การศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน
Study on mechanical properties of polypropylene fiber reinforced geopolymer concrete

อธิพงศ์ กงจักร์[1] อาณกร สมุทรนาค[2] และพิชชา จองวิวัฒสกุล[3]

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติในด้านความสามารถในการรับกำลังอัด และกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่ผลิตจากทรายธรรมชาติและทรายจากเศษหินแกรนิต โดยใช้ทรายจากเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก และเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนขนาดความยาว 48 มิลลิเมตร โดยแบ่งเป็น 3 สัดส่วน คือ เสริมเส้นใย 0 %, 0.5% และ 1.0% โดยปริมาตร ทำการบ่มตัวอย่างที่สภาวะอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 28 และ 90 วัน จากนั้นจึงทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 และทดสอบความสามารถการรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C1609 เพื่อใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติด้านการรับแรงอัดและแรงดัด จากผลการทดสอบพบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายจากเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติ 100 % มีค่ากำลังดัดสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติ และมีค่ากำลังอัดต่างกันเพียงเล็กน้อย และการเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนทำให้กำลังดัดและความเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนปริมาตรเส้นใยที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์คอนกรีต; เส้นใยพอลิโพรไพลีน; คุณสมบัติเชิงกล

Abstract

The objective of this study is to investigate the compressive strength and flexural performance of polypropylene fiber reinforced geopolymer concrete made with natural sand and granite particles. The granite particles were used as fine aggregate instead of natural sand at 0 and 100 percent by weight. The 48-mm length polypropylene fibers were used at 0%, 0.5% and 1.0% concrete volume. After 7, 28, and 90 days of curing, the specimen were subjected to compression test and flexural test in accordance with ASTM C39 and ASTM C1609, respectively. The results show that flexural strength of geopolymer concrete made with granite particles is higher than that of the geopolymer concrete using natural sand. However, the effect of granite particles on compressive strength of geopolymer concrete was insignificant. In addition, the inclusion of polypropylene fibers enhanced the flexural strength and toughness of geopolymer concrete.

Keywords; geopolymer concrete; polypropylene; mechanical properties

1. บทนำ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุหลักในการผลิตเป็นคอนกรีตใช้ในงานก่อสร้าง โดยขั้นตอนการสร้างปูนซีเมนต์มาใช้นั้นต้องระเบิดภูเขาหินปูนขนาดใหญ่นำมาผ่านกระบวนการชะล้าง บด เผา และอื่น ๆ อีกมากมาย ทุก ๆ 1 ตันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ออกมาจากเตาเผาต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1400 องศาเซลเซียส และมีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศถึง 1 ตัน ส่งผลถึงอุณหภูมิบรรยากาศของโลกที่เพิ่มสูงขึ้น [1] ทำให้มีการพัฒนาวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากยิ่งขึ้น โดยการนำวัสดุปอซโซลานชนิดต่าง ๆ มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งนำการใช้สารเคมีชนิดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาไฟและสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มาทำปฏิกิริยากับดินขาว โดยพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังกล่าว ให้ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสภาวะแข็งตัวเรียกว่าจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) [2]

การที่จีโอพอลิเมอร์มีคุณสมบัติใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งมีความแข็งแรงในด้านกำลัง รับแรงอัด แต่มีด้านความสามารถในการรับแรงดึงและแรงดัดที่ต่ำ ทำให้ต้องมีการปรับปรุง คุณสมบัติโดยการเสริมเส้นใยชนิดต่าง ๆ เพิ่มเติมเข้าไปในส่วนผสม เพื่อไปทำหน้าที่ยึดรั้งรอยแตกร้าวก็เป็นแนวทางหนึ่งในการทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดัด และคุณสมบัติด้าน ความเหนียวสูงขึ้น

