

การศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการประเมินสภาพของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยข้อมูล
จากอากาศยานไร้คนขับ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE STUDY OF THE APPLICATION OF DIGITAL TWIN IN REINFORCED CONCRETE BRIDGE
ASSESSMENT USING UNMANNED AERIAL VEHICLES



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	การศึกษาการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มดิจิทัลในการประเมินสภาพของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ
โดย	นายภัททิยะ พึ่งวงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิต ปานสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุตม์ งามโชนง)

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิสุทธิ์เสรีวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล)

ภัททียะ พึ่งวงศ์ : การศึกษาการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มในการประเมินสภาพของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ. (THE STUDY OF THE APPLICATION OF DIGITAL TWIN IN REINFORCED CONCRETE BRIDGE ASSESSMENT USING UNMANNED AERIAL VEHICLES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร. วิทิต ปานสุข

แบบจำลองเสมือนในโลกดิจิทัลเป็นแนวคิดของอุตสาหกรรม 4.0 ที่สามารถนำไปประยุกต์ในงานหลายด้าน หนึ่งในนั้นคือการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ตรวจสอบและประเมินสภาพของโครงสร้างพื้นฐานโดยเฉพาะสะพาน แบบจำลองช่วยให้ผู้ใช้สามารถคาดการณ์และวางแผนสำหรับตรวจสอบและประเมินเพื่อการบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีของการดูแลรักษาสะพานนั้น การใช้เทคนิคโฟโตแกรมเมตรีโดยการเก็บภาพจากอากาศยานไร้คนขับ เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการรวบรวมข้อมูลเพื่อจัดทำแบบจำลองดิจิทัล ด้วยกระบวนการ 3D-Reconstruction งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอกระบวนการประยุกต์ใช้แบบจำลองแพลตฟอร์มในการประเมินสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยข้อมูลจากการเก็บภาพจากอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้สะพานธนรัศมี จ.ราชบุรี เป็นพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการตั้งแต่ การรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ การประมวลผลภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลอง การสร้างฐานข้อมูลให้กับแบบจำลอง การประเมินสภาพของสะพานจากแบบจำลอง โดยได้ประยุกต์ใช้มาตรฐานการตรวจสอบจากคู่มือการประเมินของประเทศออสเตรเลียเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการประเมินตามคู่มือของกรมทางหลวงประเทศไทย จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการประเมินสภาพสะพานจากแบบจำลอง ที่จะช่วยลดเวลา ค่าใช้จ่าย รวมไปถึงความปลอดภัยของผู้ตรวจสอบ ตั้งแต่ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลที่ใช้อากาศยานไร้คนขับ ทดแทนการตรวจสอบแบบดั้งเดิม อีกทั้งลดความซับซ้อนของข้อมูลในกรณีที่สะพานมีขนาดใหญ่ และสามารถติดตามความเปลี่ยนแปลง ความเสียหายของสะพานดังกล่าวได้ ซึ่งแนวทางดังกล่าว สามารถไปต่อยอดในการประเมินและตรวจสอบสภาพให้กับโครงสร้างพื้นฐานอื่นๆในอนาคต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6470243221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Digital Twin, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), 3D-Reconstruction,
Bridge Inspection

Phattiya Puengwong : THE STUDY OF THE APPLICATION OF DIGITAL TWIN IN
REINFORCED CONCRETE BRIDGE ASSESSMENT USING UNMANNED AERIAL
VEHICLES. Advisor: Assoc. Prof. WITHIT PANSUK, Ph.D.

Digital twin (DT) is a key concept of industry 4.0 that can be applied in many fields, one of them is established for detailed virtual inspections and assessments of infrastructure assets, especially bridges. a digital twin model can be enabling users to monitor bridge also assessment to predictive maintenance, In the case of bridge, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is the most common advanced technologies that hold the potential to collect data and provide digital models by 3D-reconstruction process. This paper proposes the framework of digital twin models in the assessment of reinforced concrete bridges using data collected from unmanned aerial vehicles (UAVs). The study area for investigation is the Thanaratch Bridge, located in Ratchaburi Province, Thailand. The entire process involves various steps, starting from data collection using UAVs, image processing to create the digital twin model, establishing a database for the model, and evaluating the condition of the bridge based on the generated model. To enhance the assessment process according to the guidelines of the Australian evaluation manual. This study demonstrate the effectiveness of the bridge assessment using digital twin models, which helps reduce time, costs, and enhances safety for inspectors. The proposed methodology can be extended to assess and inspect other infrastructure structures in the future.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก, อาจารย์ ดร.ชยุตม์ งามโขง ประธานกรรมการ ตรวจสอบวิทยานิพนธ์, รองศาสตราจารย์ ดร. ธิธาร์ตัน วิสุทธิ์เสรีวงศ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร นุตยะสกุล คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำและแนวทางในการศึกษา งานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ ดร.เพชร เครือวิทย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ที่ได้ให้ความรู้และวิธีการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับ ในด้านต่างๆ รวมถึง การเสนอและปรับปรุงปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในงานศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท อินฟรา พลัส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์อากาศยานไร้คนขับ เพื่อใช้ในการบินสำรวจสะพาน

ขอขอบคุณ แขวงทางหลวงราชบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอำนวยความสะดวกในการบินสำรวจสะพานรัตนรัถษ์

ขอขอบคุณ บริษัท REI Software ที่ให้ความอนุเคราะห์วิธีการใช้งานโปรแกรม Context Capture รวมถึงช่วยแก้ไขปัญหาทางด้านเทคนิคในการใช้โปรแกรมในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

กระผมหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์ไม่มากนักน้อย จึงขอมอบความดี ทั้งหมดนี้ ให้แก่เหล่าคุณอาจารย์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น กระผมขออนุมัติรับผิดชอบเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ภัททิยะ พึ่งวงศ์

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	7
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	7
1.2 วัตถุประสงค์.....	7
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ความสำคัญและวัตถุประสงค์ของการตรวจสอบด้วยตาเปล่า	10
2.2 ประเภทความเสียหายของสะพาน	10
2.2.1 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต	10
2.2.1.1 รอยแตก (Cracking)	10
2.2.1.2 การหลุดร่อน (Spalling)	11
2.2.2 การเสื่อมสภาพของผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีต	11
2.3 การประเมินสภาพสะพาน.....	12
2.3.1 ดัชนีการประเมินสภาพสะพาน (Bridge Condition Index).....	12
2.3.2 การแบ่งชั้นส่วนสะพาน	12

2.3.3 การประเมินคะแนนสถานะสภาพ.....	13
2.3.4 คะแนนสถานภาพเฉลี่ย (Condition State Averaging).....	14
2.4 การวางแผนการบิน	17
2.4.1 ความสูงบิน	18
2.4.2 GSD (Ground Sample Distance).....	18
2.4.3 ส่วนซ้อนและส่วนเกย.....	19
2.4.4 รูปแบบการบิน	19
2.4.5 จุดควบคุมภาพถ่าย	19
2.5 การประมวลผลภาพถ่าย.....	20
2.6 ความหมายของแผนที่ดิจิทัล.....	21
2.6.1 องค์ประกอบของแผนที่ดิจิทัลองค์ประกอบของแบบจำลองแผนที่ดิจิทัลในอุดมคติ.....	22
2.6.1.1 แบบจำลองสารสนเทศ (Information Model).....	22
2.6.1.2 แบบจำลองการวิเคราะห์ (Analysis Model).....	22
2.6.1.3 แบบจำลองพื้นผิว 3 มิติ (3D Surface Model).....	22
2.6.1.4 แบบจำลองตัวแทน (Surrogate Model).....	22
2.7 ลำดับการพัฒนาแผนที่ดิจิทัลในงานวิศวกรรม	22
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
2.8.1 แนวคิดของแผนที่ดิจิทัลและแบบจำลองสารสนเทศ.....	23
2.8.2 การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับในตรวจสอบสะพาน	25
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	29
3.1 ที่ตั้ง ลักษณะสะพาน และปัจจัยในการเลือกสะพาน	29
3.2 การรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ.....	30
3.2.1 การวางแผนการบิน	30
3.2.1.1 ชนิดของอากาศยานไร้คนขับ.....	30

3.2.1.2 รูปแบบเส้นทางการบิน.....	32
3.2.1.3 จุดควบคุมภาพถ่าย	34
3.2.2 การประมวลผลภาพถ่าย	35
3.3 การแบ่งชิ้นส่วนตามการมาตรฐานการประเมินสภาพสะพาน	36
3.4 การประเมินสภาพของสะพาน	39
3.4.1 การประเมินสภาพส่วนบน.....	39
3.4.2 การประเมินสภาพส่วนล่าง.....	40
3.4.3 การคำนวณค่าเฉลี่ยคะแนนสถานภาพโดยรวมของชิ้นส่วน.....	41
3.4.4 การคำนวณคะแนนสถานภาพของทั้งสะพาน	42
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	44
4.1 ผลการประมวลผลภาพถ่าย	44
4.1.1 การประมวลผลภาพถ่ายและแบบจำลองของโครงสร้างสะพานส่วนบน	44
4.1.1.1 จุดควบคุมภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนบน.....	44
4.1.1.2 รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนบน	45
4.1.1.3 แบบจำลองโครงสร้างสะพานส่วนบน	45
4.1.2 การประมวลผลภาพถ่ายและแบบจำลองของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง	46
4.1.2.1 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 1.....	46
4.1.2.2 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 2.....	47
4.1.2.3 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 3.....	48
4.1.2.4 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 4.....	48
4.1.2.5 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 5.....	49
4.1.2.6 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 6.....	50
4.2 การแบ่งชิ้นส่วนของสะพานบนแบบจำลองแฝดดิจิทัล	50
4.2.1 การแบ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานส่วนบน.....	51

4.2.1.1	ชิ้นส่วนพื้นสะพาน ทางเท้า และรอยต่อเพื่อการขยาย	51
4.2.2	การแบ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานส่วนล่าง.....	53
4.2.3	การแบ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานส่วนท้องสะพาน	55
4.3	การประเมินสถานภาพของสะพาน	56
4.3.1	การประเมินสถานภาพสะพาน ชิ้นส่วนกลุ่มที่ 1	56
4.3.1.1	การประเมินสภาพชิ้นส่วนพื้นสะพาน	56
4.3.1.2	การประเมินสภาพส่วนเสาตอม่อ	57
4.3.1.3	การประเมินสภาพส่วนกำแพงตอม่อ	58
4.3.1.4	การประเมินสภาพส่วนคานรัดหัวเสา.....	60
4.3.1.5	การประเมินสภาพส่วนคานตามยาว	60
4.3.2	การประเมินสถานภาพสะพาน ชิ้นส่วนกลุ่มที่ 2	61
4.3.2.1	การประเมินสภาพส่วนฐานราก	61
4.3.2.2	การประเมินสภาพส่วนค้ำยันตามยาว.....	62
4.3.2.3	การประเมินสภาพส่วนค้ำยันตอม่อ	63
4.3.3	การประเมินสถานภาพสะพาน ชิ้นส่วนกลุ่มที่ 3	63
4.3.3.1	การประเมินสภาพส่วนรอยต่อขยาย.....	63
4.3.3.2	การประเมินสภาพส่วนทางเท้า.....	64
4.4	การคำนวณคะแนนสถานภาพของสะพาน	67
4.4.1	คะแนนสถานภาพของชิ้นส่วน	67
4.4.1.1	คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนพื้นสะพาน.....	67
4.4.1.2	คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนตอม่อ	68
4.4.1.3	คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนกำแพงตอม่อ	68
4.4.1.4	คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนคานรัดหัวเสา	68
4.4.1.5	คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนคานตามยาว.....	68

4.4.1.6	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนฐานราก.....	69
4.4.1.7	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนค้ำยันตามยาว.....	69
4.4.1.8	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนค้ำยันต่อม่อ.....	69
4.4.1.9	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนรอยต่อเพื่อขยาย.....	69
4.4.1.10	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนทางเท้า.....	70
4.4.2	การคำนวณคะแนนสถานภาพโดยรวมและดัชนีการประเมินสภาพสะพาน.....	71
4.5	การประเมินสถานภาพของสะพานด้วยวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม.....	71
4.5.1	การตรวจสอบโครงสร้างส่วนบนของสะพานด้วยวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม.....	72
4.5.2	การตรวจสอบโครงสร้างส่วนล่างของสะพานด้วยวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม.....	74
4.5.3	การคำนวณคะแนนสถานภาพโดยรวมและดัชนีการประเมินสภาพสะพานด้วยวิธี ตรวจสอบแบบดั้งเดิม.....	78
4.6	ขีดความสามารถและข้อจำกัดของการประเมินสภาพจากแบบจำลอง.....	79
4.6.1	เวลาที่ใช้ในแต่ละกระบวนการ.....	79
4.6.1.1	การเก็บข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ.....	79
4.6.1.2	การตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม.....	80
4.6.1.3	การประมวลผลข้อมูล.....	81
4.6.1.4	การแบ่งชิ้นส่วนจากแบบจำลองเพื่อใช้ประเมินและบันทึกผล.....	81
4.6.2	ความสมบูรณ์ของข้อมูล.....	82
บทที่ 5	สรุปผลงานวิจัย.....	83
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	83
	ภาคผนวก เกณฑ์การให้คะแนนสถานภาพของสะพาน.....	85
	บรรณานุกรม.....	87
	ประวัติผู้เขียน.....	90

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	กลุ่มชิ้นส่วนสะพานตามความสำคัญของโครงสร้าง	12
ตารางที่ 2	การให้คะแนนสถานภาพในการประเมินสะพาน	13
ตารางที่ 3	ดัชนีการประเมินสภาพสะพาน	13
ตารางที่ 4	ตัวอย่างการให้คะแนนสถานภาพของชิ้นส่วนคอนกรีตโครงสร้าง	14
ตารางที่ 5	ตัวอย่างการคำนวณคะแนนสถานภาพแต่ละชิ้นส่วน	15
ตารางที่ 6	ตัวอย่างการคำนวณคะแนนสถานภาพแต่ละชิ้นส่วนโดยรวม	15
ตารางที่ 7	การแปลค่าคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักเป็นช่วงดัชนีการประเมินสภาพสะพาน ..	16
ตารางที่ 8	ตัวอย่างการการแปลค่าคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักเป็นช่วงดัชนีการประเมินสภาพสะพาน	17
ตารางที่ 9	กลุ่มและจำนวนชิ้นส่วนตามลำดับความสำคัญของโครงสร้าง	37
ตารางที่ 10	ตัวอย่างการหาคะแนนสถานภาพโดยรวมของชิ้นส่วน	42
ตารางที่ 11	ตัวอย่างการคำนวณคะแนนสถานภาพ	43
ตารางที่ 12	ค่าพิสัยของจุดควบคุมภาคพื้นดินของโครงสร้างสะพานส่วนบน	44
ตารางที่ 13	รายละเอียดการประเมินผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนบน	45
ตารางที่ 14	รายละเอียดการประเมินผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 1).....	46
ตารางที่ 15	รายละเอียดการประเมินผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 2).....	47
ตารางที่ 16	รายละเอียดการประเมินผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 3).....	48
ตารางที่ 17	รายละเอียดการประเมินผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 4).....	48
ตารางที่ 18	รายละเอียดการประเมินผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 5).....	49
ตารางที่ 19	รายละเอียดการประเมินผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 6).....	50
ตารางที่ 20	การตรวจสอบสภาพในส่วนของพื้นสะพาน	56
ตารางที่ 21	การตรวจสอบสภาพในส่วนของเสาตอม่อ	57
ตารางที่ 22	การตรวจสอบสภาพในส่วนของกำแพงตอม่อ	58

ตารางที่ 23	การตรวจสอบสภาพในส่วนของคานรัศหัวเสา	60
ตารางที่ 24	การตรวจสอบสภาพในส่วนของคานตามยาว.....	60
ตารางที่ 25	การตรวจสอบสภาพในส่วนของฐานราก.....	61
ตารางที่ 26	การตรวจสอบสภาพในส่วนของค้ำยันตามยาว	62
ตารางที่ 27	การตรวจสอบสภาพในส่วนของค้ำยันต่อม่อ.....	63
ตารางที่ 28	การตรวจสอบสภาพในส่วนของรอยต่อขยาย	63
ตารางที่ 29	การตรวจสอบสภาพในส่วนของทางเท้า	64
ตารางที่ 30	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนพื้นสะพาน	67
ตารางที่ 31	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนต่อม่อ.....	68
ตารางที่ 32	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนกำแพงต่อม่อ.....	68
ตารางที่ 33	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนคานรัศหัวเสา	68
ตารางที่ 34	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนคานตามยาว.....	68
ตารางที่ 35	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนฐานราก.....	69
ตารางที่ 36	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนค้ำยันตามยาว	69
ตารางที่ 37	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนค้ำยันต่อม่อ.....	69
ตารางที่ 38	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนรอยต่อเพื่อขยาย	69
ตารางที่ 39	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนทางเท้า	70
ตารางที่ 40	ตารางสรุปคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนัก.....	71
ตารางที่ 41	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนพื้นสะพานจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม	73
ตารางที่ 42	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนรอยต่อส่วนขยายจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม	73
ตารางที่ 43	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนทางเท้าจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม	74
ตารางที่ 44	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนต่อม่อจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม.....	76
ตารางที่ 45	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนคานรัศหัวเสาจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม	76
ตารางที่ 46	คะแนนสถานภาพขึ้นส่วนค้ำยันต่อม่อจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม	76

ตารางที่ 47	คะแนนสถานสภาพขึ้นส่วนฐานรากจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม	77
ตารางที่ 48	คะแนนสถานสภาพขึ้นส่วนคานตามยาวจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม	77
ตารางที่ 49	คะแนนสถานสภาพขึ้นส่วนค้ำยันตามยาวจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม	77
ตารางที่ 50	คะแนนสถานสภาพขึ้นส่วนกำแพงตอม่อจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม.....	77
ตารางที่ 51	ตารางสรุปคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักจากการตรวจสอบแบบดั้งเดิม	78
ตารางที่ 52	ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ	80
ตารางที่ 53	ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม	81
ตารางที่ 54	ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ	81
ตารางที่ 55	ความสมบูรณ์ในการรวบรวมและประมวลผลของข้อมูล	82



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1	ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการคำนวณ.....	18
รูปที่ 2	รูปแบบการบินแบบทั่วไปและแบบกริด.....	19
รูปที่ 3	กระบวนการสร้างแบบจำลองจุดก้อนเมฆ 3มิติ.....	20
รูปที่ 4	ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในแนวคิดแฝดดิจิทัล.....	21
รูปที่ 5	องค์ประกอบของแฝดดิจิทัลในอุดมคติ.....	22
รูปที่ 6	ลำดับขั้นการพัฒนาแฝดดิจิทัลในงานด้านวิศวกรรมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน [8].....	23
รูปที่ 7	องค์ประกอบของแบบจำลองแฝดดิจิทัลในอุดมคติ.....	23
รูปที่ 8	กระบวนการวงจรชีวิตของแนวคิดแฝดดิจิทัลร่วมกับแบบจำลองสารสนเทศ.....	24
รูปที่ 9	แบบจำลองที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ(UAV).....	25
รูปที่ 10	แบบจำลองที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดินด้วยเลเซอร์สแกน (TLS).....	25
รูปที่ 11	รูปแบบการบินส่วนบนและข้างของสะพาน.....	26
รูปที่ 12	รูปแบบการบินส่วนท้องและตอม่อสะพาน.....	26
รูปที่ 13	แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	29
รูปที่ 14	สะพานธนรัชต์.....	30
รูปที่ 15	ตำแหน่งที่ตั้งสะพานธนรัชต์.....	30
รูปที่ 16	โดรนรุ่น DJI Phantom 4 Pro V2.0.....	31
รูปที่ 17	โดรนรุ่น Skydio 2.....	32
รูปที่ 18	รูปแบบการบินส่วนบนของสะพานโดยโปรแกรม DJI GS Pro.....	32
รูปที่ 19	รูปแบบการบินส่วนด้านข้างของสะพาน.....	33
รูปที่ 20	รูปแบบการบินในส่วนตอม่อสะพาน.....	34
รูปที่ 21	รูปแบบการบินในส่วนท้องพื้นของสะพาน.....	34
รูปที่ 22	จุดควบคุมภาพถ่ายส่วนบนของสะพาน.....	35
รูปที่ 23	จุดควบคุมภาพถ่ายส่วนตอม่อของสะพาน.....	35

รูปที่ 24	กระบวนการประมวลผลโปรแกรม Context Capture	36
รูปที่ 25	การแบ่งส่วนของสะพาน	36
รูปที่ 26	ตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณตอม่อแบบที่ 1	37
รูปที่ 27	ตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณตอม่อแบบที่ 2.....	38
รูปที่ 28	ตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณพื้นสะพาน.....	38
รูปที่ 29	การระบุชิ้นส่วนให้กับแบบจำลองที่ได้จากการประมวลผล	39
รูปที่ 30	การวัดขนาดพื้นที่การหลุดร่อนของคอนกรีตบนทางเท้า.....	40
รูปที่ 31	การวัดความกว้างของรอยต่อขยายบนพื้นสะพาน	40
รูปที่ 32	การวัดขนาดพื้นที่การหลุดร่อนของชิ้นส่วนคานรััดหัวเสา.....	41
รูปที่ 33	การประเมินสภาพพื้นผิวของท้องพื้นสะพาน	41
รูปที่ 34	จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด ครอบคลุมส่วนบนของโครงสร้างสะพาน	44
รูปที่ 35	มุมมองแบบจำลองจากทิศเหนือ.....	45
รูปที่ 36	มุมมองแบบจำลองจากทิศใต้	45
รูปที่ 37	มุมมองแบบจำลองจากด้านบน	46
รูปที่ 38	การแบ่งชิ้นส่วนพื้นสะพานบนโปรแกรม Context Editor	51
รูปที่ 39	การแบ่งชิ้นส่วนรอยต่อส่วนขยายของสะพานบนโปรแกรม Context Editor.....	52
รูปที่ 40	การแบ่งชิ้นส่วนทางเท้าของสะพานบนโปรแกรม Context Editor.....	52
รูปที่ 41	การแบ่งชิ้นส่วนตอม่อของสะพานบนโปรแกรม Context Editor	53
รูปที่ 42	การแบ่งชิ้นส่วนฐานรากสะพานบนโปรแกรม Context Editor.....	53
รูปที่ 43	การแบ่งชิ้นส่วนค้ำยันตอม่อของสะพานบนโปรแกรม Context Editor	54
รูปที่ 44	การแบ่งชิ้นส่วนคานรััดหัวเสาของสะพานบนโปรแกรม Context Editor.....	54
รูปที่ 45	การแบ่งชิ้นส่วนกำแพงตอม่อของสะพานบนโปรแกรม Context Editor	55
รูปที่ 46	การแบ่งชิ้นส่วนค้ำยันตามยาวของสะพานบนโปรแกรม Context Editor.....	55
รูปที่ 47	การแบ่งชิ้นส่วนคานตามยาวของสะพานบนโปรแกรม Context Editor.....	56

รูปที่ 48	การตรวจสอบพื้นสะพานในเวลากลางวัน.....	72
รูปที่ 49	การตรวจสอบทางเท้าในเวลากลางวัน	72
รูปที่ 50	การตรวจสอบในเวลากลางคืน	73
รูปที่ 51	การตรวจสอบต่อม่อริมตลิ่ง.....	75
รูปที่ 52	การตรวจสอบท้องพื้นสะพาน.....	75
รูปที่ 53	การเช่าเรือเพื่อตรวจสอบต่อม่อกลางน้ำ.....	76
รูปที่ 54	การบินสำรวจต่อม่อบริเวณมอ้อบสายตา.....	79
รูปที่ 55	ภาพท้องพื้นสะพานที่แสงส่องไม่ถึง.....	80
รูปที่ 56	วงรอบการตรวจสอบและประเมินสะพานจากการรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ... 84	



