพื้นดิน (Ground control point: GCP) ที่แตกต่างกัน 21 จุดเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ได้กับการตรวจสอบภาคพื้นดินของการสแกนด้วยเลเซอร์ ซอฟต์แวร์การวางแผนและควบคุมการบินของ DJI ที่ใช้แนะนำวิธีเริ่มต้นสำหรับทั้งสามระดับความสูง (รูปที่ 22 แสดงวิธีการบินระดับ 50 เมตร) พารามิเตอร์คุณภาพสูงใช้เพื่อกำหนดการกำหนดค่า GCP ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระดับความสูงของเที่ยวบินแต่ละครั้ง ในขณะที่พารามิเตอร์คุณภาพสูงพิเศษใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตของถนนเพื่อใช้ในการตรวจสอบการเสียรูป จากการตรวจสอบพบว่าการสำรวจในระดับความสูงของการสำรวจที่ต่ำจะต้องการ GCP จำนวนมากเมื่อเทียบกับความสูงการสำรวจที่สูง เนื่องจากระดับความสูงที่ต่ำ GCP จะปรากฏบนภาพที่น้อยลง เพื่อให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำระดับเซนติเมตร ในทางกลับกันสำหรับแบบสำรวจระดับความสูงที่สูงขึ้นความแม่นยำจะน้อยลงเนื่องจาก GCP มากเกินไปแสดงในรูปที่ 24 โดยผลลัพธ์ที่ออกมาแสดงรูปแบบเป็นค่าประมาณความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean Squared Error, RMSE) [8]



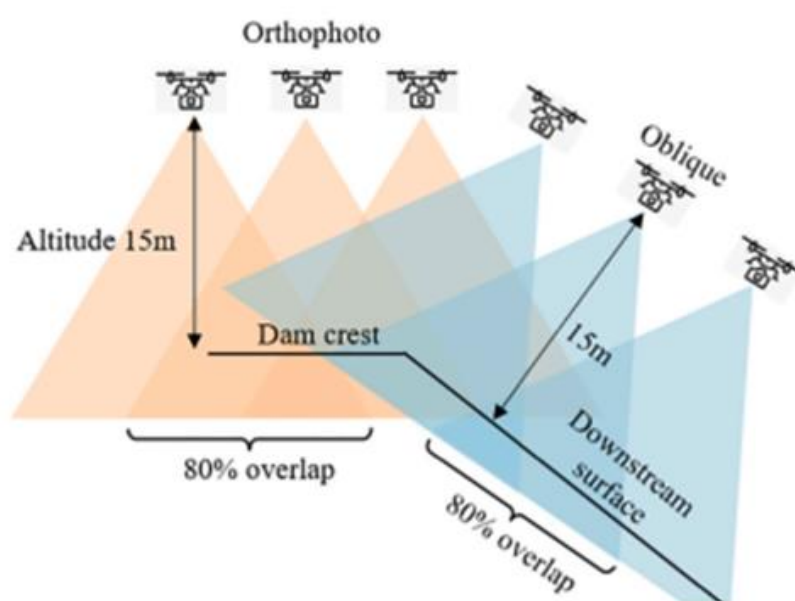
รูปที่ 22 ภาพออร์โธที่สร้างจากภาพถ่ายระยะดับความสูง 50 เมตร ของเที่ยวบิน RTK-GNSS UAV ที่ซ้อนทับด้วยวิธีการบิน 50 เมตร สามเหลี่ยมสีแดงที่มีตัวเลขระบุถึง GCP [8]



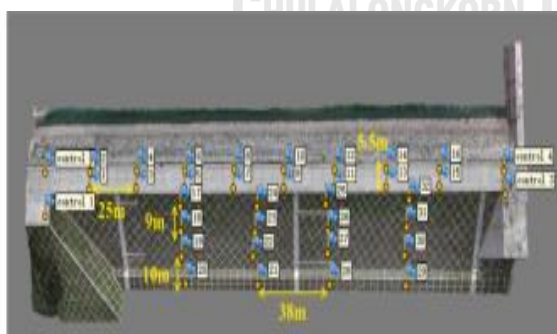
รูปที่ 23 การประมาณการ RMSE ของ UAV ที่กำหนดรูปทรงเรขาคณิตของถนน (โดยใช้พารามิเตอร์คุณภาพสูง) เทียบกับความจริงภาคพื้นดินของ TLS [8]

Sizeng Zhao และ คณะ (2021) นำเสนอแบบจำลองสามมิติ (3D) จากภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ (UAV) สำหรับการตรวจสอบและตรวจสอบเหตุผลเชิงตรรกะของเขื่อนคอนกรีต และทดสอบวิธีการตรวจจับความเสียหายบนแบบจำลองเขื่อนขนาดเล็ก ซึ่งได้ทำการสำรวจเขื่อนทั้งหมด 4 เขื่อนโดยมีความทับซ้อนที่ 80 % และความสูงจากกล้องไปยังวัตถุที่ 15 เมตร ตามรูปที่ 24 โดยแบบจำลองเขื่อนแรกทำการจัดวาง GCP ทั้งหมด 36 ชิ้นบนพื้นผิวที่ทำการศึกษา ตามรูปที่ 25 (ก.) แบบจำลองเขื่อนที่ 2 ทำการจัดวาง GCP ทั้งหมด 28 แห่งบนเขื่อน ดังแสดงในรูปที่ 25 (ข.) โดยได้ทำการหาตำแหน่งจุด CP และ GCP ที่เหมาะสมแสดงค่าเปรียบเทียบคุณภาพด้วยค่า RMSE แสดงใน

ตารางที่ 9 เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติที่เหมาะสมในการตรวจสอบแบบฉุกเฉินของ โดรนที่เป็นตามหลักสากล พบว่าในการตรวจสอบแบบฉุกเฉินต้องการเพียง 4 GCP รอบยอดเขื่อน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการสร้างเขื่อน 3 มิติจากภาพ UAV สามารถได้รับความแม่นยำที่น่าพอใจและส่งผลให้ประสิทธิภาพการตรวจสอบและการตรวจสอบเขื่อนดีขึ้น [6]



รูปที่ 24 ระดับความสูงของการถ่ายภาพทางอากาศและเส้นทางของเขื่อนโดยใช้ UAV [6]



(ก) แบบจำลองเขื่อนตัวอย่างที่ 1



(ข) แบบจำลองเขื่อนตัวอย่างที่ 2

รูปที่ 25 แบบจำลองสามมิติและการกระจาย GCP บนเขื่อน [6]

ตารางที่ 9 RMSE ของแต่ละทิศทางตาม GCP ต่าง ๆ ในตัวอย่างที่ 1 และ 2 [6]

Example	Combination of GCPs	RMSE _x (cm)	RMSE _y (cm)	RMSE _{xy} (cm)	RMSE _z (cm)
1.	With 20 GCPs (CPs on downstream)	2.22	2.01	3.00	3.95
	With 4 GCPs (CPs on crest)	1.85	2.05	2.76	2.14
	With 4 GCPs (CPs on downstream)	2.1	2.53	3.28	5.87
	With 4 GCPs (All CPs)	1.98	2.99	3.03	4.41
2.	With 10 GCPs (CPs on downstream)	2.21	2.07	3.03	5.96
	With 4 GCPs (CPs on crest)	2.19	0.81	2.33	2.43
	With 4 GCPs (CPs on downstream)	2.77	2.38	3.65	6.78
	With 4 GCPs (All CPs)	2.67	2.10	3.37	5.99

2.9.3 การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับในตรวจสอบสะพาน

Junwon Seo และคณะ (2018) ทำการตรวจสอบสะพานไม้ประกอบโครงสร้างสามช่วง ที่มีพื้นคอนกรีตประกอบ ตั้งบริเวณอยู่ใน Keystone ในรัฐเซาท์ดาโคตา (SD) โดยใช้อากาศยานไร้คนขับเป็นเครื่องมือ เสริม ผลการวิจัยถูกนำไปเปรียบเทียบกับรายงานการตรวจสอบในอดีต SD Department of Transportation (SDDOT) โดยปัญหาที่พบระหว่างการตรวจสอบสะพานคือความกังวลเรื่องสัญญาณ GPS ขัดข้องในขณะที่การ ตรวจสอบด้านล่างพื้นสะพานโดยแก้ไขจากการเอียงกล้องขึ้นเป็นมุม 35 ° เพื่อให้การตรวจสอบและการระบุ ความเสียหายของสะพานนั้นเป็นระบบและขั้นตอนในการตรวจสอบ ได้นำเสนอ 5 ขั้นตอนในการตรวจสอบ สะพานโดยใช้โดรนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนี้

1. ทำการทบทวนข้อมูลสะพานเพื่อกำหนดขอบเขตการตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งและขนาดของ สะพาน 2. การประเมินความเสี่ยงโดยครอบคลุมบริเวณโดยรอบและตัวสะพานเพื่อกำหนดเขตความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นสำหรับการทำงานของโดรน อาทิเช่น ความสูง สภาพอากาศ การจราจร สิ่งกีดขวาง ข้อจำกัดทาง กฎหมาย รายงานการตรวจสอบในอดีต เป็นต้น

3. ก่อนทำการตรวจสอบสะพาน ต้องติดตั้ง Drone Pre-Flight Setup อาทิเช่น ส่วนประกอบ และ ซอฟต์แวร์ทั้งหมดของโดรน ไม่ว่าจะเป็น ใบพัด แบตเตอรี่ iPad เป็นต้น ช่วยลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น ระหว่างการตรวจสอบ

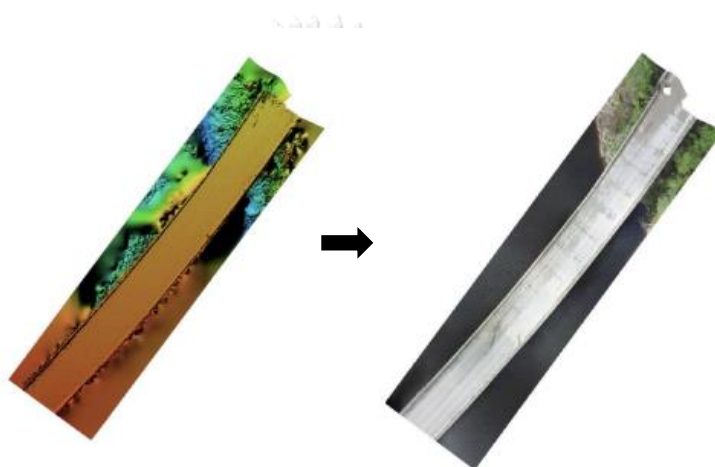
4. ดำเนินการตรวจสอบสะพานโดยจะการเก็บข้อมูลทางวิดีโอเพื่อจัดสิ่งรบกวนที่ไม่จำเป็นออกจาก กระบวนการถ่ายภาพขณะบินภายใต้สภาพอากาศเลวร้าย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่าการตรวจสอบด้วยวิดีโอช่วยให้ ได้ข้อมูลภาพที่จำเป็นสำหรับการระบุความเสียหาย

5. ขั้นตอนสุดท้ายสำหรับการตรวจสอบสะพานด้วยโดรนคือการดำเนินการระบุความเสียหาย ผลลัพธ์ ความเสียหายขึ้นส่วนต่าง ๆ ของสะพาน เพื่อแสดงคุณภาพของข้อมูลที่ได้รับโดยใช้โดรน โดยใช้ซอฟต์แวร์ คอมพิวเตอร์ Photogrammetric PhotoScan เพื่อสร้างภาพเสมือน 3 มิติสังเกตความเสียหายจากมุมต่าง ๆ

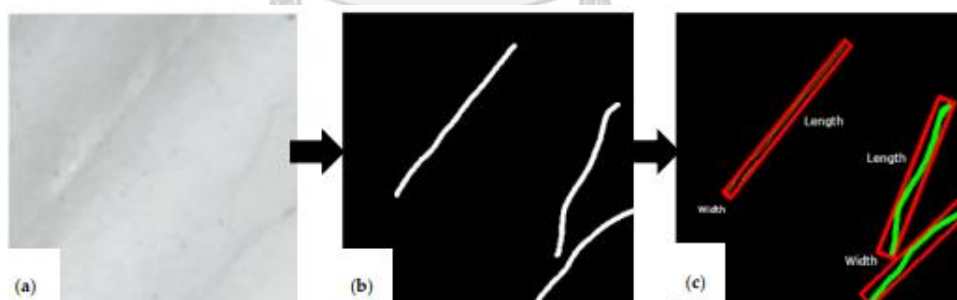
โดยผลลัพธ์ที่ได้ข้อมูลเชิงปริมาณโดยใช้โดรน เช่น พื้นที่ที่หลุดร่อน 0.18 ตร.ม. ซึ่งเหมือนกับ การวัดที่ SDDOT ให้มา (0.3 ม. คูณ 0.6 ม.) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโดรนในการตรวจสอบ สะพาน การ 29 ตรวจสอบภาคสนามของสะพานแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของภาพและความสามารถในการระบุความเสียหาย ของโดรน เพื่อทำการตรวจสอบสะพานด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการแบบเดิม [29]

Yonas Zewdu Ayele และคณะ ได้ทำการศึกษาการตรวจสอบรอยแตกร้าวของสะพาน คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ DJI Matrice 100 ร่วมกับ กล้อง Zenmuse Z3 ซึ่งเป็นกล้องที่มีประสิทธิภาพสูงในการซูมได้ถึง 7 เท่า ทำการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายโดยมีการทับซ้อนของภาพถ่ายอยู่ที่ 60-70% ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผล Agisoft Metashape ในการประมวลผลจากภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหลายแห่งในออร์เวย์มีการใช้งานสูง ทำให้การตรวจสอบและการบำรุงรักษาเป็นประจำมีความสำคัญอย่างยิ่ง รวมไปถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบจากการระบุและวิเคราะห์ความเสียหายอัตโนมัติ โดยทำการตรวจจับ และแบ่งสัดส่วนรอยแตกของสะพานเพื่อใช้ในการประเมินสภาพความเสียหายของสะพาน โดยทำการออกแบบ Mask R-CNN สำหรับการตรวจจับรอยร้าวเชิงพื้นที่และการแบ่งสัดส่วนรอยแตกสำหรับ

การแบ่งส่วนต่อพิกเซลของรอยแตกโดยอัตโนมัติ ผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะถูกบันทึกออกเป็น ความยาวความเสียหาย ความกว้างความเสียหาย พื้นที่ความเสียหาย คะแนนการจัดหมวดหมู่ความเสียหาย และตำแหน่งความเสียหาย(ระบบพิกัดภูมิศาสตร์) จากการศึกษาพบว่าสามารถอนุมานได้ว่าการใช้อากาศยานไร้คนขับในการตรวจสอบสะพานร่วมกับการตรวจจับรอยแตกอัตโนมัติ สามารถระบุภัยคุกคามที่อาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายของสะพานได้ตั้งแต่เนิ่น ๆ และสามารถระบุองค์ประกอบสะพานที่มีความเสี่ยงสูง รวมไปถึงความสามารถในการติดตามรอยร้าวอัตโนมัติจากแบบจำลอง Mask R-CNN สามารถลดการกำหนดการติดตามด้วยตนเองได้ถึง 90% และการแบ่งสัดส่วนรอยร้าวมีความแม่นยำถึง 90% [3]



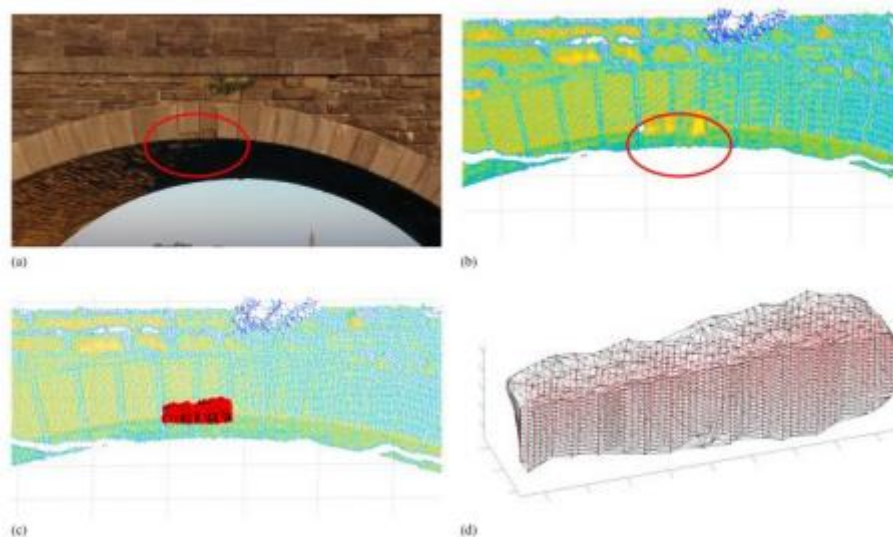
รูปที่ 26 ผลลัพธ์ในการประมวลผลภาพสะพานบอร์โธส่วนบนของสะพาน [3]



รูปที่ 27 (a) รูปโดรน (b) การติดตามข้อมูล (c) การประมาณความยาวและความกว้างของรอยร้าว [3]

Siyuan Chen และ คณะ ได้นำเสนอการตรวจสอบสะพานจากการสร้างแบบสามมิติจากภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพและข้อจำกัดในการตรวจสอบจากอากาศยานไร้คนขับเปรียบเทียบกับ Terrestrial Laser Scanner (TLS) จากการศึกษาพบว่า อากาศยานไร้คนขับนั้นมีประสิทธิภาพมากกว่า TLS ในหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็น การเข้าถึงพื้นที่ ระยะเวลาในการเก็บ

ข้อมูลพื้นที่หน้างาน และง่ายในการวางแผนการบินในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายใช้ในการประมวลแบบจำลองสามมิติ แต่อย่างไรก็ตาม TLS มีประสิทธิภาพสูงกว่าในส่วนของ ระยะเวลาในการประมวลผลแบบจำลองจุดก้อนเมฆเนื่องจาก ข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับนั้นมีปริมาณที่มากกว่า ซึ่งใช้เวลาโดยประมาณสองสามชั่วโมงจนถึงหลายวัน รวมไปถึงแบบจำลองจุดก้อนเมฆที่สร้างจากอากาศยานไร้คนขับนั้นมีความแม่นยำ น้อยกว่า TLS อย่างไรก็ตามความถูกต้องเป็นเพียงส่วนหนึ่งของชุดข้อมูลคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบสะพาน นอกจากนี้ยังมีข้อมูลส่วนอื่นควรพิจารณาไม่ว่าจะเป็นต้นทุนในการตรวจสอบซึ่ง TLS ค่อนข้างมีราคาที่สูง รวมไปถึงการเปรียบเทียบปริมาตรการสูญเสียเสี้ยนหน้าตัดของอิฐบนสะพานจากแบบจำลองจุดก้อนเมฆระหว่างแบบจำลองที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับและ TLS พบว่า ระยะห่างการบินระหว่างอากาศยานไร้คนขับที่ระยะ 10 และ 20 เมตร มีปริมาตรเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 3.97 และ 25.20 ตามลำดับเมื่อเทียบกับแบบจำลอง TLS ที่มีความแม่นยำมากกว่าอากาศยานไร้คนขับ [30]

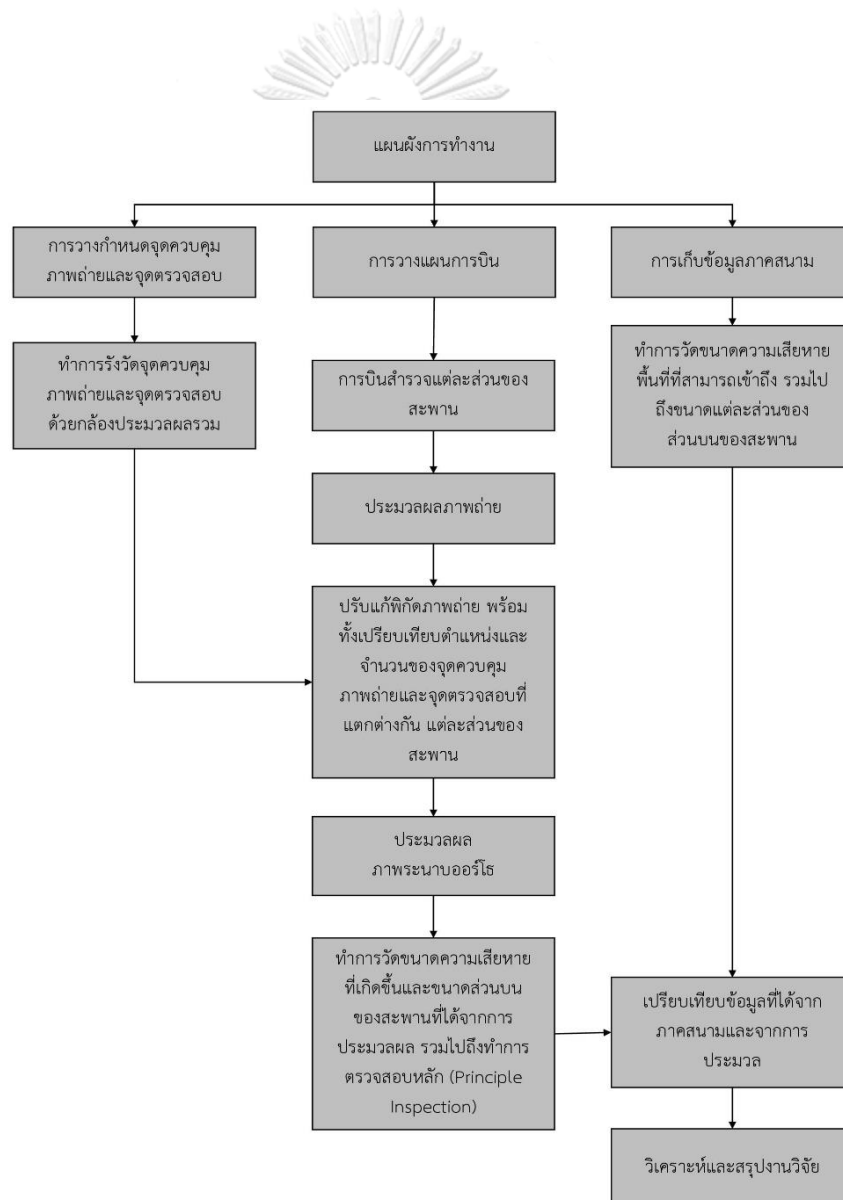


รูปที่ 28 การประเมินความเสียหายและปริมาตรของอิฐที่เกิดการแตกร้าว : (a) ข้อมูลภาพถ่าย (b) ข้อมูลแบบจำลองจุดก้อนเมฆ (c) เดิมพื้นที่ที่เสียหาย (d) ปริมาตรที่ได้ของจุดเดิม [30]

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาจำนวนจุดควบคุมภาพที่มีผลต่อความถูกต้องเชิงพิกัดของภาพพระนาบอรรโธของแต่ละส่วนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบความเสียหายภายนอกของสะพานด้วยวิธีการประเมินด้วยสายตา ทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของการตรวจสอบแบบจำลองสามมิติของสะพานจากภาพถ่ายทางอากาศ ระยะและความเสียหายของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของสะพานกับพื้นที่จริงที่สามารถเข้าถึงได้ งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานและรายละเอียดดังต่อไปนี้



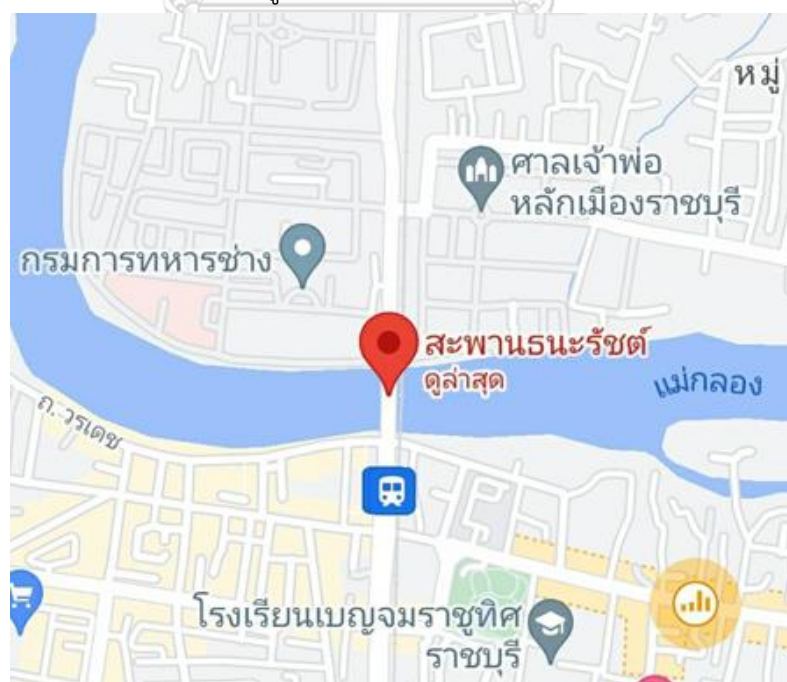
รูปที่ 29 แผนผังการทำงาน

3.1 ตำแหน่งที่ตั้งสะพานและรูปแบบโครงสร้างสะพาน

สะพานธนารักษ์เป็นสะพานขนาดใหญ่ข้ามแม่น้ำแม่กลองอยู่ในสังกัดของแขวงทางหลวงราชบุรี ตั้งอยู่ ถนน รพ 1 ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000 โดยประเภทของสะพานเป็นระบบคานตามยาวรูปตัวไอ (I-Girder) ซึ่งมีความยาวสะพานระยะ 230 เมตร กว้าง 10 เมตร สูง 10 เมตร โดยประมาณประกอบไปด้วย บริเวณเชิงลาดสะพาน 2 ส่วน บริเวณช่วงสะพาน 8 ส่วน และ บริเวณตอม่อ 7 ส่วน ในส่วนของผิวทางเป็นผิวทางแอสฟัลต์ ซึ่งรอยต่อเพื่อขยายเป็นรอยต่อเพื่อขยายแบบปิดผนึกบีบอัด (Compression Seal)



รูปที่ 30 สะพานธนารักษ์



รูปที่ 31 แผนที่ตำแหน่งสะพานธนารักษ์

3.2 การรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน

โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาจำนวนของจุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพระนาบออร์โธ (Orthoimage) โดยทำการรังวัดจุดควบคุมภาพและจุดตรวจสอบของสะพานทั้งหมด 55 จุด กระจายตัวทั่วพื้นที่ในการตรวจสอบ แบ่งเป็น 3 ส่วนของสะพานหลัก ได้แก่ ส่วนบนของสะพาน ส่วนข้างของสะพาน และ ส่วนเสาตอม่อที่ 1 โดยมีขั้นตอนดำเนินงาน ดังนี้

3.2.1 การรังวัดพิกัดของจุดอ้างอิง

ทำการรังวัดค่าพิกัดของจุดอ้างอิงที่ใช้ในการหาค่าพิกัดบนพื้นผิวของสะพานโดยทำการรังวัดด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ทันที (Real Time Kinematic: RTK) ปรับแก้ผ่านเครือข่าย NTRIP ของกรมแผนที่ทหาร ทำการรับสัญญาณผ่านเครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบสองความถี่โดยทำการรับสัญญาณเป็นระยะเวลา 1 นาที ทั้งหมด 5 ครั้ง จากนั้นนำค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นค่าพิกัดของจุดอ้างอิง โดยมีจุดอ้างอิงทั้งหมด 5 จุด แบ่งเป็น จุดอ้างอิงใช้ในการรังวัดส่วนข้างและส่วนเสาตอม่อที่ 1 ทั้งหมด 2 จุด แสดงในรูปที่ 32 ถึง รูปที่ 33 และจุดอ้างอิงใช้ในการรังวัดส่วนบนสะพาน 3 จุด แสดงในรูปที่ 33 หากค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดจากจุดอ้างอิง 2 จุดมีความแตกต่างกันเกิน 5 เซนติเมตรจะต้องทำการรังวัดใหม่ ทำการจดบันทึกค่าพิกัดเพื่อใช้ในการหาพิกัดบนจุดควบคุมภาพถ่ายบนผิวสะพาน



รูปที่ 32 ตำแหน่งจุดอ้างอิงที่ใช้ในการรังวัดส่วนข้างและส่วนเสาตอม่อที่ 1 ของสะพาน



รูปที่ 33 ตำแหน่งจุดอ้างอิงที่ใช้ในการรังวัดส่วนบนของสะพาน

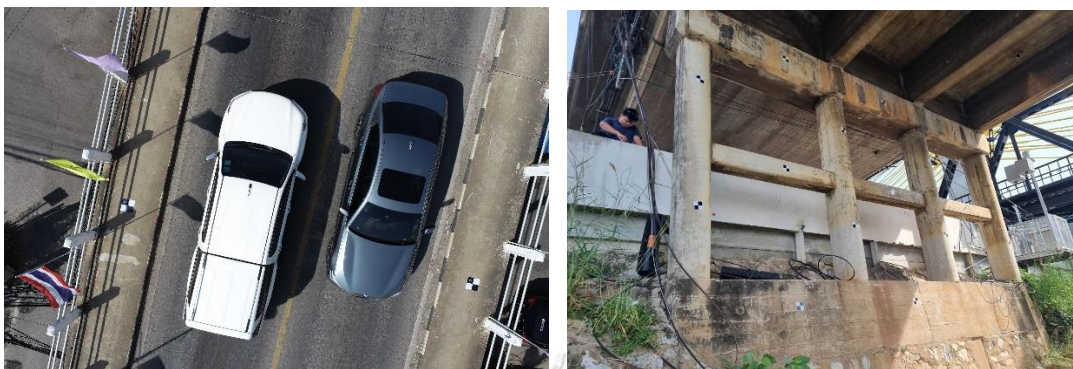


รูปที่ 34 การรังวัดหาค่าพิกัดของจุดอ้างอิงด้วยวิธีการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ในทันที

3.2.2 รังวัดค่าพิกัดของจุดที่เห็นเด่นชัดบนพื้นผิวสะพาน

ทำการรังวัดพิกัดของจุดที่เห็นเด่นชัดของพื้นผิวของสะพานด้วยกล้องประมวลผลรวม (Total Station) ซึ่งสามารถเข้าถึงพื้นที่เพื่อติดเป้าจุดควบคุมภาพถ่ายได้ 2 ส่วนได้แก่ ส่วนบนของสะพาน ทั้งหมด 22 จุด และ ส่วนเสาดม่อที่ 1 ทั้งหมด 14 จุด โดยในส่วนของด้านข้างของสะพานจะทำการรังวัดไปที่จุดที่เห็นเด่นชัดในส่วนข้างของสะพานนั้น ๆ ทั้งหมด 17 จุด โดยเริ่มจากการวางกล้องประมวลผลรวมที่อ้างอิงที่ 1 ทำการตั้งปรีซิมไว้จุดอ้างอิงที่ 2 จากนั้นทำการส่องกล้องไปที่ปรีซิมบน

จุดอ้างอิงที่ 2 ทำการระบุพิกัดของจุดอ้างอิงที่ 1 และ 2 โดยจะต้องระบุค่าความสูงของปริซึมและกล้องจากจุดอ้างอิงเพื่อใช้ในการเล็งสกัดในการคำนวณหาค่าพิกัดบนพื้นผิวของสะพาน





รูปที่ 35 ตัวอย่างการติดตั้งจุดควบคุมภาพถ่ายส่วนบนของสะพาน และ เสาคอมม่อนที่ 1



รูปที่ 36 การรังวัดค่าพิกัดของจุดที่เห็นเด่นชัดบนพื้นผิวสะพาน

3.3 การจัดทำเอกสารอธิบายข้อมูลของจุด Marking ส่วนข้างของสะพาน

จัดทำเอกสารอธิบายข้อมูลจุด Marking ส่วนข้างของสะพาน เนื่องจากส่วนข้างของสะพานนั้นไม่สามารถเข้าถึงพื้นที่เพื่อทำการติดตั้งจุดควบคุมภาพถ่ายได้ โดยนำรายละเอียดในแต่ละจุดมาระบุในเอกสารและจัดทำในรูปแบบที่ชัดเจน โดยมีข้อมูลชื่อจุด สถานที่ ค่าพิกัด ระบบพิกัด วันและเวลาที่จัดทำ รูปภาพจากจุด Marking ที่เห็นชัดเจนและคำอธิบายคร่าว ๆ ของจุดนั้น ๆ เพื่อง่ายต่อการใช้งานต่อ

ชื่อ : P03	ค่าระดับ : 6.488 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานธนบุรี ถนน รฟท ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497202.822 เมตร E 589163.172 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมซ้ายล่างตามยาวบริเวณช่วงสะพานที่ 2 และรอยต่อเสาตอม่อที่ 1 ขอบบน ของสะพานธนบุรี	

รูปที่ 37 ตัวอย่างเอกสารอธิบายข้อมูลของจุด Marking ส่วนข้างของสะพาน

3.4 การวางแผนการบิน

3.4.1 ประเภทของอากาศยานไร้คนขับ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ DJI Phantom 4 Pro V2 และ Skydio 2 ซึ่งเป็นโดรนพร้อมบินประสิทธิภาพสูง โดยมีข้อมูลสำคัญในการเลือกใช้โดรน ดังนี้

3.4.1.1 อากาศยานไร้คนขับรุ่น DJI Phantom 4 Pro V2

1. กล้องของโดรนมาพร้อมกับระบบกันสั่น 3 แกนหมุนอิสระ และเซ็นเซอร์กล้อง CMOS ขนาด 1 นิ้ว มีความละเอียด 20 ล้านพิกเซล เลนส์มุมกว้าง f/2.8

2. ความเร็วสูงสุดในการบิน 72 กิโลเมตร/ชั่วโมง ในโหมดสปอร์ต และมีระยะบินไกลถึง 7 กิโลเมตร

3. ซึ่งโดรนรุ่นนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือมีเซ็นเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวาง 5 ทิศทางเพิ่มความปลอดภัยในการบิน ในขณะที่บินกลับ และระบบการจัดการพลังงานขั้นสูงเพื่อป้องกันการทำงานผิดปกติของแบตเตอรี่



รูปที่ 38 โดรนรุ่น DJI Phantom 4 Pro V2.0

3.4.1.2 อากาศยานไร้คนขับรุ่น Skydio 2

1. กล้องของโดรนมาพร้อมกับระบบกันสั่น 3 แกน และประเภทเซนเซอร์ Sony IMX5771/2.3" 12.3MP CMOS มีความละเอียด 12 ล้านพิกเซล เลนส์มุมกว้าง f/2.8
2. สามารถบินด้วยความเร็วในการบินแบบอัตโนมัติสูงสุด 58 กม. / ชม แบตเตอรี่บินต่อเนื่อง 23 นาที และมีระยะบินไกลถึง 3.5 กม.
3. โดยโดรนรุ่นนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือ สามารถปรับองศาของกล้องได้ถึง 200°

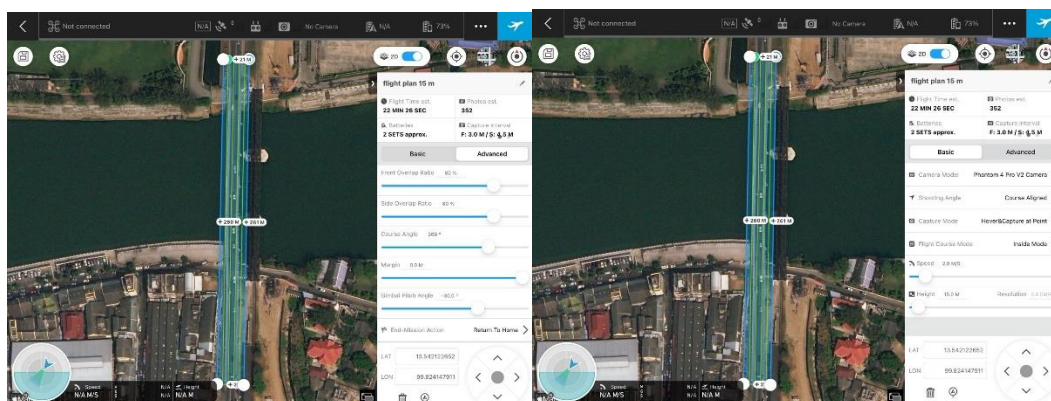


รูปที่ 39 โดรนรุ่น Skydio 2

3.4.2 การประมาณเส้นทางการบินอัตโนมัติโดย โปรแกรม DJI GS Pro

เนื่องจากสะพานธนบุรีรัศมีการสั่นจรถลอดเวลาจึงทำให้มีข้อจำกัดความสูงในการบิน ในส่วนของส่วนบนของสะพานเลือกใช้โปรแกรม DJI GS Pro เพื่อประมาณจำนวนเส้นทางการบินเบื้องต้น เนื่องจากสะพานธนบุรีรัศมีความยาว 300 เมตร กว้าง 10 เมตร สูงสูงสุด 10 เมตรโดยประมาณจากผิวหน้า โดยทำการบินในบริเวณช่วงของสะพาน จึงสร้างกรอบการบินของโดรนกว้าง 14 เมตร ยาว

170 เมตร ปรับค่า Front Overlap Ratio : 80 % , Side Overlap Ratio : 80 % , Height : 15 m , Resolution : 0.4 cm/px , Camera model : Phantom 4 Pro V2 Camera



รูปที่ 40 การปรับค่า DJI GS Pro

3.4.3 ประเมินเส้นทางการบินจากงานจริง

3.4.3.1 การประมาณเส้นทางการบินด้านข้างของสะพาน

ในการวางแผนการบินในส่วนด้านข้างของสะพานไม่สามารถทำการบินโดรนแบบอัตโนมัติได้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่อาจเกิดอันตรายกับตัวโดรนได้ ผู้สำรวจต้องทำการควบคุมการบินด้วยตัวเอง โดยให้ความเร็วในการบินนั้นคงที่ ทำการถ่ายภาพอัตโนมัติเพื่อควบคุมให้ภาพที่ถ่ายนั้นมีค่าการซ้อนทับกันไม่น้อยเกินกว่าที่กำหนด โดยจะทำเส้นทางการบิน 6 ระดับในการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 41 โดยสามารถแบ่งเส้นทางการบินได้ดังนี้

1. ส่วนบนของด้านข้างสะพานเพื่อให้ภาพถ่ายเกิดการซ้อนทับส่วนบนของสะพานโดยจะมีเส้นทางการบิน 2 เส้นทำการปรับองศากล้องลง 45 องศากับแนวราบ โดยมีระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุ 5 เมตรจากแนวราบโดยประมาณ

2. ส่วนกลางของด้านข้างสะพาน แบ่งเส้นทางการบิน 2 เส้น โดยมีระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุ 5 เมตรจากแนวราบโดยประมาณ

3. ส่วนล่างของด้านข้างสะพาน แบ่งเส้นทางการบิน 2 เส้น ซึ่งเส้นทางส่วนล่างจะปรับองศากล้องขึ้นจากแนวราบ 10 องศา เพื่อให้ครอบคลุมท้องสะพานและแก้ไขปัญหาความขัดข้องของสัญญาณ GPS



รูปที่ 41 ตัวอย่างเส้นทางการบินด้านข้างของสะพาน

3.4.3.2 การประมาณเส้นทางการบินเสาตอม่อและกำแพงตอม่อของสะพาน

ในส่วนของการวางแผนการบินของเสานั้นไม่สามารถบินอัตโนมัติได้เช่นเดียวกับการบินด้านข้างของสะพาน เพื่อให้ได้แบบจำลองของเสาจำเป็นต้องทำการบิน 2 ด้าน ของเสาโดย แต่ละด้านจะทำการบิน 4 เส้นทาง เพื่อให้ครอบคลุมทุกส่วนของเสาแสดงดังรูปที่ 42 และ รูปที่ 43



