# การตรวจสอบรอยแตกร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตในรูปแบบมัลติสเกลโดยการประมวลผลภาพ

นายปิยวัฒน์ ตันติ์ศรีสกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# INSPECTION OF MULTI SCALE CRACK ON CONCRETE SURFACE BY IMAGE PROCESSING

Mr. Piyawat Tonsrisakul

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Defense Engineering and Technology
Common Course
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การตรวจสอบรอยแตกร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตในรูปแบบมัลติสเกลโดยการประมวลผลภาพ |
| โดย | นายปิยวัฒน์ ตันติ์ศรีสกุล |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.วิทิต ปานสุข |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรเทพ สมราช |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทที นิภานันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(พันโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรเทพ สมราช)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ณัฏฐ์ดนัย สินสมุทรผดุง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปิยวัฒน์ ตันติ์ศรีสกุล : การตรวจสอบรอยแตกร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตในรูปแบบมัลติสเกลโดยการประมวลผลภาพ. ( INSPECTION OF MULTI SCALE CRACK ON CONCRETE SURFACE BY IMAGE PROCESSING) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิทิต ปานสุข, อ.ที่ปรึกษาร่วม : พ.ท. ผศ. ดร.อมรเทพ สมราช

รอยร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตอาจจะมีลักษณะความแตกต่างตามสาเหตุที่เกิดขึ้น หากได้มีการตรวจสอบในระดับที่ใกล้ชิดกับพื้นผิวรอยร้าว แล้วสามารถนำมาวิเคราะห์แยกลักษณะความแตกต่างของรอยร้าวตามสาเหตุที่เกิดขึ้นได้ ก็จะได้รูปแบบที่จะช่วยลดขั้นตอนการตรวจสอบและเพิ่มขีดความสามารถของบุคลากรในการตรวจสอบรอยร้าวได้ งานวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษา โดยตั้งสมมติฐานลักษณะความแตกต่างของรอยร้าวตามสาเหตุที่ได้กำหนด จากนั้นทำการหล่อและทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ได้กำหนดไว้ คือ การทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงเฉือนและการทดสอบแรงดึง จากนั้นนำ Chula Smart Lens ที่มีกำลังขยาย 20, 40 และ 50 เท่า มาใช้งานร่วมกับโทรศัพท์มือถือ Iphone7 ในการถ่ายรูปรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวคอนกรีตและนำภาพถ่ายไปวิเคราะห์โดยการสร้างแบบจำลองและกระบวนการประมวลผลภาพ เพื่อหาลักษณะความแตกต่างและตรวจวัดรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวบนคอนกรีต ผลจากงานวิจัยลักษณะรอยร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตจากการสร้างแบบจำลองและการประมวลผลภาพ พบว่ามีบางส่วนเป็นไปตามสมมติฐาน แต่มีบางส่วนที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐาน ดังนั้น สมมติฐานลักษณะความแตกต่างของรอยร้าวที่ได้ตั้งไว้ตามสาเหตุที่ได้กำหนดจึงไม่เป็นจริง ส่วนการตรวจวัดรอยร้าวคอนกรีตนั้นสามารถหาค่าความกว้าง ความยาวและพื้นที่ของรอยร้าวที่เกิดขึ้นได้การการประมวลผลภาพ เมื่อรู้ค่าดังกล่าวแล้วสามารถที่จะนำไปหาวิธีในการซ่อมแซมบำรุงรักษาต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

| | | |
|---|---|---|
| สาขาวิชา | วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ | ลายมือชื่อนิสิต ..... |
| ปีการศึกษา | 2562 | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ..... |
| | | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม ..... |

# # 6070245621 : MAJOR DEFENSE ENGINEERING AND TECHNOLOGY
KEYWORD: Program, Crack, Concrete, MATLAB, Model

Piyawat Tonsrisakul : INSPECTION OF MULTI SCALE CRACK ON CONCRETE SURFACE BY IMAGE PROCESSING. Advisor: Assoc. Prof. WITHIT PANSUK, Ph.D. Co-advisor: Lt.Col. Asst. Prof. Amornthep Somraj

Cracks in the concrete surface may differ in nature depending on the cause. If the inspection is closer to the surface of the crack. Then can be analyzed and differentiated characteristics of the cracks according to their causes. A model that simplifies the inspection process and increases the ability of personnel to investigate cracks. This research is a case study. By hypothesizing the different characteristics of the cracks according to the specified cause Then the concrete specimen was cast and tested, namely the bending test. Shear testing and tensile testing. Then the Chula Smart Lens with 20, 40 and 50x magnification was then used with the Iphone7 mobile phone to photograph cracks that arose on concrete surfaces and to analyze them. By modeling and image processing To characterize differences and detect cracks in the concrete surface. The research results of the crack characterization in concrete surface from modeling and image processing. It was found that some parts were based on the assumption. But there are some parts that are not in accordance with the assumptions, so the hypothesis of the fracture nature established for the given cause is not true. For the measurement of concrete cracks, the width, the length and area of possible cracks. Image Processing When knowing such values, they can be used to find ways to repair and maintain.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | | |
|---|---|---|
| Field of Study: | Defense Engineering and Technology | Student's Signature ..... |
| Academic Year: | 2019 | Advisor's Signature ..... |
| | | Co-advisor's Signature ..... |

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องด้วยข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์และได้รับความร่วมมือจากหลาย ๆ ท่าน ซึ่งให้การสนับสนุนผู้วิจัยตั้งแต่ต้นจนจบ

ขอขอบคุณ รศ.ดร. วิทิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ พ.ท.ผศ.ดร. อมรเทพ สมราช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม สำหรับคำแนะนำ คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ นส. สโรชา สุขศิริวงษ์ และ นส. อินทุอร เรืองอุตมานันท์ อย่างยิ่ง สำหรับการให้ความช่วยเหลือในด้านการหล่อและทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งข้อมูลสำคัญในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ปิยวัฒน์ ตันติ์ศรีสกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญ

**หน้า**

.....ค

บทคัดย่อภาษาไทย.....ค

.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง

กิตติกรรมประกาศ.....จ

สารบัญ.....ฉ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....1

1.2 วัตถุประสงค์.....2

1.3 ขอบเขต.....2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1 คอนกรีต.....3

2.2 ความเสียหายของคอนกรีต.....4

2.3 การตรวจสอบรอยร้าว.....5

2.3.1 ทิศทางและลักษณะของรอยร้าว.....5

2.3.2 ความลึกของรอยร้าว.....5

2.3.3 ความกว้างของรอยร้าว.....6

2.3.4 การจำแนกรอยร้าวที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง.....6

2.4 อุปกรณ์การวัดรอยร้าว.....6

2.5 MATLAB.....7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6 การประมวลผลภาพ ..... 8
2.7 ภาพดิจิตอล ..... 9
2.8 ประเภทของภาพ ..... 10
2.8.1 ภาพขาวดำ (Binary Image) ..... 10
2.8.2 ภาพระดับสีเทา (Gray Scale Image) ..... 10
2.8.3 ภาพสี (Color Image) ..... 11
2.9 การกรองข้อมูลภาพ ..... 11
2.9.1 Mean filtering ..... 12
2.9.2 Median Filter ..... 12
2.10 การตรวจจับขอบ ..... 13
2.11 Chula Smart Lens ..... 14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย ..... 16
3.1 เครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์ ..... 16
3.1.1 ด้านการทดสอบ ..... 16
3.1.2 ด้านโปรแกรม ..... 16
3.2 ตัวอย่างคอนกรีต ..... 17
3.2.1 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบแรงดัดและแรงเฉือน ..... 17
3.2.2 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบรับแรงดึง ..... 17
3.2.3 สัดส่วนการผสมตัวอย่างคอนกรีต ..... 18
3.3 การทดสอบตัวอย่าง ..... 19
3.3.1 การทดสอบแรงดัด ..... 19
3.3.2 การทดสอบแรงเฉือน ..... 20
3.3.3 การทดสอบรับแรงดึง ..... 21
3.4 การเก็บตัวอย่างภาพ ..... 22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.5 การสร้างแบบจำลองรอยร้าวคอนกรีต ..... 25
3.5.1 การนำภาพเข้าและการหาจุดทับซ้อน ..... 25
3.5.2 การสร้างแบบจำลอง ..... 26
3.6 การประมวลผลภาพ ..... 27
3.6.1 การนำภาพเข้า ..... 27
3.6.2 ปรับปรุงภาพ ..... 27
3.6.3 การตรวจสอบรอยร้าว ..... 29
3.7 การวิเคราะห์รอยร้าวจากสมมติฐาน ..... 31
3.7.1 สมมติฐานรอยร้าวจากการทดสอบแรงดัด ..... 31
3.7.2 สมมติฐานรอยร้าวจากการทดสอบแรงเฉือน ..... 31
3.7.3 สมมติฐานรอยร้าวจากทดสอบแรงดึง ..... 32
บทที่ 4 ผลการทดสอบ ..... 33
4.1 ผลการถ่ายภาพด้วย Chula smart lens ..... 34
4.1.1 ภาพรอยร้าวจากการทดสอบแรงดัด ..... 35
4.1.2 ภาพรอยร้าวจากการทดสอบแรงเฉือน ..... 35
4.1.3 ภาพรอยร้าวจากการทดสอบแรงดึง ..... 36
4.2 ผลจากการตรวจวัดรอยร้าวคอนกรีต ..... 37
4.3 ลักษณะของพื้นผิวรอยร้าวคอนกรีต ..... 41
4.3.1 ลักษณะพื้นผิวคอนกรีตจากแบบจำลอง ..... 41
4.3.2 ลักษณะพื้นผิวคอนกรีตจากกราฟ Gray Level (y) - Distance (x) ..... 44
4.4 การเปรียบเทียบการทดลอง ..... 47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ..... 51
บรรณานุกรม ..... 52
ภาคผนวก ..... 53

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Code ในส่วนโปรแกรม MATLAB ..... 53
ประวัติผู้เขียน ..... 58



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้กับงานประเภทต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลาย ด้วยความก้าวหน้าและการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วนี้ ทำให้ชีวิตประจำวันของมนุษย์นั้น ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีตลอดเวลา ตัวอย่างเช่น โทรศัพท์มือถือ ซึ่งสามารถนำมาใช้ประยุกต์ใช้ เรียนรู้ ทำงาน สร้างความบันเทิง ติดต่อสื่อสาร ทำให้เกิดการสร้างซอฟท์แวร์ที่จะตอบสนองความต้องการของมนุษย์ เพื่อสร้างความรวดเร็ว ความสะดวกและความสบายในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ จากแนวทางนี้ทางผู้จัดทำจึงคิดที่จะนำซอฟท์แวร์มาออกแบบ พัฒนามาใช้กับงานควบคู่กับงานด้านวิศวกรรมโยธาและนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีในปัจจุบัน

งานด้านวิศวกรรมโยธาอย่างหนึ่ง คือ การตรวจสอบอาคารว่ามีสภาพโครงสร้างความสมบูรณ์มากน้อยเพียงใด ขั้นตอนหนึ่งของการตรวจสอบอาคาร คือ การตรวจหารอยร้าวของตัวโครงสร้างอาคาร โดยการตรวจหารอยร้าวตามโครงสร้างเสา คาน ผนัง อื่น ๆ เป็นต้น ถ้าเป็นโครงสร้างขนาดเล็กก็สามารถตรวจหาได้ง่ายและรวดเร็ว แต่หากเป็นโครงสร้างอาคารที่ขนาดใหญ่ก็จะมีความซับซ้อนมากขึ้น ไม่ว่าขนาดโครงสร้างจะเป็นอย่างไร จำเป็นต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบ แต่อย่างไรด้วยจำนวนบุคลากรผู้เชี่ยวชาญมีอยู่อย่างจำกัด อาจไม่เพียงพอต่อปริมาณงานที่ต้องการ จึงอาจทำให้เกิดความล่าช้าและจึงได้คิดริเริ่มที่จะหาวิธีการที่จะเพิ่มศักยภาพในการตรวจสอบอาคารอีกด้วย จากจุดนี้เองทางผู้วิจัยจึงเห็นว่าควรที่จะมีการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมโยธา

งานวิจัยนี้เป็นกรณีศึกษา ลักษณะพื้นผิวของรอยร้าวคอนกรีตแต่ละตัวอย่างการทดสอบจากภาพถ่ายว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่จากสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ โดยการที่จะได้ภาพถ่ายที่มีกำลังขยายที่จะได้ภาพที่ใกล้ชิดกับพื้นผิวรอยร้าวนั้น จำเป็นต้องมีตัวเลนส์เสริมมาช่วยในการถ่ายภาพ โดยทางภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้มีการพัฒนาตัวเลนส์ ซึ่งสามารถพกพาง่าย ใช้งานร่วมกับกล้องสมาร์ทโฟนได้สะดวก ตัวเลนส์นั้น คือ Chula Smart Lens ที่มีกำลังขยาย 20, 40 และ 50 เท่า เมื่อมีตัวเลนส์ใช้งานคู่กล้องสมาร์ทโฟนแล้ว จากนั้นทำการถ่ายภาพรอยร้าวที่เกิดจากตัวอย่างคอนกรีตที่ได้รับการทดสอบด้วยแรงดัด แรงเฉือนและแรงดึง ต่อมานำภาพถ่ายรอยร้าวเข้าโปรแกรมวิเคราะห์ผลภาพทำการสร้างแบบจำลองรอยร้าว และนำเข้าโปรแกรม MATLAB ทำการประมวลผลภาพ ทั้งนี้เพื่อตรวจวัดและวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของรอยร้าวจากสาเหตุที่ได้กำหนดไว้ว่ามีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันหรือไม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากที่ทางผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานและใช้โปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์และประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้กับการตรวจหาลักษณะเฉพาะของพื้นผิวรอยร้าวจากการทดสอบที่ได้กำหนด หากผลวิจัยเป็นไปสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ ก็จะได้วิธีการประเมินสาเหตุของรอยร้าวในรูปแบบใหม่ที่จะสามารถลดขั้นตอนและเพิ่มศักยภาพในการตรวจสอบอาคาร โดยผู้ตรวจสอบสามารถที่จะถ่ายภาพรอยร้าวที่เกิดขึ้น โดยใช้โทรศัพท์มือถือ แล้วส่งภาพถ่ายผ่านแอพพลิเคชั่นมายังผู้เชี่ยวชาญ เพื่อสามารถที่จะวิเคราะห์หาสาเหตุของรอยร้าวได้ทันที เพื่อความสะดวก รวดเร็วและแม่นยำในการทำงานด้านตรวจสอบอาคาร อีกทั้งยังสามารถที่จะตรวจวัดหาขนาดรอยร้าว เพื่อทำการหาวิธีการที่จะซ่อมแซมบำรุงต่อไป ทั้งนี้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถเป็นจุดเริ่มต้นที่จะนำไปใช้พัฒนาต่อยอดทั้งงานทางทหารและพลเรือน ในงานด้านบูรณะ ซ่อมบำรุงและสนับสนุน ทางตัวโครงสร้างอาคาร สะพาน งานทางเครื่องจักรและอื่น ๆ ได้ เพื่อที่จะช่วยในการเสริมสร้างและพัฒนาประเทศชาติต่อไป

**1.2 วัตถุประสงค์**

- ตรวจหาลักษณะความแตกต่างของพื้นผิวรอยร้าวจากตัวอย่างที่ได้กำหนดไว้
- ตรวจวัดรอยร้าวที่ได้จากภาพถ่ายผ่านการประมวลผลภาพได้

**1.3 ขอบเขต**

- กรณีศึกษานี้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตจากการทดสอบแรงดัด แรงเฉือน และแรงดึงที่ได้กำหนด
- การทดสอบจะทำการให้แรงแก่ตัวอย่างและหยุดทันที เมื่อรอยร้าวปรากฏขึ้น
- ใช้ Chula Smart Lens คู่กับโทรศัพท์มือถือ Iphone7 ในการถ่ายภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

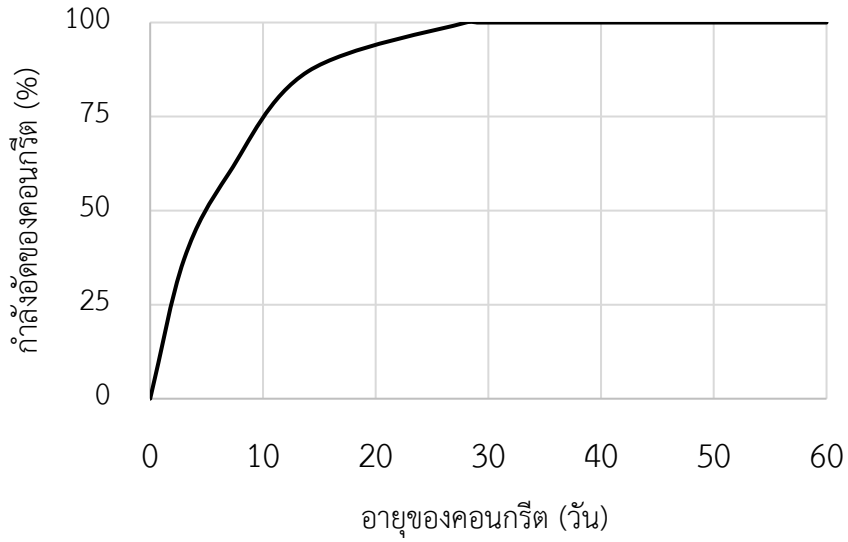
**1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

- สามารถหาลักษณะความแตกต่างของพื้นผิวของรอยร้าวได้
- สามารถตรวจวัดรอยร้าวจากการประมวลผลภาพได้
- สามารถนำองค์ความรู้ด้านซอฟท์แวร์มาประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมโยธาได้

# บทที่ 2
# หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 คอนกรีต

คอนกรีต (Concrete) เป็นวัสดุผสมที่พบกันทั่วไปในงานก่อสร้าง ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ปูนซีเมนต์ วัสดุมวลรวม (หินหรือทราย) และน้ำ เมื่อผสมเสร็จก็จะนำไปเทในแบบหล่อที่เตรียมไว้ คอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้า ๆ โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแปรสภาพเป็นของแข็ง หลังผสมเสร็จคอนกรีตก็จะมีความแข็งแรงมากขึ้นตามอายุของคอนกรีต เมื่อผ่านไปประมาณ 28 วัน ความแข็งแรงของคอนกรีตก็จะมีความคงที่ ดังภาพที่ 1




*ภาพที่ **1** กำลังอัดของคอนกรีตโดยทั่วไปเมื่อเทียบกับเวลา [1]*

การที่จะให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพนั้น จำเป็นที่จะต้องเข้าใจองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- เรื่องคุณสมบัติของวัสดุและหลักการออกแบบ
- สภาพทั่วไปของหน่วยงานก่อสร้าง
- วัสดุต่าง ๆ ต้องมีคุณภาพอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด
- ต้องระมัดระวังในเรื่อง การชั่งตวงส่วนผสมทุกชนิด
- ต้องมีการผสม การลำเลียง การเทลงแบบ การอัดแน่นและการบ่มอย่างถูกต้องเหมาะสม
- ต้องมีการควบคุมงานคอนกรีตที่ดีทุกขั้นตอน

จากที่กล่าวมาเนื้อหาส่วนนี้ใช้ในขั้นตอนของการหล่อตัวอย่างคอนกรีตสำหรับแต่ละการทดสอบที่ได้กำหนดไว้ โดยจะมีการควบคุมคุณภาพ ทั้งการทำแบบ การผสม การหล่อและการบ่ม เพื่อให้ได้ตัวอย่างคอนกรีตที่มีคุณภาพและกำลังที่พร้อมจะรับการทดสอบต่อไป

**2.2 ความเสียหายของคอนกรีต**

คอนกรีตในโครงสร้างส่วนต่าง ๆ อาจเกิดความเสียหาย เนื่องจากสภาพแวดล้อมหรือสภาพการใช้งานที่ไม่ถูกต้องไม่เหมาะสม ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น เมื่อเริ่มมีการใช้งานหรืออาจเกิดขึ้นหลังจากใช้งานโครงสร้างคอนกรีตนั้นไปแล้วช่วงหนึ่ง และความเสียหายนี้อาจเกิดมาจากสาเหตุทั้งภายในหรือภายนอกของเนื้อคอนกรีต สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สาเหตุ คือ สาเหตุด้านกายภาพ สาเหตุด้านเคมีและสาเหตุด้านกล ดังตารางที่ 1

*ตารางที่ 1 สาเหตุของความเสียหายด้าน ๆ ของคอนกรีต [1]*

| ด้านกายภาพ | ด้านเคมี | ด้านกล |
|---|---|---|
| น้ำแข็ง<br>ความร้อนและไฟ<br>การเปียกและแห้งสลับกัน<br>น้ำหนักบรรทุก<br>ความล้า<br>อุบัติเหตุ | การกดกร่อนโดยซัลเฟต, กรด<br>ปฏิกิริยาระหว่างด่างและหิน<br>น้ำทะเล<br>คาร์บอนไดออกไซด์<br>แบคทีเรีย<br>คลอไรด์<br>การกัดกร่อนเหล็กเสริม | การเสียดสี<br>การกัดกร่อน<br>การเกิดโพรง |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รอยร้าวบนผิวคอนกรีตนั้นคือความเสียหายแบบหนึ่ง ที่จะเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบถึงสิ่งผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นได้ เมื่อได้พบเห็นรอยร้าวที่เกิดขึ้นในตัวโครงสร้าง ควรวิเคราะห์หาสาเหตุให้แน่ชัดว่าเกิดขึ้นจากสาเหตุอะไร เพื่อที่จะได้ทำการแก้ไขได้อย่างถูกต้อง เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติพังทลายของโครงสร้างได้ในภายหลัง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสาเหตุการแตกร้าวของคอนกรีตนั้นมีหลายสาเหตุ มักจะไม่ได้เกิดจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง แต่มักจะเกิดจากหลายๆ สาเหตุพร้อมกัน