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันสะพานในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงมีอยู่จำนวนมาก ซึ่งต้องได้รับการดูแลรักษาอยู่เป็นประจำ เพื่อให้สามารถดำรงประสิทธิภาพการใช้งานได้อยู่เสมอ ปี พ.ศ. 2564 ที่ผ่านมามีกรมทางหลวงใช้งบประมาณไปกว่า 526 ล้านบาทสำหรับงานดูแลรักษาสะพาน[1] เหตุผลสำคัญของการใช้งบประมาณดังกล่าว เนื่องจากจำนวนของสะพาน ความยากง่ายในการตรวจสอบ รวมไปถึงการบริหารจัดการข้อมูลที่สำคัญ สำหรับการซ่อมแซมและบำรุงรักษา ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบริหารและการตัดสินใจในการใช้งบประมาณ วิธีการขั้นต้นของการตรวจสอบสะพาน คือ การตรวจด้วยตาเปล่า (Visual Inspection) [2] ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านต่างๆ เช่น บุคลากรที่ใช้ในการตรวจสอบ อุปกรณ์ระยะเวลา ความปลอดภัยของการปฏิบัติงาน รวมไปถึงการบันทึกข้อมูลลงในแบบฟอร์มที่กำหนด แต่เนื่องด้วยปัจจุบันมีการพัฒนาทางเทคโนโลยีในด้านต่างๆอย่างก้าวกระโดด ซึ่งมีงานวิจัยได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่า การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับในการทดแทนการตรวจด้วยตาเปล่า สามารถลดข้อจำกัดของการตรวจสอบแบบดั้งเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ลดอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นจากการใช้บุคลากร ลดระยะเวลาในการตรวจสอบ ลดต้นทุนในด้านต่างๆ รวมไปถึง สามารถประยุกต์ใช้ข้อมูลที่ได้รับจากอากาศยานไร้คนขับไปต่อยอดในระบบดิจิทัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในห้วงเวลาที่ผ่านมายุคของอุตสาหกรรม 4.0 ถูกนำมาเป็นกรอบในการพัฒนาองค์กรในด้านต่างๆ แนวคิดของ แพลตดิิจิทัล หรือ Digital Twin ถือเป็นหนึ่งแนวคิดที่แพร่หลายที่จะมาทดแทนกระบวนการในรูปแบบเดิมอย่างหลีกเลี่ยงมิได้ ซึ่งปัจจุบันแนวคิดของแพลตฟอร์มถูกนำมาเป็นเครื่องมือในการดูแลรักษาสะพาน เช่นการตรวจสอบประสิทธิภาพพลิงของสะพานเชิงแบบอัตโนมัติ [3] หรือแม้กระทั่งการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบและประเมินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาทางรถไฟ [4] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประโยชน์และประสิทธิภาพของแนวคิดดังกล่าว ที่จะทำให้การตรวจสอบและดูแลรักษาสะพานรวมถึงโครงสร้างพื้นฐานอื่นๆ

1.2 วัตถุประสงค์

นำเสนอกระบวนการประยุกต์ใช้แนวคิดแพลตฟอร์มในการตรวจสอบและประเมินสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการรวบรวมข้อมูลโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษา สะพานธนะรัทธ ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงราชบุรี เป็นพื้นที่ตัวอย่างในการนำเสนอกระบวนการประยุกต์ใช้แนวคิดแฝดดิจิทัลในการตรวจสอบและประเมินสะพานจากการรวบรวมข้อมูลโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงแนวทางและการประยุกต์ใช้แนวคิดแฝดดิจิทัลในการประเมินสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก
2. เพิ่มประสิทธิภาพให้กับการตรวจสอบด้วยตาเปล่า ตามวงรอบการตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพาน ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง
3. สามารถนำข้อมูลและวิธีการที่ได้จากงานวิจัยนี้ ไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้แฝดดิจิทัลจากการรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ กับโครงสร้างพื้นฐานอื่นๆ ในอนาคต





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญและวัตถุประสงค์ของการตรวจสอบด้วยตาเปล่า

การตรวจด้วยตาเปล่า (Visual Inspection) เป็นวิธีการขั้นต้นของการตรวจสอบสะพาน การตรวจสอบและบำรุงรักษาสะพานให้มีระดับการให้บริการที่ดียิ่งขึ้นอย่างสม่ำเสมอ จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสะพาน และจะเป็นการยืดอายุการใช้งานของสะพาน รวมถึงเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานให้กับประชาชนอีกด้วย

วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบสะพานคือเพื่อให้แน่ใจว่าสะพานยังคงใช้งานได้ ภายใต้เงื่อนไขด้านความปลอดภัยที่ยอมรับได้และมีค่าบำรุงรักษาที่ต่ำที่สุด

- ตรวจสอบให้แน่ใจว่าสถานภาพโครงสร้างยังคงเป็นไปตามข้อกำหนดในด้านการบริการและความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้รถใช้ถนน
- บันทึกสภาพทางกายภาพของสะพานในปัจจุบัน
- เพื่อตรวจสอบยืนยันถึงการบำรุงรักษาและการซ่อมแซมก่อนหน้า
- ให้ข้อมูลกับวิศวกรออกแบบ ก่อสร้าง และบำรุงรักษาเพื่อระบุความจำเป็นในการบำรุงรักษาและระบุปัญหาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคต

2.2 ประเภทความเสียหายของสะพาน

2.2.1 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต

2.2.1.1 รอยแตก (Cracking)

ในคอนกรีต จะมีรอยแตกอยู่ 2 ประเภท คือ รอยแตกเชิงโครงสร้าง (Structural Cracks) และรอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกเชิงโครงสร้าง (Non Structural Cracks)

รอยแตกเชิงโครงสร้าง มีสาเหตุมาจากหน่วยแรงที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) และถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

รอยแตกจากการดัด (Flexure Cracks) จะมีลักษณะอยู่ในแนวตั้ง (Vertical) และเริ่มแตกจากบริเวณที่เกิดแรงดึงสูงสุด (Maximum Tension Zone) หรือเกิดโมเมนต์สูงสุด (Maximum Moment Trussing) แล้วแผ่ไปยังส่วนที่เกิดแรงอัด (Compression Zone) ณ จุดกึ่งกลางช่วงของชิ้นส่วน

รอยแตกจากการเฉือน (Shear Cracks) เป็นรอยแตกในแนวเฉียง ที่มักจะเกิดขึ้นที่เอวคาน (Web) โดยปกติแล้ว จะพบรอยแตกนี้ได้ที่บริเวณใกล้กับ แผ่นรองสะพาน (Bearing) และรอยแตกจะเริ่มที่ด้านล่างของชิ้นส่วนนั้นและขยายตอในแนวเฉียงไปยังคานบนของชิ้นส่วน

รอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกเชิงโครงสร้าง (Non Structural Cracks) จะถูกแยกออกเป็น 3 ชนิด

- รอยแตกเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature Cracks)
- รอยแตกเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage Cracks)
- รอยแตกเนื่องจากคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete Cracks)

รอยแตกเหล่านี้ มักจะมีขนาดเล็กและไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนนั้น อย่างไรก็ตาม รอยแตกเหล่านี้จะเป็นช่องทางให้น้ำและสารเจือปนอื่นๆ เข้าไปได้ ซึ่งจะนำไปสู่ปัญหาที่ร้ายแรงอื่นๆ ต่อไป

2.2.1.2 การหลุดร่อน (Spalling)

เป็นการยุบตัวของคอนกรีตเป็นรูปคล้ายวงกลมหรือวงรี มีสาเหตุมาจากการแยกตัวหรือการถูกเคลื่อนย้ายของ ส่วนใดส่วนหนึ่งของคอนกรีตที่ผิวหน้า ทำให้เห็นรอยแตกที่ค่อนข้างจะขนานกับผิวคอนกรีต และการหลุดร่อนนี้ ก็อาจมี สาเหตุมาจากการที่เหล็กเสริมเป็นสนิมและการเกิดแรงเสียดทานจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ส่วนใหญ่แล้วเมื่อมีการหลุดร่อน ก็จะสามารถเห็นเหล็กเสริมได้สามารถแยกแยะการหลุดร่อนของคอนกรีตได้ดังนี้

- การหลุดร่อนขนาดเล็ก จะมีความลึกน้อยกว่า 2.5 เซนติเมตร หรือมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 15 เซนติเมตร
- การหลุดร่อนขนาดใหญ่ จะมีความลึกมากกว่า 2.5 เซนติเมตร หรือมีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 15 เซนติเมตร

2.2.2 การเสื่อมสภาพของผิวทางแอสฟัลท์ติกคอนกรีต

รอยแตกของผิวทางแอสฟัลท์ติกคอนกรีตแบ่งได้ 8 รูปแบบ ได้แก่

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)

2.3 การประเมินสภาพสะพาน

การประเมินสภาพสะพานโดยใช้หลักการดัชนีการประเมินสภาพโดยมีตัวคุณความสำคัญของชิ้นส่วน ตามคู่มือการตรวจสอบและประเมินสภาพสะพานของประเทศออสเตรเลีย [5]

2.3.1 ดัชนีการประเมินสภาพสะพาน (Bridge Condition Index)

ดัชนีการประเมินสภาพสะพาน (BCI) เป็นค่าตัวเลขที่สรุปการประเมินสภาพโดยรวมของโครงสร้างและให้การเปรียบเทียบสภาพสัมพัทธ์กับสะพานอื่นๆ ซึ่งจุดประสงค์หลักของดัชนีการประเมินสภาพสะพาน ไม่ใช่ตัวบ่งชี้สภาพโครงสร้างของแต่ละชิ้นส่วน แต่เป็นตัวบ่งชี้ค่าเฉลี่ยสภาพโดยรวมของตัวสะพาน

2.3.2 การแบ่งชิ้นส่วนสะพาน

ส่วนประกอบแต่ละประเภทของสะพานถูกแบ่งเป็นสามกลุ่มตามตารางที่ 1 ตามความสำคัญเชิงสัมพันธ์ของโครงสร้างหรืออีกนัยหนึ่งคือ ผลที่ตามมาของโครงสร้างหากชิ้นส่วนนั้นๆเกิดความเสียหาย ซึ่งแต่ละกลุ่มชิ้นส่วนจะได้รับตัวคูณปัจจัยเพื่อให้เหมาะสมกับความสำคัญของชิ้นส่วนนั้นๆ

ตารางที่ 1 กลุ่มชิ้นส่วนสะพานตามความสำคัญของโครงสร้าง

กลุ่ม	ชิ้นส่วน	ตัวคูณ
1	ส่วนพื้นสะพาน (Slab)	11
	คานสะพาน (Beams)	
	โครงสร้างสะพานที่เป็นรูปกล่อง (Box Girders)	
	เสาตอม่อ (Columns, Piles)	
	คานรัดหัวเสา (Cap beams, Pile Caps)	
	ส่วนเสริมกำลังภายนอก (External Strengthening)	
	สายเคเบิล (Masts, Cables/Hangers)	
	โครงถัก (Trusses)	
2	กำแพงตอม่อ (Walls)	6
	ฐานราก (Footings)	
	ค้ำยันคานตามยาว (Diaphragms)	
	แผ่นรองรับคาน (Bearings)	

3	รอยต่อเพื่อการขยาย (Expansion Joint)	3
	หูช้าง (Wing Wall)	
	ส่วนประกอบอื่นๆ	

2.3.3 การประเมินคะแนนสถานะสภาพ

โครงสร้างของสะพานแต่ละส่วนจะได้รับคะแนนสถานะสภาพ (Condition State) ระหว่าง 1 ถึง 4 หรือคะแนนรวมกัน เนื่องจากเงื่อนไขของแต่ละชิ้นส่วนอาจแตกต่างกันไปในแต่ละตำแหน่ง อาจมีสถานะเงื่อนไขมากกว่าหนึ่งสถานะสำหรับแต่ละชิ้นส่วน สัดส่วนของชิ้นส่วนแต่ละรายการจะถูกแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบทั้งหมด ผลรวมของสถานะเงื่อนไขสำหรับแต่ละชิ้นส่วนจะเป็น 100% เสมอ

ตารางที่ 2 การให้คะแนนสถานะสภาพในการประเมินสะพาน

คะแนนสถานะสภาพ (Condition State)	น้ำหนักคะแนนสถานะสภาพ (Condition State Weighting)
1	1
2	5
3	25
4	50

ตารางที่ 3 ดัชนีการประเมินสภาพสะพาน

Descriptor	BCI Range
ดีมาก	0 – 19
ดี	20 – 39
พอใช้	40 – 55
แย่มาก	56 – 100
แย่มาก	101 +

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการให้คะแนนสถานภาพของชั้นส่วนคอนกรีตโครงสร้าง

ชั้นส่วน	คะแนนสถานะสภาพ (Condition State)			
	1	2	3	4
ชั้นส่วนคอนกรีตโครงสร้างสะพาน	คอนกรีตโครงสร้างชั้นส่วนอยู่ในสภาพดี หรือมีรอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกเชิงโครงสร้าง ขนาดเล็กกว่า 0.1 มม. ผิวปูนฉาบ มีรอยแตกขนาดเล็ก ไม่เกิน 0.3 มม.	คอนกรีตโครงสร้างชั้นส่วนมีรอยแตกเล็กน้อย ขนาด 0.1-0.3 มม. มีการหลุดร่อนเล็กน้อย แต่ไม่เห็นเหล็กเสริม ผิวปูนฉาบ มีรอยแตกขนาดกลาง 0.3-1 มม.	คอนกรีตโครงสร้างชั้นส่วนมีรอยแตกชัดเจน ขนาด 0.3-0.7 มม. มีการหลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริม แต่เหล็กเสริมยังไม่เสียหาย ผิวปูนฉาบ มีรอยแตกชัดเจน 1-2 มม.	คอนกรีตโครงสร้างชั้นส่วนมีรอยแตกชัดเจน ขนาดใหญ่กว่า 0.7 มม. มีการหลุดร่อนจนเหล็กเสริมมีการผุกร่อน ผิวปูนฉาบ มีรอยแตกใหญ่กว่า 2 มม.

2.3.4 คะแนนสถานะภาพเฉลี่ย (Condition State Averaging)

ส่วนประกอบแต่ละชั้นได้รับการกำหนดระดับสถานะเงื่อนไขของตนเองหรือการจัดอันดับรวมกัน หากมีสถานะเงื่อนไขมากกว่าหนึ่งสถานะ จะต้องถูกแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบทั้งหมด ส่วนประกอบทั้งหมดที่เป็นประเภทเดียวกันจะถูกเฉลี่ยเป็นคะแนนหนึ่งแถว โดยใช้ค่าเฉลี่ยตรงของแต่ละสถานะเงื่อนไข

$$CSx = \sum_{1}^{n} CSx/n$$

โดยที่ X คือ ร้อยละคะแนนสถานะภาพ

ตัวอย่าง สะพานมีส่วนพื้นสะพาน 5 ชั้นส่วน แต่ละส่วนมีคะแนนสถานะภาพไม่เท่ากัน

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการคำนวณคะแนนสถานภาพแต่ละชั้นส่วน

	CS1	CS2	CS3	CS4
Span 1 Slab	40	20	30	10
Span 2 Slab	100			
Span 3 Slab	100			
Span 4 Slab	50	50		
Span 5 Slab	50			50
Overall 'Slab'	68%	14%	6%	12%

โดยหลักการนี้จะดำเนินการซ้ำกับชั้นส่วนอื่นๆ ดังตัวอย่าง

Component Group	COMPONENT	CS1	CS2	CS3	CS4	Group Multiplier
	Condition Weight	1	5	25	50	
1	Slabs	68.0	14.0	6.0	12.0	11
	Beams					11
	Box Girders					11
	Columns, Piles					11
	Capbeams, Pile Caps					11
	External Strengthening					11
	Masts, Cables/Hangers					11
	Trusses					11
2	Walls					6
	Footings					6
	Diaphragms					6
	Bearings					6
	Bracing, Tie Beams, Tie Rods/Bolts					6
3	Expansion Joints					3
	MSE Walls, Wing Walls, Turndown Walls					3

ตารางที่ 6 ตัวอย่างการคำนวณคะแนนสถานภาพแต่ละชั้นส่วนโดยรวม

ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณคะแนนส่วนประกอบแบบถ่วงน้ำหนักโดยที่สถานะของเงื่อนไขจะพิจารณาจากน้ำหนักเงื่อนไขและตัวคูณของกลุ่ม

$$\text{คะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนัก} = GM \times \sum_{i=1}^4 (CSi \times CWi)$$

โดยที่ *GM* คือ ตัวคูณของกลุ่มขึ้นส่วน
CSi คือ คะแนนสถานภาพ
CWi คือ คะแนนน้ำหนัก

หลังจากขั้นตอนนี้ จะรวมคะแนนส่วนประกอบแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับแต่ละองค์ประกอบเป็นคะแนนเดียว โดยใช้วิธีถ่วงเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก ซึ่งผลรวมของคะแนนองค์ประกอบถ่วงน้ำหนักจะถูกหารด้วยผลรวมของตัวคูณของกลุ่มขึ้นส่วน

ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการคือการแปลค่าคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักเป็นช่วงดัชนีการประเมินสภาพสะพาน ที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้ใน ตารางที่ 3

ตารางที่ 7 การแปลค่าคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักเป็นช่วงดัชนีการประเมินสภาพสะพาน

BCI Range	Describer	Weighted Score Range	Scaling Equations
0		100	
	ดีมาก		$BCI = (WS - 100) / 3$
20		160	
	ดี		$BCI = (WS + 180) / 17$
40		500	
	พอใช้		$BCI = (WS - 100) / 10$
56		660	
	แย่มาก		$BCI = (9x WS + 9,068) / 268$
101		2,000	
	แย่มาก		$BCI = (0.033 x WS / 35)$
200		5,000	

ตัวอย่างการการแปลค่าคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักเป็นช่วงดัชนีการประเมินสภาพสะพาน

ตารางที่ 8 ตัวอย่างการการแปลค่าคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักเป็นช่วงดัชนีการประเมินสภาพ
สะพาน

Component Group	COMPONENT	CS1	CS2	CS3	CS4	Group Multiplier	Weighted Component Score
	Condition Weight	1	5	25	50		
1	Slabs	0.0	100.0	0.0	0.0	11	5500.0
	Beams	99.6	0.4	0.0	0.0	11	1117.6
	Box Girders	0.0	0.0	0.0	0.0	11	0.0
	Columns, Piles	74.2	25.0	0.8	0.0	11	2411.2
	Capbeams, Pile Caps	100.0	0.0	0.0	0.0	11	1100.0
	External Strengthening	0.0	0.0	0.0	0.0	11	0.0
	Masts, Cables/Hangers	0.0	0.0	0.0	0.0	11	0.0
	Trusses	0.0	0.0	0.0	0.0	11	0.0
2	Walls	45.0	50.0	5.0	0.0	6	2520.0
	Footings	0.0	0.0	0.0	0.0	6	0.0
	Diaphragms	100.0	0.0	0.0	0.0	6	600.0
	Bearings	100.0	0.0	0.0	0.0	6	600.0
	Bracing, Tie Beams, Tie Rods/Bolts	0.0	0.0	0.0	0.0	6	0.0
3	Expansion Joints	0.0	60.0	40.0	0.0	3	3900.0
	MSE Walls, Wing Walls, Turndown Walls	97.5	2.5	0.0	0.0	3	330.0

คะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนัก = $[(5500.0 + 1117.6 + 2411.2 + 1100.0 + 2520.0 + 600.0 + 600.0 + 3900.0 + 330.0) \div (11 + 11 + 11 + 11 + 6 + 6 + 6 + 3 + 3)] \approx 265.86$

คะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักคือ 265.86 อยู่ในช่วง 160-500

$$BCI = (WS + 180) \div 17$$

$$BCI = (265.86 + 180) \div 17$$

ดังนั้น BCI \approx 26.2 สะพานอยู่ในสภาพดี

2.4 การวางแผนการบิน

การบินถ่ายภาพของการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ การวางแผนการบินใช้ในการกำหนดรูปแบบการบิน ระดับสูงบิน ขนาดส่วนซ้อน และส่วนเกย และการถ่ายภาพ เป็นส่วนสำคัญในการผลิตข้อมูลดิบเพื่อนำไปประมวลผล

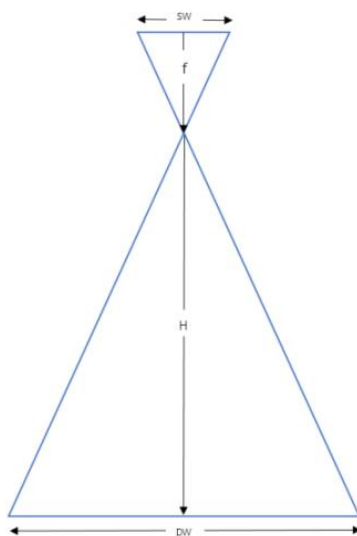
เนื่องจากการกำหนดตัวแปรของการวางแผนการบินจะต้องสอดคล้องกับความถูกต้องที่ต้องการ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการวางแผนการบิน ประกอบด้วย

- ความสูงบิน

- GSD
- ส่วนซ้อนและส่วนเกย
- รูปแบบการบิน

2.4.1 ความสูงบิน

ความสูงบินเป็นส่วนสำคัญของการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากความสูงบินที่ต่ำลงจะได้ความละเอียดของภาพถ่ายสูงขึ้น สามารถผลิตข้อมูลเชิงตำแหน่งที่มีความถูกต้องมากขึ้น แต่ต้องใช้เวลาบินนานขึ้นเพื่อให้ได้ภาพที่มีส่วนซ้อนและส่วนเกยเท่าเดิม



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการคำนวณ

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

เมื่อ

H (Flight Height)	คือ ความสูงการบินเหนือจุดขึ้นบิน หน่วยเมตร
GSD (Ground Sample Distance)	คือ ระยะพื้นที่ต่อพิกเซลหน่วย เซนติเมตรต่อพิกเซล
SW (Sensor Width)	คือ ระยะด้านกว้างของเซนเซอร์ หน่วย มิลลิเมตร
f (Focal Length)	คือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์หน่วยมิลลิเมตร
IW (Image Width)	คือ จำนวนพิกเซลด้านกว้างหน่วยพิกเซล

2.4.2 GSD (Ground Sample Distance)

การกำหนดค่า GSD ขึ้นกับความถูกต้องของข้อมูลเชิงตำแหน่งที่ต้องการ โดยมีการกำหนดความถูกต้องในงานวิศวกรรมด้านต่าง ๆ แบ่งตามประเภทกิจกรรมหรือการใช้งาน ตามแนวทางของ

FGDC (Geospatial Positioning Accuracy Standards PART 4: Standards for Architecture, Engineering, Construction (A/E/C) and Facility Management National)

ตัวอย่างงานวิศวกรรมเช่น แบบงานเกลี่ยระดับ และงานขุด กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนทางราบอยู่ที่ 25 เซนติเมตร และค่าความคลาดเคลื่อนทางตั้งอยู่ที่ 10 เซนติเมตร เมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับระดับ Survey Grade จากตารางที่ 4.1 จะได้ GSD 3 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะสามารถผลิตข้อมูลเชิงตำแหน่งทางราบเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร และสามารถผลิตข้อมูลเชิงตำแหน่งทางตั้งเท่ากับ 9 เซนติเมตร

2.4.3 ส่วนซ้อนและส่วนเกย

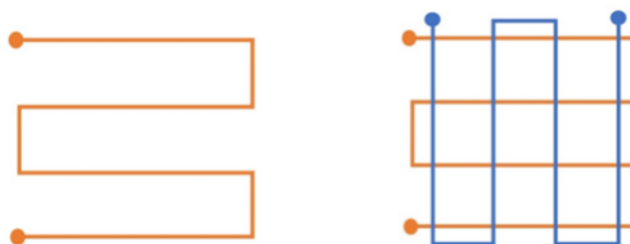
การกำหนดส่วนซ้อนและส่วนเกยที่น้อยเกินไปอาจทำให้ภาพที่ถ่ายไม่สามารถต่อกันได้ โดยการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับจะต้องกำหนดส่วนซ้อนและส่วนเกย ดังนี้

