

## ผลของรอยร้าวต่อการซ่อมแซมด้วยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ Effect of Cracks on Repair with Geopolymer Mortar

จิระณภัทร์ ผูกพันธุ์รัตน์<sup>1,\*</sup> วันโชค เครือหงษ์<sup>2</sup> จิระยุทธ สืบสุข<sup>3</sup> และ ณัฐชัย โปรัมย์ณี<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย จ.กรุงเทพมหานคร

<sup>3</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.นครราชสีมา

<sup>4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จ.สกลนคร

\*Corresponding author ; E-mail address: pdekka207@gmail.com , wunchock\_kr@mutto.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของรอยร้าวต่อประสิทธิภาพการซ่อมแซมด้วยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตแบบจานตัดที่มีกำลังอัด 32 เมกะปาสกาล ที่อายุ 28 วัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตรหนา 40 มิลลิเมตร และมีรอยร้าวลึก 16 มิลลิเมตร ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบสามจุด (Three-point bending) ในสามกรณี ได้แก่ ตัวอย่างไม่แตกร้าว ตัวอย่างที่แตกร้าวและซ่อมด้วยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และตัวอย่างที่ซ่อมด้วยปูนซีเมนต์เกรดที่ไม่หดตัว โดยให้แรงกระทำที่มุม 0° และ 63° กับแนวรอยร้าว ผลการทดสอบพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานข้อกำหนดปูนซีเมนต์เกรดที่ไม่หดตัว และตัวอย่างที่แตกร้าวแบบ Mode III (Tearing) รับแรงได้มากกว่าแบบ Mode I (Opening) จากผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุซ่อมแซมรอยร้าวในโครงสร้างคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ , แรงดัดแบบสามจุด , ปูนซีเมนต์เกรดที่ไม่หดตัว , วัสดุซ่อมแซม

### ABSTRACT

This study investigates the effect of cracks on the repair performance using geopolymer mortar. Concrete disc specimens with a compressive strength of 32 MPa at 28 days, 150 mm in diameter, and 40 mm in thickness were used. Artificial cracks with a depth of 16 mm were introduced. Three-point bending tests were performed on three types of specimens: uncracked specimens, cracked specimens repaired with geopolymer mortar, and cracked specimens repaired with non-shrink cement grout. The loading was applied at angles of 0° and 63° relative to the crack plane. The test results showed that the compressive strength of the geopolymer mortar exceeded the standard

requirements of non shrink cement grout. Specimens with Mode III (Tearing) cracks exhibited higher load-bearing capacity than those with Mode I (Opening) cracks. These findings suggest that geopolymer mortar has strong potential to be developed as an effective repair material for cracked concrete structures.

Keywords: Geopolymer mortar , Three-point bending , Non shrink grout , Repair material

### 1. บทนำ

ในปัจจุบัน การใช้คอนกรีตในงานก่อสร้างมีความสำคัญอย่างยิ่งและเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทาน มีอายุการใช้งานยาวนาน และสามารถใช้ได้หลากหลายรูปแบบ แต่ในขณะเดียวกัน คอนกรีตยังมีความเปราะบางต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีอย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไป คอนกรีตอาจเกิดความเสียหายจากหลายสาเหตุ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ การเกิดรอยแตกร้าว หรือการกัดกร่อนจากสารเคมี ซึ่งทำให้จำเป็นต้องมีการซ่อมแซมเพื่อรักษาความปลอดภัยและอายุการใช้งานของโครงสร้าง รอยร้าวในโครงสร้างอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การหดตัวของวัสดุ, การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, หรือการบรรทุกน้ำหนักที่เกินความสามารถของโครงสร้าง รอยร้าวเหล่านี้ไม่เพียงแต่ทำให้ความสวยงามลดลง แต่ยังส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงและความทนทานของโครงสร้างอีกด้วย การซ่อมแซมรอยร้าวจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต ในปัจจุบันการก่อสร้างและการซ่อมแซมโครงสร้างต่าง ๆ เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในด้านความปลอดภัยและความทนทานของวัสดุที่ใช้ ในบรรดาเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานที่มี  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ทำให้เกิดการก่อตัวและให้กำลังอัดได้ จีโอโพลิเมอร์ใช้เป็นวัสดุประสาน จากงานวิจัย Rattanasak and Chindaprasit [1] พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ มีความเหมาะสมในการผลิตแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์ และการศึกษา

พบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เมื่อเทียบการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศลดลงร้อยละ 80-90 อ้างอิง J. Davidovits [2] นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์ใช้พลังงานในการผลิตต่ำกว่าร้อยละ 60 เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตปูนซีเมนต์ อ้างอิง Z. Li, Z. Ding, Y. Zhang [3]