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีความนิยมอย่างกว้างขวางและแพร่หลาย โดยมีการใช้วัสดุหินแกรนิตซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของคอนกรีตในการก่อสร้างทำให้เกิดกากวัสดุที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นส่วนผสมของคอนกรีตต่อไปได้ เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ

และยังต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้ง การพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่ช่วยลดมลภาวะโดยใช้วัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ร่วมกับเศษหินแกรนิตเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์โดยนำมาเป็นส่วนผสมทดแทนทรายธรรมชาติ จึงถือว่าเป็นแนวทางลดปัญหามลพิษและประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

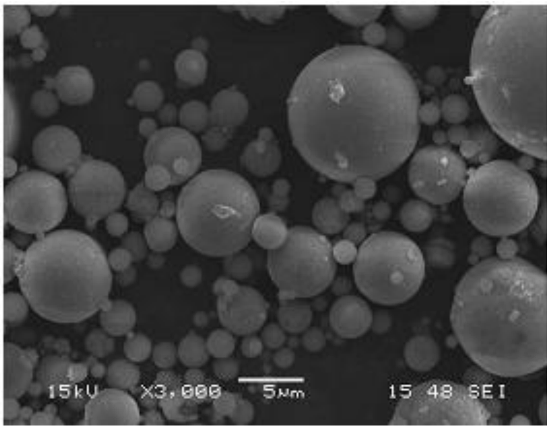
ในการวิจัยครั้งนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาคุณสมบัติในด้านความสามารถในการรับกำลังอัด และกำลังดัด ในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายจากเศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติร้อยละ 0 และ 100 โดยน้ำหนัก และศึกษาคุณสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตให้สามารถที่จะนำมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าปลิว หรือ เถ้าลอย เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อให้พลังงานความร้อนแก่หม้อไอน้ำ (Boiler) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกกันว่า เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนัก (bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะถูกพัดออกมาตามอากาศร้อน จึงเรียกว่า เถ้าปลิว เถ้าปลิวจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ลอยออกไปกับอากาศร้อน ซึ่งจะก่อให้เกิดมลภาวะในพื้นที่รอบโรงไฟฟ้า

เถ้าปลิวคือขี้เถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินหรือลิกไนต์ มีขนาดเล็กและละเอียดมาก โดยจะปลิวปนไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันของโรงผลิตไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งถ้ามีปริมาณเถ้าปลิวมากในชั้นบรรยากาศ ก็อาจก่อให้เกิดปัญหามลภาวะของอากาศได้ จึงได้มีการศึกษาวิจัยโดยการติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกก๊าซร้อนและเถ้าปลิวออกจากกัน เพื่อนำเอาเถ้าปลิวกลับมาใช้ใหม่ เช่น การนำเอาเถ้าปลิวมาใช้เป็นส่วนผสมของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ในกระบวนการผลิตคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตาม ASTM C618 [3] คือ ชนิด F (Class F) และ ชนิด C (Class C)



รูปที่ 1 ลักษณะขนาดของอนุภาคเถ้าลอยจากเครื่อง Scanning Electron Microscope (*โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก.*)

2.2 จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Si_2O_3 เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้จะแตกต่างกันจากโครงสร้างของการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง ซึ่งเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ จะทำให้ได้วัสดุประสานที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ได้ถึง 100%

จีโอพอลิเมอร์ใช้สารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูงเป็นตัวกระตุ้นทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีส่วนประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายซิลิกาและอะลูมินาซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักกับสารละลายซิลิเกตและสารละลายด่างที่มีความเข้มข้นสูงนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) หรือ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งปฏิกิริยานี้ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์

2.3 เส้นใยเสริมคอนกรีต (Fibre Reinforced Concrete)

