



## ประสิทธิภาพการซ่อมแซมคอนกรีตด้วยการเย็บ ด้วยวัสดุต่าง ๆ

### EFFICIENCY OF CONCRETE REPAIR BY STITCHING DOGS METHOD WITH DIFFERENT MATERIALS

ธนัญญ์ อินทร์อำนาจ<sup>1\*</sup> และวันชัย ยอดสุดใจ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นิสิตปริญญาโท สาขาโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>2</sup>รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

\*Corresponding author: tananut.i@airportthai.co.th

#### บทคัดย่อ

รอยแตกร้าวพื้นผิวคอนกรีตทางขับและลานจอดอากาศยาน ทำให้เกิดการทรุดตัวเนื่องจากมีน้ำลงไปยังรอยแตกร้าว ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้งานและอีกทั้งมีเวลาปิดพื้นที่ซ่อมแซมจำกัด แล้วต้องเปิดใช้งานให้ได้เร็วที่สุด วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการซ่อมแซมคอนกรีตด้วยวิธีการเย็บ (Stitching Dogs) โดยใช้วัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร, เหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) โดยใช้การเชื่อมประสานด้วยอีพ็อกซี นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบกับวิธีการซ่อมด้วยอีพ็อกซีโดยไม่มีการเย็บ และเปรียบเทียบกับคอนกรีตเดิมที่ไม่มีการซ่อมแซมอีกด้วย ประสิทธิภาพของการซ่อมแซมพิจารณาจากกำลังรับแรงดัด ความต้านทานการซึมผ่านและความต้านทานการขัดสี ผลการทดสอบพบว่า การเย็บด้วยเหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดตามมาด้วย เหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) ตามลำดับ โดยที่การขัดสี และการซึมผ่านมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงดัด กล่าวคือ การขัดสีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังรับแรงดัดสูงขึ้น แต่กำลังรับแรงดัดไม่มีผลต่อการซึมผ่านเพราะขนาดผลของการเย็บจะมีผลต่อการซึมผ่านมากกว่า

**คำสำคัญ:** การเย็บ, รอยแตกร้าว, การซ่อมแซม, แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์, เหล็กแผ่น, เหล็กเส้นกลม

#### ABSTRACT

Cracks of taxiways and aprons causes subsiding due to water ingress into pavement. This affects the usability of the airport. There is a time limitation for repairing as it should be enabled as soon as possible. The objective of this research is to compare the efficiency of concrete repairing by Stitching Dogs by using 3 materials: Steel sheet 1 inch, thickness 3 millimeters, steel round bar diameter 6 millimeters and carbon fiber Reinforced Polymer (CFRP) strip by welding using epoxy. It was also compared with repair by epoxy only and with the original concrete that has not been repaired. The repair efficiency was determined by the flexural strength, water permeability and abrasion resistance. The test results showed that Stitching Dogs with Steel sheet 1 inch, thickness 3 millimeters will be the most effective, steel round bar diameter

Tananut Inumnuay<sup>1\*</sup> and Wanchai Yodsudjai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Master student, Engineering in Infrastructure Engineering and Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

6 millimeters and carbon fiber Reinforced Polymer (CFRP) respectively. The correlation between the abrasion resistance and the flexural strength was attained as the higher flexural strength was the higher abrasion resistance. However, it was not affecting the permeability because the size of the wound repairer was more affected on the permeability.

**KEYWORDS:** Stitching Dogs, Cracks, Repair, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Steel Plates, Steel Round Bar

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันสนามบินดอนเมืองมีแผนพัฒนาการใช้พื้นที่สนามบินอย่างเต็มรูปแบบเพื่อรองรับสายการบินแบบต้นทุนต่ำ อีกทั้งสนามบินดอนเมืองได้เกิดปัญหาเนื่องมาจากอุทกภัยในปี พ.ศ.2554 ส่งผลทำให้สภาพโครงสร้างพื้นคอนกรีตเกิดความเสียหายมีรอยแตกร้าว รวมไปถึงระยะเวลาซ่อมแซมรอยแตกร้าวมีระยะเวลาที่จำกัดในการซ่อมแซม ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ความเสียหายด้านการใช้งาน (Functional failure) และความเสียหายด้านโครงสร้าง (Structural failure) โดยทั่วไปแล้วความเสียหายด้านการใช้งานมักจะประเมินได้ในทันที อันเนื่องมาจากลักษณะความเสียหายนั้นจะเกิดที่ผิวทางทำให้สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ในขณะที่ความเสียหายทางโครงสร้างนั้นมีทั้งแบบที่สามารถประเมินได้ด้วยตาเปล่า เช่น รอยแตกร้าว และแบบที่ไม่สามารถทำได้ เช่น การเกิดโพรงใต้ผิวทาง หรือการประเมินกำลังความต้านทานน้ำหนักของแต่ละชั้นทาง เป็นต้น

โครงสร้างชั้นทางของทางขับ ลานจอดอากาศยาน ของสนามบินดอนเมืองเป็นโครงสร้างคอนกรีตหนาประมาณ 50-80 เซนติเมตร อยู่บนชั้นรองพื้นทางหินขนาดใหญ่ จากการตรวจสอบสภาพพื้นผิวคอนกรีตด้วยตาเปล่า สภาพทางพบว่าผิวทางคอนกรีตส่วนใหญ่อยู่ในสภาพดี มีความเสียหายของผิวทางคอนกรีตในลักษณะเป็นรอยแตกร้าวและรอยแตกกะเทาะระดับเล็กน้อยถึงปานกลาง วัสดุยาแนวรอยต่อส่วนใหญ่อยู่ในสภาพดี ดังแสดงในรูปที่ 1 ส่วนรอยแตกร้าวที่มีความเสียหายจะส่งผลต่อโครงสร้างอาจทำให้เกิดค่ากำลังรับแรงกดลดลงในภายหลัง



