สมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดรีไซเคิลจากเศษหินแกรนิต

Mechanical properties of geopolymer concrete containing fine recycled granite aggregates.

กานต์ธิปก ฮามคำไพ[1] ภีม เหนือคลอง[2] พิชชา จองวิวัฒสกุล[3,*] และ เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์[4]

[1,2,3] หน่วยปฏิบัติการวิจัยนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

[4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

**Corresponding author; E-mail address: pitcha.j@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดรีไซเคิล โดยขยะอุตสาหกรรมแกรนิตถูกใช้แทนที่ทรายธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด ผลการทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้มวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติ จากผลการทดสอบพบว่าการใช้มวลรวมรีไซเคิลจากเศษหินแกรนิตสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของมวลรวมจากเศษหินแกรนิต นอกจากนั้นยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตเป็นมวลรวมร้อยละ 50 มีค่าความเหนียวสูงที่สุด

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์, คอนกรีต, แกรนิต, มวลรวมรีไซเคิล

Abstract

The aim of this study is to investigate the mechanical properties of geopolymer concrete containing fine recycled aggregates. Granite industry waste was used to replace natural sand at dosage levels of 0%, 25%, 50%, and 100% by mass of fine aggregate. The results were compared with the control concrete made with fine natural aggregates. The results showed that the use of recycled granite aggregates increased the 7-day compressive strength of concrete. The flexural strength increased with the increase in granite aggregate content. In addition, geopolymer concrete containing 50% granite aggregate showed the highest toughness value.

Keywords: Geopolymer, Concrete, Granite, Recycled aggregate

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นตามความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคม งานด้านวิศวกรรมโยธาถือเป็นงานหลักที่สำคัญในการช่วยขับเคลื่อนความเจริญของประเทศในการพัฒนาและสรรค์สร้างระบบโครงสร้างพื้นฐาน ดังนั้นแล้วงานวิจัยและนวัตกรรมด้านวัสดุจะส่งผลในการส่งเสริมการเติบโตแบบก้าวกระโดดของประเทศ การศึกษาและวิจัยด้านคอนกรีตเพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมรวมทั้งการพัฒนาวัสดุงานก่อสร้างชนิดใหม่ ๆ จึงมีบทบาทความสำคัญอย่างมาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลามายาวนานตั้งแต่สมัยอดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีความสะดวกง่ายต่อการทำงาน และยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งในปัจจุบันยังมีการทดลองและวิจัยเพื่อศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการระเบิดภูเขาเพื่อนำหินมาใช้งาน การลำเลียง การเผาไหม้ ตลอดจนการบดส่วนผสมให้ละเอียด ผลกระทบจากกระบวนการผลิตดังกล่าวนี้ ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจกส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาของ Davidovitz [1] พบว่าอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จนทำให้เกิดการปนเปื้อนของก๊าซดังกล่าว ซึ่งมีปริมาณสูงถึง 350 ppm จากการผลิตปูนซีเมนต์ 1,800 ล้านตัน ดังนั้นเพื่อที่จะลดผลกระทบดังกล่าว แนวทางหนึ่งที่สามารถกระทำได้ก็คือ การนำวัสดุทดแทนมาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งวัสดุทดแทนดังกล่าวอาจได้จากกากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เถ้าลอย เถ้าแกลบ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก ฯลฯ โดยสามารถนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความทนทาน

วัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนวัสดุเชื่อมประสานเดิมที่ได้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำได้ [2]

วัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้มาจากการสังเคราะห์วัสดุเหลือทิ้งที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาไม่ว่าจะเป็นเถ้าลอย เถ้าก้นเตา หรือตะกรันเตาถลุงเหล็ก ร่วมกับสารละลายที่มีความเป็นด่าง อันได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หลังจากการทำปฏิกิริยาจะได้วัสดุซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและสามารถรับกำลังได้เมื่อแข็งตัวแล้ว จากงานวิจัยของ Guo et al. [3] พบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย Class C แบ่งตามมาตรฐาน ASTM C618 [4] มีความสามารถในการรับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 63.4 MPa การใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ในการก่อสร้างนอกจากจะสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังสามารถลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งจากการอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

