# สมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากขยะพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน

# PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT AND GEOPOLYMER CONCRETES USING COARSE AGGREGATES FROM POLYPROPYLENE PLASTIC WASTE

ธิติ กางโหลน[1,*], ภีม เหนือคลอง[2], พิชชา จองวิวัฒสกุล[3], ทศพร ประเสริฐศรี[4], พรเพ็ญ ลิมปนิลชาติ[5] และ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง[6]
[1,2,3] หน่วยปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จ.กรุงเทพฯ
[4] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, จ.กรุงเทพฯ
[5] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล, จ.นครปฐม
[6] ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมธรณีเทคนิคและธรณีสิ่งแวดล้อม, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จ. กรุงเทพฯ
*Corresponding author; E-mail address: 6270122821@student.chula.ac.th

***บทคัดย่อ***

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่เป็นมวลรวมหยาบสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยแทนที่ในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร โดยมีแผนการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตครอบคลุมการทดสอบค่าการไหลแผ่, เวลาการก่อตัว, กำลังอัด, กำลังดัดและกำลังรับแรงดึงแยกของคอนกรีต ผลการทดสอบคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยพลาสติกถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของคอนกรีตควบคุมที่ผสมมวลรวมหยาบจากวัสดุธรรมชาติ ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการรับกำลังอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นทั้งของอายุบ่ม 7 และ 28 วัน การใช้มวลรวมพลาสติกไม่ส่งผลต่อกำลังดัดและกำลังดึงแยกของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้ามกำลังดัดและกำลังดึงแยกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวมพลาสติก ดังนั้นจึงไม่ควรใช้เศษพลาสติกแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติมากกว่า 10%

***คำสำคัญ:*** *ขยะพลาสติกรีไซเคิล, โพลีโพรไพลีน, จีโอโพลิเมอร์, คอนกรีต*

***Abstract***

The objective of this research is to reuse the plastic waste as coarse aggregates for Portland cement and geopolymer concretes. Natural coarse aggregates were repalced with plastic waste by the amounts of 10%, 30% and 50% by volume. Slump flow, setting time, compressive strength, flexural strength and splitting tensile strength of the concretes were investigated. The test results of concretes contained with plastic wastes were compared with the results of control concrete made with the natural coarse aggregate. The results showed that, at the age of 7 and 28 days, the compressive strength of Portland cement and geopolymer conretes decreased with increasing the plastic waste content. Incorporating the plastic aggregate did not significantly affect the flexural strength and splitting tensile strength of Portland cement concrete. On the other hand, the flexural and splitting tensile strengths of geopolymer concrete decreased when the plastic aggregate was increased; therefore, the replacing the natural coarse aggregate with plastic waste should not exceed 10%.

***Keywords:*** *Recycled plastic waste, Polypropylene, Geopolymer, Concrete*

## 1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ได้มีการนำพลาสติกหลากหลายชนิดมาใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า ของใช้ทั่วไปภายในบ้าน ฯลฯ เมื่อเวลาผ่านไปของใช้เหล่านี้ก็ได้มีการเสื่อมสภาพลงและหมดอายุการใช้งานในที่สุด จึงทำให้จำเป็นต้องเปลี่ยนหรือซื้อสินค้าตัวใหม่มาทดแทนของเดิม ซึ่งชิ้นส่วนพลาสติกที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในของใช้เหล่านั้นที่ยังคงมีสภาพดีอยู่จึงถูกทิ้งตามไปด้วยและก่อให้เกิดเป็นขยะพลาสติก ข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษระบุว่า ในปี 2561 ประเทศไทยมีขยะมูลฝอยรวม 27.8 ล้านตัน ซึ่งเป็นขยะพลาสติกประมาณ 2 ล้านตัน และขยะพลาสติกเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เพียงแค่ 5 แสนตันเท่านั้น [1]

อุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วในประเทศที่กำลังพัฒนา จึงทำให้ความต้องการในการใช้คอนกรีตมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในประเทศอินเดียนั้นคอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้มากเป็นอันดับต้น