รูปที่ 42 ตัวอย่างเส้นทางการบินกำแพงตอม่อและการส่วนซ้อน (Overlap)

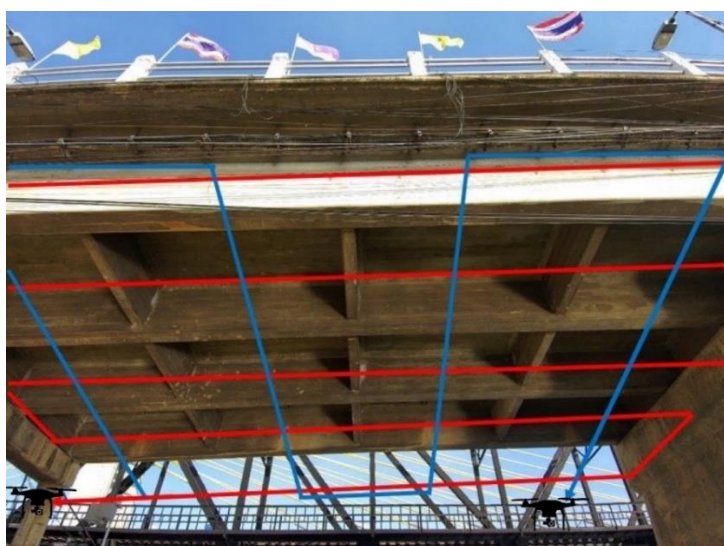


รูปที่ 43 ตัวอย่างเส้นทางการบินกำแพงตอม่อและการส่วนเกย (Sidelap)

3.4.3.3 การประมาณเส้นทางการบินส่วนใต้ท้องสะพาน

ในส่วนของการวางแผนการบินส่วนใต้ท้องสะพานไม่สามารถบินอัตโนมัติได้เนื่องจากปัญหาสัญญาณ GPS โดยจำเป็นต้องทำการ 2 เวลา ได้แก่ ตอนเช้า และ หลังกลางวัน เนื่องจากแสงสว่างที่ไม่สามารถเข้าถึงตัวใต้ท้องสะพาน ทำให้ต้องใช้แสงจากด้วยอาทิตย์ โดยจำเป็นต้องทำการปรับองศาของกล้องขึ้นจากแนวราบ 45 องศา และ 90 องศา เพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่ครบถ้วน ซึ่งรูปแบบการบินจะเป็นรูปแบบกริด โดยมีเส้นทางการบิน 9 เส้นทาง แสดงในรูปที่ 44 จะทำการบินทั้งหมด 4 ครั้งต่อช่วง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 44 ตัวอย่างเส้นทางการบินใต้ท้องสะพาน

3.5 การเก็บข้อมูลหน้างานจริง

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความเสียหายภายนอกของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สามารถเข้าถึงได้เพื่อทำการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่ได้จากแบบจำลองและพื้นที่จริง โดยมีวิธีการตรวจสอบความเสียหายที่สามารถเข้าถึงได้มีดังนี้

3.5.1 การกำหนดรหัสชิ้นส่วน

การกำหนดรหัสให้แก่ชิ้นส่วนของโครงสร้างสะพาน จุดประสงค์เพื่อระบุชื่อและตำแหน่งของชิ้นส่วนในโครงสร้างสะพานและระบุตำแหน่งความเสียหายที่เกิด โดยต้องระบุบริเวณแต่ละชิ้นส่วนของสะพานแสดงในรูปที่ 45 จำนวนบริเวณต่าง ๆ ของสะพานธนรัศต์ และ สัญลักษณ์ของชิ้นส่วนประเภทต่าง ๆ ได้กำหนดไว้ในตารางในตารางที่ 10 ซึ่งชิ้นส่วนประเภทหนึ่งอาจมีจำนวนมากกว่าหนึ่ง เช่น บริเวณช่วงสะพานที่ 1 (S1) มีคานตามยาว (Girder, GD) 10 ตัว (GD1- GD10) และ ความเสียหายอาจมีมากกว่า 1 จุด ในแต่ละชิ้นส่วนสะพาน เช่น คานตามยาวตัวที่ 10 ในช่วงสะพานที่ 1 มีความเสียหาย 2 จุด คือ S1-GD1-d1 และ S1-GD1-d2 [2]



รูปที่ 45 จำนวนบริเวณต่าง ๆ ของสะพานธนรัศต์

ตารางที่ 10 แสดงตัวอย่างการกำหนดชื่อชิ้นส่วนและสัญลักษณ์ตัวย่อบริเวณต่าง ๆ [2]

ส่วนของโครงสร้าง	ชื่อชิ้นส่วน	รหัสชิ้นส่วน	บริเวณ
โครงสร้างส่วนบน	พื้นสะพาน (Deck)	DK	S
	คานตามยาว (Girder)	GD	S
	ค้ำยันตามยาว (Diaphragm)	DP	S
โครงสร้างส่วนล่าง	คานตามรัดหัวเสา (Cap Beam)	CB	P
	ค้ำยันตอม่อ (Bracing)	BC	P

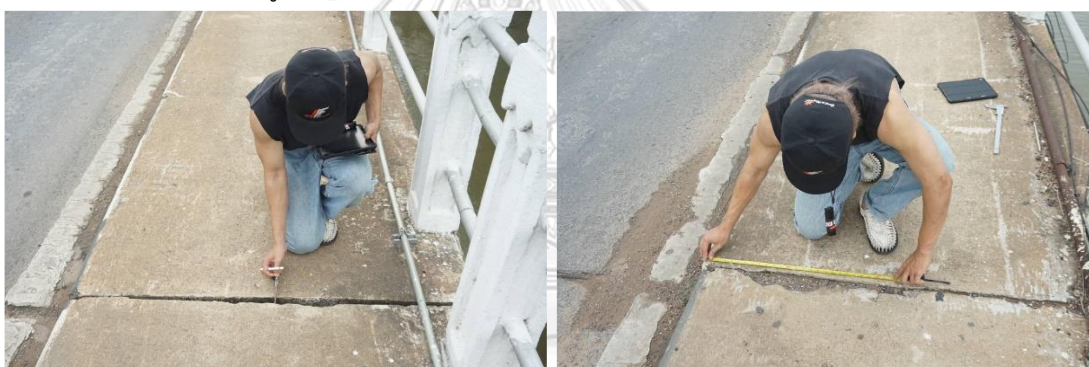
ส่วนของโครงสร้าง	ชื่อชิ้นส่วน	รหัสชิ้นส่วน	บริเวณ
โครงสร้างส่วนล่าง	เสาตอม่อ (Pier)	PR	P
	กำแพงตอม่อ (Pier Wall)	PW	P
	ฐานราก (Footing)	FT	P
ส่วนประกอบรอง	แผ่นรองรับคาน (Bearing)	BR	A หรือ P
	รอยต่อเพื่อการขยาย (Expansion Joint)	EJ	A หรือ P
	ผิวทาง (Wearing Surface)	WS	S
	ราวสะพาน (Railing)	RL	S
	ทางเท้า (Sidewalk)	SW	S

3.5.2 วิธีการตรวจสอบความเสียหายและขนาดความเสียหายภายนอกของสะพาน

ในงานวิจัยนี้ทำการหาขนาดความเสียหายของสะพานเนื่องจากโครงสร้างสะพานนั้นมีหลากหลายชิ้นส่วนและวัสดุที่แตกต่างกันความเสียหายที่เกิดขึ้นเลยมีหลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นรอยแตกร้าวของผิวทางแอสฟัลต์ รอยแตกร้าวของคอนกรีต การหลุดหล่อนของผิวคอนกรีต เป็นต้น โดยสะพานธนบุรีเป็นสะพานข้ามแม่น้ำที่มีการจราจรตลอดเวลาอีกทั้งความยากในการเข้าถึงบางส่วนของสะพานจึงไม่สามารถเข้าถึงทุกส่วนของสะพานในการวัดขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงด้วยเหตุนี้จึงทำการวัดความเสียหายที่สามารถเข้าถึงได้ ไม่ว่าจะเป็น ทางเท้า และ เสาตอม่อตัวที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่ได้จากแบบจำลองและพื้นที่จริง จากการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ที่สามารถเข้าถึงได้ โดยพบรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ 3 ส่วน ได้แก่ การแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณฐานรากเสาตอม่อที่ 1 จำนวน 6 จุด การหลุดหล่อนของผิวคอนกรีตบริเวณทางเท้าที่ 2 ในช่วงที่ 7 จำนวน 2 จุด และ ระยะรอยต่อทางเท้าทั้ง 14 จุด ในส่วนของการแตกร้าวของคอนกรีตใช้เวอร์เนียในการวัดขนาดความเสียหาย แสดงในรูปที่ การหลุดหล่อนของผิวคอนกรีตใช้ตะลันเมตรในการวัดความกว้างและความยาวสูงสุดของการหลุดหล่อนแสดงในรูปที่ และ ระยะรอยต่อทางเท้าจะทำการวัดระยะจากขอบทางเท้าเป็นระยะ 1.5 เมตร ทำการวัดขนาดความกว้างที่เกิดขึ้นโดยใช้เวอร์เนีย



รูปที่ 46 การวัดขนาดความเสียหายเสาตอม่อตัวที่ 1



รูปที่ 47 การวัดขนาดรอยต่อทางเดินเท้า

3.6 การหาระยะแต่ละส่วนของสะพาน

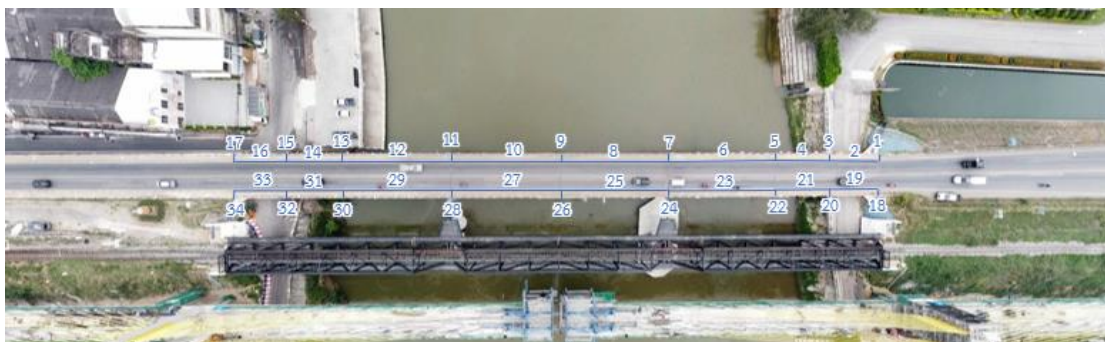
โดยงานวิจัยนี้ทำการวัดระยะของสะพานแบ่งตามกว้าง ยาวแต่ละบริเวณของสะพานและชิ้นส่วนของสะพานด้วย เทปวัดระยะ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระยะต่าง ๆ ของสะพานที่วัดได้จากแบบจำลองสามมิติและ หน่วยงานจริง โดยระยะที่จะทำการเปรียบเทียบเป็นเส้นทางส่วนบนของสะพาน ประกอบไปด้วย 34 เส้น แสดงดังรูปที่ 48 ถึง รูปที่ 50



รูปที่ 48 เส้นทางตรวจสอบระยะแต่ละส่วนของสะพานฝั่งตลาดราชบุรี



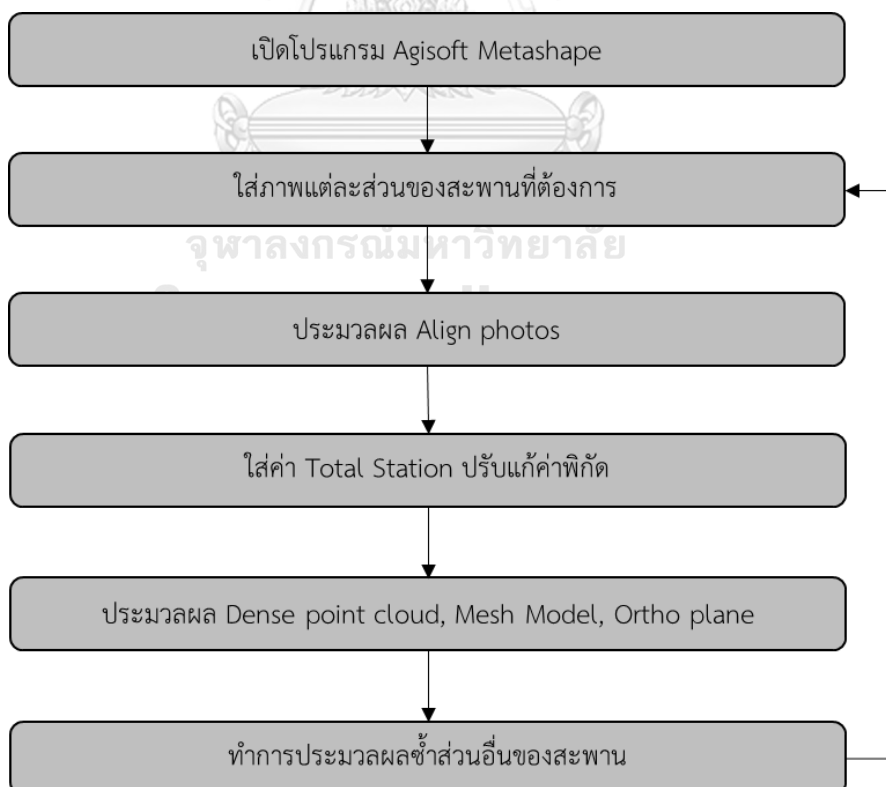
รูปที่ 49 เส้นทางตรวจสอบระยะแต่ละส่วนของสะพานของสะพานฝั่งค่ายภาณุรังษี



รูปที่ 50 เส้นทางตรวจสอบระยะแต่ละส่วนของสะพานส่วนกลางของสะพาน

3.7 การประมวลผลข้อมูล

นำภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับมาทำการประมวลผล โดยวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft MetaShape Professional โดยอาศัยทฤษฎีการสร้างจุดภาพสามมิติจากภาพหลายมุมมอง เพื่อทำการสร้างแบบจำลองสามมิติจุดก้อนเมฆของสะพานโดยทำการใช้จุดควบคุมภาพถ่านที่ได้จากกล้องประมวลผลรวมในการปรับแก้พิกัดให้มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งยิ่งขึ้น เพื่อสร้างระนาบออร์โธ (Orthoplane) ในการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 51



รูปที่ 51 กระบวนการประมวลผลโปรแกรม Agisoft Metashape

3.8 การหาจำนวนและรูปแบบการจัดวางจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้ทำการกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันมีการกระจายตัวที่ทั่วพื้นที่การตรวจสอบในการวิเคราะห์ผลของข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม เพื่อหาจำนวนและรูปแบบการจัดวางจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพของภาพออร์โธในแต่ละส่วนของสะพาน โดยจะแสดงผลในรูปของค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง Root mean Squared Error (RMSE) ของ GCP และ CP โดยในการวิเคราะห์ผลตามสมการที่ 5-9 เพื่อประเมินความถูกต้องของเชิงตำแหน่งของค่าพิกัดที่ได้จากการปรับแก้พิกัดตำแหน่ง จากนั้นนำรายงานการประมวลผลที่ได้มาพิจารณาเพื่อหาจำนวนและตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสมเพื่อสร้างภาพออร์โธในแต่ละส่วนของสะพาน ซึ่งในแต่ละส่วนของสะพานจะพิจารณาในระนาบที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. ส่วนบนของสะพานพิจารณาในแกน X แกน Y และ ระนาบ XY
2. ส่วนข้างของสะพานพิจารณาในแกน Y แกน Z และ ระนาบ YZ
3. ส่วนเสาดมื่อของสะพานพิจารณาในแกน X แกน Z และ ระนาบ XZ

3.9 การหาความกว้างหรือปริมาณความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพานและระยะแต่ละชิ้นส่วนของสะพานของภาพออร์โธ

การหาความกว้างหรือปริมาณความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพานและระยะแต่ละชิ้นส่วนของสะพานของภาพออร์โธ เลือกใช้โปรแกรม Quantum GIS (QGIS) เป็นโปรแกรมด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ (geographic information system: GIS) โดยเครื่องมือ Measure เพื่อวัดขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยอิงตำแหน่งพิกัด GIS ในภาพ และความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้พิจารณาในการตรวจสอบ โดยจำเป็นต้องกำหนดวิธีการวัดปริมาณความเสียหายจากวิธีการวัดความเสียหายตามมาตรฐานการตรวจสอบแต่ละชิ้นส่วนของสะพานที่มีวัสดุและลักษณะความเสียหายที่แตกต่างกันเป็นแนวทางในการวัดปริมาณความเสียหาย จากการตรวจสอบความเสียหายเบื้องต้นหน้างานของตัวสะพานธนารักษ์ พบว่ามีชนิดความเสียหายที่เห็นได้ชัดจำนวน 5 ประเภท ซึ่งมีแนวทางและกระบวนการในการวัดปริมาณความเสียหายดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แนวทางการวัดปริมาณความเสียหายด้วยโปรแกรม QGIS

ชนิดของวัสดุ	ชนิดความเสียหาย	แนวทางการวัดปริมาณ	หน่วย
ผิวคอนกรีต	ความกว้างรอยแตกกว้าง	วัดขนาดความกว้างและความยาวรอยแตกกว้าง	กว้าง - มิลลิเมตร ยาว - เซนติเมตร หรือเมตร
	การหลุดหล่อน	วัดพื้นที่และขนาดความกว้าง	พื้นที่ - ตารางเมตร กว้าง - เซนติเมตร
ผิวแอสฟัลต์	ความกว้างรอยแตกกว้าง	วัดขนาดความกว้างและความยาวรอยแตกกว้าง	กว้าง - มิลลิเมตร ยาว - เซนติเมตร หรือเมตร
	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียหน้าตัด	วัดพื้นที่	พื้นที่ - ตารางเมตร
รอยต่อเพื่อขยาย	ระยะการเคลื่อนขยาย	วัดขนาดความกว้างและความยาวรอยแตกกว้าง	กว้าง - มิลลิเมตร ยาว - เซนติเมตร หรือเมตร

3.10 การสอบเทียบระยะแต่ละชิ้นส่วนของสะพานและการตรวจสอบความเสียหายของสะพานจากภาพระนาบออร์โธกับค่าที่วัดจากพื้นที่จริง

นำผลการตรวจสอบระยะแต่ละชิ้นส่วนของสะพานและความเสียหายของสะพานที่วัดได้จากการประมวลผลอากาศยานไร้คนขับเปรียบเทียบกับความคลาดเคลื่อนที่วัดได้จากพื้นที่จริงไม่ว่าจะเป็นรอยแตกกว้างคอนกรีต การหลุดหล่อนของคอนกรีต ระยะรอยต่อทางเดินเท้า เป็นต้น เพื่อให้ทราบความแม่นยำของการตรวจสอบสะพานโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ

3.11 การตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นของสะพานตามมาตรฐานกรมทางหลวง

ทำการตรวจสอบความเสียหายหลัก (Principle Inspection) เพื่อหาสภาพการใช้งานของสะพานเพื่อทำการแก้ไขซ่อมบำรุงให้มีอายุการใช้งานยิ่งขึ้น ในช่วง 2 ช่วงตัวอย่างของสะพานธนบุรีรัชต์จากการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ เพื่อทราบถึงความสามารถในการประมวลผล และความสามารถการตรวจสอบในการตรวจสอบ รวมไปถึงข้อจำกัดในการตรวจสอบสะพานโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาการเก็บข้อมูลภาพถ่ายและการประมวลผลโดยใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีประสิทธิภาพสำหรับสร้างภาพระนาบออร์โธ (Orthoplan) ในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของสะพานเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหายด้วยตาเปล่า และทำการประเมินสภาพการใช้งานของสะพานจากการตรวจสอบหลัก เพื่อใช้ในการทดแทนการตรวจสอบแบบดั้งเดิมและประสิทธิภาพในการตรวจสอบมากยิ่งขึ้น โดยจากผลการศึกษามีผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

4.1 ตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่าย

โดยในการศึกษานี้ได้ทำการรังวัดจุดเด่นชัดบนพื้นผิวคอนกรีตของสะพานได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนบนของสะพาน ส่วนข้างของสะพาน และ ส่วนเสาตอม่อที่ 1 แสดงในรูปที่ 52 ถึง รูปที่ 54 ตามลำดับ และ แสดงพิกัด Marking แสดงในตารางที่ 12 ถึง ตารางที่ 14



รูปที่ 52 จุดที่เห็นเด่นชัดส่วนบนของสะพาน



รูปที่ 53 จุดที่เห็นเด่นชัดส่วนข้างของสะพาน



รูปที่ 54 จุดที่เห็นเด่นชัดส่วนเสาตอม่อที่ 1

ตารางที่ 12 แสดงค่าพิกัดของจุด Marking ส่วนบนของสะพาน ทั้ง 22 จุด

Name	N (m)	E (m)	Z (m)
P01_Topview	1497252.0274	589173.2738	7.3110
P02_Topview	1497231.5584	589172.5208	8.1110
P03_Topview	1497211.1264	589171.5078	9.1720
P04_Topview	1497190.6314	589171.1248	9.8720
P05_Topview	1497170.1104	589170.7198	10.3210
P06_Topview	1497149.6274	589170.3328	10.5640
P07_Topview	1497147.5340	589169.0673	10.5750
P08_Topview	1497108.6474	589169.5588	10.3720
P09_Topview	1497088.1314	589169.1668	9.9420
P10_Topview	1497067.6514	589168.7618	9.2890
P11_Topview	1497047.1824	589168.3478	8.3850
P12_Topview	1497047.3744	589159.7248	8.4050
P13_Topview	1497067.8494	589160.2008	9.2640
P14_Topview	1497088.3494	589160.6488	9.9390
P15_Topview	1497108.8364	589161.0058	10.3810
P16_Topview	1497129.3314	589161.3838	10.6150
P17_Topview	1497149.8274	589161.7778	10.5650
P18_Topview	1497170.3394	589162.1818	10.3230
P19_Topview	1497190.8114	589162.6008	9.8730
P20_Topview	1497211.3304	589162.9808	9.1680
P21_Topview	1497231.8124	589162.9098	8.1840
P22_Topview	1497252.2984	589162.4958	7.3060

หมายเหตุ Z (m) คือ ความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง TGM 2017

ตารางที่ 13 แสดงค่าพิกัดของจุด Marking ส่วนข้างของสะพาน ทั้ง 17 จุด

Name	N (m)	E (m)	Z (m)
P01_Sideriver	1497207.782	589163.296	7.182
P02_Sideriver	1497202.921	589162.159	7.816
P03_Sideriver	1497187.875	589162.329	6.182
P04_Sideriver	1497175.567	589162.898	7.202
P05_Sideriver	1497142.739	589160.952	9.802
P06_Sideriver	1497141.33	589160.926	9.956
P07_Sideriver	1497139.016	589160.897	9.327
P08_Sideriver	1497137.94	589160.878	9.846
P09_Sideriver	1497137.958	589160.864	8.921
P10_Sideriver	1497136.866	589160.85	9.321
P11_Sideriver	1497134.552	589160.79	9.952
P12_Sideriver	1497133.153	589160.771	9.804
P13_Sideriver	1497112.98	589160.413	8.753
P14_Sideriver	1497100.675	589161.458	7.204
P15_Sideriver	1497087.959	589159.871	8.28
P16_Sideriver	1497087.976	589160.443	6.181
P17_Sideriver	1497062.992	589159.35	7.449

ตารางที่ 14 แสดงค่าพิกัดของจุด Marking ส่วนบนของสะพาน ทั้ง 14 จุด

Name	N (m)	E (m)	Z (m)
P01_Pier1	1497202.570	589163.377	5.142
P02_Pier1	1497202.524	589165.888	5.123
P03_Pier1	1497202.485	589168.317	5.044
P04_Pier1	1497202.446	589170.815	5.124
P05_Pier1	1497202.684	589164.718	4.17
P06_Pier1	1497202.641	589167.076	4.161
P07_Pier1	1497202.590	589169.48	4.166
P08_Pier1	1497202.578	589163.363	3.317
P09_Pier1	1497202.526	589165.858	3.329
P10_Pier1	1497202.477	589168.263	3.391
P11_Pier1	1497202.439	589170.797	3.425
P12_Pier1	1497202.504	589164.637	2.111
P13_Pier1	1497202.472	589166.903	2.122
P14_Pier1	1497202.406	589169.512	2.102

4.2 ตำแหน่งสะพานระริตและตำแหน่งจุดอ้างอิง



รูปที่ 55 ตำแหน่งของสะพานระริต และ ตำแหน่งของจุดอ้างอิง

ตารางที่ 15 แสดงค่าพิกัดของจุดอ้างอิง

Name	N (m)	E (m)	Z (m)
C01	1497198.0298	589141.1266	3.4860
C02	1497082.4135	589046.6522	1.7966
C03	1497187.8934	589162.8408	9.9410
C04	1497137.9674	589161.8428	10.6020
C05	1497074.9414	589160.6538	9.5430

4.3 ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

ในการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับจำนวนทั้งหมด 943 ภาพ เพื่อหาจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยจะแบ่งการประมวลผลภาพถ่าย เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนบนของสะพานจำนวน 316 ภาพ ส่วนข้างของสะพานจำนวน 548 ภาพ และ ส่วนเสาตอม่อที่ 1 จำนวน 79 ภาพ โดยแต่ละส่วนของสะพานนั้นจะจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายและการวางที่แตกต่างกันเพื่อใช้ในการหาจำนวนที่เหมาะสมในการประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหาย ซึ่งผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

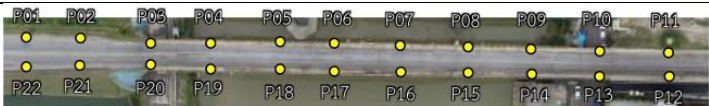
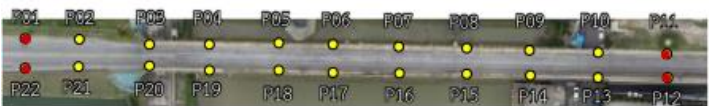
4.3.1 ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับส่วนบนของสะพาน

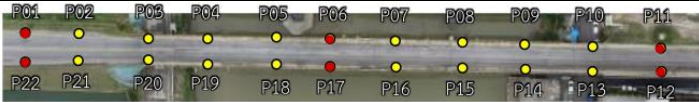
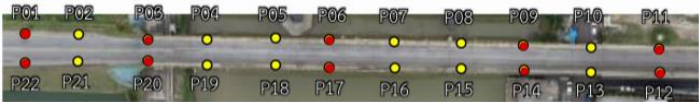
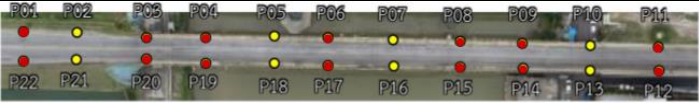
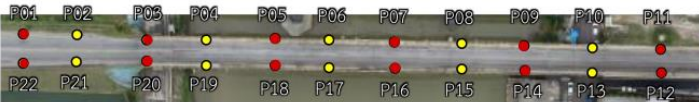

ในการประมวลผลส่วนบนของสะพานมีจำนวนภาพถ่ายทั้งหมด 316 ภาพ มีค่าความละเอียดจุดเท่ากับ 4.01 มิลลิเมตรต่อพิกเซล และค่าความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Reprojection Error) เท่ากับ 0.619 พิกเซล โดยมีจุดตรวจสอบทั้งหมด 22 จุด พบว่ารูปแบบการแบ่งสัดส่วนมีผลลัพธ์ในการประมวลผลที่มีประสิทธิภาพกว่ารูปแบบพื้นปลา โดยรายละเอียดดังนี้

4.3.1.1 ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับรูปแบบการแบ่งสัดส่วน

ทำการกำหนดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันในรูปแบบการแบ่งสัดส่วน (Portion, P) โดยใช้หมุดคู่ของจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control Point: GCP) ในการแบ่งสัดส่วนจุดตรวจสอบ (Check Point: CP) มีการกระจายตัวที่ทั่วพื้นที่การตรวจสอบทั้งหมด 7 รูปแบบ เปรียบเทียบหาตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสมในการประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหาย โดยสีแดงแสดงถึงจุดควบคุมภาพถ่าย และสีเหลืองแสดงถึงจุดตรวจสอบ

ตารางที่ 16 ตำแหน่งและการจัดวางรูปแบบการแบ่งสัดส่วนของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบส่วนบนของสะพาน

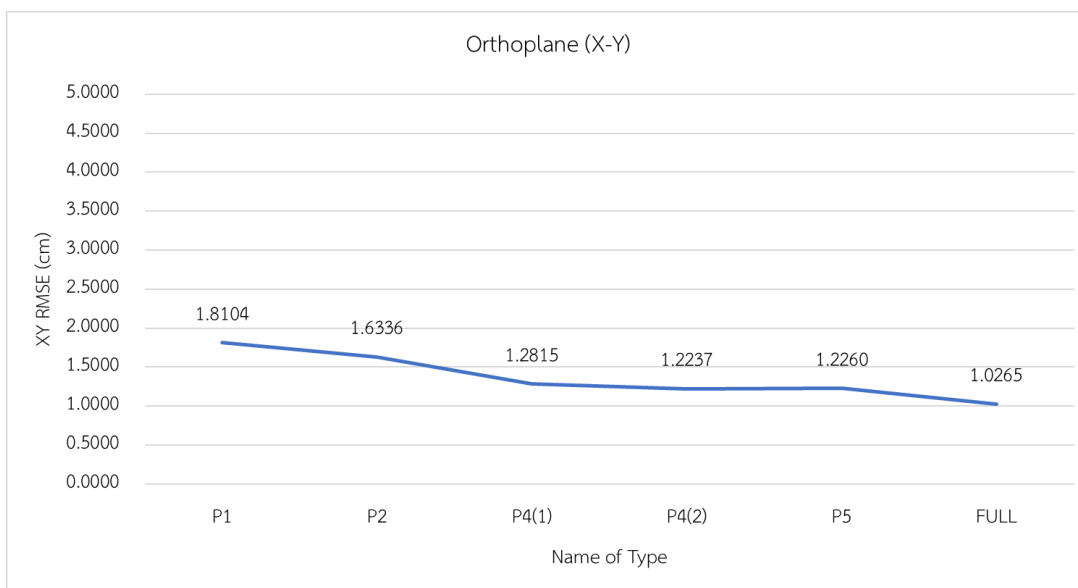
Name of Type	Number of GCP point	Number of CP point	Marking Point
NO GCP	0	22	
P1	4	18	

Name of Type	Number of GCP point	Number of CP point	Marking Point
P2	6	16	
P4(1)	10	12	
P4(2)	14	8	
P5	12	10	
FULL	22	0	

หมายเหตุ : หมดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point : GCP) (แดง) และ หมดตรวจสอบ (Check Point : CP) (เหลือง)

ตารางที่ 17 ผลการประมวลผลหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกัน
รูปแบบการแบ่งสัดส่วนส่วนบนของสะพาน

Name of Type	Number of GCP point	Number of CP point	X RMSE (cm)	Y RMSE (cm)	Z RMSE (cm)	XY RMSE (cm)
NO GCP	0	22	460.2100	210.8850	3597.4300	506.2270
P1	4	18	1.3934	1.1560	51.7579	1.8104
P2	6	16	1.2000	1.1085	1.2499	1.6336
P4(1)	10	12	0.9703	0.8372	1.0034	1.2815
P4(2)	14	8	0.9413	0.7820	1.1380	1.2237
P5	12	10	0.9726	0.7464	0.9842	1.2260
FULL	22	0	0.7938	0.6509	0.7549	1.0265



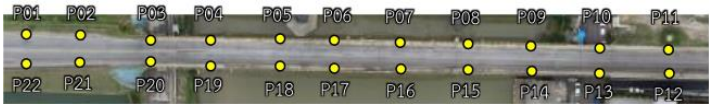
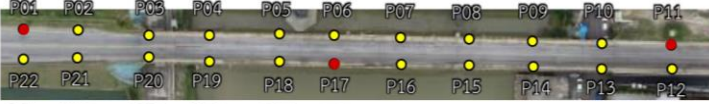
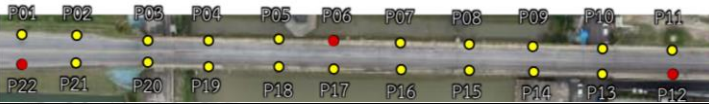
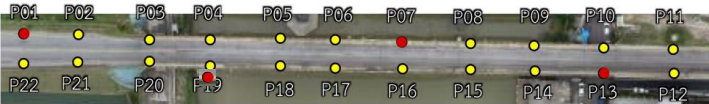
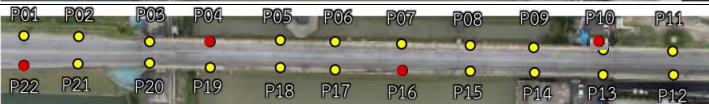
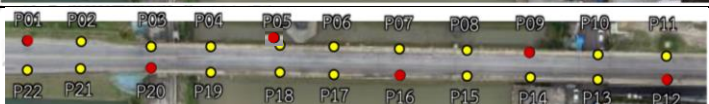




รูปที่ 56 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันรูปแบบการแบ่งสัดส่วนส่วนของสะพาน

จากรูปที่ 56 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันส่วนของสะพาน พบว่าหากใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่ 22 จุด (Full) พบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางสองมิติต่ำสุดเท่ากับ 1.0265 เซนติเมตร หากใช้การแบ่งสัดส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่ 2 ที่จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย 10 จุด (Portion 4 type 2, P4(2)) มีค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติรองลงมาเท่ากับ 1.2237 เซนติเมตร หากไม่ใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย (NO GCP) ระบายภาพออร์โธที่ได้อาจมีค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติอยู่ที่ 506.2270 เซนติเมตร และมีความคลาดเคลื่อนสองมิติคงที่ตั้งแต่จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย 6 จุด ในรูปแบบแบ่งสัดส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่ 1 (Portion 4 type 1, P4(1)) อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนสองมิติ ระหว่าง 1.0265-1.2815 เซนติเมตร

4.3.1.2 ผลการประมวลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับรูปแบบพื้นปลา

ทำการกำหนดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันในรูปแบบพื้นปลา (Zigzag, Z) โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายวางกระจายตัวในรูปแบบพื้นปลาทั่วพื้นที่การตรวจสอบ โดยมีทั้งหมด 10 รูปแบบ เปรียบเทียบหาตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสมในการประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหาย โดยสีแดงแสดงถึงจุดควบคุมภาพถ่ายและสีเหลืองแสดงถึงจุดตรวจสอบ

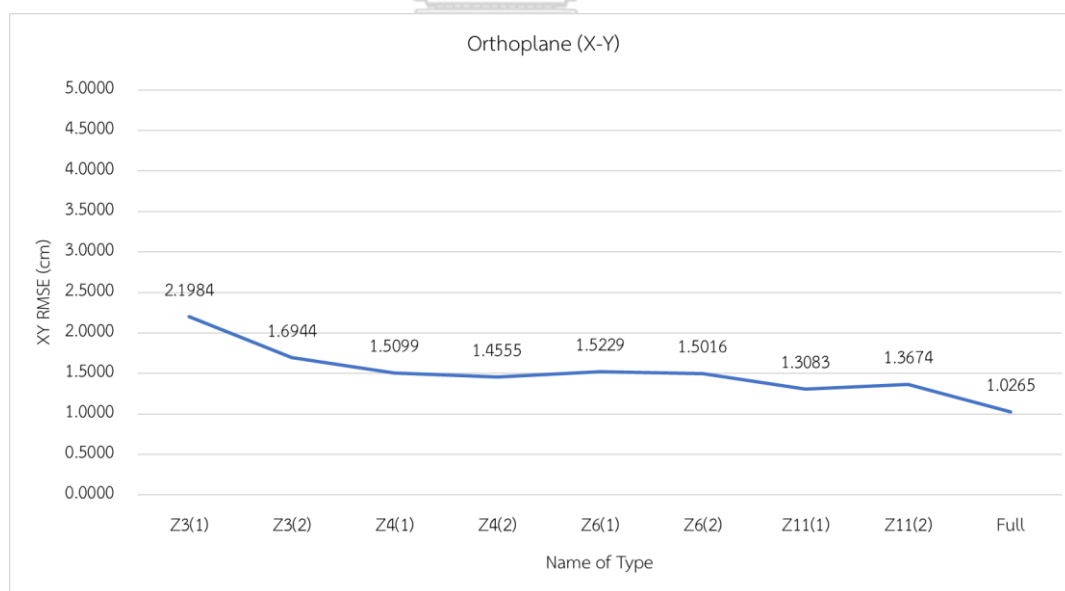
ตารางที่ 18 ตำแหน่งและการจัดวางรูปแบบพื้นปลาของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบส่วนบนของสะพาน

Name of Type	Number of GCP point	Number of CP point	Marking Point
NO GCP	0	22	
Z3(1)	3	19	
Z3(2)	3	19	
Z4(1)	4	18	
Z4(2)	4	18	
Z6(1)	6	16	
Z6(2)	6	16	
Z11(1)	11	11	
Z11(2)	11	11	
Full	22	0	

หมายเหตุ : หมดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point : GCP) (แดง) และ หมดตรวจสอบ (Check Point : CP) (เหลือง)

ตารางที่ 19 ผลการประมวลผลหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกัน
รูปแบบพื้นปลาส่วนบนของสะพาน

Name of Type	Number of GCP point	Number of CP point	X RMSE (cm)	Y RMSE (cm)	Z RMSE (cm)	XY RMSE (cm)
NO GCP	0	22	460.2100	210.8850	3597.4300	506.2270
Z3(1)	3	19	1.7198	1.3694	3.2290	2.1984
Z3(2)	3	19	1.2532	1.1404	1.9092	1.6944
Z4(1)	4	18	0.9360	1.1848	1.5993	1.5099
Z4(2)	4	18	1.1846	0.8457	2.7819	1.4555
Z6(1)	6	16	1.1516	0.9965	1.5555	1.5229
Z6(2)	6	16	1.0639	1.0597	1.2698	1.5016
Z11(1)	11	11	0.9777	0.8693	1.2553	1.3083
Z11(2)	11	11	0.7761	1.1258	0.9820	1.3674
Full	22	0	0.7938	0.6509	0.7549	1.0265



รูปที่ 57 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันรูปแบบพื้นปลาส่วนบนของสะพาน









จากรูปที่ 57 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันรูปแบบพื้นปลาส่วนบนของสะพาน พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามจำนวนจุด

ควบคุมภาพถ่าย พบว่าหากใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่ 22 จุด (FULL) พบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางสองมิติต่ำสุดเท่ากับ 1.0265 เซนติเมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติรองลงมาของ การวางแบบพื้นปลา 11 จุด รูปแบบที่ 1 (Zigzag 11 type 1,Z11(1)) จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย 11 จุด เท่ากับ 1.3083 เซนติเมตร หากไม่ใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย (NO GCP) ระบายภาพออร์โธที่ได้ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติอยู่ที่ 506.2270 เซนติเมตร และมีความคลาดเคลื่อนสองมิติคงที่ ตั้งแต่การวางแบบพื้นปลา 4 จุด รูปแบบที่ 1 (Zigzag 4 type 1,Z4(1)) จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย 3 จุดอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนสองมิติระหว่าง 1.0265-1.5099 เซนติเมตร