การวิเคราะห์หาสาเหตุการแตกร้าวของคอนกรีตนั้น จำเป็นต้องรู้ถึงรูปแบบและลักษณะของการแตกร้าวชนิดต่าง ๆ ถ้าวิเคราะห์สาเหตุของรอยร้าวผิดพลาด อาจทำให้การแก้ไขเกิดความไม่ถูกต้อง อาจต้องกลับมาแก้ไขซ้ำอีก ดังนั้น รูปแบบและลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้น จึงควรเป็นเรื่องที่ต้องทำความเข้าใจเป็นอันดับแรก เพื่อที่จะวิเคราะห์สาเหตุได้อย่างถูกต้องก่อนที่จะทำการแก้ไข

จากที่กล่าวมาในเนื้อหาส่วนของงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีต เพื่อให้เกิดการแตกร้าว อันเนื่องด้วยสาเหตุหลักจากทางด้านกายภาพ โดยจะทำการให้แรงน้ำหนักบรรทุกโดยตรงแก่ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้เตรียมไว้

**2.3 การตรวจสอบรอยร้าว**

รอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีตนั้นสามารถเกิดได้จากสาเหตุเดียวหรือหลายสาเหตุ อีกทั้งสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกช่วงอายุของโครงสร้างคอนกรีต การวิเคราะห์หาสาเหตุของรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีตจะมีส่วนช่วยในการซ่อมแซมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้น ผู้ตรวจสอบจึงต้องจำเป็นที่ต้องจดบันทึก จำนวน ทิศทาง ลักษณะ ความลึกและความกว้าง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุต่อไป

2.3.1 ทิศทางและลักษณะของรอยร้าว

ลักษณะของรอยร้าวนั้นสามารถที่จะสังเกตได้เบื้องต้นบนผิวโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะบ่งบอกถึงสาเหตุของการเกิดรอยร้าว เช่น รอยแตกลายงาที่เกิดจากการยึดรั้งที่ผิวคอนกรีตหรือมีการขยายตัวของคอนกรีตที่อยู่ด้านในของโครงสร้าง รอยร้าวที่อยู่ในทิศทางเดียวจะเกิดจากแรงดึงในคอนกรีตโดยอาจเกิดจากการทรุดตัวของโครงสร้างหรืออาจเกิดจากแรงดัดที่กระทำกับโครงสร้าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.2 ความลึกของรอยร้าว

ความลึกของรอยร้าวสามารถแยกออกกว้างๆ ได้เป็น 4 ระดับ คือ รอยร้าวเฉพาะที่ผิว รอยร้าวตื้น รอยร้าวลึกและรอยร้าวทะลุโครงสร้าง โดยรอยร้าวเฉพาะที่ผิวจะหมายถึงรอยร้าวที่ความลึกเข้าไปในโครงสร้างไม่มากหรือเกิดรอยร้าวในชั้นของปูนฉาบ รอยร้าวตื้นคือรอยร้าวที่เกิดในผิวคอนกรีตและมีความลึกที่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้าง รอยร้าวลึกคือรอยร้าวที่มีความลึกมากในระดับที่ทำให้เหล็กเสริมผุกร่อนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่รอยร้าวมีความลึกมากกว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กซึ่งทำให้เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนได้อย่างรวดเร็ว และรอยร้าวทะลุคือรอยร้าวที่ทะลุโครงสร้างซึ่งจะบ่งบอกถึงความเสียหายที่ค่อนข้างรุนแรง

2.3.3 ความกว้างของรอยร้าว

ความกว้างของรอยแตกร้าวก็เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีต อาจถูกแบ่งได้ 3 ระดับ ได้แก่ รอยร้าวขนาดเล็ก รอยร้าวขนาดกลางและรอยร้าวขนาดใหญ่ระดับความกว้างนั้นถูกจำแนกโดยคำนึงถึงลักษณะการใช้งาน สภาวะแวดล้อมและอายุการใช้งานของแต่ละโครงสร้าง เช่น รอยร้าวขนาด 0.1 มิลลิเมตร อาจจะถูกจำแนกเป็นรอยร้าวขนาดเล็กในโครงสร้างขนาดใหญ่ในสภาวะแวดล้อมธรรมดา ในขณะที่รอยร้าวขนาดเดียวกันในโครงสร้างที่อยู่ชายฝั่งทะเลนั้นอาจถูกจำแนกเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่ได้

2.3.4 การจำแนกรอยร้าวที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง

การจำแนกรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีต มีวัตถุประสงค์เพื่อระบุสาเหตุของการเกิดรอยร้าว ข้อมูลของช่วงอายุคอนกรีตระหว่างที่รอยร้าวเริ่มปรากฏจะเป็นข้อมูลสำคัญที่จะช่วยให้ผู้ตรวจสอบระบุถึงสาเหตุของรอยแตกร้าวได้ถูกต้อง

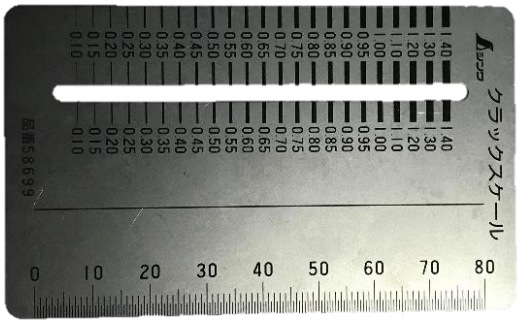
ผู้ตรวจสอบอาจจำแนกรอยร้าวที่เกิดจากพฤติกรรมทางโครงสร้างและการรับแรงโดยทั่วไปรอยร้าวที่เกิดจากพฤติกรรมทางโครงสร้างมักมีขนาดใหญ่และความกว้างของรอยร้าวนั้นอาจเพิ่มขึ้นเนื่องจากการล้าของตัวโครงสร้างคอนกรีตเอง

งานวิจัยนี้จึงจะนำเนื้อหาส่วนนี้ไปใช้ในการเก็บข้อมูลเบื้องต้นของรอยร้าวที่เกิดขึ้นจากการทดสอบที่ได้กำหนดไว้ โดยจะทำการวัดขนาดความยาว ความกว้าง ความลึกของรอยร้าว และลักษณะทิศทางการเกิดของรอยร้าว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**2.4 อุปกรณ์การวัดรอยร้าว**

งานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือวัดรอยแตก Crack Scales ดังภาพที่ 2 ในการวัดความกว้างของรอยร้าว โดยใช้เทียบกับขนาดของรอยร้าวจริงที่เกิดจากทดสอบตัวอย่างคอนกรีต

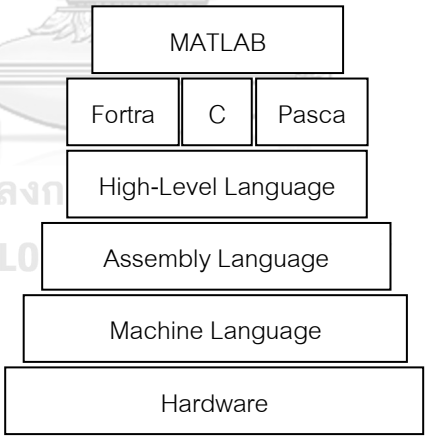



*ภาพที่ 2 Crack Scales*

## 2.5 MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) เป็นซอฟต์แวร์ในการคำนวณและเขียนโปรแกรม ที่มีภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่ใช้สำหรับคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Computing) แสดงผลกราฟฟิกและเขียนแอพพลิเคชั่น ทำให้สามารถคำนวณผลลัพธ์ พัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลองและแอพพลิเคชั่นได้ง่ายและรวดเร็วมาก ภายในตัว MATLAB ประกอบด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ กล่องเครื่องมือ (Toolbox) และฟังก์ชันพื้นฐานจำนวนมาก ทำให้การวิเคราะห์ทำได้หลากหลายวิธี อีกทั้งได้มีการสร้างกล่องเครื่องมือ (Toolbox) และบ็อกเซ็ต (Boxset) ขึ้นมามากมาย ใช้สำหรับการคำนวณเชิงเทคนิค (Technical Computing) โดยต่อยอดมาจาก Numerical Computing เพื่อให้ใช้ง่ายต่องานวิจัยและการสร้างนวัตกรรม นั่นคือ MATLAB มีไลบรารี่ (Library) ตั้งแต่การออกแบบอัลกอริทึมจนถึงไลบรารีสำหรับสร้างผลิตภัณฑ์

MATLAB นั้นสามารถไปประยุกต์ใช้งานได้หลายสาขา ทั้งการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) การสื่อสาร (Communication) การประมวลผลภาพและวิดีโอ (Image and Video Processing) ระบบควบคุม (Control System) การวัดและควบคุม (Instruments and Control) การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ (Economic) การคำนวณทางชีววิทยา (Biology) และอื่น ๆ เป็นต้น




*ภาพที่ 3 บล็อกไดอะแกรมภาษาระดับสูงสำหรับการเขียนโปรแกรม [2]*

งานวิจัยนี้จะใช้ MATLAB เป็นโปรแกรมหลักในการประมวลและวิเคราะห์ผลภาพ ซึ่งทางผู้วิจัยจะใช้เครื่องมือภายในโปรแกรมสำหรับการสร้างและพัฒนาอัลกอริทึมที่จะสามารถแสดงผลการทดลองตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ ว่าสามารถหาลักษณะความแตกต่างของรอยร้าวได้หรือไม่

**2.6 การประมวลผลภาพ**

การประมวลผลภาพ (Image Processing) คือ การแปลงข้อมูลรูปภาพที่เป็นสัญญาณอนาล็อก (Analogue Signal) ให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal) และประมวลผลผ่านทางคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลากหลายด้าน เช่น การนำเอาสีแต่ละจุด (Pixel) หรือการคำนวณจุดหลาย ๆ จุดรวมกัน (Area), การวิเคราะห์พื้นผิว (Texture), การดูรูปแบบ (Pattern), การวิเคราะห์หารูปร่าง (Shape) หรือการวิเคราะห์แบบอื่น ๆ เพื่อหาค่าที่จะสามารถระบุได้ว่าภาพนั้นมีลักษณะรูปร่างอย่างไร ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์ว่าสิ่งนั้นเป็นสิ่งที่กำลังค้นหาอยู่หรือไม่และนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ต่อไป

การประมวลผลภาพ (Image Processing) เป็นกระบวนการจัดการและวิเคราะห์สารสนเทศของรูปภาพให้เป็นข้อมูลในแบบดิจิทัล โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผล ทำให้ภาพที่ได้นั้นมีคุณสมบัติตามความต้องการทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ กระบวนการนั้นมีอยู่หลายอย่าง เช่น

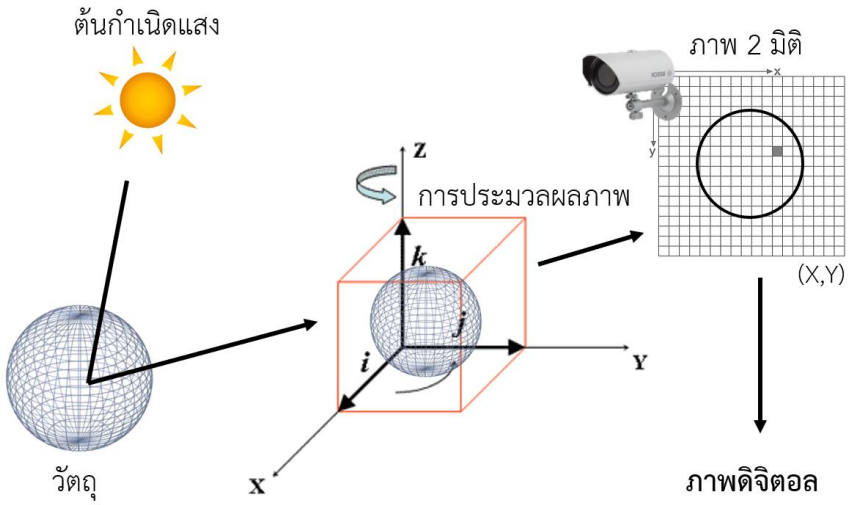
- การปรับเปลี่ยนหรือแปลงรูปภาพทั้งขนาดและรูปร่าง (Image Transformation)
- การนิยามภาพ (Image Description)
- การกรองภาพ (Image Filters)
- การคืนสภาพภาพ (Image Restoration)
- การปรับปรุงคุณภาพของภาพ (Image Enhancement)
- การแบ่งภาพและหาขอบภาพในวัตถุ (Image Segmentation and Edge Detection)
- การบีบอัดข้อมูลภาพ (Image Compression)
- การซ้อนทับภาพ (Image Registration)
- การสร้างภาพ 3 มิติ (3D Image Reconstruction)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ส่วนของเนื้อหาในการประมวลผลภาพนี้ทางผู้จัดทำจะนำเครื่องมือต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลภาพที่มีในโปรแกรม MATLAB มาเรียบเรียง สร้างและพัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับการรับภาพถ่ายมาแล้วนำมาประมวลผลภาพให้ได้ผลลัพธ์ออกมาตามที่ได้ตั้งไว้

## 2.7 ภาพดิจิตอล

ข้อมูลภาพทั่ว ๆ จะได้มาจากการที่แสงตกกระทบกับวัตถุ แล้วเกิดการสะท้อนผ่านเลนส์เข้าสู่ตัวบันทึกภาพ อาจอยู่ในรูปแบบของตัวตรวจจับ (Sensor) หรือฟิลม์ (Film) เมื่อเวลาถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล วัตถุหรือภาพที่เราเห็นด้วยตาจะเป็นข้อมูลสามมิติ (Three-dimension) ที่ประกอบไปด้วยความลึก ความสูง และความกว้าง เมื่อแปลงข้อมูลภาพออกมาเป็นข้อมูลดิจิตอล (Digital Image) แล้ว ข้อมูลของภาพนั้นจะประกอบไปด้วยความกว้างและความสูงของภาพ (Width and Height) เท่านั้น ดังภาพที่ 4 ปัจจุบันมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายประเภทที่สามารถสร้างสัญญาณภาพดิจิตอลได้สะดวกและง่ายขึ้น เช่น กล้องถ่ายภาพดิจิตอล กล้องวีดีทัศน์ ดิจิตอล เป็นต้น




*ภาพที่ 4 รูปแบบการมองเห็นวัตถุ [4]*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

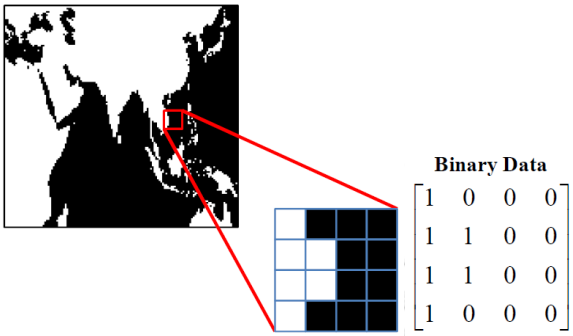
ภาพแบบดิจิตอล (Digital Image) จึงเป็นภาพที่ถูกแปลงมาจากอนาล็อกให้อยู่ในรูปของตัวเลข โดยภาพอนาล็อกถูกแบ่งเป็นพื้นที่สี่เหลียมเล็ก ๆ ที่เรียกว่าพิกเซล ในแต่ละพิกเซลจะถูกระบุตำแหน่งด้วยคู่โคออดิเนต x, y และค่าระดับความเข้มของแสงของพิกเซลนั้น ๆ

งานวิจัยนี้ในส่วนของภาพแบบดิจิตอลนั้นจะเป็นส่วนพื้นฐานที่ใช้ในการแสดงผลลัพธ์ที่ได้ออกมา โดยภาพแบบดิจิตอลนั้นจะถูกแบ่งช่องเล็ก ๆ ที่เรียกว่า พิกเซล ซึ่งในแต่ละพิกเซลก็จะมีค่าแสงสีเฉพาะตามสภาพที่กำหนดค่าสีไว้ ค่าสีเหล่านี้เมื่อรวมตัวกันก็จะแสดงเป็นภาพผลลัพธ์ที่ได้ทำไว้

## 2.8 ประเภทของภาพ

### 2.8.1 ภาพขาวดำ (Binary Image)

ภาพขาวดำในแต่ละพิกเซลจะแสดงด้วยค่าแบบไบนารี (Binary) คือ มี 1 บิต ซึ่งประกอบไปด้วยค่า 1 และ 0 โดยที่ 1 หมายถึงจุดภาพสีขาว และ 0 หมายถึงจุดภาพสีดำ ดังภาพที่ 5

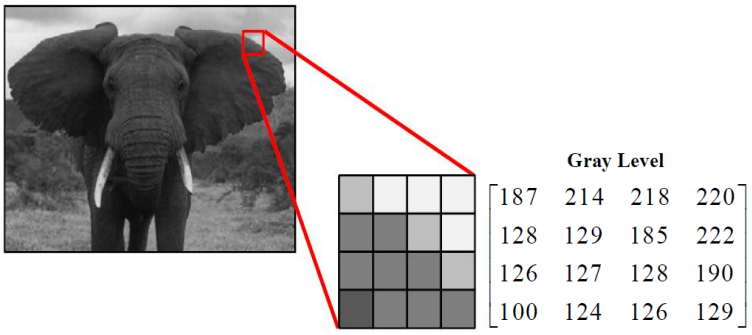



*ภาพที่ 5 ตัวอย่างภาพขาวดำ [4]*

### 2.8.2 ภาพระดับสีเทา (Gray Scale Image)

ภาพชนิดนี้ในแต่ละพิกเซลจะมีค่าความเข้มของแสงในแต่ละระดับที่แตกต่างกันไป ตั้งแต่สีขาวจนไปยังสีดำ ซึ่งสามารถกำหนดระดับความเข้มของแสงนั้นได้ โดยใช้ค่าระดับเทา โดยปกติแล้วภาพแบบระดับสีเทาจะมีความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 8 บิต ภาพจะมีค่าระดับความเข้มแสงของสีดำเท่ากับ 0 ส่วนค่าระดับความเข้มของสีขาวจะมีค่าเท่ากับ 255 ดังภาพที่ 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

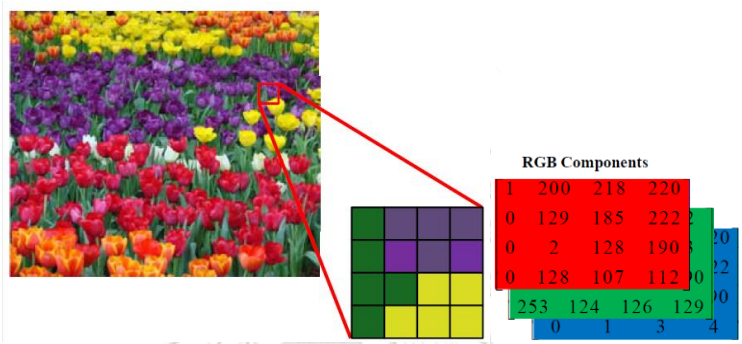



*ภาพที่ 6 ตัวอย่างภาพระดับสีเทา [4]*

2.8.3 ภาพสี (Color Image)

ในแต่ละพิกเซลของภาพสีจะเก็บค่าระดับความเข้มแสงแต่ละแถบแสงของแม่สีหลัก 3 สีที่ซ้อนกันคือ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) ซึ่งในแต่ละพิกเซลนั้น ๆ ก็จะแสดงผลของค่าสีของแต่ละพิกเซลตามระดับความเข้มในแต่ละแถบแสงนั้น

สำหรับภาพสี RGB ขนาด 24 บิตต่อจุดภาพ แต่ละ Channel คือ แดง เขียวและน้ำเงิน นั้นจะมีค่าความสว่าง 8 บิตหรือ 256 ระดับ โดยมีค่าตั้งแต่ 0-255 ดังนั้น จุดภาพแต่ละจุดจึงสามารถแสดงสีได้มากถึง 16.7 ล้านสี ดังภาพที่ 7




*ภาพที่ 7 ตัวอย่างภาพสี [4]*

ส่วนของค่าความเข้มสีในงานวิจัยนี้จะใช้ในการแสดงผลลัพธ์ของภาพที่ได้ออกมา อีกทั้งใช้เป็นส่วนที่สำคัญในการบ่งบอกถึงค่าระดับความสูงต่ำของลักษณะพื้นผิวบริเวณรอยร้าวที่ได้เกิดขึ้นจากการทดสอบตัวอย่าง

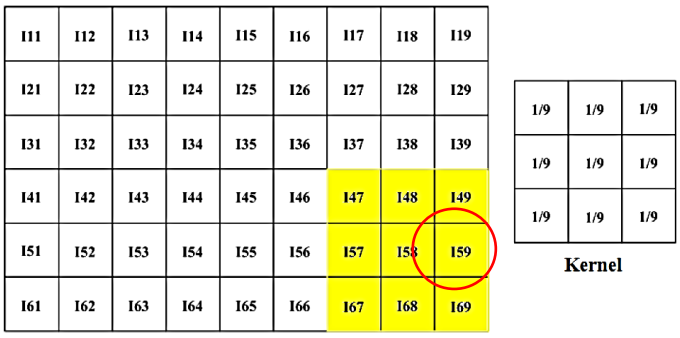
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