ในปัจจุบันการผลิตมวลรวมหยาบจากวัสดุหินแกรนิตของโรงโม่หินที่ใช้เป็นส่วนผสมหลักของคอนกรีตในอุตสาหกรรมการก่อสร้างทำให้เกิดกากวัสดุหินเหลือทิ้งซึ่งต้องใช้พื้นที่ในการฝังกลบ นอกจากนั้นแล้วยังมีปริมาณกากหินฝุ่นตกค้างเป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและยังต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้ง [5-7] การพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [8] โดยใช้วัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ร่วมกับการนำกากวัสดุหินแกรนิตเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์โดยนำมาเป็นส่วนผสมทดแทนทรายธรรมชาติ ถือว่าเป็นการผลิตวัสดุก่อสร้างที่สามารถกำจัดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9] ทั้งในอุตสาหกรรมโม่หินซึ่งมีกากหินแกรนิตเป็นวัสดุเหลือทิ้ง และอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าที่มีเถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน

สำหรับในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาความสามารถในการทำงานได้และคุณสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดสอบกับจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมทรายธรรมชาติ

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้มีวัสดุหลักซึ่งประกอบด้วย (1) มวลรวม ได้แก่ หินปูนย่อย ทรายธรรมชาติ และทรายที่นำกลับมาใช้ใหม่จากเศษหินแกรนิต และ (2) วัสดุประสาน ได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน [10] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เถ้าลอยแคลเซียมสูงที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ตั้งอยู่ในอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 และมีค่า Loss of ignition (LOI) เท่ากับ 1.83%

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติทางเคมี	ปริมาณทางเคมี (%)
SiO_2	31.5
Al_2O_3	18.6
Fe_2O_3	14.8
K_2O	2.1
CaO	18.6
Na_2O	2.3

2. สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่มีส่วนประกอบของ SiO_2 = 30.0%, Na_2O = 14.5% และน้ำ = 55.3%

3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์

4. อัตราส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 0.6 และ 1 ตามลำดับ

5. มวลรวมหยาบจากหินปูนย่อย มวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติ (NA) และเศษหินแกรนิต (GP) จากเหมืองหินเทพศิลา ในจังหวัดชลบุรี ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 2



รูปที่ 1 ทรายธรรมชาติ



รูปที่ 2 เศษหินแกรนิต

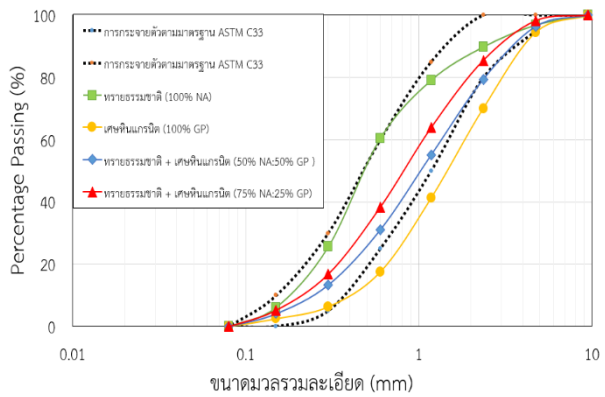
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด

มวลรวม	ความถ่วงจำเพาะ	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	การดูดซึมน้ำ (%)	โมดูลัสความละเอียด (FM)
หินปูน	2.70	1,621	0.60	-
ทรายธรรมชาติ	2.57	1,664	0.72	2.42
เศษหินแกรนิต	2.58	1,593	0.87	3.68

ขนาดการกระจายตัวของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้ใหม่ แสดงในรูปที่ 3 จากผลการทดสอบการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [11] พบว่าอนุภาคของทรายธรรมชาติ (100% NA) มีการกระจายตัวของอนุภาคของทรายอยู่ในมาตรฐาน ASTM C33 แต่อนุภาคของเศษหินแกรนิต (100% GP) มีคุณสมบัติการกระจายตัวไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 โดยมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีค่าโมดูลัสความละเอียดค่าเท่ากับ 3.68 ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าทรายธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่ามวลรวมมีขนาดคละอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานเหมาะแก่การนำไปใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อส่วนผสม	เถ้าลอย (kg/m^3)	สารละลายด่าง (kg/m^3)		มวลรวม (kg/m^3)		
		NaOH	Na_2SiO_3	หินปูน	ทรายธรรมชาติ	ทรายแกรนิต
0GP	450	135	135	1,150	500	-
25GP	450	135	135	1,150	375	125
50GP	450	135	135	1,150	250	250
100GP	450	135	135	1,150	-	500