การแตกร้าว (Fracture Mechanics) ของวัสดุเมื่อเกิดรอยร้าวหรือการแตกหัก โดยเฉพาะในสภาพที่มีความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) สูง ซึ่งสามารถแบ่งโหมดการแตกหักออกเป็น 3 รูปแบบคือ รูปแบบที่ 1 Mode I (Opening) เป็นการเปิดของรอยร้าวภายใต้แรงดึง โดยมีลักษณะคือ พื้นผิวของรอยร้าวเปิดออกและแยกจากกันในแนวตั้งฉากกับระนาบการแตกร้าว รูปแบบที่ 2 Mode II (Shearing) ซึ่งทำให้พื้นผิวของรอยร้าวเลื่อนขนานไปกับทิศทางของการขยายรอยร้าว และรูปแบบที่ 3 Mode III (Tearing) คือพื้นผิวของรอยร้าวจะเคลื่อนที่ขนานไปกับแรงที่กระทำ อ้างอิง G. Murali [4] และการทดสอบ อ้างอิง L. Tutluoglu, C. Keles [5] การหาค่าความทนทานต่อการแตกร้าว Mode I ด้วยวิธีการตัดตัวอย่างคอนกรีตแบบจานรอยบากตรง **ข้อดีของวิธีการใหม่** ได้แก่ การเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนการทดสอบที่ง่ายขึ้น โครงสร้างตัวอย่างที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ขอบเขตกระบวนการแตกร้าวที่เล็กลง และความยืดหยุ่นของรูปทรงตัวอย่างสำหรับการศึกษาพฤติกรรมผลกระทบของขนาด หลังจากนั้น อ้างอิง M.R.M. Aliha [6] ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการแตกหักแบบผสม Mode I และ Mode III ที่มีรอยร้าวเอียงผ่านเส้นผ่านศูนย์กลางและอยู่ภายใต้การรับแรงดัดแบบสามจุด (Three-point Bend Loading) เพื่อหาตัวประกอบความเข้มข้นของความเค้น (Stress Intensity Factors) ในตัวอย่างจานดัดที่พบว่า ตัวอย่างที่นำเสนอสามารถรองรับการผสม Mode I และ Mode III ได้อย่างครบถ้วน ตั้งแต่ Mode I ไปจนถึง Mode III

การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่แตกร้าวมีการใช้วัสดุซ่อมแซม เช่น ซีเมนต์เกร้าท์ชนิดไม่หดตัว (Non Shrink Cement Grout) ซีเมนต์ก่อตัวเร็ว (Rapid-Setting Cement) อีพ็อกซี (Epoxy) เป็นต้น การศึกษาการใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุซ่อมแซม อ้างอิง T. Phoo-ngernkham [7] ศึกษาผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตต่อกำลังรับแรงเฉือนอัดของจีโอโพลิเมอร์พบว่าการใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2 ให้ผลกำลังเฉือนอัดดีกว่าใช้โซเดียมซิลิเกตหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว นอกจากนั้น อ้างอิง T. Phoo-ngernkham [8] ศึกษาจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุซ่อมแซมพบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 14 โมลาร์ และการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุประสานแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงให้กำลังรับแรงเฉือนอัดสูงสุดและสามารถใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมตามท้องตลาด อ้างอิง T. Phoo-ngernkham [9] ศึกษาการซ่อมแซมรอยร้าวของคาน ด้วยจีโอโพลิเมอร์พบว่าช่วยเพิ่มกำลังดัดและการต้านทานการแตกร้าว อ้างอิง P. Chindaprasit [10] ศึกษาการใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสามารถใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมในสภาวะ

สารละลายแมกนีเซียมซิลิเกตเมื่อเทียบกับการซ่อมแซมด้วยซีเมนต์เกร้าท์ชนิดไม่หดตัว

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการนำจีโอโพลิเมอร์มาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมในงานคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาค้นคว้าด้วยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับวัสดุซ่อมแซมเชิงพาณิชย์อื่นๆ เช่น ซีเมนต์เกร้าท์ชนิดไม่หดตัว ในสภาวะการแตกร้าวโหมดที่ 1 Mode I (Opening) และโหมดที่ 3 Mode III (Tearing) รวมถึงประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยร้าว ยังมีการศึกษาน้อยมาก และการศึกษาในเรื่องนี้ยังเป็นการศึกษาวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เถ้าลอย (FA) จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย ซีเมนต์เกร้าท์ไม่หดตัว (Non Shrink Cement Grout) คือ (NS) สำหรับสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.57 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.59 ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุพบว่า เถ้าลอยมีผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เท่ากับร้อยละ 71.40 และมีปริมาณ  $\text{CaO}$  ร้อยละ 12.30 ส่วนซีเมนต์เกร้าท์ไม่หดตัวมี  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 55.00 29.30 และ 2.45 ตามลำดับ และขนาดอนุภาคเฉลี่ย D50 ของเถ้าลอยและซีเมนต์เกร้าท์ไม่หดตัวเท่ากับ 34.60 และ 942 ไมโครเมตร