เส้นใยจัดเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสูงในการนำมาผสมลงในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติข้อด้อยของคอนกรีตในด้านความเปราะ โดยที่คอนกรีตชนิดนี้ เรียกว่า คอนกรีตเสริมเส้นใย หรือคอนกรีตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Concrete, FRC) ซึ่งคอนกรีตโดยทั่วไปที่มีการเติมเส้นใยที่มีลักษณะกระจายตัวออกจากกันแบบไม่ต่อเนื่องกัน (Discontinuous Discrete Fiber) เข้าไประหว่างขั้นตอนการผสม เส้นใยที่นำมาใช้นี้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ใยหิน ฟาง ข้าว ป่าน และปอ เป็นต้น และเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น เส้นใยเหล็ก เส้นใยเซรามิค เส้นใยคาร์บอน เส้นใยไนลอน และเส้นใยพอลิโพรไพลีน เป็นต้น [4] โดยที่โครงสร้างของคอนกรีตผสมเส้นใย ประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ 1. ส่วนจับยึดหรือเมทริกซ์ (Matrix) 2. ส่วนเสริมกำลัง (Reinforcement) [5] สำหรับคอนกรีตเสริมเส้นใยที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบไม่ต่อเนื่อง คือ ลักษณะของเส้นใยที่ผสมลงไปจะมีการกระจายตัวไปในทิศทางที่ไม่แน่นอนอยู่ทั่วในเนื้อคอนกรีต

2.4 เศษหินแกรนิต (Granite cutting waste)

ในปัจจุบันการผลิตมวลรวมหยาบจากวัสดุหินแกรนิตของโรงโม่หินที่ใช้เป็นส่วนผสมหลักของคอนกรีตในอุตสาหกรรมการก่อสร้างทำให้เกิดกากวัสดุหินเหลือทิ้งซึ่งจะมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นส่วนผสมของคอนกรีตต่อไปได้ นอกจากนั้นแล้วยังมีปริมาณกากหินฝุ่นตกค้างเป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและยังต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้ง การพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้วัสดุเชื่อมประสานจีโอพอลิเมอร์ร่วมกับการนำกากวัสดุหินฝุ่นเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์โดยนำมาเป็นส่วนผสมทดแทนทราย

ธรรมชาติ [6] ถือว่าเป็นการผลิตวัสดุก่อสร้างที่สามารถกำจัดของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในอุตสาหกรรมโม่หินซึ่งมีกากหินฝุ่นเป็นวัสดุเหลือทิ้ง และอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าที่มีเถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

รายละเอียดของวัสดุมีดังนี้ เถ้าลอยแคลเซียมสูงที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ตั้งอยู่ในอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีดังนี้ SiO_2 = 30.0%, Al_2O_3 = 16.3%, Fe_2O_3 = 11.8%, K_2O = 2.1%, CaO = 20.7%, Na_2O = 1.7% และ ค่า Loss of ignition (LOI) = 1.83% สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีอัตราส่วนโดยมวลระหว่างซิลิกา (SiO_2) กับโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 2.1 และมีคุณสมบัติทางเคมี ดังนี้ SiO_2 = 30.0%, Na_2O = 14.5% และน้ำ = 55.3% สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์

มวลรวมหยาบจากหินปูนย่อย (Crushed natural limestone) มวลรวมละเอียดจากทรายธรรมชาติ และเศษหินแกรนิตจากเหมืองเทพศิลา ในจังหวัดชลบุรี ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 1 และ เส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene fiber) ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 2

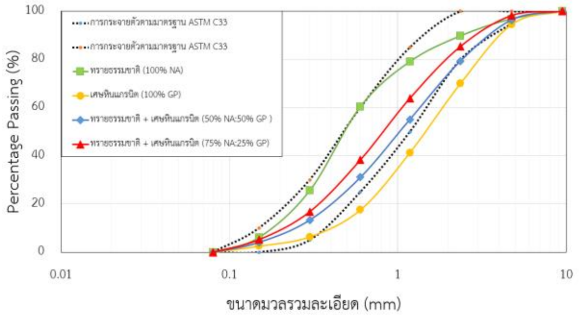
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิต

มวลรวม	ความถ่วงจำเพาะ	หน่วยน้ำหนัก (kg/m^3)	การดูดซึมน้ำ (%)	โมดูลัสความละเอียด (FM)
ทรายธรรมชาติ	2.57	1664	0.72	2.42
ทรายแกรนิต	2.58	1539	0.87	3.68

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเส้นใยพอลีโพรไพลีน

Length (mm)	Density (kg/m^3)	Strength (MPa)	E (MPa)	Surface	Shape of the end
48	900	640	12	Rough	Straight

ขนาดการกระจายตัวของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้แสดงในรูปที่ 2 จากผลการทดสอบการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [7] พบว่าอนุภาคของเศษหินแกรนิต (100% GP) มีคุณสมบัติการกระจายตัวไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 แต่เมื่อนำทรายทั้งสองชนิดมาผสมกันในปริมาณที่เหมาะสมจะพบว่า ทรายธรรมชาติที่ถูกแทนที่ด้วยเศษหินแกรนิตในปริมาณร้อยละ 25 (75%NA : 25%GP) และ 50 (50%NA : 50%GP) มีขนาดการกระจายตัวของมวลรวมละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33



รูปที่ 2 การกระจายตัวของทรายธรรมชาติและเศษหินแกรนิตที่นำกลับมาใช้ใหม่

3.2 สัดส่วนผสมและวิธีการผลิตจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษวัสดุ โดยใช้เศษหินแกรนิตแทนที่ทรายธรรมชาติในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักร้อยละ 0 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

3.3 รายละเอียดการทดสอบ

การทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Hardened concrete) ส่วนการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะทำการทดสอบตามมาตรฐานที่ได้แสดงในตารางที่ 4 และทำการคำนวณกำลังรับแรงดัดครั้งแรก (First peak strength, f_1) และกำลังรับแรงดัดสูงสุด (Maximum peak strength, f_p) จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$f_1 = \frac{P_1 \times L}{b \times d^2} \quad (3.1)$$

$$f_P = \frac{P_P \times L}{b \times d^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ P_1 หมายถึง แรงดัดสูงสุดครั้งแรก (N)

P_P หมายถึง แรงดัดสูงสุด (N)

b หมายถึง ความกว้างของตัวอย่างคานคอนกรีต (mm)

d หมายถึง ความสูงของตัวอย่างคานคอนกรีต (mm)

L หมายถึง ความยาวช่วงพาดของตัวอย่างคานคอนกรีต (mm)

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อส่วนผสม	Polypropylene (%)	เถ้าลอย (kg/m^3)	สารละลายด่าง (kg/m^3)		มวลรวม (kg/m^3)		
			NaOH	Na_2SiO_3	หินปูน	ทรายธรรมชาติ	ทรายแกรนิต
0GP	-	450	135	135	1150	500	-
100GP	-	450	135	135	1150	-	500
0GP-0.5	0.5	450	135	135	1150	500	-
100GP-0.5	0.5	450	135	135	1150	-	500
0GP-1.0	1.0	450	135	135	1150	500	-
100GP-1.0	1.0	450	135	135	1150	-	500

ตารางที่ 4 มาตรฐานการทดสอบและขนาดตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบ	มาตรฐานที่ใช้อ้างอิง	ขนาดตัวอย่าง	อายุของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ
กำลังอัด	ASTM C39 [8]	ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm	7 28 และ 90 วัน
กำลังดัด	ASTM C1609 [9]	คานขนาด 10x10x35 cm^3	28 วัน

ค่าความเหนียว (Toughness) สามารถคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานจากการทดสอบกำลังรับแรงดัด

4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

4.1 กำลังรับแรงอัด

ตามมาตรฐาน ASTM C39 การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 20 cm ที่เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน อัตราส่วน 0%, 0.5% และ1% โดยปริมาตร สามารถสรุปผลของแต่ละตัวอย่างได้ดังนี้