- ส่วนซ้อนหรือพื้นที่ที่ทับกันอยู่ของภาพประชิดในแนวนอน กำหนดให้การถ่ายภาพมีส่วนซ้อนกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 75
- ส่วนเกยหรือพื้นที่ที่ทับกันอยู่ระหว่างแนวนอนที่ประชิดกัน กำหนดให้การถ่ายภาพมีส่วนเกยกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 60

2.4.4 รูปแบบการบิน

รูปแบบการบินโดยปกติจะมีจุดประสงค์หลักคือเพื่อโครงข่ายมีความแข็งแรงและลดจำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย โดยทั่วไปจะกำหนดให้บินถ่ายในลักษณะบล็อกสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยมีรูปแบบการบินได้ 2 แบบคือ รูปแบบการบินแบบทั่วไปและรูปแบบการบินแบบกริด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2 รูปแบบการบินแบบทั่วไปและแบบกริด

2.4.5 จุดควบคุมภาพถ่าย

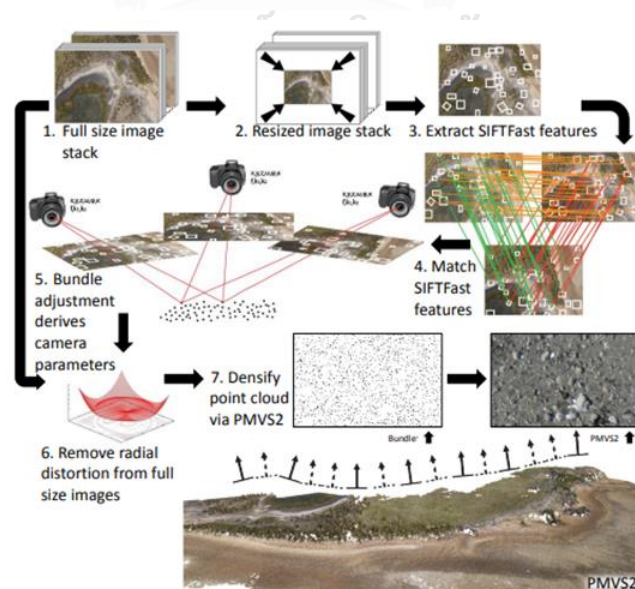
เป็นจุดที่จะนำไปใช้ในการโยงยึด ควบคุม และตัดแก้ภาพถ่ายทางอากาศ ตลอดจนอ้างอิงระบบพิกัดตำแหน่งภูมิประเทศที่จะให้ปรากฏบนแผนที่ และจุดตรวจสอบ (Check Points) เป็นจุดที่นำมาตรวจสอบค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ซึ่งต้องเป็นจุดที่ปรากฏเห็นเด่นชัดบนภาพถ่ายและสามารถระบุชี้ชัดได้บนภาคพื้นดิน ซึ่งการสำรวจต้องดำเนินการสำรวจพิกัดทั้งตำแหน่ง

ทางราบหรือทางตั้งด้วยเครื่องมือสำรวจพิกัดตำแหน่งภาคพื้นดิน เช่น การสำรวจโดยการทำวงรอบด้วยกล้องธีโอดอลไลท์ (Theodolite) กล้องระดับ (Leveling) กล้องรังวัดแบบสถานีรวม (Total-station) หรือเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนำร่อง (GNSS) เป็นต้น ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูง

2.5 การประมวลผลภาพถ่าย

ในการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ เป็นกระบวนการที่สำคัญต่อความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ซึ่งในแต่ละขั้นตอนการประมวลผลจะบ่งชี้ถึงคุณภาพของชุดข้อมูลภาพถ่าย ดังนั้นจึงทำให้ต้องมีการตั้งค่าตัวแปรให้เหมาะสม โดยจะใช้กระบวนการ Photogrammetry เป็นเทคโนโลยีการวัดและสร้างแผนที่ด้วยการใช้ภาพถ่าย เป็นวิธีการที่ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายเพื่อวัดขนาดระยะทาง รูปร่าง และตำแหน่งของวัตถุที่ถ่ายภาพไว้ โดยการใช้คุณสมบัติของเลนส์และการคำนวณ ซึ่งจะช่วยให้สามารถสร้างแผนที่หรือรูปภาพจากภาพถ่ายได้ โดยเฉพาะในการสร้างแผนที่ 3 มิติ

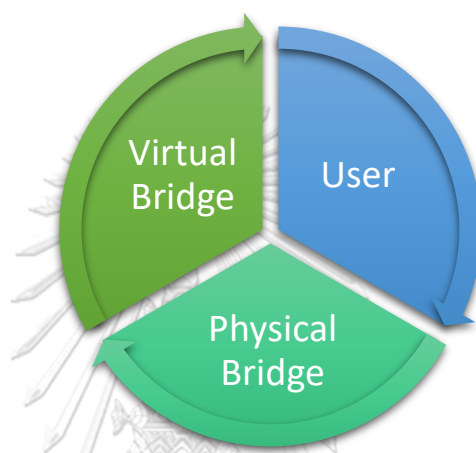
หลักการของ Photogrammetry คือ การวัดและสร้างแผนที่หรือรูปภาพจากภาพถ่ายที่ถูกถ่ายจากมุมและพิกัดที่ต่างกัน โดยการนำภาพถ่ายมาวิเคราะห์ และประมวลผลเพื่อสร้างแผนที่หรือรูปภาพ ด้วยเทคนิคการทำงานของซอฟต์แวร์ที่ใช้ใน Photogrammetry จะสามารถทำการปรับแต่งภาพ สร้างแบบจำลอง และคำนวณค่าพิกัดของวัตถุที่ถ่ายภาพได้ โดยเฉพาะในการสร้างแผนที่ 3 มิติ จะต้องใช้ข้อมูลภาพจากหลายมุมและพิกัดที่ต่างกันเพื่อทำการรวมข้อมูลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นแบบจำลองจุดก้อนเมฆ 3 มิติ (3D Point Cloud)



รูปที่ 3 กระบวนการสร้างแบบจำลองจุดก้อนเมฆ 3 มิติ

2.6 ความหมายของแฝดดิจิทัล

แฝดดิจิทัลคือแบบจำลองดิจิทัลของสิ่งมีชีวิตหรือสิ่งไม่มีชีวิต โดยการรวมโลกทางกายภาพและโลกเสมือนจริงเข้าด้วยกัน[6] การสร้าง Digital Twin เพื่อนำมาใช้งานจะทำให้เพิ่มความเป็นอัจฉริยะให้แก่การดำเนินงาน ของระบบ การนำเสนอคุณลักษณะปัจจุบันของระบบจริงผ่านแบบจำลองจะช่วยให้ผู้ใช้งานได้ควบคุม การทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมไปถึงการนำแบบจำลองมาวิเคราะห์ เพื่อปรับปรุงการ ดำเนินการ ให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีขึ้นในอนาคต[7]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในแนวคิดแฝดดิจิทัล

ซึ่งปัจจุบันงานวิจัยจากฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้แนวคิดแฝดดิจิทัลเข้ากับงานวิศวกรรมสะพานแบ่งออกเป็น 3 แนวทาง [8] ได้แก่

- การอัปเดตแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ [9]
- แบบจำลองพื้นผิว 3 มิติ [10]
- การรวมข้อมูลและอัปเดตบนแบบจำลองสารสนเทศ [11]

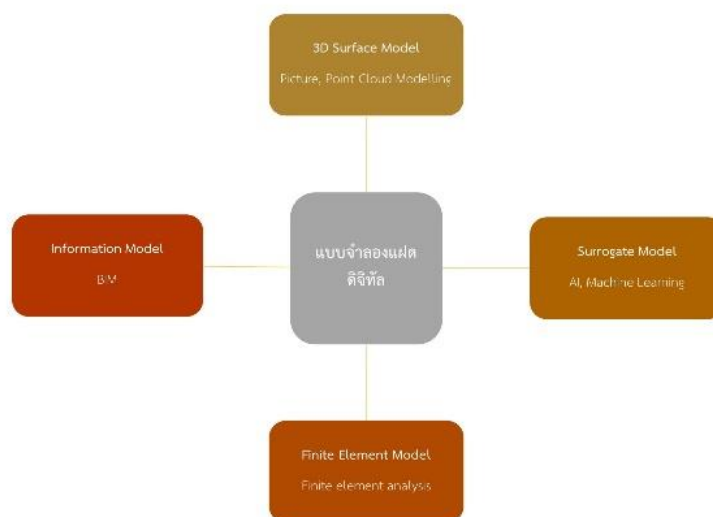
ซึ่งสามารถสรุปคุณสมบัติของแฝดดิจิทัลได้ดังต่อไปนี้ [8]

- ระบบตรวจจ็บบทศทาง ในแบบจำลองโลกเสมือนจริง การได้รับข้อมูลอย่างครบถ้วนจากการรับข้อมูลโลกแห่งความเป็นจริง ทางกายภาพ เช่น การมองเห็น การสัมผัส
- การโต้ตอบแบบตามเวลาจริง เป้าหมายสูงสุดของเทคโนโลยีแฝดดิจิทัล คือการสร้างโลกทางกายภาพจริงขึ้นมาใหม่ทั้งหมด ดังนั้นการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ระหว่างโลกธรรมชาติและโลกแฝดจึงมีความสำคัญ จำเป็นต้องมีการดำเนินการโต้ตอบและการเชื่อมต่อสองทางระหว่างชิ้นส่วนกายภาพจริง และโมเดลเสมือน
- การผสมผสานอย่างสมบูรณ์ จำเป็นต้องมีกระบวนการทั้งหมด องค์ประกอบทั้งหมด และการรวมบริการเต็มรูปแบบเพื่อให้กระบวนการ DT เป็นจริง

- มีการแสดงแบบจำลองที่มีคุณภาพสูง
- ฟังก์ชัน AI สำหรับขับเคลื่อนข้อมูล เพื่อให้ได้การตัดสินใจที่ชาญฉลาด การทำนาย และการเตือนภัยล่วงหน้า เครื่องจักรที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูล การเรียนรู้ การเรียนรู้เชิงลึก และเทคโนโลยีอื่นๆ จำเป็นต้องทำถูกฝังอยู่ในแบบจำลองแฝดดิจิทัล
- การส่งออกข้อมูล และการประสานข้อมูลระหว่างกัน

2.6.1 องค์ประกอบของแฝดดิจิทัลองค์ประกอบของแบบจำลองแฝดดิจิทัลในอุตสาหกรรม

องค์ประกอบของแบบจำลองแฝดดิจิทัลในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 4 องค์ประกอบ



รูปที่ 5 องค์ประกอบของแฝดดิจิทัลในอุตสาหกรรม

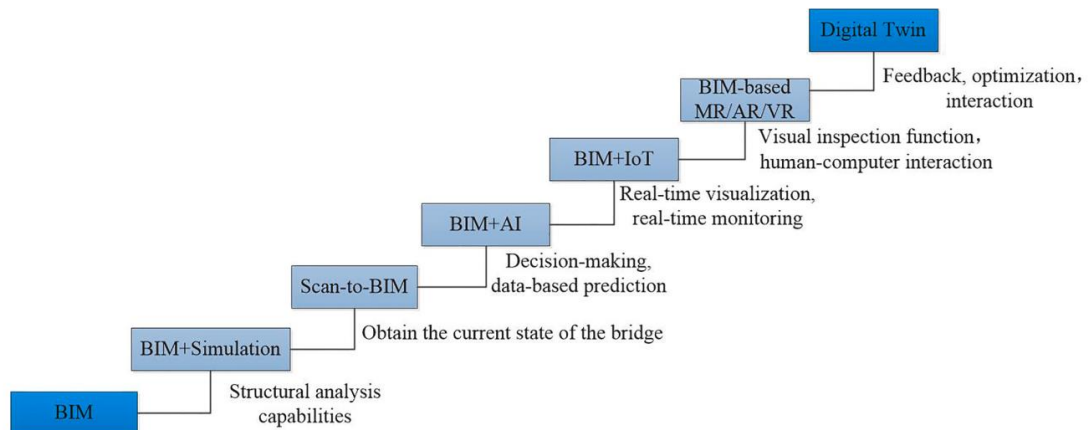
2.6.1.1 แบบจำลองสารสนเทศ (Information Model)

2.6.1.2 แบบจำลองการวิเคราะห์ (Analysis Model)

2.6.1.3 แบบจำลองพื้นผิว 3 มิติ (3D Surface Model)

2.6.1.4 แบบจำลองตัวแทน (Surrogate Model)

2.7 ลำดับการพัฒนาแฝดดิจิทัลในงานวิศวกรรม

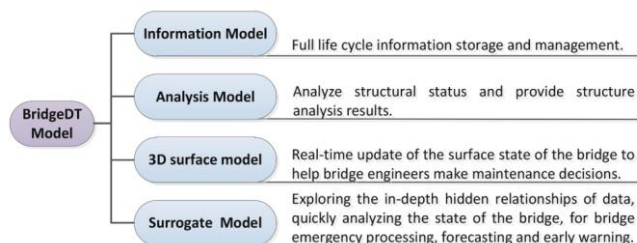


รูปที่ 6 ลำดับขั้นการพัฒนาแฝดดิจิทัลในงานด้านวิศวกรรมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน [8]

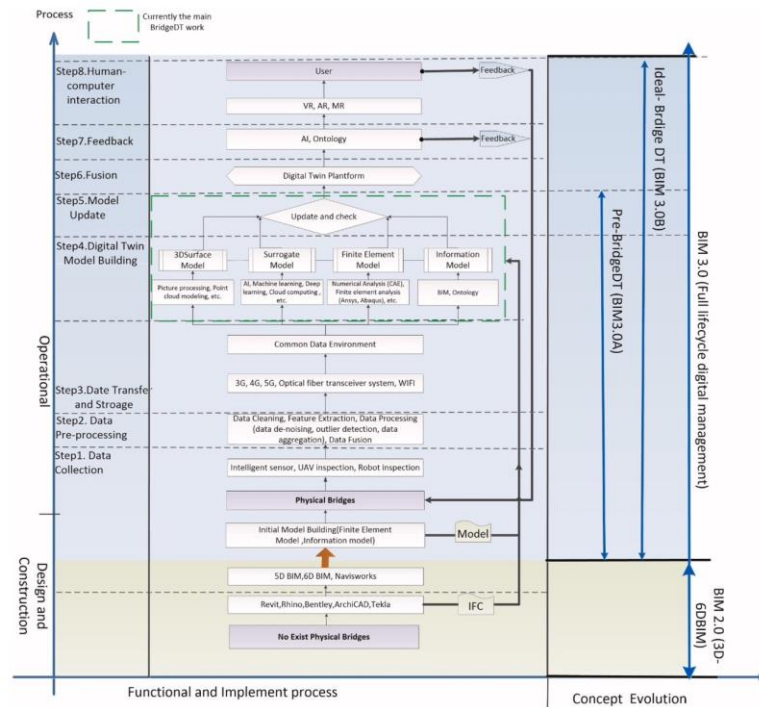
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 แนวคิดของแฝดดิจิทัลและแบบจำลองสารสนเทศ

Song Honghong, Yang Gang, Li Haijiang, Zhang Tian และ Jiang Annan[8] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ แฝดดิจิทัลและแบบจำลองสารสนเทศ จากเอกสารงานวิจัยจำนวน 125 ชิ้นในหัวข้อที่เกี่ยวกับแฝดดิจิทัล และ อีก 116 ชิ้นในหัวข้อที่เกี่ยวกับ แบบจำลองสารสนเทศ และสรุปเป็นแนวคิดในการประยุกต์ใช้แฝดดิจิทัลร่วมกับแบบจำลองสารสนเทศในการดูแลรักษาสะพานอย่างครบวงจร โดยได้ระบุงบประกอบของแบบจำลองสารสนเทศร่วมกับแฝดดิจิทัลไว้ 4 อย่าง ได้แก่ ข้อมูลสารสนเทศของแบบจำลอง, ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง, ลักษณะพื้นผิวของแบบจำลอง และ ตัวแทนของแบบจำลอง และสรุปลำดับขั้นรวมถึงกระบวนการในการพัฒนาแฝดดิจิทัลร่วมกับแบบจำลองสารสนเทศ ตั้งแต่เริ่มต้น ต่อไปจนถึงการก่อสร้างจนแล้วเสร็จเป็นตัวสะพาน การถ่ายโอนและเก็บรวบรวมข้อมูลในรูปแบบของดิจิทัล จนถึงแบบจำลองที่สมบูรณ์ในอุดมคติที่สามารถตอบโต้กับผู้ใช้งานได้อย่างสมบูรณ์ [8]



รูปที่ 7 องค์ประกอบของแบบจำลองแฝดดิจิทัลในอุดมคติ



รูปที่ 8 กระบวนการวงจรชีวิตของแนวคิดแฝดดิจิทัลร่วมกับแบบจำลองสารสนเทศ

Masoud Mohammadi, Maria Rashidi, Vahid Mousavi, Ali Karami, Yang Yu and Bijan Samali, [12] ได้ศึกษาการประเมินคุณภาพของแฝดดิจิทัลระหว่างข้อมูลที่สร้างจาก อากาศยานไร้คนขับ (UAV) กับการรังวัดภาคพื้นดินด้วยเลเซอร์สแกน (TLS) โดยได้ทำการศึกษากับสะพานไม้ยาว 54 เมตร งานวิจัยนี้จะมีเกณฑ์การเปรียบเทียบ 3 อย่าง ได้แก่

1. การกระจายตัวของจุดบนแบบจำลอง (Points Distribution) พบว่า ความหนาแน่นของจุดบนแบบจำลองที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดินด้วยเลเซอร์สแกน (TLS) มีค่ามากกว่า แบบจำลองที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ถึง 2 เท่า

2. ค่าสัญญาณที่ผิดปกติ (Outlier Noise) ที่ส่งผลต่อความผิดพลาดในกระบวนการ 3D-Reconstruction พบว่า ค่าเฉลี่ยของ สัญญาณที่ผิดปกติ (Outlier Noise) ของแบบจำลองที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดินด้วยเลเซอร์สแกน (TLS) มีค่ามากกว่า แบบจำลองที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ประมาณ ร้อยละ 2.36

3. การประเมินคุณภาพการมองเห็น (Visual Quality Assessment) พบว่าแบบจำลองที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) มีข้อมูลบางส่วนที่ไม่สมบูรณ์เนื่องมาจากการซ้อนทับกันของภาพที่ไม่ดี ในขณะที่แบบจำลองที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดินด้วยเลเซอร์สแกน (TLS) ก็ถูกรบกวนด้วยเงาของชิ้นส่วนอื่นที่มาดบัง



รูปที่ 9 แบบจำลองที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ(UAV)

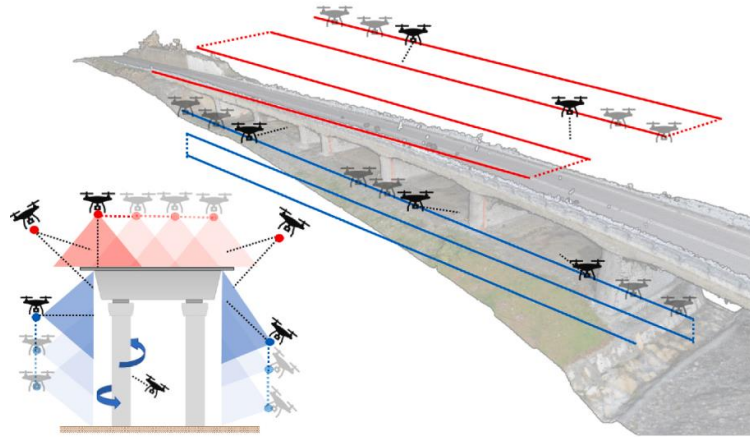


รูปที่ 10 แบบจำลองที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดินด้วยเลเซอร์สแกน (TLS)

2.8.2 การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับในตรวจสอบสะพาน

M. Mandirola และ คณะ (2022) [13] ได้นำเสนอแผนการบินในถ่ายภาพสร้างแบบจำลอง 3 มิติใช้ในการตรวจสอบและประเมินความเสี่ยงของสะพาน ซึ่งแนวทางดังกล่าวใช้ไม่ได้เฉพาะในกรณีหลังเกิดภัยพิบัติ (เช่น หลังเหตุการณ์แผ่นดินไหว) แต่ยังสามารถนำไปใช้เป็นประจำร่วมกับการตรวจสอบปกติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจสอบให้ดียิ่งขึ้น โดยโครงสร้างส่วนบนของสะพาน (เส้นสีแดง) แสดงเส้นทางการวางแผนการบินตามความยาวของสะพาน ส่วนเส้นทางการวางแผนการบินของโครงสร้างส่วนล่าง (เส้นสีฟ้า) ซึ่งให้เห็นระดับความสูงด้านข้างของสะพานที่ระดับความสูงต่าง ๆ กัน ส่วนโครงสร้างต่อม่อควรบินด้วยวิธีแบบเกลียวเพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูลดังกล่าว พื้นที่ทับซ้อนกันของภาพถ่าย ไม่ควรมีน้อยกว่า 70% เพื่อคุณภาพที่ดีของข้อมูล ซึ่งสามารถใช้แอปพลิเคชันวางแผนการบินอัตโนมัติได้ โดยระยะพื้นที่ต่อพิกเซลเฉลี่ย (GSD) ประมาณ 1–1.5 ซม./พิกเซล ถือได้ว่าเหมาะสมสำหรับการตรวจสอบ รวมไปถึงข้อแนะนำการเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธีการอ้างอิงทางภูมิศาสตร์โดยตรงโดยการใช้ข้อมูลที่สกัดโดย GNSS สำหรับการสร้างใหม่

แบบจำลองเสมือนให้มีความถูกต้องเพียงพอ ด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control point: GCP) เป็นทางเลือกที่มีความแม่นยำกว่า แต่ก็เพิ่มระยะเวลาของแต่ละขั้นตอนมากขึ้น



รูปที่ 11 รูปแบบการบินส่วนบนและข้างของสะพาน



รูปที่ 12 รูปแบบการบินส่วนท้องและตอม่อสะพาน

Junwon Seo และคณะ (2018) [14] ได้นำเสนอวิธีการตรวจสอบสะพานไม้ประเภทที่มีพื้นคอนกรีตเป็นส่วนประกอบ โดยใช้อากาศยานไร้คนขับเป็นเครื่องมือ โดยเปรียบเทียบผลกับรายงานการตรวจสอบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมในอดีต ของ South Dakota Department of Transportation (SDDOT) โดยนำเสนอขั้นตอนในการตรวจสอบสะพานโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ ดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลของสะพานที่จะทำการตรวจสอบเพื่อกำหนดขอบเขตการตรวจสอบเกี่ยวกับตำแหน่งและขนาดของสะพาน

2. การประเมินความเสี่ยงของบริเวณโดยรอบตัวสะพานเพื่อระบุความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นสำหรับการทำงานของอากาศยานไร้คนขับ อาทิเช่น สภาพอากาศ การจราจร สิ่งกีดขวาง ข้อจำกัดทางกฎหมาย ระยะทำการที่มองเห็นได้ เป็นต้น
3. ก่อนที่จะทำการตรวจสอบสะพาน จะต้องทำการตั้งค่าอุปกรณ์ล่วงหน้าให้เสร็จสมบูรณ์ เช่น ส่วนประกอบของอากาศยานไร้คนขับและซอฟต์แวร์ ไม่ว่าจะเป็น ใบพัด แบตเตอรี่ iPad เป็นต้น ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น ระหว่างการตรวจสอบ
4. ดำเนินการตรวจสอบสะพานด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยระหว่างการเก็บข้อมูลจะมีการบันทึกวิดีโอซึ่งช่วยให้ ได้ข้อมูลภาพที่จำเป็นสำหรับการระบุความเสี่ยง
5. การดำเนินการระบุความเสี่ยงของชิ้นส่วนต่างๆ ของสะพาน โดยใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan เพื่อสร้างภาพเสมือน 3 มิติ โดยได้ตรวจพบความเสี่ยงจากส่วนต่าง ๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้พบว่าข้อมูลที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับมีความคล้ายคลึงกับฐานข้อมูลเดิมที่มีอยู่จากการตรวจสอบแบบดั้งเดิม เช่น พื้นที่ที่หลุดร่อน 0.18 ตร.ม. ซึ่งเหมือนกับข้อมูลที่ SDDOT ให้มา (0.3 ม. คูณ 0.6 ม.) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสะพาน ที่มีความปลอดภัย ใช้เวลาสั้นลง และลดค่าใช้จ่าย เมื่อเทียบกับการตรวจสอบแบบดั้งเดิม