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุ

| Chemical compositions and physical properties | FA    | NS    |
|-----------------------------------------------|-------|-------|
| $\text{SiO}_2$                                | 37.70 | 55.00 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$                       | 22.70 | 2.45  |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$                       | 11.40 | 1.47  |
| $\text{CaO}$                                  | 12.30 | 29.30 |
| $\text{MgO}$                                  | 2.26  | 0.46  |
| $\text{K}_2\text{O}$                          | 2.56  | 0.26  |
| $\text{Na}_2\text{O}$                         | 1.60  | 0.49  |
| $\text{SO}_3$                                 | 3.00  | 1.83  |
| LOI                                           | 1.56  | -     |
| Median particle size D50 ( $\mu\text{m}$ )    | 34.6  | 942   |

### 2.2 อัตราส่วนผสม

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีความเข้มข้น 14 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 1 ทุกอัตราส่วนผสม การผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เริ่มจากผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูงและทรายให้เข้ากัน

หลังจากนั้นผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และตามด้วยการผสมโซเดียมซิลิเกต

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

| Symbol | FA<br>(g) | Sand<br>(g) | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub><br>(g) | NaOH<br>(g) |
|--------|-----------|-------------|-----------------------------------------|-------------|
| FA     | 100       | 100         | 33.33                                   | 16.67       |
| NS     | -         | -           | -                                       | -           |

### 2.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการแตกร้าวสำหรับการซ่อมแซม

ผสมคอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 32 เมกะปาสคาลที่อายุ 28 วัน สำหรับการทดสอบการแตกร้าวได้มีนักวิจัยหลายคนเตรียมตัวอย่าง รอยบากแบบจานดัด (Edge Notched Disc Bend - ENDB) อ้างอิง M.R.M. Aliha [11] เทคอนกรีตลงในแบบหล่อวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร หนา 40 มิลลิเมตร การหล่อตัวอย่างมีการเตรียมตัวอย่างที่มีรอยบากกว้าง 2.2 มิลลิเมตร ลึก 16 มิลลิเมตร ถอดแบบหล่อเมื่ออายุครบ 1 วัน แล้วบ่มตัวอย่างในน้ำจนกระทั่งครบ 28 วัน แล้วทำการซ่อมด้วยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการแตกร้าวสำหรับการซ่อมแซม

### 2.4 การทดสอบตัวอย่าง

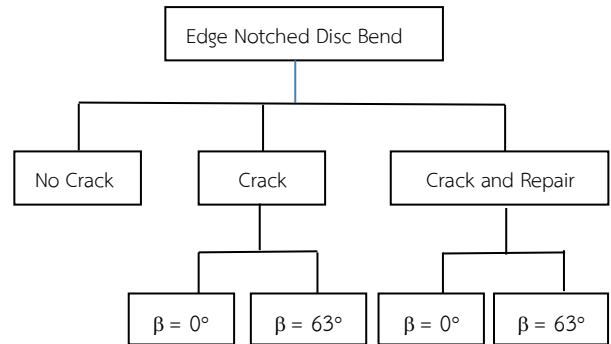
#### 2.4.1 การทดสอบกำลังอัด ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

หล่อตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ถอดแบบหล่อขึ้นตัวอย่างหลังจาก 24 ชั่วโมงและหุ้มด้วยพลาสติกคลุมที่อุณหภูมิห้อง ทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน ทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน อ้างอิง ASTM C 109 [12]

#### 2.4.2 การทดสอบกำลังดัด ของคอนกรีตที่ซ่อมแซมรอยร้าวด้วยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

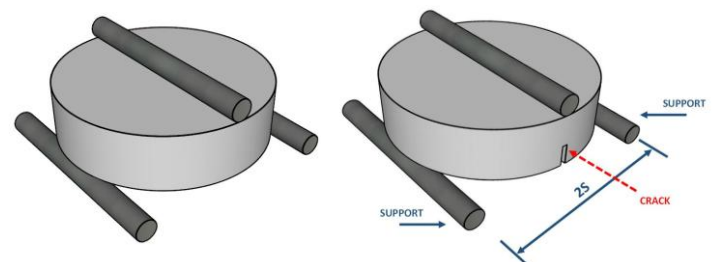
การทดสอบกำลังดัดโดยวิธีรอยบากแบบจานดัด (Edge Notched Disc Bend - ENDB) อ้างอิง M.R.M. Aliha, A. Mansourian, S. Pirmohammad [11, 13, 14] ซึ่งสามารถทดสอบได้หลายโหมดของการแตกร้าว สำหรับในงานวิจัยจะทำการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 2 แผนผังการทดสอบ การทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือกรณีที่ 1 ตัวอย่าง