## 2.9 การกรองข้อมูลภาพ

การกรองข้อมูลภาพ (Image Filtering) เป็นการประมวลผลภาพที่สำคัญในการกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ต้องการออกจากภาพหรือเป็นการนำภาพไปผ่านตัวกรองสัญญาณ เพื่อให้ได้ภาพผลลัพธ์ออกมา ภาพผลลัพธ์ที่ได้จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากภาพเริ่มต้น โดยวัตถุประสงค์หลักของการกรองข้อมูลภาพ คือ การเน้นหรือลดทอนคุณสมบัติบางประการของภาพ เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณสมบัติตามต้องการ

2.9.1 Mean filtering

เป็นฟิลเตอร์ที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการลดสัญญาณในรูปภาพ เนื่องจากมีกระบวนการที่ใช้งานที่ง่าย โดยผลลัพธ์ที่ได้จากฟิลเตอร์จะทำให้ได้ภาพถ่ายที่มีค่าความเข้มที่ราบเรียบ

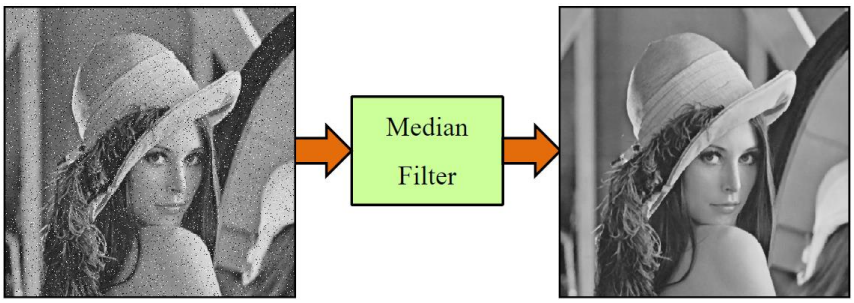



*ภาพที่ 8 แสดงภาพตัวอย่างสำหรับหาค่า mean filter [4]*

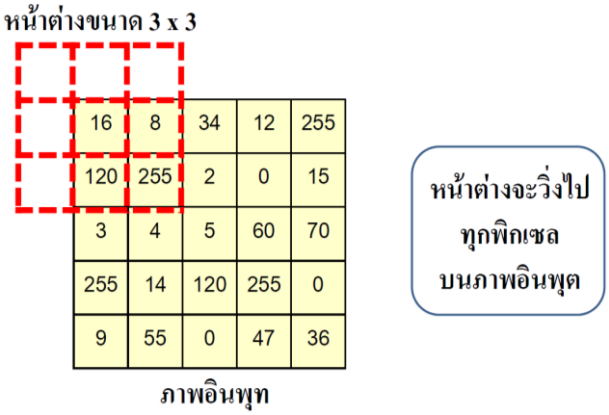
2.9.2 Median Filter

กรณีนี้พิกเซลเอาต์พุตจะถูกแทนที่ด้วยค่าที่อยู่ตรงกลางของพิกเซลที่อยู่ในหน้าต่างของภาพอินพุต (เรียงลำดับค่าจากน้อยไปมาก) ซึ่งใช้ลดสัญญาณรบกวนในรูปภาพ ซึ่ง median filter นี้จะมีลักษณะคล้ายกับ mean filter แต่มีการทำงานที่ดีกว่า mean filter เพราะจะมีการเก็บรักษารายละเอียดของรูปภาพได้ดีกว่า ดังตัวอย่างภาพที่ 9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




*ภาพที่ 9 แสดงภาพตัวอย่างสำหรับหาค่า median filter แบบ Salt and Pepper [4]*

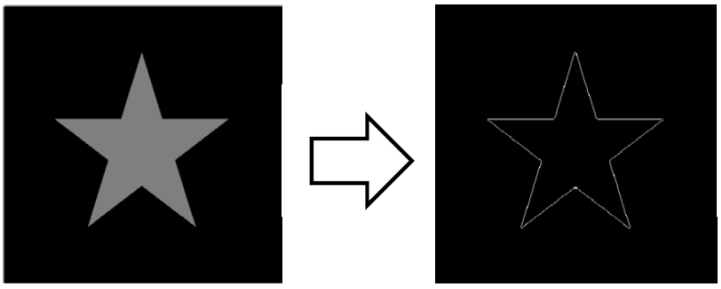



*ภาพที่ 10 แสดงภาพตัวอย่างสำหรับหาค่า median filter [4]*

ส่วนของการกรองข้อมูลภาพในงานวิจัยนี้จะใช้ในขั้นตอนการที่ได้นำภาพถ่ายเข้าโปรแกรม MATLAB แล้ว ซึ่งภาพถ่ายที่ได้มา อาจมีสิ่งที่รบกวนหรือจุดแทรกเล็ก ๆ กระจายตามภาพถ่าย ดังนั้น การกรองข้อมูลในเบื้องต้นจึงเป็นส่วนช่วยที่สำคัญจะช่วยกำจัดจุดแทรกต่าง ๆ ได้ ทำให้ภาพถ่ายมีความคมชัดมากยิ่งขึ้น

**2.10 การตรวจจับขอบ**

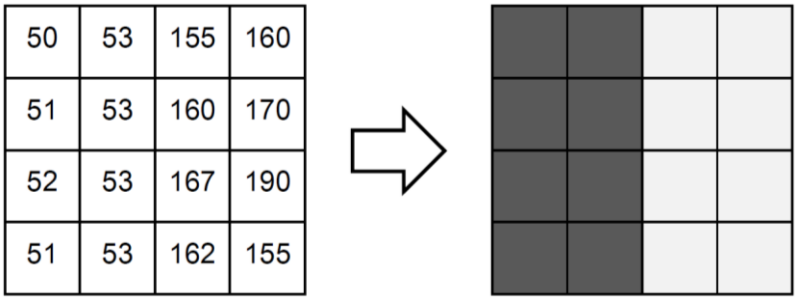
ขอบ (Edge) เป็นคุณสมบัติความไม่ต่อเนื่องของค่าระดับความเข้มสีเทา โดยขอบภาพนั้นจะมีคุณสมบัติที่ไม่แปรผันต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เช่น แสง ดังตัวอย่างภาพที่ 11



*ภาพที่ 11 ตัวอย่างการตรวจจับขอบวัตถุ [4]*

ขอบภาพนั้นประกอบด้วยข้อมูลของภาพที่มีความสำคัญและมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ได้ เช่น ขอบของภาพสามารถนำไปใช้ในการระบุถึงขนาดของวัตถุที่อยู่ในภาพ การนำไปใช้ในการแยกแยะระหว่างวัตถุในภาพกับส่วนของพื้นหลังของภาพ อาจกล่าวได้ว่า

ขอบภาพ คือ ส่วนที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของค่าระดับความเข้มสีเทาของพิกเซลที่อยู่ติดกัน หรืออาจกล่าวได้ว่า ค่าระดับความเข้มเทาของพิกเซลที่อยู่ติดกันมีค่าแตกต่างกันมาก ดังภาพที่ 12




*ภาพที่ 12 ค่าระดับความเข้มเทาที่อยู่ติดกันมีค่าแตกต่างกันมากจนนำไปสู่การตรวจจับขอบ [4]*

ทั้งนี้การตรวจจับขอบภาพนี้เป็นอีกหนึ่งในกระบวนการสำคัญของงานวิจัยนี้ที่จะนำมาใช้ในการช่วยตรวจหาทิศทางและลักษณะของรอยร้าวที่ได้เกิดขึ้นจากตัวอย่างที่ได้รับการทดสอบ อีกทั้งเป็นส่วนที่ช่วยทำให้ผลลัพธ์ของรอยร้าวที่แสดงออกมามีความเด่นชัดมากขึ้น

### 2.11 Chula Smart Lens

Chula Smart Lens เป็นชุดอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์สมาร์ทโฟน ดังภาพที่ 13 ที่ได้รับการพัฒนาโดยนายปรินทร แจ้งทวี นิสิตนักวิจัย และศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์ จากหน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถที่จะใช้งานร่วมกับกล้องสมาร์ทโฟนหรือแท็บเล็ตได้ อีกทั้งยังสามารถที่จะเปลี่ยนศักยภาพการถ่ายภาพของสมาร์ทโฟนให้เป็นกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอลแบบพกพา ซึ่งตัวเลนส์ที่มีนั้นมีกำลังขยาย 20, 40 และ 50 เท่า และหากมีการขยายเพิ่มเติมด้วย digital zoom ของสมาร์ทโฟนก็จะทำให้ได้กำลังขยายสูงถึง 400 เท่า ดังนั้น การใช้ Chula Smart Lens นี้สามารถที่จะใช้ตอบสนองกิจกรรมได้หลากหลาย เช่น การประยุกต์ทางการศึกษา การวิจัย การวินิจฉัยทางการแพทย์ อัญมณี เครื่องประดับ พระเครื่อง โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุและอื่น ๆ เป็นต้น

*ภาพที่ 13 Chula Smart Lens [3]*

Chula Smart Lens จึงเป็นอุปกรณ์เสริมสำคัญลำดับต้น ๆ ที่ใช้คู่กับกล้องสมาร์ทโฟนในการถ่ายภาพในงานวิจัยนี้ โดยจะใช้ในการถ่ายภาพรอยร้าวที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างคอนกรีตที่ได้รับการทดสอบ ซึ่งจะทำให้ได้ภาพที่มีกำลังขยาย 20, 40 และ 50 เท่า และสัดส่วนขนาดภาพที่ได้ก็จะมีความแตกต่างกันออกไป ตามระยะโฟกัสของแต่ละตัวเลนส์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 3
# วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มจากการหล่อตัวอย่างคอนกรีตสำหรับแต่ละการทดสอบและนำไปบ่มเป็นเวลา 28 วัน หลังจากบ่มตัวอย่างเสร็จ นำแต่ละตัวอย่างไปทำการทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงเฉือนและการทดสอบแรงดึง โดยแต่ละการทดสอบทำการให้แรงและหยุดทันที เมื่อรอยร้าวปรากฏขึ้น จากนั้นทำการถ่ายรูปรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแต่ละตัวอย่าง ต่อมานำภาพถ่ายรอยร้าวเข้าโปรแกรมวิเคราะห์ผลภาพ สำหรับการสร้างแบบจำลองรอยร้าวและโปรแกรม MATLAB สำหรับทำการประมวลผลภาพ ทั้งนี้เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มา นำไปวิเคราะห์ลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นต่อไป

## 3.1 เครื่องมือ วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 ด้านการทดสอบ

- เครื่องโม่ผสมปูน
- แบบหล่อตัวอย่างไว้สำหรับทดสอบ
- แบบหล่อทดสอบกำลังอัดรูปทรงกระบอก
- เครื่องทดสอบตัวอย่าง
- วัสดุมวลรวม ทรายหยาบและหินคลุก
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
- ตะแกรงเหล็ก ขนาด 1.2 มม.
- เหล็กข้ออ้อย ขนาด 12 มม. ยาว 110 ซม.
- เครื่องมือวัดรอยแตก
- Chula Smart Lens กำลังขยาย 20x, 40x และ 50x
- มือถือ iPhone7

3.1.2 ด้านโปรแกรม

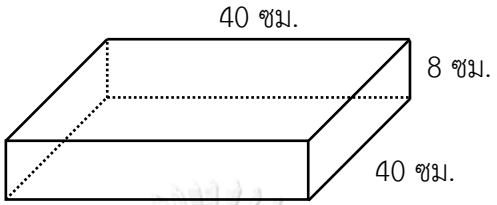
- โปรแกรม MATLAB

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**3.2 ตัวอย่างคอนกรีต**

3.2.1 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบแรงดัดและแรงเฉือน

การทดสอบทั้งสองส่วนนี้จะทำหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 40 x 40 x 8 ซม. ดังภาพที่ 14 จำนวนอย่างละ 3 ตัวอย่าง ในแต่ละการทดสอบ




*ภาพที่ 14 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบแรงดัดและแรงเฉือน*

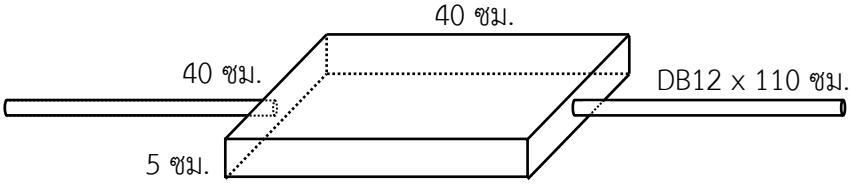
ขั้นตอนการหล่อตัวอย่างคอนกรีตในการทดสอบแรงดัดและทดสอบแรงเฉือน

- เตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์และแบบหล่อ พร้อมวางตะแกรงเหล็กเสริม
- เตรียมวัสดุตามสัดส่วนที่คำนวณไว้และทำการผสมวัสดุเข้าด้วยกัน
- เทคอนกรีตสดที่ผสมลงแบบหล่อที่เตรียมไว้ พร้อมจี้เขย่า
- ทำการแต่งผิวหน้า และทิ้งไว้ 24 ชม. ให้คอนกรีตแห้งและแข็งตัว
- หลังจาก 24 ชม. ทำการถอดแบบและนำไปบ่ม 28 วัน
- หลังจาก 28 วัน นำตัวอย่างไปทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.2 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบรับแรงดึง

การทดสอบนี้หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 40 x 40 x 5 ซม. จำนวน 1 ตัวอย่าง และใช้เหล็กข้ออ้อย ขนาด 12 มม. ยาว 110 ซม. ไว้สำหรับรับแรงดึงจากการทดสอบ ดังภาพที่ 15




*ภาพที่ 15 ตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบรับแรงดึง*

ขั้นตอนการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทดสอบรับแรงดึง

- เตรียมอุปกรณ์และแบบหล่อ พร้อมใส่เหล็กข้ออ้อยและตะแกรงเหล็ก
- เตรียมวัสดุตามสัดส่วนที่คำนวณไว้และทำการผสมวัสดุเข้าด้วยกัน
- เทคอนกรีตสดที่ผสมลงแบบหล่อที่เตรียมไว้ พร้อมจี้เขย่า
- ทำการแต่งผิวหน้า และทิ้งไว้ 24 ชม. ให้คอนกรีตแห้งและแข็งตัว
- หลังจาก 24 ชม. ทำการถอดแบบและนำไปบ่ม 28 วัน
- หลังจาก 28 วัน นำตัวอย่างไปทดสอบ

3.2.3 สัดส่วนการผสมตัวอย่างคอนกรีต

การหล่อตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดใช้ตามมาตรฐาน ACI Committee 211 โดยมีรายละเอียดส่วนผสม ดังตารางที่ 2

*ตารางที่ 2 สัดส่วนการผสมตัวอย่างคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร [6]*

| ส่วนผสม | น้ำหนัก (กก.) | ร้อยละ |
|---|---|---|
| ปูนซีเมนต์ (กก.) | 341.7 | 15 |
| หินคลุก (กก.) | 992 | 42 |
| ทรายหยาบ (กก.) | 807 | 34 |
| น้ำ (กก.) | 205 | 9 |
| อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ | 0.6 | |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

*ภาพที่ 16 ตัวอย่างคอนกรีตหลังหล่อ*

*ภาพที่ 17 ตัวอย่างคอนกรีตรับแรงดึง*

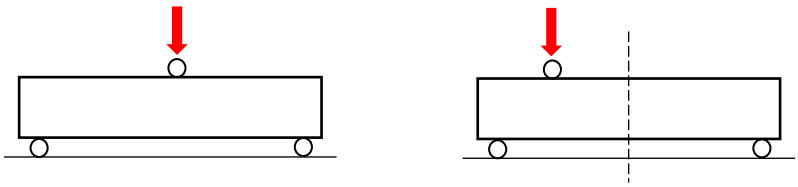
**3.3 การทดสอบตัวอย่าง**

การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในแต่ละการทดสอบจะทำการให้แรงแก่ตัวอย่างและจะหยุดทันที เมื่อรอยร้าวนั้นปรากฏขึ้น โดยจะไม่ให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างคอนกรีตจนเกิดการวิบัติเสียหายพังลง เพื่อที่จะต้องการรอยร้าวบนพื้นผิวคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเริ่มเกิดความเสียหาย

3.3.1 การทดสอบแรงดัด

การทดสอบแรงดัดจะมีการทดสอบด้วยกัน 2 แบบ มีตัวอย่างแบบละ 3 ตัวอย่าง โดยมีจุดรองรับเป็นเหล็กกลม Ø 2 ซม. ไว้ทั้ง 2 ด้านตามแนวยาว ห่างจากขอบตัวอย่าง 2.5 ซม. แบบที่ I จะทำการกดตัวอย่างที่กึ่งกลางผ่านเหล็กกลม Ø 2 ซม. ส่วนแบบที่ II จะกดตัวอย่างห่างจากกึ่งกลาง 10 ซม. ผ่านเหล็กกลม Ø 2 ซม. ลักษณะดังภาพที่ 18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



*ภาพที่ 18 การทดสอบแรงดัดแบบ I และแบบ II*

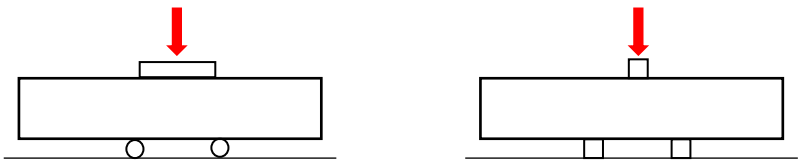
*ภาพที่ 19 เครื่องทดสอบ*

*ภาพที่ 20 ตัวอย่างคอนกรีตขณะทดสอบ*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3.2 การทดสอบแรงเฉือน

การทดสอบแรงเฉือนจะมีการทดสอบ 2 แบบ จะทำการทดสอบกดตัวอย่างแบบละ 3 ตัวอย่าง โดยจะวางจุดรองรับ (เหล็กกลม Ø 2 ซม. และเหล็ก 2x2 ซม.) ไว้ทั้ง 2 ด้านตามแนวยาว ตรงกึ่งกลาง ห่างกัน 10 ซม. แบบที่ I จะทำการกดตัวอย่างที่กึ่งกลางตัวอย่างผ่านแผ่นเหล็ก กว้าง 10 ซม. หนา 2 ซม. และแบบที่ II จะกดตัวอย่างที่กึ่งกลางตัวอย่างผ่านเหล็ก 2x2 ซม. ลักษณะดังภาพที่ 21



*ภาพที่ 21 การทดสอบแรงเฉือนแบบ I และแบบ II*

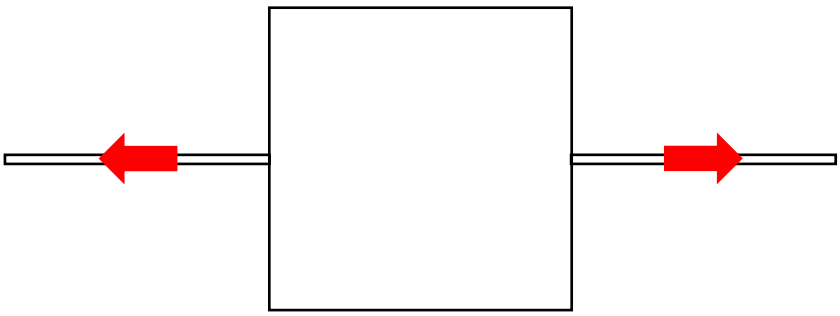
*ภาพที่ 22 การทดสอบแรงเฉือนแบบ I*

*ภาพที่ 23 การทดสอบแรงเฉือนแบบ II*

3.3.3 การทดสอบรับแรงดึง

การทดสอบรับแรงดึงจะทำการทดสอบ โดยการนำตัวอย่างไปยึดที่ปลายเหล็กทั้งสองด้านที่เครื่องทดสอบ หลังจากนั้นทำการดึงตัวอย่างจนเกิดรอยร้าว ดังภาพที่ 24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



*ภาพที่ 24 การทดสอบรับแรงดึง (1)*

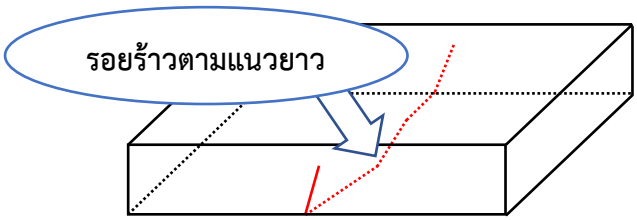
*ภาพที่ 25 การทดสอบรับแรงดึง (2)*

*ภาพที่ 26 การทดสอบรับแรงดึง (3)*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**3.4 การเก็บตัวอย่างภาพ**

การเก็บตัวอย่างภาพจะทำการถ่ายภาพตามแนวของรอยร้าวที่ได้เกิดขึ้นในแต่ละการทดสอบ โดยเบื้องต้นจะทำการถ่ายภาพในมุมระนาบที่สามารถมองเห็นรอยร้าวได้ทั้งหมดของทุกมุมที่มีรอยร้าวเกิดขึ้น ดังภาพที่ 27