4.3.2 ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับส่วนข้างของสะพาน

ในการประมวลผลส่วนข้างของสะพานมีจำนวนภาพถ่ายทั้งหมด 548 ภาพ มีค่าความละเอียดจุดเท่ากับ 1.59 มิลลิเมตรต่อพิกเซล และค่าความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Reprojection Error) เท่ากับ 0.65 พิกเซล โดยมีจุดตรวจสอบทั้งหมด 17 จุด โดยทำการกำหนดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันในรูปแบบการแบ่งสัดส่วน (Portion, P) มีการกระจายตัวที่ทั่วพื้นที่การตรวจสอบทั้งหมด 8 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบหาตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสมในการประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหาย

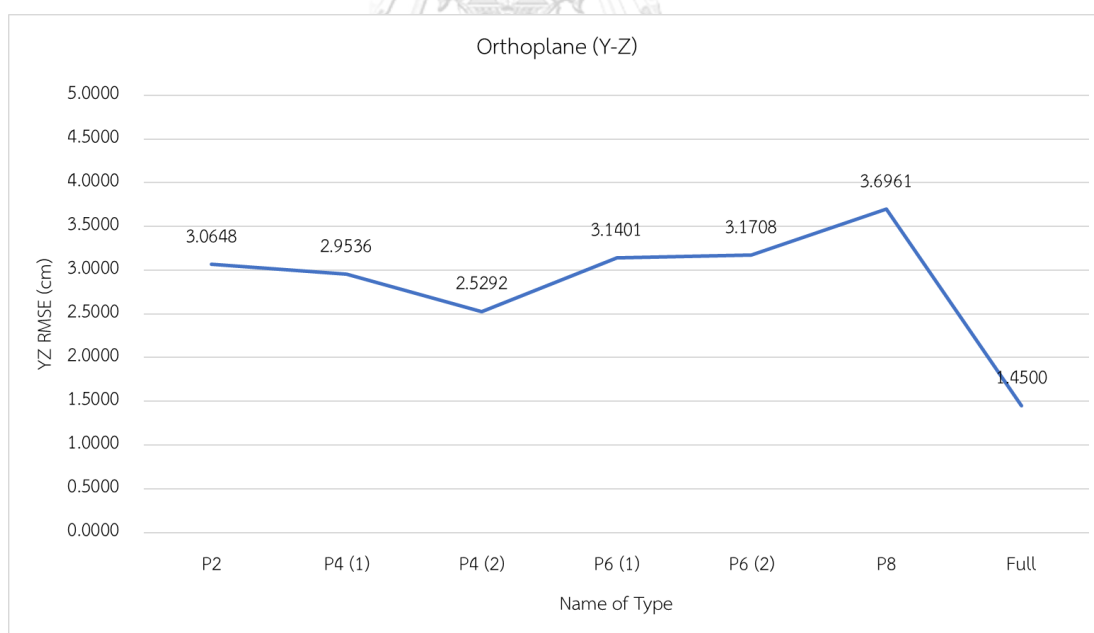
ตารางที่ 20 ตำแหน่งและการจัดวางจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบส่วนข้างของสะพาน

Name of Type	Number of GCP point	Number of CP point	Marking Point
No GCP	0	17	
P2	4	13	
P4(1)	6	11	
P4(2)	6	11	
P6(1)	8	9	
P6(2)	8	9	
P8	10	7	
Full	17	0	

หมายเหตุ : หมายเหตุควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point : GCP) (แดง) และ หมายเหตุตรวจสอบ (Check Point : CP) (เหลือง)

ตารางที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันส่วนข้างของสะพาน

Name of Type	Number of GCP point	Number of CP point	X RMSE (cm)	Y RMSE (cm)	Z RMSE (cm)	YZ RMSE (cm)
NO GCP	0	17	49.5132	360.4820	5684.9200	5696.3377
P2	4	13	5.6068	2.3203	2.0023	3.0648
P4 (1)	6	11	3.2590	2.6985	1.2008	2.9536
P4 (2)	6	11	3.2748	2.2331	1.1875	2.5292
P6 (1)	8	9	3.2200	2.9410	1.1003	3.1401
P6 (2)	8	9	2.8899	2.9633	1.1281	3.1708
P8	10	7	3.4170	3.2864	1.6915	3.6961
Full	17	0	1.8032	1.2248	0.7762	1.4500



รูปที่ 58 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันส่วนข้างของสะพาน


จากรูปที่ 58 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันส่วนข้างของสะพาน พบว่าหากใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่ 17 จุด (Full)

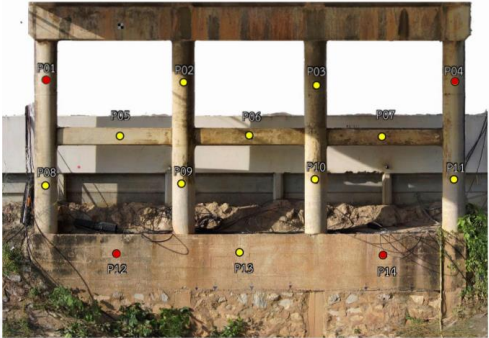



พบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางสองมิติต่ำสุดเท่ากับ 1.4500 เซนติเมตร หากวางจุดแบบสัดส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่ 2 โดยใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย 6 จุด (Portion 4 type 2, P4(2)) มีค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติรองลงมาเท่ากับ 2.5292 เซนติเมตร หากไม่ใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย (NO GCP) ระบุภาพออร์โธที่ได้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติอยู่ที่ 5696.3377 เซนติเมตร และมีความคลาดเคลื่อนสองมิติคงที่ตั้งแต่จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย 4 จุด ในรูปแบบสัดส่วน 2 ส่วน รูปแบบที่ 1 (Portion 2 type 1, P2(1)) อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนสองมิติ ระหว่าง 1.4500-3.0648 เซนติเมตร




4.3.3 ผลการประมวลผลภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับส่วนเสาตอม่อที่ 1

ในการประมวลผลส่วนเสาตอม่อที่ 1 มีจำนวนภาพถ่ายทั้งหมด 79 ภาพ มีค่าความละเอียดจุดเท่ากับ 2.17 มิลลิเมตรต่อพิกเซลและค่าความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Reprojection Error) เท่ากับ 0.722 พิกเซล โดยมีจุดตรวจสอบทั้งหมด 14 จุด โดยทำการกำหนดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันในรูปแบบมุม (Edge, E) และ การแบ่งสัดส่วน (Portion, P) มีการกระจายตัวที่ทั่วพื้นที่การตรวจสอบทั้งหมด 8 รูปแบบ เปรียบเทียบหาตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสมในการประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหาย

ตารางที่ 22 ตำแหน่งและการจัดวางจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบส่วนเสาตอม่อที่ 1

Name of Type	Number of GCP Point	Number of CP Point	Marking Point
No GCP	0	14	

Name of Type	Number of GCP Point	Number of CP Point	Marking Point
E4(1)	4	10	
E4(2)	4	10	
P1	6	8	
P2(1)	6	8	

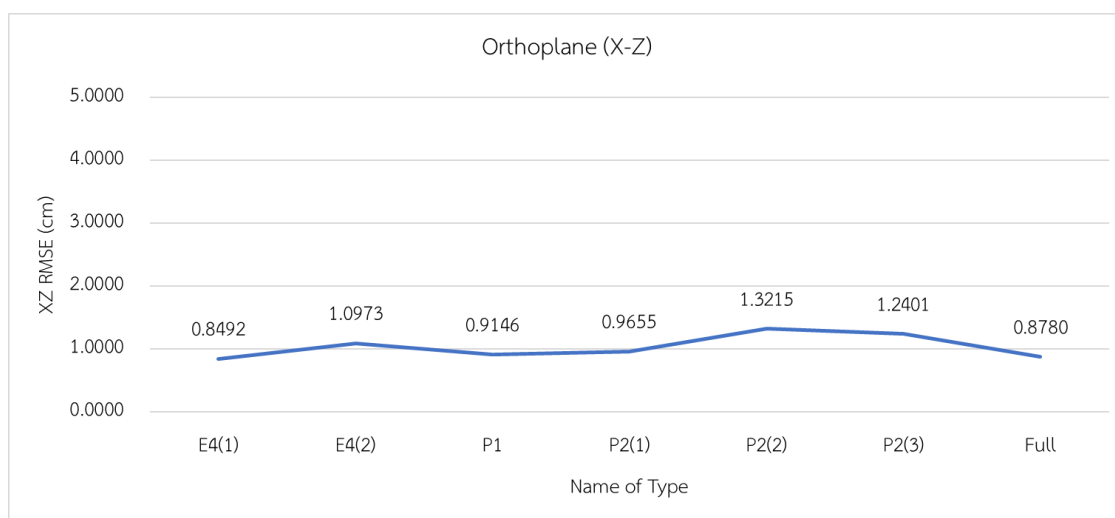
Name of Type	Number of GCP Point	Number of CP Point	Marking Point
P2(2)	6	8	
P2(3)	8	6	
Full	14	0	

หมายเหตุ : หมดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point : GCP) (แดง) และ หมดตรวจสอบ (Check Point : CP) (เหลือง)

ตารางที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันส่วนเสาตอม่อที่ 1

Name of Type	Number of GCP point	Number of CP point	X RMSE (cm)	Y RMSE (cm)	Z RMSE (cm)	XZ RMSE (cm)
No GCP	0	14	150.0820	525.3840	4471.9600	4474.4777
E4 (1)	4	10	0.6546	0.9077	0.5409	0.8492
E4 (2)	4	10	0.8899	0.9401	0.6419	1.0973
P1	6	8	0.7225	0.8383	0.5609	0.9146

Name of Type	Number of GCP point	Number of CP point	X RMSE (cm)	Y RMSE (cm)	Z RMSE (cm)	XZ RMSE (cm)
P2 (1)	6	8	0.7533	0.6303	0.6039	0.9655
P2 (2)	6	8	1.1590	1.0715	0.6348	1.3215
P2 (3)	8	6	0.8989	0.9907	0.8544	1.2401
Full	14	0	0.6962	0.5452	0.5350	0.8780



รูปที่ 59 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันส่วนเสาตอม่อที่ 1

จากรูปที่ 59 ภาพเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติของการใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่แตกต่างกันส่วนบนของสะพาน พบว่าหากไม่ใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย (NO GCP) ระบายภาพออร์โธที่ไ้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนทางสองมิติอยู่ที่ 4474.4777 เซนติเมตร หากใช้จุดควบคุมภาพถ่ายน้อยที่สุดวางแบบมุม 4 จุด รูปแบบที่ 1 (Edge 4 type 1, E4(1)) พบว่ามีความคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.8492 เซนติเมตร หากใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่ 14 จุด (Full) พบว่ามีความคลาเคลื่อนทางสองมิติเท่ากับ 0.8780 เซนติเมตร และมีความคลาดเคลื่อนสองมิติตั้งแต่จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย 4 จุดอยู่ในช่วง ระหว่าง 0.8492-1.32 เซนติเมตร

4.4 การกำหนดรหัสขึ้นส่วน

ตัวอย่างการกำหนดรหัสขึ้นส่วนของสะพานเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งความเสียหายที่เกิดขึ้นด้วยโดยจัดทำการตรวจสอบ 2 ช่วงของสะพานธนรัชต์เพื่อใช้ในการประเมินสภาพการใช้งานวิธีการตรวจสอบหลัก (Principle Inspection) แสดงในรูปที่ 61 ถึง รูปที่ 67



มุมมองที่ 1



มุมมองที่ 2



มุมมองที่ 3



มุมมองที่ 4

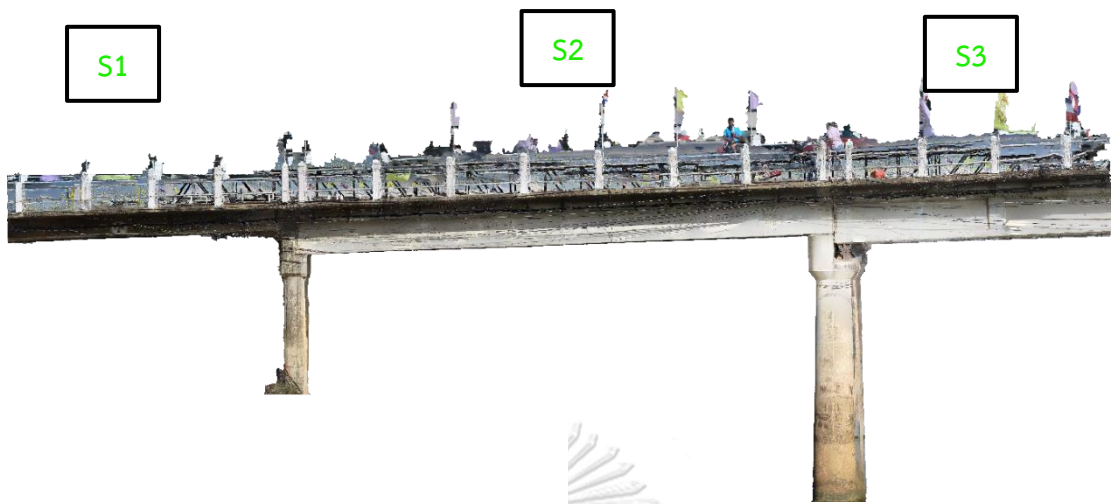
รูปที่ 60 ตัวอย่างแบบจำลองสามมิติของสะพานธนรัชต์บริเวณ ช่วงสะพานที่ 1 และ 2



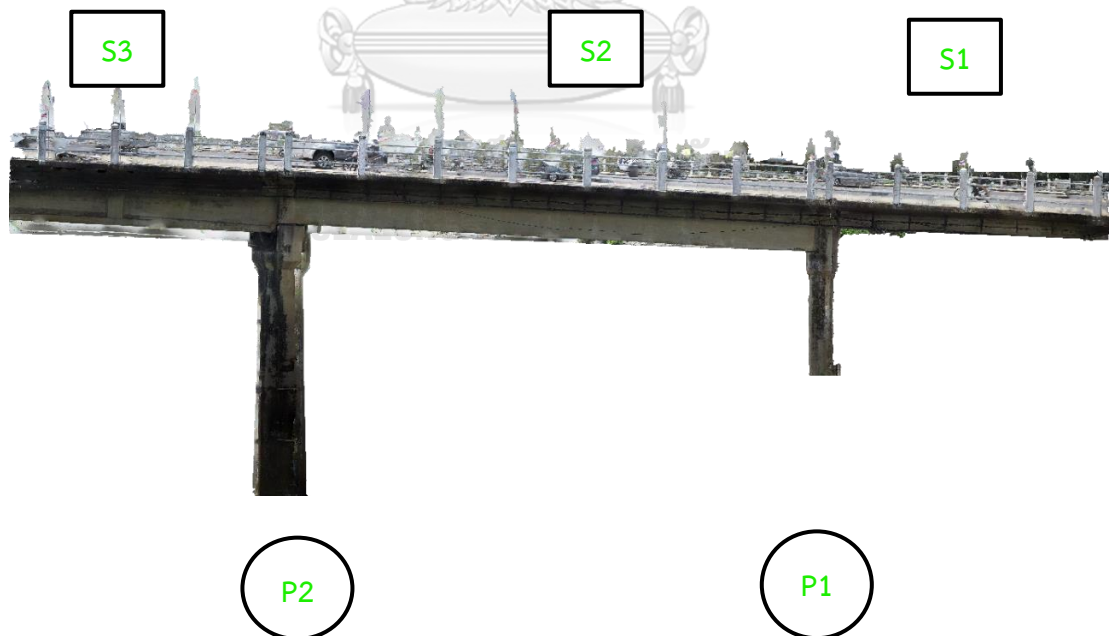
รูปที่ 61 แบบสะพานด้านบนที่มองด้านบนบริเวณ ช่วงสะพานที่ 1 และ 2



รูปที่ 62 แบบสะพานด้านบนที่มองด้านล่างบริเวณ ช่วงสะพานที่ 1 และ 2



รูปที่ 63 แบบสะพานด้านข้างฝั่งซ้าย



รูปที่ 64 แบบสะพานด้านข้างฝั่งขวา



รูปที่ 65 แบบสะพานด้านเสาต่อม่อ 1



รูปที่ 66 ส่วนหน้าของเสาตอม่อ 2



รูปที่ 67 ส่วนหลังของเสาตอม่อ 2

4.5 ผลการตรวจสอบความเสียหายพื้นผิวคอนกรีตเชิงตัวเลข

จากการตรวจสอบโดยภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ และทำการบันทึกภาพให้มีระยะเข้าใกล้กับวัตถุมากที่สุดเพื่อให้ได้คุณภาพสูงสุด โดยรูปแบบความเสียหายเชิงตัวเลขที่เป็นไปตามมาตรฐานการตรวจสอบสะพานของกรมทางหลวงนั้นจะมีรูปแบบความเสียหายหลักอยู่ 5 ประเภท ได้แก่ การหลุดหล่อนของคอนกรีต การแตกร้าวของคอนกรีต การแตกร้าวรอยต่อผิวทาง ระยะเคลื่อนขยายของรอยต่อเพื่อขยาย และ ปริมาณการสูญเสียเนื้อหน้าตัดของพื้นที่ผิวทาง ซึ่งผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

4.5.1 รอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก

รอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินเป็นไปตามตารางที่ 4 โดยแสดงตำแหน่งของความเสียหายแตกร้าวในรูปที่ 68 ถึง รูปที่ 70 และ ทำการวัดขนาดความเสียหายทั้งหมด 3 ตำแหน่งโดยจะทำการวัดขนาดความเสียหายทั้งหมด 6 จุดเพื่อหาขนาดความเสียหายสูงสุดในการพิจารณาประเมินระดับความเสียหายของรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงในตารางที่ 24



รูปที่ 68 ตำแหน่งการแตกร้าวของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนข้างของสะพานฝั่งรถไฟ






รูปที่ 69 ตำแหน่งการแตกร้าวของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนเสาตอม่อที่ 1



รูปที่ 70 ตำแหน่งการแตกร้าวของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนบนของสะพาน

ตารางที่ 24 ผลการตรวจระดับความเสียหายของการแตกร้าวของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

รายการ	ภาพประกอบ	ความกว้างรอยร้าว (มม.)							ระดับความเสียหาย
		1	2	3	4	5	6	MAX	
1		3	3	7	6	6	4	7	ขนาดใหญ่
2		2	7	10	6	7	8	10	ขนาดใหญ่
3		6	5	8	6	5	6	8	ขนาดใหญ่

4.5.2 การหลุดหล่อนของคอนกรีตเสริมเหล็ก

การหลุดหล่อนของคอนกรีตเสริมเหล็กมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินเป็นไปตามตารางที่ 5 โดยรูปที่ 71 ถึง รูปที่ 75 แสดงตำแหน่งของความเสียหายแบบหลุดหล่อน และ ทำการวัดขนาดความเสียหายทั้งหมด 16 ตำแหน่งโดยจะทำการวัดพื้นที่ที่เสียหายเพื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของความเสียหายมาพิจารณาประเมินระดับความเสียหายของการหลุดหล่อนของคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงในตารางที่ 25



รูปที่ 71 ตำแหน่งการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนข้างของสะพานฝั่งแม่น้ำ



รูปที่ 72 ตำแหน่งการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนข้างของสะพานฝั่งรถไฟ



รูปที่ 73 ตำแหน่งการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนบนของสะพาน














รูปที่ 74 ตำแหน่งการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนเสาต่อม่อที่ 1


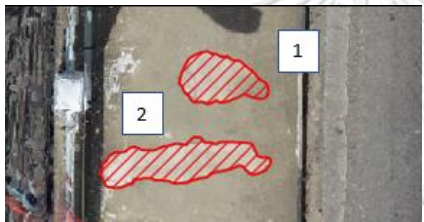

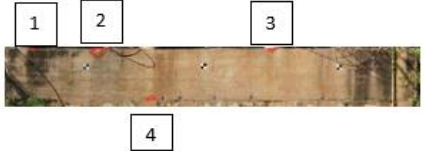



รูปที่ 75 ตำแหน่งการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนเสาต่อม่อที่ 2

ตารางที่ 25 ผลการตรวจระดับความเสียหายของการหลุดหล่อนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

รายการ	ภาพประกอบ	ขนาดความเสียหาย (ตร.ม.)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ระดับความเสียหาย
1		0.059	274	ขนาดใหญ่
2		0.087	333	ขนาดใหญ่
3		1. 0.015 2. 0.036	1. 138 2. 214	ขนาดเล็ก ขนาดใหญ่
4		0.015	138	ขนาดเล็ก
5		0.061	279	ขนาดใหญ่

รายการ	ภาพประกอบ	ขนาดความ เสียหาย (ตร.ม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ระดับความ เสียหาย
6		0.091	340	ขนาดใหญ่
7		1. 0.061 2. 0.019 3. 0.090	1. 279 2. 156 3. 339	ขนาดใหญ่ ขนาดใหญ่ ขนาดใหญ่
8		0.078	315	ขนาดใหญ่
9		0.053	260	ขนาดใหญ่
10		0.142	425	ขนาดใหญ่
11		0.04	226	ขนาดใหญ่

รายการ	ภาพประกอบ	ขนาดความ เสียหาย (ตร.ม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ระดับความ เสียหาย
12		0.007	94	ขนาดเล็ก
13		1. 0.118 2. 0.191	1. 388 2. 493	ขนาดใหญ่ ขนาดใหญ่
14		0.194	496	ขนาดใหญ่
15		1. 0.003 2. 0.026 3. 0.005 4. 0.009	1. 18 2. 182 3. 80 4. 107	ขนาดเล็ก ขนาดเล็ก ขนาดเล็ก ขนาดเล็ก
16		1. 0.048 2. 0.050	1. 247 2. 252	ขนาดใหญ่ ขนาดใหญ่

4.5.3 รอยแตกกว้างของรอยต่อผิวทางแอสฟัลต์

รอยแตกกว้างของรอยต่อผิวแอสฟัลต์มีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินเป็นไปตามตารางที่ 6 โดยแสดงตำแหน่งของความเสียหายแตกกว้างในรูปที่ 76 ทำการวัดขนาดความเสียหายทั้งหมด 2 ตำแหน่ง โดยจะทำการวัดขนาดความเสียหายทั้งหมด 6 จุดเพื่อหาขนาดความเสียหายสูงสุดในการพิจารณาประเมินระดับความเสียหายรอยแตกกว้างของรอยต่อผิวทางแอสฟัลต์ แสดงในตารางที่ 26



รูปที่ 76 ตำแหน่งการแตกกว้างรอยต่อผิวทางแอสฟัลต์ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ตารางที่ 26 ผลการตรวจระดับความเสียหายของการแตกกว้างรอยต่อผิวทางแอสฟัลต์ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

รายการ	ภาพประกอบ	ความกว้างรอยร้าว (มม.)							ระดับความเสียหาย
		1	2	3	4	5	6	MAX	
1		15	6	24	9	5	8	24	ขนาดใหญ่
2		10	9	72	69	56	3	72	ขนาดใหญ่





4.5.4 ระยะเคลื่อนขยายตัวรอยต่อเพื่อขยาย

รอยต่อเพื่อขยายของสะพานธรรฐ คือ รอยต่อเพื่อขยายแบบปิดผนึกบีบอัด (Compression Seal) ระยะเคลื่อนขยายเท่ากับ 50 มิลลิเมตร [11] แสดงตำแหน่งของชิ้นส่วนที่เกิดการเคลื่อนขยายในรูปที่ 77 และ ทำการวัดขนาดระยะเคลื่อนย้ายได้ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง โดยจะทำการวัดระยะขยายตัวทั้งหมด 6 จุด เพื่อหาระยะเคลื่อนขยายสูงสุดในการพิจารณาประเมินระดับระยะเคลื่อนขยายตัวของรอยต่อเพื่อขยาย แสดงในตารางที่ 27



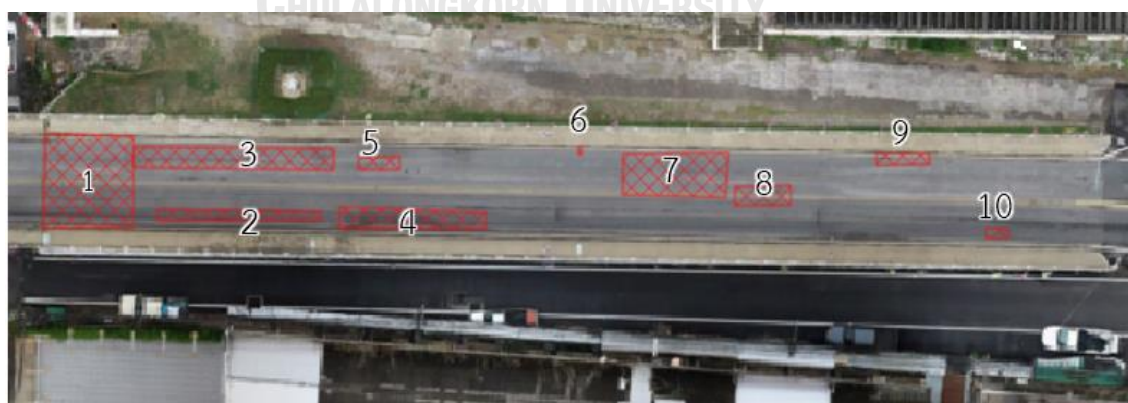
รูปที่ 77 ตำแหน่งการตรวจสอบระยะเคลื่อนขยายรอยต่อเพื่อขยายของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 27 ผลการตรวจสอบระยะเคลื่อนขยายรอยต่อเพื่อขยายของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

รายการ	ภาพประกอบ	ความกว้างรอยร้าว (มม.)							ระดับ ความ เสียหาย
		1	2	3	4	5	6	MAX	
1		13	18	18	18	17	19	19	ผ่าน
2		15	13	9	14	11	9	15	ผ่าน
3		18	14	15	19	17	15	19	ผ่าน
4		15	15	19	19	19	16	19	ผ่าน

4.5.5 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของผิวทางแอสฟัลต์


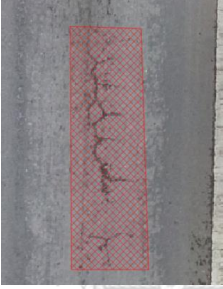


เปอร์เซ็นต์การสูญเสียหน้าพื้นที่หน้าตัดของผิวทางแอสฟัลต์มีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินเป็นไปตามตารางที่ 7 โดยแสดงตำแหน่งของความเสียหายแตกร้าวในรูปที่ 78 และ ทำการวัดขนาดความเสียหายทั้งหมด 3 ตำแหน่งโดยจะทำการวัดให้ครอบคลุมพื้นที่ที่เสียหายทั้งหมดเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวทางทั้งหมดเพื่อใช้ในการพิจารณาประเมินระดับความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์ แสดงในตารางที่ 28

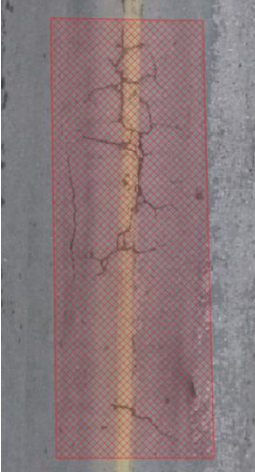
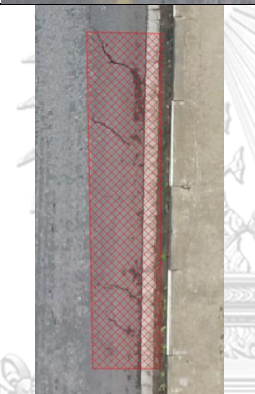



รูปที่ 78 ตำแหน่งความเสียหายบนพื้นที่หน้าตัดผิวทางแอสฟัลต์บริเวณส่วนเชิงลาดสะพานที่ 2 ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 28 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียหน้าตัดของผิวทางบริเวณเชิงลาดที่ 2

รายการ	ภาพประกอบ	ขนาดความเสียหาย (ตร.ม.)
1		46.411
2		9.274
3		23.805

รายการ	ภาพประกอบ	ขนาดความเสียหาย (ตร.ม.)
4		15.462
5		2.862
6		0.142
7		24.860

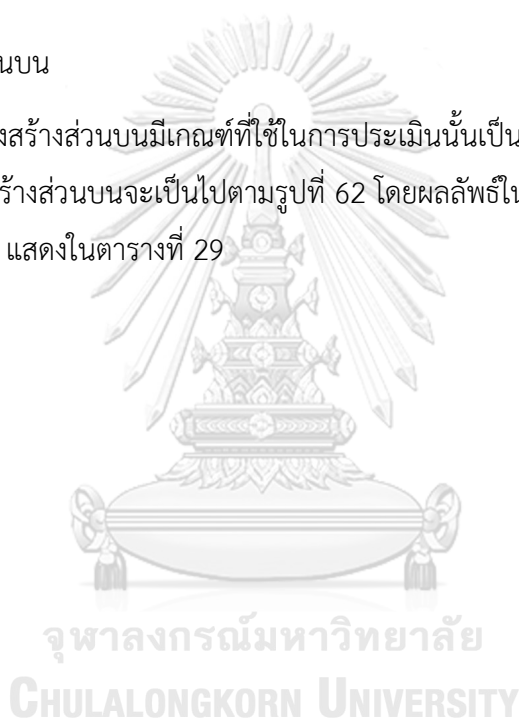
รายการ	ภาพประกอบ	ขนาดความเสียหาย (ตร.ม.)
8		6.181
9		3.346
10		1.292
พื้นที่ความเสียหายรวม		87.224
พื้นที่ผิวทางทั้งหมดเชิงลาดสะพาน 2		553.178
เปอร์เซ็นต์ความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่ผิวทางทั้งหมดเชิงลาดสะพาน 2		15.77
ระดับความเสียหาย		พอใช้

4.6 ผลการตรวจสอบของสะพานจากการตรวจสอบหลัก (Principle Inspection)


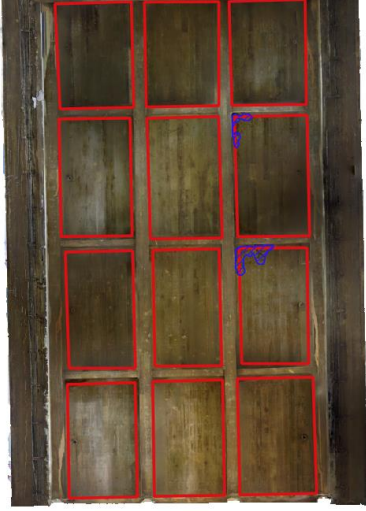
จากการตรวจสอบหลัก (Principle Inspection) สะพานธนบุรีเพื่อหาสภาพการใช้งานของ สะพาน ทำการแก้ไขซ่อมบำรุงให้มีอายุการใช้งานยิ่งขึ้น โดยคู่มือตรวจสอบสะพานกรมทางหลวง แนะนำให้ทำทุก ๆ 4 ปี สำหรับสะพาน ที่มีระดับสภาพการใช้งานตั้งแต่พอใช้ลงมา ($OCR < 3$) และ ทุก ๆ 6 ปี สำหรับสะพานตั้งแต่สภาพดีพอใช้ขึ้นไป ($OCR > 4$) [2] ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ทำการ ตรวจสอบใน 2 ช่วงตัวอย่างของสะพาน โดยจะสามารถแบ่ง ส่วนของโครงสร้าง ได้ 3 ส่วน ได้แก่ โครงสร้างส่วนบน โครงสร้างส่วน และส่วนประกอบรอง โดยมีผลลัพธ์การศึกษา ดังนี้

4.6.1 โครงสร้างส่วนบน



ในส่วนของโครงสร้างส่วนบนมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินนั้นเป็นไปตาม โดยมีรหัสชั้นส่วนและ รหัสบริเวณของโครงสร้างส่วนบนจะเป็นไปตามรูปที่ 62 โดยผลลัพธ์ในการตรวจสอบสภาพการใช้งาน ของโครงสร้างส่วนบน แสดงในตารางที่ 29















ตารางที่ 29 ตัวอย่างผลการประเมินการตรวจสอบหลักของโครงสร้างส่วนบน



ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชิ้นส่วน	รายละเอียดความ เสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
โครงสร้างส่วนบน	S1	DK1	มีร่องรอยความเสียหายเล็กน้อยตามผิวใต้ท้องสะพานเนื่องจากการเสียดสี		4
โครงสร้างส่วนบน	S2	DK1	เกิดคราบเชื้อเชื้อ 2 จุด มีขนาดทั้งหมดเท่ากับ 0.554 ตร.ม. คิดเป็น 0.721 % ของพื้นที่ทั้งหมด		4

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชิ้นส่วน	รายละเอียดความ เสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
โครงสร้างส่วนบน	S2	GD1	อยู่ในสภาพดี ไม่พบ ความเสียหายที่เกิด ขึ้นกับชิ้นส่วน		5
					
โครงสร้างส่วนบน	S2	GD2	เกิดร้าวขึ้นเกือบ 5 จุด มี ขนาดทั้งหมดเท่ากับ 1.746 ตร.ม. คิดเป็น 5.63 % ของพื้นที่ ทั้งหมด		4
					
โครงสร้างส่วนบน	S2	GD3	อยู่ในสภาพดี ไม่พบ ความเสียหายที่เกิด ขึ้นกับชิ้นส่วน		5
					

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชิ้นส่วน	รายละเอียดความ เสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
โครงสร้างส่วนบน	S2	GD4	เกิดคราบซีเมนต์ 1 จุด มี ขนาดเท่ากับ 0.18 ตร. ม. คิดเป็น 0.58 % ของ พื้นที่ทั้งหมด		4
					
โครงสร้างส่วนบน	S2	DP1	อยู่ในสภาพดี ไม่พบ ความเสียหายที่เกิด ขึ้นกับชิ้นส่วน		5
					
โครงสร้างส่วนบน	S2	DP2	อยู่ในสภาพดี ไม่พบ ความเสียหายที่เกิด ขึ้นกับชิ้นส่วน		5
					

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชิ้นส่วน	รายละเอียดความ เสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
โครงสร้างส่วนบน	S2	DP3	อยู่ในสภาพดี ไม่พบ ความเสียหายที่เกิด ขึ้นกับชิ้นส่วน		5
					
โครงสร้างส่วนบน	S2	DP4	เกิดคราบซีเกลือ 1 จุด มี ขนาดเท่ากับ 0.965 ตร. ม. คิดเป็น 22.98 % ของพื้นที่ทั้งหมด		3
					
โครงสร้างส่วนบน	S2	DP5	อยู่ในสภาพดีไม่มีความ เสียหาย		5
					

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชิ้นส่วน	รายละเอียดความ เสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
โครงสร้างส่วนบน	S2	DP6	อยู่ในสภาพดี ไม่พบ ความเสียหายที่เกิด ขึ้นกับชิ้นส่วน		5
					
โครงสร้างส่วนบน	S2	DP7	เกิดคราบจี้เกลือ 1 จุด มี ขนาดเท่ากับ 1.019 ตร. ม. คิดเป็น 24.26 %ของ พื้นที่ทั้งหมด		3
					
โครงสร้างส่วนบน	S2	DP8	อยู่ในสภาพดี ไม่พบ ความเสียหายที่เกิด ขึ้นกับชิ้นส่วน		5
					

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชิ้นส่วน	รายละเอียดความ เสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
โครงสร้างส่วนบน	S2	DP9	อยู่ในสภาพดี ไม่พบ ความเสียหายที่เกิด ขึ้นกับชิ้นส่วน		5
					
				สภาพความเสียหายโดยรวมของโครงสร้างส่วนบน	



จากการตรวจสอบหลักโครงสร้างส่วนบนพบว่า โดยสภาพความเสียหายที่พบเจอส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นนั้นได้แก่ คราบเกลือเนื่องจากสภาพโดยรอบของสะพานนั้นเป็นสะพานข้ามแม่น้ำกกซึ่งเป็นน้ำกร่อยทำให้เกิดคราบเกลือได้ง่ายโดยมีคะแนนต่ำสุดอยู่ที่ ระดับ 3 หรือสภาพพอใช้ ค้ำยันตามยาวที่ 4 (Diaphragm4, DP4) และ ค้ำยันตามยาวที่ 7 (Diaphragm7, DP7) บริเวณบริเวณช่วงสะพานที่ 2 (Span2, S2) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงหรือส่วนที่สำคัญ พิจารณาการซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลา



4.6.2 โครงสร้างส่วนล่าง





ในส่วนของโครงสร้างส่วนล่างมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินนั้นเป็นไปตามตารางที่ 41 โดยมีรหัสชิ้นส่วนและรหัสบริเวณของโครงสร้างส่วนบนจะเป็นไปตามรูปที่ 65 รูปที่ 67 โดยผลลัพธ์ในการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างส่วนบน แสดงในตารางที่ 30

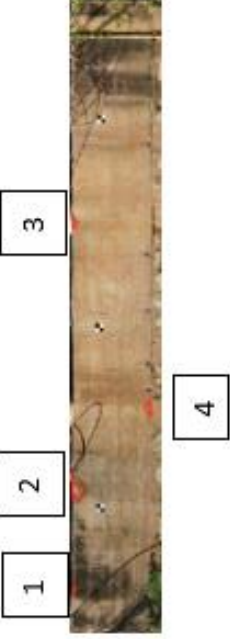
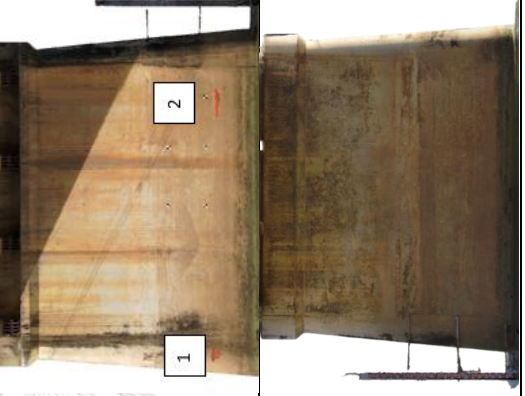


ตารางที่ 30 ตัวอย่างผลการประเมินการตรวจสอบหลักของโครงสร้างส่วนล่าง

ส่วนของโครงสร้าง	รหัสบริเวณ	ชิ้นส่วน	รายละเอียดความเสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการใช้งาน
โครงสร้างส่วนล่าง	P1	CB1	เกิดการกะเทาะหลุดหล่อน 1 จุด ขนาด 0.194 m2 มีการสูญเสียหน้าตัด ไม่เห็นเหล็กเสริม คิดเป็น 4.212 % ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด ซึ่งมีขนาดใหญ่ ไม่เห็นเหล็กเสริม		3
โครงสร้างส่วนล่าง	P1	PR1	อยู่ในสภาพดี ไม่พบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วน		5

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชั้นส่วน	รายละเอียดความเสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
โครงสร้าง ส่วนล่าง	P1	PR2	อยู่ในสภาพดี มีคราบเกลือ เล็กน้อย		4
โครงสร้าง ส่วนล่าง	P1	PR3	อยู่ในสภาพดี มีคราบเกลือ เล็กน้อย		4

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชั้นส่วน	รายละเอียดความเสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
โครงสร้าง ส่วนล่าง	P1	PR4	อยู่ในสภาพดี มีคราบเกลือ เล็กน้อย		4
โครงสร้าง ส่วนล่าง	P1	BC1	อยู่ในสภาพดี ไม่พบความ เสียหายที่เกิเกิดขึ้นกับชิ้นส่วน		5
โครงสร้าง ส่วนล่าง	P1	BC2	อยู่ในสภาพดีมีคราบเกลือ เล็กน้อย		4
โครงสร้าง ส่วนล่าง	P1	BC3	อยู่ในสภาพดีมีคราบเกลือ เล็กน้อย		4