ไม่มีการแตกร้าว (No Crack) กรณีที่ 2 ตัวอย่างมีการแตกร้าว (Crack) และกรณีที่ 3 ตัวอย่างมีการแตกร้าวและมีการซ่อมแซม (Crack and Repair) สำหรับการให้แรงกระทำด้านบนของตัวอย่างและมุมการแตกร้าวแบ่งออกเป็น Mode I มุมของแรงกระทำและมุมของการแตกร้าว  $\beta = 0^\circ$  และ Mode III มุมของแรงกระทำและมุมของการแตกร้าว  $\beta = 63^\circ$



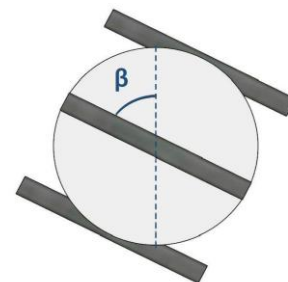
รูปที่ 2 แผนผังการทดสอบ

การทดสอบแรงดัดแบบสามจุด (Three Point Bend loading) โดยตัวอย่างที่ทดสอบระยะห่างของจุดรองรับเท่ากับ 142.5 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 3 การทดสอบกำลังดัดแบบจานดัดโดยให้แรงกระทำที่กึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ อัตราการให้แรงกระทำ 2 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ



ก) ตัวอย่างไม่มีการแตกร้าว

ข) ตัวอย่างมีการแตกร้าว



ค) การทดสอบโหมดการแตกร้าว

รูปที่ 3 การทดสอบกำลังดัดแบบจานดัด

กำลังอัดของแบบงานดัดสามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ 1 และ ความต้านทานต่อการแตกหักสามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ 2 สำหรับการแตกร้าว Mode I หรือ  $\beta = 0^\circ$  และสมการที่ 3 สำหรับกรณีมุม  $\beta = 63^\circ$  หรือ Mode III ตารางที่ 3 ปัจจัยต่อรูปร่างสำหรับแรงกระทำโหมดต่างๆ

$$\sigma = \frac{6P_{cr}S}{RB^2} \quad (1)$$

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}Y_I \quad (2)$$

$$K_{III} = \sigma\sqrt{\pi a}Y_{III} \quad (3)$$

$P_{cr}$  คือ แรงกระทำทำให้เกิดการแตกร้าว (นิวตัน)

$\sigma$  คือ กำลังอัด (เมกะปาสกาล)

$K_I$  คือ ความสามารถในการต้านทานต่อการแตกร้าว Mode I ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

$K_{III}$  คือ ความสามารถในการต้านทานต่อการแตกร้าว Mode III ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

$S$  คือ ระยะห่าง  $\frac{1}{2}$  ของจุดรองรับ (71.25 มิลลิเมตร)

$B$  คือ ความหนาของตัวอย่างทดสอบ (40 มิลลิเมตร)

$R$  คือ รัศมีของตัวอย่างทดสอบ (75 มิลลิเมตร)

$A$  คือ ความลึกของรอยร้าว (16 มิลลิเมตร)

$Y_I$  คือ ปัจจัยต่อรูปร่างสำหรับ Mode I

$Y_{III}$  คือ ปัจจัยต่อรูปร่างสำหรับ Mode III

ตารางที่ 3 ปัจจัยต่อรูปร่างสำหรับแรงกระทำโหมดต่างๆ

| Loading Mode | $\beta$ (Degree) | $Y_I$ | $Y_{III}$ |
|--------------|------------------|-------|-----------|
| I            | 0                | 0.323 | 0         |
| III          | 63               | 0     | 0.073     |

#### 2.4.3 การถ่ายภาพขยาย

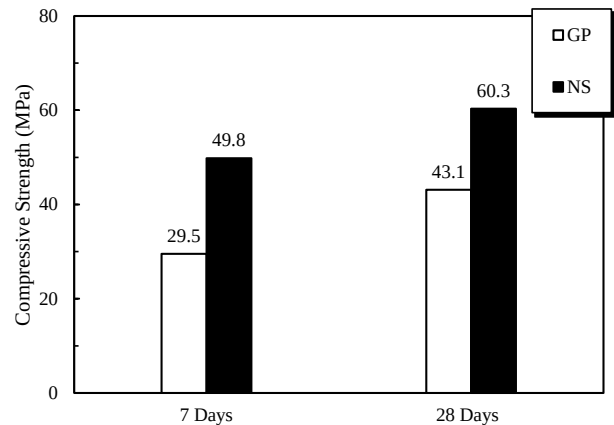
การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยนำชิ้นตัวอย่างที่อยู่ตรงกลางของคอนกรีตขนาดประมาณ 5 - 6 มิลลิเมตร ไปแช่ในอะซิโตนเพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง อ้างอิง T. Nochaiya [15] และนำไปทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy หรือ SEM)