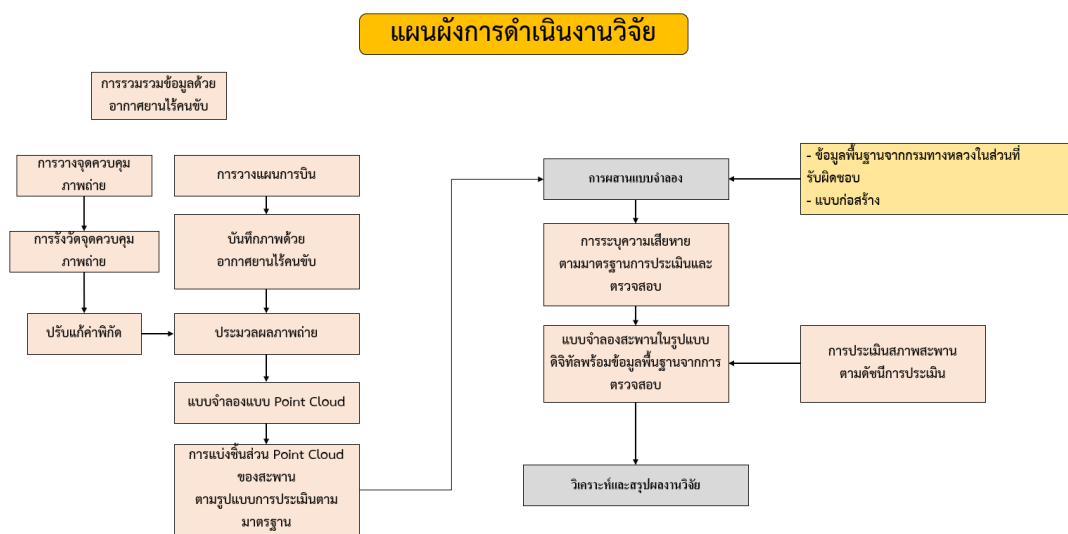


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษา สะพานธนรัศมี ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของแขวงทางหลวงราชบุรี เป็นพื้นที่ตัวอย่างในการนำเสนอกระบวนการประยุกต์ใช้แนวคิดแพลตฟอร์มดิจิทัลในการตรวจสอบและประเมินสะพานจากการรวบรวมข้อมูลโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานและรายละเอียดดังต่อไปนี้



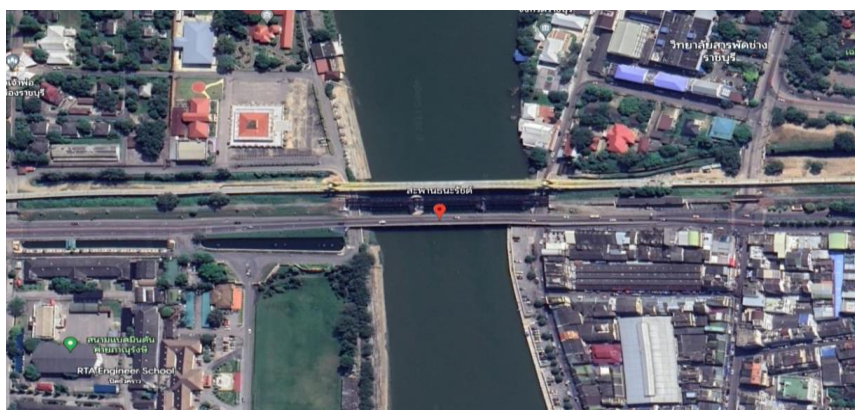
รูปที่ 13 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

3.1 ที่ตั้ง ลักษณะสะพาน และปัจจัยในการเลือกสะพาน

สะพานธนรัศมีเป็นสะพานข้ามแม่น้ำแม่กลองคู่ขนานกับสะพานรถไฟหรือสะพานจุฬาลงกรณ์ ตั้งอยู่ ถนน รถไฟ ตำบล หน้าเมือง อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัด ราชบุรี 70000 เป็นสะพานชนิดคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีความยาวสะพานระยะ 230 เมตร กว้าง 10 เมตร สูง 10 เมตร ผิดทางชนิดแอสฟัลต์ติกคอนกรีต



รูปที่ 14 สะพานธนระริชต์



รูปที่ 15 ตำแหน่งที่ตั้งสะพานธนระริชต์

ด้วยจังหวัดราชบุรี ได้รับแจ้งว่ามีการตรวจพบวัตถุระเบิดสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 จำนวน 3 ลูก ขนาดประมาณลูกละ 1,000 ปอนด์ หรือประมาณลูกละ 500 กิโลกรัม จมอยู่ใต้แม่น้ำแม่กลอง บริเวณสะพาน เนื่องจากวัตถุระเบิดดังกล่าว เป็นวัตถุที่มีอันตรายโดยอย่างยิ่งแรง ดังนั้นการสำรวจ และบำรุงรักษาในแต่ละวงรอบจึงมีข้อจำกัดและความเสี่ยงยากหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการหาแนวทางในการสำรวจ และประเมินเพื่อช่วยให้ข้อพิจารณาการตัดสินใจในการบำรุงรักษา เพื่อทดแทน กระบวนการแบบดั้งเดิมจะช่วยลดข้อจำกัดและอุปสรรคดังกล่าวได้

3.2 การรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ

3.2.1 การวางแผนการบิน

3.2.1.1 ชนิดของอากาศยานไร้คนขับ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ DJI Phantom 4 Pro V2 และ Skydio 2 ซึ่งเป็นโดรนพร้อมบิน ประสิทธิภาพสูง โดยมีข้อมูลสำคัญในการเลือกใช้โดรน ดังนี้

1. DJI Phantom 4 Pro V2

- Phantom 4 Pro V2.0 สามารถบินด้วยความเร็วสูงสุด 72 กิโลเมตร/ชั่วโมง ในโหมดสปอร์ต และมีระยะบินไกลถึง 7 กิโลเมตร (ขึ้นอยู่กับแรงลมและสัญญาณรบกวน)
- มีระบบกันสั่น 3 แกนหมุนอิสระ และเซ็นเซอร์กล้อง CMOS ขนาด 1 นิ้ว ความละเอียด 20 ล้านพิกเซล
- เลนส์มุมกว้าง f/2.8 ที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จับภาพได้กว้างขึ้น เก็บรายละเอียดได้ดีขึ้น และความแม่นยำของสีที่เที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 16 โดรนรุ่น DJI Phantom 4 Pro V2.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. Skydio 2

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



รูปที่ 17 โดรนรุ่น Skydio 2

3.2.1.2 รูปแบบเส้นทางการบิน

1. ส่วนด้านบนของสะพาน

การสำรวจในส่วนด้านบนของสะพานจะใช้การบินแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม DJI GS Pro เพื่อกำหนดรูปแบบการบินเพื่อให้ได้ข้อมูลตามที่ต้องการ โดยสะพานธนารักษ์ มีความยาว 300 เมตร กว้าง 10 เมตร สูงสูงสุด 10 เมตรโดยประมาณจากผิวน้ำจึงสร้างกรอบการบินของโดรนกว้าง 14 เมตร ยาว 170 เมตร ปรับค่า Front Overlap Ratio : 80 % , Side Overlap Ratio : 80 % , Height : 10 m , Resolution : 0.3 cm/px , Camera model : Phantom 4 Pro V2 Camera

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 18 รูปแบบการบินส่วนบนของสะพานโดยโปรแกรม DJI GS Pro

2. ส่วนด้านข้างของสะพาน

ข้อจำกัดในการสำรวจก็คือสิ่งกีดขวางบริเวณสะพานเช่น เสาไฟ สายไฟฟ้า สะพานรถไฟอยู่ด้านข้าง ทำให้ไม่สามารถทำการบินแบบอัตโนมัติได้ จึงต้องทำการบินด้วยตนเอง โดยบังคับให้อากาศยานนั้นบินด้วยความเร็วคงที่ เพื่อให้การซ้อนทับของภาพเป็นไปอย่างสมบูรณ์



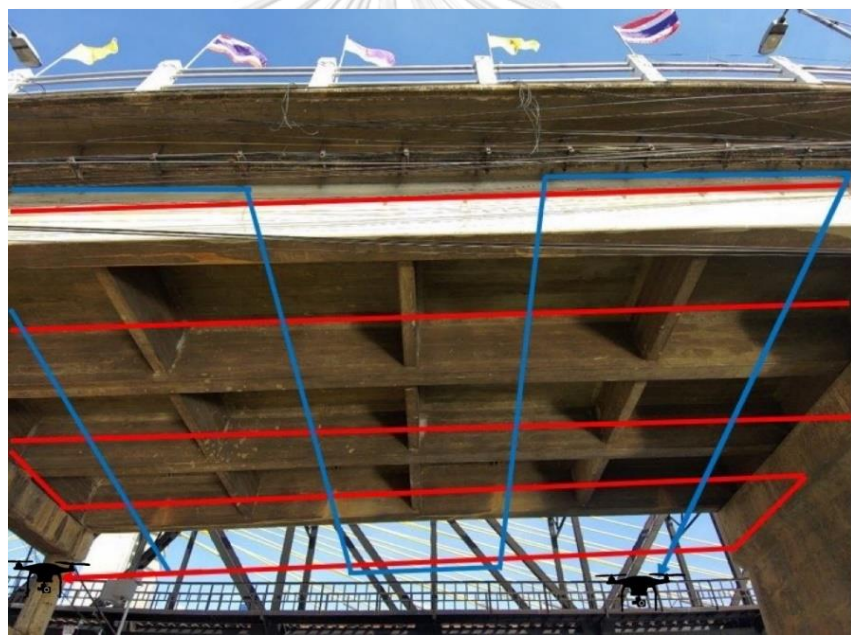
รูปที่ 19 รูปแบบการบินส่วนด้านข้างของสะพาน

3. ส่วนตอม่อและใต้ท้องสะพาน

ในส่วนของการวางแผนการบินส่วนตอม่อและใต้ท้องสะพานไม่สามารถบินแบบอัตโนมัติ เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ปฏิบัติการที่อาจก่อให้เกิดอันตรายกับตัวอากาศยานได้ จึงดำเนินการบินด้วยตนเอง โดยรูปแบบการบินของตอม่อ จะต้องบินทั้ง 2 ด้านเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วน ส่วนใต้ท้องสะพานนอกเหนือจากข้อจำกัดของพื้นที่ปฏิบัติการแล้ว แสงก็ยังเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพของภาพที่ออกมาเช่นกัน โดยเวลาที่เหมาะสมควรหลีกเลี่ยงในช่วงเวลาเที่ยงตรงหรือช่วงเวลาที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับตัวสะพาน เพราะทำให้แสงที่ตกกระทบกับตัวท้องพื้นสะพาน มีน้อยจนคุณภาพของภาพที่ออกมาไม่เพียงพอ



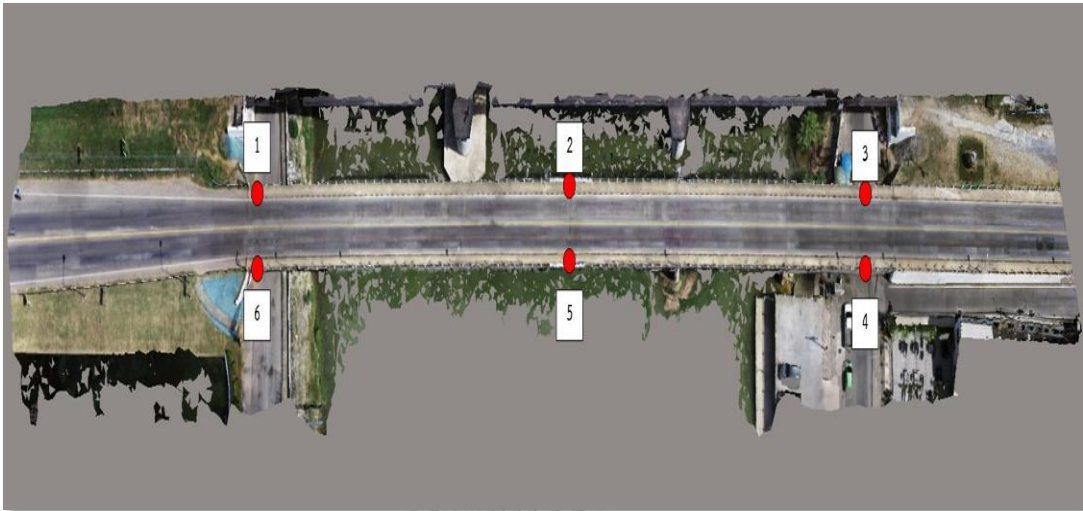
รูปที่ 20 รูปแบบการบินในส่วนตอม่อสะพาน



รูปที่ 21 รูปแบบการบินในส่วนท้องพื้นของสะพาน

3.2.1.3 จุดควบคุมภาพถ่าย

จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ทำการรังวัดจุดควบคุมภาพและจุดตรวจสอบ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนบนสะพานและตอม่อสะพาน โดยให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ



รูปที่ 22 จุดควบคุมภาพถ่ายส่วนบนของสะพาน



รูปที่ 23 จุดควบคุมภาพถ่ายส่วนตอม่อของสะพาน

3.2.2 การประมวลผลภาพถ่าย

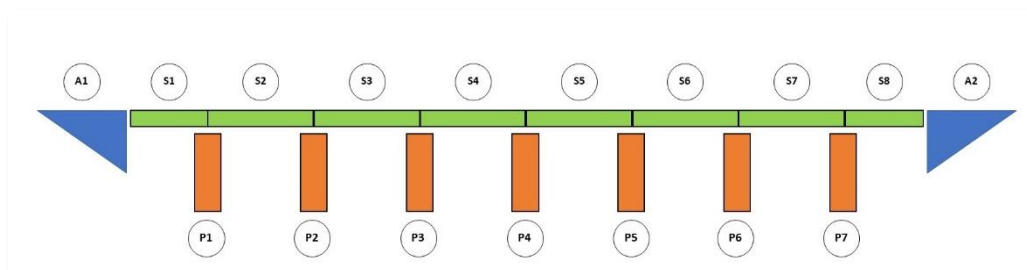
นำภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับมาทำการประมวลผล โดยวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ Context Capture โดยอาศัยทฤษฎีการสร้างจุดภาพสามมิติจากภาพหลายมุมมอง เพื่อทำการสร้างแบบจำลองสามมิติจุดก่อนเมฆของสะพานโดยทำการใช้จุดควบคุมภาพถ่ายที่ได้จากกล้องประมวลผลรวมในการปรับแก้พิกัดให้มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งยิ่งขึ้น



รูปที่ 24 กระบวนการประมวลผลโปรแกรม Context Capture

3.3 การแบ่งชิ้นส่วนตามการมาตรฐานการประเมินสภาพสะพาน

การแบ่งชิ้นส่วนและกำหนดรหัสสะพานเพื่อให้ทราบถึงรายละเอียดของชิ้นส่วนและความเสียหายบนชิ้นส่วนนั้นๆ

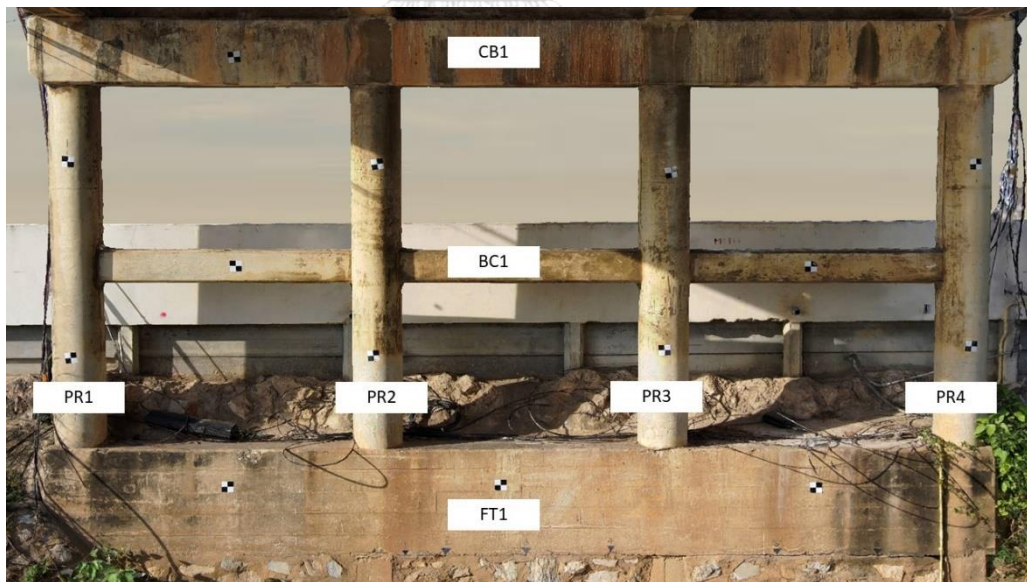


รูปที่ 25 การแบ่งส่วนของสะพาน

โดยแบ่งกลุ่มตามลำดับความสำคัญของโครงสร้างได้ดังนี้

ตารางที่ 9 กลุ่มและจำนวนชิ้นส่วนตามลำดับความสำคัญของโครงสร้าง

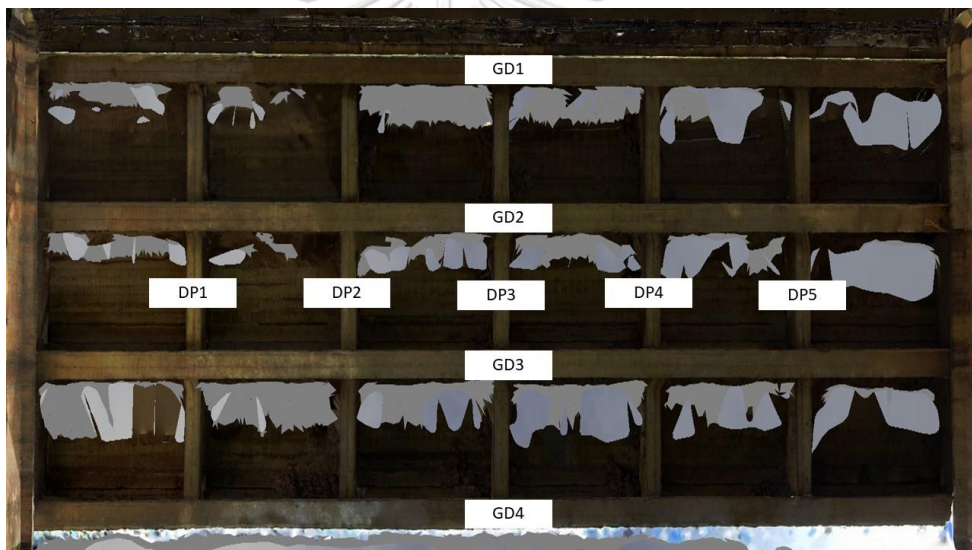
กลุ่มชิ้นส่วน	ชิ้นส่วน	รหัส	จำนวนชิ้นส่วน	ตัวคูณ
1	พื้นสะพาน (S)	S	8	11
	คานตามยาว (Girder)	GD	24	11
	เสาตอม่อ (Pier)	PR	8	11
	กำแพงตอม่อ (Pier Wall)	PW	5	11
	คานตามรัศหัวเสา (Cap Beam)	CB	2	11
2	ตอม่อริมสะพาน	A	2	6
	ฐานราก (Footing)	FT	7	6
	ค้ำยันตามยาว (Diaphragm)	DP	18	6
	ค้ำยันตอม่อ (Bracing)	BC	6	6
	แผ่นรองรับคาน (Bearing)	BR	28	6
3	รอยต่อเพื่อการขยาย (Expansion Joint)	EJ	9	3



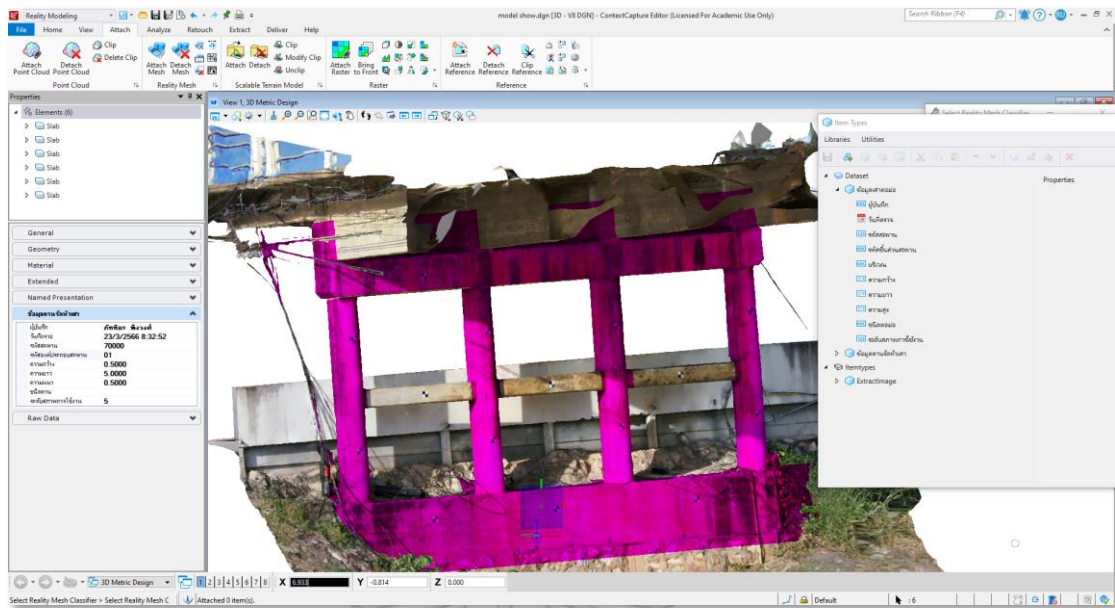
รูปที่ 26 ตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณตอม่อแบบที่ 1



รูปที่ 27 ตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณต่อม่อแบบที่ 2



รูปที่ 28 ตัวอย่างการแบ่งชิ้นส่วนบริเวณพื้นสะพาน



รูปที่ 29 การระบุชิ้นส่วนให้กับแบบจำลองที่ได้จากการประมวลผล

3.4 การประเมินสภาพของสะพาน

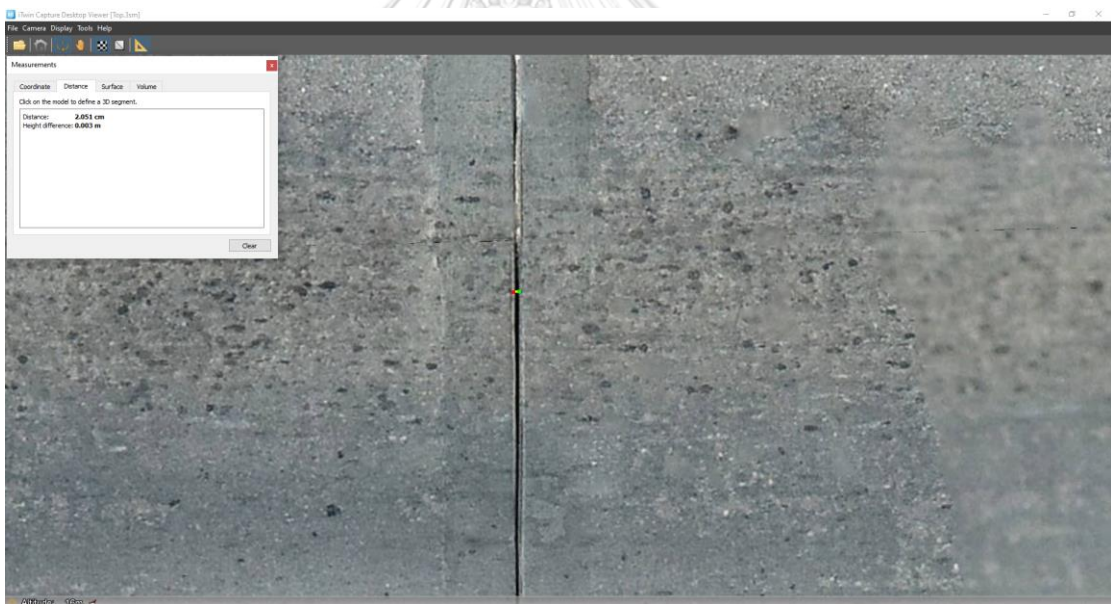
ในงานวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบและประเมินความเสียหายเพื่อทดแทนการตรวจสอบด้วยตาเปล่า ซึ่งตามมาตรฐานการประเมินจะมุ่งเน้นไปที่ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่สามารถพบเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่นรอยร้าว หรือรอยหลุดร่อนของคอนกรีตเป็นหลัก โดยจะแบ่งออกเป็น การประเมินสภาพส่วนบนและการประเมินสภาพส่วนล่างของสะพาน โดยจะใช้เครื่องมือวัดขนาดในโปรแกรม Context Viewer เพื่อวัดขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการตรวจสอบ

3.4.1 การประเมินสภาพส่วนบน

การประเมินสภาพส่วนบนของสะพานได้แก่ พื้นสะพาน ทางเท้า และ รอยต่อขยายของสะพาน โดยมุ่งเน้นไปที่ ขนาดของรอยร้าว หรือการหลุดร่อนของคอนกรีตที่เกิดขึ้น ขนาดรอยแยกของรอยต่อขยาย รวมไปถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นบนทางเท้า



รูปที่ 30 การวัดขนาดพื้นที่การหลุดร่อนของคอนกรีตบนทางเท้า



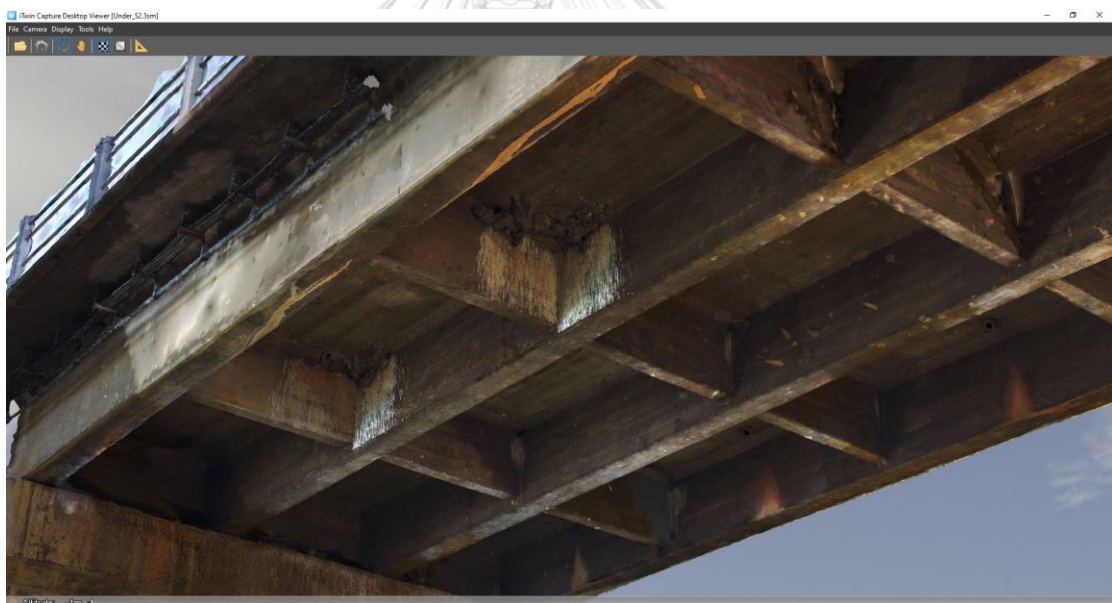
รูปที่ 31 การวัดความกว้างของรอยต่อขยายบนพื้นสะพาน

3.4.2 การประเมินสภาพส่วนล่าง

การประเมินสภาพส่วนล่างของสะพานได้แก่ ฐานราก ตอม่อ กำแพงตอม่อ คานรัดหัวเสา คานตามยาว และท้องสะพาน ก็จะใช้วิธีการเช่นเดียวกันกับการประเมินส่วนบนของสะพาน คือมุ่งเน้นไปที่ความเสียหายที่เกิดขึ้นที่สามารถตรวจพบได้ด้วยตาเปล่า



รูปที่ 32 การวัดขนาดพื้นที่การหลุดร่อนของชิ้นส่วนคานรัดหัวเสา



รูปที่ 33 การประเมินสภาพพื้นผิวของท้องพื้นสะพาน

3.4.3 การคำนวณค่าเฉลี่ยคะแนนสถานภาพโดยรวมของชิ้นส่วน

หลังจากการประเมินสภาพในแต่ละชิ้นส่วนแล้ว เนื่องจากจำนวนชิ้นของชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานแต่ละรายการมีมากกว่าหนึ่งชิ้น เช่น สะพาน ตอม่อ ทางเท้า และอื่นๆ จึงต้องมีการคำนวณคะแนนสถานภาพโดยรวมของแต่ละชิ้นส่วน เพื่อหาค่าเฉลี่ยของคะแนนสถานภาพของชิ้นส่วนนั้นๆ

เช่น พื้นสะพาน มีทั้งหมด 8 ส่วน โดยในแต่ละส่วนจะใช้ขนาดพื้นที่เป็นเกณฑ์ว่าอยู่ในสถานภาพใดบ้าง เช่น พื้น S4 อยู่ในสภาพดี คิดเป็นพื้นที่ 90% อยู่ในสภาพรองลงมา 10 % ดังแสดงตัวอย่างในตาราง

ตารางที่ 10 ตัวอย่างการหาคะแนนสถานภาพโดยรวมของชิ้นส่วน

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
S1	100	-	-	-
S2	100	-	-	-
S3	100	-	-	-
S4	90	10	-	-
S5	100	-	-	-
S6	100	-	-	-
S7	100	-	-	-
S8	100	-	-	-
Overall	98.75	1.25	-	-

3.4.4 การคำนวณคะแนนสถานภาพของทั้งสะพาน

เมื่อได้คะแนนสถานภาพโดยรวมของแต่ละชิ้นส่วน จะนำมาคำนวณคะแนนสถานภาพของทั้งสะพานโดยจะมีตัวคูณตามความสำคัญของกลุ่มชิ้นส่วน เพื่อหาคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อใช้ประเมินสะพานในภาพรวมทั้งหมด

ตารางที่ 11 ตัวอย่างการคำนวณคะแนนสถานภาพ

กลุ่มชิ้นส่วน	ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4	ตัวคูณ	คะแนนน้ำหนัก
	Condition Weight	1	5	25	50		
1	พื้นสะพาน (S)	100				11	1100
	คานตามยาว (Girder)	90	10			11	1540
	เสาตอม่อ (Pier)	80	20			11	1980
	กำแพงตอม่อ (Pier Wall)	90	10			11	1540
	คานตามรั้วหัวเสา (Cap Beam)	75	25			11	2200
2	ตอม่อริมสะพาน	100				6	600
	ฐานราก (Footing)	90	10			6	840
	ก้ำยันตามยาว (Diaphragm)	85	15			6	960
	ก้ำยันตอม่อ (Bracing)	80	15	5		6	1680
	แผ่นรองรับคาน (Bearing)	80	5	15		6	2880
3	รอยต่อเพื่อการขยาย (Expansion Joint)	50	10	40		3	3300



บทที่ 4

ผลการศึกษา

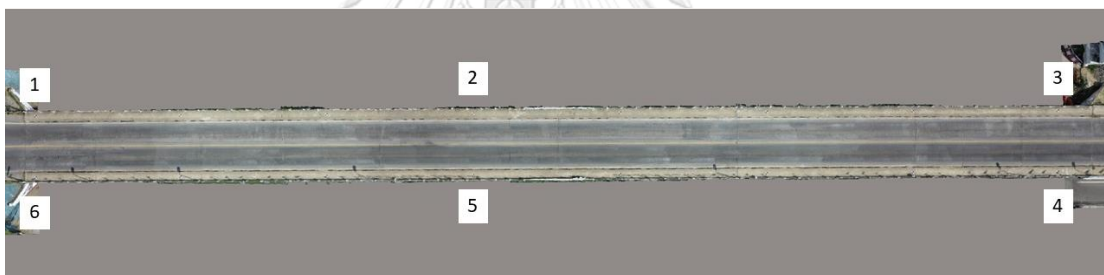
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลภาพถ่าย ที่บริเวณสะพานธนรัชต์ อ.เมือง จ.ราชบุรี นำมาประมวลผลภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลองแผนที่ดิจิทัลให้กับชิ้นส่วนต่างๆของโครงสร้างสะพาน จากนั้นนำมาประเมินสภาพเพื่อทดแทนการตรวจสอบแบบดั้งเดิม โดยมีผลการศึกษาวิจัยดังต่อไปนี้

4.1 ผลการประมวลผลภาพถ่าย

การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับของโครงสร้างสะพานแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ การประมวลผลภาพถ่ายและแบบจำลองของโครงสร้างสะพานส่วนบน และโครงสร้างสะพานส่วนล่าง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 การประมวลผลภาพถ่ายและแบบจำลองของโครงสร้างสะพานส่วนบน

4.1.1.1 จุดควบคุมภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนบน



รูปที่ 34 จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 6 จุด ครอบคลุมส่วนบนของโครงสร้างสะพาน

ตารางที่ 12 ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินของโครงสร้างสะพานส่วนบน

GCP	N (m.)	E (m.)	Z (m.)
1	1497203.14153145	589181.306259982	9.172
2	1497141.64245284	589180.131283438	10.564
3	1497080.14637423	589178.965306904	9.942
4	1497080.36437104	589170.447296108	9.939
5	1497141.84244961	589171.576272605	10.565
6	1497203.34552824	589172.779249186	9.168

4.1.1.2 รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนบน

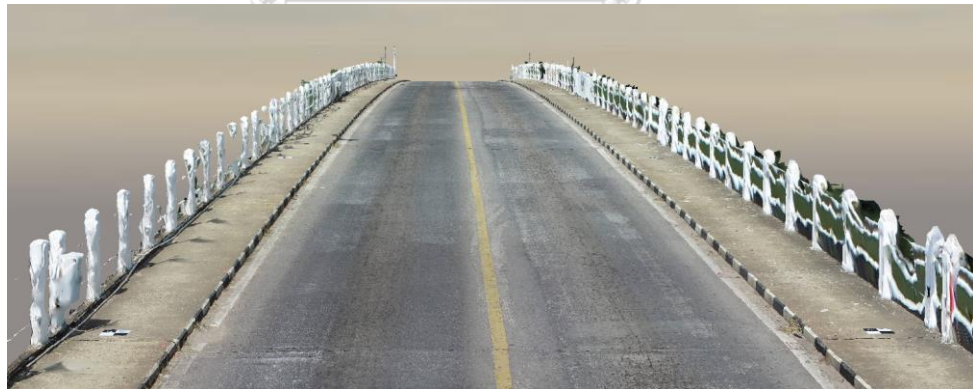
ตารางที่ 13 รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนบน

รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่าย	
จำนวนภาพถ่าย	316 ภาพ
ค่าความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Reprojection Error)	0.99 พิกเซล
ความละเอียดภาพถ่าย	3.67605 มม./พิกเซล
เวลาที่ใช้ในการประมวลผล	11 นาที 17 วินาที

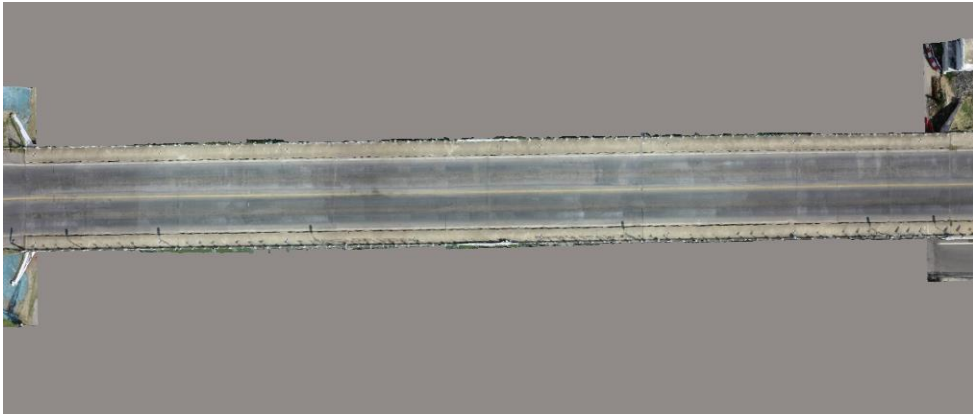
4.1.1.3 แบบจำลองโครงสร้างสะพานส่วนบน



รูปที่ 35 มุมมองแบบจำลองจากทิศเหนือ



รูปที่ 36 มุมมองแบบจำลองจากทิศใต้



รูปที่ 37 มุมมองแบบจำลองจากด้านบน

4.1.2 การประมวลผลภาพถ่ายและแบบจำลองของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง

4.1.2.1 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 1

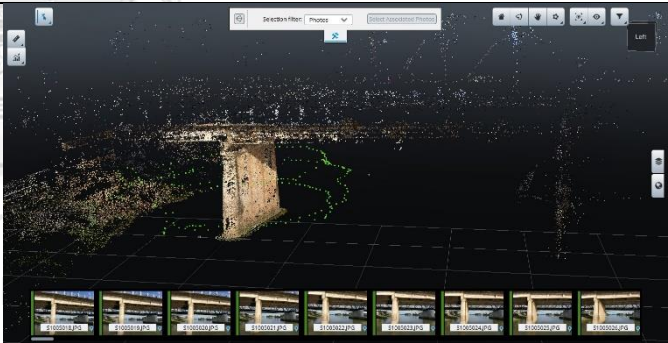

ตารางที่ 14 รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 1)

รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่าย ต่อม่อที่ 1 (P1)	
จำนวนภาพถ่าย	165 ภาพ
ค่าความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Reprojection Error)	0.8 พิกเซล
ความละเอียดภาพถ่าย	1.89852 มม./พิกเซล
เวลาที่ใช้ในการประมวลผล	8 นาที 52 วินาที
ภาพการประมวลผล	



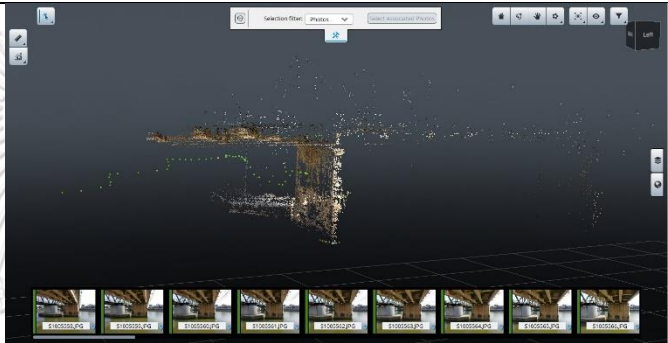

4.1.2.2 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 2

ตารางที่ 15 รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 2)

รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่าย ต่อม่อที่ 2 (P2)	
จำนวนภาพถ่าย	242 ภาพ
ค่าความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Reprojection Error)	0.8 พิกเซล
ความละเอียดภาพถ่าย	2.23278 มม./พิกเซล
เวลาที่ใช้ในการประมวลผล	5 นาที 16 วินาที
ภาพการประมวลผล	
แบบจำลอง	

4.1.2.3 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 3

ตารางที่ 16 รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 3)

รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่าย ต่อม่อที่ 3 (P3)	
จำนวนภาพถ่าย	161 ภาพ
ค่าความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Reprojection Error)	0.51 พิกเซล
ความละเอียดภาพถ่าย	2.43067 มม./พิกเซล
เวลาที่ใช้ในการประมวลผล	3 นาที 28 วินาที
ภาพการประมวลผล	
แบบจำลอง	

4.1.2.4 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 4

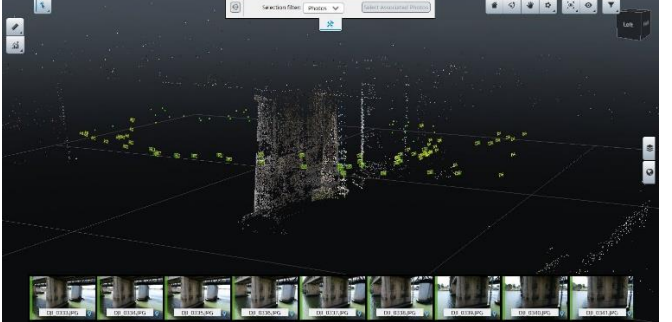
ตารางที่ 17 รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 4)


รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่าย ต่อม่อที่ 4 (P4)	
จำนวนภาพถ่าย	104 ภาพ
ค่าความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Reprojection Error)	0.51 พิกเซล
ความละเอียดภาพถ่าย	2.41048 มม./พิกเซล
เวลาที่ใช้ในการประมวลผล	1 นาที 45 วินาที

ภาพการประมวลผล	
แบบจำลอง	

4.1.2.5 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 5

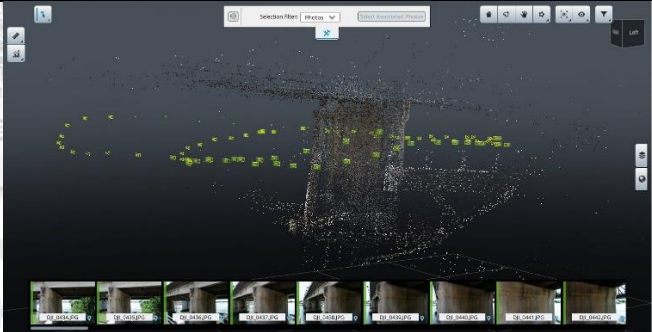

ตารางที่ 18 รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 5)

รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่าย ต่อม่อที่ 5 (P5)	
จำนวนภาพถ่าย	101 ภาพ
ค่าความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Reprojection Error)	0.52 พิกเซล
ความละเอียดภาพถ่าย	2.64063 มม./พิกเซล
เวลาที่ใช้ในการประมวลผล	1 นาที 54 วินาที
ภาพการประมวลผล	

แบบจำลอง	
----------	--

4.1.2.6 การประมวลผลภาพถ่ายต่อม่อที่ 6

ตารางที่ 19 รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่ายของโครงสร้างสะพานส่วนล่าง (ต่อม่อที่ 6)

รายละเอียดการประมวลผลภาพถ่าย ต่อม่อที่ 6 (P6)	
จำนวนภาพถ่าย	92 ภาพ
ค่าความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Reprojection Error)	0.62 พิกเซล
ความละเอียดภาพถ่าย	1.87297 มม./พิกเซล
เวลาที่ใช้ในการประมวลผล	2 นาที 7 วินาที
ภาพการประมวลผล	
แบบจำลอง	

4.2 การแบ่งชิ้นส่วนของสะพานบนแบบจำลองแปดมิติ

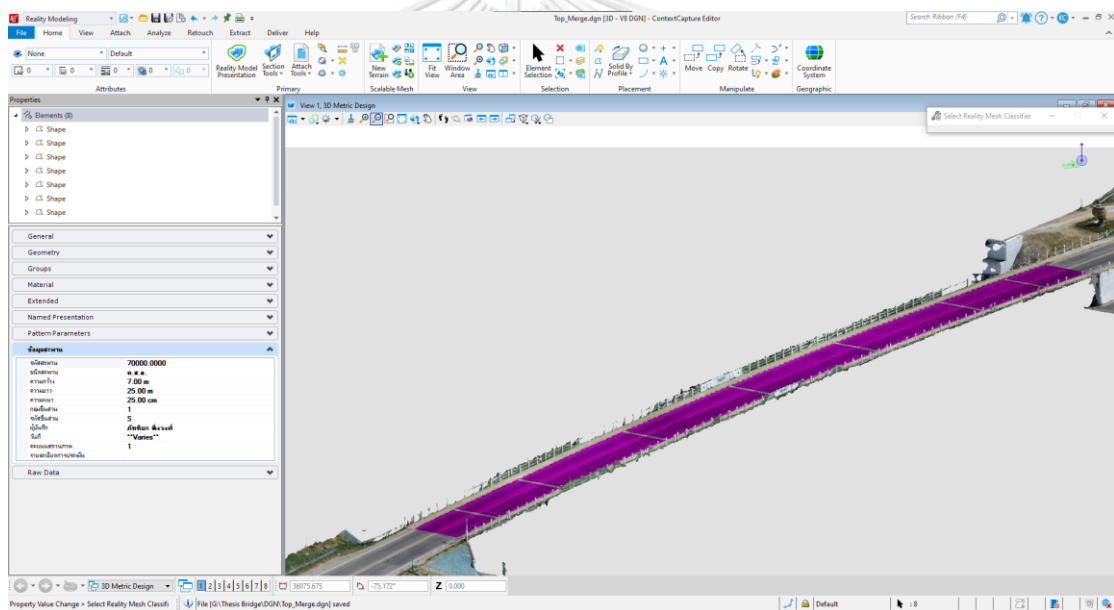
หนึ่งในหัวใจสำคัญของแบบจำลองแปดมิติ นอกเหนือจากลักษณะพื้นผิวของแบบจำลองแล้ว ยังต้องประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานของแบบจำลองนั้น ซึ่งหลังจากการประมวลผลข้อมูลเพื่อให้ได้แบบจำลองแล้ว เราจะนำแบบจำลองดังกล่าวมาแบ่งชิ้นส่วนเพื่อเพิ่มข้อมูลพื้นฐานของชิ้นส่วนนั้นๆ

ด้วยโปรแกรม Context Editor เพื่อสร้างข้อมูลพื้นฐานของแบบจำลองชิ้นส่วนสะพาน ซึ่งจะประกอบด้วยข้อมูลที่ระบุรายละเอียดของการสำรวจ ไม่ว่าจะเป็น ชื่อ วัน เวลา สถานที่ มิติของชิ้นส่วนนั้นๆ รวมไปถึงรายละเอียดของการประเมินที่สามารถระบุและใช้ในการติดตามการประเมินได้ในอนาคต

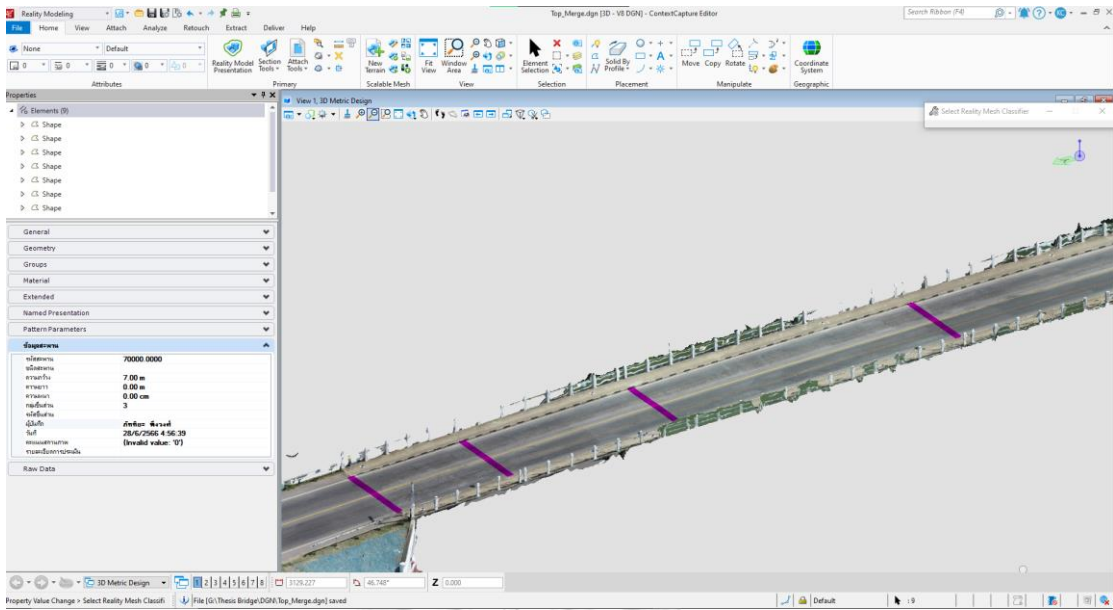
4.2.1 การแบ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานส่วนบน