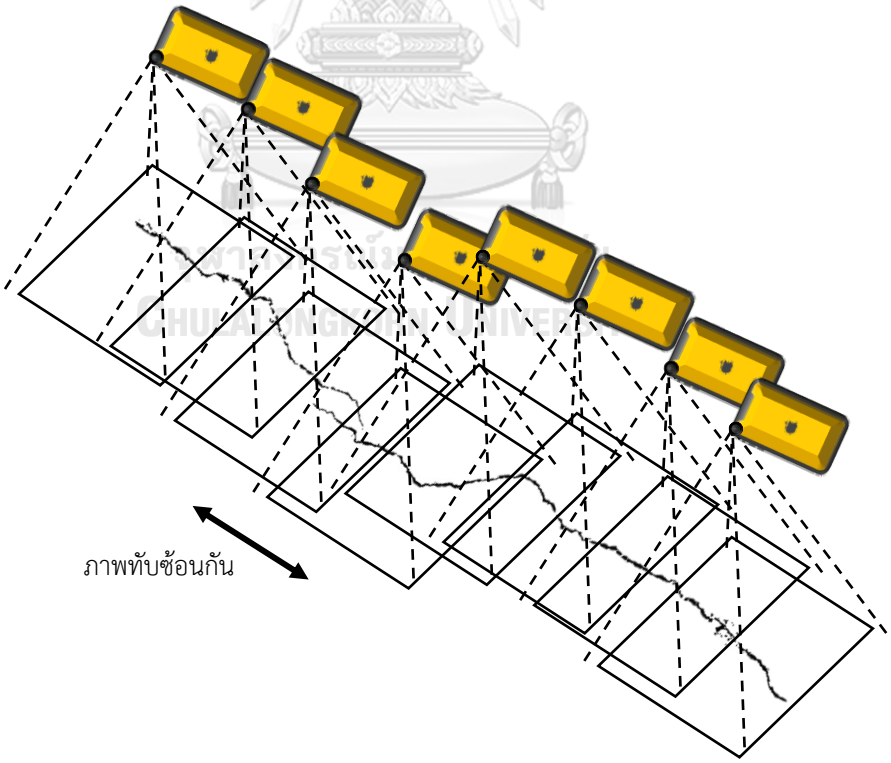

*ภาพที่ 27 ตำแหน่งรอยร้าวแนวยาวที่ใช้ในการถ่ายภาพ*

ต่อมาใช้ Chula Smart Lens ดังภาพที่ 29 ติดตั้งบนโทรศัพท์มือถือ Iphone7 ดังภาพที่ 30 ทำการถ่ายภาพรอยร้าว ตามแนวรอยร้าวที่ได้เกิดขึ้นและจะทำการถ่ายภาพให้มีส่วนที่ทับซ้อนกันกัน ดังภาพที่ 28 เพื่อใช้สำหรับการสร้างแบบจำลอง โดยการใช้ Chula Smart Lens ในการถ่ายภาพ แต่ละเลนส์จะมีระยะโฟกัสที่ไม่เท่ากัน โดยยิ่งเลนส์มีกำลังขยายมาก ก็จะทำให้ได้จำนวนภาพที่มากและบริเวณพื้นที่รอบรอยร้าวก็น้อยลงตาม ข้อมูล Chula Smart Lens ดังตารางที่ 3

*ตารางที่ 3 ข้อมูลเบื้องต้นของ Chula Smart Lens [3]*

| Chula Smart Lens | | | |
|---|---|---|---|
| กำลังขยาย, เท่า | ระยะโฟกัส, ซม. | ขนาดภาพ, ซม. | จำนวนภาพต่อ ซม.* |
| 20 | 2.0 | 1.6x1.6 | 1 - 2 |
| 40 | 1.6 | 0.4x0.4 | 2 - 5 |
| 50 | 0.1 | 0.3x0.3 | 6 - 7 |

*ภาพถ่ายมีส่วนที่ทับซ้อนเกี่ยวกัน




*ภาพที่ 28 การถ่ายภาพตามแนวยาวของรอยร้าว*

*ภาพที่ 29 Chula Smart Lens 20x 40x 50x*

*ภาพที่ 30 การติด Chula Smart Lens กับ Iphone7*

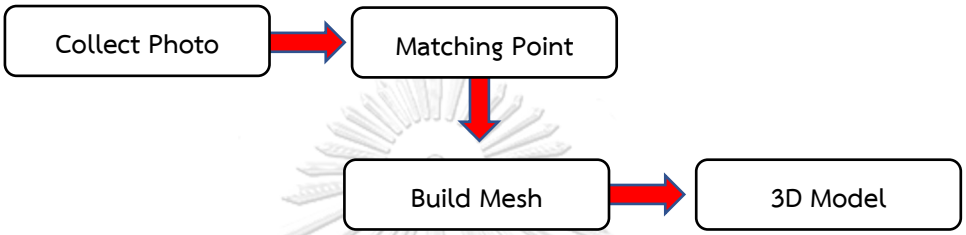
การควบคุมระยะโฟกัสนั้น จะมีการสร้างหรือหาวัสดุที่ทำเป็นฐานได้ให้มีความมั่นคง สำหรับการตั้ง Iphone7 ในขณะถ่ายภาพ ซึ่งฐานนั้นสามารถเลื่อนไปตามรอยร้าวที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งส่วนนี้เองอาจทำให้ระยะโฟกัสคลาดเคลื่อนได้ อันเนื่องมาจากการเลื่อนฐานของผู้วิจัยเอง

การถ่ายภาพโดยใช้ Chula Smart Lens คู่กับ Iphone7 จำเป็นต้องมีการควบคุมแสง หากไม่มีการควบคุมแสงจะส่งผลต่อภาพถ่ายในการประมวลผลภาพได้ อาจทำให้ผลลัพธ์ที่ออกมามีความคลาดเคลื่อนได้ โดยการควบคุมแสงในการถ่ายภาพนั้นจะวางตำแหน่งและระยะโฟกัสในการถ่ายภาพไม่ให้มีเงามาตกกระทบต่อบริเวณรอยร้าว แต่ในส่วนของการถ่ายภาพโดย Chula Smart Lens ที่มีกำลังขยาย 50 เท่า เนื่องด้วยระยะโฟกัสที่ใกล้ชิดกับพื้นผิวคอนกรีตมากทำให้ขาดแสงสว่าง ทำให้ภาพถ่ายที่ออกมามืด จึงจำเป็นต้องมีการฉายแสงเสริม (การฉายแสงเสริมเมื่อวางทิศทางใด ต้องวางทิศทางนั้นตลอดการถ่ายภาพรอยร้าวตลอดช่วง)

ดังนั้น ภาพถ่ายรอยร้าวที่ได้มานั้นจะมีอยู่ด้วยกัน 4 แบบ คือ (1) ภาพถ่ายในมุมมองภาพรวมแต่ละระนาบ (2) ภาพถ่ายกำลังขยาย 20 เท่า (3) ภาพถ่ายกำลังขยาย 40 เท่า และ (4) ภาพถ่ายกำลังขยาย 50 เท่า

### 3.5 การสร้างแบบจำลองรอยร้าวคอนกรีต

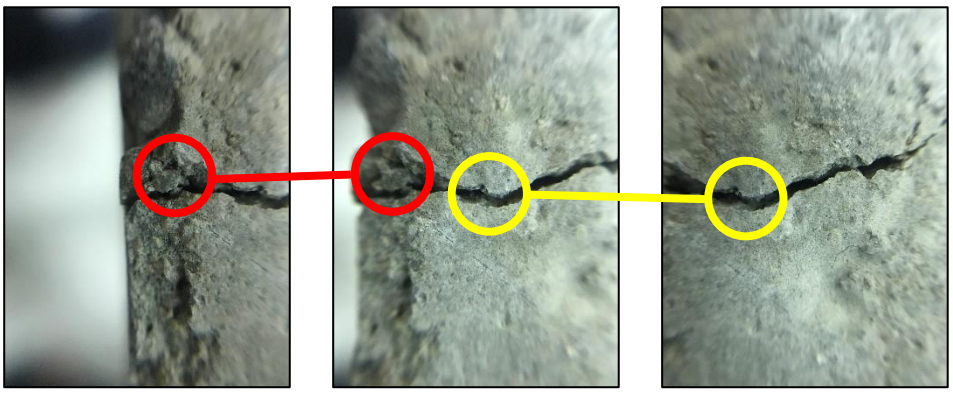
ขั้นตอนนี้เป็นการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลภาพ ซึ่งเป็นการนำภาพถ่ายรอยร้าวทั้ง 4 แบบ เข้าโปรแกรม โดยภาพถ่ายรอยร้าวแต่ละแบบนั้นควรมีการจัดเรียงลำดับและในระหว่างภาพถ่ายควรมีจุดที่ทับซ้อนที่สามารถเห็นได้ชัดเจน จากนั้นจะทำการจัดเรียงและหาจุดที่ทับซ้อนกัน แล้วทำเครื่องหมายกำกับจุดที่ทับซ้อนของภาพถ่าย เพื่อให้โปรแกรมสามารถการสร้างแบบจำลองได้ง่ายขึ้น โดยมีขั้นตอนเบื้องต้น ดังภาพที่ 31




*ภาพที่ 31 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเบื้องต้น*

3.5.1 การนำภาพเข้าและการหาจุดทับซ้อน

การรวบรวมภาพถ่ายเข้าโปรแกรมจะเป็นการนำภาพมาจากการถ่ายรอยร้าวคอนกรีตจากการทดสอบที่ได้กำหนดไว้ โดยภาพถ่ายที่นำเข้าจะต้องมีการจัดเรียงลำดับความต่อเนื่องของภาพ ต้องมีลักษณะภาพที่มีความต่อเนื่องกันและมีจุดที่ทับซ้อนคาบเกี่ยวกันในระหว่างภาพถ่าย ดังภาพที่ 32 จากนั้นทำการสำรวจหาจุดทับซ้อนในแต่ละภาพและทำการกำกับจุดตำแหน่งที่ทับซ้อน (Marker) กันระหว่างภาพ เพื่อให้ตัวโปรแกรมสามารถประมวลผลความต่อเนื่องของลำดับภาพได้ ขั้นตอนนี้ใช้เวลามากน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนภาพที่ได้นำเข้ามาก หากภาพถ่ายไม่มีจุดทับซ้อนที่เด่นชัด อาจทำให้แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนผิดพลาดได้



*ภาพที่ 32 ตำแหน่งจุดภาพที่ทับซ้อนคาบเกี่ยวกัน*

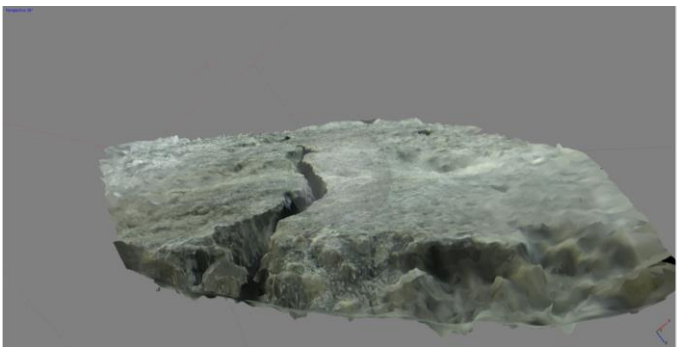
3.5.2 การสร้างแบบจำลอง

หลังจากการกำกับจุดตำแหน่งที่ทับซ้อนกันระหว่างภาพเสร็จแล้ว ทำการตั้งค่าจำนวนจุด (Key Point) ที่จะสร้างในแต่ละภาพ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาพ ตั้งค่าจำนวนจุดที่เหมือนกัน (Tie Point) ระหว่างภาพ เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง และตั้งค่าระดับความแม่นยำที่จะให้ตัวโปรแกรมประมวลผล

ต่อมาใช้คำสั่งภายในโปรแกรมทำการสร้างแบบจำลอง (Building Mesh) ขึ้นมา ซึ่งความแม่นยำ ความถูกต้องของแบบจำลองจะขึ้นอยู่กับลักษณะความเด่นชัดของภาพถ่ายที่นำเข้ามาและการตั้งค่าเบื้องต้น หากแบบจำลองแสดงความผิดพลาดขึ้นให้ทำการตรวจสอบการกำกับจุดที่ทับซ้อนใหม่และกำหนดค่าจำนวนจุดในแต่ละภาพใหม่จนกว่าจะได้แบบจำลองตามความต้องการ

เมื่อได้แบบจำลองรอยร้าวตามลักาณะภาพถ่าย ต่อมาจะทำการเพิ่มรายละเอียดต่อพื้นผิวแบบจำลอง โดยการนำภาพถ่ายมารวมกับพื้นผิวแบบจำลอง (Build Texture) และทำการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิวแบบจำลอง (Build DEM) ซึ่งทำให้แบบจำลองรอยร้าวคอนกรีตที่ได้มีความละเอียดสมจริงยิ่งขึ้น จากนั้นทำการนำแบบจำลองที่ได้ไปดูลักษณะพื้นผิวรอยร้าวและวิเคราะห์ต่อไป ดังตัวอย่างภาพที่ 33 และภาพที่ 34

*ภาพที่ 33 แบบจำลองลักษณะพื้นผิวรอยร้าวคอนกรีต (มุมมองด้านบน)*



*ภาพที่ 34 แบบจำลองลักษณะพื้นผิวรอยร้าวคอนกรีต (มุมมองด้านข้าง)*

เนื่องด้วยภาพถ่ายพื้นผิวรอยร้าวแต่ละแบบที่นำเข้ามานั้นเป็นภาพถ่าย 2 มิติ ดังนั้น แบบจำลองที่ได้จากขั้นตอนนี้จะเป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการสมมติและสร้างมาจากตัวโปรแกรม โดยมีข้อมูลพื้นฐานอ้างอิงจากภาพถ่าย ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนที่ต่างไปจากสภาพพื้นผิวรอยร้าวของจริงได้

**3.6 การประมวลผลภาพ**

ขั้นตอนนี้เป็นการนำภาพรอยร้าวคอนกรีตเข้าโปรแกรม MATLAB เพื่อเข้ากระบวนการประมวลผลภาพ โดยเริ่มจากนำภาพถ่ายเข้ามาปรับปรุง ต่อมาทำการแปลงภาพสี (RBG Image) เป็นภาพสีเทา (Gray Image) สำหรับนำไปแปลงภาพเป็นสีขาวดำ (Binary Image) และปรับปรุงลบจุดรบกวน (Noise) ออก เพื่อนำไปใช้ในตรวจวัดและวิเคราะห์ลักษณะความแตกต่างบริเวณพื้นผิวของรอยร้าวที่เกิดจากแต่ละการทดสอบ โดยใช้หลักองค์ความรู้ของการประมวลผลภาพ

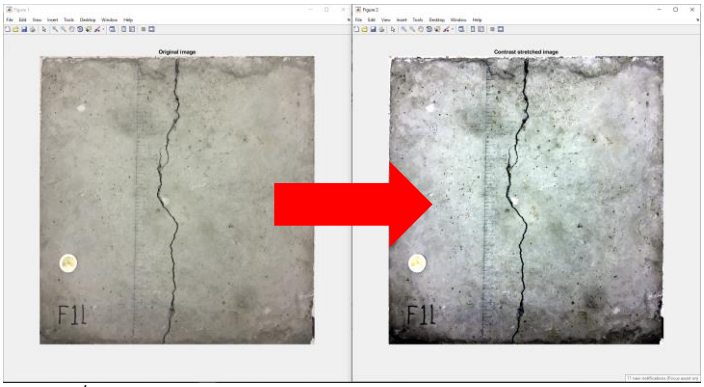
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.6.1 การนำภาพเข้า

การนำภาพเข้าจะใช้ภาพรอยร้าวที่ถ่ายจากแต่ละการทดสอบตัวอย่าง ลักษณะภาพเบื้องต้นที่ใช้ จะต้องสามารถเห็นรอยร้าวได้ด้วยตาเปล่า มีแสงสว่างภายในภาพอย่างเพียงพอ ภาพไม่มืดจนเกินไปและใช้คำสั่งฟังก์ชันในการเรียกภาพนำเข้าโปรแกรม

3.6.2 ปรับปรุงภาพ

ขั้นตอนนี้เป็นการนำภาพเข้ามาและใช้คำสั่งฟังก์ชันในการปรับปรุงภาพ ทำให้ภาพส่วนที่มีโทนสีดำมีความเข้มขึ้น ส่งผลให้มีภาพในส่วนที่เป็นรอยร้าวความคม เห็นชัดเจนขึ้น ดังภาพที่ 35



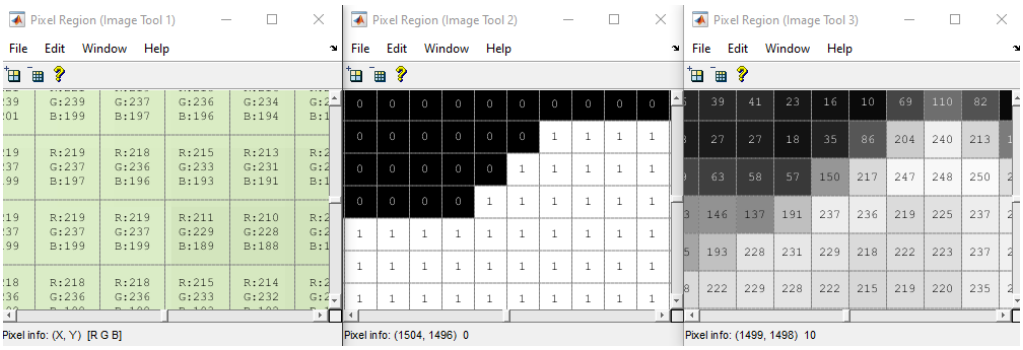
*ภาพที่ 35 (ซ้าย) ภาพต้นฉบับ (ขวา) ภาพหลังปรับปรุง*

ต่อมาทำการแปลงภาพจากภาพสี (RBG Image) เป็นภาพสีเทา (Gray Image) ส่วนนี้จะทำให้ค่าจุดภาพ (Pixel) มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเดิมค่าจุดภาพของภาพสีแต่ละจุดมีค่า R, G และ B แต่ละค่ามีตัวเลขระหว่าง 0-255 ทำให้ไม่สะดวกต่อการประมวลผลภาพ จึงต้องมีการแปลงภาพสีเป็นภาพสีเทา ทำให้ค่าจุดภาพแต่ละจุดมีค่าเป็นเลขตัวเดียว คือ 0-255 ส่งผลให้สะดวกต่อการประมวลผลภาพต่อ โดยค่าจุดภาพแต่ละประเภท ดังตารางที่ 4 และมีภาพตัวอย่าง ดังภาพที่ 36

*ตารางที่ 4 ค่าจุดภาพแต่ละประเภท [4]*

| Image | Value of Pixel (Per 1 Pixel) | |
|---|---|---|
| RGB | R | 0 - 255 |
| | G | 0 - 255 |
| | B | 0 - 255 |
| Gray | 0 - 255 | |
| Binary | B | 0 |
| | W | 1 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

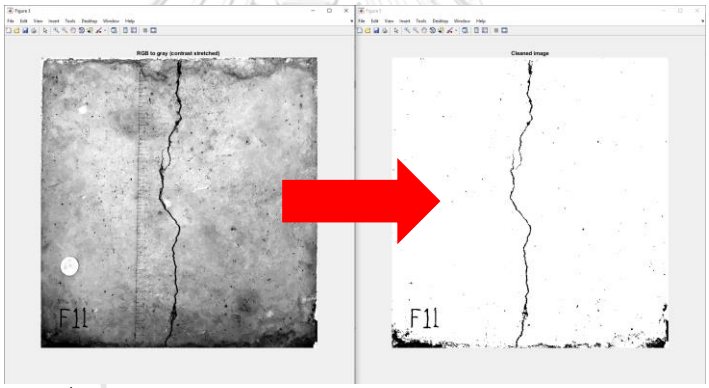



*ภาพที่ 36 จุดภาพของ RGB, Binary และ Gray Image ตามลำดับ*

3.6.3 การตรวจสอบรอยร้าว

ขั้นตอนนี้เป็นการนำภาพสีเทา (Gray Image) มาใช้สำหรับการหาลักษณะพื้นผิวของรอยร้าวและภาพสีขาว (Binary Image) ใช้สำหรับตรวจวัดหาขนาดความกว้าง ความยาวและพื้นที่รอยร้าวที่เกิดขึ้น โดยแบ่งเป็นส่วนในการประมวล ดังนี้

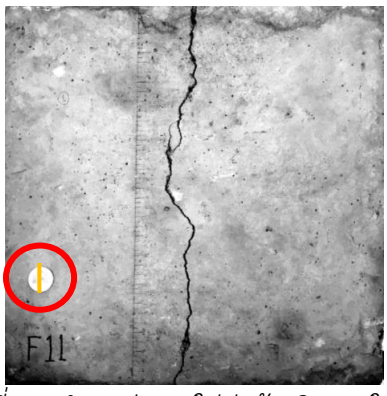
1. ส่วนแรกจะนำภาพสีเทามาแปลงเป็นภาพขาวดำ (Binary Image) เดิมค่าจุดภาพของภาพสีเทาแต่ละจุดมีค่าเป็นเลขตัวเดียว (0-255) เมื่อทำการแปลงเป็นภาพสีขาวดำ ทำให้ค่าจุดภาพเปลี่ยนไปเป็น 0 (ดำ) และ 1 (ขาว) จากนั้นทำการใช้คำสั่งมอร์โฟโลจีกับภาพขาวดำต่อ ซึ่งเป็นการประมวลผลด้านโครงสร้างเกี่ยวของกับการแยกสวนประกอบของภาพ เพื่อใช้ในการแสดงลักษณะรูปร่าง ส่วนนี้จึงส่งผลทำให้สามารถตรวจจับและแสดงขอบเขตทิศทางลักษณะรูปร่างรอยร้าวที่ชัดเจนขึ้น ตัวอย่างดังภาพที่ 37