รูปที่ 3 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้ใหม่

2.2 สัดส่วนผสมและวิธีการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุ โดยใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry; SSD) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้แสดงในตารางที่ 3 การผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมี 3 ขั้นตอนด้วยกันซึ่งใช้เวลาผสม 15 นาที ในขั้นตอนแรกใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับเถ้าลอย (Fly ash) ผสมกันเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นใส่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดผสมกันต่อเป็นเวลาอีก 5 นาที สุดท้ายใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และผสมอีกเป็นเวลา 5 นาที เมื่อผสมเรียบร้อยแล้วนำจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมาเข้าแบบหล่อที่เตรียมไว้สำหรับการทดสอบ ส่วนในการบ่มนั้นจะใช้พลาสติกห่อตัวอย่างแล้วบ่มอุณหภูมิห้องก่อนจะนำตัวอย่างไปทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

2.3 การทดสอบจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

สมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทำการทดสอบ ได้แก่ ความสามารถในการทำงานได้ กำลังอัด กำลังดัด พร้อมทั้งประเมินค่าความเหนียวของคอนกรีต

2.3.1 ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต

ทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตทดสอบจากความสามารถในการไหลแผ่ (Slump flow) ตามมาตรฐาน ASTM C1611 [12]

2.3.2 กำลังอัด

ทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39 [13] โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน

2.3.3 กำลังดัดและความเหนียว

ทดสอบความสามารถในการรับกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C78 [14] ซึ่งในการทดสอบได้ใช้ตัวอย่างคานขนาดหน้าตัด 10x10 ซม. ยาว 35 ซม. ที่อายุบ่ม 28 วัน ตัวอย่างถูกกดในลักษณะการกดที่จุดแบ่งสาม (Third point loading) มีการติดตั้งเครื่องมือวัดการโก่งตัว (LVDT) ที่จุดกึ่งกลางคาน และเครื่องมือวัดแรงกระทำ (Load cell) ตามรูปที่ 4 เพื่อบันทึกข้อมูลของแรงกระทำและการโก่งตัว เพื่อนำมาประเมินค่าความเหนียวของวัสดุซึ่งได้จากคำนวณพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัว (Load-displacement curve)

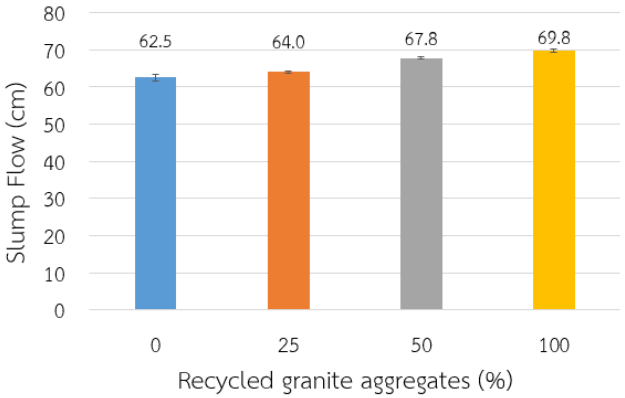


รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างและเครื่องมือการทดสอบกำลังดัดและความเหนียว

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1 ความสามารถในการทำงานได้

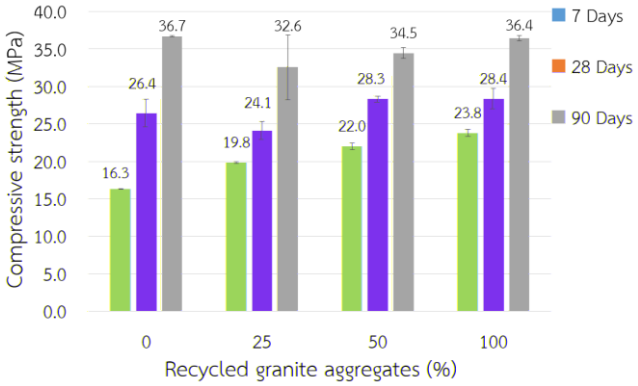
รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบในความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติและทรายจากเศษหินแกรนิต โดยวัดค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C1611 เมื่อทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยทรายจากเศษหินแกรนิตในร้อยละ 0, 25, 50 และ 100 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าการไหลแผ่ เท่ากับ 62.5, 64.0, 67.8 และ 69.8 ซม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความสามารถในการทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณและสัดส่วนของทรายจากเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะส่วนผสมที่มีการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยทรายจากเศษหินแกรนิตในร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าการไหลแผ่มากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ โดยมีค่าสูงกว่าส่วนผสม 0GP ร้อยละ 10