ๆ โดยมีปริมาณมากถึง 450 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี [2] ส่งผลให้วัสดุจำพวกหิน และทรายซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน อีกทั้งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอตแลนซึ่งเป็นวัสดุประสานในการทำคอนกรีตนั้น ได้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ชั้นบรรยากาศโดยที่คิดเป็นร้อยละ 6 ของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มนุษย์สร้างขึ้น [3]

ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ [4] ซึ่งวัสดุจีโอโพลิเมอร์นั้นเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่ได้มาจากการสังเคราะห์วัสดุปอซโซลาน ที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก อย่างเช่น เถ้าลอย ดินขาวเผา เป็นต้น นำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายซิลิกาและอะลูมินาซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งปฏิกิริยานี้ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และประหยัดพลังงานในการผลิตปูนซีเมนต์ได้อีกด้วย [5]

จากที่มาปัญหาดังที่ได้กล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นว่าวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำได้ นั่นก็คือนำขยะพลาสติกบดไปแทนที่ในมวลรวมหยาบของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เพื่อที่จะช่วยลดปัญหาการเพิ่มขึ้นของขยะพลาสติก และลดการใช้มวลรวมในคอนกรีต จึงใช้ขยะพลาสติกแทนที่ในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ และศึกษาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบรีไซเคิลจากขยะพลาสติก

## 2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

### *2.1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย*

งานศึกษาวิจัยนี้มีวัสดุที่ใช้ประกอบไปด้วย มวลรวมหยาบทรายธรรมชาติ ขยะพลาสติกชนิดพอลิโพรไพลีน (Polypropylene plastic waste) ซึ่งจะถูกนำมาแทนที่หินหรือมวลรวมหยาบเพื่อที่จะช่วยลดปริมาณขยะพลาสติก อีกทั้งยังมีเถ้าลอย (Fly ash) สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีรายละเอียดส่วนผสมดังนี้

1) เถ้าลอยแคลเซียมสูง (HCF) ซึ่งนำมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 [6] นับเป็น Class C

2) สารละลายโซเดียมซิลิเกต ($Na_2SiO_3$) ซึ่งมีองค์ประกอบ $Na_2O$ เท่ากับ 9.84% และ $H_2O$ เท่ากับ 61.45% และ$SiO_2$ เท่ากับ 28.71%

3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่จะใช้ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ มีความเข้มข้น 10 โมลาร์

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (ordinary Portland cement Type I)

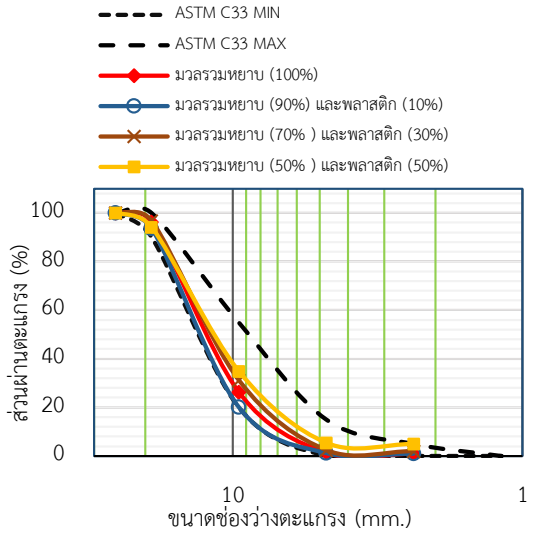
5) มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้นั้นจะอยู่สภาวะแห้งในอากาศ (Air dry) ซึ่งขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 [7] มีสมบัติดังตารางที่ 1

6) ขยะพลาสติกบดที่ใช้เป็นชนิด Polypropylene (PP) ซึ่งเป็นพลาสติกบดเป็นเม็ดคล้ายมวลรวมหยาบ ดังแสดงในรูปที่ 1 มีสมบัติของขยะพลาสติกบด ดังตารางที่ 1 และมีขนาดคละดังแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 สมบัติมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

| มวลรวม | ความถ่วงจำเพาะ | หน่วยน้ำหนัก ($kg/m^3$) | โมดูลัสความละเอียด (FM) | การดูดซึมน้ำ (%) |
|---|---|---|---|---|
| มวลรวมหยาบ | 2.7 | 1621 | 7.19 | 0.6 |
| มวลละเอียด | 2.57 | 1664 | 2.66 | 0.72 |
| ขยะพลาสติกบด | 0.9 | 908 | 4.97 | - |