### 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 การทดสอบกำลังอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าที่อายุการบ่ม 7 วัน กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ (GP) และ ซีเมนต์เกร้าที่ไม่หดตัว (NS) มีค่าเท่ากับ 29.5 และ 43.1 เมกะปาสกาล ตามลำดับ

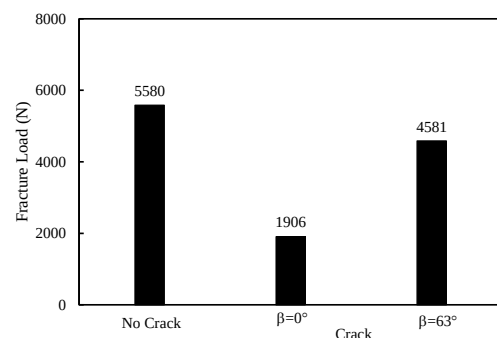
และเมื่ออายุการบ่มเป็น 28 วัน กำลังอัดเพิ่มขึ้น 49.8 และ 60.3 ตามลำดับ กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นด้วยอายุการบ่มแคลเซียมออกไซด์ในเถ้าลอยส่งผลเชิงบวกต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และทำปฏิกิริยาร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจล (N-A-S-H) ส่งผลให้การพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้น อ้างอิง W. Punurai [16] จากข้อกำหนดซีเมนต์เกร้าที่ไม่หดตัว ASTM C 1107 [17] กำหนดให้กำลังอัดที่ 28 วันไม่น้อยกว่า 34 เมกะปาสกาล



รูปที่ 4 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

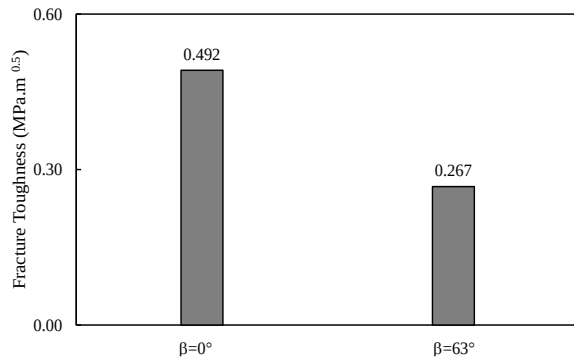
#### 3.2 ความสามารถในการต้านทานต่อการแตกร้าว

รูปที่ 5 แรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของการทดสอบแบบงานดัด พบว่ากรณีตัวอย่างไม่มีการแตกร้าว (No Crack) สามารถรับแรงประลัยได้ 5,580 นิวตัน สำหรับการรับแรงของ Mode I (Opening) ที่  $\beta = 0^\circ$  รับแรงที่ทำให้เกิดการวิบัติได้ 1,906 นิวตัน หรือรับได้ประมาณร้อยละ 34 เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการแตกร้าว เนื่องจากทิศทางการรับแรงของ Mode I เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงกระทำในแนวตั้งฉากกับรอยร้าวทำให้รอยร้าวเปิดออกซึ่งเป็นรูปแบบรอยร้าวพบบ่อยในโครงสร้าง และกรณีการรับแรงของ Mode III (Tearing) ที่  $\beta = 63^\circ$  รับแรงที่ทำให้เกิดการวิบัติได้ 4,581 นิวตัน รับแรงได้ประมาณร้อยละ 82 เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการแตกร้าว เกิดขึ้นเมื่อแรงเฉือนทำให้รอยร้าวบิดตัวออกจากระนาบตั้งฉากกับรอยร้าว อย่างไรก็ตามแรงประลัยใน Mode III สูงกว่า ใน Mode I เพราะว่าคอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังเฉือนได้ดีกว่าการรับกำลังดึง สอดคล้องกับการศึกษาของ อ้างอิง G. Murali , A. Mansourian [4, 13]