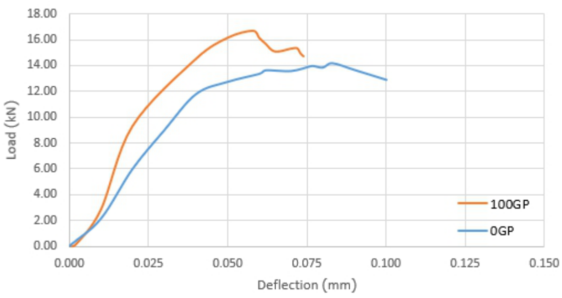
ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของกำลังอัด

Mixture	Compressive Strength (MPa)		
	7 days	28 days	90 days
0GP	16.32	28.26	36.72
100GP	23.80	28.36	36.42
0GP-0.5	17.10	32.67	34.19
100GP-0.5	25.87	30.80	31.15
0GP-1.0	14.06	30.14	37.25
100GP-1.0	17.84	31.54	32.23

จากตารางที่ 5 พบว่า เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดในระยะ 7 วัน พบว่า จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้เศษหินแกรนิต มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้ทรายธรรมชาติ โดยคาดว่ามีผลมาจากการที่หินแกรนิตมีอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมและมุมมากกว่าจึงทำให้รับแรงในช่วงแรกได้ดี แต่เมื่อระยะเวลาที่ 28 วันและ 90 วัน มีการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้ทรายธรรมชาติ มีค่ามากกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้เศษหินแกรนิต นอกจากนี้พบว่าเมื่อเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนอัตราส่วนร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในระยะเวลาการบ่ม 7 วัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนเป็นร้อยละ 1 พบว่ากำลังรับแรงอัดนั้นมีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการอัดตัวที่ไม่แน่นของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเส้นใยมีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่วนในระยะเวลาการบ่ม 28 วันและ 90 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเส้นใย

4.2 กำลังรับแรงดัด

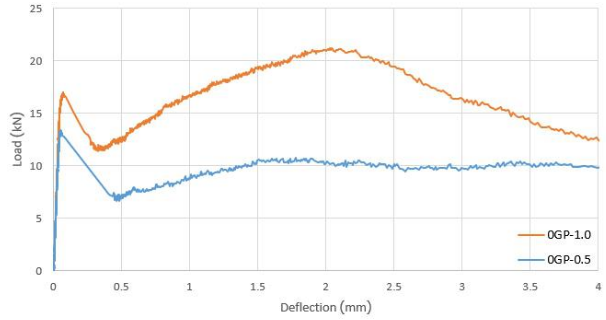
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใย กราฟ Load-deflection ที่มีลักษณะคล้ายกับการทดสอบคานคอนกรีตทั่วไปโดยมีค่า Peak load เพียงจุดเดียว กำลังรับแรงจะลดลงอย่างรวดเร็วจนวิบัติและไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไป และค่าความเหนียว (Toughness) มีค่าค่อนข้างต่ำ โดยจีโอพอลิเมอร์ล้วน (Plain Geopolymer) ที่ใช้ทรายแกรนิต (100GP) มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดดีกว่าจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนโดยใช้ทรายธรรมชาติ (0GP)



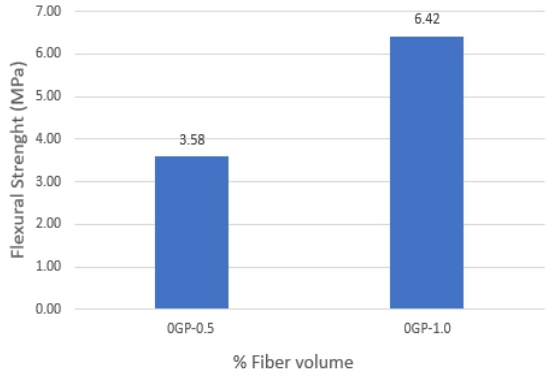
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะแอ่นตัวของจีโอโพลิเมอร์ 0GP และ 100GP