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชั้นส่วน	รายละเอียดความเสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
โครงสร้าง ส่วนล่าง	P1	FT1	เกิดการหลุดหล่อน 4 จุดไม่เห็นเหล็กเสริม ได้แก่ 0.003 ,0.026 ,0.005 และ 0.009 ตร.ม. ตามลำดับ คิดทั้งหมดเป็น 0.547 % ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด ตำแหน่งที่ 2 เป็นการหลุดหล่อน ขนาดใหญ่ไม่เห็นเหล็กเสริม		3
โครงสร้าง ส่วนล่าง	P2	PW1	เกิดการหลุดหล่อนเนื่องจากการชน 2 จุด มีขนาดเท่ากับ 0.247 และ 0.252 ตร.ม. ซึ่งเป็นรอยแตกขนาดใหญ่ไม่เห็นเหล็กเสริม		3
โครงสร้างส่วนล่าง					3



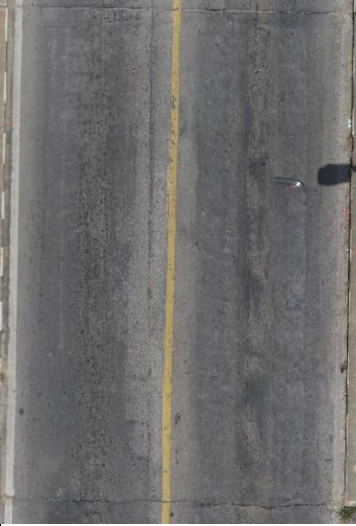
จากการตรวจสอบหลักโครงสร้างส่วนล่างพบว่า โดยสภาพความเสียหายที่พบเจอส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นได้แก่ ทรานเกลื้อและการหลุดล่อนของคอนกรีต โดยมีคะแนนต่ำสุดอยู่ที่ ระดับ 3 หรือสภาพพอใช้ของชิ้นส่วนคานตามรัดหัวเสาที่ 1 (Cap Beam 1, CB1) และ ฐานรากที่ 1 (Footing 1, FT1) ในบริเวณตอม่อที่ 1 (Pier 1, P1) และ ชิ้นส่วนกำแพงตอม่อที่ 1 (Pier Wall 1, PW1) ในบริเวณตอม่อที่ 2 (Pier2, P2) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่รับแรงหรือส่วนที่สำคัญพิจารณาการซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลา




4.6.3 ส่วนประกอบรอง





ในส่วนของโครงสร้างส่วนล่างมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินนั้นเป็นไปตามตารางที่ 42 ตารางที่ 45 โดยมีรหัสชิ้นส่วนและรหัสบริเวณของโครงสร้างส่วนบนจะเป็นไปตาม รูปที่ 61 รูปที่ 67 โดยผลลัพธ์ในการตรวจสอบสภาพการใช้งานของโครงสร้างส่วนบน แสดงตารางที่ 31









ตารางที่ 31 ตัวอย่างผลการประเมินการตรวจสอบหลักของโครงสร้างส่วนประกอบ

ส่วนของโครงสร้าง	รหัสบริเวณ	ชิ้นส่วน	รายละเอียดความเสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการใช้งาน
ส่วนประกอบ	A1	EJ1	เกิดรอยแตกร้าวที่รอยต่อผิวทางโดยมีความกว้างรอยต่อผิวทางมีเฉลี่ย 11.17 มม. และ กว้างสูงสุด 24 มม.		2
ส่วนประกอบ	S1	SW1	เกิดการหลุดล่อนของคอนกรีตบริเวณด้านข้างของสะพานมีขนาด 0.061 , 0.019 และ 0.090 ตร.ม. ไม่เห็นเหล็กเสริม และไม่มีการรับน้ำหนักของตัวสะพาน		3
ส่วนประกอบ	S1	WS1	อยู่ในสภาพดีไม่มีความเสียหาย		5

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชั้นส่วน	รายละเอียดความเสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
ส่วนประกอบ อบริง	S1	SW2	เกิดการเสียหายน้ำตักของคอนกรีตชน บริเวณขอบสะพานขนาด 0.007 ตร.ม. ซึ่งเป็นรอยแตกขนาดเล็ก และ เกิดการ หลุดล่อนของคอนกรีตบริเวณด้านข้าง ของสะพานมีขนาด 0.059 ตร.ม. ซึ่ง เป็นความเสียหายขนาดใหญ่ ไม่เห็น เหล็กเสริม และไม่เกิดการรับน้ำหนัก ของตัวสะพาน		3
ส่วนประกอบ อบริง	P1	EJ1	มีสิ่งสกปรกอุดต้นตามรอยต่อ		4
ส่วนประกอบ อบริง	S2	SW1	อยู่ในสภาพดีไม่มีความเสียหาย		5

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชั้นส่วน	รายละเอียดความเสียหาย	ภาพความเสียหาย	สภาพการ ใช้งาน
ส่วนประกอบ อปรง	S2	WS1	อยู่ในสภาพดีไม่มีความเสียหาย		5
ส่วนประกอบ อปรง	S2	SW2	อยู่ในสภาพดีไม่มีความเสียหาย		5
ส่วนประกอบ อปรง	P2	EJ1	มีสิ่งสกปรกอุดตันตามรอยต่อ		4
ส่วนประกอบ อปรง	P2	BR1	อยู่ในสภาพดีไม่มีความเสียหาย		5

ส่วนของ โครงสร้าง	รหัส บริเวณ	ชั้นส่วน	รายละเอียดความเสียหาย	ภาพความเสียหาย		สภาพการ ใช้งาน
ส่วนประกอบ อบริง	P2	BR2	อยู่ในสภาพดีไม่มีมีความเสียหาย			5
ส่วนประกอบ อบริง	P2	BR3	อยู่ในสภาพดีไม่มีมีความเสียหาย			5
ส่วนประกอบ อบริง	P2	BR4	อยู่ในสภาพดีไม่มีมีความเสียหาย			5
ส่วนประกอบอบริง						2

จากการตรวจสอบหลักส่วนประกอบของสะพานพบว่า โดยสภาพความเสียหายที่พบเจอส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นคือ การใช้งาน โดยความเสียหายที่เกิดจากการใช้งานในแต่ละชั้นของสะพานโดยมีคะแนนต่ำสุดอยู่ที่ ระดับ 2 หรือสภาพชำรุด ได้แก่ ชั้นส่วนรอยต่อที่ 1 (Expansion Joint 1, EJ1) บริเวณเชิงลาดสะพานที่ 1 (Approach 1, A1) ซึ่งเป็นชั้นส่วนที่ไม่ได้รับแรง ทำการดำเนินการซ่อมแซมให้กลับคืนสู่ สภาพเดิม

4.6.4 ผลการประเมินสภาพความเสียหายหลัก

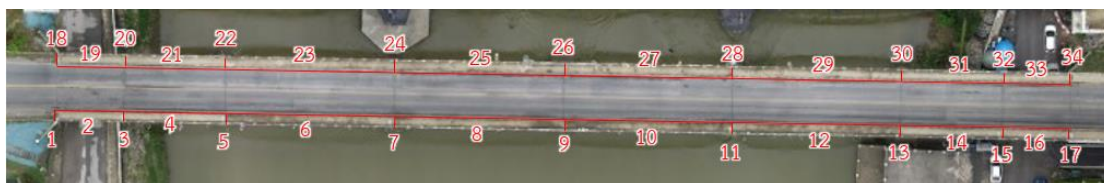
จากการตรวจสอบความเสียหายหลักของสะพานธนรัชต์ในส่วนของ 2 ช่วงของสะพาน พบว่า โครงสร้างส่วนบนและล่างซึ่งเป็นโครงสร้างหลักมีสภาพการใช้งานในระดับพอใช้และสภาพการใช้งานของส่วนประกอบอยู่ในระดับชำรุด ควรทำการพิจารณาการซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลาในทุก 4 ปี

ตารางที่ 32 ผลการประเมินสภาพการใช้งานของสะพาน 2 ช่วงของสะพาน

ส่วนของโครงสร้าง	สภาพการใช้งาน
โครงสร้างส่วนบน	3
โครงสร้างส่วนล่าง	3
ส่วนประกอบ	2
Overall Condition Rating	3

4.7 การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบระยะของชิ้นส่วนต่าง ๆ ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากโปรแกรม QGIS กับขนาดพื้นที่หน้างานจริง

จากการวัดระยะแต่ละส่วนของส่วนบนของสะพานโดยใช้เทปวัดระยะเปรียบเทียบกับภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับทั้งหมด 34 จุดแสดงในรูปที่ 79 ได้ผลดังตารางที่ 33

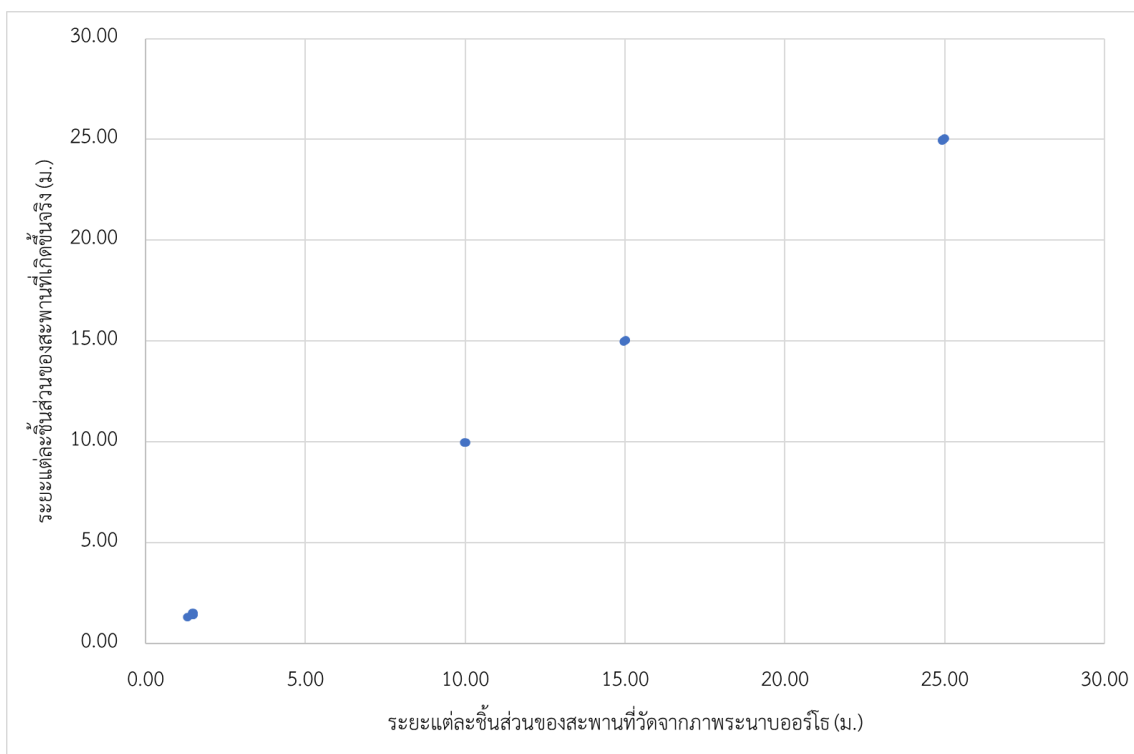


รูปที่ 79 ตัวอย่างตำแหน่งระยะส่วนบนของสะพาน 34 จุด

ตารางที่ 33 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะของชิ้นส่วนส่วนบนของสะพานที่ได้จากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

รายการ	ระยะแต่ละชิ้นส่วนของสะพานที่เกิดขึ้นจริง (ม.)	ระยะแต่ละชิ้นส่วนของสะพานที่วัดจากภาพระนาบออร์โธ (ม.)	%ความคลาดเคลื่อน
1	1.50	1.49	0.43
2	10.02	10.00	0.23
3	1.47	1.49	1.05
4	14.99	15.01	0.18
5	1.47	1.47	0.18
6	24.91	24.95	0.18
7	1.46	1.42	3.04
8	24.99	25.04	0.19
9	1.29	1.34	4.13
10	24.96	25.00	0.13
11	1.46	1.55	5.86
12	24.94	24.99	0.21
13	1.46	1.51	3.57
14	15.02	15.05	0.22
15	1.49	1.54	3.85
16	9.97	9.98	0.05
17	1.49	1.52	2.29
18	1.48	1.46	0.93
19	9.97	9.98	0.07
20	1.49	1.50	0.14
21	14.96	14.99	0.18
22	1.48	1.45	2.45
23	24.91	24.97	0.23

รายการ	ระยะแต่ละชั้นส่วนของ สะพานที่เกิดขึ้นจริง (ม.)	ระยะแต่ละชั้นส่วนของสะพานที่วัดจาก ภาพระนาบออร์โธ (ม.)	%ความคลาด เคลื่อน
24	1.48	1.44	3.12
25	25.00	25.05	0.20
26	1.33	1.32	0.15
27	24.95	25.01	0.21
28	1.51	1.46	3.55
29	24.91	24.96	0.19
30	1.50	1.46	2.74
31	15.02	15.04	0.15
32	1.50	1.45	3.25
33	9.98	10.00	0.15
34	1.50	1.47	2.02
min			0.15
max			3.55
average			1.42



รูปที่ 80 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะของชั้นส่วนบนของสะพานที่ได้จากภาคสนามกับภาพถ่าย
อากาศยานไร้คนขับ

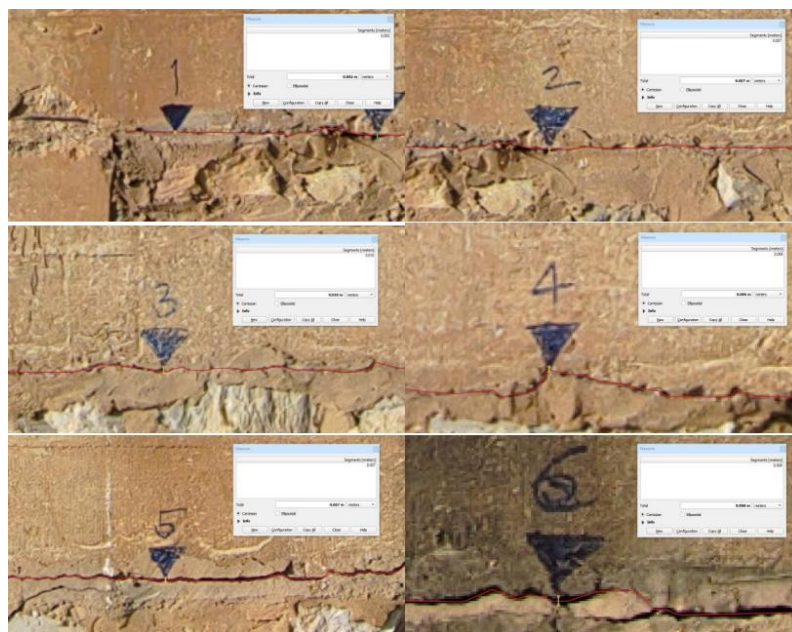
จากผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะของชั้นส่วนบนของสะพานที่ได้จากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ พบว่ามีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.42 ใกล้เคียงกับพื้นที่ความเป็นจริง

4.8 การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบรูปแบบความเสียหายต่าง ๆ ของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

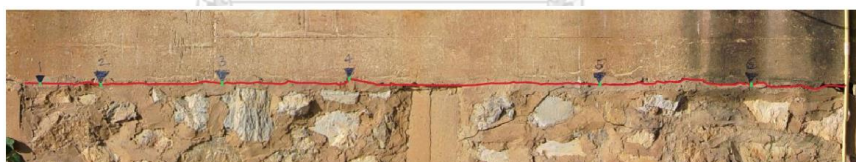
จากการวัดขนาดความเสียหายที่วัดได้จากการประมวลผลรวมระหว่างส่วนบนของสะพาน ส่วนข้างฝั่งแม่น้ำและเสาตอม่อที่ 1 ของอากาศยานไร้คนขับที่มีขนาดความละเอียดจุดเท่ากับ 1.87 มิลลิเมตรต่อพิกเซล นำมาเปรียบเทียบกับความเสียหายเกิดขึ้นจากพื้นที่จริง อย่างไรก็ตามไม่สามารถประเมินความเสียหายได้หลายตำแหน่ง เนื่องจากไม่สามารถเข้าถึงพื้นที่ความเสียหายได้ โดยผลลัพธ์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความเสียหายแต่ละรูปแบบมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน เมื่อขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงมากขึ้น เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนก็จะน้อยลงตามไปด้วย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแต่ละความเสียหายแสดงดังนี้

4.8.1 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของรอยแตกร้าวรอยแตกร้าวบนผิวสะพาน คอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

จากการวัดระยะความกว้างรอยร้าวโดยใช้เวอร์เนียเปรียบเทียบกับภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับทั้งหมด 6 จุดแสดงในรูปที่ 81 ได้ผลดังตารางที่ 34



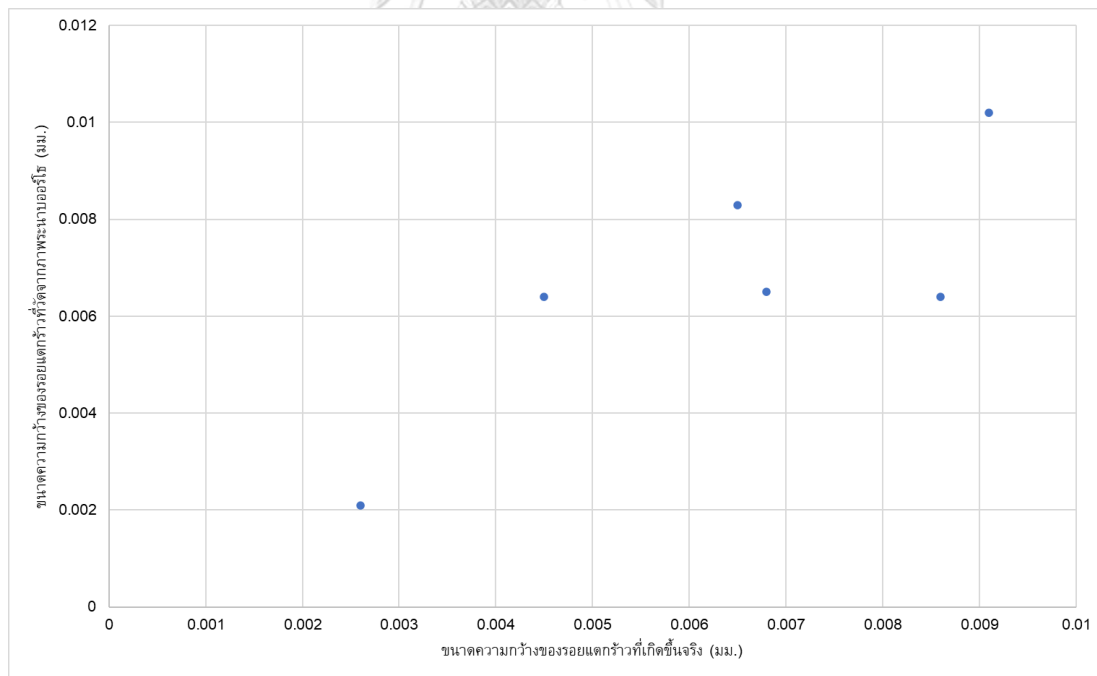
รูปที่ 81 ตัวอย่างการวัดขนาดรอยแตกร้าวทั้ง 6 จุด บนชั้นส่วนฐานรากบริเวณเสาตอม่อที่ 1



รูปที่ 82 ตัวอย่างตำแหน่งรอยแตกร้าวบนชั้นส่วนฐานรากบริเวณเสาตอม่อที่ 1

ตารางที่ 34 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของรอยแตกกว้างบนผิวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

รายการ	ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้างที่เกิดขึ้นจริง (มม.)	ขนาดความกว้างของรอยแตกกว้างที่วัดจากภาพพระนาบอร์โฮ (มม.)	%ความคลาดเคลื่อน
1	2.6	2.1	19.23
2	8.6	6.4	25.58
3	9.1	10.2	12.09
4	4.5	6.4	42.22
5	6.8	6.5	4.41
6	6.5	8.3	27.69
min			4.41
max			42.22
average			21.87



รูปที่ 83 ความสัมพันธ์ระหว่างรอยแตกกว้างบนผิวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

4.8.2 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะเคลื่อนขยายรอยต่อทางเท้าจาก ภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

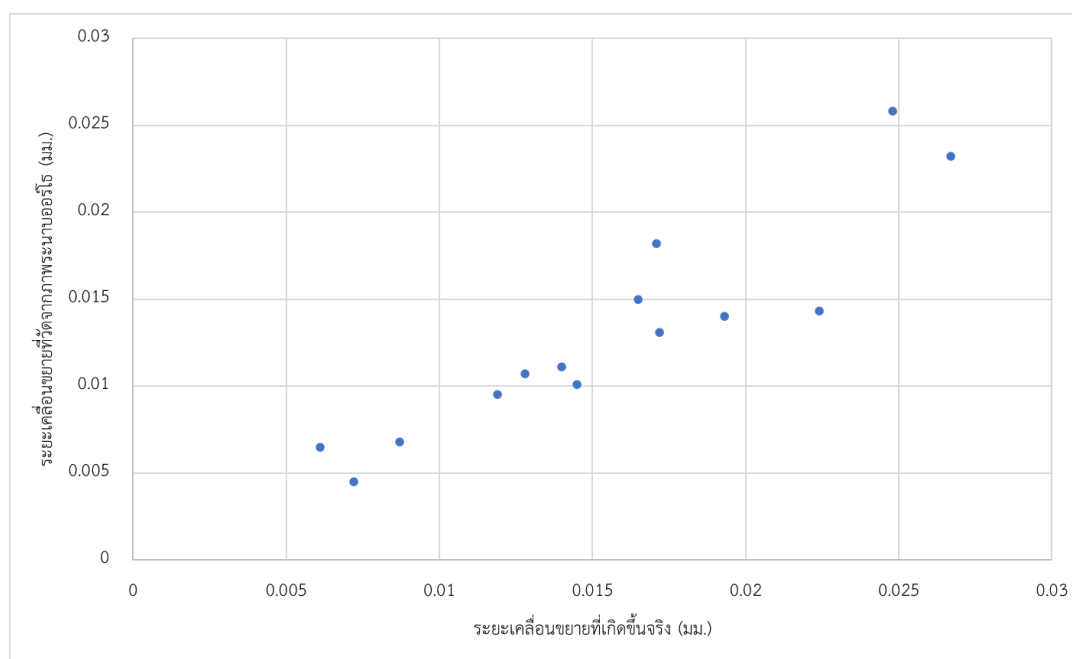
จากการวัดระยะเคลื่อนขยายรอยต่อทางเท้าโดยใช้เวอร์เนียร์ในการวัดเพื่อเปรียบเทียบกับ
ภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับทั้งหมด 14 จุด แสดงในรูปที่ 84 ได้ผลดังตารางที่ 35



รูปที่ 84 ตัวอย่างตำแหน่งระยะเคลื่อนขยายรอยต่อทางเท้า 14 จุด
ตารางที่ 35 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะเคลื่อนขยายรอยต่อทางเท้าจาก
ภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

รายการ	ตำแหน่ง	ระยะเคลื่อนขยายที่ เกิดขึ้นจริง (มม.)	ระยะเคลื่อนขยายที่วัดจาก ภาพระนาบออร์โธ (มม.)	%ความคลาดเคลื่อน
1	P1-SW2	6.1	6.5	6.56
2	P2-SW2	14.0	11.1	20.71
3	P3-SW2	7.2	4.5	37.50
4	P4-SW2	17.1	18.2	6.43
5	P5-SW2	24.8	25.8	4.03
6	P6-SW2	22.4	14.3	36.16
7	P7-SW2	17.2	13.1	23.84
8	P7-SW1	11.9	9.5	20.17
9	P6-SW1	19.3	14.0	27.46
10	P5-SW1	16.5	15.0	9.09
11	P4-SW1	14.5	10.1	30.34
12	P3-SW1	26.7	23.2	13.11
13	P2-SW1	12.8	10.7	16.41

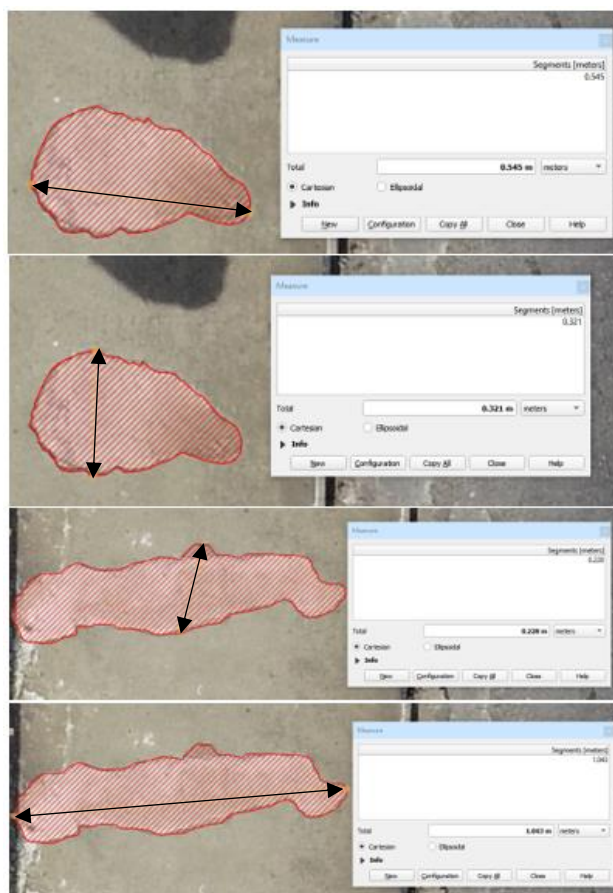
รายการ	ตำแหน่ง	ระยะเคลื่อนขยายที่เกิดขึ้นจริง (มม.)	ระยะเคลื่อนขยายที่วัดจากภาพระนาบออร์โธ (มม.)	%ความคลาดเคลื่อน
14	P1-SW1	8.7	6.8	21.84
Min				4.03
Max				37.50
Average				19.55



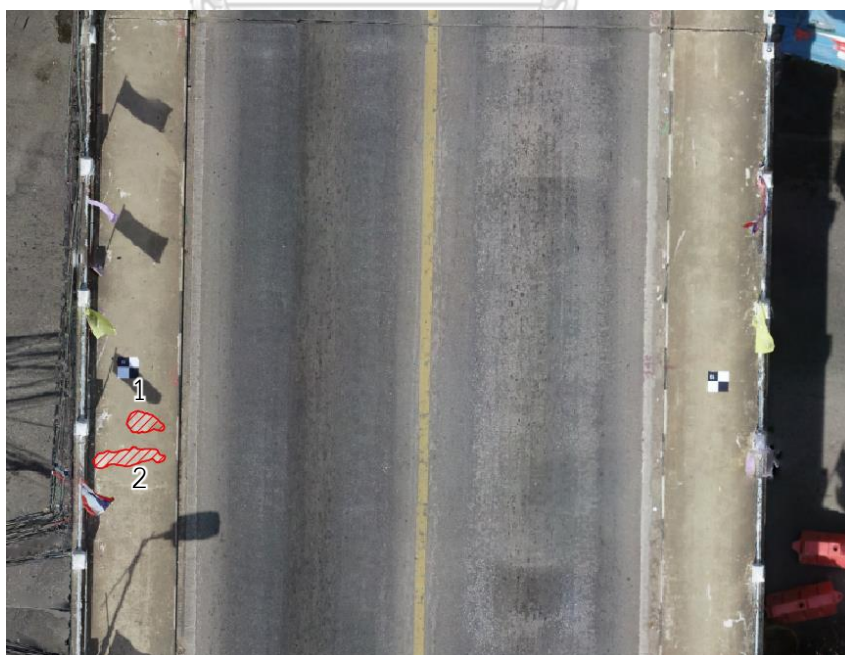
รูปที่ 85 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนขยายรอยต่อทางเท้าจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

4.8.3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความกว้างและความยาวของการหลุดล่อนของคอนกรีตภายนอกสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

จากการวัดระยะความกว้างและความยาวของการหลุดล่อนของคอนกรีตที่ระยที่มากที่สุดโดยใช้เทปวัดระยะเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบพื้นที่ที่เสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กกับภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับทั้งหมด 2 จุด แสดงในรูปที่ 86 ได้ผลดังตารางที่ 36



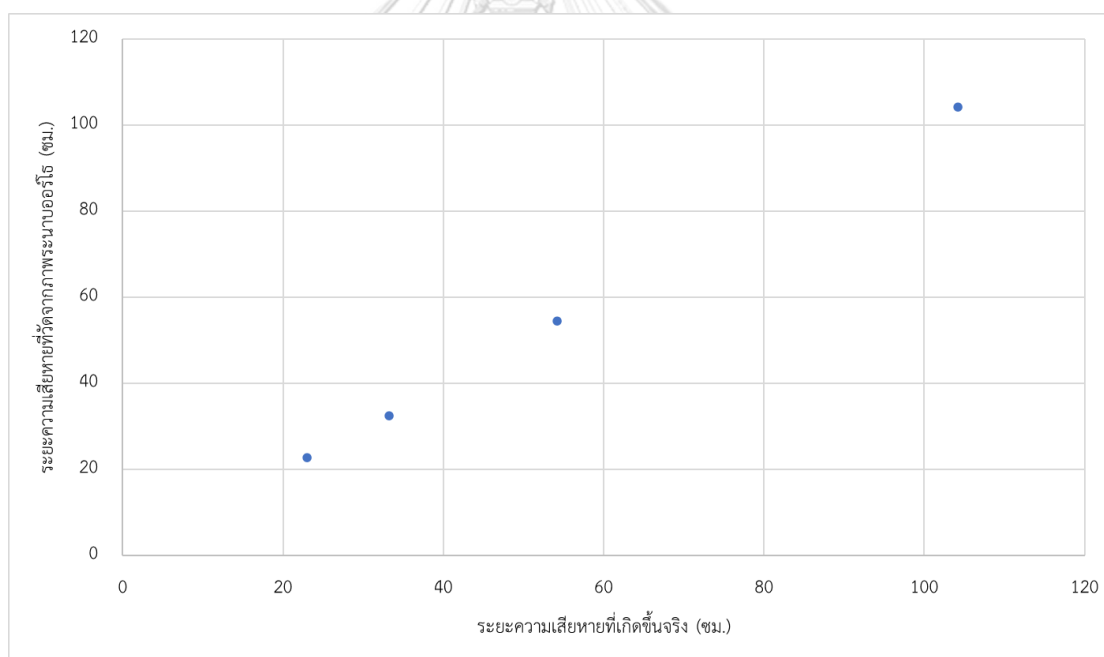
รูปที่ 86 ตัวอย่างการวัดขนาดความกว้างและความยาวการหลุดล่อนทั้ง 2 จุด



รูปที่ 87 ตัวอย่างตำแหน่งการหลุดล่อนทั้ง 2 จุด บนชั้นส่วนทางเท้าที่ 2 ชั้นส่วนที่ 7

ตารางที่ 36 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความกว้างและความยาวของการหลุดล่อนของคอนกรีตภายนอกสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

รายการ	ด้าน	ระยะความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง (ซม.)	ระยะความเสียหายที่วัดจากภาพ ระนาบออร์โธ (ซม.)	%ความคลาด เคลื่อน
1	กว้าง	33.2	32.6	1.81
	ยาว	54.2	54.5	0.55
2	กว้าง	23.0	22.8	0.87
	ยาว	104.2	104.3	0.10
Min				0.10
Max				1.81
Average				0.83



รูปที่ 88 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความยาวของการหลุดล่อนของคอนกรีตภายนอกสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากภาคสนามและภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับ

4.9 ความสามารถและข้อจำกัดในการตรวจสอบสะพานด้วยอากาศยานไร้คนขับ

4.9.1 การบินสำรวจสะพานด้วยอากาศยานไร้คนขับ

ในส่วนของการบินสำรวจเพื่อใช้ในการประมวลผลสร้างภาพพระนาบอร์โธแต่ละส่วนของสะพาน นั้นจะมีระยะเวลาและความละเอียดจุดที่แตกต่างกัน เนื่องจากข้อจำกัดและสภาพแวดล้อมในแต่ละพื้นที่ของชิ้นส่วนนั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งตารางที่ 37 แสดงถึงระยะเวลาโดยเฉลี่ยในการบินสำรวจแต่ละส่วนของโครงสร้างของสะพานธนบุรี โดยในแต่ละส่วนของโครงสร้างจะมีเงื่อนไขและข้อจำกัดดังนี้

1. การบินสำรวจโครงสร้างส่วนบน อาทิเช่น คานตามยาว และ คานตามขวาง เป็นต้น จำเป็นต้องทำการบิน 2 เวลาในรูปแบบ Double Grid เนื่องจากปัญหาทางด้านแสงสว่างจึงจำเป็นต้องใช้แสงอาทิตย์ในทิศตะวันออกในตอนเช้าเพื่อในการถ่ายภาพฝั่งขวาของสะพานและทำการถ่ายภาพฝั่งซ้ายจากแสงสว่างในทิศตะวันตกในตอนเย็น จึงทำให้จำนวนรูปถ่ายนั้นค่อนข้างมากและใช้ระยะเวลา 1 วันเต็ม

2. การบินสำรวจโครงสร้างส่วนล่าง ไม่สามารถตรวจสอบฐานรากหาคะระดับน้ำในช่วงการบินนั้นสูงเกินกว่าระดับของฐานราก

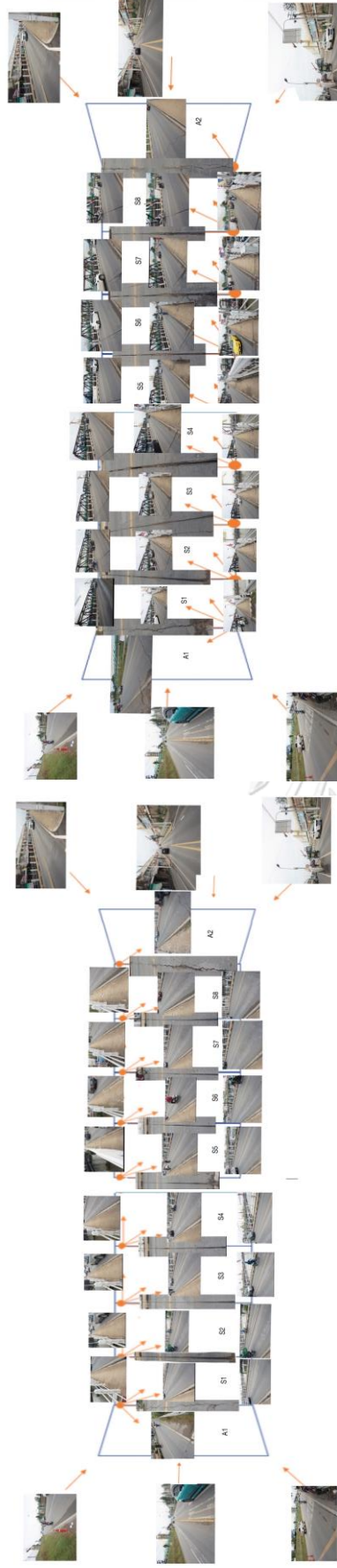
3. การบินสำรวจส่วนประกอบรอง ข้อจำกัดในส่วนของความสูงในการบิน โดยระยะเข้าใกล้ในการบินนั้นมียกข้อจำกัด เนื่องจากมีการจราจรตลอดเวลา ทำให้ความละเอียดในการสำรวจนั้นมียกข้อจำกัด

ตารางที่ 37 ระยะเวลาโดยเฉลี่ยในการบินสำรวจแต่ละส่วนของโครงสร้างของสะพานธนบุรี

ส่วนของโครงสร้าง	ระยะเวลาในการบินสำรวจ
โครงสร้างส่วนบน	20 นาที / ช่วงสะพาน
โครงสร้างส่วนล่าง	10 นาที / เส้า
ส่วนประกอบรอง	5 นาที / ช่วง สะพาน

4.9.2 การประมวลผลภาพถ่ายแต่ละชิ้นส่วนของสะพานจากอากาศยานไร้คนขับ

ผลการประมวลผลภาพถ่ายระนาบออร์โธแต่ละส่วนชิ้นส่วนของสะพานที่ใช้ในการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น ในส่วนของการรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการประเมินความเสียหายในวิธีแบบดั้งเดิม การถ่ายภาพชิ้นส่วนสะพานในแต่ละบริเวณ เพื่อใช้ประกอบการประเมินสภาพการใช้งานและเก็บไว้เป็นประวัติสภาพการใช้งานเมื่อสะพานมีอายุ ต่างๆกัน โดยใช้วิธีการถ่ายภาพของระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System : BMMS) ที่ได้พัฒนาวิธีการถ่ายภาพจากสถานีวิจัยและพัฒนางานทางกรมทางหลวง โดยวิธีการถ่ายภาพจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือการถ่ายภาพด้านบนและล่างของสะพาน ในแต่ละด้านจะแบ่งออกเป็นภาพถ่ายทางฝั่งขวาและซ้ายของสะพาน [2] โดยแสดงตัวอย่างการถ่ายภาพด้านบนทางฝั่งซ้ายและขวาของสะพานธนบุรีแสดงในรูปที่ 89 โดยผลลัพธ์ของการประมวลผลจากอากาศยานไร้คนขับ พบว่าสามารถใช้อากาศยานไร้คนขับในการประมวลผลภาพถ่ายระนาบออร์โธในการตรวจสอบความเสียหายลดความซับซ้อนในการรวบรวมข้อมูลและง่ายต่อการตรวจสอบ โดยรูปที่ 90 แสดงตัวอย่างการประมวลผลภาพถ่ายระนาบออร์โธส่วนบน แม้ว่าจะไม่สามารถประมวลผลบางชิ้นส่วนที่แสงเข้าไม่ถึง และสามารถเข้าถึงได้ยาก รวมไปถึงมีสิ่งกีดขวางบดบังแสดงในตารางที่ 38



รูปที่ 89 ตัวอย่างการถ่ายภาพด้านบนทางฝั่งซ้ายและขวาของสะพานรัษฎ์



รูปที่ 90 ตัวอย่างการประมวลผลระนาบออร์โธส่วนบนของสะพานรัษฎ์

ตารางที่ 38 ความครบถ้วนและข้อจำกัดในการประมวลผลภาพถ่ายแต่ละชิ้นส่วนของสะพานจากอากาศยานไร้คนขับ

ส่วนของ โครงสร้าง	ชื่อชิ้นส่วน	การประมวลผลภาพถ่าย		หมายเหตุ
		ครบถ้วน	ไม่ครบถ้วน	
โครงสร้าง ส่วนบน	พื้นสะพาน (Deck)	/		-
	คานตามยาว (Girder)	/		-
	ค้ำยันตามยาว (Diaphragm)	/		-
โครงสร้าง ส่วนล่าง	คานตามรัดหัวเสา (Cap Beam)	/		-
	ค้ำยันตอม่อ (Bracing)	/		-
	เสาตอม่อ (Pier)	/		-
	กำแพงตอม่อ (Pier Wall)	/		-
	ฐานราก (Footing)	/		ไม่สามารถตรวจสอบฐานราก ของตอม่อกลางน้ำหากระดับ น้ำในช่วงการบินนั้นสูงเหนือ ฐานราก
	เสาเข็ม (pile)	/		ไม่สามารถตรวจสอบเสาเข็ม ของตอม่อกลางน้ำหากระดับ น้ำในช่วงการบินนั้นสูงเหนือ ฐานราก
ส่วนประกอบ รอง	แผ่นรองรับคาน (Bearing)		/	สามารถประมวลผลแผ่น รองรับคานได้ แต่อย่างไรก็ ระนาบออร์โธที่ได้นั้นจะมี ความผิดเพี้ยนเนื่องจากแสง สว่างไม่เพียงพอ
	รอยต่อเพื่อการขยาย (Expansion Joint)	/		-