รูปที่ 5 แรงที่ทำให้เกิดการแตกหัก

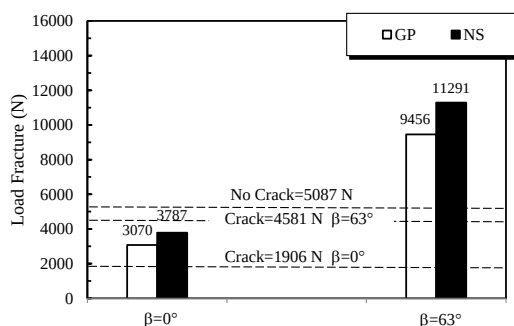
ความสามารถในการต้านทานต่อการแตกร้าวแสดงในรูปที่ 6 พบว่า การต้านทานต่อการแตกร้าว (Fracture Toughness หรือ  $K_{Ic}$  สำหรับ Mode I ที่  $\beta = 0^\circ$  มีค่าเท่ากับ 0.492 เมกะปาสคาล.เมตร<sup>1/2</sup> ขณะที่ Mode III ที่  $\beta = 63^\circ$  มีค่าเท่ากับ 0.267 เมกะปาสคาล.เมตร<sup>1/2</sup> สอดคล้องกับการศึกษาของ พบว่า มีค่า  $K_{Ic}$  มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ G. Murali , M.R.M. Aliha [4, 11]



รูปที่ 6 ความสามารถในการต้านทานต่อการแตกร้าว

### 3.3 ความสามารถในการรับแรงเมื่อซ่อมแซมด้วยจีโอโพลิเมอร์มาร์ตาร์

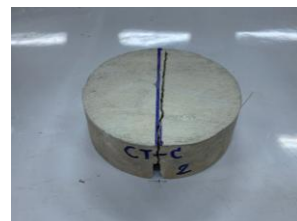
รูปที่ 7 ความสามารถในการรับแรงเมื่อซ่อมแซมพบว่า สำหรับ  $\beta = 0^\circ$  แรงประลัยที่ซ่อมแซมด้วยจีโอโพลิเมอร์ (GP) และซีเมนต์เกร้าท์ไม่หดตัว (NS) มีค่าเท่ากับ 3,070 นิวตัน และ 3,787 นิวตัน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่มีรอยร้าวที่ยังไม่ได้ซ่อมแซม 1,906 นิวตัน แรงประลัยของจีโอโพลิเมอร์ (GP) และซีเมนต์เกร้าท์ไม่หดตัว (NS) เพิ่มขึ้นร้อยละ 61 และ 98 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา  $\beta = 63^\circ$  ซ่อมแซมด้วยจีโอโพลิเมอร์ (GP) และซีเมนต์เกร้าท์ไม่หดตัว (NS) มีค่าแรงประลัยเท่ากับ 9,456 นิวตัน และ 11,291 นิวตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 106 และ 246 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ซ่อมแซมรับแรงประลัยได้ 4,581 นิวตัน การซ่อมแซมรอยร้าวด้วยจีโอโพลิเมอร์ (GP) และซีเมนต์เกร้าท์ไม่หดตัว (NS) ทำให้รับแรงเพิ่มขึ้นเพราะว่าวัสดุซ่อมแซมช่วยประสานรอยร้าวทำให้แรงสามารถถ่ายโอนผ่านรอยร้าวได้ดีลดการกระจุกตัวของหน่วยแรง (Stress Concentration) ที่ปลายของรอยร้าว อีกประการหนึ่งวัสดุซ่อมแซมถูกเติมเต็มช่องว่างในรอยร้าวทำให้โครงสร้างรับแรงได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การซ่อมแซมสำหรับ Mode III ที่มุม  $\beta = 63^\circ$  มีประสิทธิภาพการถ่ายแรงได้ดีกว่าเนื่องจากวัสดุซ่อมแซมมีกำลังสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีต



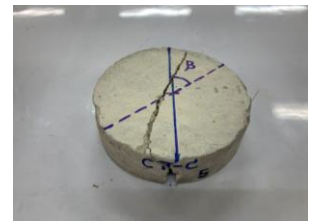
รูปที่ 7 ความสามารถในการรับแรงเมื่อซ่อมแซม

### 3.4 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง

รูปที่ 8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง พบว่ารูปที่ 8 (ก) การวิบัติภายใต้ Mode I ถูกแบ่งครึ่งออกเป็นสองส่วนตามแนวร้าวเริ่มต้น เป็นโหมดที่เกิดจากแรงดึง (Tensile Stress) ทิศทางตั้งฉากกับรอยทำให้รอยร้าวเปิดออก เส้นทางการร้าวจะขยายตัวที่ใหญ่ขึ้นทำให้แยกออกเป็นสองชิ้น ขณะที่รูปที่ 8 (ข) การวิบัติภายใต้ Mode III รอยร้าวจะบิดเบี้ยวไปจากระนาบรอยร้าวเดิม มักจะเกิดการบิดเบี้ยวของรอยร้าว เกิดจาก แรงเฉือนบิด (Out of plane Shear Stress) ซึ่งทำให้วัสดุบิดรอบแกนส่งผลให้การแตกร้าวไม่อยู่ในแนวระนาบเดิม (Twisting Fracture path) ส่วนรูปที่ 8 (ค) เป็นรูปแบบแยกออกเป็นสองชิ้นเนื่องจาก รอยต่อระหว่างรอยร้าวและวัสดุซ่อมแซม ส่วนรูปที่ 8 (ง) เป็นรอยร้าวแบบเฉือนบิด