รูปที่ 1 ขยะพลาสติกบดชนิด Polypropylene (PP)




รูปที่ 2 การกระจายตัวของมวลรวมหยาบและขยะพลาสติกบด

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต

| ชื่อส่วนผสม | W/C | Slump (cm) | ปูนซีเมนต์ ($kg/m^3$) | น้ำ ($kg/m^3$) | มวลรวม ($kg/m^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | หิน | ทราย | ขยะพลาสติก |
| C-PP0 | 0.55 | 5 - 10 | 375 | 206 | 1120 | 760 | - |
| C-PP10 | | | 375 | 206 | 1008 | 760 | 37 |
| C-PP30 | | | 375 | 206 | 784 | 760 | 112 |
| C-PP50 | | | 375 | 206 | 560 | 760 | 187 |

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

| ชื่อส่วนผสม | เถ้าลอย ($kg/m^3$) | สารละลายด่าง ($kg/m^3$) | | มวลรวม ($kg/m^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NaOH | $Na_2SiO_3$ | หิน | ทราย | ขยะพลาสติก |
| GPC-PP0 | 450 | 135 | 135 | 1150 | 500 | - |
| GPC-PP10 | 450 | 135 | 135 | 1035 | 500 | 38.5 |
| GPC-PP30 | 450 | 135 | 135 | 805 | 500 | 115 |
| GPC-PP50 | 450 | 135 | 135 | 575 | 500 | 192 |

### *2.2. ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต*

ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการมุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยที่มวลรวมหยาบจะถูกแทนที่ด้วยขยะพลาสติกบดชนิด PP ในอัตราส่วน 0%, 10%, 30% และ 50% โดยปริมาตร ซึ่งส่วนผสมของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ

### *2.3. ขั้นตอนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต*

*2.3.1 การผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต*

วิธีการผสมนั้นจะเป็นการผสมด้วยเครื่องผสมคอนกรีต โดยจะแบ่งขั้นตอนดังนี้ เริ่มต้นจากเทปูน หิน ทราย ลงในเครื่องแล้วเปิดเครื่องเพื่อคลุกส่วนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นขั้นตอนต่อมาทำการเติมน้ำลงไปในเครื่องแล้วปล่อยให้เครื่องปั่นอีก 3 นาที แล้วทำการพักให้เครื่องหยุดหมุน 3 นาที และสุดท้ายก็เปิดเครื่องปั่นอีก 2 นาทีแล้วจึงสามารถตักเข้าแบบหล่อได้

*2.3.2 การผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต*

วิธีการผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนซึ่งจะใช้เวลาผสม 15 นาที ขั้นตอนแรกใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับเถ้าลอย เป็นเวลา 3 นาที ตามด้วยขั้นตอนที่สองคือใส่มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบผสมกันเป็นเวลา 3 นาที ขั้นตอนสุดท้ายให้ใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกตและทำการผสมอีก 3 นาที จากนั้นเมื่อทำครบสามขั้นตอนก็ให้นำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเทเข้าแบบหล่อที่เตรียมไว้ และเมื่อแกะออกจากแบบแล้วจะทำการบ่มโดยห่อตัวอย่างด้วยพลาสติกใสเก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง

### *2.4. การทดสอบปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต*

*2.4.1 เวลาในการก่อตัว*

ทดสอบเวลาการแข็งตัว (Setting time) ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C403 [8]

*2.4.2 ความสามารถในการทำงานได้*

ทดสอบความสามารถในการทำงานได้โดยการวัดค่าการไหลแผ่ (Slump flow) ของของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1611 [9]

*2.4.3 กำลังรับแรงอัด*

ทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด (Compressive strength) ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 [10] โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. สูง 20 cm. ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน

*2.4.4 กำลังดัด*

ทดสอบความสามารถในการรับกำลังดัด (Flexural strength) ของของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C78 [11] โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างคานสี่เหลี่ยมขนาด 10x10x35 $cm^3$ ที่อายุบ่ม 28 วัน