4.2.1.1 ชิ้นส่วนพื้นสะพาน ทางเท้า และรอยต่อเพื่อการขยาย

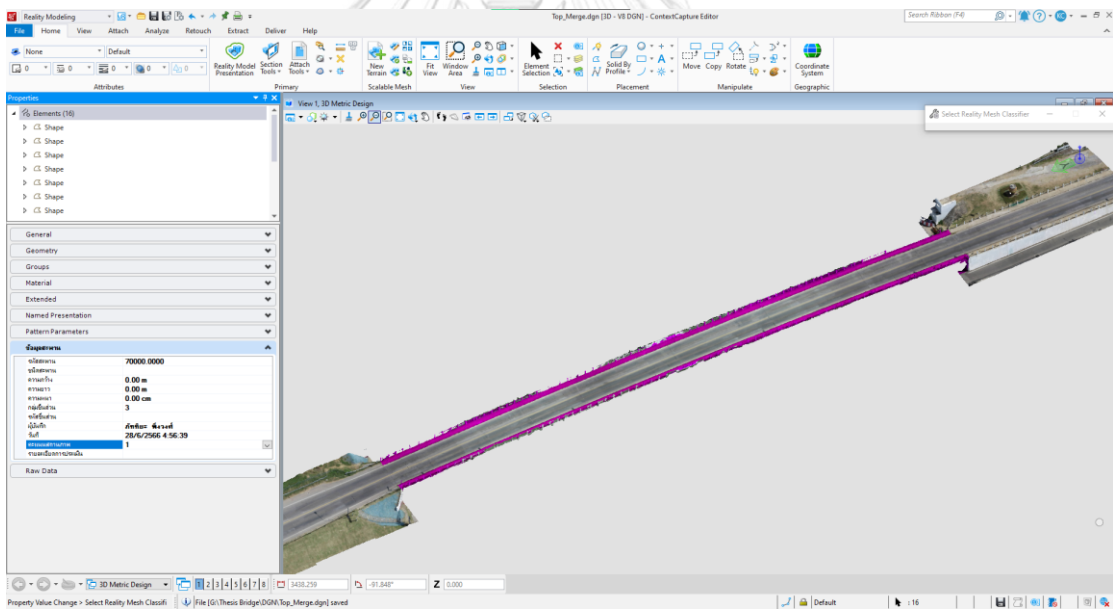
โครงสร้างสะพานส่วนบน จะดำเนินการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ ส่วนพื้นสะพาน ซึ่งอยู่ในกลุ่มชิ้นส่วนที่ 1 ซึ่งมีความสำคัญสูงสุดสำหรับโครงสร้างสะพาน ลำดับต่อมาคือส่วนของทางเท้าและรอยต่อขยาย อยู่ในกลุ่มชิ้นส่วนที่ 3 ที่มีความสำคัญรองลงมา



รูปที่ 38 การแบ่งชิ้นส่วนพื้นสะพานบนโปรแกรม Context Editor



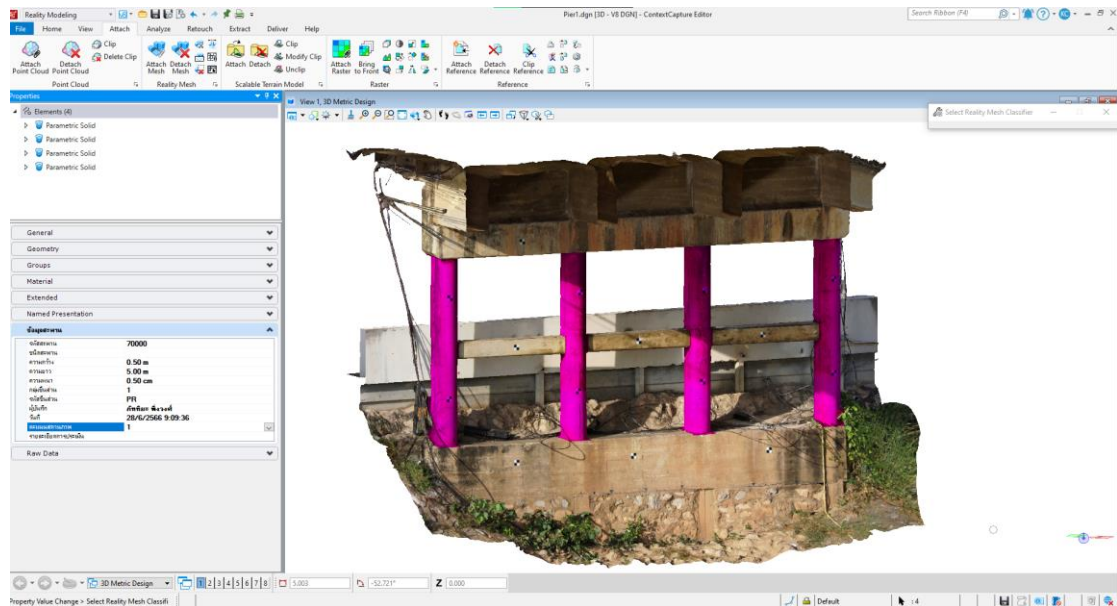
รูปที่ 39 การแบ่งชิ้นส่วนรอยต่อส่วนขยายของสะพานบนโปรแกรม Context Editor



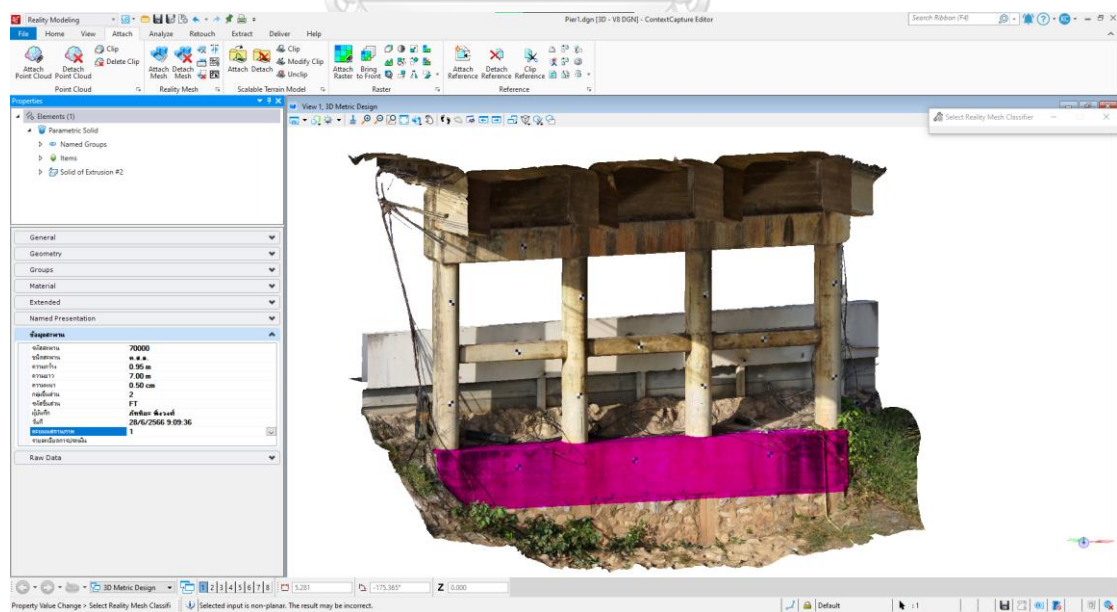
รูปที่ 40 การแบ่งชิ้นส่วนทางเท้าของสะพานบนโปรแกรม Context Editor

4.2.2 การแบ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานส่วนล่าง

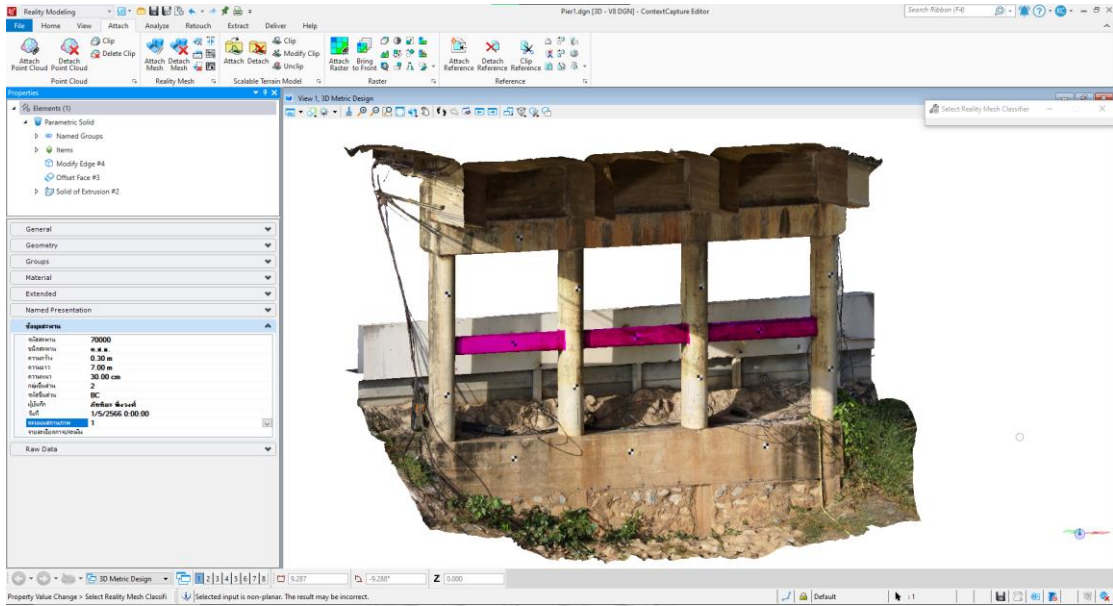
โครงสร้างสะพานส่วนล่างของสะพานธนรัชต์ หลักๆจะประกอบไปด้วยตอม่อ จำนวน 2 ชนิด โดยการแบ่งจะแบ่งตามความสำคัญของชิ้นส่วนโครงสร้างได้แก่ ฐานราก กำแพงตอม่อ ค้ำยันตอม่อ และคานรัดหัวเสา



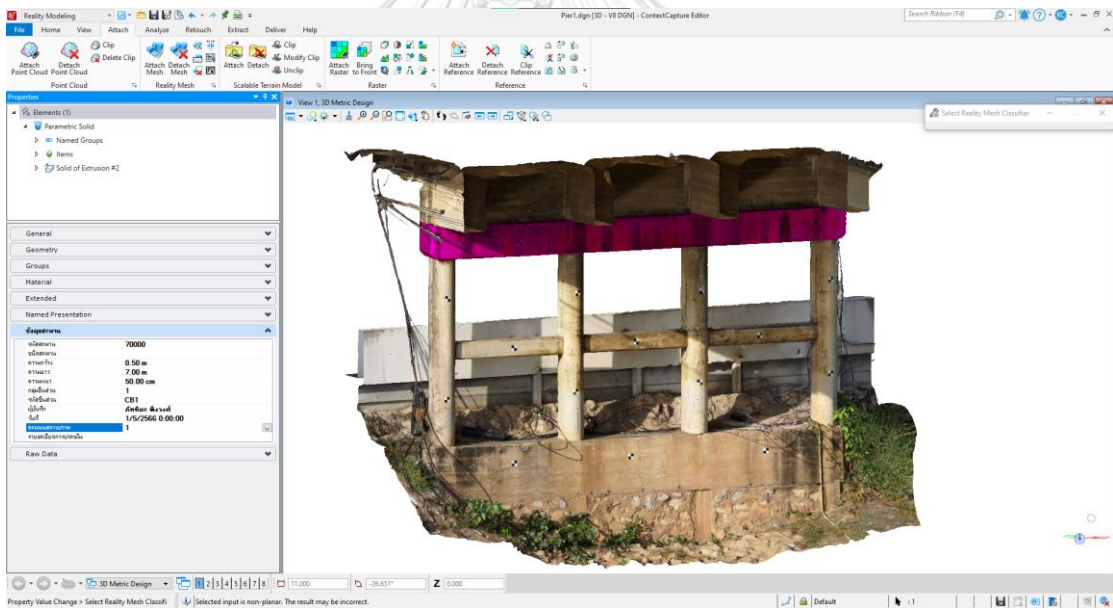
รูปที่ 41 การแบ่งชิ้นส่วนตอม่อของสะพานบนโปรแกรม Context Editor



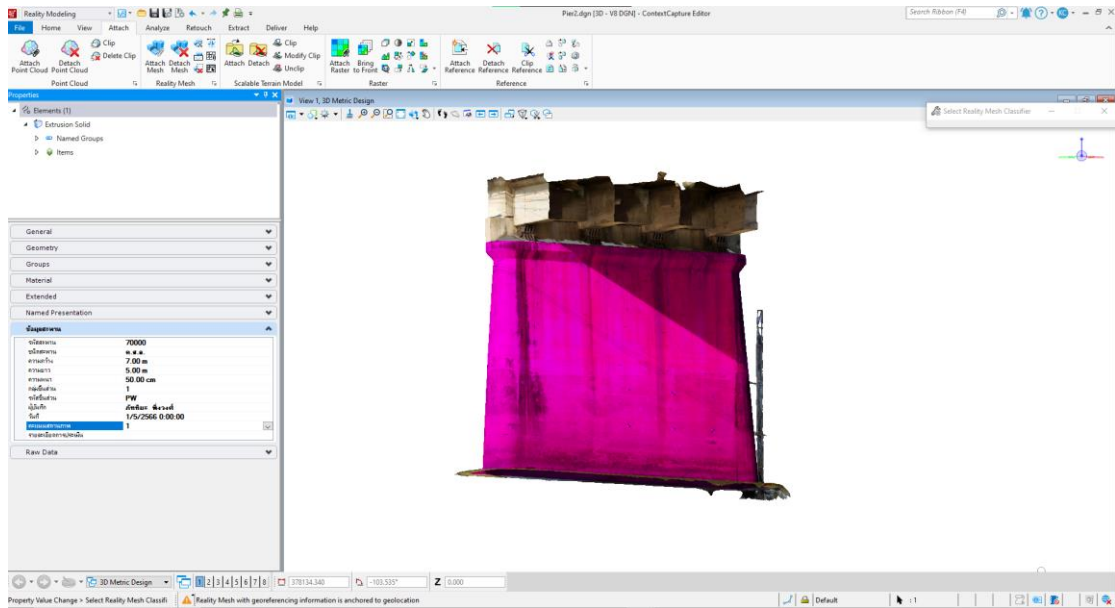
รูปที่ 42 การแบ่งชิ้นส่วนฐานรากสะพานบนโปรแกรม Context Editor



รูปที่ 43 การแบ่งชิ้นส่วนค้ำยันตอม่อของสะพานบนโปรแกรม Context Editor



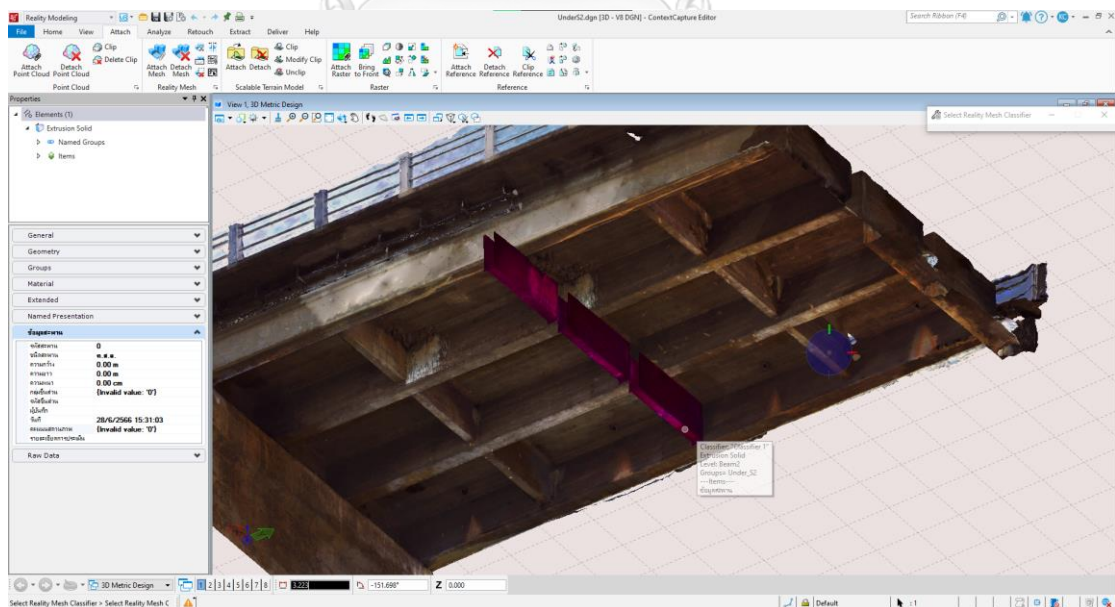
รูปที่ 44 การแบ่งชิ้นส่วนคานรัดหัวเสาของสะพานบนโปรแกรม Context Editor



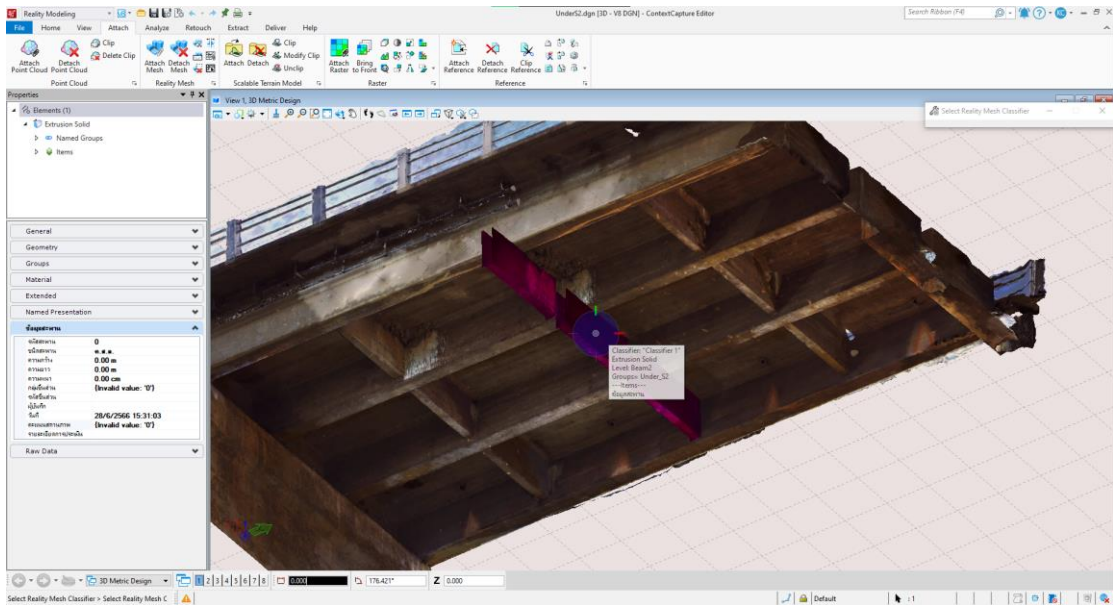
รูปที่ 45 การแบ่งชิ้นส่วนกำแพงต่อมอของสะพานบนโปรแกรม Context Editor

4.2.3 การแบ่งชิ้นส่วนโครงสร้างสะพานส่วนท้องสะพาน

ส่วนท้องพื้นของสะพานชนิดประปรกประกอบด้วยคาน 2 ชนิด ได้แก่คานตามยาว และ ค้ำยันตามยาว



รูปที่ 46 การแบ่งชิ้นส่วนค้ำยันตามยาวของสะพานบนโปรแกรม Context Editor






รูปที่ 47 การแบ่งชิ้นส่วนคานตามยาวของสะพานบนโปรแกรม Context Editor





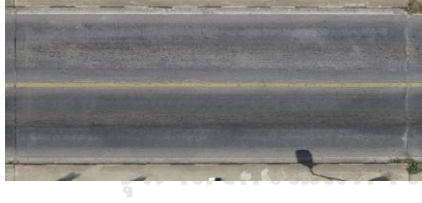
4.3 การประเมินสถานภาพของสะพาน

4.3.1 การประเมินสถานภาพสะพาน ชิ้นส่วนกลุ่มที่ 1

4.3.1.1 การประเมินสภาพชิ้นส่วนพื้นสะพาน

ตารางที่ 20 การตรวจสอบสภาพในส่วนของพื้นสะพาน

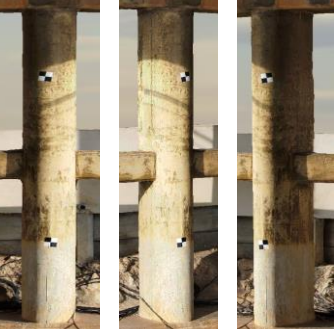
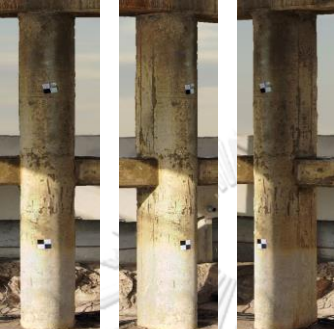

รหัสชิ้นส่วน	ภาพชิ้นส่วน	รายละเอียด
S1		ชิ้นส่วนพื้น S1 พื้นที่ 70 ตร.ม. อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ผิวทางจราจรหลุดร่อนเล็กน้อย โครงสร้างไม่พบความเสียหาย
S2		ชิ้นส่วนพื้น S2 พื้นที่ 90 ตร.ม. อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ผิวทางจราจรหลุดร่อนเล็กน้อย โครงสร้างไม่พบความเสียหาย
S3		ชิ้นส่วนพื้น S3 พื้นที่ 175 ตร.ม. อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ผิวทางจราจรหลุดร่อนเล็กน้อย โครงสร้างไม่พบความเสียหาย

S4		<p>ชั้นส่วนพื้น S4 พื้นที่ 175 ตร.ม. อยู่ในสภาพสมบูรณ์ 90% ผิวทางจราจรหลุดร่อนเล็กน้อย โครงสร้างไม่พบความเสียหาย</p>
S5		<p>ชั้นส่วนพื้น S5 พื้นที่ 175 ตร.ม. อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ผิวทางจราจรหลุดร่อนเล็กน้อย โครงสร้างไม่พบความเสียหาย</p>
S6		<p>ชั้นส่วนพื้น S6 พื้นที่ 175 ตร.ม. อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ผิวทางจราจรหลุดร่อนเล็กน้อย โครงสร้างไม่พบความเสียหาย</p>
S7		<p>ชั้นส่วนพื้น S7 พื้นที่ 90 ตร.ม. อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ผิวทางจราจรหลุดร่อนเล็กน้อย โครงสร้างไม่พบความเสียหาย</p>
S8		<p>ชั้นส่วนพื้น S8 พื้นที่ 70 ตร.ม. อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ผิวทางจราจรหลุดร่อนเล็กน้อย โครงสร้างไม่พบความเสียหาย</p>

4.3.1.2 การประเมินสภาพส่วนเสาดอม่อ

ตารางที่ 21 การตรวจสอบสภาพในส่วนของเสาดอม่อ


รหัสชิ้นส่วน	ภาพชิ้นส่วน	รายละเอียด
PR1		<p>เสาดอม่อ ค.ส.ล. จำนวน 1 ต้น คอนกรีตอยู่ในสภาพสมบูรณ์ มีคราบสกปรกเล็กน้อย</p>