รูปที่ 5 ค่าการไหลแผ่ของจีโพอลิเมอร์คอนกรีต

3.2 กำลังรับแรงอัด

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติและทรายแกรนิตที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน จะเห็นได้ว่าในระยะเวลาช่วง 7 วันแรก โดยส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 25 (25GP), 50 (50GP), 100 (100GP) โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 19.8 MPa, 22.0 MPa และ 23.8 MPa ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติ (0GP) ซึ่งกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 16.3 MPa



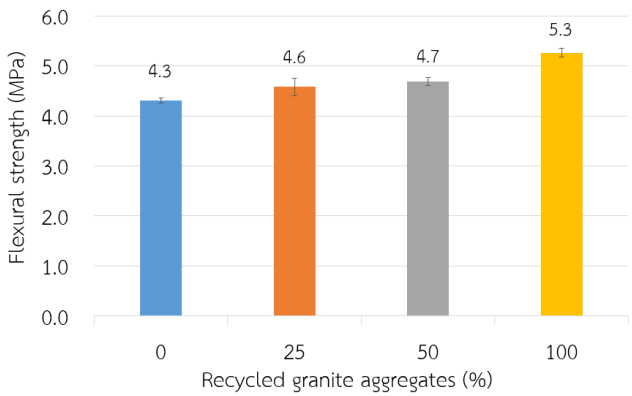
รูปที่ 6 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุบ่ม 7, 28 และ 90 วัน

แต่อย่างไรก็ตามหลังจากที่ตัวอย่างมีอายุ 28 วัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในส่วนผสม 0GP, 25GP, 50GP และ 100GP มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 26.4 MPa, 24.1 MPa, 28.3 MPa และ 28.4 MPa ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่ส่วนผสม 25GP มีกำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าส่วนผสมอื่น ๆ เล็กน้อย และเมื่อตัวอย่างมีอายุ 90 วันพบว่ามีกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในส่วนผสม 0GP, 25GP, 50GP และ 100GP มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 36.7 MPa, 32.6 MPa, 34.5 MPa และ 36.4 MPa ตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 6 พบว่าที่อายุ 90 วัน ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต 100GP มี

ค่ากำลังรับแรงอัดที่มีค่าใกล้เคียงกันกับ 0GP แต่ส่วนผสม 25GP และ 50GP พบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าส่วนผสม 0GP และ 100GP เล็กน้อย

3.3 กำลังรับแรงดัด

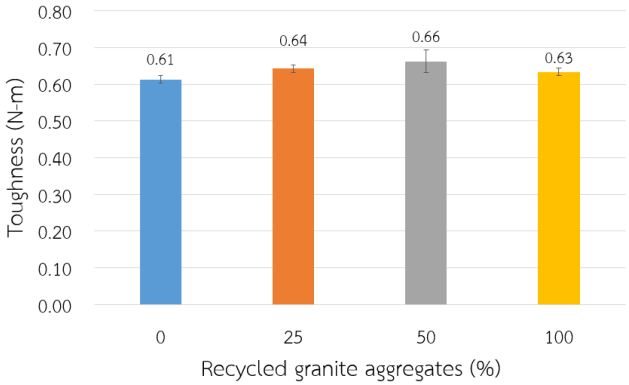
รูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติและทรายแกรนิตที่อายุบ่ม 28 วัน จากการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในส่วนผสม 0GP, 25GP, 50GP และ 100GP มีค่าเท่ากับ 4.3 MPa, 4.6 MPa, 4.7 MPa และ 5.3 MPa ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณสัดส่วนเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มปริมาณเศษหินแกรนิตมีส่วนช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับกำลังดัดที่ดีขึ้น เนื่องจากรูปร่างของเศษหินแกรนิตนั้นช่วยในการจับตัวกันระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ นอกจากนั้นการเพิ่มปริมาณเศษหินแกรนิตช่วยลดความพรุนภายในคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่ความสามารถในการรับกำลังดัดที่เพิ่มขึ้น [7]



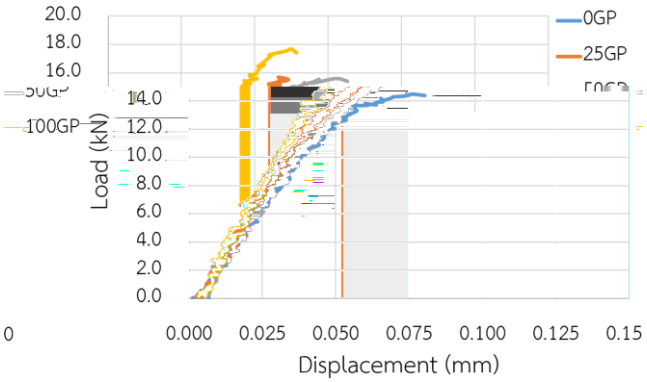
รูปที่ 7 กำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในแต่ละส่วนผสม