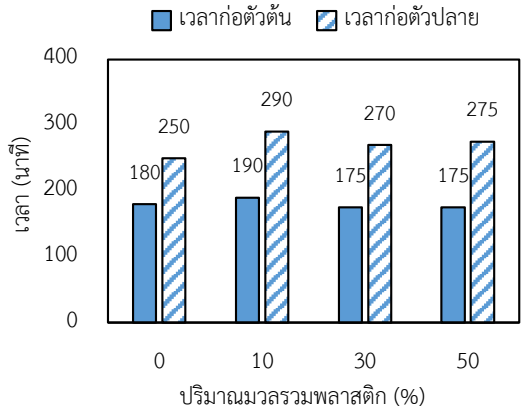
*2.4.5 กำลังดึงแยก*

การทดสอบกำลังผ่าแยก (Splitting tensile strength) ของของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมาตรฐาน ASTM C496 [12] โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. สูง 20 cm. ที่อายุบ่ม 28 วัน

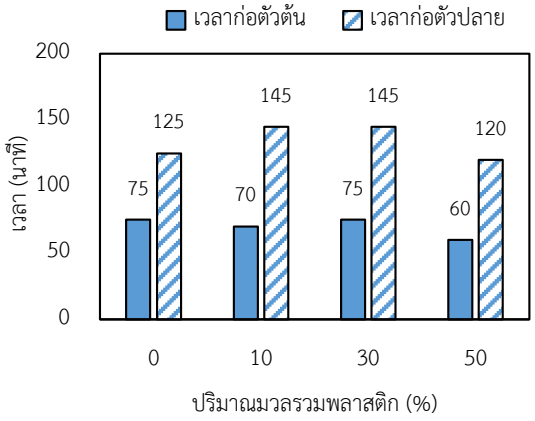
## 3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

### *3.1. เวลาในการก่อตัว*

เวลาการก่อตัวต้นและเวลาการก่อตัวปลายของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตถูกแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ




รูปที่ 3 เวลาการก่อตัวของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต




รูปที่ 4 เวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

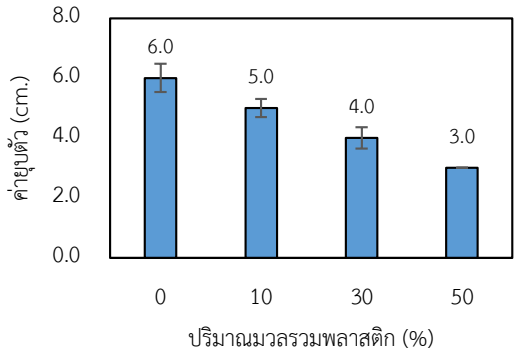
จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการแทนที่หินด้วยพลาสติกบดที่ 10% จะทำให้เวลาในการก่อตัวต้นเท่ากับ 190 นาที เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกพบว่ามีการก่อตัวต้นที่ช้ากว่า 10 นาที และในส่วนผสมที่ทำการแทนที่หินด้วยพลาสติก 30% และ 50% มีการก่อตัวต้นที่เร็วกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่อยู่เพียง 5 นาที แต่สำหรับเวลาก่อตัวปลายของของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีการแทนที่พลาสติก 10%, 30% และ 50% มีเวลาการก่อตัวปลายที่นานกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้มีการแทนที่ทั้งหมด โดยตัวอย่างที่มีการแทนที่ 10% นั้นมีเวลาการก่อตัวปลายที่นานที่สุด

จากผลการทดสอบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (รูปที่ 4) พบว่าเวลาการก่อตัวต้นของส่วนผสมที่มีการแทนที่พลาสติก 10% และ 30% ไม่มีความแตกต่างกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่มีมวลรวมพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อใช้มวลรวมพลาสติกแทนที่ 50% พบว่าเวลาการก่อตัวต้นจะเร็วกว่าตัวอย่างควบคุมอยู่ 15 นาที ซึ่งในส่วนของเวลาการก่อตัวปลายนั้น พบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยพลาสติก 10% และ 30% จะมีเวลาการก่อตัวปลายนานกว่าส่วนผสมควบคุมอยู่ 20 นาที แต่ตัวอย่างที่มีการแทนที่ 50% จะมีเวลาการก่อตัวไวกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการแทนที่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