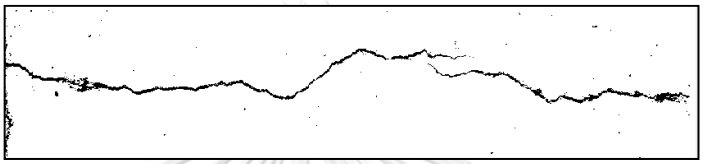

*ภาพที่ 37 ภาพรอยร้าวสีขาวดำหลังจากผ่านการประมวลผลภาพ*

2. ส่วนที่สองเป็นการใช้ตำแหน่งจุดภาพ (Pixel) มาใช้ประมวลผลทางรูปร่างเรขาคณิตร่วมกับสมการคณิตศาสตร์ เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพจากภาพรอยร้าว นั้นคือ พื้นที่ ความยาวและความกว้างของรอยร้าว การหาค่าดังกล่าวเริ่มจากการใส่ค่าอ้างอิงลงไปในภาพสีเทา โดยการระบุหน่วยและระยะค่าที่ใช้เป็นค่าอ้างอิง ดังภาพที่ 38 เมื่อใส่ค่าอ้างอิงภายในภาพแล้ว จากนั้นจะทำการแปลงภาพสีเทาที่ได้ใส่ค่าอ้างอิงแปลงเป็นภาพสีขาวดำ เพื่อหาความกว้าง ความยาวและพื้นที่ของรอยร้าว ซึ่งรอยร้าวที่ได้นั้นจะแสดงเป็นภาพสีดำ โดยค่าดังกล่าวจะนับจากจุดภาพสีดำที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 39

CHULALONGKORN UNIVERSITY

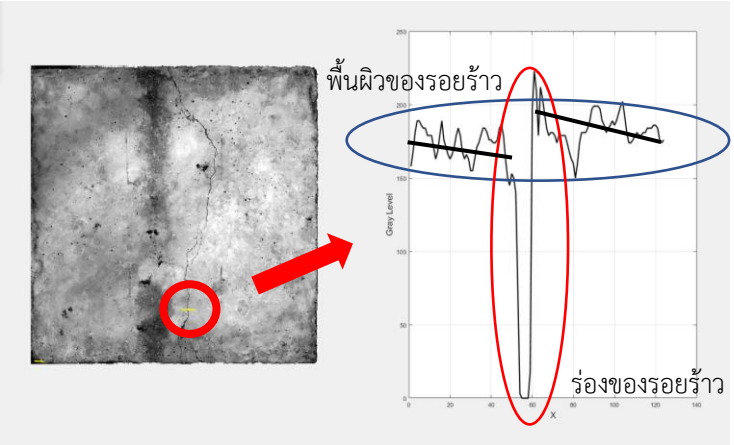



*ภาพที่ 38 ตำแหน่งการใส่ค่าอ้างอิงภายในภาพ*

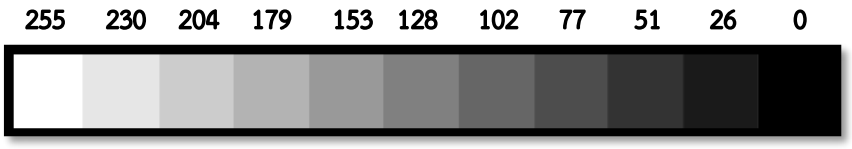


*ภาพที่ 39 ภาพรอยร้าวสีขาวดำสำหรับอ่านค่า*

3. ส่วนสุดท้ายเป็นนำภาพสีเทามาวิเคราะห์หาลักษณะพื้นผิวรอยร้าวจากค่าระดับจุดภาพของสีเทา (0 - 255) ดังภาพที่ 41 โดยจะทำการลากเส้นข้ามรอยร้าวและบริเวณรอบข้าง จากนั้นดูลักษณะพื้นผิวรอยร้าวได้จากกราฟระยะทาง – ค่าระดับจุดภาพ รอยร้าวส่วนที่เป็นร่องลึกจะมีจุดภาพเป็นสีดำ (0) และไล่ไต่ระดับสีขึ้นมาจนเป็นจุดภาพที่สว่างขาว (255) ดังนั้น กราฟระยะทาง – ค่าระดับจุดภาพ ทำให้เห็นลักษณะพื้นผิวของรอยร้าวแต่ละการทดสอบโดยรอบว่ามีลักษณะอย่างไร โดยบริเวณลักษณะพื้นผิวของรอยร้าวรอบข้างจะใช้เส้นตรงแทนที่ ซึ่งประมาณจากค่าแนวโน้มทั้งสองข้างของร่องรอยร้าว ดังภาพที่ 40




*ภาพที่ 40 ตำแหน่งที่พิจารณาและกราฟระยะทาง - ค่าระดับจุดภาพ*



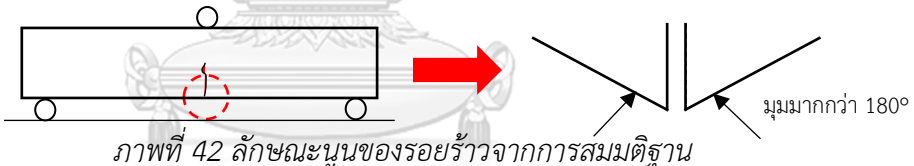

*ภาพที่ 41 ค่าจุดภาพระดับสีเทาจากตื้นไปลึก [4]*

### 3.7 การวิเคราะห์รอยร้าวจากสมมติฐาน

ขั้นตอนนี้เป็นการนำ กราฟระยะทาง – ค่าระดับจุดภาพ มาวิเคราะห์หาลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นว่าเป็นอย่างไร ซึ่งทางผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานของลักษณะพื้นผิวของรอยร้าวจากแต่ละการทดสอบไว้ ดังนี้

3.7.1 สมมติฐานรอยร้าวจากการทดสอบแรงดัด

รอยร้าวคอนกรีตจากการทดสอบแรงดัด ได้สมมติฐานว่ารอยร้าวตามแนวยาวตรงบริเวณขอบรอยร้าวอาจมีลักษณะที่นูนหรือเส้นระดับพื้นผิวมีการทำมุมมากกว่า 180 องศา ขึ้นไป ดังภาพที่ 42

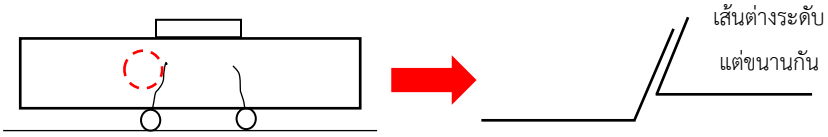



*ภาพที่ 42 ลักษณะนูนของรอยร้าวจากการสมมติฐาน*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.7.2 สมมติฐานรอยร้าวจากการทดสอบแรงเฉือน

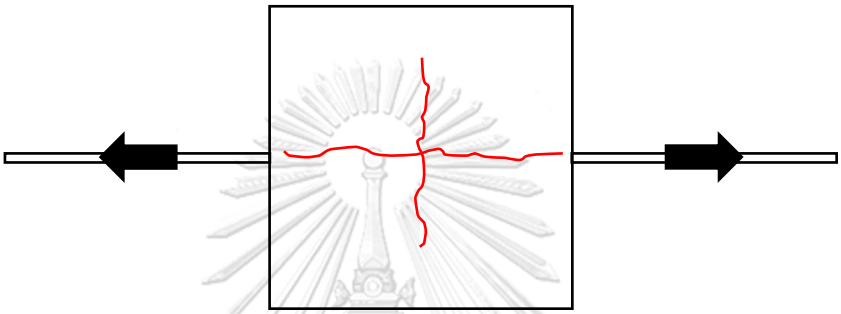
รอยร้าวคอนกรีตจากการทดสอบแรงเฉือน ได้สมมติฐานว่ารอยร้าวตามแนวยาวตรงบริเวณขอบรอยร้าวอาจมีลักษณะระดับที่ต่างกันหรือมีเส้นระดับพื้นผิวมีความห่างกันที่สังเกตได้ชัดเจน แต่เส้นระดับนั้นยังคงขนานกันอยู่ ดังภาพที่ 43




*ภาพที่ 43 ลักษณะระดับที่ต่างกันของรอยร้าวจากสมมติฐาน*

3.7.3 สมมติฐานรอยร้าวจากทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงได้มีการดึงตัวอย่างคอนกรีตตัวอย่างเดียว คาดว่ารอยร้าวจะเกิดตามแนวเหล็กเส้นและแนวขวางที่ตรงกลางตัวอย่าง เมื่อมองในมุมด้านข้างอาจตั้งสมมติฐานได้ว่าการแยกตัวของรอยร้าวในระดับที่เท่าหรือต่างกันเล็กน้อยตามแนวเหล็กเส้นและแนวขวาง ดังภาพที่ 44 หรือมีเส้นระดับพื้นผิวนั้นมีระดับที่ใกล้เคียงกัน ยังคงขนานกันอยู่และทำมุมประมาณ 180 องศา ดังภาพที่ 45



ภาพที่ 44 ตำแหน่งรอยร้าวจากการคาดการณ์

*ภาพที่ 45 การแยกของรอยร้าวในระดับที่เท่ากันจากการสมมติฐาน*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# บทที่ 4
# ผลการทดสอบ

การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 3 การทดสอบ คือ การทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงเฉือน และการทดสอบแรงดึง แต่ละการทดสอบจะทำการให้แรงแก่ตัวอย่างคอนกรีตและหยุดทันที เมื่อตัวอย่างรอยร้าวเริ่มปรากฏขึ้น โดยจะไม่ให้แรงแก่ตัวอย่างจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ โดยตัวอย่างแต่ละการทดสอบจะเกิดการแตกร้าวขึ้นจากการให้แรง ซึ่งผลจากการให้แรงแก่ตัวอย่างจนเริ่มแตกร้าวนั้นเป็นดังตารางที่ 5

*ตารางที่ 5 ผลการให้แรงแต่ละการทดสอบ*

| การทดสอบ | | การให้แรง, ครั้งที่ (กก.) | | | แรงเฉลี่ย (กก.) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | |
| แรงดัด | แบบ I | 1,600 | 1,600 | 1,600 | 1,600 |
| | แบบ II | 3,400 | 2,300 | 2,350 | 2,683 |
| แรงเฉือน | แบบ I | 6,400 | 6,250 | 6,100 | 6,250 |
| | แบบ II | มากกว่า 10,000 กก. | | | |
| แรงดึง | - | 6,000 | - | - | 6,000 |

หลังจากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตจะได้ลักษณะรอยร้าวตามลักษณะแรงที่ได้กำหนดไว้ ภาพที่ 46 และภาพที่ 47 เป็นภาพรอยร้าวจาการทดสอบแรงดัดและแรงเฉือน ตามลำดับ ทิศทางของลักษณะรอยร้าวนั้นจะเกิดตามแนวแรงที่ได้กระทำ ณ ตำแหน่งตลอดแนวตรงกลางของตัวอย่างคอนกรีต และภาพที่ 48 เป็นภาพรอยร้าวจาการทดสอบแรงดึงจะเกิดขึ้น 2 ทิศทาง ทิศทางแรกของรอยร้าวนั้นจะเกิดตามแนวเหล็กเสริม DB12 ซึ่งเกิดจากการขยายตัวและยืดออกของเหล็กเสริมที่ได้ถูกดึงโดยเครื่องทดสอบ ส่วนอีกทิศทางของรอยร้าวนั้นเกิดขึ้นตรงกลางตัวอย่างคอนกรีต เป็นแนวขวางของเหล็กเสริม ซึ่งเกิดจากการแยกตัวของตัวเนื้อคอนกรีตเองที่ไม่สามารถรับแรงดึงได้ (เนื้อคอนกรีตมีการยึดรั้งกับเหล็กเสริม DB12) เหตุรอยร้าวที่เกิดขึ้นตรงกลางนั้น เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตนั้นถูกแรงดึงที่สมมาตรและสมดุลกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

*ภาพที่ 46 รอยร้าวจากการทดสอบแรงดัด*

*ภาพที่ 47 รอยร้าวจากการทดสอบแรงเฉือน*

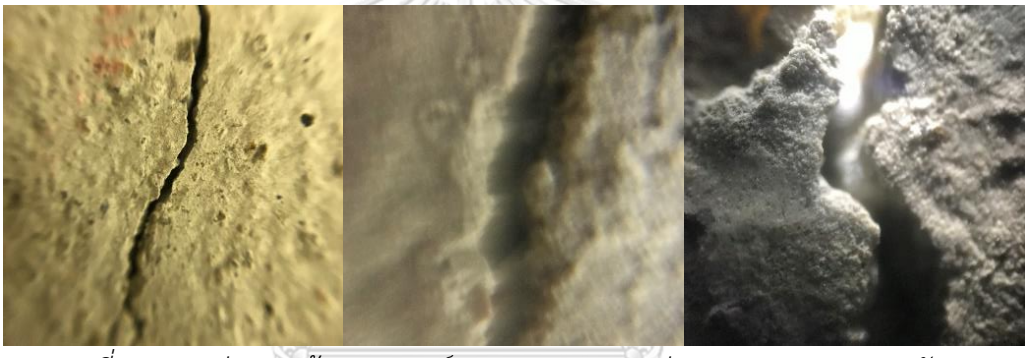
*ภาพที่ 48 รอยร้าวจากการทดสอบแรงดึง*

**4.1 ผลการถ่ายภาพด้วย Chula smart lens**

ภาพรอยร้าวที่ได้จากการถ่ายภาพ ด้วย Chula Smart Lens เลนส์กำลังขยาย 20, 40 และ 50 เท่า ใช้งานคู่กับโทรศัพท์มือถือ Iphone7 ทำให้ได้ภาพจากแต่ละการทดสอบที่มีกำลังขยายใกล้ชิดกับรอยร้าว โดยมีตัวอย่างภาพ ดังนี้

4.1.1 ภาพรอยร้าวจากการทดสอบแรงดัด

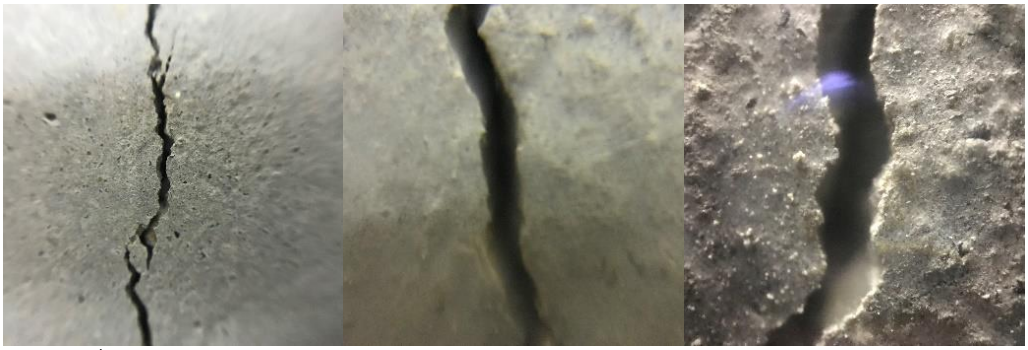
*ภาพที่ 49 ภาพถ่ายรอยร้าวจากเลนส์ 20, 40 และ 50 เท่า จากการทดสอบแรงดัด (1)*



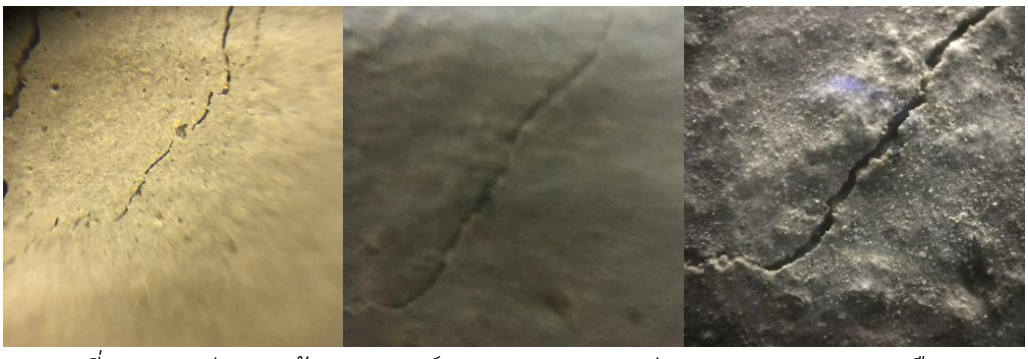
*ภาพที่ 50 ภาพถ่ายรอยร้าวจากเลนส์ 20, 40 และ 50 เท่า จากการทดสอบแรงดัด (2)*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.2 ภาพรอยร้าวจากการทดสอบแรงเฉือน

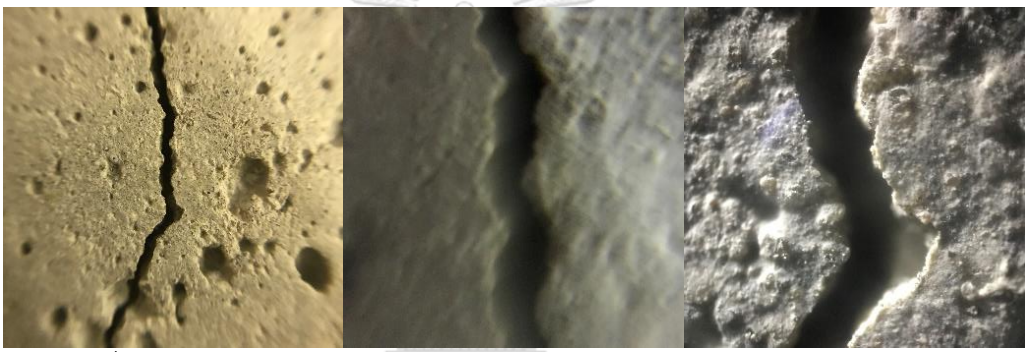


*ภาพที่ 51 ภาพถ่ายรอยร้าวจากเลนส์ 20, 40 และ 50 เท่า จากการทดสอบแรงเฉือน (1)*

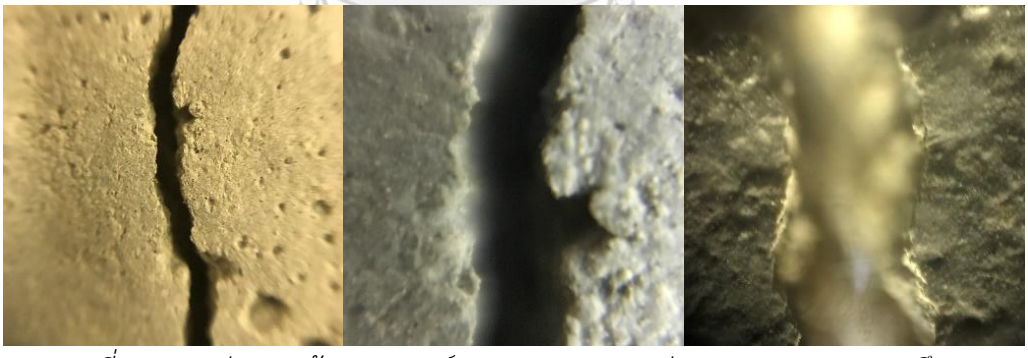


*ภาพที่ 52 ภาพถ่ายรอยร้าวจากเลนส์ 20, 40 และ 50 เท่า จากการทดสอบแรงเฉือน (2)*

4.1.3 ภาพรอยร้าวจากการทดสอบแรงดึง



*ภาพที่ 53 ภาพถ่ายรอยร้าวจากเลนส์ 20, 40 และ 50 เท่า จากการทดสอบแรงดึง (1)*



*ภาพที่ 54 ภาพถ่ายรอยร้าวจากเลนส์ 20, 40 และ 50 เท่า จากการทดสอบแรงดึง (2)*

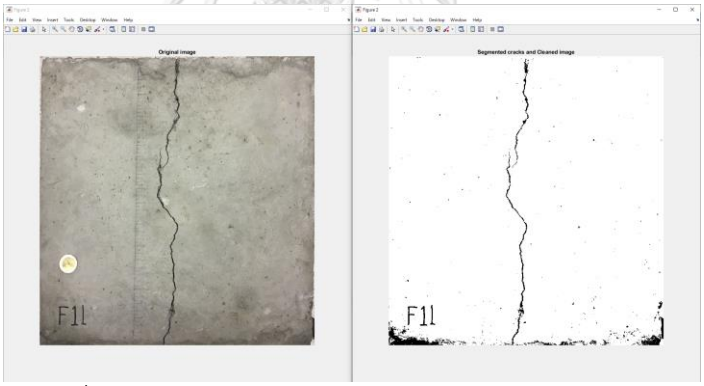
ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้ปรากฏดังข้างต้นนั้น (ภาพที่ 49 ถึงภาพที่ 54) เป็นภาพถ่ายรอยร้าวที่ได้จากเลนส์ที่มีกำลังขยาย 20, 40 และ 50 เท่า ใช้คู่กับ Iphone7 โดยลักษณะทั่วไปของภาพถ่ายที่ได้มานั้นจะมีการโฟกัสที่ชัดเจนเป็นวงกลมบริเวณตรงกลางของภาพถ่ายและบริเวณรอบข้างหรือตรงขอบของภาพถ่ายจะมีลักษณะภาพที่เบลอไม่ชัดเจน ลักษณะดังที่ได้กล่าวไปนั้นเกิดมาจากตัว Chula Smart Lens เองที่มีพื้นผิวเลนส์ที่นูนโค้งออกมา จึงเป็นเหตุทำให้เกิดลักษณะดังกล่าวขึ้น

ดังตัวอย่างภาพที่ 49 ถึงภาพที่ 54 จะเห็นได้ว่า ยิ่งเลนส์มีกำลังขยายมากเท่าใด ก็จะทำให้ได้เห็นรอยร้าวที่ใกล้ชิดขึ้น ความละเอียดที่มีมากตามเช่นกัน แต่ในทางกลับกันบริเวณโดยรอบของรอยร้าวนั้นก็จะน้อยลง มุมมองของภาพก็จะแคบขึ้น อีกทั้งจำนวนภาพที่ต้องถ่าย เก็บเป็นข้อมูลก็จะมีจำนวนมาก