(ก) รอยแตกร้าวบริเวณทางขับ



(ข) รอยแตกร้าวบริเวณลานจอดอากาศยาน

### รูปที่ 1 การแตกร้าวบริเวณทางขับและลานจอดอากาศยาน

เนื่องจากน้ำท่วมพื้นที่สนามบินดอนเมืองและได้เปิดให้บริการในฐานะสนามบินนานาชาติแห่งที่สองอีกครั้ง เพื่อต้องการลดความแออัดของสนามบินสุวรรณภูมิลงภายหลังการเปิดให้บริการสนามบินดอนเมือง พบความเสียหายของพื้นผิวสนามบินบริเวณภายในเขตพื้นที่ปฏิบัติการเขตการบิน (Airside) จึงต้องมีการซ่อมแซมพื้นผิวของสนามบินดอนเมือง ซึ่งในการซ่อมแซมนั้น

ยังหาวิธีที่เหมาะสมในการซ่อมแซมพื้นผิวของสนามบินดอนเมืองได้ ดังนั้นควรหาวิธีซ่อมแซมพื้นผิวสนามบินที่ถูกวิธี และต้องปฏิบัติตามกฎของ FAA (Federal Aviation Administration) และ ICAO (International Civil Aviation Organization) ซึ่งกำหนดให้ท่าอากาศยานต้องมีมาตรฐานในด้านการบำรุงรักษาพื้นผิวของสนามบินเพื่อความปลอดภัยของอากาศยานต่าง ๆ

ACI 224.1R-93 [1] ได้อธิบายว่า รอยแตกในคอนกรีตมีหลายสาเหตุ อาจส่งผลกระทบต่อลักษณะที่ปรากฏเท่านั้นหรืออาจบ่งบอกถึงความเครียดต่อโครงสร้างที่สำคัญหรือการขาดความทนทาน รอยแตกที่เกิดอาจครอบคลุมทั้งหมดของความเสียหาย ความสำคัญอยู่กับประเภทของโครงสร้าง โดยลักษณะของการแตกร้าวนั้นมีสาเหตุมาจากดังนี้ การหดตัวแบบพลาสติก การทรุดตัวจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ปฏิกริยาทางเคมี การฟุ้ง การกัดกร่อนของการเสริมแรง การก่อสร้างที่ไม่ดี การก่อสร้างที่มีการรับน้ำหนักมากเกินไปเกินกำหนด ข้อผิดพลาดในการออกแบบและรายละเอียด การใช้งานภายนอกที่มีการรับน้ำหนักมากเกินไปเกินกำหนด

ส่วนในการประเมินความเสียหายได้กล่าวไว้ใน ASTM D 5340-03 [2] การเกิดความเสียหายของพื้นผิวที่เป็นคอนกรีตที่เกิดขึ้นของสนามบิน มีความเสียหายทั้งหมด 16 ชนิด ได้แก่ การแตกร้าว และการเสื่อมของรอยต่อ รอยต่อคอนกรีตพื้นผิว และพื้นผิวเสื่อมกำลังของรอยต่อคอนกรีต ยกเว้นรอยร้าวที่เป็นเส้นตรง ซึ่งการซ่อมแซมรอยแตกร้าวบนแผ่นพื้นคอนกรีต ในระดับเล็กน้อยถึงปานกลางและรอยแตกไม่ขยับตัว ไม่ทรุดตัว มีวิธีการซ่อมแซมรอยแตกร้าว ได้แก่ การอุดซ่อมรอยแตกร้าวด้วยวัสดุ รอยแตก การอุดซ่อมรอยแตกร้าวด้วยอีพอกซี การอุดซ่อมรอยแตกร้าวด้วยอีพอกซีเชื่อมด้วยวัสดุ

ทั้งนี้ในการเลือกการทดสอบเพื่อให้เหมือนการซ่อมแซมในพื้นที่การใช้งานจริงของพื้นผิวคอนกรีตทางขับและลานจอดอากาศยานที่มีสภาพที่ตรงต่อการรับแรงดัด ทนต่อการซึมผ่านของน้ำและทนต่อการขัดสีและมีทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C 293-02, ทดสอบการซึมผ่านตามมาตรฐาน JIS A 6909 และทดสอบการขัดสีตามมาตรฐาน ASTM C 779

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการซ่อมแซมคอนกรีตด้วยวิธีการเย็บ (Stitching Dogs) โดยใช้วัสดุ 3 ชนิดในการเย็บ ได้แก่ (1) เหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร (2) เหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (3) แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการซ่อมวัสดุเชื่อมประสานอีพอกซีอย่างเดียวโดยไม่มีการเย็บ เพื่อเป็นแนวทางในการซ่อมแซมพื้นผิวของสนามบินให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

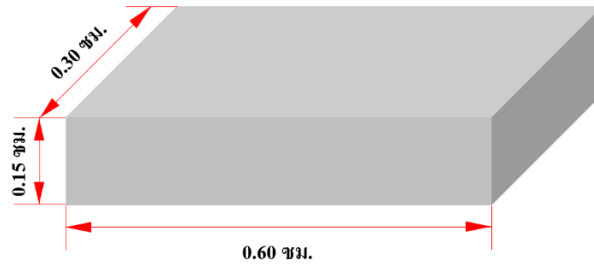
## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การเตรียมตัวอย่างก่อนซ่อมแซม

ทำการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 1 ให้มีกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 28 วัน มีกำลังรับแรงอัด 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.64) ควบคุมค่าขุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระดับ 8 – 10 เซนติเมตร โดยใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และมีขนาดหินโตนด์ ¾ นิ้ว และเตรียมตัวอย่างคอนกรีต ขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 จำนวน 36 ตัวอย่าง เมื่อได้อายุไม่น้อยกว่า 28 วัน