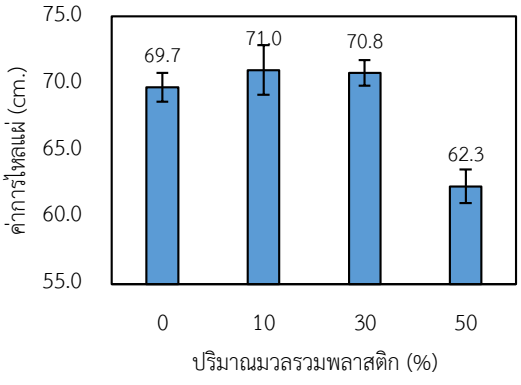
### *3.2. ความสามารถในการทำงานได้*

จากผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่แสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการแทนที่หินด้วยพลาสติกบดที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตนั้นลดลงตามไปด้วย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่พลาสติกบดนั้นมีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน บางชิ้นรูปทรงยาวและมีเหลี่ยมมุมมาก จึงส่งผลให้หินและทรายไม่สามารถไหลได้ดี

จากผลการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า เมื่อมีการแทนที่หินด้วยพลาสติก 10% และ 30% ไม่ส่งผลต่อค่าการไหลของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อมีการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่มากเกินไปที่ 50% นั้นจะทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลงอย่างมาก ซึ่งสาเหตุนั้นจะคล้ายกับของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่กล่าวไว้ข้างต้น




รูปที่ 5 ความสามารถในการทำงานได้ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต



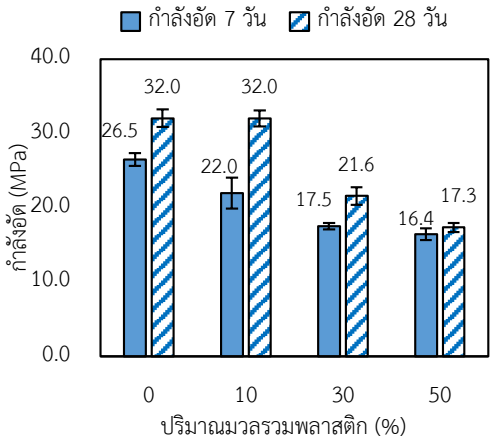

รูปที่ 6 ความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

### *3.3. กำลังรับแรงอัด*

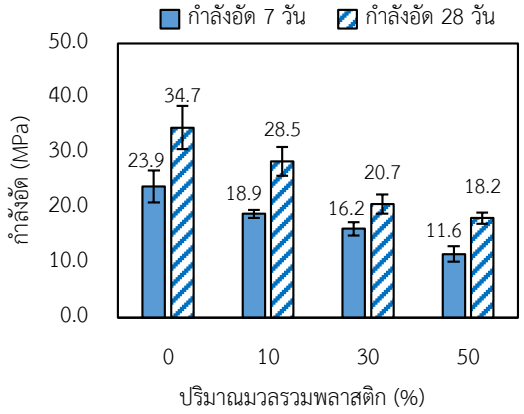
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 และ 28 วันจะแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 7 วัน จะลดลงตามปริมาณการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่เพิ่มขึ้น โดยที่เมื่อตัวอย่างมีการแทนที่หินด้วยพลาสติก 0% 10% 30% และ 50% จะมีกำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 26.5, 22.0, 17.5 และ 16.4 MPa ตามลำดับยกตัวอย่างเมื่อมีการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่ 10% กำลังรับแรงอัดจะอยู่ที่ 22.0 MPa เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งมีกำลังรับแรงอัดที่ 26.5 MPa กำลังรับแรงอัดจะลดลงประมาณ 17% ต่อมาที่อายุบ่ม 28 วัน ตัวอย่างที่มีการแทนที่หินด้วยพลาสติก 0% และ 10% จะมีกำลังรับแรงอัดที่เท่ากันคือ 32.0 MPa และส่วนผสมที่มีการแทนที่หินด้วยพลาสติก 30% และ 50% จะมีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงมาคือ 21.6 และ 17.3 MPa ตามลำดับ

ในส่วนของผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 และ 28 วันจะแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน นั้นจะคล้ายกันกับกำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 วัน กล่าวคือ กำลังรับแรงอัดจะลดลงตามปริมาณพลาสติกที่มากขึ้น ยกตัวอย่างเมื่อมีการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่ 10% กำลังรับแรงอัดจะอยู่ที่ 18.9 MPa เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งมีกำลังรับแรงอัดที่ 23.9 MPa กำลังรับแรงอัดจะลดลงประมาณ 20% และผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน จากตัวอย่างที่มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่ 0% 10% 30% และ 50% จะมีกำลังที่ลดลงคือ 34.7, 28.5, 20.7 และ 18.2 MPa ตามลำดับ