ส่วนของ โครงสร้าง	ชื่อชิ้นส่วน	การประมวลผลภาพถ่าย		หมายเหตุ
		ครบถ้วน	ไม่ครบถ้วน	
ส่วนประกอบ รอง	ผิวทาง (Wearing Surface)	/		-
	ราวสะพาน (Railing)	/		-
	ทางเท้า (Sidewalk)	/		-

4.9.3 การวัดขนาดความเสียหายจากการประมวลผลอากาศยานไร้คนขับ

จากการตรวจสอบความเสียหายเชิงตัวเลขของสะพานด้วยระยะห่างในการบินนั้นเข้าใกล้กับตัวสะพานมากที่สุดเพื่อให้ได้ความละเอียดจุดที่ดีที่สุดในแต่ละส่วนของการตรวจสอบความเสียหายสามารถแบ่งขนาดความเสียหายได้ 3 ส่วน ได้แก่ ความเสียหายขนาดเล็ก ความเสียหายขนาดกลาง และความเสียหายขนาดใหญ่ แสดงในตารางที่ 38 โดยพบว่าไม่สามารถวัดขนาดความเสียหายที่น้อยกว่าขนาดความละเอียดจุดของภาพถ่าย ความลึกของความเสียหาย และ ไม่สามารถตรวจสอบการเยื้องศูนย์ของชิ้นส่วน ไม่ว่าจะเป็น เสาตอม่อ และ Bearing Capacity เป็นต้น

ตารางที่ 39 ความสามารถและข้อจำกัดในการตรวจสอบความเสียหายด้วยอากาศยานไร้คนขับ

ขนาดความเสียหาย	ชนิดความเสียหาย	%ความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย	หมายเหตุ
ความเสียหายขนาดเล็ก	รอยแตกร้าวคอนกรีต	21.87	ไม่สามารถวัดขนาดความเสียหายที่น้อยกว่าขนาดความละเอียดจุดของภาพถ่าย
	รอยแตกร้าวผิวแอสฟัลต์		
ความเสียหายขนาดกลาง	รอยต่อเพื่อขยาย	19.55	-
ความเสียหายขนาดใหญ่	การหลุดล่อนของคอนกรีต	0.832	ไม่สามารถวัด ความลึกของความเสียหาย
	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียหน้าตัด		

บทที่ 5

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบสะพานของกรมทางหลวงด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Bridge Visual Inspection) โดยใช้อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ในการประมวลผลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหาย สามารถใช้เป็นแนวทางหรือเป็นตัวเปรียบเทียบในการตรวจสอบสะพานแบบดั้งเดิม จากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่สำคัญในการตรวจสอบสะพานด้วยอากาศยานไร้คนขับ คือ การวางแผนการบิน (Flight Plan) เนื่องจากมีมุมอับที่ต้องสะพานและรูปแบบโครงสร้างสะพานนั้นมีความซับซ้อน ที่อาจส่งผลกระทบต่อตัวอากาศยานไร้คนขับในขณะทำการบินตรวจสอบ โดยผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องควบคุมการบินให้เข้าใกล้ตัวสะพานให้มากที่สุด เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพสูงเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเสียหาย โดยอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในการเก็บข้อมูลประกอบไปด้วย DJI Phantom 4 Pro V2.0 และ Skydio 2 พบว่า สามารถประมวลผลภาพระนาบออร์โธแต่ละชิ้นส่วนของสะพานเพื่อใช้ในการตรวจสอบด้วยตาเปล่า โดย DJI Phantom 4 Pro V2.0 นั้นมีข้อจำกัดในการปรับองศาของกล้องซึ่งไม่สามารถใช้ในการตรวจสอบความเสียหายได้ ต้องสะพาน แต่อย่างไรก็ตามด้วยความสามารถในการเข้าถึงและการปรับองศาของกล้อง Skydio 2 สามารถตรวจสอบได้ต้องสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ว่าคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้นั้นจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า DJI Phantom 4 Pro V2.0 จากผลลัพธ์ในการประมวลผลพบว่าสามารถทดแทนวิธีการเข้าถึงการตรวจสอบแบบดั้งเดิม ไม่ว่าจะเป็น การนั่งกระเช้า การปีนป่ายหรือการนั่งเรือ เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะมีชิ้นส่วนบางส่วนที่มีปัญหาในการประมวลผล เช่น แผ่นรองรับคานและฐานราก เป็นต้น เนื่องจากแสงสว่างไม่เข้าถึงและระดับน้ำที่สูงกว่าชิ้นส่วน

ในส่วนของการบินสำรวจสะพานด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้ในการประมวลผลภาพระนาบออร์โธ (Orthoimage) สามารถประมวลผลระนาบออร์โธทดแทนวิธีการถ่ายภาพชิ้นส่วนด้วยวิธีการถ่ายภาพของระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System : BMMS) ลดความซับซ้อนในการรวบรวมข้อมูล ง่ายต่อการตรวจสอบ และความสามารถในการวัดขนาดความเสียหาย เนื่องจากภาพระนาบออร์โธนั้นเป็นภาพที่ได้รับการปรับแก้องศาของการถ่ายภาพที่ผิดเพี้ยน รวมไปถึงพิกัดของภาพถ่ายให้มีขนาดใกล้เคียงพื้นที่จริง โดยสามารถแบ่งการตรวจสอบความเสียหายเป็น 3 ส่วนของโครงสร้างหลัก ได้แก่ โครงสร้างส่วนบน (Superstructure) โครงสร้างส่วนล่าง (Substructure) และ ส่วนประกอบรอง (Secondary Components) โดยพบว่า

โครงสร้างส่วนบนของสะพานถือได้ว่าใช้ระยะเวลาในการบินมากที่สุดเนื่องจากมุมอัปเดตท้องสะพาน และแสงสว่างไม่เพียงพอจึงจำเป็นต้องทำการบินรูปแบบกริด เพื่อให้เห็นทุกชิ้นส่วนของโครงสร้างส่วนบน รวมไปถึงทำการบินสำรวจ 2 เวลา ได้แก่ ช่วงเช้าของวันเนื่องจากแสงอาทิตย์จะอยู่ในทิศ ตะวันออกสามารถช่วยในการถ่ายภาพฝั่งขวาของสะพานและช่วงเย็นของวันแสงอาทิตย์จะอยู่ในทิศ ตะวันตกสามารถช่วยในการถ่ายภาพฝั่งซ้ายของสะพาน ซึ่งจะทำให้ภาพถ่ายที่ได้นั้นมีจำนวนมาก ส่งผลต่อระยะเวลาการสำรวจและการประมวลผล ในส่วนของโครงสร้างส่วนล่างจะเป็นส่วนที่ใช้เวลาน้อยที่สุดในการบินสำรวจ แต่อย่างไรก็ตามจะไม่สามารถเก็บภาพในบางชิ้นส่วนได้ครบถ้วน เนื่องจากแสงสว่างที่เข้าไม่ถึงของชิ้นส่วนแผ่นรองรับคาน หรือระดับน้ำที่สูงบดบังฐานราก และในส่วนสุดท้าย คือ ส่วนประกอบรองจะมีค่าความละเอียดของภาพถ่ายที่ได้จะน้อยกว่าส่วนอื่น ๆ ของสะพาน เนื่องจากการจราจรบนท้องถนนในขณะที่ทำการตรวจสอบ ที่อาจส่งผลและก่อให้เกิดอันตรายต่อตัว อากาศยานไร้คนขับจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความสูงในการบิน โดยระยะปลอดภัยในการบินอยู่ที่ความ สูง 15 เมตรจากตัวสะพาน

ในการวางจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control Point: GCP) ของสะพานธนบุรีรัศมีเพื่อช่วย การปรับแก้ภาพพิกัดของภาพถ่ายในการสร้างระนาบออร์โธ พบว่าไม่สามารถที่จะกำหนดจุดควบคุม ภาพถ่ายในส่วนใต้ท้องสะพานได้ เนื่องจากไม่สามารถกำหนดจุดเด่นชัดในการกำหนดจุดควบคุม ภาพถ่ายและแสงสว่างที่เข้าไม่ถึง ทำให้ยากแก่การกำหนดจุดควบคุมภาพถ่าย โดยตำแหน่งที่สามารถ วางจุดควบคุมภาพถ่าย ได้แก่ ส่วนบนของสะพาน ส่วนข้างของสะพาน และส่วนเสาตอม่อ โดยใน ส่วนบนของสะพานเริ่มมีค่าคงที่เมื่อจุดควบคุมภาพถ่ายตั้งแต่ 6 จุด ในรูปแบบการวางแบบสัดส่วน 2 ส่วนขึ้นไป ในการกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายส่วนข้างของสะพานเริ่มมีค่าคงที่เมื่อจุดควบคุมภาพถ่าย ตั้งแต่ 4 จุด โดยการวางในรูปแบบสัดส่วน 2 ส่วน ขึ้นไป และ ส่วนสุดท้ายคือ ส่วนเสาตอม่อเริ่มมี ค่าคงที่เมื่อจุดควบคุมภาพถ่ายตั้งแต่ 4 จุด ในรูปแบบมุม สามารถช่วยประมวลผลสร้างระนาบออร์โธ ในแต่ละส่วนของสะพานที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบความเสียหายสะพานด้วยตาเปล่า

จากการวัดระยะแต่ละส่วนของส่วนบนของสะพานโดยใช้เทปวัดระยะเปรียบเทียบกับ ภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับทั้งหมด 34 จุด พบว่ามีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ร้อยละ 1.42 ใกล้เคียงกับพื้นที่ความเป็นจริง ในส่วนของการศึกษาการตรวจสอบความเสียหายเชิง ตัวเลขของสะพานด้วยระยะทางในการบินนั้นเข้าใกล้กับตัวสะพานมากที่สุดเพื่อให้ได้ความละเอียดจุด ที่ดีที่สุดในการตรวจสอบความเสียหาย สามารถแบ่งขนาดความเสียหายได้ 3 ส่วน ได้แก่ ความเสียหายขนาดเล็ก ความเสียหายขนาดกลาง และ ความเสียหายขนาดใหญ่ โดยพบว่า ขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงนั้นแปรผกผันกับเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่จริงกับที่วัดได้จากระนาบ

ออร์โธ มีความหมายว่าหากทำการวัดความเสี่ยงที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็น การแตกร้าวของคอนกรีต การแตกร้าวผิวแอสฟัลต์จะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูง เนื่องจากหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นคุณภาพของภาพถ่าย ขนาดความละเอียดจุดที่ไม่เพียง ปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อคุณภาพของภาพถ่าย รวมไปถึงความผิดพลาดของคน (Human Error) ในการวัดขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นในโปรแกรม Quantum GIS (QGIS) ในทางกลับกันในการตรวจสอบการหลุดล่อนของคอนกรีตและเปอร์เซ็นต์การสูญเสียหน้าตัดผิวแอสฟัลต์ จะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่น้อยใกล้เคียงกับความเป็นจริงสามารถทดแทนรูปแบบการตรวจสอบดั้งเดิม

5.2 ข้อเสนอแนะ

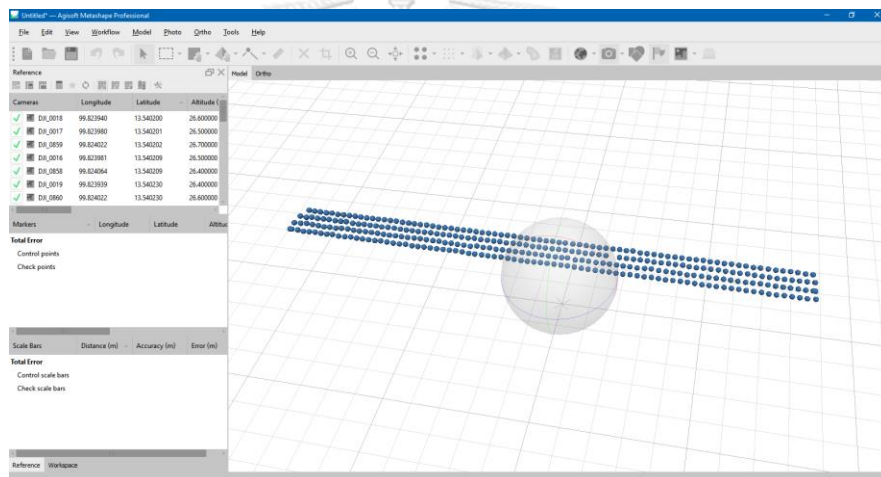
สำหรับงานวิจัยในอนาคต ในส่วนของการตรวจสอบสะพานด้วยตาเปล่าด้วยอากาศยานไร้คนขับ หากต้องการเพิ่มคุณภาพให้กับภาพถ่ายและลดระยะเวลาในการสำรวจ ควรเพิ่มคุณภาพของกล้องของอากาศยานไร้คนขับและติดตั้งไฟฉายแก้ไขข้อจำกัดในการตรวจได้ท้องสะพานและประสิทธิภาพในการประมวลผลมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence: AI) ในการตรวจจับความเสียหายและวัดขนาดความเสียหายโดยอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบความเสียหายของสะพานมากยิ่งขึ้น ในส่วนของการกำหนดจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control Point: GCP) หากสะพานที่ทำการตรวจสอบนั้นมีขนาดใหญ่กว่าสะพานธนบุรีศรีนครินทร์ ควรทำการกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายตามขั้นตอนข้างต้น เพื่อหาจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสมให้ง่ายต่อการตรวจสอบครั้งต่อไป เนื่องจากขนาดของสะพานแต่ละสะพานนั้นมีขนาดที่แตกต่างกันจึงจำเป็นต้องทำการกำหนดใหม่เพื่อเหมาะสมกับสะพานนั้น ๆ

ภาคผนวก ก

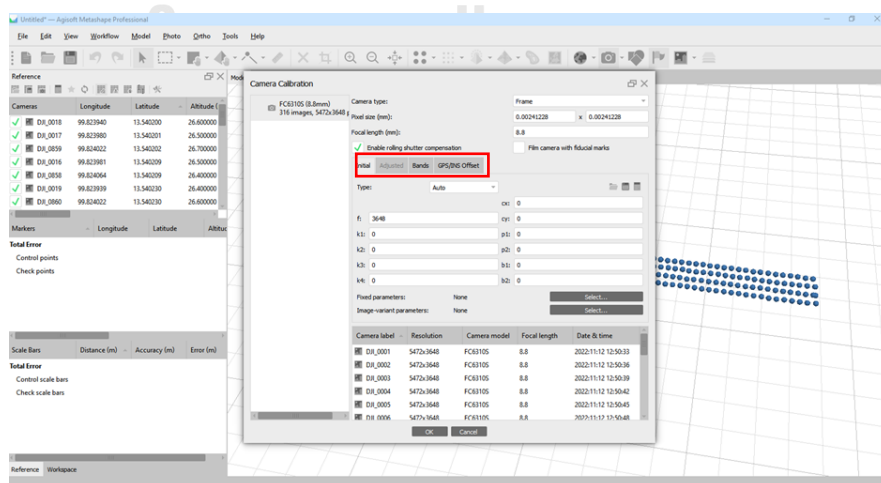
การประมวลผลภาพด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft Metashape

ขั้นตอนการประมวลผลการสร้างภาพระนาบออร์โธ (Orthoimage) จากซอฟต์แวร์ Agisoft Metashape เพื่อใช้ในการตรวจสอบสภาพการใช้งานของสะพาน

1. การนำข้อมูลภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ โดยคลิกไปในส่วน Workflow จากนั้นทำการ Add Folder เพื่อเลือกไฟล์ภาพถ่ายที่ทำการสำรวจ จากนั้นทำการคลิกถูก Rolling shutter compensation ใน Camera calibration เพื่อแก้ไขความผิดพลาดของภาพถ่ายจากการของอากาศยานไร้คนขับ

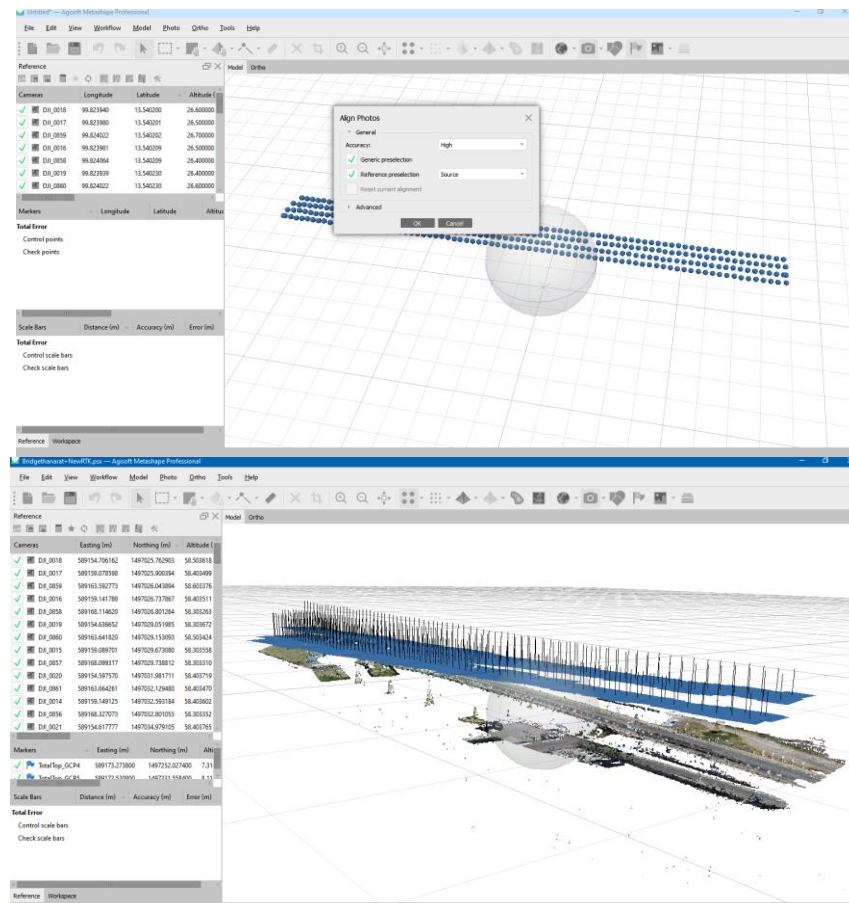


รูปที่ 91 การนำข้อมูลภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับใส่ในซอฟต์แวร์



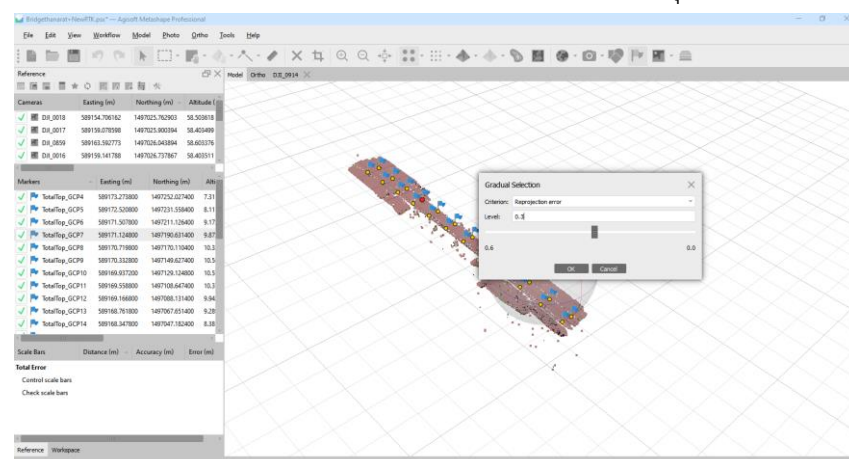
รูปที่ 92 แก้ไขความผิดพลาดของภาพถ่ายจากการของอากาศยานไร้คนขับจากกล้อง Rolling shutter

2. คำสั่ง Align Photos โปรแกรมจะทำการจัดตำแหน่งโดยค้นหาตำแหน่งและทิศทางผ่านการคำนวณโดยใช้ข้อมูลพิกัดจากภาพถ่ายแต่ละภาพเพื่อใช้ในการจับคู่ภาพที่เหมือนกันเพื่อในการสร้างแบบจำลองจุดก่อนเมฆแบบหึ่ง



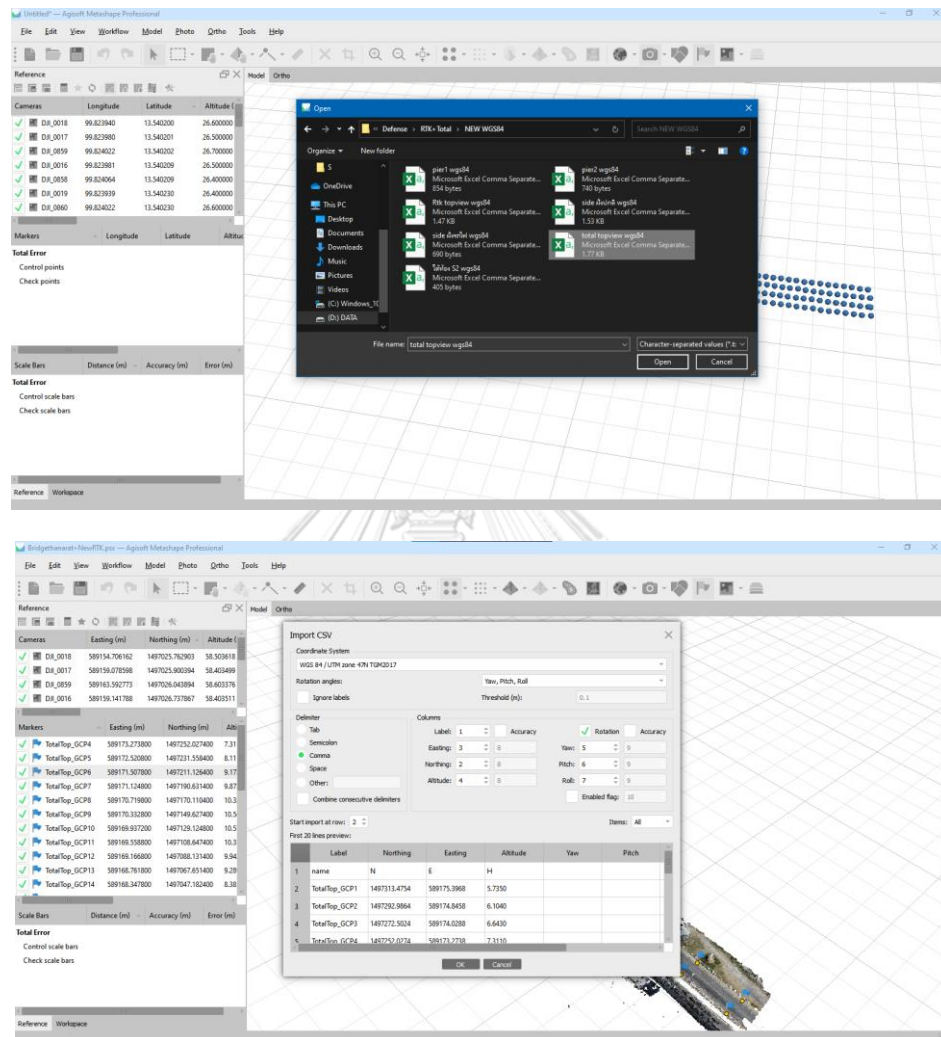
รูปที่ 93 คำสั่ง Align Photo เพื่อสร้างแบบจำลองจุดก่อนเมฆแบบหึ่ง

3. ทำการลบจุดก่อนเมฆที่มีการฟุ้งกระจาย ด้วยคำสั่ง Gradual Selection กำหนดช่อง Criterion เป็น Projection error ปรับค่าเท่ากับ 0.3 จากนั้นทำการลบจุดก่อนเมฆส่วนนั้น

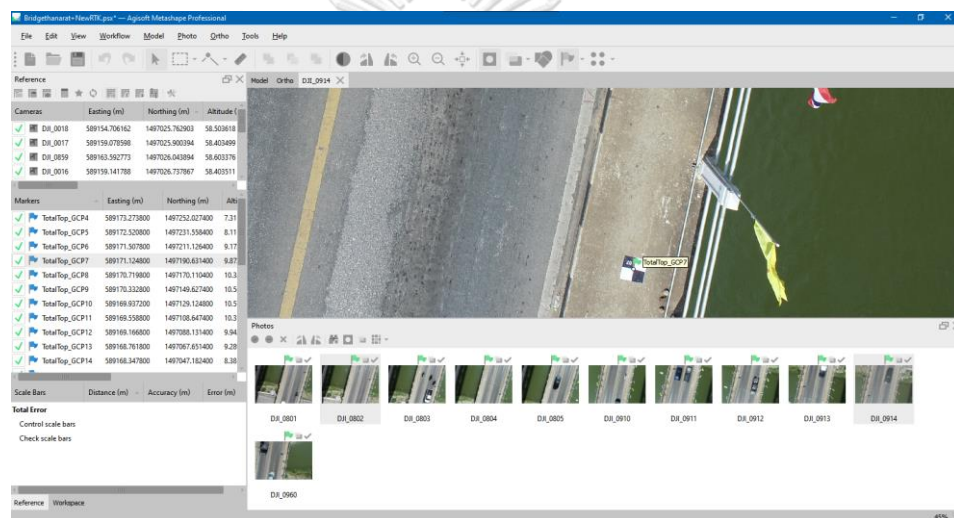
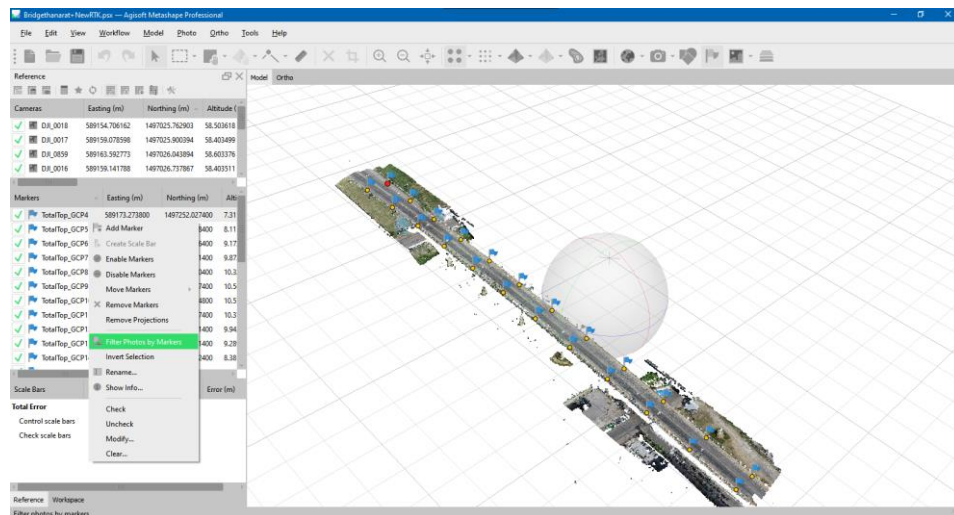


รูปที่ 94 คำสั่ง Gradual Selection ทำการลบจุดก่อนเมฆที่มีการฟุ้งกระจาย

4. นำค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวม (Total Station) ทำการตั้งค่าพิกัด Coordinate System เป็น WGS 84 / UTM 47N TGM2017 จากนั้นทำการปรับตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายให้ตรงตามภาพด้วยคำสั่ง Filter Photos by Markers แต่ละ จุดควบคุมภาพถ่ายนั้น

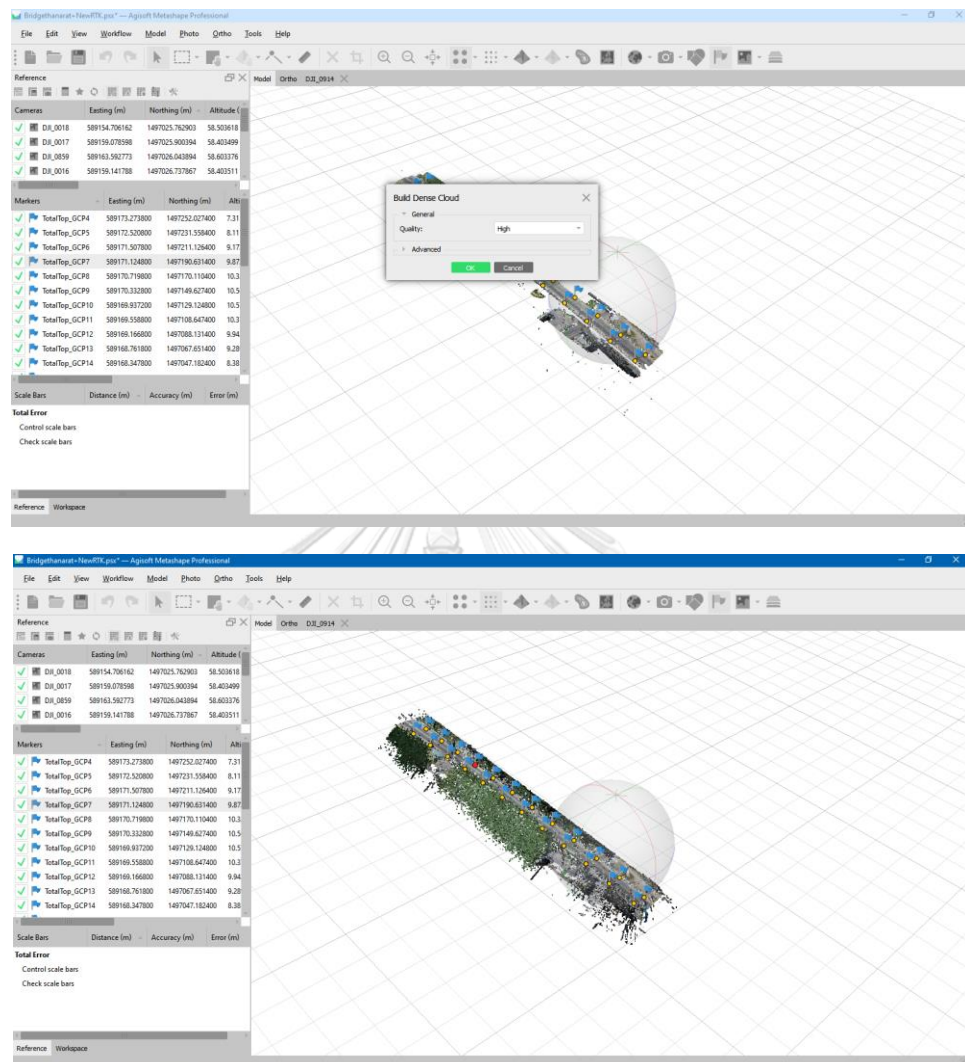


รูปที่ 95 การนำเข้าข้อมูลพิกัดจุดควบคุมภาพและตั้งค่าพิกัด Coordinate System เป็น WGS 84 / UTM 47N TGM2017



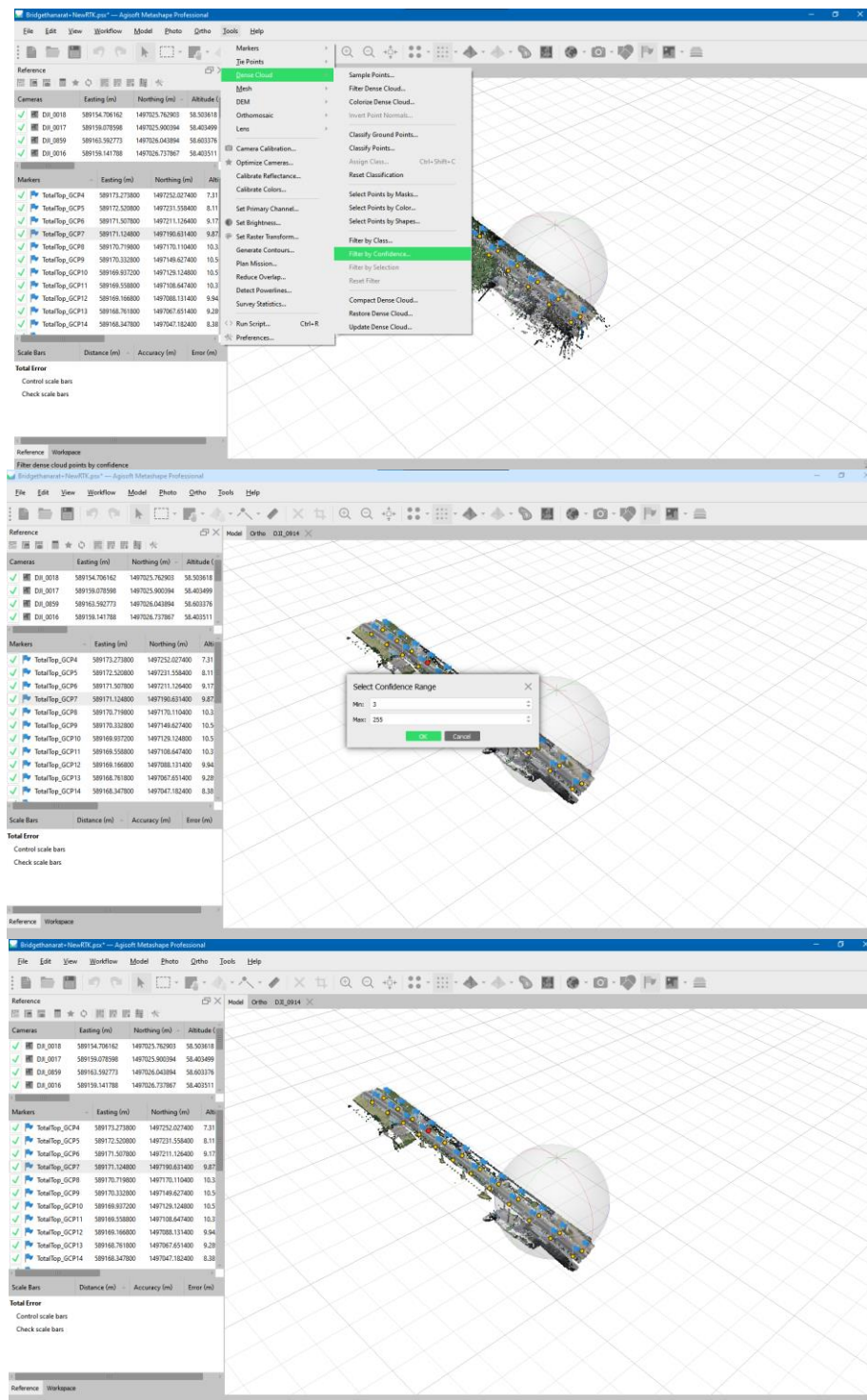
รูปที่ 96 คำสั่ง Filter Photos by Markers

4. คำสั่ง Build Dense Cloud โปรแกรมจะทำการคำนวณข้อมูลเชิงลึกของภาพแต่ละภาพ ข้อมูลจะประมวลออกมาเป็นจุดก้อนเมฆหนาแน่นที่มีความคล้ายคลึงกับโครงสร้างเสมือนจริง



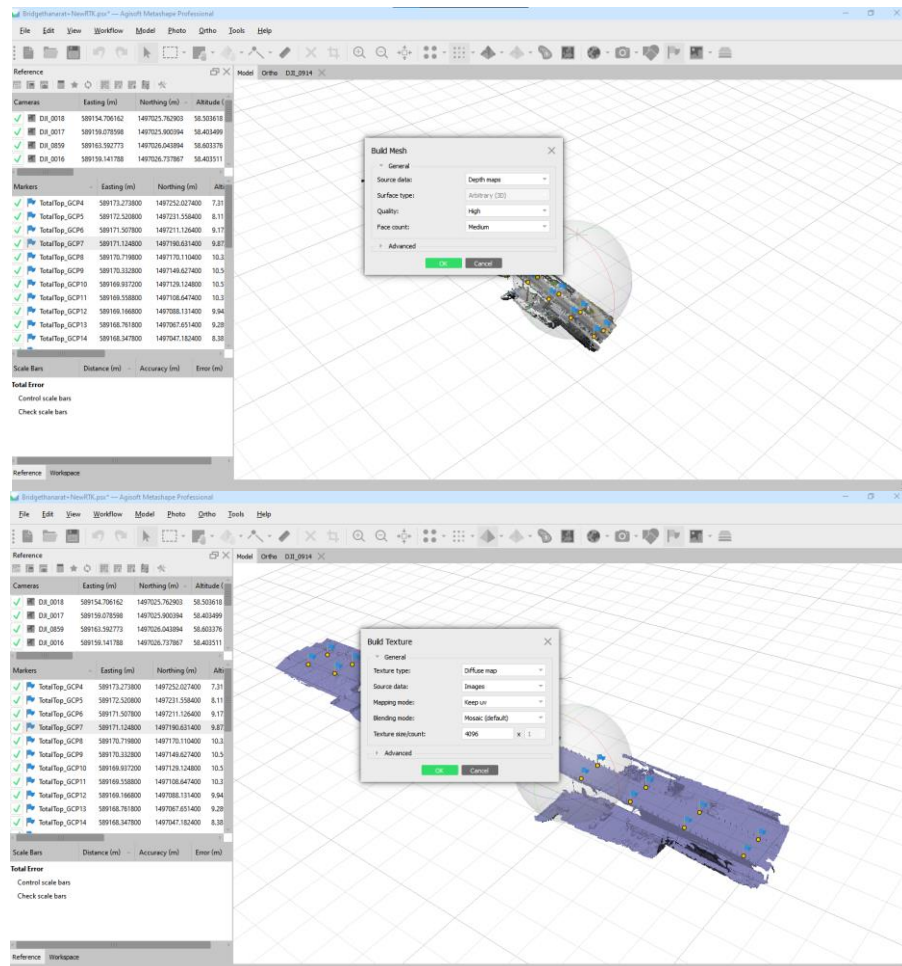
รูปที่ 97 คำสั่ง Build Dense Cloud

5. ทำการลบจุดก่อนเมฆหนาแน่นที่มีการฟุ้งกระจาย ด้วยคำสั่ง Filter by Select Confidence Range

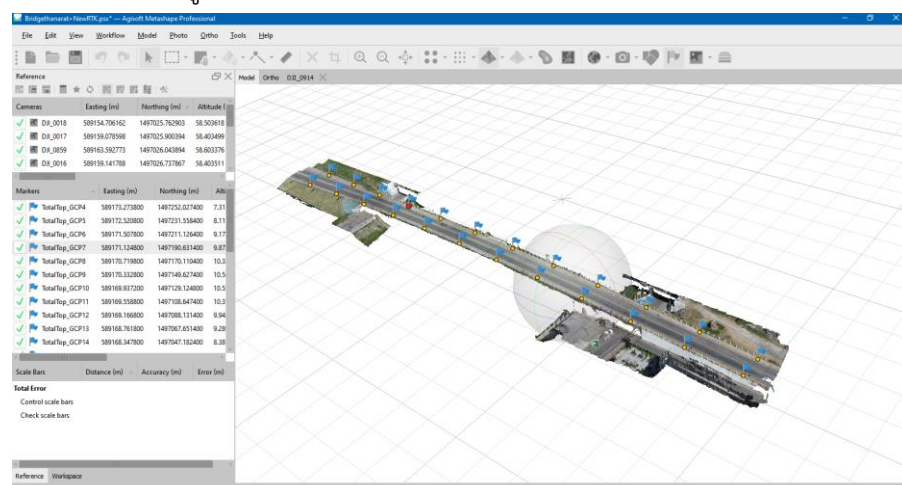


รูปที่ 98 คำสั่ง Filter by Select Confidence Range ทำการลบจุดก้อนเมฆหนาแน่นที่มีการพุ่งกระจาย