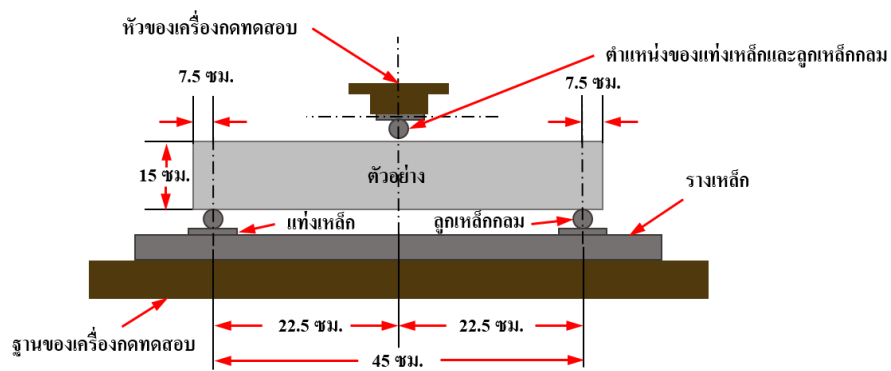
ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีต

| Mix   | Mix proportion (kg/m <sup>3</sup> ) |                     |                       |            |      | Slump (mm.) |
|-------|-------------------------------------|---------------------|-----------------------|------------|------|-------------|
|       | Cement (Kg)                         | Fine aggregate (Kg) | Coarse aggregate (Kg) | Water (Kg) | W/C  |             |
| CT240 | 313                                 | 835                 | 1056                  | 177        | 0.64 | 80 - 100    |



รูปที่ 2 ตัวอย่างคานคอนกรีต

นำตัวอย่างคอนกรีตไปทดสอบกำลังรับแรงดัดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จนคานคอนกรีตแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 โดยเพิ่มน้ำหนักในการกด หาค่าการโก่งตัวของคานโดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ทำกรกดและการโก่งตัวมาเขียนกราฟ พร้อมทั้งหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด จำนวน 36 ตัวอย่าง



รูปที่ 3 การทดสอบวิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน



(ก) เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine



(ข) กดคานคอนกรีตตัวอย่างจนแตกหัก

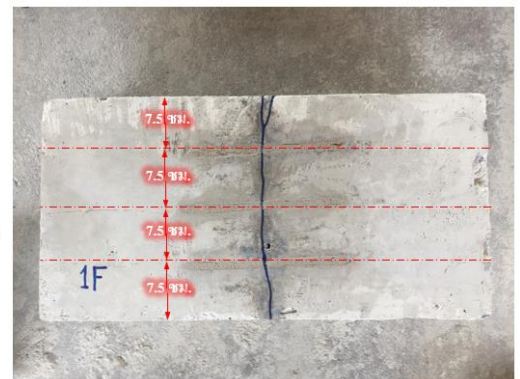
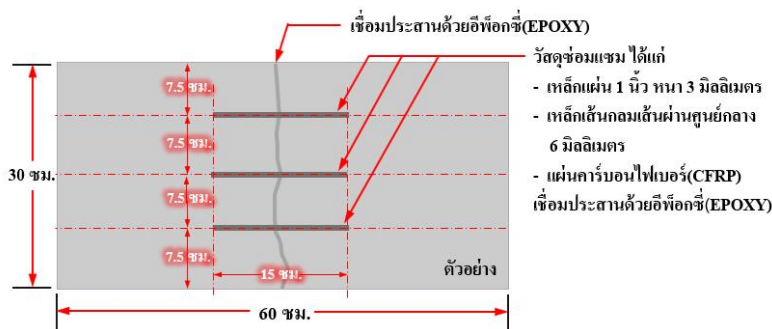
รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อกดคานคอนกรีตก่อนนำไปช่อมแซม

ตารางที่ 2 สรุปจำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

| ลำดับ      | วิธีซ่อมแซม                               | ทดสอบ (จำนวนตัวอย่าง) |                 |               |
|------------|---|-----------------------|-----------------|---------------|
|            |   | ทดสอบแรงคัต           | ทดสอบการซึมผ่าน | ทดสอบการขีดสี |
| 1          | เหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร           | 3                     | 3               | 3             |
| 2          | เหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร | 3                     | 3               | 3             |
| 3          | แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์(CFRP)                  | 3                     | 3               | 3             |
| 4          | ซ่อมแซมด้วยอีพ็อกซี่ไม่มีการเย็บ          | 3                     | 3               | 3             |
| รวม        |   | 12                    | 12              | 12            |
| รวมทั้งหมด |   | 36                    |                 |               |

## 2.2 การเตรียมตัวอย่างหลังซ่อมแซม

หลังจากนั้นนำไปทำการซ่อมแซมโดยเชื่อมประสานอีพ็อกซี่ให้คานคอนกรีตติดกัน รออายุต่ำสุดของเนื้อคอนกรีตใหม่ประมาณ 3 - 6 สัปดาห์ แล้วนำมาทำการซ่อมแซมด้วยวิธีการเย็บ (Stitching Dogs) [3, 4] โดยใช้วัสดุได้แก่ เหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร, เหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) เชื่อมประสานด้วยอีพ็อกซี่ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การซ่อมแซมด้วยวิธีการเย็บ(Stitching Dogs)

## 2.3 วิธีการทดสอบ

ดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพ ดังนี้

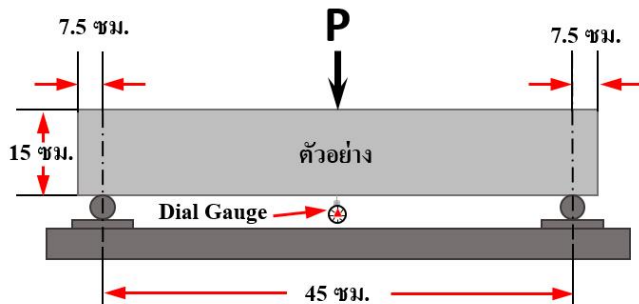
### 2.3.1 การทดสอบแรงคัต

ทำการทดสอบคานคอนกรีตจำนวน 12 ตัวอย่าง คัดตั้งตัวอย่างทดสอบและทดสอบตัวอย่างคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 6 เริ่มทำการทดสอบเพื่อหาค่าระยะการโก่งตัวของคานคอนกรีต ต่อมาเริ่มทำการปล่อยแรงกดเข้าสู่ห้วงคดที่กระทำกับคานคอนกรีตบริเวณกึ่งกลาง