ทั้งนี้สาเหตุที่กำลังลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อมีการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากพลาสติกเป็นวัสดุที่ไม่มีความแข็งแรงเท่ากับหิน ดังนั้นเมื่อหินมีจำนวนลดลงและถูกแทนที่ด้วยพลาสติกบดเข้ามาจึงทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงตามไปด้วย



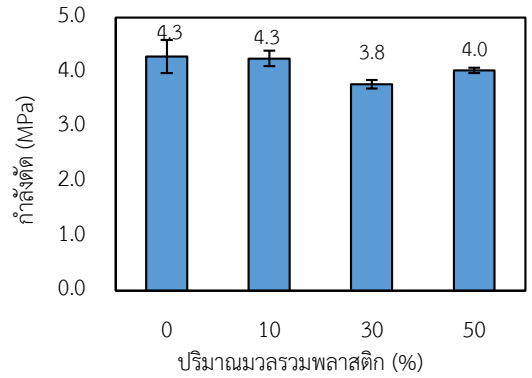

รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน



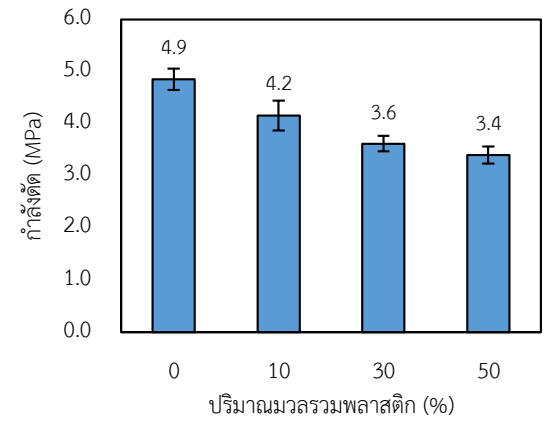

รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน

### *3.4. กำลังรับแรงดัด*

จากรูปที่ 9 และ 10 ซึ่งแสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอายุบ่ม 28 วัน จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกบดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ




รูปที่ 9 กำลังรับแรงดัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

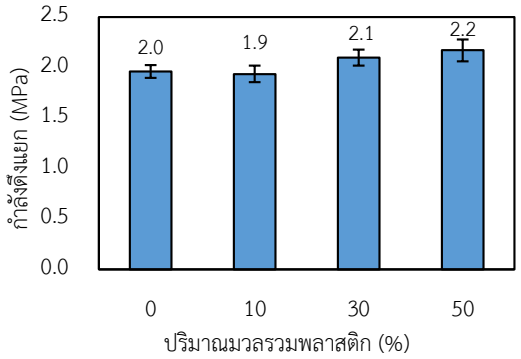



รูปที่ 10 กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

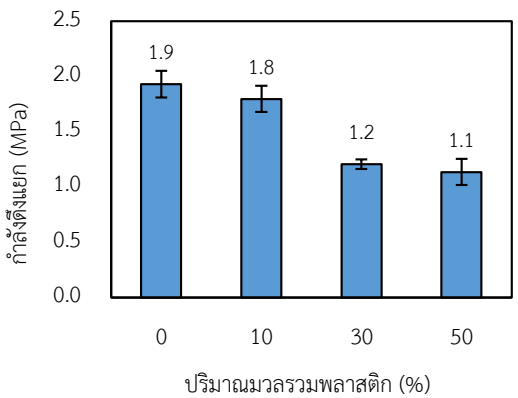
ในทางกลับกันกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (รูปที่ 10) ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มปริมาณหินพลาสติก ตัวอย่างที่มีการแทนที่หินด้วยพลาสติกบด 0% 10% 30% และ 50% มีกำลังลังรับแรงดัดเท่ากับ 4.9, 4.2, 3.6 และ 3.4 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากวัสดุประสานอย่างจีโอโพลิเมอร์นั้นยึดเกาะกับผิวของพลาสติกที่เป็นผิวมันได้ไม่ดีนักจึงทำให้เกิดรอยต่อที่ไม่แข็งแรงระหว่างมวลรวมที่เป็นพลาสติกและเพสต์ขึ้น ส่งผลต่อความแข็งแรงของกำลังรับแรงดัด