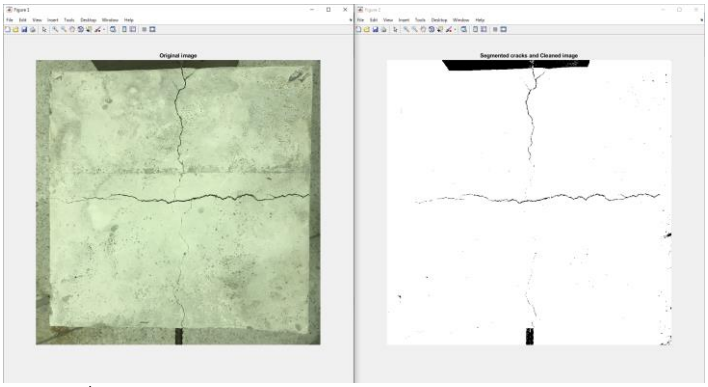
**4.2 ผลจากการตรวจวัดรอยร้าวคอนกรีต**

ส่วนนี้เป็นการนำภาพถ่ายรอยร้าวแต่ละแบบที่ได้จากตัวอย่างคอนกรีตแต่ละการทดสอบนำเข้าโปรแกรม MATLAB ทำการประมวลผลภาพ จึงได้ผลลัพธ์ ดังนี้

ภาพถ่ายที่ผ่านการประมวลผลภาพและสามารถแสดงลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นนั้น จากการทดลองพบว่า ลักษณะทิศทางของรอยร้าวนั้นจะเห็นได้ชัดเจน เมื่อภาพถ่ายถูกปรับปรุงและแปลงเป็นภาพขาวดำ (Binary Image) โดยลักษณะรอยร้าวที่แสดงออกมาจะมีจุดภาพเป็นสีดำ แต่อาจมีบางส่วนของภาพที่แสดงขึ้นมา ซึ่งไม่มีความเกี่ยวกับลักษณะรอยร้าว เนื่องจากในส่วนของภาพต้นฉบับนั้นมีจุดภาพโทนสีที่คล้ายคลึงกับจุดภาพของรอยร้าว (สีโทนทึบ/สีโทนดำ) ดังตัวอย่างภาพที่ 55 และภาพที่ 56

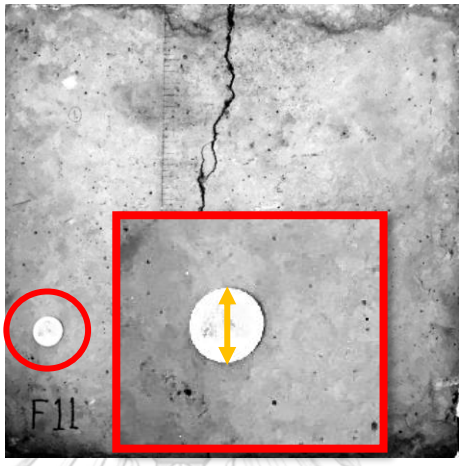



*ภาพที่ 55 ผลการตรวจจับรอยร้าวจากตัวอย่างทดสอบแรงดัด*




*ภาพที่ 56 ผลการตรวจจับรอยร้าวจากตัวอย่างทดสอบแรงดึง*

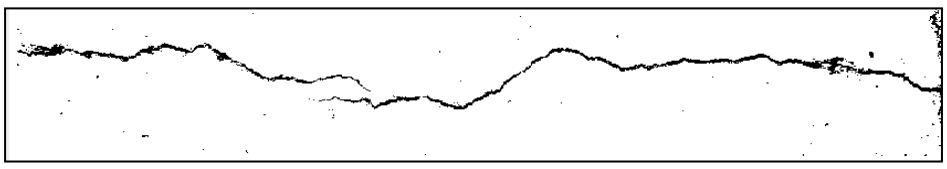
ต่อมาเป็นส่วนในการหาค่าความยาว ความกว้างและพื้นที่ของรอยร้าวที่ปรากฏบนภาพถ่าย งานวิจัยนี้จะเริ่มการหาค่าดังกล่าว จากการที่รู้ค่าอ้างอิงบนภาพถ่ายนั้นก่อนและทำการป้อนข้อมูลนั้นเป็นค่าอ้างอิงลงในภาพสีเทา ดังภาพที่ 57 เพื่อใช้เป็นค่าพื้นฐานในการหาค่าความยาว ความกว้างและพื้นที่ของรอยร้าวต่อไป




*ภาพที่ 57 ค่าอ้างอิงเหรียญ 10 บาท ขนาด 2.6 ซม.*

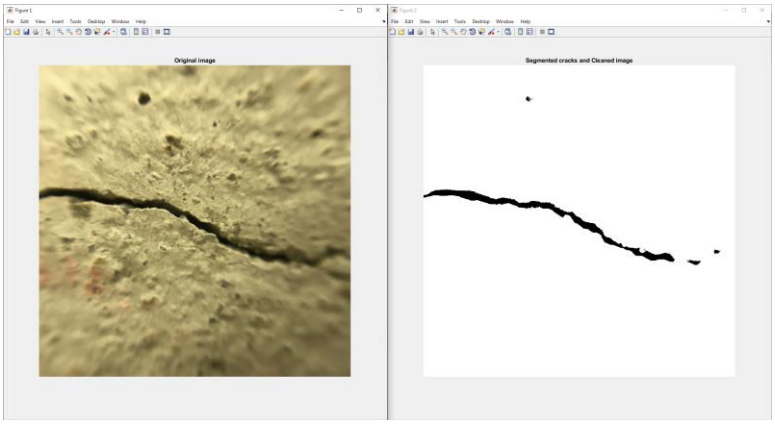
เมื่อรู้ค่าอ้างอิงของตำแหน่งภาพแล้ว จะทำการแปลงภาพสีเทานั้นมาเป็นภาพสีขาวดำ โดยรอยร้าวจะที่มีจุดภาพเป็นสีดำ แต่อาจมีบางส่วนที่ไม่ใช่รอยร้าวปรากฏขึ้น เพราะส่วนนั้นมีสีทึบ/ดำในภาพต้นฉบับ เนื่องจากตัวโปรแกรมจะแปลงภาพจากต้นฉบับที่มีสีโทนทึบ/ดำเป็นหลัก จากนั้นจะให้ตัวโปรแกรมอ่านค่าจุดภาพสีดำทั้งหมดภายในภาพสีขาวดำแปลงค่าออกมาเป็นพื้นที่ของรอยร้าว โดยเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้ใส่ไว้ ในทำนองเดียวกันให้ตัวโปรแกรมอ่านค่าจุดภาพสีดำและนับรวบรวมค่าในแนวแกน x และแนวแกน y หากแนวแกนไหนมีค่ามากกว่าก็จะถูกแปลงเป็นค่าความยาวของรอยร้าว ส่วนอีกแนวแกนจะถูกแปลงเป็นค่าความกว้างของรอยร้าว และค่าความกว้างนั้นจะถูกย่อยแบ่งเป็นช่วงค่าระหว่างของความกว้างรอยร้าว

ตัวอย่างเช่น ภาพที่ 58 เป็นมุมมองภาพรวมของรอยร้าว เมื่อนำไปผ่านกระบวนการตรวจวัดรอยร้าวแล้ว จะได้ค่ารอยร้าวมีความกว้างอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.8 ซม. ความยาว 45.7 ซม. และพื้นที่ของรอยร้าว 14.1 ซม$^2$

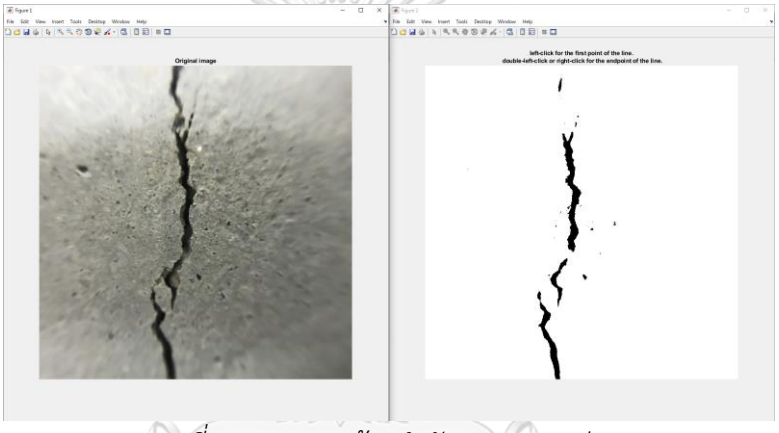


*ภาพที่ 58 ตัวอย่างภาพขาวดำโดยรวมของรอยร้าว*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




*ภาพที่ 59 ภาพรอยร้าวกำลังขยาย 20 เท่า (1)*




*ภาพที่ 60 ภาพรอยร้าวกำลังขยาย 20 เท่า (2)*

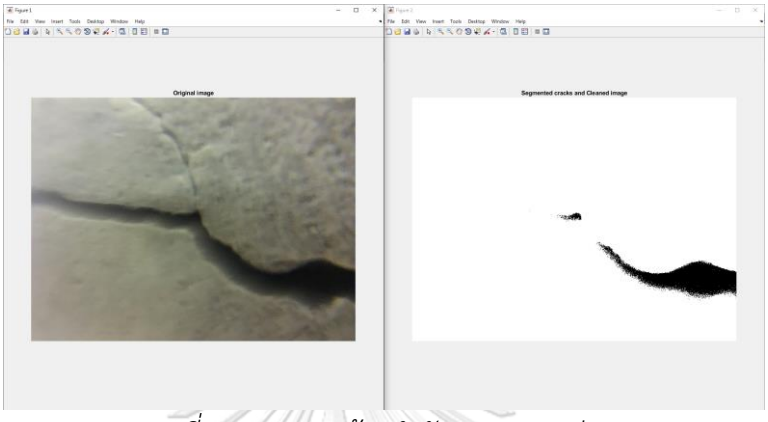
จากตัวอย่าง ภาพที่ 58 ถึง ภาพที่ 60 สามารถนำสรุปเป็นตารางเปรียบเทียบกับค่าที่ได้วัดจริงได้ โดยค่าที่สามารถเทียบได้ คือ ค่าความกว้างและความยาว ดังตารางที่ 6

*ตารางที่ 6 การเทียบค่าการตรวจวัด*

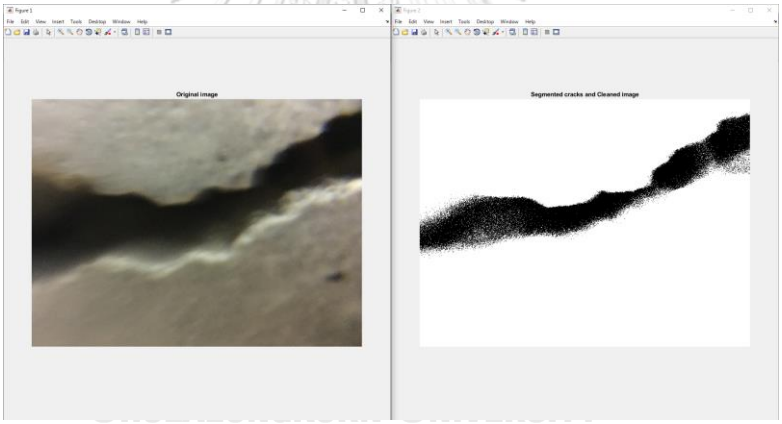
| ภาพที่ | MATLAB | | | จริง | |
|---|---|---|---|---|---|
| | กว้าง | ยาว | พื้นที่ | กว้าง | ยาว |
| 58 | 0.10 – 0.80 | 45.70 | 14.10 | 0.1 – 0.8 | 40.00 |
| 59 | 0.45 – 0.60 | 14.70 | 5.10 | 0.55 | 16.0 |
| 60 | 0.20 – 0.60 | 14.30 | 7.14 | 0.60 | 16.0 |

จากตารางที่ 6 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบที่วัดได้จริงแล้วกับค่าที่ผ่านการตรวจวัดจาก MATLAB แล้ว มีค่าที่คลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ 3.0 – 10.0 เปอร์เซ็นต์

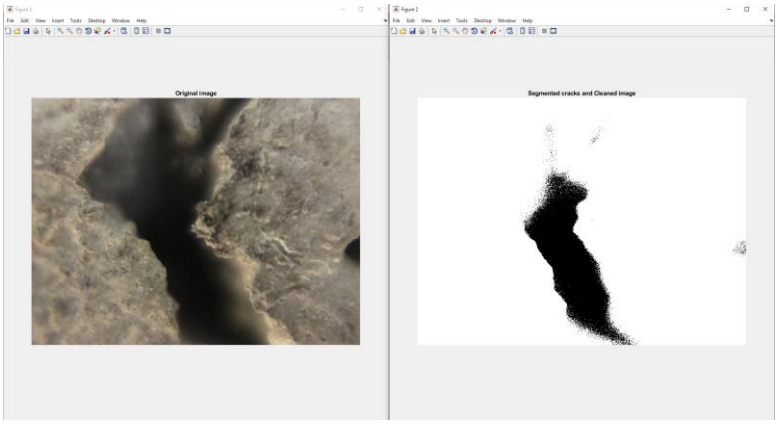
ภาพที่ 61 ถึงภาพที่ 64 เป็นตัวอย่างภาพกำลังขยาย 40 และ 50 เท่า พบว่า รอยร้าวในภาพสีขาวดำเมื่อนำไปเทียบกับภาพต้นฉบับแล้ว รอยร้าวนั้นขาดหายเป็นจำนวนมาก เห็นได้ชัดเจน จึงไม่เหมาะที่จะนำมาตรวจวัด อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก



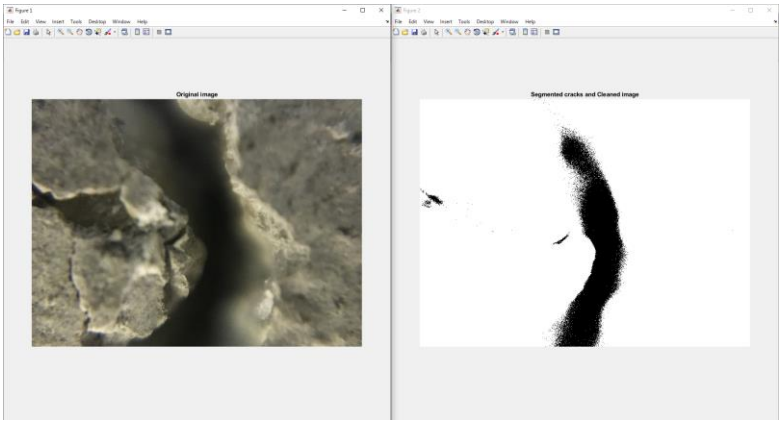

*ภาพที่ 61 ภาพรอยร้าวกำลังขยาย 40 เท่า (1)*




*ภาพที่ 62 ภาพรอยร้าวกำลังขยาย 40 เท่า (2)*




*ภาพที่ 63 ภาพรอยร้าวกำลังขยาย 50 เท่า (1)*




*ภาพที่ 64 ภาพรอยร้าวกำลังขยาย 50 เท่า (2)*

ดังนั้น การตรวจวัดรอยร้าวในงานวิจัยนี้ จะตรวจวัดหาค่าได้ดีโดยใช้ภาพรอยร้าวในมุมมองที่กว้างและภาพกำลังขยาย 20 เท่า อย่างไรก็ตามเมื่อแปลงค่าภาพสีแล้ว ภาพสีขาวดำที่แสดงออกมาอาจมีส่วนที่ขาดหายหรือมีส่วนที่เพิ่มเติมขึ้น ไม่ตรงกับภาพต้นฉบับจริง มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 3 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนภาพกำลังขยาย 40 และ 50 เท่า จะใช้ในการตรวจวัดได้ไม่ดี เนื่องด้วยภาพขาวดำที่ได้แปลงออกมาแล้วมีส่วนที่ขาดหายเป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับภาพต้นฉบับ ทำให้ผลการตรวจวัดที่ออกมามีความคลาดเคลื่อนมาก

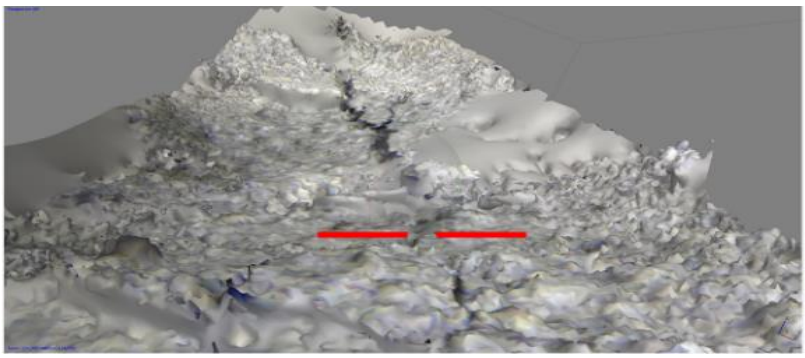
## 4.3 ลักษณะของพื้นผิวรอยร้าวคอนกรีต

4.3.1 ลักษณะพื้นผิวคอนกรีตจากแบบจำลอง

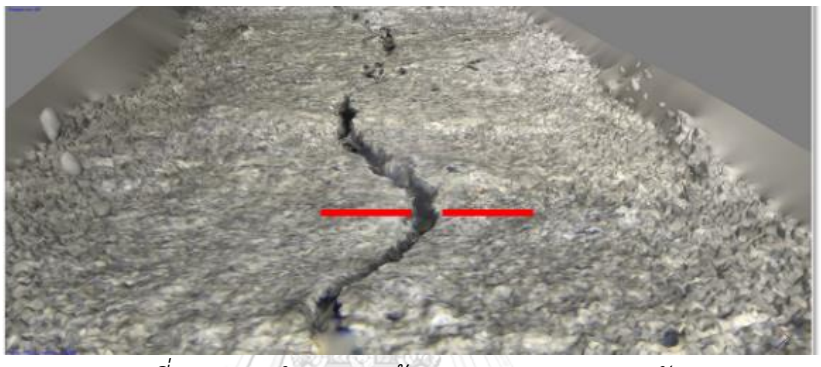
ส่วนแรกจะเป็นการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพโดยนำภาพถ่ายแต่ละการทดสอบมาจัดเรียงและสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของงานวิจัยนี้จะเป็นช่วง ๆ ในการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากภาพต้นฉบับเป็นรอยร้าว ซึ่งแต่ละภาพมีความคล้ายคลึงกันทำให้ เมื่อนำภาพถ่ายจำนวนมากเข้ากระบวนการของโปรแกรม จึงทำให้โปรแกรมไม่สามารถอ่านค่า จับจุดที่เหมือนกันได้อย่างมากพอ ส่งผลให้แบบจำลองมีความบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปแบบตามรอยร้าวรูปร่างจริง งานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องแบ่งส่วนในการสร้างแบบจำลองเป็นช่วง ๆ จึงสามารถสร้างแบบจำลองให้ตรง คล้ายคลึงกับรอยร้าวของจริงได้

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองเป็นช่วง ๆ ได้แล้ว ทำให้ผลลัพธ์แบบจำลองที่ได้มามีความคล้ายคลึงกับรอยร้าวของจริง ซึ่งเมื่อดูแบบจำลองพื้นผิวรอยร้าวจากการทดสอบแรงดัด พบว่าบริเวณตามรอยร้าวนั้นมีลักษณะนูนขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่ได้มีการนูนตลอดแนวรอยร้าว โดยส่วนใหญ่แล้วพื้นผิวของแบบจำลองรอยร้าวจะมีระดับที่ใกล้เคียงหรือระดับเท่ากัน ดังภาพที่ 65 และภาพที่ 66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



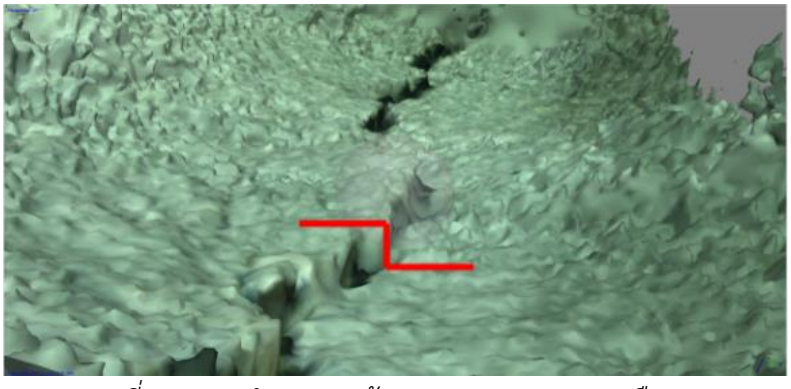
*ภาพที่ 65 แบบจำลองรอยร้าวจากการทดสอบแรงดัด (1)*



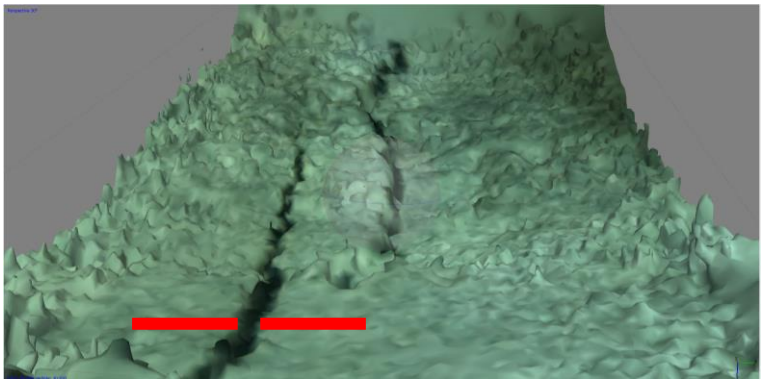
*ภาพที่ 66 แบบจำลองรอยร้าวจากการทดสอบแรงดัด (2)*

เมื่อดูแบบจำลองพื้นผิวรอยร้าวจากการทดสอบแรงเฉือน พบว่าบริเวณตามรอยร้าวนั้นในบางส่วนมีลักษณะที่ต่างระดับที่ชัดเจนเป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ แต่ก็ไม่ได้เป็นไปตามสมมติฐานตลอดแนวรอยร้าว อีกทั้งยังมีพื้นผิวของแบบจำลองในระดับที่ใกล้เคียงหรือระดับเท่ากัน ดังภาพที่ 67 และภาพที่ 68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

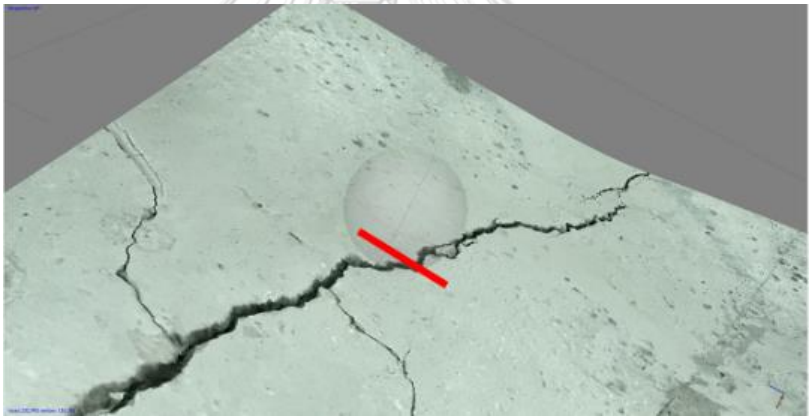


*ภาพที่ 67 แบบจำลองรอยร้าวจากการทดสอบแรงเฉือน (1)*

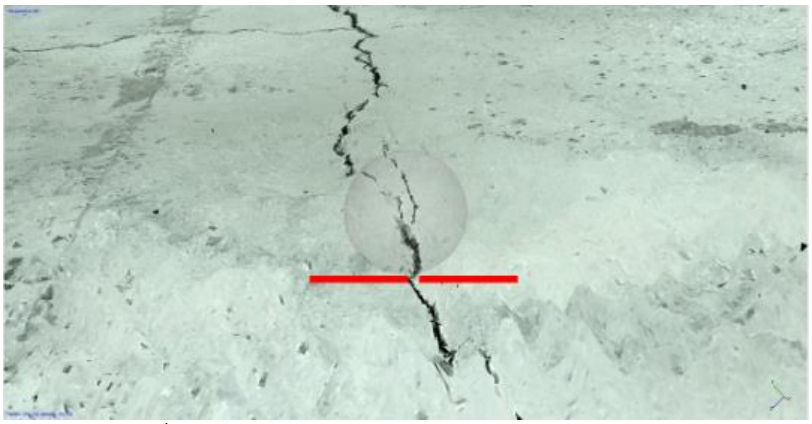


*ภาพที่ 68 แบบจำลองรอยร้าวจากการทดสอบแรงเฉือน (2)*

เมื่อดูแบบจำลองพื้นผิวรอยร้าวจากการทดสอบแรงดึง พบว่าบริเวณตามรอยร้าวทั้งสองแนวที่เกิดขึ้นทั้งตามแนวเหล็กเสริมและตามแนวขวางนั้นมีระดับที่ใกล้เคียงหรือระดับที่เกือบจะเท่ากัน ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ ดังภาพที่ 69 และภาพที่ 70



*ภาพที่ 69 แบบจำลองรอยร้าวจากการทดสอบแรงดึง (1)*



*ภาพที่ 70 แบบจำลองรอยร้าวจากการทดสอบแรงดึง (2)*

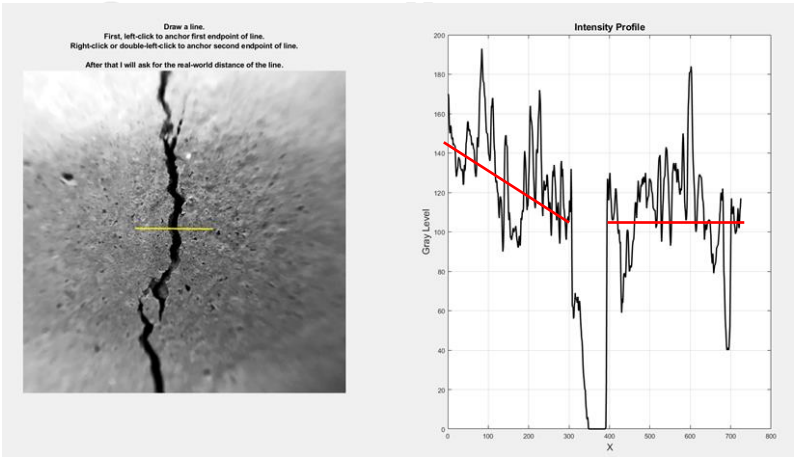
ส่วนของการสร้างแบบจำลองจะใช้ภาพรอยร้าวในมุมมองภาพรวมและภาพกำลังขยาย 20 เท่าเป็นหลัก เนื่องด้วยจำนวนภาพที่ใช้ไม่มากจนเกินไป อีกทั้งบริเวณโดยรอบของรอยร้าวมีรายละเอียดพื้นที่ที่สามารถนำไปหาจุดทับซ้อนระหว่างภาพถ่ายได้ง่าย ในทางกลับกันภาพกำลังขยาย 40 และ 50 เท่า นั้นไม่เหมาะกับการที่จะนำมาสร้างแบบจำลอง เนื่องด้วยจำนวนภาพที่มากจนเกินไป และรายเอียดพื้นที่โดยรอบของรอยร้าวนั้นมีน้อยหรือแคบจนเกินไป ทำให้การหาจุดทับซ้อนนั้นทำได้ยากส่งผลให้การสร้างแบบจำลองผิดพลาด

ดังนั้น ลักษณะพื้นผิวรอยร้าวที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง พบว่า มีบางตำแหน่งมีที่เป็นไปตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ แต่บางตำแหน่งก็ไม่เป็นไปตามสมมติฐาน

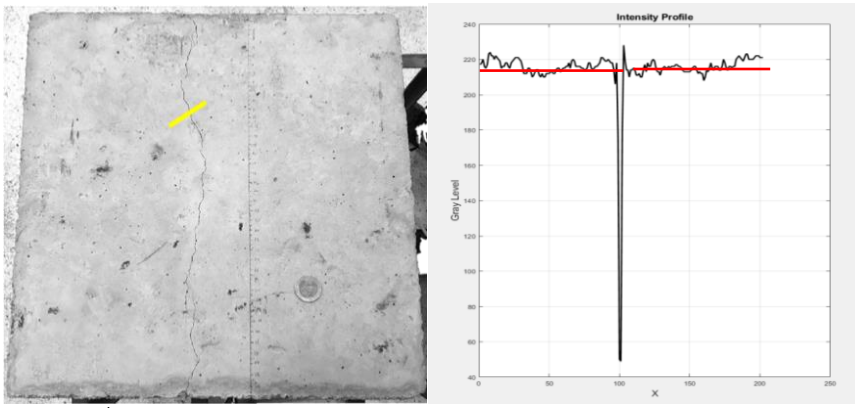
4.3.2 ลักษณะพื้นผิวคอนกรีตจากกราฟ Gray Level (y) - Distance (x)

ต่อมาเป็นการดูลักษณะพื้นผิวของรอยร้าวคอนกรีต โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการนำภาพถ่ายมาแปลงและปรับปรุงเป็นภาพสีเทา โดยแต่ละการทดสอบมาลากเส้น จะได้กราฟ Gray Level (y) - Distance (x) สำหรับดูค่าระดับสีเทาตามระยะเส้นที่ได้ลากไว้ ทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะรูปแบบเป็น 2 มิติ แสดงเป็นลักษณะพื้นผิวบริเวณด้านข้างและร่องลึกของรอยร้าวคอนกรีตตามเส้นที่ได้ลากไว้ ซึ่งบริเวณลักษณะพื้นผิวของรอยร้าวรอบข้างทั้งสองนั้นจะถูกแทนที่ด้วยการใช้เส้นตรงที่จะเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวของรอยร้าวที่จะนำไปวิเคราะห์ตามสมติฐานที่ได้ตั้งไว้ เส้นตรงดังกล่าวจะประมาณจากค่าแนวโน้มจากกราฟทั้งสองข้างของร่องรอยร้าว โดยจะใช้คำสั่งหาเส้นแนวโน้มภายในโปรแกรม MATLAB ที่คำนวณจากตัวเลขในแนวแกน x และแกน y ภายในกราฟทั้งสองข้างที่ได้ปรากฏขึ้น ดังภาพที่ 71 และภาพที่ 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

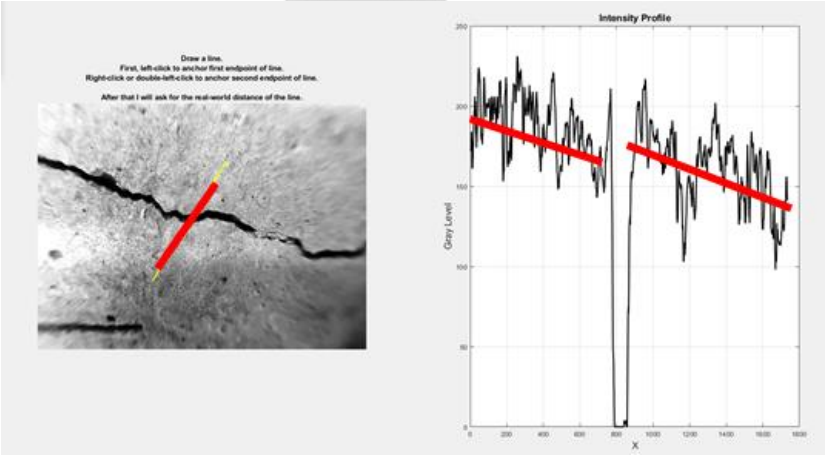



*ภาพที่ 71 กราฟ Gray Level (y) - Distance (x) จากรูปถ่ายกำลังขยาย 20 เท่า*

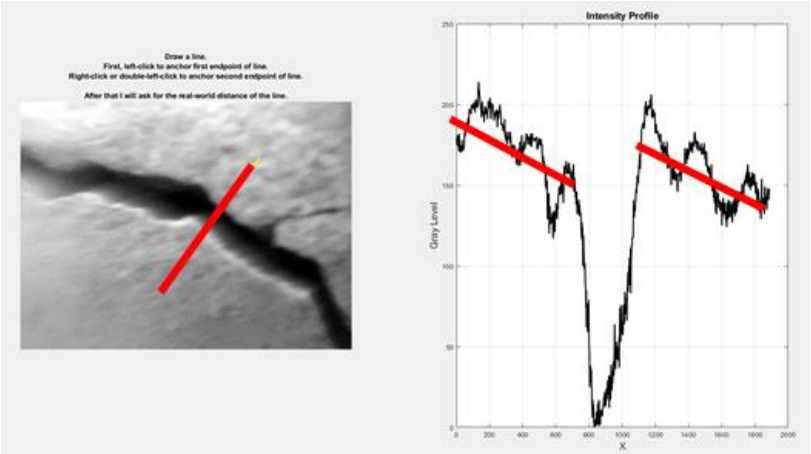



*ภาพที่ 72 กราฟ Gray Level (y) - Distance (x) จากภาพถ่ายโดยรวม*

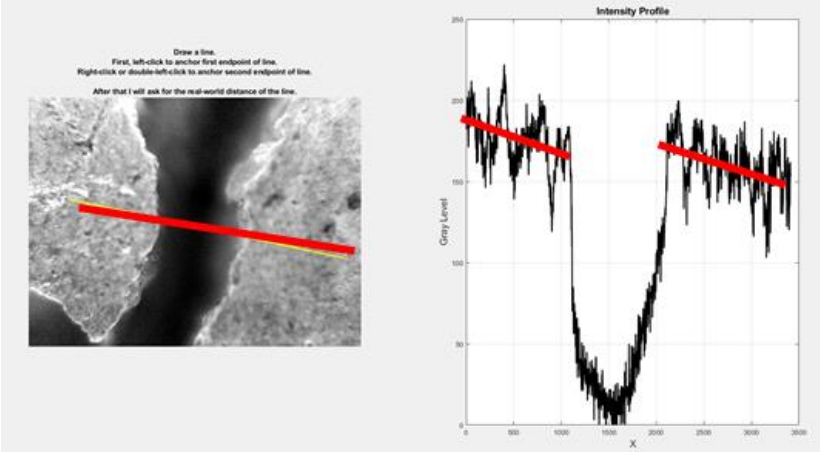
เมื่อนำภาพถ่ายรอยร้าวคอนกรีตกำลังขยาย 20, 40 และ 50 เท่า มาหาลักษณะพื้นผิวคอนกรีต โดยใช้กราฟ Gray Level (y) - Distance (x) พบว่า ยิ่งภาพถ่ายมีกำลังขยายมากเท่าไรก็จะทำให้ได้กราฟที่แสดงร่องความกว้างของรอยร้าวที่ชัดเจนขึ้น แต่ในทางกลับกันบริเวณรอบข้างของร่องรอยร้าวก็จะมีขนาดที่แคบลงตาม ซึ่งอาจทำให้การพิจารณาบริเวณลักษณะพื้นผิวนั้นมีไม่เพียงพอ โดยมีตัวอย่าง ดังภาพที่ 73 ภาพที่ 74 และภาพที่ 75




*ภาพที่ 73 ตัวอย่างกราฟจากการทดสอบแรงดัด เลนส์ 20 เท่า*




*ภาพที่ 74 ตัวอย่างกราฟจากการทดสอบแรงดัด เลนส์ 40 เท่า*




*ภาพที่ 75 ตัวอย่างกราฟจากการทดสอบแรงดัด เลนส์ 50 เท่า*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลจากการดูกราฟ Gray Level (y) - Distance (x) พบว่า รูปที่สามารถใช้ดูระดับพื้นผิวรอยร้าวได้เหมาะสมที่สุด คือ รูปถ่ายโดยรวมดังภาพตัวอย่างที่มีระยะขอบเขตของพื้นผิวที่เห็นความต่างระดับได้ชัดเจน รองลงมา คือ รูปถ่ายกำลังขยาย 20 เท่า เห็นได้ว่าระยะขอบเขตของพื้นผิวนั้น สามารถที่จะมองเห็นถึงความต่างระดับของผิวพื้นได้ แต่ยังเห็นไม่ชัดเจนเท่ากับรูปถ่ายโดยรวม ส่วนรูปถ่ายกำลังขยาย 40 เท่า และ 50 เท่า เมื่อทำกราฟ Gray Level (y) - Distance (x) แล้วไม่สามารถที่จะดูความต่างระดับได้ เนื่องด้วยระยะขอบเขตนั้นมีไม่พียงพอ

ดังนั้น ลักษณะพื้นผิวรอยร้าวที่ได้จากการดูกราฟ Gray Level (y) - Distance (x) พบว่า มีบางตำแหน่งมีที่เป็นไปตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ แต่บางตำแหน่งก็ไม่เป็นไปตามสมมติฐาน

**4.4 การเปรียบเทียบการทดลอง**

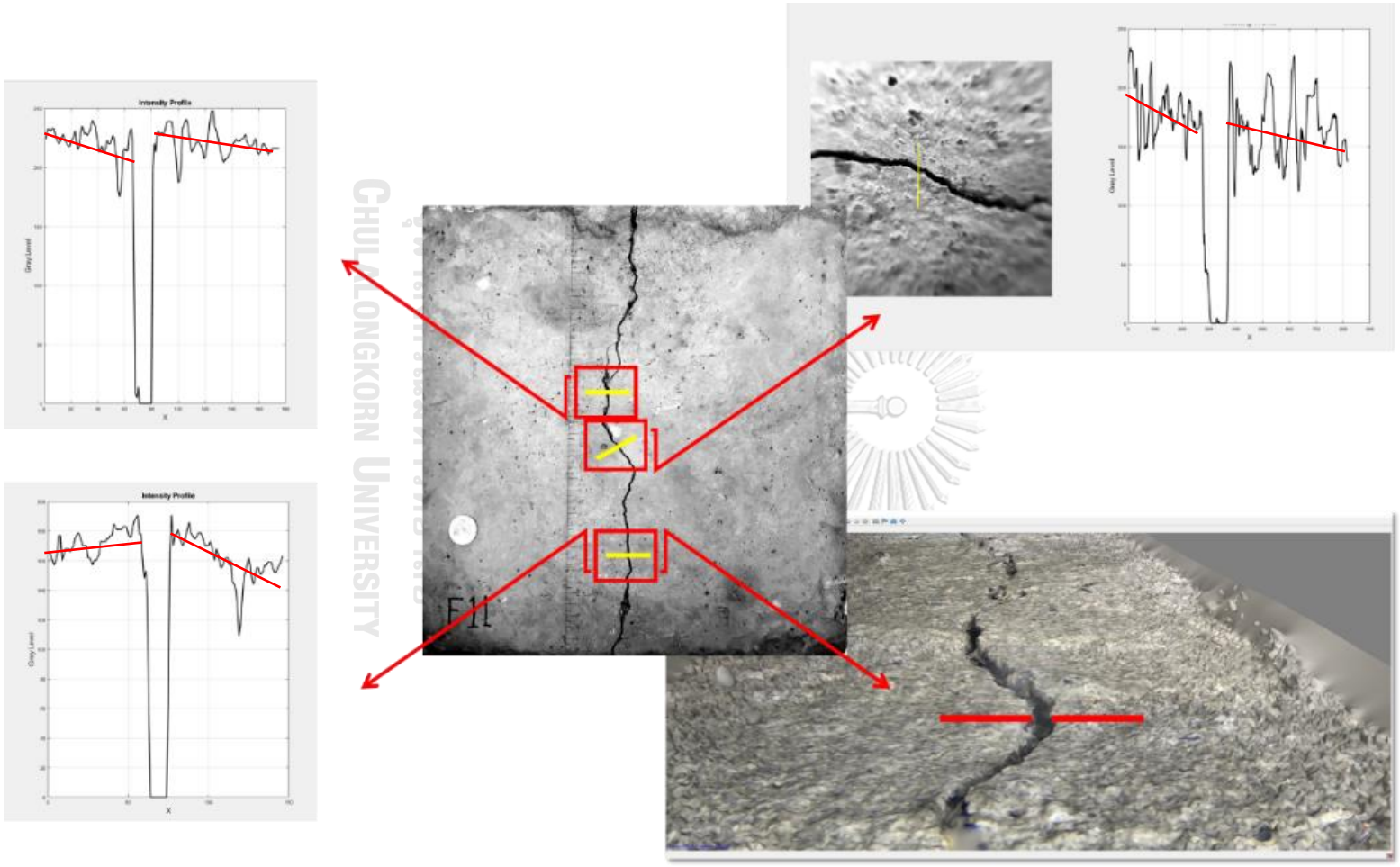
ส่วนนี้เป็นการนำผลลัพธ์จากการประมวลผลต่าง ๆ ทั้งกราฟ Gray Level (y) - Distance (x) และแบบจำลองสามมิติมาเปรียบเทียบกัน ทั้งนี้เพื่อตรวจดูลักษณะพื้นผิวของรอยร้าวคอนกรีตจากแต่ละการทดสอบว่ามีผลลัพธ์เป็นไปตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้หรือไม่

ตัวอย่างเปรียบเทียบพื้นผิวรอยร้าวจากการทดสอบแรงดัด ทั้งกราฟ Gray Level (y) - Distance (x) และแบบจำลองสามมิติ จะเห็นได้ว่ามีบริเวณรอยร้าวมีบางตำแหน่งที่มีลักษณะที่นูนขึ้นเล็กน้อย ซึ่งส่วนใหญ่ก็ไม่ได้มีการนูนที่ชัดเจนมากนัก และบริเวณอื่น ๆ ไม่ได้มีการนูนตลอดแนวรอยร้าวเช่นกัน ส่วนใหญ่แล้วนั้นพื้นผิวของรอยร้าวที่ได้มีการทดลองไปมีระดับที่ใกล้เคียงหรือระดับเท่ากัน ดังภาพที่ 76