6. คำสั่ง Build Mesh และ Build Texture เพื่อสร้างแบบจำลองตาข่ายโดยใช้ข้อมูลอ้างอิงของจุดก่อนเมฆหนาแน่น

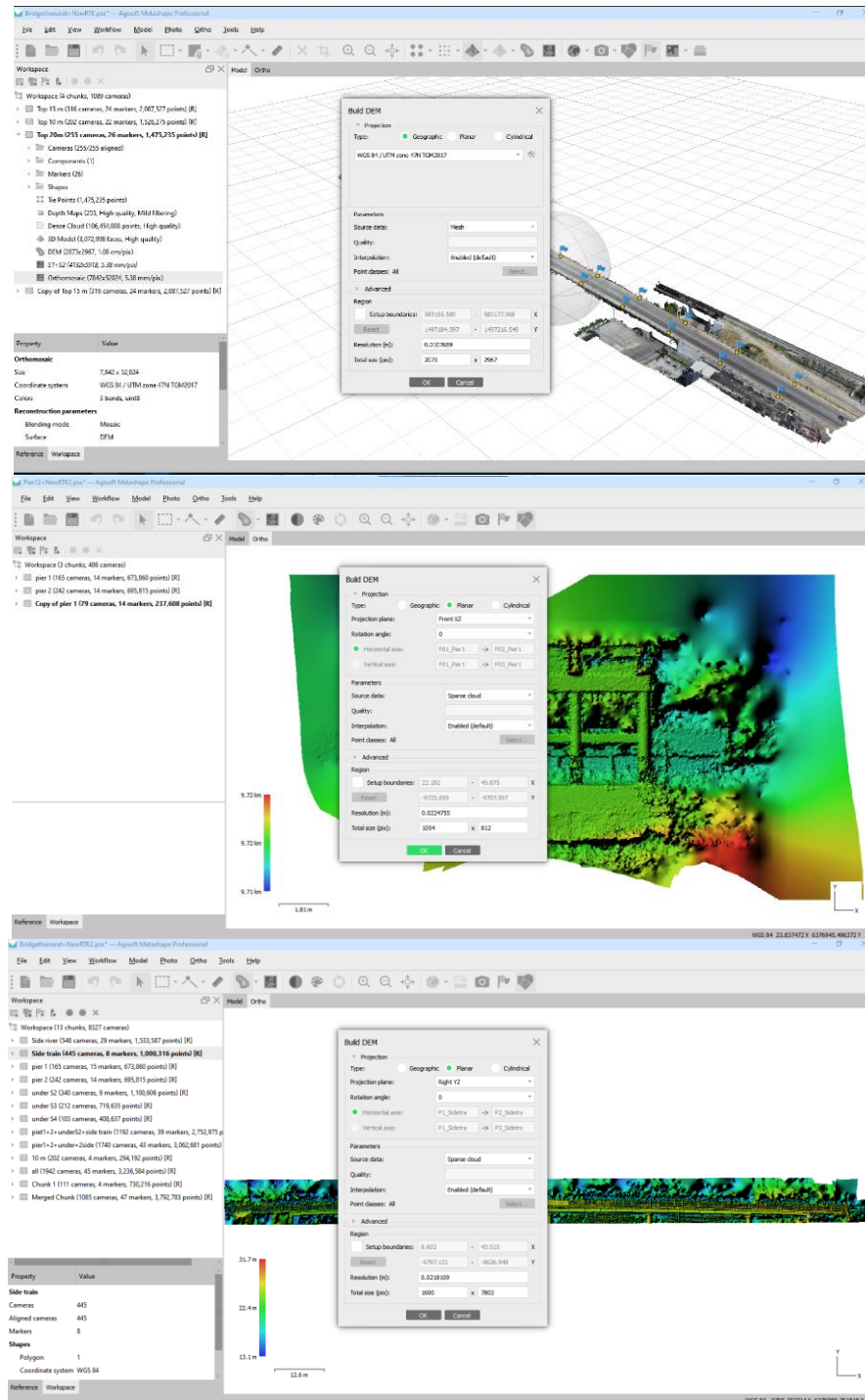


รูปที่ 99 คำสั่ง Build Mesh และ Build Texture

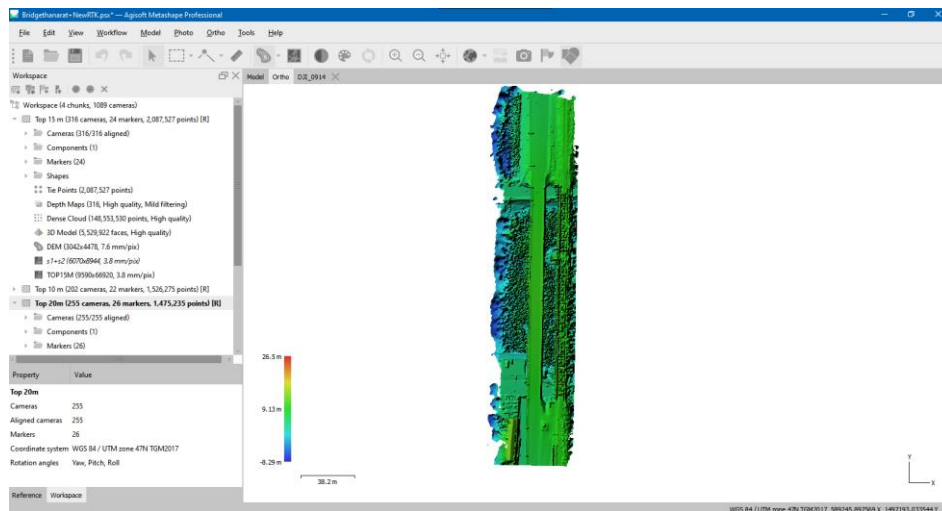


รูปที่ 100 แบบจำลองตาข่าย (Mesh Model)

7. คำสั่ง Build DEM โดยจะสร้างจาก Mesh Model ซึ่งส่วนบนของสะพานสามารถกำหนดเป็นกำหนดเป็นรูปแบบของ Geographic โดยใช้พิกัดตั้งต้นได้ ในส่วนของ ส่วนข้างและเสาตอม่อ จำเป็นต้องกำหนดเป็นรูปแบบ Planar เพื่อใช้ในการกำหนด Projection plane ระนาบแกนนั้น ๆ ของด้านที่ต้องการประมวลผล

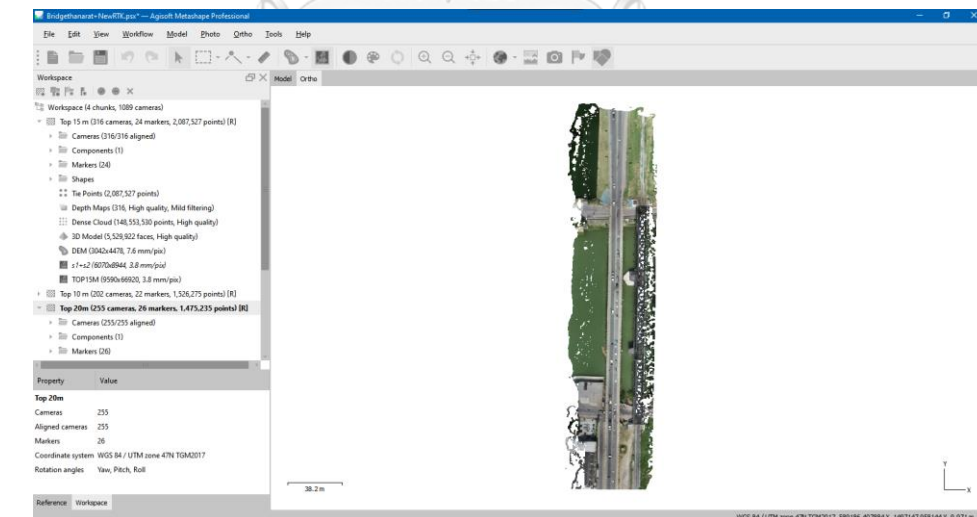


รูปที่ 101 ตัวอย่างการกำหนดค่าคำสั่ง Build DEM แต่ละส่วนของสะพาน

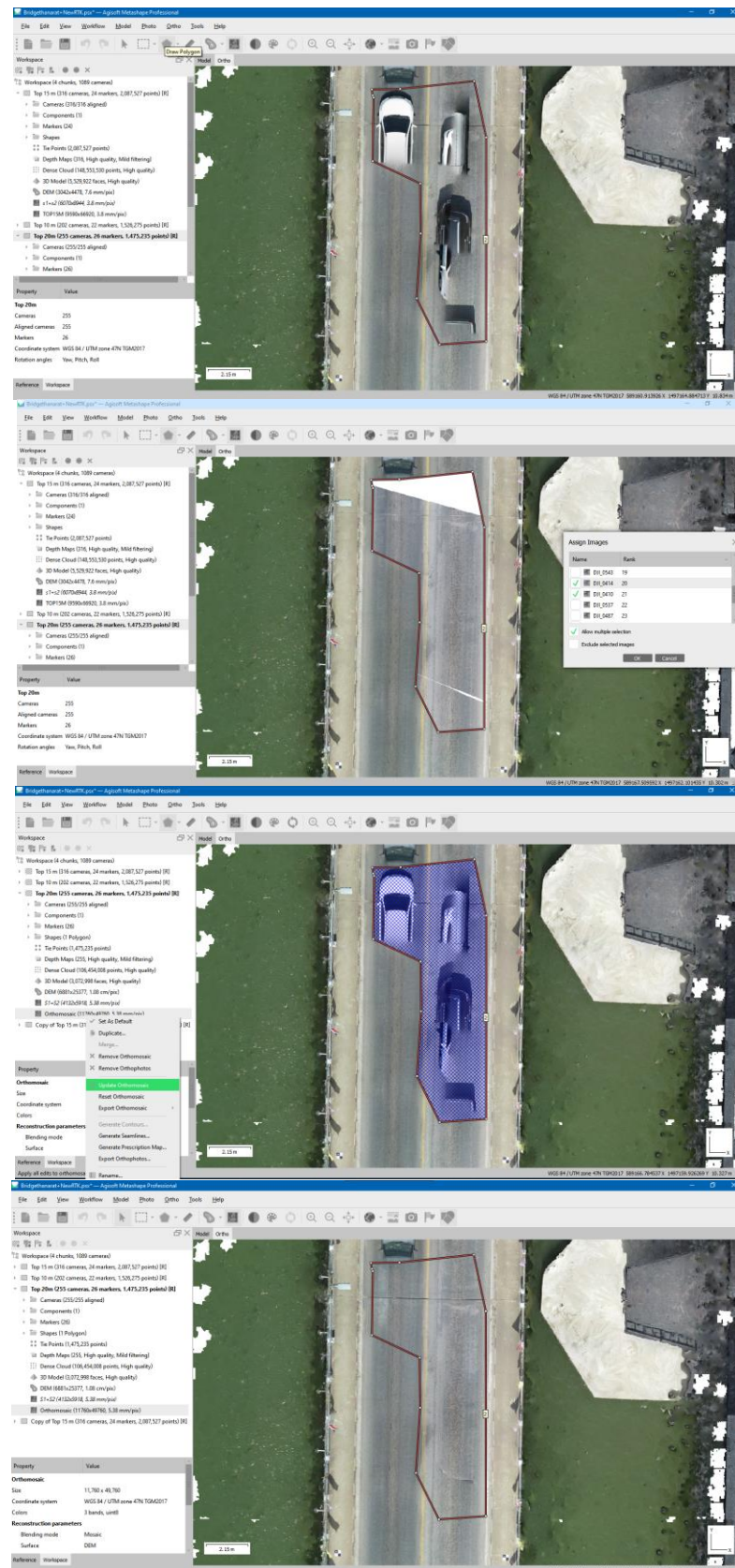


รูปที่ 102 แบบจำลองความสูงส่วนบนของสะพาน

8. คำสั่ง Build Orthomosaic โดยจะสร้างจากแบบจำลอง DEM เพื่อใช้ในการสร้างระนาบออร์โธนั้น ๆ โดยภาพออร์โธที่ได้นั้นจะมีภาพถ่ายที่ไม่พึงประสงค์ติดอยู่ ไม่ว่าจะเป็น รถบนทางถนน คนเดินทางเท้า และอื่น ๆ ซึ่งเราสามารถแก้ไขภาพถ่ายที่เกิดขึ้นได้โดยเริ่มจากการวาดกรอบที่มีสิ่งแปลกปลอมอยู่ด้วยคำสั่ง Draw Polygon จากนั้นทำการ Assign image ทำการเลือกหลายภาพที่ต้องการจะประกอบกันโดยเลือก Allow Multiple Selection โดยเลือกภาพถ่ายทางอากาศที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมของถนน แล้วทำการ Update Orthomosaic



รูปที่ 103 ภาพระนาบออร์โธส่วนบนของสะพาน



รูปที่ 104 วิธีการแก้ไขภาพระนาบออร์โธ

ภาคผนวก ข

เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายแต่ละชั้นส่วนกรมทางหลวง

ตารางที่ 40 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายชั้นส่วนของโครงสร้างส่วนบน

ระดับความเสียหาย	สภาพ	สภาพโครงสร้างส่วนบน	
		ความเสียหาย	เงื่อนไขรายละเอียด
5	ดีมาก	-สภาพผิวใหม่ ไม่มีความเสียหาย	-
4	ดีพอใช้	- ผิวคอนกรีตสึกกร่อนเล็กน้อย	- ปูนทรายหลุดล่อน มองไม่เห็นผิวหิน
		- คอนกรีตมีโพรงขนาดเล็ก	- ลึกไม่ถึงผิวเหล็กเสริม
		- คอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนเล็กน้อย	- ลึกไม่ถึงผิวเหล็กเสริม
		- รอยแตกเนื่องจากการหดตัว	-
		- รอยแตกขยายงาที่ผิว (Map Cracks)	-
		- รอยแตกแบบHairline	- ความกว้างน้อยกว่า 1.6 mm สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก และ น้อยกว่า 0.1 mm สำหรับคอนกรีตอัดแรง
		- มีรอยคราบน้ำเล็กน้อย	-
3	พอใช้	- ผิวคอนกรีตสึกกร่อนหรือถูกกัดเซาะปานกลาง	- ปูนทรายหลุดล่อน 5-10 mm มองเห็นผิวหิน และบางแห่งเห็น เม็ดหิน หรือเม็ดหิน บางส่วนหลุด ออกมา
		- คอนกรีตมีโพรงขนาดเล็กหลายจุดหรือ โพรงขนาดใหญ่	- ลึกไม่ถึงผิวเหล็กเสริม
		- คอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนเล็กน้อยหลาย จุดหรือเป็นบริเวณกว้าง	- ลึกไม่ถึงผิวเหล็กเสริม
		- รอยแตกเนื่องจากการหดตัว	-

		หลายจุด	
		- รอยแตกหลายงาที่ผิว (Map Cracks) บริเวณกว้าง	-
		- รอยแตกขนาดเล็ก (อาจเกิดพร้อมขี้เกลือ คราบน้ำ และ/หรือ สนิม)	- ความกว้าง 1.6–3.2 mm สำหรับคอนกรีตเสริม และ 0.10-0.23 mm สำหรับคอนกรีตอัดแรง
		- รอยแตกหรือบิ่นจากการชนลิกไม้ถึงผิวเหล็กเสริม	- ลิกไม้ถึงผิวเหล็กเสริม
		- มีรอยคราบน้ำในปริมาณมากพบคราบเกลือ	-
		- Tie Rod เป็นสนิมหรือได้รับความเสียหาย	-
2	ชำรุด	- ผิวคอนกรีตสีกร่อนหรือถูกกัดเซาะรุนแรง	- ปูนทรายหลุดล่อน 10-20 mm เม็ดหินหลุดล่อน
		- คอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนถึงเหล็กเสริม	- ลิกถึงระดับเหล็กเสริม
		- รอยแตกขนาดกลาง (อาจเกิดพร้อมขี้เกลือ คราบน้ำและ/หรือ สนิม) - รอยแตกเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม	- ความกว้าง 3.2–4.8 mm สำหรับคอนกรีตเสริม และ 0.25-0.76 mm สำหรับคอนกรีตอัดแรง
		- เหล็กเสริมเป็นสนิม	-
1	วิกฤต	- ผิวคอนกรีตสีกร่อนหรือถูกกัดเซาะรุนแรง มาก	- ปูนทรายหลุดล่อนลิก > 20 mm เม็ดหินหลุดล่อนเป็นหลุมลิก
		- คอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนถึงเหล็กเสริม หลายจุดหรือเป็นบริเวณกว้าง	- ลิกถึงระดับเหล็กเสริม
		- รอยแตกขนาดใหญ่ (อาจเกิด	- ความกว้าง >4.8 mm (RC)

		พร้อมซีเกลื้อ คราบน้ำและ/หรือสนิม) - รอยแตกขนาดใหญ่เนื่องจากเหล็กเสริม เป็นสนิม	และ >0.76 mm PC สำหรับคอนกรีตอัดแรง
		- รอยแตกเนื่องจากแรงเฉือนหรือแรงดัดที่มี ความเสียหายที่มีผลต่อก าลังของ โครงสร้าง	- รอยแตกทุกขนาด
		- เหล็กเสริมเป็นสนิมหรือได้รับความเสียหายอย่างมาก	-
0	วิบัติ	- สภาพชำรุดเสียหายมาก ต้องทุบโครงสร้างทิ้งและก่อสร้างใหม่	-

ตารางที่ 41 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายชิ้นส่วนของโครงสร้างส่วนล่าง

ระดับความเสียหาย	สภาพ	สภาพโครงสร้างส่วนล่าง	
		ความเสียหาย	เงื่อนไขรายละเอียด
5	ดีมาก	-สภาพผิวใหม่ ไม่มีความเสียหาย	-
4	ดีพอใช้	- ผิวคอนกรีตสีกร่อนเล็กน้อย	- ปูนทรายหลุดล่อน มองไม่เห็นผิวหิน
		- คอนกรีตมีโพรงขนาดเล็ก	- ลึกไม่ถึงผิวเหล็กเสริม
		- คอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนเล็กน้อย	- ลึกไม่ถึงผิวเหล็กเสริม
		- รอยแตกเนื่องจากการหดตัว	-
		- รอยแตกขยายงาที่ผิว (Map Cracks)	-
		- รอยแตกแบบHairline	- ความกว้างน้อยกว่า 1.6 mm สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก และ น้อยกว่า 0.1 mm สำหรับคอนกรีตอัดแรง
3	พอใช้	- ผิวคอนกรีตสีกร่อนหรือถูกกัดเซาะปานกลาง	- ปูนทรายหลุดล่อน 5-10 mm มองเห็นผิวหิน และบางแห่งเห็น เม็ดหิน หรือเม็ดหิน บางส่วนหลุด ออกมา
		- คอนกรีตมีโพรงขนาดเล็กหลายจุดหรือ โพรงขนาดใหญ่	- ลึกไม่ถึงผิวเหล็กเสริม
		- คอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนเล็กน้อยหลาย จุดหรือเป็นบริเวณกว้าง	- ลึกไม่ถึงผิวเหล็กเสริม
		- รอยแตกเนื่องจากการหดตัวหลายจุด	-
		- รอยแตกขยายงาที่ผิว (Map	-

		Cracks) บริเวณกว้าง	
		-รอยแตกขนาดเล็ก (อาจเกิดพร้อมขึ้นเกลือ คราบน้ำ และ/หรือ สนิม)	- ความกว้าง 1.6–3.2 mm สำหรับคอนกรีตเสริม
		-รอยแตกหรือบิ่นจากการชนลิกไม้ถึงผิวเหล็กเสริม	- ลิกไม้ถึงผิวเหล็กเสริม
		- คอนกรีตเสียหายถึงเหล็กเสริม ในตำแหน่ง ที่ไม่มีผลต่อกำลังของโครงสร้าง (อาจมี สนิมเหล็ก)	-
2	ชำรุด	- ผิวคอนกรีตสีกร่อนหรือถูกกัดเซาะรุนแรง	- ปูนทรายหลุดล่อน 10-20 mm เม็ดหินหลุดล่อน
		- คอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนถึงเหล็กเสริม	- ลิกถึงระดับเหล็กเสริม
		- รอยแตกขนาดกลาง (อาจเกิดพร้อมขึ้นเกลือ คราบน้ำและ/หรือ สนิม) - รอยแตกเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม	- ความกว้าง 3.2–4.8 mm สำหรับคอนกรีตเสริม
1	วิกฤต	- ผิวคอนกรีตสีกร่อนหรือถูกกัดเซาะรุนแรง มาก	- ปูนทรายหลุดล่อนลิก > 20 mm เม็ดหินหลุดล่อนเป็นหลุมลิก
		- คอนกรีตกะเทาะหลุดล่อนถึงเหล็กเสริม หลายจุดหรือเป็นบริเวณกว้าง	- ลิกถึงระดับเหล็กเสริม
		- รอยแตกขนาดใหญ่ (อาจเกิดพร้อมขึ้นเกลือ คราบน้ำและ/หรือ สนิม) - รอยแตกขนาดใหญ่เนื่องจากเหล็กเสริม เป็นสนิม	- ความกว้าง >4.8 mm (RC) และ >0.76 mm PC สำหรับคอนกรีต อัดแรง
		- รอยแตกเนื่องจากแรงเฉือนหรือแรงดัดที่มีความเสียหายที่มีผลต่อ	- รอยแตกทุกขนาด

		กำลังของโครงสร้าง	
		- เหล็กเสริมเป็นสนิมหรือได้รับความเสียหายอย่างมาก	-
0	วิบัติ	- สภาพชำรุดเสียหายมาก ต้องทุบโครงสร้างทิ้งและก่อสร้างใหม่	-

ตารางที่ 42 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายของทางเท้า

ระดับความเสียหาย	สภาพ	สภาพทางเท้า
5	ดีมาก	- สภาพใหม่ ไม่มีความเสียหาย
4	ดีพอใช้	- พบการหลุดล่อนหรือเป็นโพรงขนาดเล็ก
3	พอใช้	- พบการหลุดล่อนหรือเป็นโพรงขนาดเล็กจำนวนมาก พบรอยแตกขนาดเล็ก - สามารถสังเกตเห็นเหล็กเสริมได้ แต่เหล็กเสริมยังอยู่ในสภาพที่ดี
2	ชำรุด	- พบการหลุดล่อนหรือเป็นโพรงขนาดใหญ่ เหล็กเสริมเป็นสนิม - พบรอยแตกขนาดใหญ่ มีการเอียงตัวเล็กน้อย
1	วิกฤต	- พบการหลุดล่อนหรือเป็นโพรงขนาดใหญ่เป็นบริเวณกว้าง เหล็กเสริมเป็นสนิมอย่างมาก - พบรอยแตกขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก - มีการเอียงตัวจนอาจทำให้โครงสร้างไม่มีความมั่นคง
0	วิบัติ	- ชำรุดเสียหายมาก จนไม่สามารถใช้งานได้

ตารางที่ 43 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายของรอยต่อเพื่อขยาย

ระดับความเสียหาย	สภาพ	สภาพรอยต่อเพื่อขยาย
5	ดีมาก	- สภาพดี ไม่มีความเสียหาย
4	ดีพอใช้	- สภาพใช้งานได้ เริ่มมีการสะสมของเศษวัสดุ - Joint Filler เริ่มหลุดล่อน (Concrete Joint) - พบรอยแตกตามแนวรอยต่อ (Asphaltic Concrete)
3	พอใช้	- สภาพใช้งานได้ มีการสะสมของเศษวัสดุหรือวัชพืชในปริมาณค่อนข้างมาก - Joint Filler หลุดล่อน (Concrete Joint) - Metal Plate เริ่มเป็นสนิม เสียรูปหรือโก่งงอเล็กน้อย - หลวม (Metal Joint)
2	ชำรุด	- ผิวทางเสียหายบริเวณรอยต่อสะพานหรือเสียหายตามแนว ยาวสะพาน (Asphaltic Concrete) - มีการรื้อซึม - มีเศษวัสดุอุดตัน - มีการสะสมของเศษวัสดุหรือวัชพืชอย่างมากจนทำให้ปลาย สะพานเคลื่อนที่ไม่เป็นอิสระ - พบรอยแตกหรือการหลุดล่อนของคอนกรีตที่อยู่ใกล้เคียง - Metal Plate เสียรูปโก่งงอแตกหักหลุดออกเป็นบางส่วน (Metal Joint)
1	วิกฤต	- มีการรื้อซึม - มีรอยแตกฉีกขาด - พบรอยแตกขนาดใหญ่หรือการหลุดล่อนของคอนกรีตที่อยู่ ใกล้เคียงเป็นบริเวณ กว้าง - Metal Plate เสียรูปโก่งงอแตกหักหลุดออกเป็นบริเวณ กว้าง (Metal Joint)
0	วิบัติ	- สภาพชำรุดเสียหายมากจนไม่สามารถใช้งานได้

ตารางที่ 44 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์

ระดับความเสียหาย	สภาพ	สภาพผิวทางแอสฟัลต์
5	ดีมาก	- สภาพดี ไม่มีความเสียหาย
4	ดีพอใช้	- สภาพเรียบ มีความเสียหายน้อยมาก - ผู้ขับขี่ยานพาหนะไม่สามารถมองเห็นความเสียหาย และไม่ เป็น อุปสรรคต่อการขับขี่
3	พอใช้	- สภาพพอใช้ มีความเสียหายน้อยกว่าร้อยละ 20 ของพื้นที่ผิว - ผิวทางเสียหายบริเวณรอยต่อสะพานหรือเสียหายตามแนว ยาวสะพาน (รอยต่อของแผ่นพื้น) - สามารถขับขี่ยานพาหนะด้วยอัตราความเร็วปกติ
2	ชำรุด	- สภาพชำรุด มีความเสียหายระหว่างร้อยละ 20-50 ของพื้นที่ ผิว - ผิวทางมีรอยซ่อมไม่เรียบร้อยเป็นแห่ง ๆ - ผิวทางเป็นหลุมเป็นบ่อ มีการหลุดล่อน - ผิวทางแตกร้าว หรือแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว - ผิวทางเสียรูปร่าง (ขรุขระ เป็นลูกระนาด ร่องล้อ ฯ) - ต้องขับขี่ยานพาหนะด้วยความเร็วที่ช้ากว่าปกติ เป็นอุปสรรค ต่อ การจราจร
1	วิกฤต	- สภาพชำรุด มีความเสียหายมากกว่าร้อยละ 50 ของพื้นที่ ผิว - ผิวทางเป็นหลุมเป็นบ่อ มีการหลุดล่อน แตกร้าว เสียรูปร่าง (ขรุขระ เป็นลูกระนาด ร่องล้อ ฯ) อย่างรุนแรงหรือเป็นบริเวณ กว้าง - ต้องขับขี่ยานพาหนะด้วยความเร็วต่ำมาก ต้องใช้ความ ระมัดระวัง เป็น อุปสรรคต่อการจราจร
0	วิบัติ	- สภาพชำรุด เสียหายมาก ต้องรื้อผิวทางทิ้งและปูผิวใหม่

ตารางที่ 45 เกณฑ์การจัดลำดับความเสียหายของแผ่นรองรับคาน

ระดับความเสียหาย	สภาพ	สภาพแผ่นรองรับคาน
5	ดีมาก	- สภาพใหม่ ไม่มีความเสียหาย
4	ดีพอใช้	- มีการสะสมของเศษวัสดุในบริเวณแผ่นรองรับคาน
3	พอใช้	- มีการโย้เอียงไม่เกิน 25% ของความหนาของฐานรอง - มีการยุบตัวไม่ได้ระดับต่างกันไม่เกิน 1/10 ของความหนา - มีการเลื่อนของแผ่นยางรองรับคานไม่เกินครึ่งหนึ่งของความหนาของ แผ่นยางรองคอสะพาน - มีความสกปรก แต่ไม่พบความเสียหายแผ่น
2	ชำรุด	- มีการโย้เอียงประมาณ 25% ของความหนาของฐานรอง - มีการยุบตัวไม่ได้ระดับต่างกันประมาณ 1/10 ของความหนา - มีการเลื่อนของแผ่นยางรองคอสะพานประมาณครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นยางรองคอสะพาน - พบการปริแตกที่ผิวแต่ไม่พบรอยฉีกขาด - ไม่พบการแยกตัวระหว่างยางและแผ่นเหล็ก - มีความสกปรก และพบความเสียหาย
1	วิกฤต	- มีการโย้เอียงเกิน 25% ของความหนาของฐานรอง - มีการยุบตัวไม่ได้ระดับต่างกันเกิน 1/10 ของความหนา - มีการเลื่อนของแผ่นยางรองคอสะพานเกินครึ่งหนึ่งของความหนาของ แผ่นยางรองคอสะพาน - พบรอยฉีกขาดขนาดใหญ่ - พบการแยกตัวระหว่างยางและแผ่นเหล็ก
0	วิบัติ	- ชำรุดเสียหายมาก จนไม่สามารถใช้งานได้

ภาคผนวก ค

การกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	-5.38215	-2.51383	34.2878	34.7986	0.278 (14)
TotalTop_GCP02	-5.13761	-2.4326	34.5092	34.9742	0.391 (13)
TotalTop_GCP03	-4.82606	-2.3627	34.7846	35.1972	0.352 (13)
TotalTop_GCP04	-4.63388	-2.26645	34.8873	35.2666	0.320 (11)
TotalTop_GCP05	-4.49978	-2.16231	34.9669	35.3215	0.265 (10)
TotalTop_GCP06	-4.43533	-2.091	35.0115	35.3532	0.523 (10)
TotalTop_GCP07	-4.43043	-2.00643	35.0413	35.3773	0.354 (11)
TotalTop_GCP08	-4.48809	-1.93856	35.0348	35.3743	0.398 (9)
TotalTop_GCP09	-4.60773	-1.82625	35.01	35.3591	0.240 (12)
TotalTop_GCP10	-4.79923	-1.73947	34.9693	35.3399	0.533 (10)
TotalTop_GCP11	-5.03111	-1.6487	34.9337	35.3326	0.176 (14)
TotalTop_GCP12	-4.69784	-1.63869	37.0894	37.4216	0.641 (18)
TotalTop_GCP13	-4.46394	-1.73182	37.1248	37.4323	0.292 (16)
TotalTop_GCP14	-4.30458	-1.84262	37.1481	37.442	0.584 (14)
TotalTop_GCP15	-4.17738	-1.92153	37.1713	37.4546	0.361 (14)
TotalTop_GCP16	-4.10203	-2.00562	37.1406	37.4202	0.303 (16)
TotalTop_GCP17	-4.11486	-2.08468	37.1321	37.4175	0.273 (17)
TotalTop_GCP18	-4.19566	-2.18306	37.0849	37.3853	0.254 (17)
TotalTop_GCP19	-4.33867	-2.26958	36.9998	37.3223	0.217 (17)
TotalTop_GCP20	-4.52137	-2.35912	36.9003	37.251	0.275 (16)
TotalTop_GCP21	-4.7842	-2.44211	36.8915	37.2805	0.163 (20)
TotalTop_GCP22	-5.00565	-2.52705	36.9363	37.3595	0.361 (20)
Total	4.6021	2.10885	35.9743	36.3287	0.360

Table 5. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 105 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานโดยการไม่มีจุดควบคุมภาพถ่าย
(NO GCP)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.000917387	0.526159	0.967733	1.10152	0.293 (14)
TotalTop_GCP11	-0.693285	-0.702227	-1.09216	1.47193	0.188 (14)
TotalTop_GCP12	0.689476	0.64532	1.23828	1.55729	0.646 (18)
TotalTop_GCP22	-0.00739308	-0.485847	-0.833954	0.965185	0.357 (20)
Total	0.488896	0.596333	1.04381	1.29776	0.422

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	-0.111614	0.618281	22.5508	22.5595	0.392 (13)
TotalTop_GCP03	-0.844456	-0.301031	42.218	42.2275	0.356 (13)
TotalTop_GCP04	-1.614	1.02484	56.6754	56.7077	0.329 (11)
TotalTop_GCP05	-1.16414	2.71663	65.4364	65.5031	0.266 (10)
TotalTop_GCP06	-1.56928	0.936268	67.6893	67.714	0.526 (10)
TotalTop_GCP07	-1.58897	0.309077	64.9319	64.952	0.351 (11)
TotalTop_GCP08	-1.50523	-2.21329	55.5816	55.646	0.401 (9)
TotalTop_GCP09	-1.32392	-0.258484	40.7978	40.8201	0.243 (12)
TotalTop_GCP10	-2.13213	-0.712362	20.8485	20.9693	0.543 (10)
TotalTop_GCP13	0.424832	0.372119	25.0027	25.0091	0.291 (16)
TotalTop_GCP14	-2.12371	-1.58666	43.4664	43.5472	0.581 (14)
TotalTop_GCP15	-1.75577	-0.192236	57.4039	57.4311	0.364 (14)
TotalTop_GCP16	0.0933143	0.711324	63.5562	63.5603	0.307 (16)
TotalTop_GCP17	-0.160636	1.87649	68.3275	68.3534	0.260 (17)
TotalTop_GCP18	-1.32429	0.940925	65.9086	65.9286	0.251 (17)
TotalTop_GCP19	-2.46088	0.992999	56.7867	56.8487	0.222 (17)
TotalTop_GCP20	-0.669194	0.334281	42.7797	42.7862	0.273 (16)
TotalTop_GCP21	-0.802041	0.0292899	23.0654	23.0794	0.170 (20)
Total	1.39336	1.15596	51.7579	51.7896	0.344

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 106 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งสัดส่วน 1 ส่วน โดยใช้จุด
ควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Portion 1: P1)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.161393	0.461744	0.796359	0.934581	0.287 (14)
TotalTop_GCP06	-1.18413	-0.410269	-0.0872771	1.25623	0.528 (10)
TotalTop_GCP11	-0.564942	-0.759204	-1.04314	1.40844	0.186 (14)
TotalTop_GCP12	0.944518	0.643657	1.00244	1.52029	0.641 (18)
TotalTop_GCP17	0.463647	0.462186	0.46353	0.80215	0.283 (17)
TotalTop_GCP22	0.169195	-0.414714	-0.848877	0.959795	0.364 (20)
Total	0.693191	0.541267	0.782122	1.17694	0.412

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	0.00235818	-0.351551	-0.379991	0.517675	0.387 (13)
TotalTop_GCP03	-0.69637	-2.25177	0.796116	2.48781	0.348 (13)
TotalTop_GCP04	-1.41602	-1.27151	1.26507	2.28523	0.314 (11)
TotalTop_GCP05	-0.879296	0.816989	0.990013	1.55588	0.265 (10)
TotalTop_GCP07	-1.29602	-0.249899	-0.0759658	1.32208	0.356 (11)
TotalTop_GCP08	-1.31485	-1.57601	-0.785264	2.19756	0.394 (9)
TotalTop_GCP09	-1.15202	0.932447	-1.47708	2.09246	0.236 (12)
TotalTop_GCP10	-1.98131	0.123254	-2.51436	3.20356	0.520 (10)
TotalTop_GCP13	0.720918	1.2626	1.35374	1.98658	0.290 (16)
TotalTop_GCP14	-1.70795	-0.329165	0.922902	1.96906	0.583 (14)
TotalTop_GCP15	-1.11261	0.515404	0.813981	1.47177	0.360 (14)
TotalTop_GCP16	0.793277	0.149803	-1.60772	1.79902	0.302 (16)
TotalTop_GCP18	-0.79675	-1.05267	1.47366	1.97854	0.254 (17)
TotalTop_GCP19	-2.11783	-1.4103	1.44373	2.9255	0.216 (17)
TotalTop_GCP20	-0.479722	-1.6429	1.49625	2.27333	0.280 (16)
TotalTop_GCP21	-0.679055	-0.982281	0.288561	1.22852	0.160 (20)
Total	1.19999	1.10851	1.24987	2.05693	0.335

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 107 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งสัดส่วน 2 ส่วน โดยใช้จุด
ควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 2: P2)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.12671	0.738227	0.889745	1.16305	0.290 (14)
TotalTop_GCP03	-0.388783	-0.691896	0.222504	0.824246	0.352 (13)
TotalTop_GCP06	-0.61463	-0.247682	0.0028007	0.662665	0.527 (10)
TotalTop_GCP09	-0.480522	0.637707	-0.913335	1.21316	0.241 (12)
TotalTop_GCP11	-0.197257	-0.834339	-0.709416	1.11279	0.181 (14)
TotalTop_GCP12	1.35456	0.661779	0.777621	1.69631	0.640 (18)
TotalTop_GCP14	-1.00627	-0.534127	0.819422	1.40332	0.585 (14)
TotalTop_GCP17	0.909886	0.58061	0.0337219	1.07988	0.278 (17)
TotalTop_GCP20	-0.155655	-0.143398	0.469897	0.515359	0.279 (16)
TotalTop_GCP22	0.441666	-0.183514	-1.30988	1.39447	0.367 (20)
Total	0.686249	0.574668	0.734336	1.15777	0.404

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	0.122312	0.766404	-0.627822	0.998246	0.387 (13)
TotalTop_GCP04	-0.99391	0.150322	0.757492	1.25867	0.314 (11)
TotalTop_GCP05	-0.354279	1.66172	0.709816	1.84137	0.265 (10)
TotalTop_GCP07	-0.647039	-0.409076	0.278106	0.814461	0.355 (11)
TotalTop_GCP08	-0.606307	-1.85204	-0.30786	1.97293	0.392 (9)
TotalTop_GCP10	-1.44345	-0.0855587	-2.06762	2.52308	0.519 (10)
TotalTop_GCP13	1.30238	1.13736	1.21902	2.1156	0.289 (16)
TotalTop_GCP15	-0.414676	0.271004	0.729909	0.882137	0.360 (14)
TotalTop_GCP16	1.39158	-0.0513515	-1.79824	2.27437	0.302 (16)
TotalTop_GCP18	-0.440501	-0.242517	0.681029	0.846555	0.255 (17)
TotalTop_GCP19	-1.77777	-0.0237982	0.455399	1.83533	0.216 (17)
TotalTop_GCP21	-0.374306	0.075255	-0.489706	0.620951	0.160 (20)
Total	0.970283	0.837194	1.00343	1.62764	0.314

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 108 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งสี่ส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่ 1

โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 10 จุด (Portion 4 type 1: P4(1))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.23032	0.775676	0.917374	1.22323	0.290 (14)
TotalTop_GCP03	0.00429557	-0.689929	0.0500086	0.691752	0.351 (13)
TotalTop_GCP04	-0.466222	0.117974	0.401591	0.626543	0.318 (11)
TotalTop_GCP06	-0.249366	-0.158713	-0.0951333	0.310522	0.526 (10)
TotalTop_GCP08	-0.321961	-1.32307	-0.342036	1.40398	0.397 (9)
TotalTop_GCP09	-0.271397	0.833884	-0.914694	1.26716	0.241 (12)
TotalTop_GCP11	-0.158477	-0.872169	-0.623416	1.08372	0.180 (14)
TotalTop_GCP12	1.36873	0.662779	0.723333	1.68401	0.640 (18)
TotalTop_GCP14	-0.861363	-0.309726	0.685965	1.14386	0.584 (14)
TotalTop_GCP15	-0.176039	0.77589	0.52714	0.954395	0.363 (14)
TotalTop_GCP17	1.36175	0.69395	-0.15144	1.53586	0.276 (17)
TotalTop_GCP19	-1.25811	-0.0962407	0.140647	1.2696	0.216 (17)
TotalTop_GCP20	0.246196	-0.198926	0.269611	0.415781	0.279 (16)
TotalTop_GCP22	0.541347	-0.22802	-1.30587	1.4319	0.367 (20)
Total	0.705705	0.656992	0.623873	1.14842	0.383

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	0.383629	0.786361	-0.709144	1.12624	0.387 (13)
TotalTop_GCP05	0.130204	1.60606	0.445928	1.67189	0.265 (10)
TotalTop_GCP07	-0.344317	0.0262475	0.227388	0.413459	0.355 (11)
TotalTop_GCP10	-1.32646	-0.06119	-1.99879	2.39967	0.519 (10)
TotalTop_GCP13	1.38755	1.19875	1.14149	2.15993	0.289 (16)
TotalTop_GCP16	1.76122	0.403045	-1.95371	2.66108	0.303 (16)
TotalTop_GCP18	0.0718171	-0.30021	0.38296	0.491876	0.254 (17)
TotalTop_GCP21	-0.11556	0.0226962	-0.588016	0.599693	0.160 (20)
Total	0.941268	0.782009	1.13804	1.67112	0.314

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 109 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งสัดส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 14 จุด (Portion 4 type 2: P4(2))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.167827	0.756159	0.749572	1.07787	0.287 (14)
TotalTop_GCP03	-0.255576	-0.801434	-0.0869496	0.845681	0.351 (13)
TotalTop_GCP05	-0.243232	1.15498	0.266115	1.20994	0.270 (10)
TotalTop_GCP07	-0.648149	-0.191785	0.409182	0.790132	0.357 (11)
TotalTop_GCP09	-0.519922	0.670259	-0.907079	1.24192	0.242 (12)
TotalTop_GCP11	-0.236784	-0.841153	-0.908805	1.26077	0.184 (14)
TotalTop_GCP12	1.30988	0.634606	0.92342	1.72372	0.640 (18)
TotalTop_GCP14	-1.06948	-0.517401	1.1761	1.67173	0.587 (14)
TotalTop_GCP16	1.37747	0.183078	-1.224	1.85179	0.308 (16)
TotalTop_GCP18	-0.30074	-0.651317	0.583288	0.924599	0.257 (17)
TotalTop_GCP20	-0.057771	-0.248439	0.43004	0.499994	0.279 (16)
TotalTop_GCP22	0.466135	-0.164179	-1.12782	1.23134	0.366 (20)
Total	0.705171	0.64281	0.815863	1.25543	0.377

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	0.21184	0.755533	-0.866733	1.16916	0.387 (13)
TotalTop_GCP04	-0.821088	-0.197412	0.280992	0.890007	0.313 (11)
TotalTop_GCP06	-0.636307	-0.311013	-0.0240228	0.708655	0.524 (10)
TotalTop_GCP08	-0.637672	-1.72952	-0.160361	1.85029	0.392 (9)
TotalTop_GCP10	-1.48264	-0.0845096	-2.18175	2.63921	0.519 (10)
TotalTop_GCP13	1.2507	1.11955	1.4687	2.23041	0.289 (16)
TotalTop_GCP15	-0.477182	0.385339	1.24804	1.39061	0.361 (14)
TotalTop_GCP17	1.03679	0.584586	0.320967	1.23276	0.284 (17)
TotalTop_GCP19	-1.66359	-0.344367	0.294251	1.72415	0.216 (17)
TotalTop_GCP21	-0.309738	0.0608651	-0.406019	0.514289	0.160 (20)
Total	0.972582	0.746379	0.984157	1.57212	0.338

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 110 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งสัดส่วน 5 ส่วน โดยใช้จุด
ควบคุมภาพถ่ายจำนวน 12 จุด (Portion 5: P5)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP...	0.286581	0.65159	1.09485	1.30591	0.294 (14)
TotalTop_GCP...	0.335609	0.58546	-0.38037	0.774647	0.390 (13)
TotalTop_GCP...	-0.0434697	-0.798015	0.17752	0.818677	0.352 (13)
TotalTop_GCP...	-0.536208	-0.0520383	0.362671	0.649428	0.317 (11)
TotalTop_GCP...	-0.000991941	1.23269	0.333572	1.27702	0.271 (10)
TotalTop_GCP...	-0.45509	-0.351272	0.0436118	0.576542	0.526 (10)
TotalTop_GCP...	-0.532844	-0.0583469	0.526556	0.751391	0.357 (11)
TotalTop_GCP...	-0.466451	-1.34259	-0.0435325	1.42198	0.396 (9)
TotalTop_GCP...	-0.33552	0.730084	-0.664801	1.04286	0.237 (12)
TotalTop_GCP...	-1.34175	-0.296389	-1.64373	2.14242	0.526 (10)
TotalTop_GCP...	-0.0913493	-1.09867	-0.435181	1.18525	0.179 (14)
TotalTop_GCP...	1.39588	0.390438	0.734251	1.62482	0.639 (18)
TotalTop_GCP...	1.29916	0.910911	1.14553	1.95699	0.301 (16)
TotalTop_GCP...	-1.00186	-0.447382	0.775624	1.34368	0.585 (14)
TotalTop_GCP...	-0.36116	0.709084	0.713723	1.06894	0.366 (14)
TotalTop_GCP...	1.53813	0.28299	-1.63378	2.26167	0.313 (16)
TotalTop_GCP...	1.17541	0.513249	-0.0689711	1.28443	0.281 (17)
TotalTop_GCP...	-0.0888437	-0.584462	0.270397	0.650079	0.255 (17)
TotalTop_GCP...	-1.37342	-0.232111	0.0883239	1.39569	0.216 (17)
TotalTop_GCP...	0.189539	-0.289372	0.381009	0.514616	0.279 (16)
TotalTop_GCP...	-0.132612	-0.143085	-0.342064	0.393786	0.162 (20)
TotalTop_GCP...	0.530968	-0.32938	-1.15211	1.31064	0.366 (20)
Total	0.793768	0.650892	0.754946	1.27423	0.362

Table 5. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 111 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน

22 จุด (FULL)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.252885	-0.0325643	-0.0394942	0.258014	0.279 (14)
TotalTop_GCP11	0.255656	-0.0182269	-0.0278978	0.257818	0.175 (14)
TotalTop_GCP17	-0.518282	0.0341845	0.350449	0.626577	0.286 (17)
Total	0.364201	0.0292189	0.204249	0.418585	0.254

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	-0.153312	-0.814041	0.253952	0.866405	0.387 (13)
TotalTop_GCP03	-1.31875	-2.73257	2.62251	4.01044	0.348 (13)
TotalTop_GCP04	-2.31351	-1.82773	4.334	5.2418	0.314 (11)
TotalTop_GCP05	-1.94335	0.210176	4.95215	5.32396	0.265 (10)
TotalTop_GCP06	-2.31045	-0.829426	4.39148	5.03102	0.524 (10)
TotalTop_GCP07	-2.24465	-0.43975	4.41189	4.96957	0.357 (11)
TotalTop_GCP08	-1.98022	-1.70797	3.35077	4.25043	0.395 (9)
TotalTop_GCP09	-1.42934	0.949857	1.96059	2.60561	0.236 (12)
TotalTop_GCP10	-1.76284	0.442849	-0.121379	1.82166	0.522 (10)
TotalTop_GCP12	1.94508	1.34486	-2.2174	3.24173	0.637 (18)
TotalTop_GCP13	1.08946	1.5183	-0.584906	1.95813	0.290 (16)
TotalTop_GCP14	-1.87156	-0.375209	0.019576	1.9089	0.583 (14)
TotalTop_GCP15	-1.7098	0.326327	0.550113	1.82552	0.359 (14)
TotalTop_GCP16	-0.0856355	-0.0757948	-1.59992	1.604	0.301 (16)
TotalTop_GCP18	-1.81208	-1.67497	0.749805	2.57903	0.256 (17)
TotalTop_GCP19	-3.01148	-1.99188	-0.243415	3.61882	0.217 (17)
TotalTop_GCP20	-1.10493	-2.17721	-1.46127	2.84542	0.279 (16)
TotalTop_GCP21	-0.878088	-1.52075	-4.48742	4.81878	0.161 (20)
TotalTop_GCP22	0.326599	-1.01264	-7.93694	8.00794	0.361 (20)
Total	1.71978	1.36939	3.22895	3.90627	0.373

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 112 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งฟืนปลา 3 จุด รูปแบบที่ 1
โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 3 จุด (Zigzag 3 type 1: Z3 (1))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.154422	0.446817	0.324546	0.57343	0.280 (14)
TotalTop_GCP06	-1.14054	-0.465861	-0.534541	1.34298	0.528 (10)
TotalTop_GCP12	0.328657	-0.0509285	-0.0408896	0.335083	0.637 (18)
TotalTop_GCP17	0.46416	0.438268	0.913344	1.11433	0.288 (17)
TotalTop_GCP22	0.182873	-0.384863	-0.379442	0.570559	0.362 (20)
Total	0.579929	0.389734	0.523624	0.873151	0.439

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	0.032311	-0.330589	-0.792941	0.859702	0.387 (13)
TotalTop_GCP03	-0.619998	-2.21255	0.504497	2.3525	0.348 (13)
TotalTop_GCP04	-1.32885	-1.22349	0.989491	2.05958	0.314 (11)
TotalTop_GCP05	-0.804825	0.847796	0.652161	1.33859	0.264 (10)
TotalTop_GCP07	-1.2851	-0.537006	-0.823795	1.61818	0.357 (11)
TotalTop_GCP08	-1.39663	-2.11482	-1.84382	3.13412	0.394 (9)
TotalTop_GCP09	-1.371	0.240544	-2.89472	3.21199	0.235 (12)
TotalTop_GCP10	-2.38645	-0.638284	-4.35958	5.01084	0.520 (10)
TotalTop_GCP11	-1.19638	-1.52584	-3.42446	3.93528	0.175 (14)
TotalTop_GCP13	0.304509	0.546465	0.696698	0.936343	0.290 (16)
TotalTop_GCP14	-1.95609	-0.976791	0.676957	2.28881	0.583 (14)
TotalTop_GCP15	-1.24974	0.0243724	0.892907	1.53614	0.358 (14)
TotalTop_GCP16	0.730716	-0.0959652	-1.29932	1.49378	0.300 (16)
TotalTop_GCP18	-0.742752	-0.979997	2.03192	2.37503	0.255 (17)
TotalTop_GCP19	-2.03746	-1.32508	2.0247	3.1633	0.216 (17)
TotalTop_GCP20	-0.40452	-1.57598	2.04321	2.61191	0.280 (16)
TotalTop_GCP21	-0.638781	-0.932926	0.809718	1.3907	0.160 (20)
Total	1.25315	1.14037	1.9092	2.55262	0.327

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 113 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งฟืนปลา 3 จุด รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 3 จุด (Zigzag 3 type 2: Z3 (2))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.78612	0.119601	-0.198533	0.819576	0.283 (14)
TotalTop_GCP07	-0.471377	0.133415	-0.00353132	0.489907	0.358 (11)
TotalTop_GCP13	0.605213	-0.00896818	0.00962318	0.605355	0.290 (16)
TotalTop_GCP19	-0.930275	-0.260643	0.475504	1.07678	0.217 (17)
Total	0.7197	0.158208	0.257694	0.780644	0.284

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	0.881539	-0.0294538	-1.31172	1.58069	0.387 (13)
TotalTop_GCP03	0.319132	-1.44908	0.0936963	1.48676	0.350 (13)
TotalTop_GCP04	-0.323807	-0.108737	0.883136	0.946892	0.314 (11)
TotalTop_GCP05	0.195256	1.99862	0.909615	2.20454	0.263 (10)
TotalTop_GCP06	-0.24454	0.497259	0.0815019	0.560097	0.527 (10)
TotalTop_GCP08	-0.723546	-1.88452	-0.973449	2.24111	0.394 (9)
TotalTop_GCP09	-0.822705	0.0290964	-2.09364	2.24967	0.236 (12)
TotalTop_GCP10	-1.92181	-1.27292	-3.68927	4.35022	0.521 (10)
TotalTop_GCP11	-0.768851	-2.56123	-2.91058	3.95254	0.175 (14)
TotalTop_GCP12	0.60147	-1.012	-0.889414	1.47545	0.637 (18)
TotalTop_GCP14	-1.56138	-1.10528	0.127784	1.91726	0.584 (14)
TotalTop_GCP15	-0.722855	0.348367	0.410742	0.901437	0.359 (14)
TotalTop_GCP16	1.42666	0.671964	-1.81228	2.40234	0.302 (16)
TotalTop_GCP17	1.34923	1.4887	0.240876	2.02353	0.282 (17)
TotalTop_GCP18	0.268292	0.177881	0.89266	0.948928	0.255 (17)
TotalTop_GCP20	0.677093	-0.899487	0.18945	1.14168	0.279 (16)
TotalTop_GCP21	0.401718	-0.754687	-1.3522	1.5998	0.160 (20)
TotalTop_GCP22	1.15415	-0.858373	-2.88139	3.22045	0.361 (20)
Total	0.935961	1.18483	1.59928	2.19944	0.374

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 114 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งฟืนปลา 4 จุด รูปแบบที่ 1
โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Zigzag 4 type 1: Z4 (1))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP04	-1.09867	-0.280233	0.171424	1.14673	0.317 (11)
TotalTop_GCP10	-0.313466	-0.136565	-0.0856103	0.352478	0.520 (10)
TotalTop_GCP16	1.04056	0.204912	0.291059	1.09976	0.305 (16)
TotalTop_GCP22	0.360969	0.195244	-0.0940035	0.421018	0.362 (20)
Total	0.793475	0.210529	0.180463	0.840531	0.373

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.284848	1.02363	-0.366032	1.12381	0.279 (14)
TotalTop_GCP02	0.178685	0.406343	-1.69257	1.74981	0.387 (13)
TotalTop_GCP03	-0.425948	-1.30346	-0.3867	1.42477	0.348 (13)
TotalTop_GCP05	-0.647502	1.56548	0.20406	1.70635	0.264 (10)
TotalTop_GCP06	-0.996277	0.0702359	-0.475483	1.10616	0.524 (10)
TotalTop_GCP07	-0.924004	-0.0934444	-0.0511597	0.930125	0.358 (11)
TotalTop_GCP08	-0.607005	-1.69783	-0.133665	1.80802	0.397 (9)
TotalTop_GCP09	0.0118514	0.730976	-0.00554271	0.731093	0.236 (12)
TotalTop_GCP11	1.56103	-1.1446	2.44473	3.11827	0.175 (14)
TotalTop_GCP12	3.06384	0.00586707	6.73163	7.39608	0.636 (18)
TotalTop_GCP13	2.35639	0.727411	5.8624	6.35999	0.290 (16)
TotalTop_GCP14	-0.56532	-0.795192	4.45003	4.55573	0.583 (14)
TotalTop_GCP15	-0.466292	0.168837	3.47016	3.50541	0.358 (14)
TotalTop_GCP17	0.600421	0.988817	1.89126	2.21701	0.283 (17)
TotalTop_GCP18	-0.632483	-0.212944	2.42318	2.5134	0.256 (17)
TotalTop_GCP19	-1.85324	-0.339274	2.07824	2.80512	0.216 (17)
TotalTop_GCP20	-0.180031	-0.641571	1.97489	2.08427	0.280 (16)
TotalTop_GCP21	-0.434613	-0.178879	0.832878	0.956332	0.160 (20)
Total	1.18459	0.845747	2.78191	3.13967	0.355

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 115 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งฟืนปลา 4 จุด รูปแบบที่ 2
โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Zigzag 4 type 2: Z4 (2))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.479383	0.386907	-0.390556	0.72941	0.284 (14)
TotalTop_GCP05	-0.648452	0.51829	0.791888	1.14726	0.282 (10)
TotalTop_GCP09	-1.13355	0.106949	-0.489828	1.23948	0.236 (12)
TotalTop_GCP12	0.70298	-0.157321	0.318147	0.787495	0.636 (18)
TotalTop_GCP16	0.739096	-0.0928789	-0.263374	0.790098	0.303 (16)
TotalTop_GCP20	-0.149779	-0.778529	0.31673	0.853732	0.279 (16)
Total	0.706885	0.422146	0.463763	0.94497	0.383

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	0.376322	0.267709	-1.52779	1.59607	0.387 (13)
TotalTop_GCP03	-0.317895	-1.45413	-0.163023	1.49737	0.351 (13)
TotalTop_GCP04	-1.07824	-0.890416	0.636067	1.53624	0.312 (11)
TotalTop_GCP06	-1.20279	-0.820548	0.684871	1.60905	0.524 (10)
TotalTop_GCP07	-1.31508	-0.535859	1.22945	1.87833	0.355 (11)
TotalTop_GCP08	-1.28766	-2.1275	0.583714	2.55442	0.393 (9)
TotalTop_GCP10	-2.07726	-0.777842	-2.35855	3.23771	0.519 (10)
TotalTop_GCP11	-0.796048	-1.64352	-2.04084	2.73859	0.175 (14)
TotalTop_GCP13	0.610676	0.4079	1.70533	1.85673	0.289 (16)
TotalTop_GCP14	-1.74888	-1.11713	2.06832	2.92993	0.583 (14)
TotalTop_GCP15	-1.18258	-0.00381849	2.30784	2.59319	0.359 (14)
TotalTop_GCP17	0.501808	0.13857	1.1798	1.28955	0.288 (17)
TotalTop_GCP18	-0.722265	-1.24019	1.257	1.90782	0.257 (17)
TotalTop_GCP19	-1.93544	-0.936264	0.630932	2.24067	0.216 (17)
TotalTop_GCP21	-0.199046	-0.317146	-1.12651	1.18711	0.160 (20)
TotalTop_GCP22	0.801811	-0.408169	-2.59753	2.74894	0.362 (20)
Total	1.15163	0.996473	1.55549	2.17687	0.350

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 116 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งพื้นปลา 6 จุด รูปแบบที่ 1
โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Zigzag 6 type 1: Z6 (1))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP03	-0.205396	-0.591678	0.432478	0.761122	0.352 (13)
TotalTop_GCP07	-0.271012	0.18334	-0.446887	0.553867	0.357 (11)
TotalTop_GCP11	0.616273	-0.0286691	-0.174752	0.641212	0.177 (14)
TotalTop_GCP14	-0.456061	0.01129	0.495252	0.673345	0.584 (14)
TotalTop_GCP18	-0.0827692	0.0216232	0.275706	0.288673	0.256 (17)
TotalTop_GCP22	0.388625	0.387424	-0.298746	0.624801	0.362 (20)
Total	0.37888	0.298667	0.371443	0.608869	0.367

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.174336	1.39964	2.1814	2.59767	0.279 (14)
TotalTop_GCP02	0.263382	1.08096	0.0121826	1.11265	0.387 (13)
TotalTop_GCP04	-0.75633	0.238024	0.613576	1.00258	0.313 (11)
TotalTop_GCP05	-0.0783709	1.92738	0.287992	1.95035	0.264 (10)
TotalTop_GCP06	-0.300227	0.295185	-0.584213	0.720122	0.524 (10)
TotalTop_GCP08	-0.189236	-1.26316	-1.13418	1.70814	0.394 (9)
TotalTop_GCP09	0.0382258	1.27443	-1.64124	2.0783	0.234 (12)
TotalTop_GCP10	-0.779972	0.590779	-2.26085	2.4635	0.519 (10)
TotalTop_GCP12	2.29224	1.40499	1.73996	3.20247	0.637 (18)
TotalTop_GCP13	2.02365	1.73344	1.36724	2.99488	0.290 (16)
TotalTop_GCP15	0.0407476	0.811648	0.196042	0.835981	0.358 (14)
TotalTop_GCP16	1.79269	0.563872	-2.34518	3.00525	0.301 (16)
TotalTop_GCP17	1.3236	1.15938	-0.449042	1.81596	0.281 (17)
TotalTop_GCP19	-1.51057	0.0456228	0.275648	1.5362	0.216 (17)
TotalTop_GCP20	0.0103065	-0.0827448	0.65554	0.660822	0.279 (16)
TotalTop_GCP21	-0.311082	0.321627	0.0734272	0.453439	0.160 (20)
Total	1.06387	1.05968	1.26981	1.96651	0.355

Table 7. Check points.

รูปที่ 117 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งฟืนปลา 6 จุด รูปแบบที่ 2
โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Zigzag 6 type 2: Z6 (2))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.596322	0.509925	0.325852	0.849589	0.281 (14)
TotalTop_GCP03	0.0811879	-0.846707	0.267523	0.891669	0.351 (13)
TotalTop_GCP05	-0.0426665	0.850936	0.497962	0.986853	0.272 (10)
TotalTop_GCP07	-0.629689	-0.44346	0.0492552	0.771745	0.356 (11)
TotalTop_GCP09	-0.588196	0.168916	-0.966091	1.14361	0.242 (12)
TotalTop_GCP11	-0.127131	-0.726375	-0.444527	0.861038	0.177 (14)
TotalTop_GCP13	1.30558	0.717371	1.07208	1.83535	0.301 (16)
TotalTop_GCP15	-0.508585	0.00888104	0.369708	0.628825	0.362 (14)
TotalTop_GCP17	1.13107	0.212071	-0.24993	1.17761	0.282 (17)
TotalTop_GCP19	-1.36769	-0.369912	0.23377	1.43599	0.217 (17)
TotalTop_GCP21	0.139507	-0.0982668	-0.872497	0.889028	0.166 (20)
Total	0.754092	0.535979	0.581806	1.0929	0.275

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	0.607012	0.600415	-0.775267	1.15326	0.387 (13)
TotalTop_GCP04	-0.52695	-0.256075	0.723784	0.931189	0.315 (11)
TotalTop_GCP06	-0.560233	-0.698777	-0.116887	0.903224	0.524 (10)
TotalTop_GCP08	-0.654579	-2.10724	-0.49925	2.26234	0.394 (9)
TotalTop_GCP10	-1.50375	-0.427703	-1.99833	2.53723	0.522 (10)
TotalTop_GCP12	1.60418	0.700482	0.974566	2.00346	0.638 (18)
TotalTop_GCP14	-1.10136	-1.05865	0.649275	1.65991	0.581 (14)
TotalTop_GCP16	1.43145	-0.0469047	-2.16915	2.59932	0.302 (16)
TotalTop_GCP18	-0.136683	-0.950981	0.372287	1.03036	0.254 (17)
TotalTop_GCP20	0.316824	-0.287325	0.320163	0.534264	0.280 (16)
TotalTop_GCP22	0.954524	-0.418332	-2.37402	2.5927	0.362 (20)
Total	0.977724	0.86934	1.25534	1.81317	0.429

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 118 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งฟืนปลา 11 จุด รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 11 จุด (Zigzag 11 type 1: Z11 (1))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP02	0.311179	0.546633	0.0673786	0.632598	0.387 (13)
TotalTop_GCP04	-0.776939	-0.0922247	0.604367	0.988635	0.320 (11)
TotalTop_GCP06	-0.500467	0.164383	0.299517	0.60597	0.527 (10)
TotalTop_GCP08	-0.423592	-0.755151	0.258049	0.903478	0.396 (9)
TotalTop_GCP10	-1.02991	-0.0630335	-1.56769	1.87679	0.524 (10)
TotalTop_GCP12	1.57146	-0.0150124	0.801513	1.76413	0.638 (18)
TotalTop_GCP14	-0.897751	0.135855	1.04113	1.38143	0.588 (14)
TotalTop_GCP16	1.50794	0.703309	-1.31129	2.11849	0.310 (16)
TotalTop_GCP18	-0.202884	-0.133365	0.309881	0.393668	0.257 (17)
TotalTop_GCP20	0.00140858	-0.562822	0.357234	0.666623	0.279 (16)
TotalTop_GCP22	0.429289	0.0547943	-0.577091	0.721336	0.362 (20)
Total	0.850981	0.399937	0.796941	1.23257	0.432

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
TotalTop_GCP01	0.285959	1.04582	2.25579	2.50282	0.279 (14)
TotalTop_GCP03	-0.228074	-1.0949	0.503253	1.22641	0.351 (13)
TotalTop_GCP05	-0.195833	1.75205	0.674116	1.88745	0.263 (10)
TotalTop_GCP07	-0.585552	0.356991	0.952474	1.17368	0.354 (11)
TotalTop_GCP09	-0.142848	1.34855	-0.532547	1.45691	0.233 (12)
TotalTop_GCP11	0.308805	-1.53343	-0.52351	1.6495	0.176 (14)
TotalTop_GCP13	1.48446	1.15914	1.42252	2.36025	0.289 (16)
TotalTop_GCP15	-0.310467	1.3104	1.12628	1.75558	0.361 (14)
TotalTop_GCP17	1.09215	1.05131	0.077551	1.51791	0.282 (17)
TotalTop_GCP19	-1.55362	-0.288607	0.0346676	1.58058	0.215 (17)
TotalTop_GCP21	-0.298273	-0.178976	-0.215026	0.408944	0.159 (20)
Total	0.776138	1.12577	0.98196	1.68345	0.272

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 119 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนบนของสะพานการแบ่งปันปลา 11 จุด รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 11 จุด (Zigzag 11 type 2: Z11 (2))

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
P01_Sideriver	0.694526	-4.19828	57.2301	57.3881	1.167 (24)
P02_Sideriver	0.496504	-4.19134	56.8407	56.9971	1.722 (21)
P03_Sideriver	1.02501	-4.0037	57.0691	57.2186	2.196 (18)
P04_Sideriver	0.629664	-3.89764	57.2584	57.3944	2.897 (31)
P05_Sideriver	-0.128254	-3.61854	56.6766	56.7922	2.397 (13)
P06_Sideriver	-0.179977	-3.60829	56.6652	56.7803	2.687 (14)
P07_Sideriver	0.00801054	-3.59096	56.7101	56.8236	1.799 (19)
P08_Sideriver	-0.15787	-3.58041	56.6745	56.7877	1.279 (13)
P09_Sideriver	0.110596	-3.5961	56.7183	56.8323	2.294 (20)
P10_Sideriver	0.016327	-3.57415	56.7125	56.825	1.652 (17)
P11_Sideriver	-0.180678	-3.54918	56.6639	56.7752	1.606 (12)
P12_Sideriver	-0.134508	-3.54893	56.6716	56.7828	2.878 (12)
P13_Sideriver	0.133406	-3.38223	56.7247	56.8256	5.170 (19)
P14_Sideriver	0.592165	-3.31659	57.2491	57.3481	2.957 (28)
P15_Sideriver	0.339022	-3.15937	56.7561	56.845	5.152 (26)
P16_Sideriver	0.960117	-3.18734	57.0451	57.1421	3.188 (28)
P17_Sideriver	0.670345	-3.03159	56.7625	56.8474	2.323 (11)
Total	0.495132	3.60482	56.8492	56.9655	2.914

Table 5. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 120 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานโดยการไม่มีจุดควบคุมภาพถ่าย

CHULALONGKORN UNIVERSITY (NO GCP)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Sideriver	-0.0124286	-0.067613	-0.0659059	0.0952344	1.167 (24)
P08_Sideriver	3.11912	0.494772	0.265519	3.16926	1.287 (13)
P09_Sideriver	-3.08578	-0.439003	0.639987	3.18188	2.293 (20)
P17_Sideriver	-0.00933389	-0.0378021	-0.0806183	0.0895289	2.324 (11)
Total	2.19381	0.332988	0.350331	2.24642	1.794

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02_Sideriver	-3.79463	-4.10375	3.94278	6.83999	1.722 (21)
P03_Sideriver	-6.6822	2.63329	-1.1517	7.27409	2.195 (18)
P04_Sideriver	-4.86365	1.773	-4.19902	6.66561	2.895 (31)
P05_Sideriver	4.44012	0.567118	0.254116	4.48339	2.395 (13)
P06_Sideriver	4.70703	0.349418	0.122032	4.72156	2.687 (14)
P07_Sideriver	1.41598	0.650184	0.722852	1.71763	1.800 (19)
P10_Sideriver	2.14832	0.617544	0.922246	2.4181	1.652 (17)
P11_Sideriver	4.62768	0.859961	0.352266	4.72007	1.606 (12)
P12_Sideriver	3.92933	-0.127676	0.0230708	3.93147	2.877 (12)
P13_Sideriver	-6.41029	1.51151	1.09519	6.67652	5.170 (19)
P14_Sideriver	-7.24424	-0.479237	-2.36541	7.6357	2.955 (28)
P15_Sideriver	-2.14009	5.08365	3.02467	6.29064	5.151 (26)
P16_Sideriver	-11.9361	3.56475	-0.312762	12.4609	3.188 (28)
Total	5.60682	2.32027	2.00234	6.38979	3.144

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 121 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 2 ส่วน โดยใช้จุด
ควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Portion 2: P2)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Sideriver	0.486794	-0.5252	0.878073	1.13306	1.169 (24)
P03_Sideriver	-0.701837	0.674764	-1.10143	1.47005	2.195 (18)
P08_Sideriver	2.30022	0.435406	0.120263	2.34416	1.283 (13)
P09_Sideriver	-1.39056	-0.558876	0.337929	1.53629	2.296 (20)
P14_Sideriver	-1.34324	-0.0818141	0.888387	1.61252	2.955 (28)
P17_Sideriver	0.659751	0.0061454	-0.36267	0.752887	2.332 (11)
Total	1.30344	0.454568	0.711054	1.5528	2.198

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02_Sideriver	-4.41658	-5.12689	2.16426	7.10459	1.723 (21)
P04_Sideriver	-0.321385	0.0380691	-1.47748	1.51251	2.899 (31)
P05_Sideriver	3.62204	0.303606	0.0551001	3.63516	2.398 (13)
P06_Sideriver	3.50792	0.158134	-0.0624281	3.51203	2.688 (14)
P07_Sideriver	1.97588	0.515197	0.546546	2.11383	1.797 (19)
P10_Sideriver	2.76406	0.565942	0.767091	2.92382	1.653 (17)
P11_Sideriver	3.57017	0.931175	0.203984	3.69524	1.607 (12)
P12_Sideriver	3.30979	-0.0191359	-0.104753	3.31151	2.877 (12)
P13_Sideriver	-4.2741	1.98953	0.849681	4.79042	5.172 (19)
P15_Sideriver	-0.33008	5.67903	2.62794	6.26629	5.151 (26)
P16_Sideriver	-4.26352	4.00449	0.646954	5.8849	3.189 (28)
Total	3.25902	2.69852	1.20076	4.39831	3.236

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 122 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่

1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 4 type 1: P4(1))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Sideriver	0.0595076	-0.225188	0.781735	0.815696	1.167 (24)
P04_Sideriver	-0.24376	0.477513	-1.30781	1.41343	2.898 (31)
P08_Sideriver	2.86983	0.137451	0.210226	2.88081	1.280 (13)
P09_Sideriver	-0.64955	-0.864106	0.396226	1.15134	2.296 (20)
P13_Sideriver	-2.93071	0.543851	0.923745	3.1206	5.174 (19)
P17_Sideriver	0.905726	-0.119045	-0.243475	0.945405	2.333 (11)
Total	1.73831	0.475087	0.756664	1.95447	2.894

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02_Sideriver	-4.87122	-4.69266	1.89557	7.02446	1.723 (21)
P03_Sideriver	-0.671486	1.32136	-1.16992	1.88828	2.197 (18)
P05_Sideriver	4.06764	0.183587	0.12914	4.07383	2.399 (13)
P06_Sideriver	3.96454	-0.00980109	0.0190299	3.9646	2.689 (14)
P07_Sideriver	2.61259	0.256817	0.621492	2.69774	1.794 (19)
P10_Sideriver	3.46623	0.21812	0.847599	3.57502	1.654 (17)
P11_Sideriver	4.22352	0.483347	0.304081	4.26195	1.605 (12)
P12_Sideriver	4.03173	-0.536267	-0.00423476	4.06724	2.876 (12)
P14_Sideriver	0.183829	-1.63027	1.20305	2.03443	2.954 (28)
P15_Sideriver	0.750323	4.47491	2.67633	5.26788	5.152 (26)
P16_Sideriver	-2.82702	2.78102	0.852128	4.05614	3.189 (28)
Total	3.27477	2.23306	1.18752	4.13774	2.927

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 123 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 4 ส่วน รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 4 type 2: P4(2))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Sideriver	0.465861	-0.515907	0.991813	1.21115	1.168 (24)
P03_Sideriver	-0.893111	0.643249	-1.21812	1.64172	2.194 (18)
P05_Sideriver	0.919005	-0.0677168	-0.206172	0.944279	2.398 (13)
P07_Sideriver	-0.443977	0.145716	0.285548	0.547619	1.799 (19)
P10_Sideriver	0.365085	0.206801	0.505993	0.65733	1.653 (17)
P12_Sideriver	0.712107	-0.343424	-0.367796	0.871957	2.877 (12)
P14_Sideriver	-1.91209	-0.134434	1.29049	2.31074	2.955 (28)
P17_Sideriver	0.798381	0.0161621	-0.520886	0.953412	2.333 (11)
Total	0.934762	0.332564	0.784183	1.26464	2.229

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02_Sideriver	-4.95187	-5.07144	1.74899	7.30064	1.722 (21)
P04_Sideriver	-1.37299	-0.100719	-1.15196	1.79506	2.898 (31)
P06_Sideriver	0.746684	-0.209109	-0.324187	0.840453	2.687 (14)
P08_Sideriver	-0.349197	0.0789077	-0.137608	0.383538	1.284 (13)
P09_Sideriver	-3.60083	-0.930249	0.05474	3.71945	2.296 (20)
P11_Sideriver	0.883226	0.596132	-0.0621436	1.06739	1.607 (12)
P13_Sideriver	-5.93595	1.82154	0.573941	6.23562	5.173 (19)
P15_Sideriver	-1.13681	5.64452	2.36898	6.22615	5.151 (26)
P16_Sideriver	-3.99445	3.9582	0.660958	5.66214	3.189 (28)
Total	3.21999	2.94102	1.10026	4.49761	3.350

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 124 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 6 ส่วน รูปแบบที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 8 จุด (Portion 6 type 1: P6 (1))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Sideriver	0.323995	-0.514451	0.996535	1.16735	1.169 (24)
P03_Sideriver	-0.502892	0.652809	-1.14274	1.40887	2.195 (18)
P05_Sideriver	1.70933	0.208256	-0.046726	1.72261	2.401 (13)
P08_Sideriver	0.444649	0.374879	0.0265535	0.582195	1.287 (13)
P09_Sideriver	-2.71847	-0.630324	0.216442	2.79897	2.295 (20)
P12_Sideriver	1.47756	-0.0584	-0.204423	1.49278	2.880 (12)
P14_Sideriver	-1.41261	-0.0871252	1.48171	2.04903	2.955 (28)
P17_Sideriver	0.689636	0.00478965	-0.566455	0.892465	2.333 (11)
Total	1.39292	0.400477	0.783166	1.64741	2.284

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02_Sideriver	-5.02659	-5.09495	1.6981	7.35586	1.723 (21)
P04_Sideriver	-0.780747	-0.0148494	-0.962757	1.23963	2.899 (31)
P06_Sideriver	1.53492	0.0787368	-0.162943	1.54555	2.686 (14)
P07_Sideriver	0.397217	0.443287	0.449485	0.74587	1.801 (19)
P10_Sideriver	1.2024	0.503551	0.671818	1.46652	1.651 (17)
P11_Sideriver	1.65336	0.886125	0.102472	1.87864	1.606 (12)
P13_Sideriver	-5.34276	1.98128	0.703259	5.74153	5.173 (19)
P15_Sideriver	-0.93473	5.66603	2.42633	6.23416	5.151 (26)
P16_Sideriver	-3.62948	3.97511	0.755692	5.43559	3.189 (28)
Total	2.88985	2.96331	1.1281	4.29012	3.308

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 125 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 6 ส่วน รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 8 จุด (Portion 6 type 2: P6 (2))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02_Sideriver	-0.673901	-0.612114	0.657467	1.12298	1.722 (21)
P04_Sideriver	1.10708	1.12952	-0.642433	1.70709	2.891 (31)
P06_Sideriver	1.47039	-0.0633182	-0.102936	1.47535	2.689 (14)
P08_Sideriver	0.522532	0.0622134	0.0760227	0.531686	1.285 (13)
P09_Sideriver	-2.14522	-0.9461	0.178868	2.3514	2.297 (20)
P11_Sideriver	1.75028	0.372458	0.134379	1.7945	1.606 (12)
P13_Sideriver	-3.87718	-0.221676	0.256668	3.89198	5.174 (19)
P15_Sideriver	1.69016	0.884379	0.86222	2.09337	5.150 (26)
P16_Sideriver	0.166753	-0.654833	-0.658952	0.943838	3.188 (28)
Total	1.81651	0.662677	0.489323	1.99456	3.349

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Sideriver	5.83158	4.10679	0.324643	7.13991	1.168 (24)
P03_Sideriver	2.96963	3.40819	-1.63643	4.80754	2.195 (18)
P05_Sideriver	1.72851	0.131569	0.00720415	1.73353	2.401 (13)
P07_Sideriver	0.727425	0.186495	0.46753	0.884597	1.799 (19)
P10_Sideriver	1.5893	0.127848	0.681733	1.73407	1.651 (17)
P12_Sideriver	1.72306	-0.665877	-0.18585	1.85658	2.881 (12)
P14_Sideriver	1.35824	-3.46755	1.19502	3.91111	2.955 (28)
P17_Sideriver	6.30259	-6.73688	-4.2378	10.1522	2.324 (11)
Total	3.41697	3.28639	1.69146	5.03359	2.229

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 126 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานการแบ่งสัดส่วน 8 ส่วน โดยใช้จุด
ควบคุมภาพถ่ายจำนวน 9 จุด (Portion 8: P8)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Sideriver	2.36575	1.37719	0.632786	2.8096	1.169 (24)
P02_Sideriver	-3.43719	-2.99592	1.05743	4.68059	1.758 (21)
P03_Sideriver	0.908763	1.68152	-1.36999	2.35165	2.290 (18)
P04_Sideriver	-0.230238	0.346264	-0.686055	0.802234	3.027 (31)
P05_Sideriver	1.21	0.0346563	-0.180816	1.22393	2.434 (13)
P06_Sideriver	1.00115	-0.120433	-0.302672	1.05281	2.718 (14)
P07_Sideriver	0.220146	0.193312	0.275716	0.402309	1.811 (19)
P08_Sideriver	0.0993715	0.0912416	-0.137693	0.192767	1.291 (13)
P09_Sideriver	-2.69234	-0.906006	0.00440658	2.8407	2.307 (20)
P10_Sideriver	1.09689	0.192779	0.478874	1.2123	1.662 (17)
P11_Sideriver	1.35768	0.498735	-0.0972784	1.44965	1.614 (12)
P12_Sideriver	1.29929	-0.475395	-0.417962	1.44528	2.989 (12)
P13_Sideriver	-4.32293	0.437213	0.1851	4.34893	5.379 (19)
P14_Sideriver	0.492637	-2.29041	1.24098	2.65117	3.002 (28)
P15_Sideriver	0.502413	2.0652	1.48933	2.5953	5.278 (26)
P16_Sideriver	-1.21184	0.443549	-0.0142742	1.29054	3.250 (28)
P17_Sideriver	1.35151	-0.622988	-1.39669	2.04094	2.364 (11)
Total	1.8032	1.22476	0.776199	2.31388	2.991