คานคอนกรีตโดยค่อย ๆ เพิ่มน้ำหนักขึ้นทีละน้อยจนคานคอนกรีตแตกหัก ในระหว่างเพิ่มน้ำหนักนั้น ทำการจดค่าระยะการ โกงตัวตรง เครื่องวัดค่า เมื่อแรงกดกระทำทุก ๆ 2 KN จนคานคอนกรีตวิบัติ โดยการทดสอบนี้ได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 293-02 [5] พร้อมทั้งคำนวณหาค่าโมดูลัสแตกหัก (Modulus of Rupture) โดยสมการที่คำนวณหาค่าโมดูลัสแตกหัก (Modulus of Rupture) คือ

$$R = \frac{3 PL}{2 bd^2} \quad (1)$$

|       |     |                                      |
|-------|-----|--------------------------------------|
| เมื่อ | $R$ | โมดูลัสแตกหัก                        |
|       | $P$ | แรงกดสูงสุด                          |
|       | $L$ | ช่วงของคาน                           |
|       | $b$ | ความกว้างเฉลี่ยของแท่งทดสอบที่รอยแตก |
|       | $d$ | ความลึกเฉลี่ยของแท่งทดสอบที่รอยแตก   |

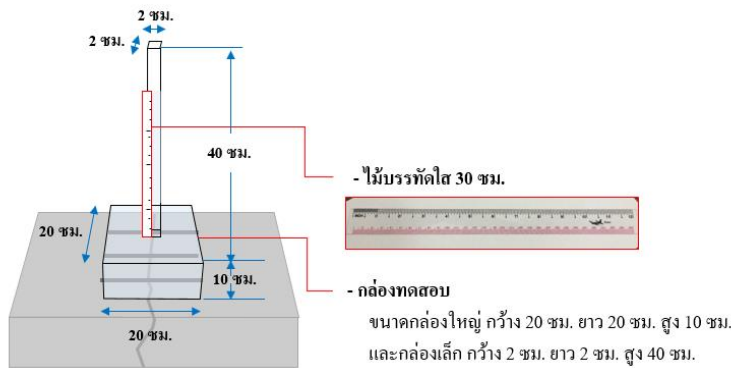


รูปที่ 6 การทดสอบแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C 293-02

### 2.3.2 การทดสอบการซึมผ่าน

ทำการทดสอบคานคอนกรีตจำนวน 12 ตัวอย่าง หลังซ่อมแซมดำเนินการติดตั้งกรวยอะคริลิกใส ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสใหญ่ ซึ่งมีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตรและหลอดขนาดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเล็ก 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ติดตั้งไม้บรรทัด สูง 30 เซนติเมตร ติดตั้งกับคานคอนกรีตบริเวณที่ซ่อมแซมเติมน้ำตามระยะที่กำหนดแล้วจับเวลา ทุก ๆ 5 นาที ได้แก่ 5 10 15 จนครบ 2 ชั่วโมง จดค่าระดับน้ำที่ลดลงเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยได้ประยุกต์ใช้วิธีการทดสอบนี้ตามมาตรฐาน JIS A 6909 [6] ทั้งนี้ Mindness Young และ Darwin [7] อธิบายไว้ว่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อความทนทานคืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ความสามารถในการซึมผ่านของคอนกรีตและความสามารถในการแทรกซึมลดลง เมื่ออัตราส่วนลดลง อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ นั้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของคอนกรีต ซึ่งเห็นได้ว่าการซึมผ่านคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในการทดสอบจะแตกต่างกันเกี่ยวกับพื้นที่ในการซึมผ่านเนื่องจากให้ครอบคลุมแปลที่ทำการซ่อมแซม ซึ่งมีค่าการซึมผ่านมากกว่ามาตรฐาน