### *3.5. กำลังดึงแยก*

ในส่วนของผลการทดสอบกำลังลังดึงแยกทั้งในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วันนั้นจะถูกแสดงในรูปที่ 11 และ12 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการแทนที่หินด้วยพลาสติกที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อกำลังดึงแยกของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างที่มีการแทนที่พลาสติกที่ 30% และ50% จะมีค่ากำลังดึงแยกอยู่ที่ 2.1 และ 2.2 MPa ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการใส่พลาสติกแทนที่แล้วถือว่ามีกำลังเพิ่มขึ้นมาเล็กน้อยเท่านั้น แต่ในทางกลับกันกำลังดึงแยกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นไปตามสาเหตุที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.4




รูปที่ 11 กำลังรับดึงแยกของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน




รูปที่ 12 กำลังดึงแยกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน

## 4. สรุปผล

จากการทดสอบการนำพลาสติกบดชนิดพอลิโพรไพลีนมาใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนที่หินในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในปริมาณร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1) การนำพลาสติกบดมาใช้เป็นมวลรวมหยาบส่งผลให้เวลาในการก่อตัวปลายของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ
2) ค่าการไหลแผ่ของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณมวลรวมพลาสติกที่มากขึ้น ในทางตรงกันข้ามค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อแทนที่หินด้วยพลาสติกไม่เกิน 30%
3) ความสามารถในการรับกำลังอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นทั้งของอายุบ่ม 7 และ 28 วัน
4) การเพิ่มปริมาณมวลรวมพลาสติกไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดและกำลังดึงแยกของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงดัดและกำลังดึงแยกของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกลับมีค่าลดลงตามปริมาณมวลรวมพลาสติกที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปัญหาของการยึดเกาะระหว่างมวลรวมพลาสติกกับวัสดุประสานอย่างจีโอโพลิเมอร์

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.) – จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [Grant number B16F630071]

## 6. การอ้างอิง

[1] สุพจิต สุขกันตะ และคณะ. “สถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชน ปี พ.ศ.2561,” ใน *รายงานสถานการณ์สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2561* (กรุงเทพมหานคร: ส่วนขยะมูลฝอยชุมชน กองจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ, 2561), หน้า 5-9.

[2] Sharma, N. K., Kumar, P., Kumar, S., Thomas, B. S., Gupta, R. C. (2017). Properties of concrete containing polished granite wasteas partial substitution of coarse aggregate. *Construction and Building Materials* 151: pp. 158-163.

[3] Valipour, M., Yekkalar, M., Shekarchi, M., Panahi, S. (2014). Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming

index in marine environments. *Journal of Cleaner Production* 65: pp. 418423.

[4] Nuaklong, P., Sata, V., Chindaprasirt. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production* 112: pp. 23002307.

[5] Zhuang, X. Y., et al. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production* 125: pp. 253-267.

[6] American Society for Testing and Materials. (2005). ASTM C618-05: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. In *Annual book of ASTM standards 2005*, West Conshohocken, PA, USA.

[7] American Society for Testing and Materials. (2008). ASTM C33-08: Standard Specifications for Concrete Aggregates. In *Annual book of ASTM standards 2008*, West Conshohocken, PA, USA.

[8] American Society for Testing and Materials. (1999). ASTM C403: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. In *Annual book of ASTM standards 1999*, West Conshohocken, PA, USA.

[9] American Society for Testing and Materials. (2005). ASTM C1611. Standard Test Method for Slump Flow of Self Consolidating Concrete. In *Annual book of ASTM standards 2005*, West Conshohocken, PA, USA.

[10] American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In *Annual book of ASTM standards 2018*, West Conshohocken, PA, USA.

[11] American Society for Testing and Materials. (2002). ASTM C78. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). In *Annual book of ASTM standards 2002*, West Conshohocken, PA, USA.

[12] American Society for Testing and Materials. (2011). ฤ ASTM C496. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In *Annual book of ASTM standards 2011*, West Conshohocken, PA, USA.