Table 5. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 127 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนข้างของสะพานโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 17 จุด (FULL)

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
P01_Pier1	0.4778	-5.62588	43.9607	44.3218	1.365 (49)
P02_Pier1	-0.623257	-5.1676	44.0588	44.3652	1.404 (71)
P03_Pier1	-1.70187	-4.75434	44.1839	44.4715	1.447 (77)
P04_Pier1	-2.81162	-4.28928	44.2365	44.5328	1.784 (51)
P05_Pier1	-0.0437127	-5.63368	44.4191	44.7749	0.987 (66)
P06_Pier1	-1.08122	-5.20367	44.5134	44.8296	0.956 (75)
P07_Pier1	-2.14525	-4.76298	44.5948	44.8997	1.089 (77)
P08_Pier1	0.65433	-5.98524	44.7908	45.1937	0.942 (48)
P09_Pier1	-0.451897	-5.52444	44.8806	45.2216	0.764 (73)
P10_Pier1	-1.51792	-5.07388	44.9346	45.2456	0.878 (77)
P11_Pier1	-2.64102	-4.61084	45.0101	45.3226	1.221 (55)
P12_Pier1	0.2151	-5.96359	45.3967	45.7872	0.606 (54)
P13_Pier1	-0.791523	-5.55788	45.4741	45.8193	0.612 (62)
P14_Pier1	-1.93878	-5.07737	45.58	45.9029	0.775 (50)
Total	1.50082	5.25384	44.7196	45.0522	1.104

Table 5. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 128 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 โดยไม่มีจุดควบคุมภาพถ่าย

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Pier1	-0.270143	0.131386	1.08304	1.12393	1.365 (49)
P04_Pier1	-1.04088	0.0207221	0.275001	1.07679	1.784 (51)
P12_Pier1	0.879568	-0.161987	-0.445595	0.999217	0.606 (54)
P14_Pier1	0.429916	0.00338542	-0.822708	0.928271	0.775 (50)
Total	0.727131	0.104813	0.7287	1.03475	1.220

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02_Pier1	1.08009	1.03597	0.74804	1.67314	1.404 (71)
P03_Pier1	-1.36665	0.0696989	0.599885	1.49414	1.447 (77)
P05_Pier1	0.132016	0.857558	0.0728381	0.870712	0.987 (66)
P06_Pier1	0.921935	1.13276	0.722108	1.62928	0.956 (75)
P07_Pier1	0.446606	1.69271	-0.23128	1.76585	1.089 (77)
P08_Pier1	0.182496	-0.0109991	0.395644	0.435844	0.942 (48)
P09_Pier1	-0.287849	0.481073	0.953778	1.10634	0.764 (73)
P10_Pier1	-0.134485	0.8682	-0.271678	0.919601	0.878 (77)
P11_Pier1	0.0190859	1.00387	-0.362726	1.06756	1.221 (55)
P13_Pier1	0.223125	-0.533284	-0.392326	0.698639	0.613 (62)
Total	0.654643	0.90771	0.54085	1.24299	1.067

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 129 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาต่อม่อที่ 1 การแบ่งมุม 4 จุด รูปแบบที่ 1 โดย
ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Edge 4 type 1: E4 (1))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Pier1	-0.204547	0.382106	0.505774	0.666072	1.365 (49)
P04_Pier1	-0.67951	-0.199088	0.275033	0.759613	1.784 (51)
P08_Pier1	0.378961	-0.387215	-0.259403	0.600697	0.942 (48)
P11_Pier1	0.503556	0.197715	-0.431679	0.692103	1.221 (55)
Total	0.47454	0.306051	0.382455	0.682002	1.365

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02_Pier1	1.24909	1.12245	0.363781	1.71827	1.404 (71)
P03_Pier1	-1.09729	-0.0213167	0.402507	1.16898	1.447 (77)
P05_Pier1	0.33138	0.693192	-0.489463	0.91099	0.987 (66)
P06_Pier1	1.21588	0.820229	0.344249	1.50653	0.956 (75)
P07_Pier1	0.834907	1.22915	-0.420277	1.54418	1.089 (77)
P09_Pier1	0.0080862	-0.0458586	0.49543	0.497614	0.764 (73)
P10_Pier1	0.252947	0.208511	-0.538438	0.630377	0.878 (77)
P12_Pier1	1.21349	-1.0395	-1.03196	1.90212	0.606 (54)
P13_Pier1	0.645983	-1.54698	-0.801878	1.85835	0.612 (62)
P14_Pier1	0.957224	-1.18066	-1.02388	1.83264	0.775 (50)
Total	0.889926	0.94009	0.641928	1.44493	1.013

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 130 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาต่อม่อที่ 1 การแบ่งมุม 4 จุด รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 4 จุด (Edge 4 type 1: E4 (2))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Pier1	-0.391383	0.198597	0.956931	1.05278	1.365 (49)
P04_Pier1	-1.10089	-0.32968	0.419273	1.22329	1.784 (51)
P08_Pier1	0.127554	0.0295097	0.252074	0.284047	0.942 (48)
P11_Pier1	0.0209234	0.627098	-0.233791	0.669588	1.221 (55)
P12_Pier1	0.876099	-0.212159	-0.55253	1.05728	0.606 (54)
P14_Pier1	0.466166	-0.319854	-0.752216	0.940981	0.775 (50)
Total	0.628054	0.339011	0.588901	0.925303	1.181

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02_Pier1	0.980561	0.961315	0.713583	1.54752	1.404 (71)
P03_Pier1	-1.44415	-0.141398	0.652428	1.59099	1.447 (77)
P05_Pier1	0.0652632	0.836026	-0.0154462	0.838712	0.987 (66)
P06_Pier1	0.874589	0.978224	0.720049	1.49676	0.956 (75)
P07_Pier1	0.418603	1.40306	-0.145835	1.47142	1.089 (77)
P09_Pier1	-0.323218	0.381901	0.901425	1.03096	0.764 (73)
P10_Pier1	-0.152313	0.634416	-0.235735	0.693725	0.878 (77)
P13_Pier1	0.23785	-0.710265	-0.416828	0.857202	0.613 (62)
Total	0.722471	0.838254	0.560884	1.24065	1.061

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 131 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 การแบ่งสัดส่วน 1 ส่วน โดยใช้จุด
ควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 1: P1)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Pier1	-0.405899	-0.0311592	0.598676	0.723973	1.365 (49)
P04_Pier1	-1.07768	-0.583222	0.253291	1.25128	1.784 (51)
P06_Pier1	0.904762	0.819248	0.464579	1.30598	0.956 (75)
P08_Pier1	0.163304	-0.0422646	-0.115089	0.204206	0.942 (48)
P11_Pier1	0.0909358	0.521104	-0.408805	0.668536	1.221 (55)
P13_Pier1	0.323045	-0.690192	-0.702898	1.03672	0.613 (62)
Total	0.616987	0.541908	0.467767	0.945063	1.176

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02_Pier1	0.978769	0.723312	0.42048	1.28762	1.404 (71)
P03_Pier1	-1.43183	-0.380653	0.42062	1.54012	1.447 (77)
P05_Pier1	0.0845916	0.685987	-0.331804	0.766699	0.987 (66)
P07_Pier1	0.461738	1.23743	-0.339279	1.36365	1.089 (77)
P09_Pier1	-0.276112	0.299255	0.598011	0.72347	0.764 (73)
P10_Pier1	-0.0946628	0.539253	-0.477079	0.726195	0.877 (77)
P12_Pier1	0.952001	-0.184452	-0.897691	1.32143	0.606 (54)
P14_Pier1	0.565878	-0.307245	-0.973245	1.16697	0.775 (50)
Total	0.753344	0.630343	0.603863	1.15304	1.057

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 132 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 การแบ่งสัดส่วน 2 ส่วน รูปแบบที่ 1
โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 2 type 1: P2 (1))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P05_Pier1	-0.247888	-0.0295271	0.121228	0.277519	0.987 (66)
P06_Pier1	0.356493	-0.00777792	0.900153	0.968206	0.956 (75)
P07_Pier1	-0.307711	0.296518	0.0770033	0.43421	1.089 (77)
P12_Pier1	0.620789	0.234488	-0.357164	0.753611	0.606 (54)
P13_Pier1	-0.212717	-0.386217	-0.178511	0.475687	0.612 (62)
P14_Pier1	-0.210484	-0.113961	-0.472924	0.530045	0.775 (50)
Total	0.35547	0.225828	0.449813	0.616189	0.880

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Pier1	-0.626217	-1.19863	0.894359	1.62134	1.365 (49)
P02_Pier1	0.529486	-0.553996	0.701486	1.03892	1.404 (71)
P03_Pier1	-2.10196	-1.72951	0.686897	2.80736	1.447 (77)
P04_Pier1	-1.97955	-2.09484	0.495999	2.92455	1.784 (51)
P08_Pier1	-0.0513855	-0.221852	0.35192	0.419174	0.942 (48)
P09_Pier1	-0.71728	-0.00870329	1.04257	1.26551	0.764 (73)
P10_Pier1	-0.75658	0.0891197	-0.0567166	0.763919	0.878 (77)
P11_Pier1	-0.804647	-0.069172	-0.00617512	0.807638	1.221 (55)
Total	1.15901	1.07152	0.634809	1.7013	1.249

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 133 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 การแบ่งสัดส่วน 2 ส่วน รูปแบบที่ 2 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด (Portion 2 type 1: P2 (2))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Pier1	-0.377376	0.0307744	0.376114	0.533687	1.365 (49)
P02_Pier1	1.14597	0.818318	0.277635	1.43526	1.404 (71)
P03_Pier1	-1.13022	-0.26908	0.355211	1.2149	1.447 (77)
P04_Pier1	-0.645141	-0.41054	0.27411	0.812333	1.784 (51)
P08_Pier1	0.242576	-0.485805	-0.439517	0.698588	0.942 (48)
P09_Pier1	-0.0596462	-0.101802	0.358323	0.377248	0.764 (73)
P10_Pier1	0.250941	0.18966	-0.63227	0.706192	0.878 (77)
P11_Pier1	0.571353	0.221995	-0.47987	0.778461	1.221 (55)
Total	0.670921	0.394202	0.414045	0.881455	1.249

Table 6. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P05_Pier1	0.212811	0.505015	-0.603395	0.815116	0.987 (66)
P06_Pier1	1.16302	0.675833	0.271529	1.37226	0.956 (75)
P07_Pier1	0.84895	1.12984	-0.451943	1.48375	1.089 (77)
P12_Pier1	1.13787	-0.948442	-1.23079	1.92591	0.606 (54)
P13_Pier1	0.63253	-1.41591	-0.960611	1.82419	0.613 (62)
P14_Pier1	1.01693	-0.998252	-1.1401	1.82496	0.775 (50)
Total	0.898852	0.990721	0.854352	1.58726	0.880

Table 7. Check points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 134 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 การแบ่งสัดส่วน 2 ส่วน รูปแบบที่ 3 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 8 จุด (Portion 2 type 3: P2 (3))

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01_Pier1	-0.428977	-0.3587	0.732868	0.921837	1.365 (49)
P02_Pier1	0.919782	0.39841	0.525566	1.13179	1.404 (71)
P03_Pier1	-1.52381	-0.693719	0.498194	1.74683	1.447 (77)
P04_Pier1	-1.20555	-0.900435	0.301005	1.53452	1.784 (51)
P05_Pier1	0.0332853	0.453706	-0.185064	0.491127	0.987 (66)
P06_Pier1	0.820126	0.59047	0.583717	1.16704	0.956 (75)
P07_Pier1	0.342624	1.01126	-0.248381	1.09624	1.089 (77)
P08_Pier1	0.12269	-0.187214	0.0455292	0.228418	0.942 (48)
P09_Pier1	-0.351202	0.153874	0.728851	0.823555	0.764 (73)
P10_Pier1	-0.203535	0.391512	-0.374692	0.57888	0.877 (77)
P11_Pier1	-0.0541804	0.374208	-0.336087	0.505887	1.221 (55)
P12_Pier1	0.880824	-0.206266	-0.739054	1.16816	0.606 (54)
P13_Pier1	0.220824	-0.711227	-0.570778	0.938293	0.613 (62)
P14_Pier1	0.425565	-0.322368	-0.871919	1.02238	0.775 (50)
Total	0.69616	0.545169	0.535034	1.03349	1.104

Table 5. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

รูปที่ 135 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศส่วนเสาตอม่อที่ 1 โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 14 จุด (FULL)



ภาคผนวก ง
การวัดความเสียหายต่าง ๆ หน่วยงาน



รูปที่ 136 การวัดขนาดความกว้างรอยแตกร้าวคอนกรีตจุดที่ 1 บริเวณฐานรากเสาต่อม่อที่ 1



รูปที่ 137 การวัดขนาดความกว้างรอยแตกร้าวคอนกรีตจุดที่ 2 บริเวณฐานรากเสาต่อม่อที่ 1



รูปที่ 138 การวัดขนาดความกว้างรอยแตกร้าวคอนกรีตจุดที่ 3 บริเวณฐานรากเสาตอม่อที่ 1



รูปที่ 139 การวัดขนาดความกว้างรอยแตกร้าวคอนกรีตจุดที่ 4 บริเวณฐานรากเสาตอม่อที่ 1



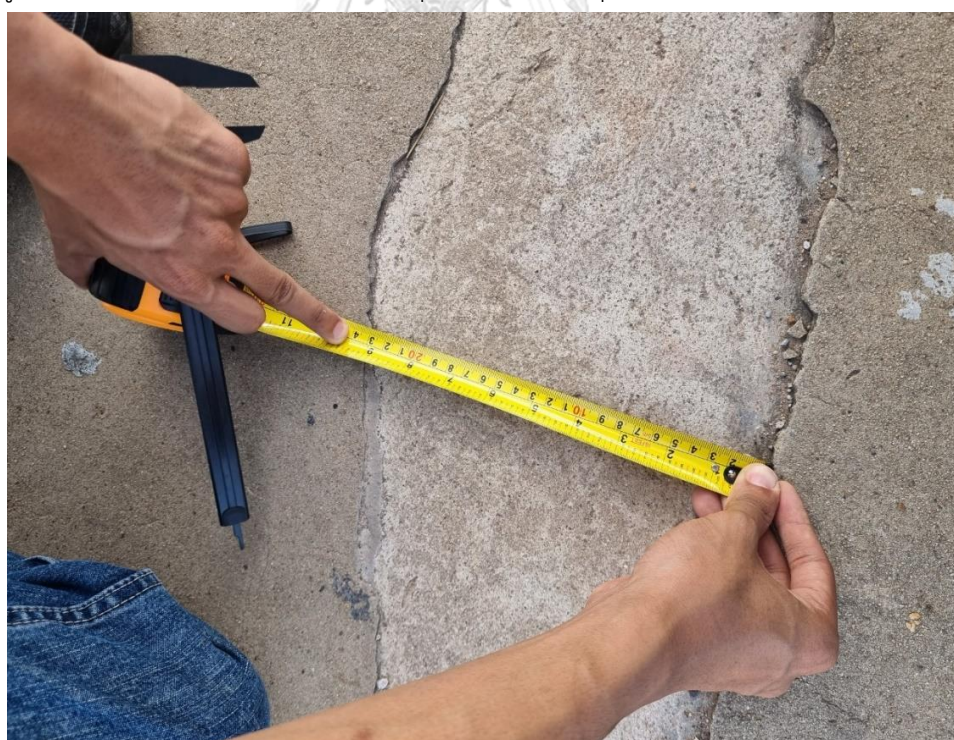
รูปที่ 140 การวัดขนาดความกว้างรอยแตกร้าวคอนกรีตจุดที่ 5 บริเวณฐานรากเสาต่อม่อที่ 1



รูปที่ 141 การวัดขนาดความกว้างรอยแตกร้าวคอนกรีตจุดที่ 6 บริเวณฐานรากเสาต่อม่อที่ 1



รูปที่ 142 การวัดขนาดความยาวผิวหลุดลอกคอนกรีตจุดที่ 1 บริเวณผิวทางที่ 2 ช่วงที่ 7



รูปที่ 143 การวัดขนาดความกว้างผิวหลุดลอกคอนกรีตจุดที่ 1 บริเวณผิวทางที่ 2 ช่วงที่ 7



รูปที่ 144 การวัดขนาดความยาวผิวหลุดล่อนคอนกรีตจุดที่ 2 บริเวณผิวทางที่ 2 ช่วงที่ 7



รูปที่ 145 การวัดขนาดความกว้างผิวหลุดล่อนคอนกรีตจุดที่ 2 บริเวณผิวทางที่ 2 ช่วงที่ 7



รูปที่ 146 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 2 เสาต่อม่อที่ 1



รูปที่ 147 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 2 เสาต่อม่อที่ 2



รูปที่ 148 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 2 เสาคอม่อที่ 3



รูปที่ 149 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 2 เสาคอม่อที่ 4



รูปที่ 150 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 2 สะดอม่อที่ 5



รูปที่ 151 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 2 สะดอม่อที่ 6



รูปที่ 152 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 2 เสาต่อม่อที่ 7



รูปที่ 153 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 เสาต่อม่อที่ 7



รูปที่ 154 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 สะดอม่อที่ 6



รูปที่ 155 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 สะดอม่อที่ 5



รูปที่ 156 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 สะดอม่อที่ 4



รูปที่ 157 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 สะดอม่อที่ 3



รูปที่ 158 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 สะดอม่อที่ 2





รูปที่ 159 การวัดขนาดความกว้างรอยต่อทางเท้าบริเวณรอยต่อที่ 1 สะดอม่อที่ 1


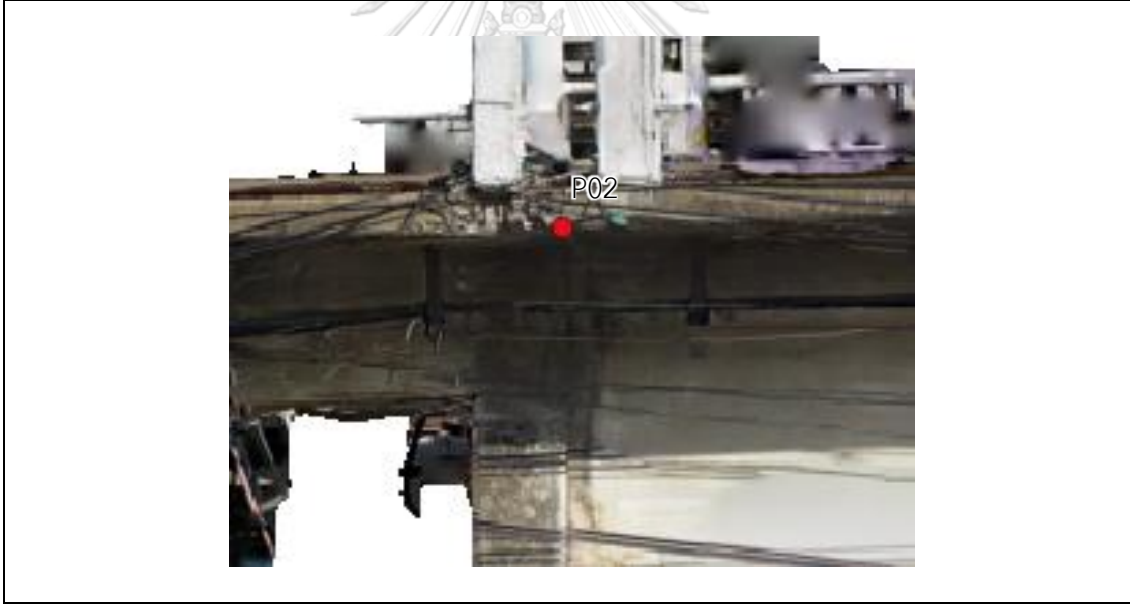
ภาคผนวก จ

รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์



ตารางที่ 46 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P01

ชื่อ : P01	ค่าระดับ : 7.182 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497207.782 เมตร E 589163.296 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : ปลายลูกศรด้านล่างป้ายเครื่องหมายบอกความสูงบริเวณช่วงสะพานที่ 1 ของสะพานพระราชต์	


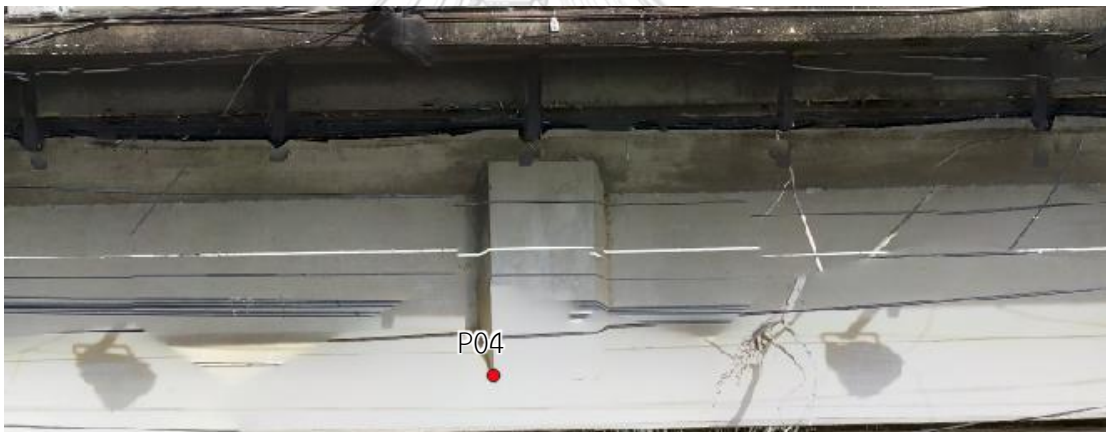
ตารางที่ 47 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P02

ชื่อ : P02	ค่าระดับ : 7.816 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497202.921 เมตร E 589162.159 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบล่างด้านข้างรอยต่อทางเท้าระหว่างระยะช่วงสะพานที่ 1 และ 2 ของสะพานพระราชต์	


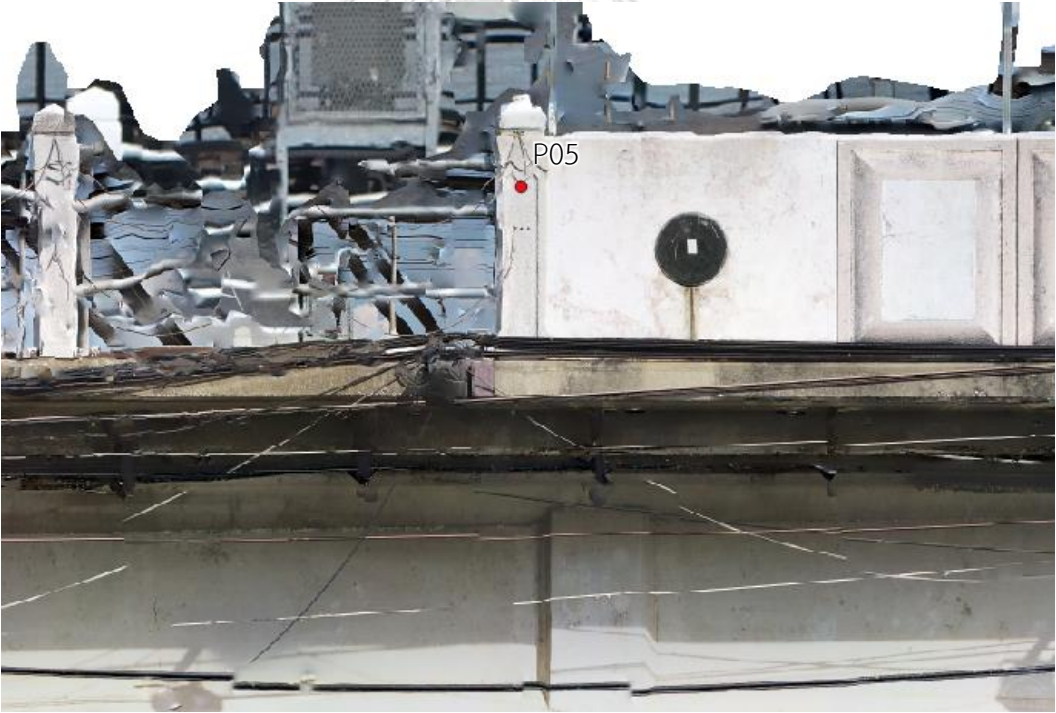
ตารางที่ 48 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P03

ชื่อ : P03	ค่าระดับ : 6.182 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497187.875 เมตร E 589162.329 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบกลางส่วนบนด้านข้างของเสาตอม่อส่วนบนบริเวณเสาตอม่อที่ 2 ของสะพานพระราชต์	

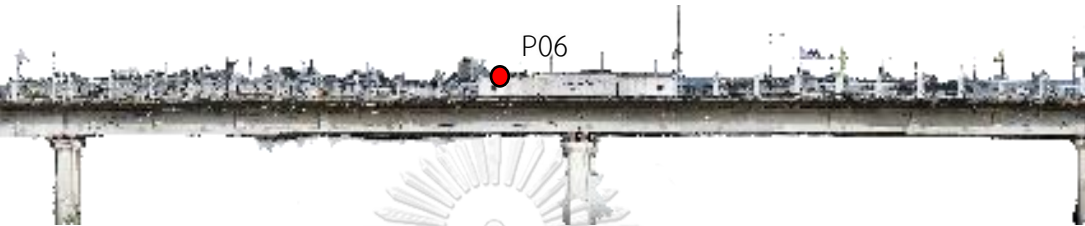
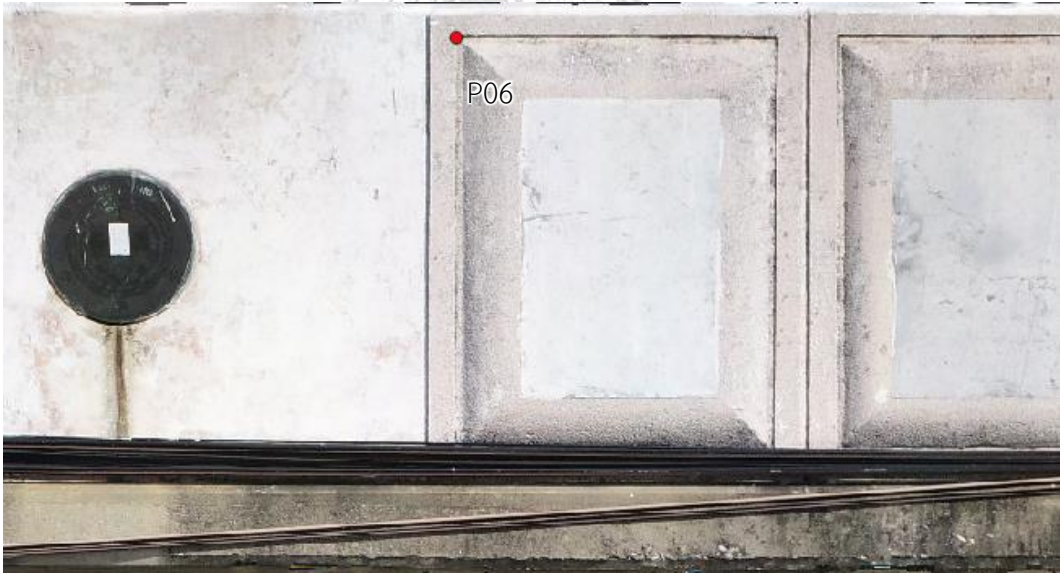
ตารางที่ 49 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P04

ชื่อ : P04	ค่าระดับ : 7.202 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497175.567 เมตร E 589162.898 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมล่างซ้ายรอยค้ำยันตามยาวที่ 3 ของคานตามบริเวณช่วงสะพานที่ 3 ของสะพานพระราชต์	



ตารางที่ 50 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P05

ชื่อ : P05	ค่าระดับ : 9.802 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497142.739 เมตร E 589160.952 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบล่างส่วนกลางของลายราวสะพานด้านซ้ายบริเวณช่วงสะพานที่ 4 ของสะพานพระราชต์	


ตารางที่ 51 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P06

ชื่อ : P06	ค่าระดับ : 9.956 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497141.33 เมตร E 589160.926 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบบนซ้ายป้ายสะพานส่วนในบริเวณช่วงสะพานที่ 4 ของสะพานพระราชต์	


ตารางที่ 52 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P07

ชื่อ : P07	ค่าระดับ : 9.327 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานธนารักษ์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497139.016 เมตร E 589160.897 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบล่างลายดอกสี่กลีบด้านซ้ายล่างของป้ายสะพานบริเวณช่วงสะพานที่ 4 ของสะพานธนารักษ์	

ตารางที่ 53 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P08

ชื่อ : P08	ค่าระดับ : 9.846 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497137.94 เมตร E 589160.878 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบบนลายดอกสี่กลีบส่วนบนของป้ายสะพานบริเวณช่วงสะพานที่ 4 ของสะพานพระราชต์	

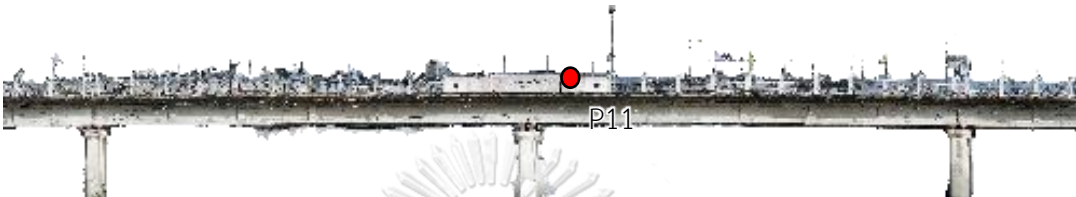

ตารางที่ 54 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P09

ชื่อ : P09	ค่าระดับ : 8.921 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานธนารักษ์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497137.958 เมตร E 589160.864 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบล่างด้านข้างรอยต่อทางเท้าระหว่างระยะช่วงสะพานที่ 4 และ 5 ของสะพานธนารักษ์	

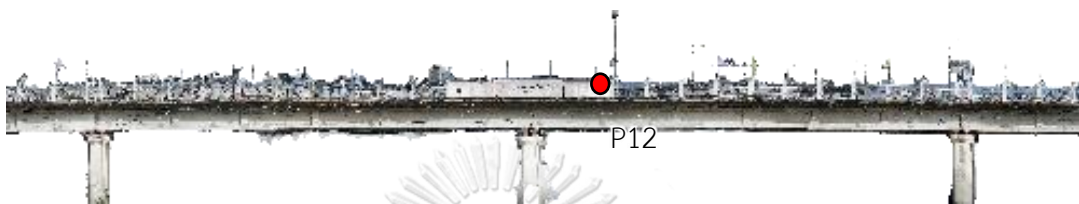
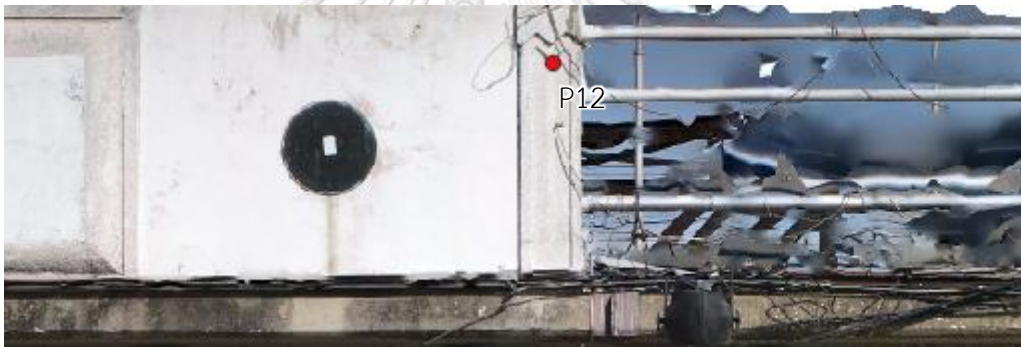
ตารางที่ 55 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P10

ชื่อ : P10	ค่าระดับ : 9.321 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานธนารักษ์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497136.866 เมตร E 589160.85 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบล่างลายดอกสี่กลีบด้านขวาของป้ายสะพานบริเวณช่วงสะพานที่ 5 ของสะพานธนารักษ์	



ตารางที่ 56 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P11

ชื่อ : P11	ค่าระดับ : 9.952 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N เมตร 1497134.552 E 589160.79 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบบนขวาปลายสะพานส่วนในบริเวณช่วงสะพานที่ 5 ของสะพานพระราชต์	



ตารางที่ 57 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานธนารักษ์ จุด P12

ชื่อ : P12	ค่าระดับ : 9.804 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานธนารักษ์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497133.153 เมตร E 589160.771 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบล่างส่วนกลางของลายราวสะพานด้านขวาบริเวณช่วงสะพานที่ 5 ของสะพานธนารักษ์	



ตารางที่ 58 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P13

ชื่อ : P13	ค่าระดับ : 8.753 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497112.98 เมตร E 589160.413 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบล่างด้านข้างรอยต่อทางเท้าระหว่างระยะช่วงสะพานที่ 5 และ 6 ของสะพานพระราชต์	



ตารางที่ 59 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราม 8 จุด P14

ชื่อ : P14	ค่าระดับ : 7.204 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราม 8 ถนน รพท ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497100.675 เมตร E 589161.458 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมล่างซ้ายรอยค้ำยันตามยาวที่ 3 ของคานตามบริเวณช่วงสะพานที่ 6 ของสะพานพระราม 8	



ตารางที่ 60 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P15

ชื่อ : P15	ค่าระดับ : 8.28 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497087.959 เมตร E 589159.871 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบล่างด้านข้างรอยต่อทางเท้าระหว่างระยะช่วงสะพานที่ 6 และ 7 ของสะพานพระราชต์	

ตารางที่ 61 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P16

ชื่อ : P16	ค่าระดับ : 6.181 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497087.976 เมตร E 589160.443 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบกลางส่วนบนด้านข้างของเสาตอม่อส่วนบนบริเวณเสาตอม่อที่ 6 ของสะพานพระราชต์	

ตารางที่ 62 รายละเอียดจุด Post-Marking ส่วนข้างของสะพานพระราชต์ จุด P17

ชื่อ : P17	ค่าระดับ : 7.449 เมตร (MSL TGM2017)
สถานที่ตั้ง : สะพานพระราชต์ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000	
ค่าพิกัด : N 1497062.992 เมตร E 589159.35 เมตร	
ตำแหน่งบนพื้นผิวสะพาน	
	
ภาพจุด	
	
คำอธิบาย : มุมขอบล่างด้านข้างของทางเท้าด้านขวาบริเวณช่วงสะพานที่ 8 ของสะพานพระราชต์	

บรรณานุกรม

1. กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย, มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย. 2551, กรุงเทพมหานคร.
2. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพานโครงการศึกษาและพัฒนา ระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน. 2555.
3. Ayele, Y.Z., et al., Automatic crack segmentation for UAV-assisted bridge inspection. *Energies*, 2020. 13(23): p. 6250.
4. Seo, J., L. Duque, and J. Wacker, Drone-enabled bridge inspection methodology and application. *Automation in Construction*, 2018. 94: p. 112-126.
5. อนุกรรมการพัฒนาระบบประกันคุณภาพของกรมทางหลวงชนบทด้านบำรุงรักษาและอำนวยความสะดวก, คู่มือระบบประกันคุณภาพ (Quality Assurance) ของกรมทางหลวงชนบท ด้านบำรุงรักษาและอำนวยความสะดวก. 2560.
6. Zhao, S., et al., Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction. *Automation in Construction*, 2021. 130: p. 103832.
7. Rakha, T. and A. Gorodetsky, Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. *Automation in Construction*, 2018. 93: p. 252-264.
8. Varbla, S., A. Ellmann, and R. Puust, Centimetre-range deformations of built environment revealed by drone-based photogrammetry. *Automation in Construction*, 2021. 128: p. 103787.
9. ในพระบรมราชูปถัมภ์, ว., มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม. 2561.
10. Mandirola, M., et al., Use of UAS for damage inspection and assessment of bridge infrastructures. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022. 72: p. 102824.
11. กรมทางหลวง, คู่มือการตรวจสอบ วิเคราะห์และประเมินกำลังรับน้ำหนักของสะพาน (Bridge Inspection Analysis and Evaluation Manual). 2549.
12. CPAC. Concrete Technology. 2000; Available from:

https://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/e-contech%20u17.pdf.

13. Raina, V., Concrete bridges: inspection, repair, strengthening, testing and load capacity evaluation. 2003, New Delhi: India.
14. (AASHTO), A.A.o.S.H.a.T.O., AASHTO Bridge Element Inspection Guide Manual, ed. 1. 2010.
15. กรมทางหลวง, คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง (Pavement distress identification manual). 2550.
16. (WSDOT), W.S.D.o.T., Bridge design manual (LRFD). 2019, Olympia: Washington.
17. กรมที่ดิน, ศ., คู่มือการทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศเพื่อการรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับ. 2563.
18. PSU, G. การบินถ่ายภาพทางอากาศ. 2552; Available from: <http://www.geog.pn.psu.ac.th/CAIAerial/HtmlBook/1flight2.html>.
19. ศรีกลาง, พ.ก. การวางแผนการสำรวจภาคพื้นดิน. 2561; Available from: http://kqgnss.blogspot.com/2018/08/blog-post_26.html.
20. จำกัต์, บ.ย.ค. Geoid (จีอยด์). 2021; Available from: <https://www.universalcorp.co.th/all-blogs/item/8-5145>.
21. พรหมทอง, พ.ด., การพัฒนาแบบจำลองจีอยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทย. วารสารแผนที่. Vol. 1. 2560, กรมแผนที่ทหาร.
22. ตาเขียว, ร.ท.ว. เอกสารประกอบวิชาการ การสำรวจด้วยดาวเทียม (Satellite Surveying) กรมแผนที่ทหาร. 2560; Available from: <http://kqgnss.blogspot.com/2018/05/gnss.html>.
23. Lucieer, S.H.a.A., Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. Remote Sensing, 2012.
24. Liu, Q., D.S. Kieffer, and M. Bitenc. Three-dimensional UAV-based photogrammetric structural models for rock slope engineering. in IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018-Volume 1. 2019. Springer.
25. องค์ความรู้ตามภารกิจกรมโยธาธิการและผังเมือง, การสำรวจและจัดทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV). 2563.

26. สันติธรรมนนท์, ไ., การรังวัดด้วยภาพถ่ายดิจิทัล (Digital Photogrammetry), ed. พ. (ฉบับปรับปรุงแก้ไข). 2555.
27. Lingua, A., et al., 3D MODEL GENERATION USING OBLIQUE IMAGES ACQUIRED BY UAV. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2017. 42.
28. Khaloo, A., et al., Unmanned aerial vehicle inspection of the Placer River Trail Bridge through image-based 3D modelling. Structure and Infrastructure Engineering, 2018. 14(1): p. 124-136.
29. Seo, J., L. Duque, and J.P. Wacker, Field application of UAS-based bridge inspection. Transportation Research Record, 2018. 2672(12): p. 72-81.
30. Chen, S., et al., UAV bridge inspection through evaluated 3D reconstructions. Journal of Bridge Engineering, 2019. 24(4): p. 05019001.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	บรรชนก มณีรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	14 มกราคม 2541
สถานที่เกิด	สมุทรสงคราม
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	380/32 ศุภาลย์วิลล์ รัชดา 32 เขต จตุจักร แขวง จันทระเกษม จ.กรุงเทพฯ 10900