ก) ก่อนซ่อมแซม  $\beta = 0^\circ$



ข) ก่อนซ่อมแซม  $\beta = 63^\circ$



ค) หลังซ่อมแซม  $\beta = 0^\circ$



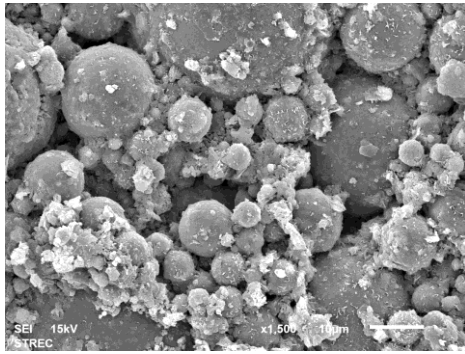
ง) หลังซ่อมแซม  $\beta = 63^\circ$

รูปที่ 8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง

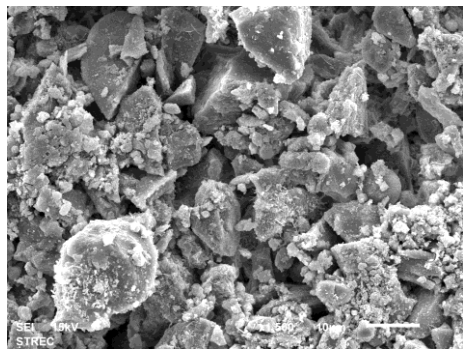
### 3.5 ภาพถ่ายขยายของวัสดุซ่อมแซม

รูปที่ 9 ภาพขยาย Fractured Surface ของของวัสดุซ่อมแซม เมื่อพิจารณารูปที่ 9 (ก) พบว่าลักษณะเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มาร์ตาร์ ประกอบด้วยอนุภาคเถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยา ไม่ทำปฏิกิริยา และทำปฏิกิริยา บางส่วนการทำปฏิกิริยาทำให้เกิดจีโอโพลิเมอร์เจล (N-A-S-H) และแคลเซียมซิลิเกต (C-S-H) ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มาร์ตาร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น อ้างอิง T. Phoo-ngernkham [18] เมื่อพิจารณา รูปที่ 9 (ข) พบโครงสร้างผลึกของแคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรตส่งผลให้เกิดกำลังของซีเมนต์เกร้าท์ไม่หดตัว





ก) จีโอโพลิเมอร์ (GP) ที่ขนาดพื้นที่ 10  $\mu\text{m}$  กำลังขยาย 1500x



ข) ซีเมนต์เกอราท์ไม่หดตัว (NS) ที่ขนาดพื้นที่ 10  $\mu\text{m}$  กำลังขยาย 1500x

รูปที่ 9 ภาพขยาย Fractured Surface ของวัสดุซ่อมแซม

#### 4.สรุปผลการทดสอบ

1. เถ้าลอยในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม นอกจากนี้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ยังสามารถต่อยอดพัฒนาเป็นวัสดุที่ใช้ซ่อมแซมในเชิงพาณิชย์ได้
2. การรับแรงของ Mode I (Opening) ที่  $\beta = 0^\circ$  สามารถรับแรงได้ประมาณร้อยละ 34 เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการแตกร้าว กรณีการรับแรงของ Mode III (Tearing) ที่  $\beta = 63^\circ$  สามารถรับแรงได้ประมาณร้อยละ 82 เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการแตกร้าว
3. การต้านทานต่อการแตกร้าว (Fracture Toughness) หรือ  $K_{IC}$  สำหรับ Mode I ที่  $\beta = 0^\circ$  มีค่าเท่ากับ 0.492 เมกะปาสคาล.เมตร<sup>1/2</sup> ขณะที่ Mode III ที่  $\beta = 63^\circ$  มีค่าเท่ากับ 0.267 เมกะปาสคาล.เมตร<sup>1/2</sup>
4. ความสามารถในการรับแรงเมื่อซ่อมแซมรอยร้าวด้วยจีโอโพลิเมอร์ (GP) และซีเมนต์เกอราท์ไม่หดตัว (NS) Mode III ที่มุม  $\beta = 63^\circ$  พบว่าสามารถรับแรงได้มากกว่า Mode I ที่มุม  $\beta = 0^\circ$  และตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีรอยแตกร้าว ซึ่งมีความสอดคล้องกับ ผลการวิจัยของ T. Phoo-ngernkham , T. Phoo-ngernkham , P. Chindaprasirt [7], [9], [10] ที่การซ่อมแซมรอยร้าวด้วย