ในส่วนของผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่เสริมเส้นใย พบว่าค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาตรเส้นใย จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนโดยใช้ทรายธรรมชาติที่

อัตราส่วน 1% โดยปริมาตร (0GP-1.0) มีค่ากำลังรับดัดสูงสุดครั้งแรก (1^{st} Peak) มากที่สุดที่ 5.18 MPa ภายหลังการเกิดรอยแตกร้าวแรก กำลังรับแรงอัดจะตกลงแต่ไม่ถึงจุดวิบัติก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เมื่อมีการช่วยรับแรงของเส้นใยตามระยะการแอ่นตัวของกึ่งกลางคานที่เพิ่มขึ้นเกิดเป็น (2^{nd} Peak load) โดยหากพิจารณาการตกลงของกำลังรับแรงหลังการแตกร้าว (Load dropping) พบว่า จีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนอัตรา 0.5 % โดยปริมาตร มีค่าตกลงของกำลังรับแรงภายหลังการแตกร้าวมากกว่า 1.0% โดยมีค่าการตกลงของการแตกร้าวเป็น 44.56 % และ 27.10 % ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนของปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีกำลังรับแรงที่สูง ทำให้สามารถรับแรงกระทำหลังการแตกร้าวได้รวดเร็ว



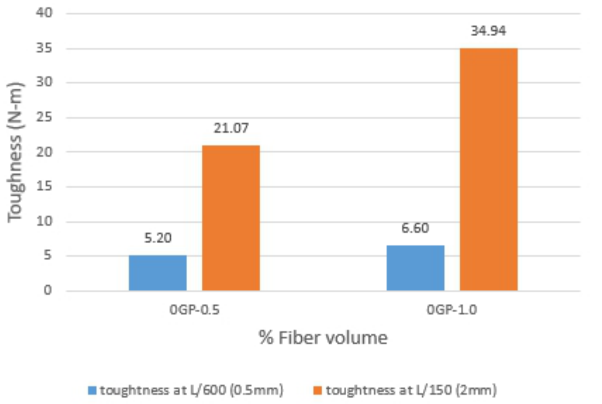
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะแอ่นตัวของจีโอโพลิเมอร์ 0GP-0.5 และ 0GP-1.0



รูปที่ 5 กำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิโพรพิลีน 0.5% และ 1.0 % โดยปริมาตร

4.3 ความเหนียว

ความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนคำนวณตามมาตรฐาน ASTM C1609 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่เสริมเข้าไปสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดัดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยแปรผันตรงตามสัดส่วนเส้นใยพอลิโพรไพลีนที่เพิ่มขึ้น โดยคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกระทำ (Load) และระยะโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (Deflection) ที่ระยะแอ่นตัว L/600 (0.5 มิลลิเมตร) และ L/150 (2 มิลลิเมตร)



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าความเหนียวที่ระยะโก่งตัว L/600 และ L/150 ของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิโพรพิลีน

ความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเส้นใยที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะแอ่นตัว L/600 จะมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากระยะแอ่นตัวยังมีค่าน้อย ทำให้เส้นใยยังทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจนที่ระยะแอ่นตัว L/150 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น

5. บทสรุป

5.1 กำลังรับแรงอัด

จากผลการทดสอบพบว่าในระยะเวลาช่วง 7 วันแรก จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิต (100GP) มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติ (0GP) แต่อย่างไรก็ตาม หลังจากที่ตัวอย่างมีอายุที่ 28 วันและ 90 วันขึ้นไปพบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตทั้งส่วนผสม 0GP และ 100P มีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยไม่มีนัยสำคัญ