3.4 ความเหนียว

รูปที่ 8 แสดงผลค่าความเหนียว (Toughness) ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในแต่ละส่วนผสมซึ่งค่าความเหนียวพิจารณามาจากพื้นที่ใต้กราฟของกราฟแรงกระทำและการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคาน (Load-displacement curve) ตามรูปที่ 9 ซึ่งค่าความเหนียวสามารถที่จะบ่งบอกได้ถึงความเปราะของวัสดุ จากผลการทดสอบพบว่าค่าความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในส่วนผสม 0GP, 25GP, 50GP และ 100GP มีค่าเท่ากับ 0.61 N-m, 0.64 N-m, 0.66 N-m และ 0.63 N-m ตามลำดับ พบว่าที่ส่วนผสม 50GP มีค่าความเหนียวที่มากกว่าส่วนผสมอื่น ๆ ซึ่งค่าความเหนียวของส่วนผสม 50GP จะสังเกตได้ว่าค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่างในส่วนผสม 50GP ก่อนที่จะวิบัติมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าส่วนผสมอื่น ๆ แต่ที่ส่วนผสม 100GP ถึงแม้ว่าจะมีค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงกว่าส่วนผสมอื่น ๆ แต่กลับพบว่ามีค่าความเหนียวที่น้อยกว่าส่วนผสม 25GP และ 50GP



รูปที่ 8 ค่าความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตในแต่ละส่วนผสม



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว

4. สรุปผล

ผลการทดสอบพบว่าค่าการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของทรายจากเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตพบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน ของส่วนผสมที่ทรายธรรมชาติถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในร้อยละ 25 50 และ 100 มีการพัฒนากำลังอัดที่สูงกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตจากทรายธรรมชาติ แต่เมื่อพิจารณาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วันและ 90 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของทุกส่วนผสมมีค่าแตกต่างกันไม่มากและไม่มีนัยสำคัญ ส่วนความสามารถในการรับกำลังดัดและค่าความเหนียวนั้นพบว่าค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเศษหินแกรนิตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่วนผสมที่ใช้เศษหินแกรนิตทดแทนทรายธรรมชาติทั้งหมดมีค่ากำลังรับแรงดัดที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น ๆ ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิตเป็นมวลรวมร้อยละ 50 มีค่าความเหนียวสูงที่สุด จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า

ทรายแกรนิตนั้นสามารถนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายธรรมชาติในวัสดุจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณห้าง หุ้นส่วนจำกัด เทพศิลาอุตสาหกรรม ที่สนับสนุนวัสดุ (เศษหินแกรนิต) ที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Davidovits, J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. World resource review, 6(2), pp. 263-278.

[2] Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. Journal of Cleaner Production, 112, pp. 2300-2307.

[3] Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. Cement and Concrete Composites, 32(2), pp. 142-147.

[4] American Society for Testing and Materials. (2005). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C618-05. Annual Book of ASTM Standards, 4(2).

[5] Ghannam, S., Najm, H., & Vasconez, R. (2016). Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. Sustainable Materials and Technologies, 9, pp. 1-9.

[6] Jain, A., Gupta, R., & Chaudhary, S. (2019). Performance of self- compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. Construction and Building Materials, 221, pp. 539-552.

[7] Singh, S., Khan, S., Khandelwal, R., Chugh, A., & Nagar, R. (2016). Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. Journal of Cleaner Production, 119, pp. 86-98.

[8] Vijayalakshmi, M., & Sekar, A. S. S. (2013). Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. Construction and Building Materials, 46, pp. 1-7.

[9] อำพล วงศ์ษา. (2556). การใช้วัสดุเศษวัสดุเป็นส่วนผสมในคอนกรีตพรุน (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย.

[10] Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., ... & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. Journal of Cleaner Production, 125, pp. 253-267.

[11] American Society for Testing and Materials. (2003). Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33-03. Annual Book of ASTM Standards, 4(2).

[12] American Society for Testing and Materials. (2005). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM C1611/C1611M-05. Annual Book of ASTM Standards, 4(2).

[13] American Society for Testing and Materials. (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39/C39M-18. Annual Book of ASTM Standards, 4(2).

[14] American Society for Testing and Materials. (2002). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM C78-02. Annual Book of ASTM Standards, 4(2).