จีโอโพลิเมอร์ (GP) สามารถรับแรงได้มากกว่า ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีรอยแตกร้าว

5. เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกในการซ่อมแซมคอนกรีตเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เกอราท์ไม่หดตัว

จากผลงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าทั้ง จีโอโพลิเมอร์ (GP) และซีเมนต์เกอราท์ไม่หดตัว (NS) เป็นวัสดุที่เหมาะสมกับการซ่อมแซมรอยร้าว แต่อาจเลือกใช้ได้โดยพิจารณาจากลักษณะของงานโครงสร้าง สภาพแวดล้อม งบประมาณ และความต้องการในด้านความคงทน โดยทั่วไปแล้ว หากลักษณะงานซ่อมแซมอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นหรือสารเคมีสูง ควรเลือกใช้จีโอโพลิเมอร์ (GP) หากลักษณะงานโครงสร้างที่ต้องรับแรงกด แรงดึงสูง และต้องการความแข็งแรงในระยะยาว ควรเลือกใช้ซีเมนต์เกอราท์ไม่หดตัว (NS)

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] U. Rattanasak, P. Chindaprasirt, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, Minerals Engineering, 22 (2009) 1073-1078.
- [2] J. Davidovits, Chemistry of geopolymeric systems, terminology, in: Geopolymer, sn, 1999, pp. 9-39.
- [3] Z. Li, Z. Ding, Y. Zhang, Development of sustainable cementitious materials, in: Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, China, 2004, pp. 55-76.
- [4] G. Murali, S.R. Abid, K. Al-Lami, N.I. Vatin, S. Dixit, R. Fediuk, Pure and mixed-mode (I/III) fracture toughness of preplaced aggregate fibrous concrete and slurry infiltrated fibre concrete and hybrid combination comprising nano carbon tubes, Construction and Building Materials, 362 (2023) 129696.
- [5] L. Tutluoglu, C. Keles, Mode I fracture toughness determination with straight notched disk bending method, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48 (2011) 1248-1261.
- [6] M.R.M. Aliha, A. Bahmani, S. Akhondi, Numerical analysis of a new mixed mode I/III fracture test specimen, Engineering Fracture Mechanics, 134 (2015) 95-110.

- [7] T. Phoo-ngernkham, A. Maegawa, N. Mishima, S. Hatanaka, P. Chindaprasirt, Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer, *Construction and Building Materials*, 91 (2015) 1-8.
- [8] T. Phoo-ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridditirud, S. Hatanaka, P. Chindaprasirt, High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, *Construction and Building Materials*, 98 (2015) 482-488.
- [9] T. Phoo-ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridditirud, S. Hatanaka, P. Chindaprasirt, Compressive strength, Bending and Fracture Characteristics of High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Containing Portland Cement Cured at Ambient Temperature, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (2016) 1263-1271.
- [10] P. Chindaprasirt, B. Sriopas, P. Phosri, P. Yoddumrong, K. Anantakarn, W. Kroehong, Hybrid high calcium fly ash alkali-activated repair material for concrete exposed to sulfate environment, *Journal of Building Engineering*, 45 (2022) 103590.
- [11] M.R.M. C Aliha, A. Bahmani, S. Akhondi, Determination of mode III fracture toughness for different materials using a new designed test configuration, *Materials & Design*, 86 (2015) 863-871.
- [12] ASTM 109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens,, Annual Book ASTM Standards,, West Conshohocken (2016).
- [13] A. Mansourian, S. Hashemi, M.R.M. Aliha, Evaluation of pure and mixed modes (I/III) fracture toughness of Portland cement concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, 178 (2018) 10-18.
- [14] S. Pirmohammad, A. Bayat, Characterizing mixed mode I/III fracture toughness of asphalt concrete using asymmetric disc bend (ADB) specimen, *Construction and Building Materials*, 120 (2016) 571-580.
- [15] T. Nochaiya, Y. Sekine, S. Choopun, A. Chaipanich, Microstructure, characterizations, functionality and compressive strength of cement-based materials using zinc oxide nanoparticles as an additive, *Journal of Alloys and Compounds*, 630 (2015) 1-10.
- [16] W. Punurai, W. Kroehong, A. Saptamongkol, P. Chindaprasirt, Mechanical properties, microstructure and drying shrinkage of hybrid fly ash-basalt fiber geopolymer paste, *Construction and Building Materials*, 186 (2018) 62-70.
- [17] ASTM C 1107, Packaged Dry, Hydraulic-Cement Grout (Nonshrink), Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.01 (2011).
- [18] T. Phoo-ngernkham, C. Phiangphimai, D. Intarabut, S. Hanjitsuwan, N. Damrongwiriyanupap, L.-y. Li, P. Chindaprasirt, Low cost and sustainable repair material made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue, *Construction and Building Materials*, 247 (2020) 118543.