เมื่อเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนเข้าไปในส่วนผสมในปริมาณ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรของคอนกรีต พบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่เพิ่มขึ้นถ้าเสริมปริมาณเส้นใยพอลิโพรไพลีนเพิ่มถึงอัตราส่วนร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรของคอนกรีต หลังจากนั้นพบว่ากำลังรับแรงอัดนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยพอลีโพรไพลีนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สาเหตุของการลดลงของกำลังรับแรงอัดมาจากการอัดตัวที่ไม่แน่นของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเส้นใยมีปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้อาจเกิดโพรงอากาศภายในตัวอย่าง

5.2 กำลังรับแรงดัด

จากการทดสอบพบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้เศษหินแกรนิต (100GP) มีกำลังรับแรงที่สูงกว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติ (0GP) โดยมีกำลังรับแรงสูงสุดครั้งแรกเฉลี่ย 5.26 MPa และ 4.30 MPa ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการเสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีน 0GP-0.5 และ 0GP-1.0 จะมีค่ากำลังรับสูงสุดครั้งแรก(1^{st} Peak) ต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยไม่มีนัยสำคัญ ในส่วนของกำลังรับแรงหลังการแตกร้าวสูงสุด(2^{nd} Peak)

พบว่าจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้ทรายธรรมชาติส่วนผสม 0GP-0.5 มีกำลังรับแรงหลังการแตกร้าวสูงสุด ต่ำกว่ากำลังรับสูงสุดครั้งแรก แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็นร้อยละ 1.0 โดยปริมาตรจะมีกำลังรับแรงหลังการแตกร้าวสูงสุด สูงกว่ากำลังรับสูงสุดครั้งแรก ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มสัดส่วนของปริมาณเส้นใย และในส่วนของกำลังรับแรงดัด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาตรของเส้นใยโพอลิโพรไพลีนโดยมีค่าสูงสุดที่ 6.5 MPa ที่ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตเสริมเส้นใยที่ใช้ทรายธรรมชาติ 0GP-1.0

5.3 ค่าความเหนียวของจีโอโพลิเมอร์เส้นใย

ความเหนียวของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิโพรไพลีนเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเส้นใยที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะแอ่นตัว L/600 จะมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากระยะแอ่นตัวยังมีค่าน้อย ทำให้เส้นใยยังทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจนที่ระยะแอ่นตัว L/150 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนพอลิโพรไพลีน 1% โดยปริมาตร มีค่าความเหนียวสูงสุดเท่ากับ 35.85 N-m

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณห้าง หุ้นส่วนจำกัด เทพศิลาอุตสาหกรรม ที่สนับสนุนวัสดุ (เศษหินแกรนิต) ที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] กระทรวงพลังงาน. รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย ปี 2553 กรุงเทพฯ. [ออนไลน์] 2553. [สืบค้นวันที่ 1 พฤษภาคม 2562]. จาก http://www.scribd.com/doc/57134261.

[2] Duxson, P., et al. “Geopolymer Technology: The Current State of the Art.” J. Mater. Sci. 42 (2007) : 2917–2933.

[3] ASTM C618-05. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

[4] ดวงฤดี ฉายสุวรรณ. “การพัฒนาจีโอโพลีเมอร์ด้วยวัสดุปอซโซลานต้นทุนต่ำในประเทศไทยเป็นวัสดุก่อสร้างสีเขียวเพื่อลดภาวะเรือนกระจก” ใน เอกสารผลงานวิจัยโครงการทุนอุดหนุนวิจัย มก,2556.

[5] Terwilliger, G. and Cline, T. Geopolymer Concrete: Reducing the Carbon Emissions of Construction in a Developing World. New York . Session B5 (3210), 2013.

[6] Sarbjeet Singh, Ravindra Nagar. Utilization of granite cutting waste in concrete as partial replacement of sand. Jaipur. 2015.

[7] ASTM C33-03. Standard Specification for Concrete Aggregates.

[8] ASTM C39-01. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

[9] ASTM C1609-10. Standard test method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete [Using Beam with Third-point Loading].