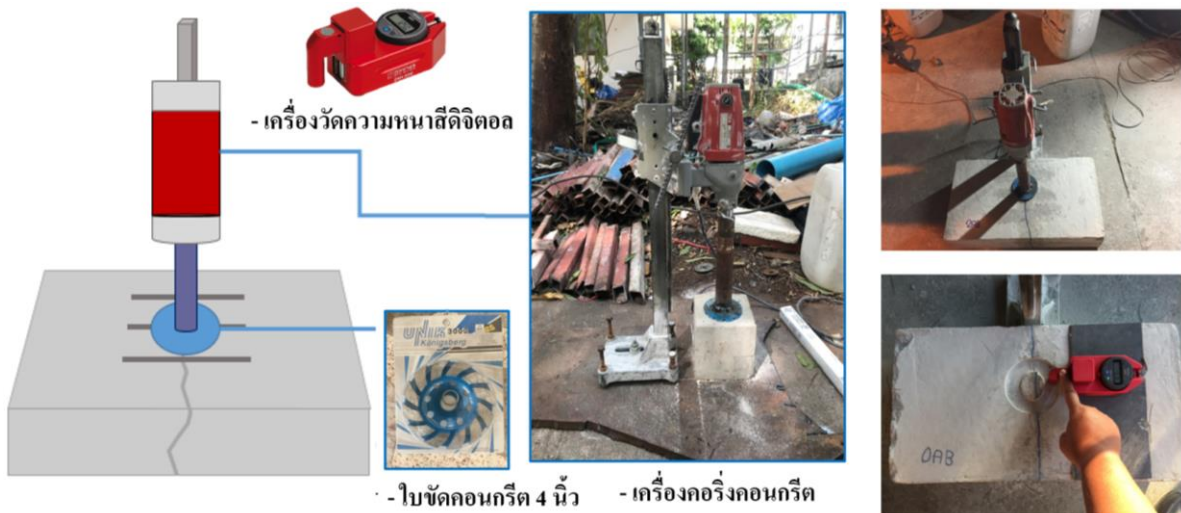




รูปที่ 7 การทดสอบการซึมผ่าน ประยุกต์ตามมาตรฐาน JIS A6909

### 2.3.3 การทดสอบการซัดสี

ทำการทดสอบคานคอนกรีตจำนวน 12 ตัวอย่าง หลังซ่อมแซมโดยประยุกต์ใช้เครื่องเจาะคอนกรีตที่มีรอบหมุนที่ 1100 รอบ/นาที โดยการติดตั้งใบซัดคอนกรีตกับกระบอกเจาะคอนกรีต และวางไว้ที่ตำแหน่งคานคอนกรีตที่ซ่อมแซมไว้ ดำเนินการจับเวลาทุก ๆ 10 วินาที วัดค่าความลึกที่ถูกซัดสีออกไป โดยใช้เครื่องวัดความหนาดีจิจิตอล จับเวลาจนครบ 200 วินาที นำมาพิจารณาการถูกซัดสีบริเวณที่ซ่อมแซม ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยได้ประยุกต์ใช้วิธีการทดสอบนี้ตามมาตรฐาน ASTM C779 [8] โดยค่าตามมาตรฐาน ASTM C779 ที่ใช้ทดสอบจากการซัดสีความลึกสูงสุด ไม่เกิน 3 มิลลิเมตร ในสภาวะการทดสอบตอนเปียกน้ำ ส่วนในการทดสอบในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่ามาตรฐานในการทดสอบความลึกของการซัดสี แต่ต่ำกว่ามาตรฐานที่ไม่ได้ทดสอบตอนเปียกน้ำ

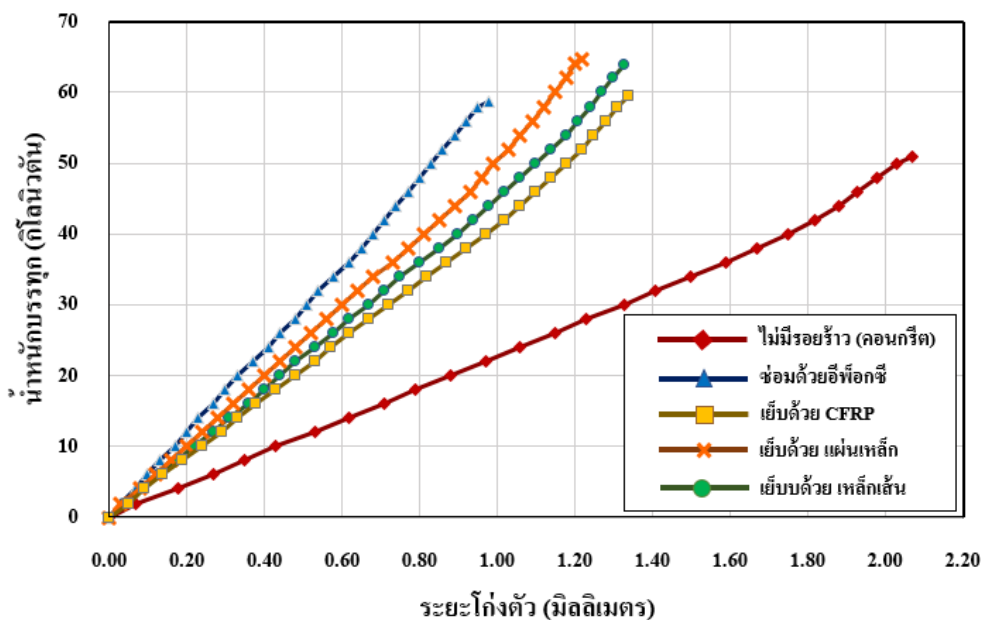


รูปที่ 8 การทดสอบการซัดสี

### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 การทดสอบแรงค้ำ

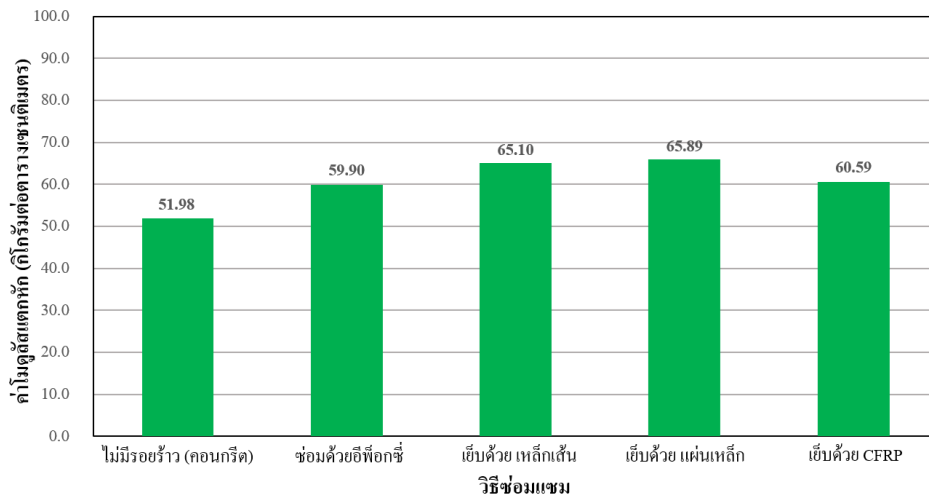
รูปที่ 8 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะ โกงตัวที่กึ่งกลางคานคอนกรีต พบว่าก่อนซ่อมแซมที่ไม่มีรอยแตกร้าวจะมีการรับน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่าหลังการซ่อมแซมตามวิธีต่าง ๆ แต่จะมีระยะ โกงตัวมากกว่าหลังการซ่อมแซมตามวิธีต่าง ๆ โดยหลังการซ่อมแซมจะมีความแข็งแรงในการรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นแต่จะมีระยะ โกงตัวน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดของทุก ๆ วิธีที่ซ่อมแซมและเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะเห็นได้ว่าการเย็บด้วยเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ตามมาด้วยการเย็บด้วยแผ่นเหล็ก 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร, การเย็บด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) และซ่อมด้วยอีพ็อกซี ตามลำดับ