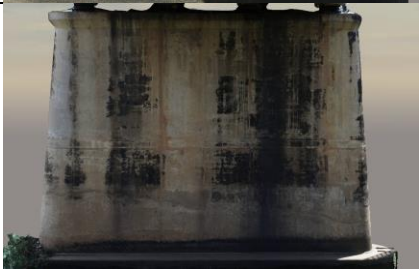
PR2		<p>เสาตอม่อ ค.ส.ล. จำนวน 1 ต้น คอนกรีตอยู่ในสภาพสมบูรณ์ มีคราบสกปรกเล็กน้อย</p>
PR3		<p>เสาตอม่อ ค.ส.ล. จำนวน 1 ต้น คอนกรีตอยู่ในสภาพสมบูรณ์ มีคราบสกปรกเล็กน้อย</p>
PR4		<p>เสาตอม่อ ค.ส.ล. จำนวน 1 ต้น คอนกรีตอยู่ในสภาพสมบูรณ์ มีคราบสกปรกเล็กน้อย</p>

4.3.1.3 การประเมินสภาพส่วนกำแพงตอม่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 22 การตรวจสอบสภาพในส่วนของกำแพงตอม่อ

รหัสชิ้นส่วน	ภาพชิ้นส่วน	รายละเอียด
PW1		<p>เสากำแพงตอม่อ PW1 ชนิด ค.ส.ล. จำนวน 1 ต้น พื้นที่ 52 ตร.ม. คอนกรีตโครงสร้างอยู่ในสภาพ สมบูรณ์ มีผิวหลุดร่อนเล็กน้อย ประมาณ 4 ตร.ม. ไม่เห็นเหล็กเสริม</p>

		
PW2		<p>เสากำแพงต่อม่อ PW2 ชนิด ค.ส.ล. จำนวน 1 ต้น พื้นที่ 52 ตร.ม. คอนกรีตโครงสร้างอยู่ในสภาพ สมบูรณ์ มีผิวหลุดร่อนเล็กน้อย ประมาณ 28 ตร.ม. ไม่เห็นเหล็ก เสริม</p>
PW3		<p>เสากำแพงต่อม่อ PW3 ชนิด ค.ส.ล. จำนวน 1 ต้น พื้นที่ 52 ตร.ม. คอนกรีตโครงสร้างอยู่ในสภาพ สมบูรณ์ มีผิวหลุดร่อนเล็กน้อย ประมาณ 22 ตร.ม. ไม่เห็นเหล็ก เสริม</p>
PW4		<p>เสากำแพงต่อม่อ PW4 ชนิด ค.ส.ล. จำนวน 1 ต้น พื้นที่ 52 ตร.ม. คอนกรีตโครงสร้างอยู่ในสภาพ สมบูรณ์</p>

		มีผิวหลุดร่อนเล็กน้อย ประมาณ 18 ตร.ม. ไม่เห็นเหล็ก เสริม
PW5		เสาก้ำแพงต่อม่อ PW5 ชนิด ค.ส.ล. จำนวน 1 ต้น พื้นที่ 52 ตร.ม. คอนกรีตโครงสร้างอยู่ในสภาพ สมบูรณ์ มีผิวหลุดร่อนเล็กน้อย ประมาณ 5 ตร.ม. ไม่เห็นเหล็กเสริม

4.3.1.4 การประเมินสภาพส่วนคานรัดหัวเสา








ตารางที่ 23 การตรวจสอบสภาพในส่วนของคานรัดหัวเสา

รหัสชิ้นส่วน	ภาพชิ้นส่วน	รายละเอียด
CB1		มีชิ้นส่วนคอนกรีตหลุดร่อน แต่ไม่พบเหล็กเสริม ขนาด 0.193 ตร.ม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 54.46 ซม.

4.3.1.5 การประเมินสภาพส่วนคานตามยาว

ตารางที่ 24 การตรวจสอบสภาพในส่วนของคานตามยาว

รหัสชิ้นส่วน	ภาพชิ้นส่วน	รายละเอียด
SPAN1 GD1		ชิ้นส่วนคานตามยาว GD1 มีความยาว 10 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์ มีคราบเกลือเล็กน้อย
SPAN1		ชิ้นส่วนคานตามยาว GD2


GD2		มีความยาว 10 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์
SPAN1 GD3		ชั้นส่วนคานตามยาว GD3 มีความยาว 10 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์ มีคราบเกลือ ขนาดรวม 1.57 ตร.ม.
SPAN1 GD4		ชั้นส่วนคานตามยาว GD4 มีความยาว 10 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์
SPAN2 GD5		ชั้นส่วนคานตามยาว GD5 มีความยาว 10 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์
SPAN3 GD6		ชั้นส่วนคานตามยาว GD6 มีความยาว 10 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์
SPAN4 GD7		ชั้นส่วนคานตามยาว GD7 มีความยาว 10 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์
SPAN5 GD8		ชั้นส่วนคานตามยาว GD8 มีความยาว 10 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์

4.3.2 การประเมินสถานภาพสะพาน ชั้นส่วนกลุ่มที่ 2

4.3.2.1 การประเมินสภาพส่วนฐานราก








ตารางที่ 25 การตรวจสอบสภาพในส่วนของฐานราก

รหัสชั้นส่วน	ภาพชั้นส่วน	รายละเอียด
--------------	-------------	------------

FT1		<p>ชั้นส่วนฐานราก ค.ส.ล. ขนาด 0.8x1x8 ม. มีชั้นส่วนคอนกรีตหตุร่อน แต่ไม่เห็นเหล็กเสริม ขนาด 0.021 ตร.ม. มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.01 ซม.</p>
-----	--	---


4.3.2.2 การประเมินสภาพส่วนค้ำยันตามยาว

ตารางที่ 26 การตรวจสอบสภาพในส่วนของค้ำยันตามยาว

รหัสชั้นส่วน	ภาพชั้นส่วน	รายละเอียด
SPAN1 DP1		<p>ชั้นส่วนค้ำยันตามยาว DP1 มีความยาว 7 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์</p>
SPAN1 DP2		<p>ชั้นส่วนค้ำยันตามยาว DP2 มีความยาว 7 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์</p>
SPAN1 DP3		<p>ชั้นส่วนค้ำยันตามยาว DP3 มีความยาว 7 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์</p>
SPAN2 DP4		<p>ชั้นส่วนค้ำยันตามยาว DP4 มีความยาว 7 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์</p>
SPAN2 DP5		<p>ชั้นส่วนค้ำยันตามยาว DP5 มีความยาว 7 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์</p>
SPAN2 DP6		<p>ชั้นส่วนค้ำยันตามยาว DP6 มีความยาว 7 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์</p>
DP7		<p>ชั้นส่วนค้ำยันตามยาว DP7 มีความยาว 7 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์</p>

4.3.2.3 การประเมินสภาพส่วนค้ำยันตอม่อ

ตารางที่ 27 การตรวจสอบสภาพในส่วนของค้ำยันตอม่อ

รหัสชิ้นส่วน	ภาพชิ้นส่วน	รายละเอียด
BC1		ชิ้นส่วนค้ำยันตอม่อ BC1 มีความยาว 7 เมตร โครงสร้างอยู่ในสภาพสมบูรณ์







4.3.3 การประเมินสถานภาพสะพาน ชิ้นส่วนกลุ่มที่ 3

4.3.3.1 การประเมินสภาพส่วนรอยต่อขยาย

รอยต่อส่วนขยายของสะพานธนรัชต์เป็นรอยต่อขยายประเภทรอยต่อแบบปิดโดยการกด (Compression Seal) [15] ซึ่งสามารถรองรับการขยายตัวได้มากที่สุดที่ 5 ซม.

ตารางที่ 28 การตรวจสอบสภาพในส่วนของรอยต่อขยาย

รหัสชิ้นส่วน	ภาพชิ้นส่วน	รายละเอียด
EJ1		รอยต่อขยาย EJ1 Joint Filler หลุดร่อน มีรอยแยก ขนาดประมาณ 1.8-2.0 ซม. มีเศษดินอุดตัน
EJ2		รอยต่อขยาย EJ2 Joint Filler หลุดร่อนเล็กน้อย รอยต่ออยู่ในสภาพสมบูรณ์ มีเศษดินอุดตันรอยต่อ
EJ3		รอยต่อขยาย EJ3 Joint Filler หลุดร่อนเล็กน้อย รอยต่ออยู่ในสภาพสมบูรณ์ มีเศษดินอุดตันรอยต่อ

EJ4		รอยต่อขยาย EJ4 Joint Filler หลุดร่อนเล็กน้อย รอยต่อมีการหลุดร่อนของผิวทาง มีเศษดินอุดตันรอยต่อ
EJ5		รอยต่อขยาย EJ5 Joint Filler หลุดร่อน รอยต่อมีการหลุดร่อนของผิวทาง มีเศษดินอุดตันรอยต่อ
EJ6		รอยต่อขยาย EJ6 Joint Filler หลุดร่อน รอยต่อมีการหลุดร่อนของผิวทาง มีเศษดินอุดตันรอยต่อ
EJ7		รอยต่อขยาย EJ7 Joint Filler หลุดร่อน รอยต่อมีการหลุดร่อนของผิวทาง มีเศษดินอุดตันรอยต่อ
EJ8		รอยต่อขยาย EJ8 Joint Filler หลุดร่อน รอยต่อมีการหลุดร่อนของผิวทาง มีเศษดินอุดตันรอยต่อ
EJ9		รอยต่อขยาย EJ9 Joint Filler หลุดร่อน รอยต่อมีการหลุดร่อนของผิวทาง อย่างชัดเจน มีเศษดินอุดตันรอยต่อ

4.3.3.2 การประเมินสภาพส่วนทางเท้า

ตารางที่ 29 การตรวจสอบสภาพในส่วนของทางเท้า

รหัสชิ้นส่วน	ภาพชิ้นส่วน	รายละเอียด
FT-L1		ทางเท้าส่วน FT-L1

		ขนาด 15 ตร.ม. อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ใช้งานได้ตามปกติ
FT-L2		ทางเท้าส่วน FT-L2 ขนาด 22.5 ตร.ม. มีการสีกร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย ใช้งานได้ตามปกติ
FT-L3		ทางเท้าส่วน FT-L3 ขนาด 37.5 ตร.ม. มีการสีกร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย ใช้งานได้ตามปกติ
FT-L4		ทางเท้าส่วน FT-L4 ขนาด 37.5 ตร.ม. มีการสีกร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย ใช้งานได้ตามปกติ
FT-L5		ทางเท้าส่วน FT-L5 ขนาด 37.5 ตร.ม. มีการสีกร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย ใช้งานได้ตามปกติ
FT-L6		ทางเท้าส่วน FT-L6 ขนาด 37.5 ตร.ม. มีการสีกร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย ใช้งานได้ตามปกติ
FT-L7		ทางเท้าส่วน FT-L7 ขนาด 22.5 ตร.ม. มีการสีกร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย ใช้งานได้ตามปกติ

FT-L8		<p>ทางเท้าส่วน FT-L8</p> <p>ขนาด 15 ตร.ม.</p> <p>มีการสีกร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย</p> <p>ใช้งานได้ตามปกติ</p>
FT-R1		<p>ทางเท้าส่วน FT-R1</p> <p>ขนาด 15 ตร.ม.</p> <p>มีการกะเทาะของคอนกรีตเล็กน้อย</p> <p>บริเวณขอบทางเท้า</p> <p>ผิวบนอยู่ในสภาพสมบูรณ์</p> <p>ใช้งานได้ตามปกติ</p>
FT-R2		<p>ทางเท้าส่วน FT-R2</p> <p>ขนาด 22.5 ตร.ม.</p> <p>มีการสีกร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย</p> <p>ใช้งานได้ตามปกติ</p>
FT-R3		<p>ทางเท้าส่วน FT-R3</p> <p>ขนาด 37.5 ตร.ม.</p> <p>มีการหลุดร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย</p> <p>จนเห็นเหล็กเสริม</p> <p>ขนาด 0.08 ตร.ม.</p> <p>บริเวณขอบทางเท้า</p> <p>ผิวทางด้านบนใช้งานได้ตามปกติ</p>
FT-R4		<p>ทางเท้าส่วน FT-R4</p> <p>ขนาด 37.5 ตร.ม.</p> <p>มีการสีกร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย</p> <p>ใช้งานได้ตามปกติ</p>
FT-R5		<p>ทางเท้าส่วน FT-R5</p> <p>ขนาด 37.5 ตร.ม.</p> <p>มีการหลุดร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย</p> <p>ไม่เห็นเหล็กเสริม</p> <p>ใช้งานได้ตามปกติ</p>

FT-R6		ทางเท้าส่วน FT-R6 ขนาด 37.5 ตร.ม. อยู่ในสภาพสมบูรณ์ ใช้งานได้ตามปกติ
FT-R7		ทางเท้าส่วน FT-R7 ขนาด 22.5 ตร.ม. มีการสึกกร่อนของคอนกรีตเล็กน้อย ใช้งานได้ตามปกติ
FT-R8		ทางเท้าส่วน FT-R8 ขนาด 15 ตร.ม. มีการหลุดร่อนของคอนกรีต ขนาด 0.183 ตร.ม. และ 0.117 ตร. ม. แต่ไม่เห็นเหล็กเสริม ใช้งานได้ตามปกติ

4.4 การคำนวณคะแนนสถานภาพของสะพาน

4.4.1 คะแนนสถานภาพของชิ้นส่วน

4.4.1.1 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนพื้นสะพาน

ตารางที่ 30 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนพื้นสะพาน

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
S1	100	-	-	-
S2	100	-	-	-
S3	100	-	-	-
S4	90	10	-	-
S5	100	-	-	-
S6	100	-	-	-
S7	100	-	-	-
S8	100	-	-	-
Overall	98.75	1.25	-	-

4.4.1.2 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนต่อม่อ

ตารางที่ 31 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนต่อม่อ

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
PR1	100	-	-	-
PR2	100	-	-	-
PR3	100	-	-	-
PR4	100	-	-	-
Overall	100	-	-	-

4.4.1.3 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนกำแพงต่อม่อ

ตารางที่ 32 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนกำแพงต่อม่อ

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
PW1	92	8	-	-
PW2	46	54	-	-
PW3	57	43	-	-
PW4	65	35	-	-
PW5	90	10	-	-
Overall	70	30	-	-

4.4.1.4 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนคานรัดหัวเสา

ตารางที่ 33 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนคานรัดหัวเสา

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
CB1	90	10	-	-
Overall	90	10	-	-

4.4.1.5 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนคานตามยาว

ตารางที่ 34 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนคานตามยาว

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
GD1	100	-	-	-
GD2	100	-	-	-
GD3	90	10	-	-
GD4	100	-	-	-
GD5	100	-	-	-

GD6	100	-	-	-
GD7	100	-	-	-
GD8	100	-	-	-
Overall	98.75	1.25	-	-

4.4.1.6 คะแนนสถานภาพขั้นพื้นฐานราก

ตารางที่ 35 คะแนนสถานภาพขั้นพื้นฐานราก

ขั้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
FT1	95	5	-	-
Overall	95	5	-	-

4.4.1.7 คะแนนสถานภาพขั้นส่วนค้ำยันตามยาว

ตารางที่ 36 คะแนนสถานภาพขั้นส่วนค้ำยันตามยาว

ขั้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
DP1	100	-	-	-
DP2	100	-	-	-
DP3	100	-	-	-
DP4	100	-	-	-
DP5	100	-	-	-
DP6	100	-	-	-
DP7	100	-	-	-
Overall	100	-	-	-

4.4.1.8 คะแนนสถานภาพขั้นส่วนค้ำยันตอม่อ

ตารางที่ 37 คะแนนสถานภาพขั้นส่วนค้ำยันตอม่อ

ขั้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
BC1	100	-	-	-
Overall	100	-	-	-

4.4.1.9 คะแนนสถานภาพขั้นส่วนรอยต่อเพื่อขยาย

ตารางที่ 38 คะแนนสถานภาพขั้นส่วนรอยต่อเพื่อขยาย

ขั้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
EJ1	20	30	50	-
EJ2	50	50	-	-

EJ3	80	20	-	-
EJ4	60	40	-	-
EJ5	10	60	30	-
EJ6	20	40	40	-
EJ7	10	40	50	-
EJ8	65	35	-	-
EJ9	-	40	60	-
Overall	<u>35</u>	<u>39.45</u>	<u>25.55</u>	-

4.4.1.10 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนทางเท้า

ตารางที่ 39 คะแนนสถานภาพชิ้นส่วนทางเท้า

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
FP-L1	100	-	-	-
FP-L2	95	5	-	-
FP-L3	90	10	-	-
FP-L4	90	10	-	-
FP-L5	100	-	-	-
FP-L6	95	5	-	-
FP-L7	95	5	-	-
FP-L8	95	5	-	-
FP-R1	85	10	5	-
FP-R2	90	10	-	-
FP-R3	88	5	-	3
FP-R4	95	5	-	-
FP-R5	95	5	-	-
FP-R6	100	-	-	-
FP-R7	95	5	-	-
FP-R8	85	15	-	-
Overall	<u>87.125</u>	<u>11.875</u>	<u>0.625</u>	<u>0.375</u>

4.4.2 การคำนวณคะแนนสถานภาพโดยรวมและดัชนีการประเมินสภาพสะพาน

หลังจากที่ได้คะแนนสถานภาพโดยรวมของแต่ละชิ้นส่วนแล้ว จะนำมาสู่การคำนวณคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักโดยมีตัวคูณชิ้นส่วนตามความสำคัญของโครงสร้างนั้นๆ

ตารางที่ 40 ตารางสรุปคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนัก

กลุ่ม ชิ้นส่วน	ชิ้นส่วน	รหัส	CS1	CS2	CS3	CS4	ตัวคูณ ชิ้นส่วน	คะแนน สถานภาพแบบ ถ่วงน้ำหนัก
	ตัวคูณคะแนนน้ำหนัก							
1	ส่วนพื้นสะพาน	S	98.75	1.25	-	-	11	1155
	คานตามยาว	GD	98.75	1.25	-	-	11	1155
	เสาตอม่อ	PR	100	-	-	-	11	1100
	คานรัดหัวเสา	CB	90	10			11	1540
	กำแพงตอม่อ	PW	70	30			11	2420
2	ฐานราก	FT	95	5	-	-	6	720
	ค้ำยันตามยาว	DP	100	-	-	-	6	600
	ค้ำยันตอม่อ	BC	100	-	-	-	6	600
3	รอยต่อเพื่อขยาย	EJ	35	39.45	25.55	-	3	2613
	ทางเท้า	FP	87.125	11.875	0.625	0.375	3	542.625
รวมคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนัก								157.54

นำคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักมาคำนวณดัชนีการประเมินสภาพ ตามตารางที่ 7 โดยสถานภาพสะพานแบบถ่วงน้ำหนัก อยู่ในช่วง 0-160

$$\text{ดังนั้น BCI จะมีค่า} = (WS-100)/3$$

$$= 19.18 \text{ อยู่ในเกณฑ์ } \underline{\text{ดีมาก}}$$

4.5 การประเมินสถานภาพของสะพานด้วยวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม

ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบสภาพของสะพานด้วยสายตา ด้วยวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม กล่าวคือให้ผู้สำรวจเดินตรวจสอบตามโครงสร้างสำคัญ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาเปรียบเทียบกับผลจากการประเมินจากแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้รูปแบบการประเมินแบบถ่วงน้ำหนัก

4.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างส่วนบนของสะพานด้วยวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม

โครงสร้างส่วนบนของสะพานประกอบไปทาง พื้นสะพาน รอยต่อส่วนขยาย และทางเท้า ใช้ผู้สำรวจ จำนวน 4 นาย เพื่อประเมิน เก็บภาพและบันทึกความเสียหาย เพื่อประเมินผลออกมาเป็นความเสียหายตามตารางคะแนนสถานภาพ โดยแบ่งการสำรวจเป็น 2 ห้วง ได้แก่ห้วงกลางวันและห้วงกลางคืน

ในห้วงกลางวัน ดำเนินสำรวจความเสียหายขั้นต้นและบันทึกความเสียหายบริเวณทางเท้า แต่เนื่องด้วยการจราจรที่หนาแน่น ทำให้ไม่สามารถบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อส่วนขยายและส่วนพื้นสะพานได้ จึงต้องมาดำเนินการต่อในห้วงกลางคืน เวลา 00.00-02.00 ที่การจราจรเบาบางลง



รูปที่ 48 การตรวจสอบพื้นสะพานในเวลากลางวัน



รูปที่ 49 การตรวจสอบทางเท้าในเวลากลางวัน



รูปที่ 50 การตรวจสอบในเวลากลางคืน

ตารางที่ 41 คะแนนสถานสภาพชิ้นส่วนพื้นสะพานจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
S1	100	-	-	-
S2	100	-	-	-
S3	100	-	-	-
S4	90	10	-	-
S5	100	-	-	-
S6	100	-	-	-
S7	100	-	-	-
S8	100	-	-	-
Overall	98.75	1.25	-	-

ตารางที่ 42 คะแนนสถานสภาพชิ้นส่วนรอยต่อส่วนขยายจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
EJ1	10	40	50	-
EJ2	80	20	-	-
EJ3	60	40	-	-
EJ4	70	30	-	-
EJ5	30	70	-	-
EJ6	40	50	10	-

EJ7	40	20	40	-
EJ8	90	10	-	-
EJ9	40	60	-	-
Overall	<u>51.11</u>	<u>37.78</u>	<u>11.11</u>	-

ตารางที่ 43 คะแนนสถานสภาพขึ้นส่วนทางเท้าจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ขึ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
FP-L1	95	5	-	-
FP-L2	95	5	-	-
FP-L3	95	5	-	-
FP-L4	95	5	-	-
FP-L5	100	-	-	-
FP-L6	95	5	-	-
FP-L7	95	5	-	-
FP-L8	95	5	-	-
FP-R1	-	-	-	100
FP-R2	100	-	-	-
FP-R3	90	10	-	-
FP-R4	100	-	-	-
FP-R5	100	-	-	-
FP-R6	100	-	-	-
FP-R7	95	5	-	-
FP-R8	-	-	-	100
Overall	<u>84.375</u>	<u>3.125</u>	-	<u>12.5</u>

4.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างส่วนล่างของสะพานด้วยวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม

โครงสร้างส่วนล่างของสะพาน ประกอบไปด้วย ส่วนตอม่อ ค้ำยันตอม่อ คานรัดหัวเสา ฐานราก ส่วนท้องพื้นของสะพาน ที่ประกอบด้วยคานตามยาว และค้ำยันตามยาว เนื่องด้วยข้อจำกัดของการตรวจสอบแบบดั้งเดิม เช่น ตอม่อริมตลิ่งต้องใช้บันไดและการปีนของผู้สำรวจ เพื่อเข้าถึงจุดที่ตรวจสอบได้ยาก ตอม่อกลางน้ำ ผู้วิจัยต้องเช่าเรือเหมาลำเพื่อสำรวจตอม่อกลางน้ำ ส่วนท้องพื้น

สะพาน สามารถตรวจสอบเพียงได้แค่ที่ระยะมองเห็นเท่านั้น เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือขนาดใหญ่เช่น รถกระเช้าเพื่อเข้าถึงจุดอับดังกล่าว



รูปที่ 51 การตรวจสอบตอม่อริมตลิ่ง



รูปที่ 52 การตรวจสอบท้องพื้นสะพาน



รูปที่ 53 การเข้าเรือเพื่อตรวจสอบตอม่อกลางน้ำ

ตารางที่ 44 คะแนนสถานสภาพชิ้นส่วนตอม่อจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
PR1	100	-	-	-
PR2	100	-	-	-
PR3	100	-	-	-
PR4	100	-	-	-
Overall	100	-	-	-

ตารางที่ 45 คะแนนสถานสภาพชิ้นส่วนคานรัดหัวเสาจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
CB1	90	-	10	-
Overall	90	-	10	-