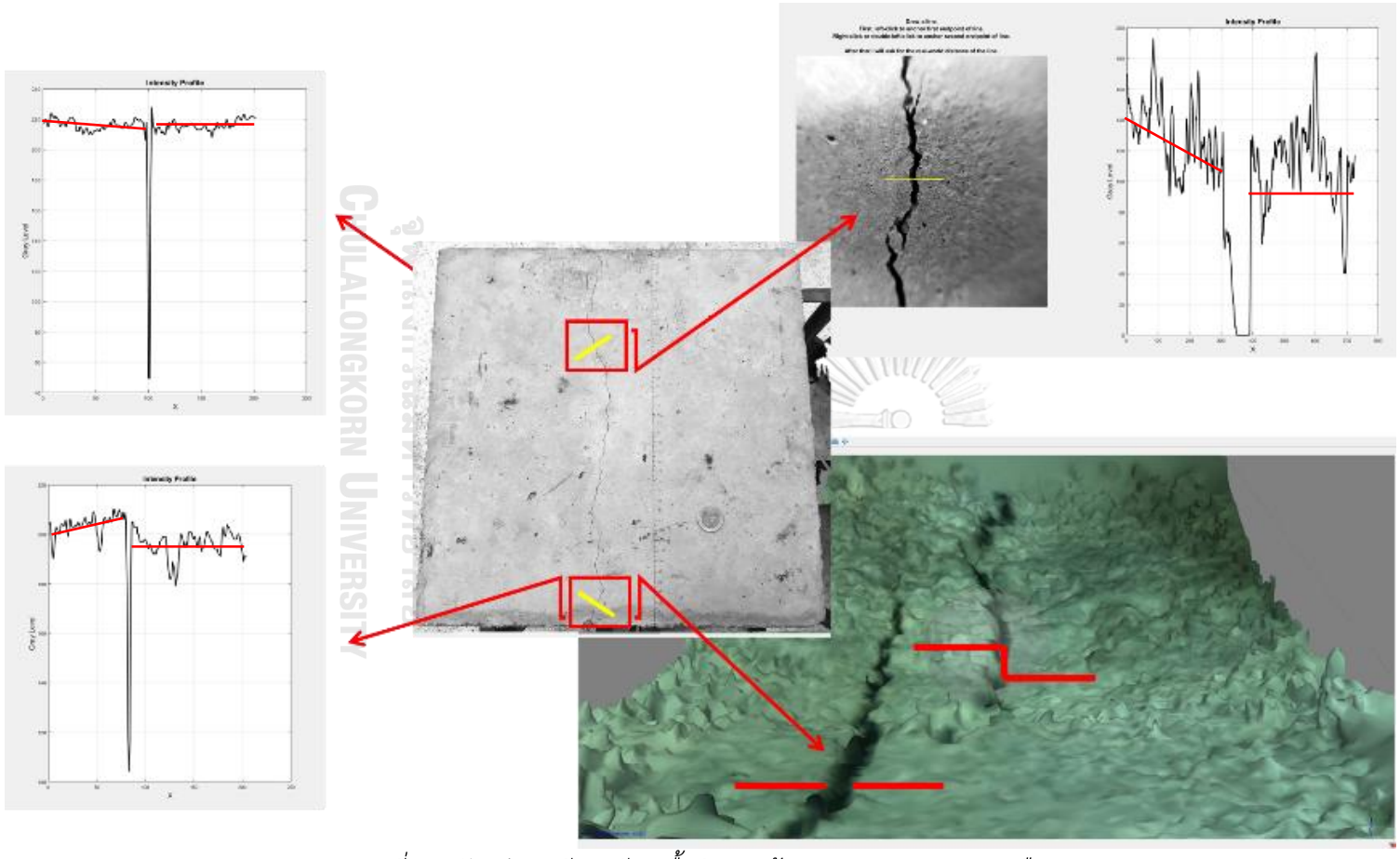
ตัวอย่างเปรียบเทียบพื้นผิวรอยร้าวจากการทดสอบแรงเฉือน ทั้งกราฟ Gray Level (y) - Distance (x) และแบบจำลองสามมิติ จะเห็นได้ว่ามีบริเวณรอยร้าวมีบางตำแหน่งที่มีลักษณะที่ต่างระดับกันชัดเจน และมีบริเวณอื่น ๆ ที่พื้นผิวของรอยร้าวที่ได้มีการทดลองไปมีระดับที่ใกล้เคียงหรือระดับเท่ากัน ดังภาพที่ 77

ตัวอย่างเปรียบเทียบพื้นผิวรอยร้าวจากการทดสอบแรงดึง ทั้งกราฟ Gray Level (y) - Distance (x) และแบบจำลองสามมิติ จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของรอยร้าวส่วนใหญ่ที่ได้มีการทดลองไปนั้นมีระดับที่ใกล้เคียงหรือระดับเท่ากันจะเกือบหมดตลอดแนวรอยร้าวทั้งสองแนว แต่ก็มีบางตำแหน่งที่มีลักษณะนูนออกมาก ดังภาพที่ 78

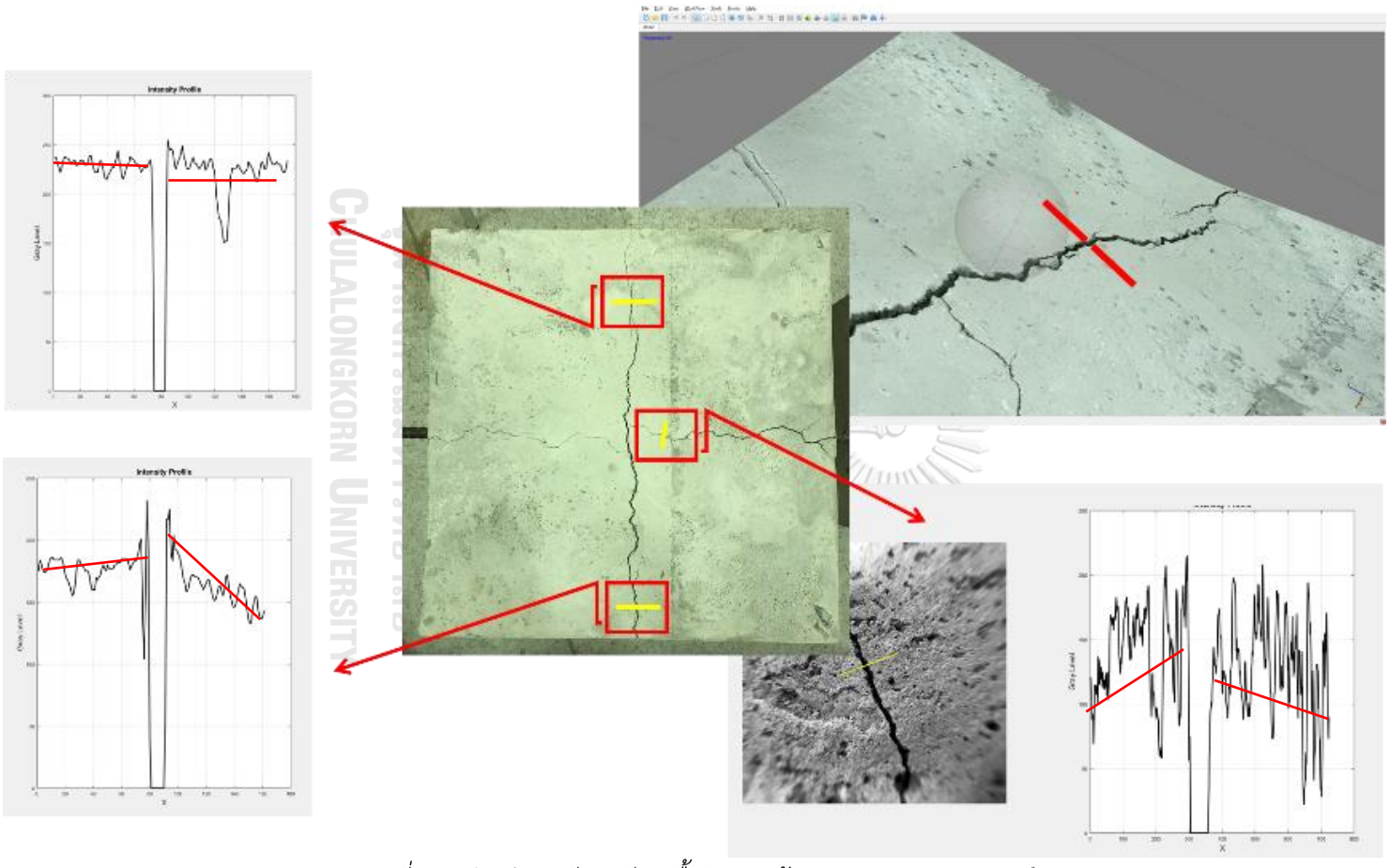
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




*ภาพที่ 76 ตัวอย่างเปรียบเทียบพื้นผิวรอยร้าวจากการทดสอบแรงดัด*



*ภาพที่ 77 ตัวอย่างเปรียบเทียบพื้นผิวรอยร้าวจากการทดสอบแรงเฉือน*




*ภาพที่ 78 ตัวอย่างเปรียบเทียบพื้นผิวรอยร้าวจากการทดสอบแรงดึง*

Chulalongkorn University

# บทที่ 5
# สรุปผลการวิจัย

กรณีศึกษาตัวอย่างรอยร้าวจากตัวอย่างคอนกรีตจากการทดสอบแรงดัด แรงเฉือนและแรงดึง โดยมีการให้แรงแก่ตัวอย่างและหยุดทันที เมื่อรอยร้าวเริ่มปรากฏขึ้น จากนั้นทำการใช้งาน Chula Smart Lens คู่กับโทรศัพท์มือถือ Iphone7 ในการถ่ายภาพ งานวิจัยนี้จะเป็นการให้ความสำคัญกับรอยร้าวที่เกิดจากการทดสอบที่ได้กำหนดไว้เป็นหลัก ซึ่งมีผลสรุปได้ดังนี้

1. จากการหาลักษณะพื้นผิวรอยร้าวจากแบบจำลองและกราฟ Gray Level (y) – Distance (x) ทั้ง 2 วิธีนั้น พบว่า ลักษณะพื้นผิวรอยร้าวบางตำแหน่งมีลักษณะเป็นไปตามสมมติฐาน แต่บางตำแหน่งก็มีลักษณะไม่เป็นไปตามสมมติฐาน ดังนั้น สมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ตามวิธีที่ได้ทดลองทำทั้ง 2 วิธี ไม่เป็นจริง จึงต้องหาวิธีการที่เหมาะสมกว่าในการทดลองต่อไป
2. ภาพที่ถูกปรับปรุงและแปลงเป็นภาพสีขาวดำนั้นสามารถทำให้เห็นทิศทางของรอยร้าวได้ชัดเจน อีกทั้งสามารถที่วัดค่าความกว้าง ความยาวและพื้นที่ของรอยร้าวที่เกิดขึ้นได้ โดยแต่ละครั้งก่อนทำการวัด จะต้องมีการใส่ค่าอ้างอิงในภาพก่อนเป็นอันดับแรก ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 3 - 10 % เมื่อได้ค่าดังกล่าวก็สามารถนำไปหาวิธีการในการซ่อมแซมรอยร้าวได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บรรณานุกรม

[1] CPAC Concrete Technology, The Concrete Products and Aggregate Co, Ltd.

[2] MathWorks (2018). Matlab. Image Processing Toolbox™ User's Guide. MathWorks. www.mathworks.com, The MathWorks, Inc.: 1046.

[3] Suksirivong, S. and I. Rueng-uttamanan (2018). CONCRETE CRACK INSPECTIONS BY CHULA SMART LENS. Civil Engineering. Chulalongkorn University, Chulalongkorn University. Degree of Bachelor: 50.

[4] ดร. โสภณ ผู้มีจรรยา (2556). การประมวลผลภาพดิจิตอล วิชา 7123512 ดร. โสภณ ผู้มีจรรยา. http://sites.google.com/site/dip7123512.

[5] โศรฏา แข็งการ, ก. ช. การใช้ Matlab สำหรับงานทางวิศวกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: 314.

[6] Suksirivong, Sarocha, and Intuon Rueng-uttamanan. 2018. 'CONCRETE CRACK INSPECTIONS BY CHULA SMART LENS', Chulalongkorn University.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# ภาคผนวก

## Code ในส่วนโปรแกรม MATLAB

----------START

```
function Test6_Re()
global originalImage;
clc;                    % Clear the Command Window.
close all;              % Close all figures.
workspace;              % Make sure the Workspace Panel is showing.
format shortG;
format compact;
fontSize = 30;
%load image
path=imgetfile();
originalImage=imread(path);          %figure,imshow(originalImage)
%title('Original image')             %%Image adjust
Istrech = imadjust(originalImage,stretchlim(originalImage));          %%Convert RGB image to gray
Igray_s = rgb2gray(Istrech);         %figure,imshow(Igray_s,[])
%title('RGB to gray (contrast stretched) ')          %%Image segmentation by thresholding
%use incremental value to run this selection till required threshold 'level' is
%achieved
level = 0.08;
Ithres = im2bw(Igray_s,level);        %%Image morphological operation
BW = bwmorph(Ithres,'clean',10);     %figure,imshow(Ithres)
%title('Segmented cracks and Cleaned image')  % Get the dimensions of the image.
% numberOfColorBands should be = 1.
[~, ~, ~] = size(Igray_s );
% Display the original gray scale image.
figureHandle = figure;
subplot(1,2,1);
imshow(Igray_s , []);
message = sprintf('First Step, Calibrate Unit Value.');
reply = questdlg(message, 'Calibration', 'OK', 'Cancel', 'OK');
if strcmpi(reply, 'Cancel')                % User said Cancel, so exit.
return;
end
button = 1; % Allow it to enter loop.
while button ~= 4    if button > 1
    button = menu('Select a Task', 'Calibrate Again', 'Measure Distance', 'Measure Area', 'Exit');
end    switch button
    case 1
        success = Calibrate();
        while ~success
            success = Calibrate();
        end
        button = 99;
    case 2
```

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
            DrawLine();
        case 3
            DrawArea();
        otherwise
            close(figureHandle);
            break;
    end       end           end
function success = Calibrate()      %Case 1
global lastDrawnHandle;
global calibration;
try
    success = false;
    instructions = sprintf('left-click for the first point of the line.\n double-left-click or right-click for the endpoint of the line.');
    title(instructions);
    [~, ~, rgbValues, xi,yi] = improfile(1000);
    rgbValues = squeeze(rgbValues);
    distanceInPixels = sqrt( (xi(2)-xi(1)).^2 + (yi(2)-yi(1)).^2);
    if length(xi) < 2
        return;
    end
    % Plot the line.
    hold on;
    lastDrawnHandle = plot(xi, yi, 'y-', 'LineWidth', 2);
    % Input the real distance that you want.
    userPrompt = {'Input the name of units.:','Input the value of distance in those units:'};
    dialogTitle = 'Calibration information';
    numberOfLines = 1;
    def = {'name of unit', 'value of unit'};
    answer = inputdlg(userPrompt, dialogTitle, numberOfLines, def);
    if isempty(answer)
        return;
    end
    calibration.units = answer{1};
    calibration.distanceInPixels = distanceInPixels;
    calibration.distanceInUnits = str2double(answer{2});
    calibration.distancePerPixel = calibration.distanceInUnits / distanceInPixels;
    success = true;
    message = sprintf('The distance you drew is %.2f pixels = %.2f %s.\nThe number of %s per pixel is %.4f.\nThe number of pixels
per %s is %.4f',...
        distanceInPixels, calibration.distanceInUnits, calibration.units, ...
        calibration.units, calibration.distancePerPixel, ...
        calibration.units, 1/calibration.distancePerPixel);
    uiwait(msgbox(message));
catch ME
    errorMessage = sprintf('Error in function Calibrate().\nDid you first left click and then right click?\n\nError Message:\n%s', ME.message);
    fprintf(1, '%s\n', errorMessage);
    WarnUser(errorMessage);           end
return; % from Calibrate()           end
% --- Executes on button press in DrawLine.
```

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

```
function success = DrawLine()       %Case 2
try
    global lastDrawnHandle;
    global calibration;
    fontSize = 14;
    instructions = sprintf('Draw a line.\nFirst, left-click to anchor first endpoint of line.\nRight-click or double-left-click to anchor second endpoint of line.\n\nAfter that I will ask for the real-world distance of the line.');
    title(instructions);
    msgboxw(instructions);
    subplot(1,2, 1); % Switch to image axes.
    [~,~, ~, xi,yi] = improfile(1000);
    % Get the profile again but spaced at the number of pixels instead of 1000 samples.
    hImage = findobj(gca,'Type','image');
    theImage = get(hImage, 'CData');
    lineLength = round(sqrt((xi(1)-xi(2))^2 + (yi(1)-yi(2))^2));
    [~,~, rgbValues] = improfile(theImage, xi, yi, lineLength);
    % rgbValues is 1000x1x3.  Call Squeeze to get rid of the singleton dimension and make it 1000x3.
    rgbValues = squeeze(rgbValues);
    distanceInPixels = sqrt( (xi(2)-xi(1)).^2 + (yi(2)-yi(1)).^2);
    distanceInRealUnits = distanceInPixels * calibration.distancePerPixel;
    if length(xi) < 2
        return;                 end
    % Plot the line.
    hold on;
    lastDrawnHandle = plot(xi, yi, 'y-', 'LineWidth', 2);
    % Plot profiles along the line of the red, green, and blue components.
    subplot(1,2,2);
    [~, columns] = size(rgbValues);
    if columns == 3
        % It's an RGB image.
        plot(rgbValues(:, 1), 'r-', 'LineWidth', 2);
        hold on;
        plot(rgbValues(:, 2), 'g-', 'LineWidth', 2);
        plot(rgbValues(:, 3), 'b-', 'LineWidth', 2);
        title('Red, Green, and Blue Profiles along the line you just drew.', 'FontSize', 14);
    else
        % It's a gray scale image.
        plot(rgbValues, 'k-', 'LineWidth', 2);
    end
    xlabel('X', 'FontSize', fontSize);
    ylabel('Gray Level', 'FontSize', fontSize);
    title('Intensity Profile', 'FontSize', fontSize);
    grid on;
    % Inform use via a dialog box.
    txtInfo = sprintf('Distance = %.1f %s, which = %.1f pixels.', ...
        distanceInRealUnits, calibration.units, distanceInPixels);
    msgboxw(txtInfo);
    % Print the values out to the command window.
    fprintf(1, '%\n', txtInfo);
```

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

```
catch ME
    errorMessage = sprintf('Error in function DrawLine().\n\nError Message:\n%s', ME.message);
    fprintf(1, '%s\n', errorMessage);
    WarnUser(errorMessage);
end
end  % from DrawLine()
function DrawArea()                 %Case 3
global originalImage;
global lastDrawnHandle;
global calibration;
try
    txtInfo = sprintf('Left click to anchor vertices.\nDouble left click to anchor final point of polygon.');
    title(txtInfo);
    msgboxw(txtInfo);
    % Get size information.
    [~, ~, numberOfColorBands] = size(originalImage);
    % Get a gray scale version.
    if numberOfColorBands > 1
        grayImage = rgb2gray(originalImage);
    else
        grayImage = originalImage;
    end
    subplot(1,2, 1); % Switch to image axes.
    % Ask user to draw a polygon.
    [maskImage, xi, yi] = roipolyold();
    % Draw the polygon over the image on the main screen.
    hold on;
    lastDrawnHandle = plot(xi, yi, 'r-', 'LineWidth', 2);
    numberOfPixels = sum(maskImage(:));
    area = numberOfPixels * calibration.distancePerPixel^2;
    % Get the mean gray level of the gray scale image.
    mean_GL = mean(grayImage(maskImage)); % Of the gray scale version.
    % Print the area values out to the command window.
    txtInfo = sprintf('Area = %8.1f square %s.\nMean gray level = %.2f.', ...
        area, calibration.units, mean_GL);
    fprintf(1,'%s\n', txtInfo);
    title(txtInfo, 'FontSize', 14);
    % Done with measurement of area.
    % Now, just for fun, get the mean value and display the histogram.
    if numberOfColorBands >= 3
        % It's a color image.  Get the mean RGB Values.
        redPlane = double(originalImage(:, :, 1));
        greenPlane = double(originalImage(:, :, 2));
        bluePlane = double(originalImage(:, :, 3));
        mean_RGB_GL(1) = mean(redPlane(maskImage));
        mean_RGB_GL(2) = mean(greenPlane(maskImage));
        mean_RGB_GL(3) = mean(bluePlane(maskImage));
        fprintf('%s\nRed mean = %.2f\nGreen mean = %.2f\nBlue mean = %.2f', ...
            txtInfo, mean_RGB_GL(1), mean_RGB_GL(2), mean_RGB_GL(3));                    end
```

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

```
    % Just for fun, let's get its histogram within the masked region.
    [pixelCount, grayLevels] = imhist(grayImage(maskImage));
    subplot(1,2, 2); % Switch to plot axes.
    cla;
    bar(pixelCount);
    grid on;
    caption = sprintf('Histogram within area.    Mean gray level = %.2f', mean_GL);
    title(caption, 'FontSize', 14);
    xlim([0 grayLevels(end)]); % Scale x axis manually.
    % Show the mean as a vertical red bar on the histogram.
    hold on;
    maxYValue = ylim;
    line([mean_GL, mean_GL], [0 maxYValue(2)], 'Color', 'r', 'linewidth', 2);
catch ME
    errorMessage = sprintf('Error in function DrawArea().\n\nError Message:\n%s', ME.message);
    fprintf(1, '%s\n', errorMessage);
    WarnUser(errorMessage);
end
end % od DrawArea()
function msgboxw(message)          %Case 4
    uiwait(msgbox(message));
end
function WarnUser(message)
    uiwait(msgbox(message));
end
```

----------END

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# ประวัติผู้เขียน

| | |
|---|---|
| **ชื่อ-สกุล** | ปิยวัฒน์ ตันติ์ศรีสกุล |
| **วัน เดือน ปี เกิด** | วันพุธ ที่ 29 เดือน ธันวาคม พ.ศ.2536 (ค.ศ.1993) |
| **สถานที่เกิด** | โรงพยาบาลสตูล จังหวัดสตูล |
| **วุฒิการศึกษา** | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| **ที่อยู่ปัจจุบัน** | บ้านเลขที่ 62 ถนนสฤษดิ์ภูมินารถ อำภอเมืองสตูล ตำบลพิมาน จังหวัดสตูล รหัสไปรษณีย์ 91000 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University