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการซ่อมแซมแต่ละวิธี

รูปที่ 9 แสดงค่าโมดูลัสแตกหักของแต่ละวิธีซ่อมแซม เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะเห็นได้ว่าก่อนซ่อมแซมที่ไม่มีรอยแตกร้าวมีค่าโมดูลัสแตกหักน้อยกว่าหลังซ่อมแซมตามวิธีต่าง ๆ และมีแนวโน้มทำให้ค่าโมดูลัสแตกหักมากขึ้นของทุก ๆ วิธี โดยการเย็บด้วยแผ่นเหล็ก 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ตามมาด้วย การเย็บด้วยเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร, การเย็บด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) และซ่อมด้วยอีพ็อกซี ตามลำดับ ซึ่งมีผลใกล้เคียงกับการทดลองของ Anilkumar P M [9] ที่ว่าวิธีการเย็บที่ดีที่สุดคือการเย็บรูปร่างเป็นตัวยู มีการเว้นระยะในการเย็บของแต่ละวิธีเท่า ๆ กัน โดยความถี่อยู่ระหว่าง 1 ฟุตถึง 3 ฟุต และยาวประมาณ 6 นิ้ว กล่าวคือ การเย็บรูปแบบดังกล่าวกับการเย็บด้วยเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรมีลักษณะเหมือนกัน จะเห็นได้ว่าการเย็บด้วยเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรจะมีประสิทธิภาพไม่ดีที่สุด แต่ถ้าเปรียบเทียบกับวิธีการซ่อมแซมตามวิธีต่าง ๆ ในการทดสอบนี้ จะเห็นได้ว่าการเย็บด้วยแผ่นเหล็ก 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการซ่อมแซม

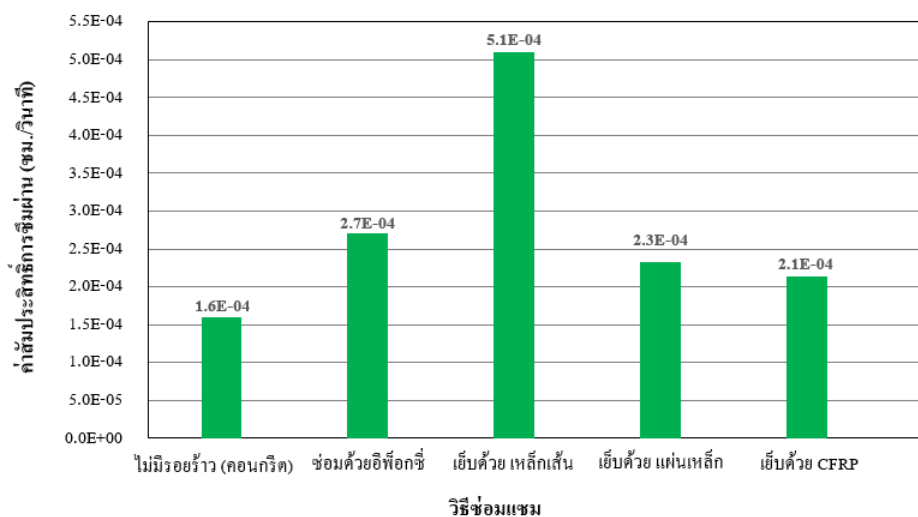




รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพค่าโมดูลัสแตกหัก

### 3.2 การทดสอบการซึมผ่าน

รูปที่ 10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของแต่ละวิธีซ่อมแซม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างเดิมที่ไม่เสียหายและยังไม่ซ่อมแซม พบว่าในการซ่อมแซมทุก ๆ วิธีจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสูงขึ้น และเปรียบเทียบระหว่างแต่ละวิธีการซ่อม พบว่าการซ่อมแซมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) มีค่าน้อยที่สุด ตามมาด้วยการซ่อมแซมที่ใช้เหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร, การซ่อมแซมที่ใช้เหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และการซ่อมแซมด้วยอีพ็อกซีโดยไม่มีการเย็บ (Stitching Dogs) ตามลำดับ จากการศึกษาของ K. Wang [10] อธิบายว่า ขนาดความกว้างของแผลในการซ่อมแซมมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน กล่าวคือขนาดแผลที่ใหญ่ขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าสูงขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้พบว่า การซ่อมแซมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) และเหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร มีขนาดแผลความกว้างอยู่ระหว่าง 3 – 5 มิลลิเมตร (รูปที่ 11(ก)) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการซ่อมแซมด้วยเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จะมีขนาดแผลความกว้างอยู่ระหว่าง 10 – 15 มิลลิเมตร (รูปที่ 11(ข)) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมากที่สุด ซึ่งเห็นได้ว่าการซ่อมแต่ละอย่างมีวัสดุขนาดแตกต่างกัน ทำให้ต้องกรีดคอนกรีตเพื่อซ่อมแซมไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน



(ก) ขนาดแผลความกว้างอยู่ระหว่าง 3 – 5 มิลลิเมตร

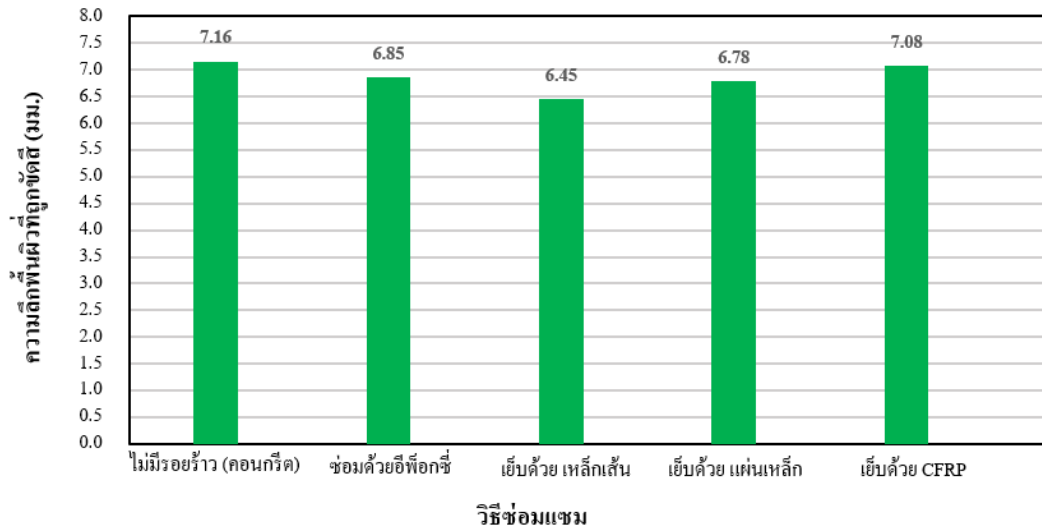


(ข) ขนาดแผลความกว้างอยู่ระหว่าง 10 – 15 มิลลิเมตร

รูปที่ 11 ขนาดความกว้างของแผลในการซ่อมแซม

### 3.3 การทดสอบการขัดสี

รูปที่ 12 แสดงการต้านทานการขัดสี เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับหลังซ่อมของผิวคอนกรีต ด้วยวิธีการเย็บ (Stitching Dogs) โดยใช้วัสดุ 3 ชนิด จะเห็นได้ว่าการขัดสีจะทำได้ยากกว่าเพราะหลังซ่อมผิวคอนกรีตมีความแกร่งกว่า และการซ่อมที่ใช้เหล็กกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จะขัดสีได้ยากที่สุดทำให้ระยะขัดสีกินลึกลงไปได้น้อยที่สุด ตามมาด้วย เหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร, การซ่อมแซมด้วยอีพ็อกซีโดยไม่มีการเย็บ (Stitching Dogs) และแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) ตามลำดับ พื้นที่ผิวสัมผัสมีอีพ็อกซีมากเป็นสาเหตุที่สำคัญต่อการทนทานต่อการขัดสี ตามการศึกษาของ Jains E. [11] ซึ่งในการวิจัยนี้ การซ่อมที่ใช้เหล็กกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวสัมผัสในการขัดสีมากที่สุด ส่วนการซ่อมที่ใช้เหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร และการซ่อมที่ใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) มีพื้นที่ผิวสัมผัสใกล้เคียงกัน ซึ่งตรงกับผลการขัดสีที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีอีพ็อกซีมาก



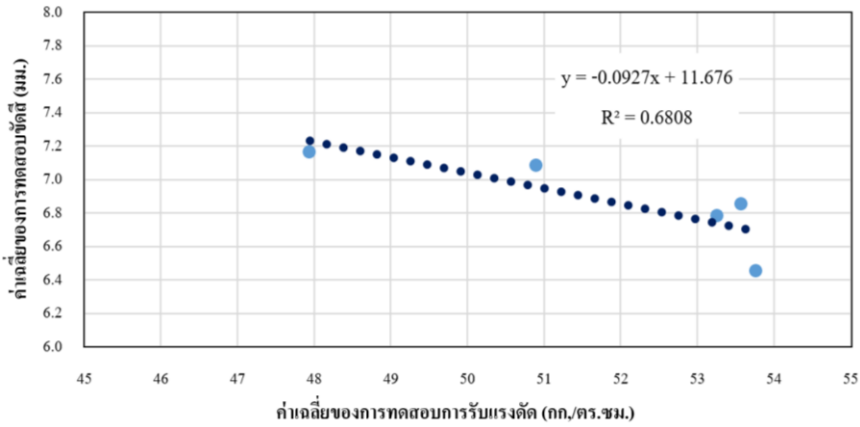
รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพค่าขั้วดี

### 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างทดสอบการรับแรงดัด ทดสอบการซึมผ่าน ทดสอบการขั้วดี

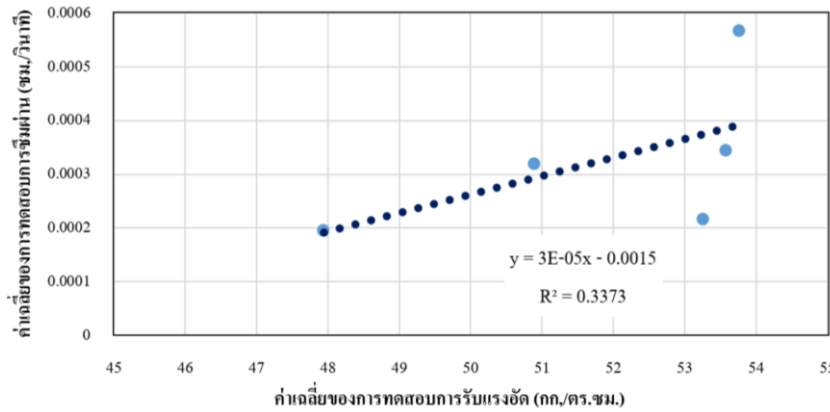
รูปที่ 13 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทดสอบการรับแรงดัด ทดสอบการซึมผ่าน ทดสอบการขั้วดี โดยการซ่อมคอนกรีตด้วยวิธีการเย็บ (Stitching Dogs) โดยใช้วัสดุ 3 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจะเห็นได้ว่าการซ่อมจะส่งผลต่อค่าโมดูลัสแตกหักเพิ่มขึ้น ทำให้การต้านทานการขั้วดีเฉลี่ยเพิ่มขึ้น (กัลดรอนผิวคอนกรีตน้อยลง) เพราะแรงงขึ้นตามกราฟ (รูปที่ 13(ก)) ส่วนที่ว่าค่าโมดูลัสแตกหักเพิ่มขึ้น แต่การซึมผ่านเฉลี่ยกลับเพิ่มขึ้นตามกัน ทั้ง ๆ ที่ควรลดลง เป็นอย่างนี้เนื่องจากขนาดผลของการเย็บตามทออธิบายไว้ไปก่อนหน้านี้ ดังนั้นค่าโมดูลัสแตกหักจึงไม่มีผลต่อการซึมผ่านตามกราฟ (รูปที่ 13(ข)) โดยเหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ตามมาด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) และเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ

### 3.5 วิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล ราคา เวลาที่ใช้ซ่อมแซมของแต่ละวิธี

วิธีซ่อมแซมที่ดีที่สุด คือ การเย็บด้วยเหล็กแผ่น 1 นิ้ว หนา 3 มิลลิเมตร เพื่อซ่อมแซม ก็เพราะมีค่ากำลังรับแรงดัดดีที่สุด รวมถึงค่าการซึมผ่านมีค่าน้อยและยังมีค่าทนทานต่อการขั้วดี รวมถึงราคาซ่อมแซมต่อเมตรไม่แพงมากนั้นและเวลาในการซ่อมแซมต่อเมตรก็ใช้เวลาไม่มากนัก และยังมีค่าใกล้เคียงกับการเย็บด้วยเหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร แต่ต่างกันที่การทดสอบคุณสมบัติทางกลด้านการซึมผ่าน ส่วนการเย็บด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์(CFRP) ไม่เหมาะสมที่จะนำมาซ่อมแซมเนื่องจากกำลังรับแรงดัดไม่ค่อยดี รวมถึงการทนทานต่อการขั้วดีได้น้อยและยังมีราคาซ่อมแซมต่อเมตรแพงที่สุด ส่วนในการซ่อมแซมด้วยอีพ็อกซีที่ไม่มีการเย็บ เหมาะสมกับการซ่อมแซมที่ไม่ค่อยรับแรงดัด ซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 3



(ก) ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสแตกหักกับค่าการขาดดี



(ข) ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสแตกหักกับค่าการซึมผ่านในคอนกรีต

รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นทำให้ความซึมผ่านเพิ่ม และทำให้การขาดดีเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล ราคา เวลาที่ใช้ซ่อมแซมของแต่ละวิธี

| ลำดับ | วิธีซ่อมแซม                               | ทดสอบแรงดัด | ทดสอบการซึมผ่าน | ทดสอบการขาดดี | ราคาซ่อมแซมต่อเมตร | เวลาที่ใช้ซ่อมแซมต่อเมตร |
|-------|---|-------------|-----------------|---------------|--------------------|--------------------------|
| 1     | เหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร           | ดีที่สุด    | น้อย            | น้อย          | พอเหมาะ            | พอเหมาะ                  |
| 2     | เหล็กเส้นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร | ดี          | มาก             | น้อยที่สุด    | ถูก                | มาก                      |
| 3     | แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์(CFRP)                  | ปานกลาง     | น้อยที่สุด      | มาก           | แพงที่สุด          | พอเหมาะ                  |
| 4     | ซ่อมแซมด้วยอิพ็อกซีไม่มีการเย็บ           | พอใช้       | ปานกลาง         | ปานกลาง       | ถูกที่สุด          | น้อย                     |

#### 4. สรุป

1. เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำลังรับแรงดัด คอนกรีตที่มีการซ่อมแซมมีประสิทธิภาพดีกว่าคอนกรีตเดิมที่ไม่แตกร้าวเสียหาย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ การเชื่อมด้วยแผ่นเหล็กให้ประสิทธิภาพสูงสุด ตามมาด้วยเหล็กเส้น และคาร์บอนไฟเบอร์ตามลำดับ

2. เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพด้านทานการซึมผ่าน คอนกรีตที่มีการซ่อมแซมมีประสิทธิภาพดีต่อกว่าคอนกรีตเดิมที่ไม่แตกร้าวเสียหาย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ การเชื่อมด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ตามมาด้วยแผ่นเหล็กและเหล็กเส้นตามลำดับ

3. เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการขัดสี คอนกรีตที่มีการซ่อมแซมมีประสิทธิภาพดีกว่าคอนกรีตเดิมที่ไม่แตกร้าวเสียหาย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ การเชื่อมด้วยเหล็กเส้นให้ประสิทธิภาพสูงสุด ตามมาด้วยแผ่นเหล็ก และคาร์บอนไฟเบอร์ตามลำดับ

4. การขัดสี และการซึมผ่านมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงดัด กล่าวคือการขัดสีมีความแกร่งเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังรับแรงดัดสูงขึ้น แต่กำลังรับแรงดัดไม่มีผลต่อการซึมผ่านเพราะขนาดผลของการเชื่อมจะมีผลต่อการซึมผ่านมากกว่า

5. การเชื่อมด้วยเหล็กแผ่น 1 นิ้วหนา 3 มิลลิเมตร เหมาะสมที่สุด กับสภาพการใช้งานมากที่สุดเนื่องจากให้กำลังรับแรงดัดดี มีความต้านทานการซึมผ่านและการกัดกร่อนพอสมควร รวมถึงให้งบประมาณและเวลาที่ใช้ซ่อมแซมพอเหมาะ

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และกองสนามบิน ส่วนสนามบินฝ้ายสนามบินและอาคาร ท่าอากาศยานดอนเมือง ที่ให้ใช้สถานที่ในเตรียมตัวอย่างและใช้ในการทดสอบ

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] American Concrete Institute. ACI 224.1R-93: 1998. *Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures*. 1998.
- [2] American Society for Testing and Materials. ASTM D5340-03: 2003. *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*. 2003.
- [3] James, D. C. *Engineering and Design Evaluation and Repair of Concrete Structures*, (EM 1110-2-2002), Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers, 1995, pp. 6-21.
- [4] กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย, *มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต*, มยผ.1901-51, พ.ศ.2551
- [5] American Society for Testing and Materials. ASTM C293-02: 2002. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. 2002.
- [6] Japan Industrial Standard permeability test B. JIS A 6909: 1995. *JIS Handbook 24-1, Architecture/Material Part*, 764-765. 1995.
- [7] S. Mindess, J.F. Young, and D. Darwin, *Concrete*, 2nd Edition, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ. 2003, pp. 477-481
- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM C 779/C 779M: 1995. *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces*. 1995.
- [9] Anilkumar P M, Dr. J Sudhakumar, Repairing Cracks in Concrete Structures. *International Conference on Current Trends in Engineering Research*, ICCTER. 2014, pp. 2-3
- [10] Kejin Wang, Daniel C. Jansen, Surendra P. Shah, Alan F. Karr, The NSF Center for Advanced Cement-Based Materials. *Permeability Study of Cracked Concrete*, 1997, pp. 1-13
- [11] Jain.s E.McDonald, TonyC.Liu. *Repair of Concrete Surfaces Subjected to Abrasion Erosion Damage*, Vicksburg: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1979, pp. 17.