ตารางที่ 46 คะแนนสถานสภาพชิ้นส่วนค้ำยันตอม่อจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ชิ้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
BC1	100	-	-	-
Overall	100	-	-	-

ตารางที่ 47 คะแนนสถานภาพขั้นพื้นฐานรากจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ขั้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
FT1	95	5	-	-
Overall	95	5	-	-

ตารางที่ 48 คะแนนสถานภาพขั้นส่วนคานตามยาวจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ขั้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
GD1	100	-	-	-
GD2	100	-	-	-
GD3	100	-	-	-
GD4	100	-	-	-
GD5	100	-	-	-
GD6	100	-	-	-
GD7	100	-	-	-
GD8	100	-	-	-
Overall	100	-	-	-

ตารางที่ 49 คะแนนสถานภาพขั้นส่วนค้ำยันตามยาวจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ขั้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
DP1	100	-	-	-
DP2	100	-	-	-
DP3	100	-	-	-
DP4	100	-	-	-
DP5	100	-	-	-
DP6	100	-	-	-
DP7	100	-	-	-
Overall	100	-	-	-

ตารางที่ 50 คะแนนสถานภาพขั้นส่วนกำแพงต่อม่อจากการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ขั้นส่วน	CS1	CS2	CS3	CS4
----------	-----	-----	-----	-----

PW1	90	10	-	-
PW2	65	30	5	-
Overall	77.5	20	2.5	-

4.5.3 การคำนวณคะแนนสถานภาพโดยรวมและดัชนีการประเมินสภาพสะพานด้วยวิธีตรวจสอบแบบดั้งเดิม

หลังจากที่ได้คะแนนสถานภาพโดยรวมของแต่ละชิ้นส่วนแล้ว จะนำมาสู่การคำนวณคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักโดยมีตัวคูณชิ้นส่วนตามความสำคัญของโครงสร้างนั้นๆ เหมือนกับการประเมินจากแบบจำลอง

ตารางที่ 51 ตารางสรุปคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักจากการตรวจสอบแบบดั้งเดิม

กลุ่ม	ชิ้นส่วน	รหัส	CS1	CS2	CS3	CS4	ตัวคูณ	คะแนน
1	ส่วนพื้นสะพาน	S	98.75	1.25	-	-	11	1155
	คานตามยาว	GD	100	-	-	-	11	1100
	เสาตอม่อ	PR	100	-	-	-	11	1100
	คานรัดหัวเสา	CB	90	-	10	-	11	3740
	กำแพงตอม่อ	PW	77.5	20	2.5	-	11	2640
2	ฐานราก	FT	95	5	-	-	6	720
	ค้ำยันตามยาว	DP	100	-	-	-	6	600
	ค้ำยันตอม่อ	BC	100	-	-	-	6	600
3	รอยต่อเพื่อขยาย	EJ	51.121	37.78	11.11	-	3	1553.313
	ทางเท้า	FP	84.375	3.125	-	12.5	3	2175
รวมคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนัก								194.725

นำคะแนนสถานภาพแบบถ่วงน้ำหนักมาคำนวณดัชนีการประเมินสภาพ ตามตารางที่ 7 โดยสถานภาพสะพานแบบถ่วงน้ำหนัก อยู่ในช่วง 160-500

$$\text{ดังนั้น BCI จะมีค่า} = (WS+180)/17$$

$$= 22.04 \text{ อยู่ในเกณฑ์ ดี}$$

4.6 ขีดความสามารถและข้อจำกัดของการประเมินสภาพจากแบบจำลอง

4.6.1 เวลาที่ใช้ในแต่ละกระบวนการ

4.6.1.1 การเก็บข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ

เนื่องด้วยข้อจำกัดของรูปแบบการบินและสภาพแวดล้อมต่างๆซึ่งส่งผลต่อการบินเก็บข้อมูล เช่น

1. ส่วนต่อม่อของสะพาน ใช้การบินด้วยมือซึ่งต้องอาศัยความชำนาญของผู้ใช้อากาศยานไร้คนขับในการควบคุม และบังคับ รวมไปถึงมุมอับสายตา ด้านหลังของต่อม่อ ซึ่งต้องใช้ผู้ช่วยในการบอกตำแหน่ง รวมถึงอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างบิน



รูปที่ 54 การบินสำรวจต่อม่อบริเวณมุมอับสายตา

2. ส่วนท้องพื้นสะพาน ที่ต้องอาศัยแสงจากทางด้านทิศตะวันออกและตะวันตก เพื่อช่วยให้มองเห็น ดังนั้น ช่วงเวลาที่ใช้ดำเนินการเก็บข้อมูลควรจะต้องเป็นช่วงเช้าและเย็น เพื่อให้แสงอาทิตย์ช่วยส่องภายใต้ท้องสะพาน



รูปที่ 55 ภาพท้องฟ้าที่แสงส่องไม่ถึง

โดยสามารถสรุประยะเวลาที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 52 ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ

ชั้นส่วนโครงสร้าง	รูปแบบการบิน	จำนวน ชั้นส่วน	ระยะเวลาต่อ ชั้นส่วน(นาที)	รวมระยะเวลา (นาที)
โครงสร้างส่วนบน	อัตโนมัติ	1	20	20
ชั้นส่วนต่อม่อ	ควบคุมด้วยมือ	7	15	105
ชั้นส่วนท้องฟ้าที่แสงส่องไม่ถึง	ควบคุมด้วยมือ	8	10	80
รวมระยะเวลาที่ใช้ในการสำรวจ				205

4.6.1.2 การตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

การตรวจสอบแบบดั้งเดิมที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการ มีข้อจำกัดหลายขั้นตอน ตั้งแต่

1. บุคลากรที่ใช้ในการตรวจสอบ ซึ่งผู้ตรวจสอบต้องมีความรู้ ความเข้าใจในการประเมินพอสมควร เพื่อที่จะสามารถให้คะแนนสภาพแต่ละชั้นได้อย่างถูกต้อง และมีความอดทนต่อสภาพอากาศ
2. ความปลอดภัย เนื่องด้วยสะพานธรรค์เป็นเส้นทางหลักที่ใช้เดินทางเข้าตัวเมืองราชบุรี ทำให้การจราจรแทบจะหนาแน่นอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการตรวจสอบส่วนรอยต่อขยาย และพื้นสะพาน จึงไม่สามารถดำเนินการได้ในหัวกลางวัน อีกทั้งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ตรวจสอบได้

3. ข้อจำกัดในการเข้าถึงชิ้นส่วนต่างๆ เช่นตอม่อริมตลิ่งที่มีขนาดใหญ่และความสูง จึงทำให้ต้องใช้บันไดร่วมกับการปีนป่ายเพื่อไปวัดระยะความเสียหายของคอนกรีตที่เกิดขึ้น ตอม่อกลางน้ำ ที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพื่อเช่าเรือเหมาลำไปตรวจสอบตอม่อแต่ละต้นที่อยู่บริเวณกลางน้ำ และส่วนท้องพื้นสะพานที่ไม่สามารถสำรวจได้ หากไม่ใช้รถกระเช้าที่เป็นเครื่องมือพิเศษในการตรวจสอบ

ซึ่งสามารถสรุประยะเวลาสำหรับการตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 53 ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในตรวจสอบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

ชิ้นส่วนโครงสร้าง	จำนวนชิ้นส่วน	ระยะเวลาที่ใช้	หมายเหตุ
โครงสร้างส่วนบน (สะพาน+ทางเท้า)	1	180 นาที ในเวลากลางวัน 60 นาที ในเวลากลางคืน	การจราจรหนาแน่นในเวลากลางวัน ไม่สามารถสำรวจได้
ชิ้นส่วนตอม่อ	7	120 นาที	ต้องใช้เรือหรืออุปกรณ์พิเศษ เพื่อสำรวจ
ชิ้นส่วนท้องพื้นสะพาน	8	120 นาที	ต้องใช้เรือหรืออุปกรณ์พิเศษ เพื่อสำรวจ
รวมระยะเวลาสำรวจ		8 ชั่วโมง	การปฏิบัติงานจริงใช้เวลา 2 วัน

4.6.1.3 การประมวลผลข้อมูล

การประมวลผลข้อมูลจากการรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับนั้น จะใช้โปรแกรม Context Capture ในการประมวลผลเพื่อสร้างแบบจำลอง ซึ่งระยะเวลาขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัย โดยใช้หน่วยประมวลผล AMD Ryzen7 2700X,Ram 16 GB DDR4,VGA AMD Radeon RX6750XT ในการประมวลผล

ตารางที่ 54 ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ

ชิ้นส่วนโครงสร้าง	ระยะเวลาในการประมวลผล
โครงสร้างส่วนบน	11 นาที 17 วินาที
ชิ้นส่วนตอม่อและท้องพื้นสะพาน	23 นาที 22 วินาที
รวมระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผล	33 นาที 39 วินาที

4.6.1.4 การแบ่งชิ้นส่วนจากแบบจำลองเพื่อใช้ประเมินและบันทึกผล

การแบ่งชิ้นส่วนจากแบบจำลองเพื่อใช้บันทึกฐานข้อมูลของชิ้นส่วนนั้นๆ รวมถึงใช้ประเมินและบันทึกผลการประเมินลงไป จะใช้โปรแกรม Context Editor โดยหลักๆความเร็วจะอยู่ที่ความเชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือในการสร้างชิ้นส่วนของโปรแกรมดังกล่าว

4.6.2 ความสมบูรณ์ของข้อมูล

จากการบินสำรวจข้อมูลและการประมวลผลภาพถ่าย ที่มีข้อจำกัดทั้งในเรื่องการจราจรที่มีความแน่นหนาตลอดเวลา ส่วนท้องสะพานที่แสงไม่สามารถส่องเข้าถึง รวมไปถึงสิ่งกีดขวางบริเวณท้องสะพานที่อาจก่อให้เกิดอันตรายกับตัวอากาศยานไร้คนขับได้ ทำให้การรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ ยังมีข้อบกพร่อง

ตารางที่ 55 ความสมบูรณ์ในการรวบรวมและประมวลผลของข้อมูล

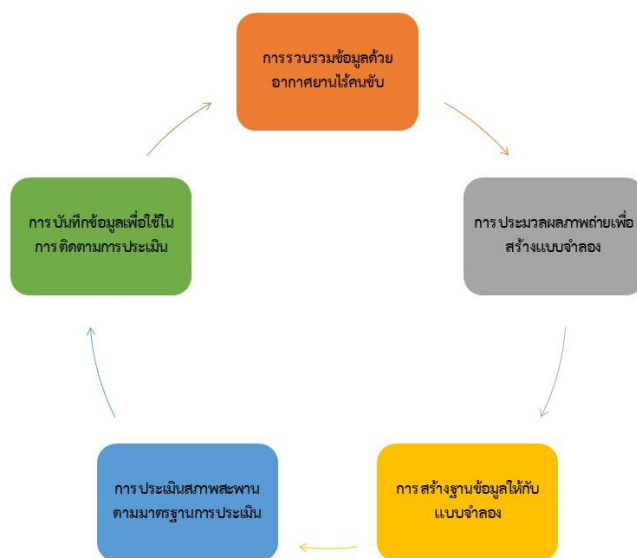
ชิ้นส่วน	คุณภาพของข้อมูลและการประมวลผล	หมายเหตุ
ส่วนบนของสะพาน	ครบถ้วน สมบูรณ์	
ส่วนต่อม่อ	ครบถ้วน สมบูรณ์	
ส่วนฐานราก	ไม่ครบถ้วน	เนื่องจากระดับน้ำขึ้นสูงเหนือฐานราก ทำให้ไม่สามารถสำรวจได้
แผ่นรองรับคาน	ไม่ครบถ้วน	เนื่องจากมุมในการถ่ายภาพของอากาศยานมีจำกัด ทำให้การประมวลผลภาพออกมาไม่สมบูรณ์ ไม่สามารถประเมินในรูปแบบเชิงตัวเลขได้
จุดรองรับ	ไม่ครบถ้วน	เนื่องจากมุมในการถ่ายภาพของอากาศยานมีจำกัด ทำให้การประมวลผลภาพออกมาไม่สมบูรณ์ ไม่สามารถประเมินในรูปแบบเชิงตัวเลขได้
ท้องสะพาน	ไม่ครบถ้วน	ท้องสะพานบางส่วนที่แสงไม่สามารถส่องถึงได้ ส่งผลให้การประมวลผลออกมาไม่สมบูรณ์ รวมถึงสิ่งกีดขวางบริเวณท้องพื้นสะพาน ทำให้มุมในการบันทึกข้อมูล มีจำกัด

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ มุ่งเน้นนำเสนอกระบวนการประยุกต์ใช้แบบจำลองแฝดดิจิทัลในการประเมินสภาพสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือทดแทนการตรวจสอบแบบดั้งเดิม โดยเริ่มจากกระบวนการรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ ที่ต้องมีการวางแผนการบินก่อนการออกรวบรวมข้อมูล เช่นการวางแผนการวางจุดควบคุมภาพถ่าย ให้ครอบคลุมพื้นที่ที่จะทำการบิน วางแผนลำดับเวลาในการบิน เช่นได้ต้องสะพานที่ต้องอาศัยแสงอาทิตย์ช่วงเช้าหรือเย็น เพื่อให้แสงส่องเข้าถึงใต้ท้องสะพาน รูปแบบการบินในแต่ละส่วนไม่ว่าจะเป็น การบินแบบอัตโนมัติสำหรับพื้นที่ส่วนบนของสะพาน หรือการบินแบบบังคับด้วยมือ สำหรับส่วนที่เหลือ กระบวนการถัดมาคือการประมวลผลภาพถ่ายด้วยโปรแกรม Context Capture ที่จะต้องใช้จุดควบคุมภาพถ่ายสำหรับส่วนบนของสะพาน โดยในส่วนที่เหลือจะใช้เป็นระบบอัตโนมัติตามค่าพื้นฐานของโปรแกรม เพื่อให้ได้แบบจำลองสามมิติที่มีลักษณะพื้นผิวเหมือนของจริง ถัดมาคือกระบวนการแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองเพื่อสร้างฐานข้อมูลของชิ้นส่วนนั้นๆ โดยข้อมูลพื้นฐานที่เราใส่ คือข้อมูลที่จะใช้เป็นพื้นฐานในการประเมินรวมถึงติดตามความเสียหายในอนาคต ถัดมาคือการประเมินสภาพสะพานตามมาตรฐานของการประเมิน โดยผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงข้อจำกัดของการประเมินตามมาตรฐานของกรมทางหลวงของประเทศไทย ซึ่งใช้คะแนน 1-5 ในการประเมินสภาพโดยรวมของตัวสะพาน ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว เราควรจะต้องใช้รูปแบบการประเมินที่มีความละเอียดมากกว่าเดิม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการประเมิน รวมไปถึงให้ข้อพิจารณาสำหรับลำดับความเร่งด่วนในการใช้งบประมาณในการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมสะพานให้กับผู้มีอำนาจ ผู้วิจัยจึงได้ใช้คู่มือการตรวจสอบสะพานจากประเทศออสเตรเลียมาประยุกต์ใช้กับการประเมินในครั้งนี้ พบว่าสะพานธนรัชต์อยู่ในสภาพที่ดี ขั้นตอนสุดท้ายคือการบันทึกการประเมินดังกล่าวลงในแบบจำลองที่มีฐานข้อมูลของสะพานอยู่เดิม เพื่อใช้ติดตามการประเมินตามวงรอบการตรวจสอบสะพาน



รูปที่ 56 วงรอบการตรวจสอบและประเมินสะพานจากการรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ

ผลการประเมินสะพานจากแบบจำลองเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ การตรวจสอบแบบดั้งเดิม จะสังเกตได้ว่า โครงสร้างส่วนใหญ่ได้ผลที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นส่วนของคานรัดหัวเสาและทางเท้า เนื่องจากการประเมินคานรัดหัวเสาจากแบบจำลอง ไม่สามารถสังเกตเห็นเหล็กเสริมที่ไหลออกมาจาก ผิวคอนกรีตที่หลุดร่อน ซึ่งสามารถสังเกตเห็นจากการตรวจสอบแบบดั้งเดิมได้ อีกส่วนหนึ่งคือทางเท้า ซึ่งมีจุดที่เกิดการแตกของคอนกรีตที่อาจทำให้เกิดอันตรายกับผู้ใช้ทางเท้าได้ แต่จากการประเมินด้วย แบบจำลองไม่สามารถสังเกตเห็นได้ เนื่องจากความสมบูรณ์ของชุดข้อมูลไม่เพียงพอ แต่ผลคะแนน สถานภาพโดยรวมของสะพานได้ผลออกมาใกล้เคียงกัน นั่นคือสะพานอยู่ในสภาพการใช้งานที่ดี

จากกระบวนการประเมินสะพานจากแบบจำลองดังกล่าวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้การ ตรวจสอบด้วยตาเปล่าที่เป็น การตรวจสอบขั้นต้นของวงรอบการตรวจสอบสะพานได้เป็นอย่างดี เนื่อง ด้วยการรวบรวมข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับจะช่วยลดข้อจำกัดต่างๆ เช่นการเข้าถึงจุดอับของพื้นที่ เช่นใต้ท้องสะพาน หรือหลีกเลี่ยงจุดที่การจราจรหนาแน่น เพื่อลดความเสี่ยงในการสำรวจ อีกทั้งตัว แบบจำลองที่มีฐานข้อมูลซึ่งสามารถย้อนดูบันทึกการสำรวจในครั้งก่อน รวมไปถึงติดตามความ เปลี่ยนแปลงของชิ้นส่วนที่ให้ความสำคัญได้ ลดความยุ่งยาก ซับซ้อนและเพิ่มความสะดวกในการ บริหารจัดการชุดข้อมูลโดยเฉพาะสะพานที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งรูปแบบการประเมินที่ใช้ตัวคุณ ความสำคัญของชิ้นส่วนโครงสร้าง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินสะพานให้มีประสิทธิภาพ มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะรูปแบบของคะแนนสถานภาพสะพานที่มีความละเอียดสูง ทำให้ผู้มีอำนาจ สามารถลำดับความสำคัญในการจัดสรรงบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ภาคผนวก
เกณฑ์การให้คะแนนสถานภาพของสะพาน

ชั้นส่วน	คะแนนสถานภาพ			
	CS1	CS2	CS3	CS4
1. โครงสร้างคอนกรีต (พื้น, คาน, คานตามยาว, ค้ำยันตามยาว)	ชั้นส่วนอยู่ในสภาพดี หรือมีรอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกเชิงโครงสร้าง ขนาดเล็กกว่า 0.1 มม.	ชั้นส่วนมีรอยแตกร้าวเล็กน้อย ขนาด 0.1-0.3 มม.	ชั้นส่วนมีรอยแตกชัดเจน ขนาด 0.3-0.7 มม. มีการหลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริม แต่เหล็กเสริมไม่เสียหาย	ชั้นส่วนมีรอยแตกชัดเจน ขนาดใหญ่กว่า 0.7 มม. มีการหลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริม มีการผุกร่อน
		พบรอยเกิดคราบขี้เกลือเล็กน้อย	พบรอยเกิดคราบขี้เกลือขนาดใหญ่	
2. ตอม่อคอนกรีต (เสาเข็ม, เสาตอม่อ, กำแพงตอม่อ)	ชั้นส่วนอยู่ในสภาพดี หรือมีรอยแตกที่ไม่ใช่รอยแตกเชิงโครงสร้าง ขนาดเล็กกว่า 0.1 มม.	ชั้นส่วนมีรอยแตกร้าวเล็กน้อย ขนาด 0.1-0.3 มม. หรือมีการหลุดร่อนเล็กน้อย ไม่พบเห็นเหล็กเสริม	ชั้นส่วนมีรอยแตกชัดเจน ขนาด 0.3-0.7 มม. มีการหลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริม มีการผุกร่อนของเหล็กเสริมเล็กน้อย	ชั้นส่วนมีรอยแตกชัดเจน ขนาดใหญ่กว่า 0.7 มม. มีการหลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริม มีการผุกร่อนจนทำให้สูญเสียหน้าตัด
	ผิวปูนฉาบ มีรอยแตกขนาดเล็ก ไม่เกิน 0.3 มม.	ผิวปูนฉาบมีรอยแตกขนาดกลาง 0.3-1 มม.	ผิวปูนฉาบ มีรอยแตกชัดเจน ขนาด 1-2 มม.	ผิวปูนฉาบ มีรอยแตกขนาดใหญ่กว่า 2 มม.
3. แผ่นรองพื้นสะพาน/จุดรองรับ	แผ่นรองพื้นสะพานอยู่ในสภาพดี	ฐานรองแผ่นพื้นสะพานมีรอยร้าวเล็กๆ หรือเกิดการผุกร่อนเล็กน้อย แต่ยังไม่ถึงขั้น	แผ่นพื้นสะพานเกิดการผุกร่อนตรงตำแหน่งรอยเชื่อม เริ่มเสียรูป	แผ่นพื้นสะพานชำรุดจนไม่สามารถใช้งานได้

		สามารถใช้งานได้ปกติ	สามารถใช้งานได้ปกติ	
4. รอยต่อขยายของสะพาน	อยู่ในสภาพสมบูรณ์ Joint Filler หลุดร่อนเล็กน้อย	อยู่ในสภาพสมบูรณ์ถึงพอใช้ Joint Filler เริ่มหลุดร่อนอย่างเห็นได้ชัด เริ่มพบรอยแตกตามแนวรอยต่อ	Joint Filler หลุดร่อน มีวัสดุอุดตันตามแนวรอยต่อ แนวรอยต่อเริ่มเสียรูป	สภาพชำรุดเสียหายมาก



บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. กรมทางหลวง, รายงานประจำปี 2564. 2564:
<http://www.doh.go.th/content/page/journals/190210>.
2. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพานโครงการศึกษาและพัฒนาระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน. 2555.
3. Pregolato, M., et al., *Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure*. Automation in Construction, 2022. 141: p. 104421.
4. Kaewunruen, S., et al. *Digital Twins for Managing Railway Bridge Maintenance, Resilience, and Climate Change Adaptation*. Sensors, 2023. 23, DOI: 10.3390/s23010252.
5. Australia, M.W., *Detailed Visual Bridge Inspection Guideline For Concrete And Steel Bridges*. 2017.
6. Futai, M.M., et al., *Challenges in the application of digital transformation to inspection and maintenance of bridges*. Structure and Infrastructure Engineering, 2022. 18(10-11): p. 1581-1600.
7. ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ(NECTEC) *DIGITAL TWIN* แบบจำลองเสมือนจริงจากระบบทางกายภาพ. 2022.
8. Honghong, S., et al., *Digital twin enhanced BIM to shape full life cycle digital transformation for bridge engineering*. Automation in Construction, 2023. 147: p. 104736.
9. Lin, K., et al., *Digital twin-based collapse fragility assessment of a long-span cable-stayed bridge under strong earthquakes*. Automation in Construction, 2021. 123: p. 103547.
10. Lu, R. and I. Brilakis, *Digital twinning of existing reinforced concrete bridges from labelled point clusters*. Automation in Construction, 2019. 105: p. 102837.
11. Kaewunruen, S., et al. *Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions*. Sustainability, 2021. 13, DOI: 10.3390/su13042051.
12. Mohammadi, M., et al., *Quality Evaluation of Digital Twins Generated Based on UAV Photogrammetry and TLS: Bridge Case Study*. Remote Sensing, 2021. 13: p. 3499.

13. 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.
14. Seo, J., L. Duque, and J. Wacker, *Drone-enabled bridge inspection methodology and application*. Automation in Construction, 2018. 94: p. 112-126.
15. กรมทางหลวง, คู่มือการตรวจสอบ วิเคราะห์ และประเมินกำลังรับน้ำหนักของสะพาน. 2549.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ภัททิยะ พึ่งวงศ์

วัน เดือน ปี เกิด

19 พฤษภาคม 2536

ที่อยู่ปัจจุบัน

7/2 ม.6 ต.วังจันทร์ อ.วังจันทร์ จ.ระยอง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY