



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
ทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุน (ว.1)
ประจำปีงบประมาณ 2561

เรื่อง การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา และเถ้าถ่านหิน
บิทูมินัสผสมเส้นใยสังเคราะห์

Study the Engineering Properties of Geopolymer from Wastewater Treatment
Residue and Bituminous Coal Ash with Synthesis Fiber

คณะผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล ผศ. ดร. รุ่งโรจน์ ปิยะพานุวัฒน์ หัวหน้าโครงการ

สังกัด ศูนย์บริการทางการศึกษาราชบุรี

บทคัดย่อ (Abstract)

ภาษาไทย : งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก และเถ้าลอยโดยมีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ คือ 2 และ 2.13 ตามลำดับ จากนั้นทำการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 โดยทำการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วที่ปริมาณ ร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักแห้ง และความยาวเส้นใยที่ใช้ คือ 2.5 และ 5 เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างไปทำการทดสอบกำลังอัด และดัด โดยบ่มตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 14 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษา พบว่าจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก และเถ้าลอยที่ไม่มีการเสริมเส้นใยมีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 77.34 และ 199.34 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบกำลังดัดนั้น จีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกสามารถสร้างกำลังดัดได้สูงสุดที่การผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ที่ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร มีค่ากำลังดัดเท่ากับ 61.97 ส่วนจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยค่ากำลังดัดเกิดขึ้นสูงสุดที่การผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนอัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร มีค่ากำลังดัดเท่ากับ 166 เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) พบผลึกของ Sodium aluminum silicate hydrate ซึ่งมีลักษณะคล้ายเจลทั่วทั้งชิ้นงาน ดังนั้นวัสดุจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก หรือเถ้าลอย สามารถใช้ทดแทนวัสดุก่อสร้าง เช่น กำแพงงานซ่อมแซม หรืองานที่รับกำลังดัดไม่สูงมากนัก

คำสำคัญ : Geopolymer, Polyethylene fiber, Glass fiber, Compressive strength, Flexural strength

Abstract

English : This research studied about engineering properties of geopolymer synthetic from Water Treatment Residue (WTR) that was added by glass dust and Bituminous Coal Ash with synthesis fiber with $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio 2 and 2.13, respectively. The sodium hydroxide solution with $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 0.25 was applied for reaction motivation. The percentages of polyethylene and glass fiber were 1, 2, and 3 by weight which had 2.5 and 5 cm of length. The block samples were cured for 7, 14, and 28 days at room temperature, after that, they were test compressive and flexural strength. The compressive strength results represented that geopolymer synthetic from WTR mixed glass dust and Bituminous Coal Ash without synthesis fiber were the best condition which the compressive strength equals to 77.34 and 199.34 kg/cm^2 at 28 day, respectively. While the best result of flexural strength was received from geopolymer synthetic from Water Treatment Residue (WTR) added glass dust reined force with 2% by weight of 5 cm polyethylene fiber that the maximum flexural strength was 61.97 kg/cm^2 . Also, the maximum flexural strength of Bituminous Coal Ash occurred when 2% of 2.5 cm polyethylene fiber was added into sample that the maximum flexural strength was 166 kg/cm^2 . The block sample was analyzed micro-structure by Scanning Electron Microscope (SEM) technique that the results showed Sodium aluminum silicate hydrate crystal overall of sample. As the results, geopolymer synthetic from Water Treatment Residue (WTR) that was added by glass dust or Bituminous Coal Ash can be used as construction materials such as wall, reparation works, or low flexural strength works.

Key words : Geopolymer, Polyethylene fiber, Glass fiber, Compressive strength, Flexural strength

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้สนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุน (ว.1) ประจำปีงบประมาณ 2561 และขอขอบคุณ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการศึกษาวิจัย

คณะผู้วิจัย

31 สิงหาคม 2561

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ญ
 บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.2 ขอบเขตการวิจัย	2
 2 ทฤษฎี	3
2.1 จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)	3
2.1.1 สมบัติของจีโอพอลิเมอร์	3
2.1.2 โครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์	4
2.1.3 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไร้เซชัน	5
2.1.4 วัสดุพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และวัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Portland cement and Geopolymer)	7
2.1.5 ประโยชน์จากการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์	8
2.1.6 วัสดุที่ใช้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์	8
2.2 วัสดุคอนกรีตเสริมเส้นใย	11
2.2.1 สมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใย	11
2.2.2 การใช้งานคอนกรีตเสริมเส้นใยในปัจจุบัน	11
2.3 เส้นใย	11
2.3.1 เส้นใยธรรมชาติ	12
2.3.2 เส้นใยสังเคราะห์	13
2.4 การทดสอบกำลังของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์	15
2.4.1 การทดสอบปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม	15
2.4.2 การทดสอบสมบัติของเส้นใย	15
2.4.3 การทดสอบสมบัติของจีโอพอลิเมอร์	15
2.5 วารสารปริทรรศน์	17

สารบัญ (ต่อ)

3	วิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	20
3.1.1	ดินตะกอนประปา (Water Treatment Residue; WTR)	20
3.1.2	เส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย	20
3.1.3	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	20
3.1.4	น้ำปราศจากประจุ (DI)	20
3.2	เครื่องมือในการทดลอง	20
3.3	การเตรียมวัสดุ และสารเคมี	21
3.3.1	การเตรียมดินตะกอนประปา	21
3.3.2	การเตรียมสารเคมี	23
3.4	ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผสม	23
3.5	การเตรียมเส้นใย	23
3.6	การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์	25
3.7	การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา	26
3.7.1	การทดสอบกำลังรับแรงอัด	26
3.7.2	การทดสอบกำลังรับแรงดัด	26
3.7.3	การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ	26
3.7.4	การทดสอบค่าความหนาแน่นสุทธิต่อของก้อนตัวอย่าง	27
3.7.5	การทดสอบหาองค์ประกอบของธาตุ (XRF)	27
3.7.6	การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (SEM)	27
4	อภิปรายผล	28
4.1	การศึกษาสมบัติทางเคมี และทางวิศวกรรมของวัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัย	28
4.1.1	การศึกษาสมบัติทางเคมีของดินตะกอนประปา	28
4.1.2	การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางวิศวกรรมของเส้นใย	29
4.2	ผลของปริมาณ และความยาวของเส้นใยต่อการพัฒนากำลังอัดของ จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา และเถ้านหินบิทมินัส	30
4.2.1	ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปา และเถ้านหินบิทมินัส	30
4.3	ผลของปริมาณ และความยาวของเส้นใยต่อสมบัติทางด้านความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา และเถ้าน เถ้านหินบิทมินัส	34
4.3.1	ปริมาณ และความยาวของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติด้าน ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา	34

สารบัญ (ต่อ)

4.3.2	ปริมาณ และความยาวของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา	36
4.3.3	ปริมาณ และความยาวของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติด้านความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหินบิทูมินัส	37
4.3.4	ปริมาณ และความยาวของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหินบิทูมินัส	38
4.4	ผลการทดสอบกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก และเถ้านหินบิทูมินัส	39
4.4.1	ผลของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติการรับกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา	39
4.4.2	ผลของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติการรับกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหินบิทูมินัส	44
4.5	โครงสร้างระดับจุลภาค	47
4.5.1	โครงสร้างระดับจุลภาคของดินตะกอนประปา	47
4.5.2	โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใย	48
4.5.3	โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินบิทูมินัสเสริมเส้น	49
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	51
5.1	สรุปผลการวิจัย	51
5.2	ข้อเสนอแนะ	52
	เอกสารอ้างอิง	53
	ภาคผนวก	56

ตารางที่	สารบัญตาราง	หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่นำมาใช้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์	4
2.2	สมบัติของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ	12
2.3	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยแก้วชนิดต่างๆ ร้อยละโดยน้ำหนัก	13
2.4	สมบัติเชิงกลของเส้นใยชนิดต่างๆ	14
3.1	อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา	25
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย	28
4.2	สมบัติทางวิศวกรรมของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว	29

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ดินตะกอนประปา และเถ้าลอย	2
2.1 ปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน	6
2.2 การเปรียบเทียบการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน	7
2.3 กระบวนการผลิตน้ำประปา	9
3.1 ดินตะกอนประปาที่เก็บจากโรงประปาบางเขน	21
3.2 ดินตะกอนประปา	22
3.3 ตะกอนประปาหลังบด	22
3.4 เส้นใย	24
3.5 ขนาดแบบหล่อจีโอพอลิเมอร์	25
3.6 การทดสอบการรับแรงดัดแบบ 4 จุด	26
3.7 ทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ	27
4.1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก และเถ้าถ่านหินบิทูมินัส ที่อายุการบ่มต่างๆ	30
4.2 อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา และเถ้าถ่านหินบิทูมินัสที่อายุการบ่ม 28 วัน	31
4.3 อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาว 5 เซนติเมตร ในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา และเถ้าถ่านหินบิทูมินัส ที่อายุการบ่ม 28 วัน	31
4.4 อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา และเถ้าถ่านหินบิทูมินัส ที่อายุการบ่ม 28 วัน	32
4.5 อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วที่มีความยาว 5 เซนติเมตร ในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา และเถ้าถ่านหินบิทูมินัส ที่อายุการบ่ม 28 วัน	33
4.6 ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ที่อยู่การบ่ม 28 วัน	34
4.7 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ที่อยู่การบ่ม 28 วัน	36
4.8 ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินบิทูมินัสผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ที่อยู่การบ่ม 28 วัน	37
4.9 ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินบิทูมินัสผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ที่อยู่การบ่ม 28 วัน	38
4.10 ตัวอย่างพฤติกรรมกรรมการรับกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร	39
4.11 ตัวอย่างกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร	41

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	ตัวอย่างค่ากำลังตัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วที่ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร	42
4.13	ตัวอย่างค่ากำลังตัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วที่ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร	43
4.14	ตัวอย่างค่ากำลังตัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินบิทูมินัสเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร	44
4.15	ตัวอย่างค่ากำลังตัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินบิทูมินัสเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร	45
4.16	ตัวอย่างค่ากำลังตัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินบิทูมินัสเสริมเส้นใยแก้วที่ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร	45
4.17	ตัวอย่างค่ากำลังตัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินบิทูมินัสเสริมเส้นใยแก้วที่ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร	46
4.18	โครงสร้างระดับจุลภาคของดินตะกอนประปา	47
4.19	โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก	48
4.20	โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินบิทูมินัส	48
4.21	โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินบิทูมินัส	49
4.22	โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินบิทูมินัสเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว	50

คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

ASTM	= American Society of Testing and Materials
g/cm^3	= กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
Kg	= กิโลกรัม
ksc	= กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
$\text{Si}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	= อัตราส่วน ซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินั่มออกไซด์
XRF	= X-ray Fluorescence
กรัม/ซม. ³	= กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
กก./ซม. ²	= กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

บทที่ 1 บทนำ

งานอาคาร หรือสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ มีการใช้โครงสร้างหลากหลายรูปแบบ โดยโครงสร้างบางรูปแบบมีความโค้งสูง และมีความบาง ดังนั้นในการเลือกวัสดุจึงต้องมีการพิจารณาเลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมกับโครงสร้างในแต่ละประเภท ในปัจจุบันโครงสร้างส่วนมากจะใช้คอนกรีตเป็นองค์ประกอบหลัก แต่คอนกรีตไม่สามารถทำให้มีลักษณะบาง และสามารถรับกำลังดัดได้ในเวลาเดียวกัน จึงมีการพัฒนาสมบัติทางด้านการรับกำลังดัดของคอนกรีตขึ้นมา โดยการเสริมกำลังของคอนกรีตด้วยเหล็กเส้น แต่ปัญหาที่ตามมาของการใช้เหล็กเส้นเสริมกำลังในคอนกรีตก็คือ เหล็กเส้นมีน้ำหนักมาก และมีราคาสูง จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการศึกษาวิจัย (Zhang และ Li, 2013) หาวัสดุที่ใช้ทดแทน หรือวัสดุที่สามารถลดปริมาณการใช้เหล็กเส้นในงานก่อสร้างลง วัสดุนั้นก็คือ เส้นใย แต่ปัญหาของงานก่อสร้างไม่ได้มีแค่เรื่องวัสดุเสริมกำลังเท่านั้น ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมยังเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญด้วยเช่นกัน เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานในคอนกรีตทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมอย่างมาก เช่น กระบวนการระเบิดภูเขาหินปูนเพื่อให้ได้แร่หินปูน กระบวนการนี้จะทำให้เกิดฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็ก (PM 2.5-10) เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ หรือมลพิษที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ กระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,400-1,500 องศาเซลเซียส ในการเผาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นปูนซีเมนต์ที่สมบูรณ์ การทำให้เกิด ความร้อนสูงถึง 1,400-1,500 องศาเซลเซียส จะต้องใช้เชื้อเพลิงเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการเผาไหม้เชื้อเพลิงในปริมาณมากย่อมส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกออกมาในปริมาณสูง ซึ่งทำให้เกิดสภาวะเรือนกระจกขึ้น จากปัญหาที่กล่าวมานั้นแนวทางในการแก้ไขปัญหา คือ การหาวัสดุเชื่อมประสานชนิดอื่นๆ ที่สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ เช่น จีโอพอลิเมอร์ เป็นต้น

จีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุตั้งต้นหลายชนิด แต่วัสดุนั้นจะต้องมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น แก้วลอย (ผกามาต อสิริยะรังสรรค์, 2557) ดินขาว (แสงจันทร์ ยมเกิด, 2546) และดินตะกอนประปา (นภารัตน์ ไวยเจริญ, 2556) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ดินตะกอนประปา ฝุ่นกระจก และแก้วลอยบิโหมินัสเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากโรงผลิตน้ำประปา (โรงประปาบางเขน) เกิดปัญหาเรื่อง การกำจัดดินตะกอนประปา ในปัจจุบันทางโรงประปาจำเป็นต้องว่าจ้างบริษัทเอกชนเพื่อกำจัดดินตะกอนประปาออกจากพื้นที่โรงงาน ซึ่งโรงประปาต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการหาวิธีการนำดินตะกอนประปามาใช้ประโยชน์จึงเป็นแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายสำหรับการกำจัดดินตะกอนประปาได้ แต่ดินตะกอนประปามีองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่ต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับอัตราส่วน SiO_2 และ Al_2O_3 ให้มีความเหมาะสมก่อนทำการสังเคราะห์ วัสดุที่นำมาปรับอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของดินตะกอนประปาก็คือฝุ่นกระจกจากอุตสาหกรรมกระจก ส่วนสาเหตุที่เลือกใช้แก้วลอยบิโหมินัสในการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ก็เพราะประเทศไทยมีการใช้พลังงานถ่านหินบิโหมินัสในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อสิ้นสักระบวนการผลิตจึงเกิดของเสียจากการเผาไหม้ (แก้วลอย) ขึ้นเป็นจำนวนมาก การนำวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาใช้สังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม

จากสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอพอลิเมอร์ พบว่า จีโอพอลิเมอร์สามารถรับกำลังอัดได้ดี แต่ไม่สามารถรับกำลังดัดได้ แต่ในงานโครงสร้างบางประเภท วัสดุจำเป็นต้องรับกำลังดัดได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ก็คือ การเสริมแรงของวัสดุด้วยเส้นใย ปัจจุบันประเภทของเส้นใยมี 2 ชนิด คือ เส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์ แต่เส้นใยชนิดที่นิยมใช้ในงานโครงสร้าง คือ เส้นใยสังเคราะห์ เนื่องจากมีความคงทนต่อสารเคมี และมีสมบัติที่คงที่ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษาถึงพฤติกรรมในการรับกำลังอัด และกำลังดัด ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปา ผสมฝุ่นกระจก และเถ้าลอยบิทูมินัสเสริมด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ในอัตราส่วนเส้นใยร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่ความยาวของเส้นใยทั้ง 2 ชนิดมีค่าเท่ากับ 2.5 และ 5 เซนติเมตร



ก) ดินตะกอนประปา



ข) เถ้าถ่านหินบิทูมินัส

รูปที่ 1.1 ดินตะกอนประปา และเถ้าลอย

1.1 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงสมบัติเชิงวิศวกรรมของวัสดุสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา และเถ้าถ่านหินบิทูมินัสที่เสริมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว
- 2) เป็นการนำดินตะกอนประปาที่เหลือทิ้งมาทำให้เกิดประโยชน์ โดยการทำเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้ทดแทนวัสดุสำหรับงานก่อสร้าง
- 3) เพื่อลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

1.2 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาสมบัติของดินตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน โดยนำดินตะกอนประปามาทำการบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำ ดินตะกอนประปาที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ทั้งก่อนเผา และหลังเผา
- 2) ศึกษาสมบัติของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วชนิดอี (E-Glass Fiber) โดยทำการศึกษาในด้านกำลังรับแรงดึงของเส้นใยที่สภาวะปกติ และกำลังรับแรงดึงของเส้นใยที่ผ่านการแช่ในสารละลายต่างเข้มข้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) ศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา และเถ้าถ่านหินบิทูมินัสเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีน และ เส้นใยแก้วที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ที่ความยาวเส้นใย 2.5 และ 5 เซนติเมตร อายุการบ่มตัวอย่างที่ 7 14 และ 28 วัน โดยศึกษากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด ความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ ของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทั้งสองชนิด

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอพอลิเมอร์ถือเป็นวัสดุเชื่อมผสมที่มีส่วนองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) และมีธาตุหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) จีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้ต่างเข้มข้น ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือต่างเข้มข้นอื่นๆ เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริyajีโอพอลิเมอร์ โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุก่อสร้างต่างๆ ซึ่งใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในบางโครงสร้าง เช่น งานพื้น งานสนาม และงานซ่อมแซม เป็นต้น (สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ และคณะ, 2558) ดังนั้น ประโยชน์ของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ คือ การเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรับกำลังอัดได้ดี และสังเคราะห์ได้จากวัสดุเหลือทิ้งที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น เถ้าแกลบ เถ้าถ่านหิน ดินขาว และตะกอนประปา เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีประโยชน์ทั้งทางด้านงานก่อสร้าง และยังสังเคราะห์ได้จากวัสดุที่หลากหลาย ในการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร และอุตสาหกรรมมาสังเคราะห์เป็น จีโอพอลิเมอร์ เพื่อที่จะนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์จะ พบว่า จีโอพอลิเมอร์สามารถลดการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศได้สูงกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ (สุจินนท์ ยิ้มคมขำ, 2546) เนื่องจากปูนซีเมนต์ต้องใช้ความร้อนมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส แต่จีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส ในการสังเคราะห์

2.1.1 สมบัติของจีโอพอลิเมอร์

การนำวัสดุจีโอพอลิเมอร์มาใช้ในการก่อสร้าง วัสดุจีโอพอลิเมอร์นั้นจะต้องมีสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่เทียบเท่า หรือสูงกว่าปูนซีเมนต์ในบางด้าน โดยสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เบื้องต้นเป็นดังต่อไปนี้

- 1) จีโอพอลิเมอร์มีความคงทนต่อการกัดกร่อนสูงกว่าปูนซีเมนต์ เนื่องจากปูนซีเมนต์มอร์ตาร์มีส่วนผสมของแคลเซียม (Ca) ที่สูง ส่งผลให้เกิดปัญหาการขยายตัวในสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2560) ความเค็มจากเกลือจะส่งผลทำให้เกิดการกัดกร่อนคอนกรีตที่สร้างจากปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ (ตัวอย่างเช่น การกัดกร่อนที่เกิดกับโครงสร้างบริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเล) และเหตุผลที่จีโอพอลิเมอร์สามารถทนต่อการกัดกร่อน หรือเกลือได้ เนื่องจากมีโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตที่แข็งแรง
- 2) จีโอพอลิเมอร์สามารถทนไฟ (อุณหภูมิสูง) ได้ดี เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบของสารอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งมีสมบัติในการทนความร้อน (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2560) โดยความสามารถในการทนไฟนั้นขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์ ถ้ามีอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินัมออกไซด์มากกว่า 1.5 โดยน้ำหนัก หรือมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์สามารถทนเปลวไฟได้ดียิ่งขึ้น โดยจีโอพอลิเมอร์สามารถทนเปลวไฟได้ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส
- 3) ค่ากำลังอัด จีโอพอลิเมอร์สามารถสร้างกำลังรับแรงอัดได้สูงในเวลาอันสั้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา จีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาสามารถสร้างกำลังอัดได้สูงถึง 90-100 กิโลกรัมต่อตาราง

เซนติเมตร (ชาลินี อ่อนแสง, 2555) จึงสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ในงานผนัง หรือพื้นที่ที่มีการรับกำลังอัดไม่สูงมากนัก

- 4) การกักเก็บสารพิษ เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับซีโอไลต์ (Zeolite) จึงทำให้สามารถเก็บสารเคมีบางอย่าง เช่น โลหะหนัก เอาไว้ในโครงสร้างได้

2.1.2 โครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เกิดจากซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) รวมตัวกันเป็นสารเชื่อมประสานในรูปของโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ และ $[\text{SiO}_4]^{4-}$ โดยมีอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม (Na^+) หรือโพแทสเซียม (K^+) ในการทำให้ประจุสมดุลที่ตำแหน่งของ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ (พัชรภรณ์ ธรรมบำรุง, 2558) ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูง (ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่นำมาสังเคราะห์) แต่ในการผลิตปูนซีเมนต์มีความจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,400-1,500 องศาเซลเซียส (สุจินันท์ ยิ้มคมขำ, 2546) ดังนั้นโครงสร้างโมเลกุลของจีโอพอลิเมอร์ จึงเป็นไปตามสมการที่ 2.1 (พัชรภรณ์ ธรรมบำรุง, 2558)

$$M_n [-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2]_n \cdot w\text{H}_2\text{O} \quad (2.1)$$

เมื่อ M คือ ธาตุอัลคาไลน์
 z คือ จำนวนโมเลกุลของ SiO_2 เท่ากับ 12 และ 13
 n คือ จำนวนโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่ หรือ Degree of Polymerization
 w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

โดยอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินัมออกไซด์ จะระบุถึงสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ และถ้าจีโอพอลิเมอร์มีอัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินัมออกไซด์ต่ำ จะทำให้ได้โครงสร้างแข็งมีรูปแบบเป็น 3 มิติ การใช้งาน เช่น ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 เหมาะใช้สำหรับงานอิฐ อัตราส่วน 2 ต่อ 1 เหมาะสำหรับงานปูนซีเมนต์ และคอนกรีต (นันทชัย ชูศิลป์ และคณะ, 2556) เป็นต้น ดังนั้นในการเลือกนำวัสดุมาทำการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องทำการหาอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) ก่อนจะนำมาใช้ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณค่าโดยเฉลี่ยทางด้านองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุชนิดต่างๆ ที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมินัมออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลัก

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่นำมาใช้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2560)

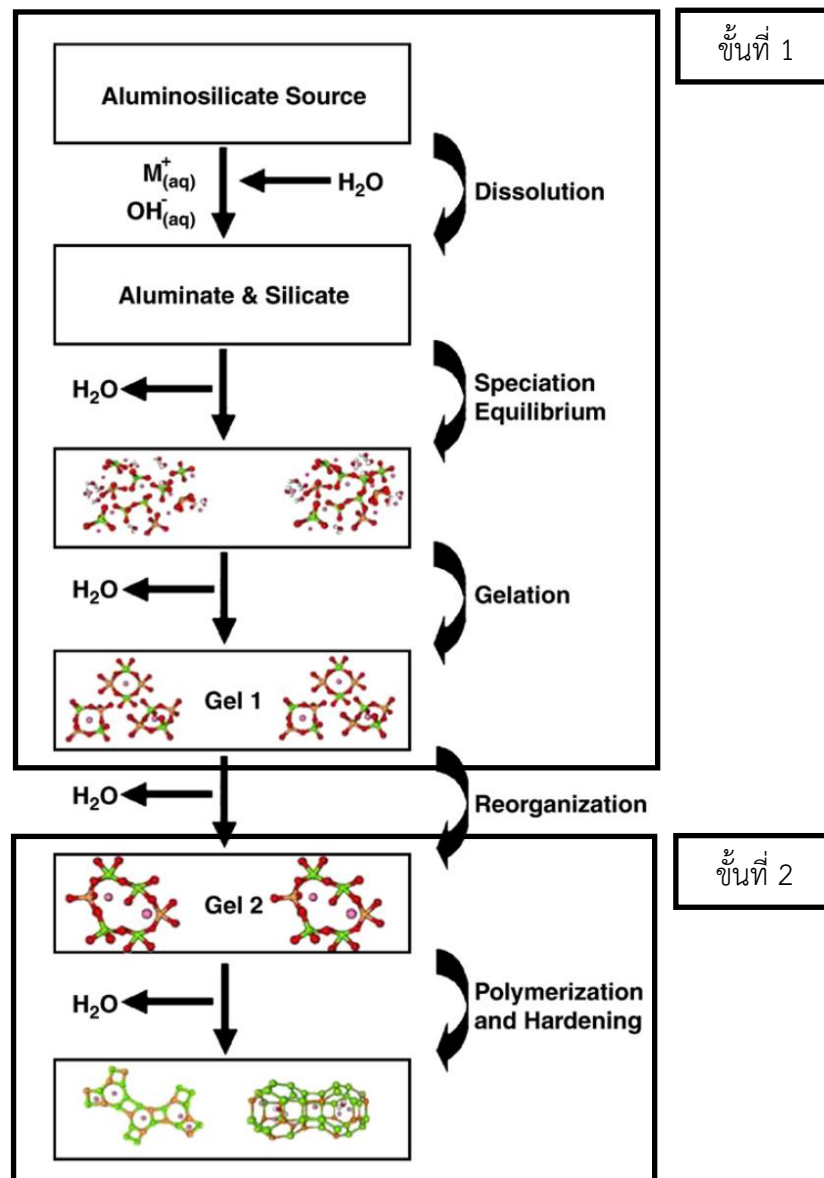
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ตะกรันเตาถลุงเหล็ก	ตะกอนประปา	เถ้าถ่านหินบิทูมินัส
SiO_2	32-42	40-60	30-40
Al_2O_3	7-42	20-35	20-30
CaO	32-45	0-2	15-25
MgO	5-15	0-1	1.10-2
Fe_2O_3	0.10-1.50	1-10	12-16
MnO	0.20-1.00	0.10-0.90	-

2.1.3 ปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

การเกิดปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันนั้น กระบวนการทุกกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จนอาจถือได้ว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาทั้งหมดเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน และในปัจจุบันยังไม่มีการอธิบายถึงกลไกของปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ชัดเจน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจการเกิดปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันสามารถอธิบายได้เป็นสองขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การชะละลาย (Dissolution) เป็นกระบวนการในการทำปฏิกริยาระหว่างวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์กับต่างแก๊ โดยสารละลายต่างแก๊ที่นิยมใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ส่งผลให้เกิดการแตกสลายของพันธะโควาเลนต์ของ Si-O-Si และ Al-O-Si เมื่อมีการแตกตัวเกิดขึ้นแล้วจะเกิดการก่อตัวในรูปของคอลลอยด์ (Colloid) หรืออาจเรียกว่าเจล (Gel) ความเข้มข้นของสารละลายต่างแก๊ที่ใช้ในการทำปฏิกริยานั้น มีผลต่อการชะละลายของอะตอมซิลิกอน และอลูมินา กล่าวคือ ความเข้มข้นของต่างแก๊มากจะทำให้เกิดการชะของอะตอมซิลิกอน และอลูมินาออกมามาก (แต่เมื่อมีความเข้มข้นมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการแข็งตัวที่รวดเร็วในระหว่างการผสม และอาจทำให้ค่ากำลังลดลง) ดังนั้นในกระบวนการสังเคราะห์ต้องมีการคำนวณหาปริมาณของต่างแก๊ที่มีสัดส่วนเหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ให้ได้มากที่สุด (Provis และ Deventer, 2009)

ขั้นตอนที่ 2 ปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ของซิลิกาไอออน (Si^{4+}) และอลูมินาไอออน (Al^{3+}) ที่ถูกทำให้แตกตัวออกมาจากวัสดุตั้งต้นในขั้นตอนที่ 1 จะเกิดการรวมตัวกับไอออน (Ion) ของออกซิเจนอยู่ในรูปทรงสี่หน้า และเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่าง Si O และ Al เกิดเป็นสารประกอบของอะลูมิโนซิลิเกต (Si-O-Al-O) ดังกลไกที่ได้เสนอไว้โดย Tanyildizi และ Yonar (2016) ขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเป็น ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Provis และ Deventer, 2009)

วัตถุดิบที่ใช้ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจนกลายเป็นจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วย

- 1) วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ปอซโซลาน (Pozzolan) เช่น ดินตะกอนประปา หรือเถ้าลอย ซึ่งสาร 2 ชนิดนี้สามารถ ละลายได้ง่าย ในงานวิจัยนี้วัสดุที่นำมาใช้แทนปอซโซลาน คือ ดินตะกอนประปา จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน ตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร
- 2) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิดนี้มีความเป็นด่างสูง แต่สารที่นิยมใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีราคาที่ไม่สูง หาซื้อได้ง่าย และส่งผลต่อค่าการรับแรงเชิงกลที่สูงกว่า ดังงานวิจัยของ ชาลินี อ่อนแสง (2555) ได้ทำการเปรียบเทียบการเลือกใช้ต่างแ่งในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอพอลิเมอร์ โดยงานวิจัยดังกล่าวได้ใช้ต่าง 2 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองพบว่า ในการเกิดปฏิกิริยา จีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ถ้าใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นต่างแ่งสำหรับ

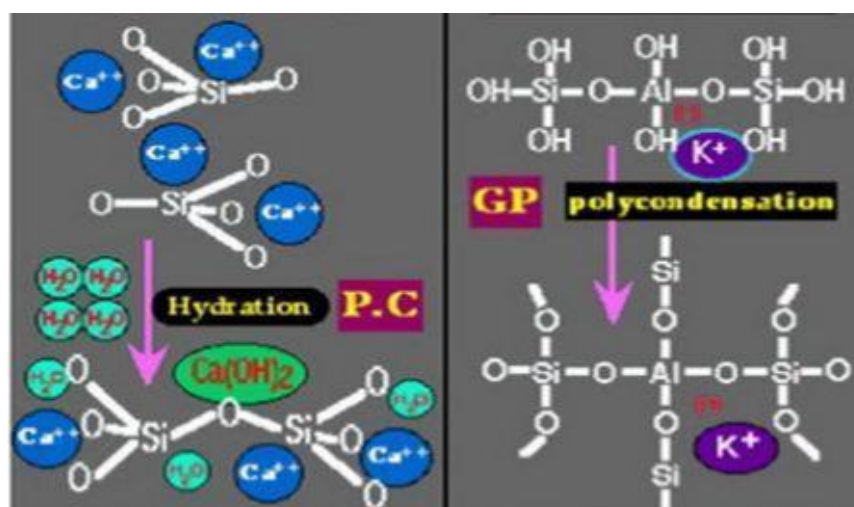
การสังเคราะห์ จะทำให้ความสามารถในการละลายของซิลิกาในระหว่างปฏิกิริยาเกิดขึ้นรวดเร็วกว่าการใช้ต่างแก่ประเภทโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

- 3) สารปรับอัตราส่วน ใช้ในกรณีที่วัสดุที่จะนำมาสังเคราะห์มีอัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินัมออกไซด์ไม่เหมาะสม สารที่นำมาใช้ในการปรับอัตราส่วนมักจะเป็นสารประกอบโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในรูปสารละลาย แต่ในการปรับอัตราส่วนควรจะใช้เป็นสารที่มีราคาไม่สูง หรือวัสดุเหลือทิ้งมากกว่า นอกจากจะทำให้ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายแล้ว ยังเป็นการนำของเสียมาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด เช่น ฝุ่นกระจกจากอุตสาหกรรมผลิตกระจกถ้าอัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ต่ำจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

2.1.4 วัสดุพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Portland cement and Geopolymer)

วัสดุพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีความแตกต่างกันจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากโครงสร้างไฮเดรชัน (Hydration) ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จะประกอบด้วยตัวเชื่อมประสานหลัก เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ตัวเชื่อมประสานนี้จะทำหน้าที่ในการเพิ่มกำลังอัดให้กับคอนกรีต ซีเมนต์เพส (มอร์ตาร์) ที่แข็งตัวเรียบร้อยแล้ว สมการปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2551)

เมื่อนำเอาวัสดุปอซโซลานซึ่งมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ มาใช้ร่วมกับซีเมนต์พอร์ตแลนด์ จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) ปฏิกิริยานี้จะส่งผลให้เกิดคอนกรีต (หรือซีเมนต์เพส) ที่มีโครงสร้างหนาแน่นและทนทานมากขึ้น จากที่กล่าวมาข้างต้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement) กับปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) มีความแตกต่างกันดังรูปที่ 2.2 กล่าวคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยา แต่ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจะใช้ไอออนของด่างในการทำให้เกิดปฏิกิริยานั่นเอง



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2551)

2.1.5 ประโยชน์จากการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่าการนำเอาวัสดุเหลือทิ้ง เช่น ดินตะกอนประปา กากของเสียจากอุตสาหกรรม หรือเถ้าจากโรงไฟฟ้า มาสังเคราะห์ให้เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้าง และใช้ทดแทนปูนซีเมนต์จะมีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ (ถ้าผลิตในปริมาณมากจนถึงจุดคุ้มทุน) ในภาคอุตสาหกรรม และยังช่วยลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) อันเป็นผลทำให้เกิดสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังสามารถนำไปใช้งานในด้านอื่นๆ ได้ เช่น นำไปผลิตอิฐทนไฟ วัสดุตกแต่ง อุตสาหกรรมการประกอบเครื่องบิน และพิวส์ไฟฟ้าในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับไฟฟ้า เป็นต้น (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2551)

2.1.6 วัสดุที่ใช้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

วัสดุที่ใช้สังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยส่วนมากจะเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินัมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547) ซึ่งวัสดุดังกล่าวถูกจัดอยู่ในประเภทวัสดุพอซโซลาน (Pozzoland) วัสดุพอซโซลานมีดังนี้

- 1) เถ้าลอย เป็นของเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งมีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก และละเอียด โดยองค์ประกอบหลักของธาตุในเถ้าลอยจะเป็น ซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมินัมออกไซด์เป็นหลัก แหล่งเถ้าลอยในประเทศไทยจะสามารถพบได้จากตามโรงไฟฟ้าต่างๆ เช่น โรงไฟฟ้าแม่เมาะ เป็นต้น ในปัจจุบันมีการนำเอาเถ้าลอยมาใช้สังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์กันอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ จเร ชุมอักษร (2550)
- 2) ดินขาว เกิดจากการผุพัง หรือเกิดจากการขยายตัวของหินบางชนิด เช่น หินไรโอไลต์ หินแกรนิต และหินทราย เป็นต้น โดยดินขาวจะมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมินัมออกไซด์เป็นหลักเช่นกัน แหล่งที่พบดินขาวในประเทศไทยส่วนมากจะพบที่จังหวัดระนอง ปัจจุบันได้มีการศึกษาการนำดินขาวมาใช้ประโยชน์อยู่หลากหลายด้าน เช่น ในงานวิจัยของธัญรัศม์ เลิศโมซิตพงศ์ (2553) ได้นำดินขาวมาทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะใช้สังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้รับกำลังอัด
- 3) ดินตะกอนประปา เกิดจากโรงผลิตน้ำประปาที่ใช้ระบบการตกตะกอน โดยกระบวนการกวนเร็ว กวนช้า และตกตะกอน (Coagulation and Flocculation) ยกตัวอย่างเช่น โรงผลิตน้ำประปาบางเขน ซึ่งถือเป็นโรงประปาขนาดใหญ่มีความสามารถในการผลิตน้ำได้วันละประมาณ 3,600,000 ลูกบาศก์เมตร แหล่งน้ำดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต คือ แหล่งน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา โดยส่งน้ำดิบผ่านคลองประปาตะวันออกจนถึงโรงผลิตน้ำประปาเป็นระยะทางประมาณ 18 กิโลเมตร และยังรับน้ำดิบบางส่วนมาจากแม่น้ำแม่กลอง เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการน้ำประปา เนื่องจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนเป็นโรงงานผลิตน้ำประปาขนาดใหญ่มีกำลังการผลิตสูง ซึ่งสามารถให้บริการน้ำประปาในพื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานคร

กระบวนการผลิตน้ำประปาแต่ละโรงประปานั้นจะมีการวางระบบ และขั้นตอนในกระบวนการที่มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต กระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงประปาบางเขน หลังจากสูบน้ำดิบจากแม่น้ำแล้ว น้ำที่ถูกสูบขึ้นมาจะผ่านตระแกรงตาข่าย (Screening) เพื่อใช้แยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ เช่น กิ่งไม้ ขยะ หรือสัตว์น้ำ ออกจากระบบก่อน

จากกระบวนการผลิตน้ำประปาจะเกิดของเสีย ซึ่งประกอบไปด้วย ดินตะกอนประปา และอุปกรณ์สำนักงานต่างๆ ในส่วนของเสียที่เกิดจากดินตะกอนประปาจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

- ดินตะกอนประปาจากกระบวนการผลิตน้ำประปาที่มาจากตะแกรงกรองในขั้นตอนการสูบน้ำจากแหล่งน้ำดิบเข้าสู่กระบวนการผลิต ตะกอนส่วนนี้จะประกอบด้วย เศษหิน ดิน ทราย กิ่งไม้ หรือเศษขยะ
- ดินตะกอนประปาที่เกิดจากถังตกตะกอน โดยส่วนมากถังตกตะกอนจะถูกติดตั้งไว้หลังจากถังกวนเร็ว กวนช้า แต่ในบางโรงประปาถังนี้จะถูกรวมเอาไว้เป็นถังเดียวกันกับระบบกวนเร็ว กวนช้า เนื่องจากต้องการใช้พื้นที่ให้น้อยที่สุด ดินตะกอนที่มาจากส่วนนี้จะมียอดประกอบของสารส้ม (Alum) ปนออกมากับดินตะกอนประปาด้วย ในงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) จากดินตะกอนประปา ผู้ทำการวิจัยจะนำดินตะกอนประปาจากส่วนนี้มาใช้ในการวิจัย เนื่องจากมีอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีความเหมาะสมในการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์
- ดินตะกอนส่วนสุดท้ายมาจากถังกรอง เนื่องจากถังกรองจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองตะกอนขนาดเล็กที่อาจหลุดออกมากับน้ำหลังจากผ่านถังตกตะกอนมาแล้ว และเพื่อให้เกิดความแน่ใจว่าน้ำประปาที่ได้จะไม่มีตะกอนดินประปาติดออกมากับน้ำ ดังนั้นตะกอนส่วนนี้จะถูกส่งไปยังเครื่องอัดตะกอน (Filter Press) รวมกับตะกอนที่มาจากถังตกตะกอน

กระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาบางเขนจะมีดินตะกอนประปาเกิดขึ้นประมาณ ปีละ 1-1.2 แสนตัน (น้ำหนักตะกอนแห้ง ณ โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาบางเขน) ในสมัยก่อนนั้นดินตะกอนประปาที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการถมที่ดิน (ข้อมูลเฉพาะจากที่โรงประปาบางเขน) แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำดินตะกอนประปามาใช้ทำเป็นวัตถุดิบสำหรับทำเครื่องปั้นดินเผา โดยได้มีการศึกษาวิจัยของ เกษม พงษ์ชนะวัน ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง (การประปานครหลวง, 2559) ผลการวิจัย พบว่า ดินตะกอนของการประปานครหลวงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาจำพวกเซรามิกซ์ และกระเบื้องเคลือบ นอกจากนี้ยังได้มีการคิดค้นสูตรในการผสมดินสำหรับงานเครื่องปั้นดินเผาขึ้นมามากกว่า 2,000 สูตร เพื่อใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับวงการอุตสาหกรรมด้านเครื่องปั้นกระเบื้องเคลือบ จากผลการวิจัยดังกล่าว ทำให้มีชาวบ้านในพื้นที่ใกล้เคียงโรงประปาได้หันมาใช้ดินตะกอนของการประปานครหลวงเป็นวัตถุดิบสำหรับการปั้นเพิ่มมากขึ้น โดยไม่ต้องไปหาซื้อดินจากที่ห่างไกล เช่น ลำปาง อ่างทอง ระนอง เป็นต้น (การประปานครหลวง, 2559) ปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงสมบัติของดินตะกอนประปาว่ามียอดประกอบของแร่ธาตุอะไรบ้าง และสามารถเอาดินตะกอนไปพัฒนาเป็นอะไรได้ จากการศึกษาของนักวิจัย พบว่า ในดินตะกอนประปามีอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีความเหมาะสมต่อการนำมาสังเคราะห์เป็นก้อนแข็งเพื่อใช้เป็นวัสดุรับแรงได้ โดยงานวิจัยของ ขวัญเรือน จันทวงศ์ (2557) ได้ทดลองศึกษาการนำดินตะกอนประปามาทำการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ ผลการทดลอง พบว่า สามารถให้กำลังอยู่ที่ประมาณ 90-100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2.2 วัสดุคอนกรีตเสริมเส้นใย

คอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถรับกำลังอัดได้สูง แต่สามารถรับกำลังดึง หรือกำลังดัดได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในงานก่อสร้างบางประเภทวัสดุที่ใช้จำเป็นต้องรับกำลังดึง หรือกำลังดัดด้วย จึงเกิดการพัฒนาร่วมผสมของคอนกรีตเพื่อให้สามารถใช้งานที่รับกำลังดึง หรือกำลังดัดได้ โดยทำการเสริมเหล็กเส้นเข้าไปในส่วนผสมของซีเมนต์ ผลปรากฏว่าคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับกำลังดัดได้เพิ่มมากขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อระยะเวลาผ่านไป หรือมีการใช้งานในพื้นที่ที่มีความชื้นสูงเหล็กเส้นจะถูกกัดกร่อน และโครงสร้างที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเหล็กยังมีน้ำหนักมากจึงทำให้การออกแบบโครงสร้างจำเป็นต้องทำให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น จากปัญหาดังกล่าว จึงทำให้เกิดการพัฒนาการเสริมโครงสร้างการรับแรง โดยการใช้เส้นใยแทนเหล็กเส้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบากว่านั่นเอง

2.2.1 สมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใย

- 1) ทางด้านกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) การผสมเส้นใยจะส่งผลโดยตรงกับกำลังรับแรงดัดของวัสดุ คือ เมื่อวัสดุเกิดการแตกหักจากกำลังดัดที่กระทำต่อวัสดุ เส้นใยที่แทรกอยู่ระหว่างวัสดุจะทำหน้าที่เป็นตัวรับกำลังดัดแทน จึงทำให้วัสดุยังสามารถคงรูปร่าง และสมบัติการใช้งานได้ดังเดิม แต่กำลังดัดที่เพิ่มขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับการยึดติดกันของเส้นใย และวัสดุเชื่อมประสานด้วย
- 2) ความเหนียว (Toughness) เส้นใยที่ถูกผสมในคอนกรีตจะทำหน้าที่ยึดรั้งรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นของคอนกรีต (วรเชษฐ์ ป้อมเชียงพิน, 2550) ทำให้วัสดุมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุสามารถรับกำลังดัด และเกิดการโก่งตัวได้มากกว่าการไม่ผสมเส้นใยในคอนกรีต
- 3) กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) เมื่อผสมเส้นใยลงไปค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมักจะต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการผสมเส้นใย เนื่องจากสมบัติการยึดติดกันของคอนกรีต และเส้นใย ดังนั้นการเลือกชนิดเส้นใยที่มีความเหมาะสมจึงเป็นเรื่องสำคัญเป็นอย่างมาก โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเส้นใยมักจะลดลงไม่เกินร้อยละ 15 ของกำลังอัดสูงสุด
- 4) ความสามารถในการเท (Workability) การผสมเส้นใยส่งผลให้ความสามารถในการเทของคอนกรีตลดลง โดยความสามารถในการเทจะแปรผกผันกับปริมาณเส้นใยที่ใช้ผสม ดังนั้นการหาอัตราส่วนผสมระหว่างคอนกรีตกับเส้นใยจึงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอีกอย่างหนึ่ง

2.2.2 การใช้งานคอนกรีตเสริมเส้นใยในปัจจุบัน

การเสริมเส้นใยลงไปในงานคอนกรีตนั้น จะส่งผลให้คอนกรีตสามารถรับกำลังดัดได้สูงขึ้น และยังทำให้วัสดุมีน้ำหนักเบา ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมใช้งานคอนกรีตเสริมเส้นใยในงานโครงสร้าง เช่น คาน หรือโครงสร้างที่มีรูปทรงแปลกตา ส่วนชนิดของเส้นใยที่ได้รับความนิยม คือ เส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยพอลิเอทิลีน เนื่องจากมีสมบัติที่แน่นอน คงทนต่อสารเคมี และหาซื้อได้ง่าย

2.3 เส้นใย

เส้นใยในปัจจุบันมีหลากหลายประเภท แต่โดยทั่วไปแล้วเส้นใยจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันทั้งทางด้านกายภาพ และเคมี การใช้งานขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่จะนำเส้นใยไปใช้ เช่น หากต้องการนำเส้นใยไปใช้กับสารเคมี เส้นใยธรรมชาติบางชนิดก็ไม่มี ความเหมาะสม เนื่องจากไม่มีสมบัติในการทนต่อการ

ทำปฏิกิริยากับสารเคมี จึงอาจทำให้เกิดการกัดกร่อน หรือเกิดความเสียหายได้ ส่วนเส้นใยสังเคราะห์จะมีราคาที่สูงกว่า เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตทางอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสังเคราะห์ โดยเส้นใยที่ใช้ในการวิจัย คือ เส้นใยพอลิเอทิลีน (Polyethylene) และเส้นใยแก้ว (Glass Fibre) ความแตกต่างของเส้นใยทั้ง 2 ประเภทสามารถอธิบายได้เบื้องต้นดังนี้

2.3.1 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติมีอยู่หลายชนิดทั้งจากพืช และสัตว์บางประเภท แต่เส้นใยที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงส่วนมากจะเป็นเส้นใยจากพืชมากกว่า เนื่องจากเส้นใยจากสัตว์นั้นมีราคาที่สูง และมีการนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นๆ ที่อาจจะมียุทธศาสตร์ได้มากกว่า เช่น นำไปทำเสื้อผ้าขนสัตว์ เครื่องประดับ เป็นต้น ส่วนเส้นใยที่ได้จากมนุษย์ เช่น เส้นผม จะมีข้อจำกัด คือ ในการนำมาใช้ศึกษานั้นต้องได้รับการอนุญาต และผ่านการอบรมเกี่ยวกับจริยธรรมในงานวิจัยมาแล้วถึงจะสามารถนำมาใช้งานได้ ซึ่งถือเป็นขั้นตอนที่ยุ่งยาก เป็นต้น องค์ประกอบหลักของเส้นใยธรรมชาติมักเป็นสารจำพวกลิกนินเซลลูโลส (Lignin cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เส้นใยธรรมชาติส่วนใหญ่มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความคล้ายคลึงกัน แต่การจัดเรียงตัวของโครงสร้างย่อยภายในเส้นใยแตกต่างกันด้วยเหตุผลนี้ทำให้เส้นใยแต่ละชนิดมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังมีขนาด ลักษณะ และสมบัติเชิงกลที่ไม่สม่ำเสมอเปลี่ยนแปลงไปตามพันธุ์พืช ฤดูกาล ตลอดจนแหล่งเพาะปลูก ทำให้การศึกษาเกี่ยวกับการนำเส้นใยธรรมชาติมาเป็นวัสดุเสริมแรงไม่ค่อยได้รับความนิยมมากในอดีต แต่ในปัจจุบันได้มีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เช่น ปัญหาทรัพยากรธรรมชาติที่ลดน้อยลง เกิดภาวะสภาพอากาศเปลี่ยนแปลง (Climate Change) จึงทำให้การศึกษาเกี่ยวกับเส้นใยธรรมชาติได้รับความนิยมอีกครั้ง (ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย, 2559) ยกตัวอย่างความแตกต่างของแหล่งเพาะปลูกที่มีความแตกต่างกัน เพื่อที่จะได้เกิดความเข้าใจชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังนี้ น้ำยางพาราจากแหล่งเพาะปลูกภาคใต้จะให้คุณภาพของน้ำยางที่ดีกว่าแหล่งเพาะปลูกทางภาคอีสาน เนื่องจากภูมิอากาศทางภาคใต้มีฝนตกประมาณ 8 เดือนต่อปี ซึ่งเป็นภูมิอากาศที่มีความเหมาะสมกับต้นยางพารา และมีธาตุอาหารในดินที่สมบูรณ์กว่า จึงทำให้ได้น้ำยางที่มีคุณภาพ และได้ปริมาณที่มากกว่าการเพาะปลูกยางพาราในภาคอีสาน นอกจากนั้นสมบัติของเส้นใยในแต่ละแหล่งเพาะปลูกยังขึ้นกับภูมิอากาศ และธาตุอาหารของแต่ละแหล่งเช่นกัน ดังนั้นการนำเอาเส้นใยธรรมชาติมาใช้ในการค้นคว้าวิจัยจึงควรคำนึงถึงแหล่งที่มาของวัตถุดิบ และควรทำการทดสอบสมบัติใหม่ทุกครั้ง

ตารางที่ 2.2 สมบัติของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ (ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย, 2559)

ชนิดเส้นใย	ปริมาณ เซลลูโลส (ร้อยละ)	ความ หนาแน่น (ก./ซม. ³)	มอดุลัส (จิกะ ปาสคาล)	ความ แข็งแรง (เม กะปาสคาล)	ระยะยืด ขาด (ร้อยละ)
ใยใบสับปะรด	67-85	1.44	34.50-82.50	413-1627	16
ปอ (Flax)	41-48	1.3-1.45	13-26.50	393-773	7-8
ป่านครนารายณ์ (Sisal)	47-78	1.45	9.40-22	468-640	3-7
ฝ้าย	92	1.50-1.60	5.50-12.60	287-800	7-8
ใยมะพร้าว (Coir)	36	1.15	4-6	131-175	15-40

2.3.2 เส้นใยสังเคราะห์

เส้นใยสังเคราะห์ส่วนมากทำมาจากพลาสติก ซึ่งพลาสติกที่ใช้ คือ สารสังเคราะห์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของสารอินทรีย์ ประกอบด้วยคาร์บอน (Carbon) และไฮโดรเจน (Hydrogen) ในปัจจุบันได้มีการศึกษา และนำเส้นใยสังเคราะห์ไปใช้ในการช่วยเสริมแรงในการก่อสร้างอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเส้นใยสังเคราะห์สามารถช่วยให้วัสดุมีกำลัง และความยืดหยุ่นที่มากขึ้น โดยเส้นใยสังเคราะห์ที่ได้รับความนิยม คือ เส้นใยคาร์บอน โดยส่วนมากเส้นใยชนิดนี้จะถูกนำมาใช้ในงานวัสดุที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักที่เบา เช่น ใช้เป็นโครงสร้างของรถแข่ง เส้นใยพอลิโพรไพลีน (Polypropylene) เป็นเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ ส่วนมากมักจะนำมาทำเป็นเครื่องใช้ภายในบ้าน เช่น ตะกร้า ช้อน เป็นต้น ส่วนเส้นใยที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัย คือ เส้นใยพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) และ เส้นใยแก้ว (Glass fibres) ซึ่งเส้นใยแก้ว (Glass fibres) สามารถผลิตได้หลายชนิด เส้นใยแก้วกลุ่มซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชนิดที่ได้รับความนิยมนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงมากที่สุด เส้นใยชนิดนี้มักเป็นแบบอสัณฐาน เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะเป็นผลึกได้ แต่จะส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยแก้วลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้เส้นใยแก้วสามารถแบ่งตามชนิดได้ดังนี้

- เส้นใยแก้วชนิดซี (C glass) สามารถทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้สูง มีราคาแพงกว่าชนิดอื่น และมีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยแก้วชนิดอี
- เส้นใยแก้วชนิดอี (E glass) ให้ค่ากำลังดึงที่สูง สามารถใช้ในงานไฟฟ้าได้ นิยมในงานคอนกรีตผสมเส้นใยชนิดนี้ยังถูกใช้เป็นมาตรฐานในการผลิตเส้นใยแก้วชนิดอื่นๆ ด้วย
- เส้นใยแก้วชนิดเอส (S glass) องค์ประกอบคล้ายแก้ว มีความแข็งแรงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นใยแก้วชนิดอื่น เส้นใยแก้วชนิดเอสมักนิยมใช้ในงานพิเศษ เช่น อุตสาหกรรมการบิน หรือวัสดุที่ต้องการความแข็งแรงสูงอื่นๆ

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยแก้วชนิดต่างๆ ร้อยละโดยน้ำหนัก (ทวิชัย อมรศักดิ์ชัย, 2559)

ธาตุ	เส้นใยแก้วชนิด ซี	เส้นใยแก้วชนิด อี	เส้นใยแก้วชนิด เอส
SiO_2	65	65	55.2
Al_2O_3	4	25	14.8
Fe_2O_3	0.3	-	0.3
B_2O_3	5	-	7.3
CaO	14	-	18.7
MgO	3	10	3.3
Na_2O	8.5	-	0.3
K_2O	-	-	0.2
F_2	-	-	0.3

เส้นใยพอลิเอทิลีน (Polyethylene) พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

- พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density) โดยทั่วไปมักมีรูปแบบเป็นเม็ด ทึบแสง สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีน คือ มีความแข็งแรงสูง สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี ใช้งานที่อุณหภูมิ

สูงสุดไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส ทนต่อกรด ต่าง แต่ทนต่อไขมันได้น้อย ทนต่อเบนซีนไม่ได้ และสามารถคงรูปได้ดี ไม่มีรส และกลิ่น การนำพอลิเอทิลีนมาใช้งาน เช่น ใช้ผลิตของเล่น เครื่องใช้ภายในบ้าน เครื่องมือแพทย์ กล่อง เส้นเชือกสำหรับตกปลา เป็นต้น ค่าสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีดังต่อไปนี้ สมบัติการนำความร้อน 1.38 กิโลจูลต่อกิโลกรัมเซลเซียส ค่าความร้อนจำเพาะ 1.88 กิโลจูลต่อกิโลกรัมเซลเซียสค่าความหนาแน่นที่ 20 องศาเซลเซียส อยู่ที่ 0.94-0.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราการหดตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 2-4 โดยปกติจะเป็นพลาสติกที่ชอบน้ำ (บรรเลง ศรีนิล, 2547)

- พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density) สมบัติโดยทั่วไป คือ สามารถโค้งตัวได้มาก ทนต่อความร้อนสูงได้ อุณหภูมิใช้งานสูงสุดอยู่ที่ 85-95 องศาเซลเซียส ผิวไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น หรือรส การนำไปใช้งาน เช่น ดอกไม้เทียม เครื่องมือแพทย์ เป็นต้น ค่าสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีดังนี้ สมบัติการนำความร้อน 1.09 กิโลจูลต่อกิโลกรัมเซลเซียสค่าความร้อนจำเพาะ 2.09 กิโลจูลต่อกิโลกรัมเซลเซียส ความหนาแน่นที่ 20 องศาเซลเซียส คือ 0.92-0.94 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราการหดตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 1.5-3 (บรรเลง ศรีนิล, 2547)

จากข้อมูลข้างต้นทำให้สามารถทราบถึงสมบัติ และความสามารถเบื้องต้นของเส้นใยสังเคราะห์แต่ละชนิด ในการนำเส้นใยไม่ว่าจะเป็นชนิดใดก็ตาม มาใช้ในการทดลองนอกจากจะต้องทราบข้อมูลเบื้องต้นของเส้นใยแต่ละชนิดแล้ว การทราบสมบัติเชิงกลของเส้นใยที่นำมาใช้งานยังเป็นสิ่งจำเป็นอีกด้วย ตัวอย่างสมบัติเชิงกลของเส้นใยเสริมแรงเป็นดังตารางที่ 2.4 (ทั้งนี้คุณสมบัติเชิงกลที่แสดงเป็นเพียงค่าประมาณที่น่าจะมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานเท่านั้น)

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของเส้นใยชนิดต่างๆ (บรรเลง ศรีนิล, 2547)

สมบัติ	ชนิด			
	หน่วย	เส้นใยแก้ว (ชนิด E)	เส้นใยคาร์บอน (PAN based)	เส้นใยพอลิเอทิลีน (PE)
ความหนาแน่น	กรัม/ซม. ³	2.56	1.86	0.97
มอดุลัสของยัง	เมกะปาสคาล	76	380	113
ความแข็งแรง	เมกะปาสคาล	1.40-2.50	12	3.40
การยืดตัว	ร้อยละ	1.80-3.20	0.7	3.50
การดูดซึมน้ำ	ร้อยละ	0.17	น้อยมาก	น้อยมาก

2.4 การทดสอบกำลังของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์

คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีต หรือจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแข็งตัวแล้ว มีการทดสอบอยู่หลายรูปแบบ แต่การทดสอบที่มีความสำคัญที่สุดของคอนกรีต หรือจีโอพอลิเมอร์ที่แข็งตัวแล้ว คือ ค่ากำลัง (Strength) นอกจากนี้การผสมก้อนตัวอย่างยังต้องทำการหาค่าที่เป็นส่วนประกอบสำคัญอีกมาก การทดสอบตัวอย่างจากจีโอพอลิเมอร์เป็นดังนี้

2.4.1 การทดสอบปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม

การทดสอบหาความชื้นเหลือปกติ (Normal Consistency) วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้ คือ การหาปริมาณน้ำที่มีความเหมาะสม และระยะการก่อตัวของวัสดุผสม ในทางทฤษฎีที่ระยะจมของเข็มเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เป็นปริมาณน้ำที่มีความเหมาะสมที่สุด ในการผสมตัวอย่าง แต่ในความเป็นจริง การทำให้ผลการทดลองเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เลยนั้นไม่สามารถทำได้จึงทำการทดลองให้ได้ค่าน้อยกว่า 10 มิลลิเมตร และมากกว่า 10 มิลลิเมตร จากนั้นให้นำค่าทั้งหมดมาวาดกราฟเปลี่ยนแทน โดยใช้ความสัมพันธ์ของระยะจมของเข็ม (แกนนอน หน่วยเป็นมิลลิเมตร) และร้อยละของน้ำที่ใช้ผสม (แกนตั้ง หน่วยเป็นร้อยละ)

2.4.2 การทดสอบสมบัติของเส้นใย

- การทดสอบความหนาแน่นของเส้นใย (Fiber Density Test) ทำได้โดยชั่งน้ำหนักกระบอกตวงขนาด 1,000 มิลลิลิตร ใส่ น้ำ ให้ถึงปริมาตร 800 มิลลิลิตร (กำหนดเป็น A) จากนั้นนำเส้นใยใส่เข้าไปจนระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นถึง 900 มิลลิลิตร นำกระบอกตวงมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (กำหนดเป็น B) และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นตามสมการที่ 2.4

$$\text{ความหนาแน่น (กรัม/ซม.}^3\text{)} = A/B \quad (2.4)$$

- การดูดซึมน้ำของเส้นใย ทำได้โดยชั่งเส้นใยที่ต้องการหาการดูดซึมน้ำให้ได้ อย่างต่ำ 100 กรัม (กำหนดเป็น A) นำเส้นใยดังกล่าวไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำขึ้นจากน้ำ และเอากะดาษซับให้หมด นำเส้นใยไปตากที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก (กำหนดเป็น B) ค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.5

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)} = \frac{(B-A)}{A} \times 100 \quad (2.5)$$

2.4.3 การทดสอบสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

- 1) การทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ กำลังอัดเป็นสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุรับแรง เนื่องจากการออกแบบวัสดุรับแรงส่วนมากมักจะออกแบบให้วัสดุรับเฉพาะแรงอัดเพียงอย่างเดียว ถึงแม้ว่าคอนกรีตจะรับแรงดึงได้บ้างก็มักจะไม่นำมาคิด ส่วนที่ต้องรับแรงดึงมักจะใช้เหล็กเสริมรับแรงส่วนนี้แทนวัสดุ ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จึงทำเพื่อ

ทดสอบหาค่าความต้านทานแรงอัดของชิ้นงานตัวอย่าง โดยการหล่อแบบตัวอย่างได้ทั้งรูปทรงกระบอก และรูปทรงลูกบาศก์ขนาดต่างๆ เช่น $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร เป็นต้น กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับภูมิภาคส่วนผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของน้ำต่อตะกอนประปา อายุการบ่ม และอื่นๆ เนื่องจากในปัจจุบันวิวัฒนาการของคอนกรีตได้พัฒนาไปเป็นอย่างมาก จึงทำให้สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงถึง 700 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือสูงกว่านั้น (สำเร็จ รักซ้อน และปริญา จินดาประเสริฐ, 2555) ส่วนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาจะมีกำลังอัดอยู่ที่ประมาณ 50 – 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นอย่างต่ำ และอาจให้กำลังอัดสูงสุดได้ถึง 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังอัด (f_c) หมายถึง กำลังที่ได้จากการทดสอบก้อนตัวอย่างมาตรฐานรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ที่อายุการบ่มคอนกรีต 28 วัน หรือก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ เซนติเมตร และ $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร (ขนาดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในการทดสอบ) ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้การหล่อแบบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร

ในการออกแบบอาคารโครงสร้างเหล็ก (Steel Structure; คสล.) กำหนดให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญ ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงขีดความสามารถของชิ้นงาน และจากคณงานก่อสร้างด้วยว่าจะมีความสามารถสร้างคอนกรีตคุณภาพที่ทำการออกแบบไว้ได้หรือไม่ โดยปกติผู้ออกแบบจะกำหนดค่ากำลังอัดของคอนกรีตสำหรับก่อสร้างจริงให้สูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้งานจริง โดยปกติวิศวกรจะกำหนดค่ากำลังให้มากกว่าการใช้งานอยู่ที่ประมาณร้อยละ 15-20 เพื่อความปลอดภัยเนื่องจากกำลังของคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างย่อมต่ำกว่ากำลังของคอนกรีตตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ส่วนค่ามาตรฐานกำลังของก้อนจีโอพอลิเมอร์ในปัจจุบันยังไม่ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานเอาไว้

- 2) การทดสอบหาค่ากำลังดัด (Flexural Strength and Ultimate Test) คานคอนกรีตเสริมแรงจะมีพฤติกรรมอยู่ 2 แบบ คือ พฤติกรรมของคานรับแรงดัด และพฤติกรรมของคานรับแรงเฉือน ซึ่งการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จำเป็นต้องรู้ถึงพฤติกรรมในแบบต่างๆ ของคาน และรูปแบบการเสียรูปของคาน เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถให้รายละเอียดในการเสริมแรงแบบต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง และตรงตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของคานคอนกรีต (สำเร็จ รักซ้อน และปริญา จินดาประเสริฐ, 2555)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาค่ากำลังดัด และกำลังประลัย มีวัตถุประสงค์ในการหาค่ากำลังดัด และกำลังประลัยเพื่อทดสอบหาค่ากำลังดัด หรือพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมแรงที่มีแรงกระทำที่ระยะ 1 ส่วน 3 ของความยาวของคานคอนกรีตเสริมแรง การทดสอบกำลังดัดที่นิยมใช้ในงานถนนคอนกรีตนั้น ทำได้โดยการทดสอบคานคอนกรีตล้วน ขนาดพื้นที่หน้าตัด 15×15 เซนติเมตร กำลังดัดที่ได้จากการทดลองนี้ หมายถึง ค่ากำลังสูงสุด หรือบางครั้งเรียกว่า โมดูลัสแตกหัก (Modulus of Rupture) โดยทั่วไปค่ากำลังดัดของคอนกรีตล้วน จะมีค่าประมาณร้อยละ 15 ของกำลังอัด ทั้งนี้การทดสอบกำลังดัดจะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM (C 78-00, C 192) เครื่องมือในการทดสอบกำลัง

ตัดประกอบไปด้วย เครื่องทดสอบแรงอัดมาตรฐานแบบแกนเดี่ยว เครื่องวัดระยะการแอ่นตัว และเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger)

- 3) ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง สามารถใช้บอกได้ว่าวัสดุนั้นมีปริมาณสารอยู่เท่าไรต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และสามารถทำให้ทราบได้ว่าก้อนตัวอย่างที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ทดสอบนั้นมีความแตกต่างของปริมาตรมวลสารมากน้อยเท่าไร

2.5 วารสารปริทรรศน์

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม และการเกษตร มาใช้ผลิตเป็นวัสดุเชื่อมผสมเพื่อทดแทนการผลิตปูนซีเมนต์ เช่น จีโอพอลิเมอร์ ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุ หรือของเสีย เช่น ดินตะกอนประปา ถ้ำลอย หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) เหมาะสม แต่วัสดุที่มีความน่าสนใจ และเป็นสิ่งแปลกใหม่ในประเทศไทย คือ ดินตะกอนประปา เนื่องจากเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปา จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาของ Wailjarean, et al. (2014) ได้นำดินตะกอนประปามาทำการสังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ แต่ผลปรากฏว่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาถึงเหตุผล โดยใช้เทคนิค NMR ในการทดสอบ พบว่าโครงสร้างของดินตะกอนประปายังไม่เหมาะที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Gopolymerization) ผู้วิจัยจึงนำตะกอนประปาไปเผาที่อุณหภูมิ 600 800 และ 900 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง พบว่า ที่อุณหภูมิการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส สามารถทำให้เกิดกำลังอัดได้สูงที่สุด โดยค่ากำลังอัดเกิดขึ้นสูงกว่าการนำดินตะกอนประปาที่ยังไม่ผ่านการเผามาสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์มากถึงร้อยละ 34 ที่อายุการบ่มตัวอย่าง 28 วัน

เมื่อทราบถึงวิธีการกระตุ้นดินตะกอนประปาให้มีความเหมาะสมในการสังเคราะห์ให้เกิดเป็นจีโอพอลิเมอร์แล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์อีก คือ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ทำให้เกิดปฏิกิริยา และอุณหภูมิการบ่ม จากงานวิจัยของ ขวัญเรือน จันทวงษ์ (2557) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการบ่ม และความเข้มข้นของด่างต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.20 0.25 และ 0.30 จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง (32 องศาเซลเซียส) และที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ด้วยเตาอบไฟฟ้าเป็นเวลา 1 2 และ 3 วัน ผลการศึกษา พบว่า จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 ที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง มีค่าการพัฒนา กำลังอัดสูงสุดทุกอายุการบ่ม ส่วนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส จะพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่ม 1 วัน และจากนั้นค่ากำลังอัดจะมีการพัฒนาอย่างช้าๆ

ในงานวิจัยที่ผ่านมาทั้ง 2 งานวิจัย ผู้วิจัยได้ใช้ดินตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาในประเทศไทยเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวไม่ได้มีการปรับอัตราส่วน ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) ให้มีความเหมาะสม โดยตะกอนประปาที่ใช้ส่วนมากจะมีอัตราส่วน ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) อยู่ที่ 1.6-

1.79 จากที่กล่าวมานี้ จึงได้มีข้อสันนิษฐานว่าความจริงแล้วอัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินัมออกไซด์ที่ส่งผลให้เกิดค่ากำลังอัดได้สูงที่สุดนั้นควรจะเป็นเท่าไร งานวิจัยของ ซาลินี อ่อนแสง (2555) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินัมออกไซด์ และชนิดของต่างที่มีผลต่อการพัฒนาำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ โดยผู้วิจัยได้ทดลองปรับอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินัมออกไซด์ ให้ได้ที่ 1.78-8.00 โดยใช้เก้าแถบในการปรับอัตราส่วน และใช้เตาต้มขึ้น 2 ชนิด ในการทำปฏิกิริยา คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผลการศึกษา พบว่า ที่อายุการบ่ม 60 วัน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นต่าง จะทำให้เกิดค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 18.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อัตราส่วน K_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.3 แต่ถ้าใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยา พบว่า ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 170 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อัตราส่วน Na_2O/SiO_2 เท่ากับ 0.25 (เทวนันท์ ทองหยาด, 2543) จากผลการทดลอง สารกระตุ้นปฏิกิริยาที่เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเหมาะสมในการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปามากกว่า สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินัมออกไซด์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา คือ 2 ถ้าอัตราส่วนมากกว่า 2 จะทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปามีค่าต่ำลงนั่นเอง

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยเกี่ยวกับจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาได้มีผู้ศึกษามาแล้วบางส่วน แต่ยังไม่มีการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาเสริมแรงด้วยเส้นใย สาเหตุที่ควรทำการศึกษจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปามีสมบัติในการรับกำลังอัดได้ดีพอสมควร แต่วัสดุมีความเปราะสูงจึงไม่สามารถรับกำลังดึง หรือกำลังดัดได้ ดังนั้นก่อนที่จะมีการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาเสริมเส้นใยนั้น ควรจะเริ่มด้วยการหาแนวทางของงานวิจัยจากงานคอนกรีต หรือวัสดุเชื่อมผสานเสริมเส้นใยชนิดอื่นๆ ก่อน สิ่งแรกที่ต้องพิจารณา คือ เราควรจะใช้เส้นใยชนิดใด ความยาวเท่าไร อัตราส่วนผสมแค่ไหน และควรมีการทดสอบสมบัติของเส้นใยอย่างไร

ส่วนมากในปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเส้นใยมากมาย โดยส่วนมากจะใช้เส้นใยสังเคราะห์ในการทดลอง จากการศึกษา พบว่า เส้นใยธรรมชาติจากพืช เมื่อระยะเวลาผ่านไปเส้นใยจะเกิดการเสื่อมสลายไปตามธรรมชาติ เนื่องจากเส้นใยเป็นสารจำพวกสารอินทรีย์ทำให้เกิดช่องว่างในโครงสร้าง และไม่สามารถรับกำลังทางวิศวกรรมได้เหมือนกับช่วงระยะเวลาแรก ซึ่งต่างจากเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้เวลานานกว่าจะเกิดการเสื่อมสลายไปจากเดิม (Korniejenko et al., 2016)

ความยาวเส้นใย ถ้าเส้นใยมีความยาวมากเกินไป จะเกิดการพันกันระหว่างผสม ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งก้อนตัวอย่าง งานวิจัยของ อมรรรัตน์ สุริยวิจิตรเศรษฐี (2559) และงานวิจัยของ จเร ชุมอักษร (2550) ใช้เส้นใยขนาดความยาวต่างๆ ในการทดลองผลปรากฏว่าที่ความยาวเส้นใยประมาณ 2.5 เซนติเมตร สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัดได้มากที่สุด

อัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยกับวัสดุที่จะนำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุเชื่อมผสาน ในงานวิจัยส่วนมากจะใช้อัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 1 2 3 และ 4 โดยน้ำหนัก หรือปริมาตร (ขึ้นอยู่กับผู้ศึกษา และ

ความเหมาะสมของเส้นใยแต่ละชนิด) แต่ส่วนมากจะใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก เนื่องจากสะดวกต่อการคำนวณ จากงานวิจัยของ อมรรรัตน์ สุริยวิจิตรเศรษฐี (2559) ได้ทำการศึกษาโดยการนำเส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบเส้นผสมในคอนกรีต ซึ่งพลาสติกที่ใช้เป็นพลาสติกชนิด Polyethylene Terephthalate (PET) และ High Density Polyethylene (HDPE) อัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสม คือ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทวีชัย สำราญวานิช และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรม และวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว และเส้นใยสังเคราะห์อะคริลิก พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม คือ ที่ร้อยละ 0.2 โดยปริมาณ สามารถทำให้คานตัวอย่างรับแรงดัดได้มากที่สุด Tanyildizi et al., (2016) ศึกษาสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อวิเคราะห์ความทนต่ออุณหภูมิสูงของจีโอพอลิเมอร์ที่มีเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) จีโอพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้ถูกสังเคราะห์มาจากเถ้าลอยชนิดเอฟ (F-Class) ปริมาณเส้นใยที่นำมาเป็นส่วนผสมร่วมกับจีโอพอลิเมอร์ คือ ร้อยละ 0 1 และ 2 โดยมวลของเถ้าลอย ผลการศึกษา พบว่า ปริมาตรส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด คือ ร้อยละ 2 โดยมวล จากงานวิจัยที่กล่าวมา และงานอื่นๆ ส่วนมากอัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการพัฒนากำลังดัด ถ้าอัตราส่วนมากเกินไปอาจจะเกิดปัญหาในการผสม และการยึดติดกับวัสดุเชื่อมผสานส่งผลให้ค่ากำลังดัดลดลง

การทดสอบสมบัติของเส้นใยในผลงานวิจัยเกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเส้นใยนั้น จะทำการทดสอบสมบัติของเส้นใยเบื้องต้น เพื่อจะได้ทราบถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้งานร่วมกับวัสดุเชื่อมผสานสมบัติที่จำเป็นต้องทราบ ก็คือ ความหนาแน่นของเส้นใย เพื่อจะได้ใช้ในการหาปริมาณในการผสมของเส้นใยต่อวัสดุเชื่อมผสาน ถ้าเส้นใยมีค่าการดูดซึมน้ำมาก ในการทดลองมีความจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปในส่วนผสม เพื่อความเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา ค่าแรงดึงของเส้นใยที่สัมผัสกับความชื้นต่างกันในการทดลอง ค่านี้จะทำให้ทราบความแข็งแรง และความคงทนต่อต่างของเส้นใย ถ้าเส้นใยไม่สามารถทนต่อความชื้นของต่างได้ การผสมเส้นใยชนิดนั้นลงไปในส่วนผสมอาจจะไม่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังดัดก็เป็นได้ สมบัติสุดท้ายที่ควรทราบ คือ ค่าความชอบน้ำวัสดุเชื่อมผสาน ส่วนมากจะเป็นวัสดุที่ชอบน้ำ (มีขั้ว) วัสดุที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะจับกับวัสดุที่มีความชอบน้ำเหมือนกันถ้าเส้นใยที่ใช้ในการผสมรวมไม่มีสมบัติความมีขั้ว การยึดติดของเส้นใยต่อวัสดุเชื่อมผสานก็จะลดลง (ทวีชัย สำราญวานิช และคณะ, 2550; จเร ชุมอักษร, 2550) และจะส่งผลโดยตรงต่อกำลังของชิ้นงาน

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ดินตะกอนประปา (Water Treatment Residue; WTR)

ดินตะกอนประปาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากกระบวนการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวง สำนักงานการประปาบางเขน กรุงเทพมหานคร ทำการเก็บดินตะกอนประปาหลังจากถึงตกตะกอนถึงสุดท้าย โดยผ่านกระบวนการรีดตะกอน (Filter Press) ในวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2560

3.1.2 เส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย

เส้นใยที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเส้นใยสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ

- 1) เส้นใยพอลิเอทิลีน (Polyethylene Fiber) เป็นเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ใช้ในกิจกรรมกีฬาตกปลา มาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25-0.5 มิลลิเมตร เป็นเส้นใยที่ผลิตมาจากบริษัท Sunline Super ปริมาณเส้นใยทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองประมาณ 15 กิโลกรัม
- 2) เส้นใยแก้ว ประเภทอี (E-glass fibers) จากบริษัท Intransos ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25-0.5 มิลลิเมตร ปริมาณเส้นใยแก้วทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยจำนวน 1 ม้วน (20 กิโลกรัม)

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้ในการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ความบริสุทธิ์ของสารร้อยละ 99.9 จากบริษัท สเปกตรัม ไชเอนติฟิค จำกัด

3.1.4 น้ำปราศจากประจุ (DI)

น้ำปราศจากประจุ (Deionized water) ใช้ในการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สำหรับเตรียมการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ จากห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3.2 เครื่องมือในการทดลอง

- 1) เครื่องบดลดขนาดอนุภาค (Los Angeles Abrasion Machine)
- 2) เตาเผาอุณหภูมิสูง (High Temperature Furnace)
- 3) เครื่องมือทดสอบความแข็งของซีเมนต์เพส (Vicat Apparatus)
- 4) เครื่องชั่งละเอียด (Analytical Balance)
- 5) เครื่องกวนผสมตัวอย่าง (Mortar Mixer)
- 6) แบบหล่อซีเมนต์พลาสติก (Mold) ขนาด 5×5×5 และ 30×7.5×1 เซนติเมตร
- 7) โต๊ะเขย่ามาตรฐานสำหรับไล่ฟองอากาศ (Vibrating Table)
- 8) เกรียงปาดปูน (Trowel)

- 9) อุปกรณ์สำหรับทดสอบกำลังอัด และกำลังดัด (Compression Machine)
- 10) เครื่องเก็บข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ (Data Logger) รุ่น TDS 500
- 11) เครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ใช้สำหรับเตรียมสารละลาย และภาชนะต่างๆ สำหรับการสังเคราะห์ จีโอพอลิเมอร์

3.3 การเตรียมวัสดุ และสารเคมี

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ และสารเคมีในงานวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็นขั้นตอนการเตรียมตะกอนประปา การเตรียมสารเคมี ปริมาณน้ำที่มีความเหมาะสม การเตรียมเส้นใย และการสังเคราะห์ จีโอพอลิเมอร์ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 การเตรียมดินตะกอนประปา

นำตะกอนหลังจากกระบวนการอัดตะกอน (Filter Press) ตามรูปที่ 3.1 ซึ่งค่าความชื้นของตะกอนประปาชุดนี้ คือ ร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำดินตะกอนประปาไปตากแห้งที่สภาวะอากาศปกติ (อุณหภูมิห้อง) ตามรูปที่ 3.2 ก และนำดินตะกอนประปาไปบดต่อที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อดินตะกอนประปาแห้งสนิทแล้ว จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.2 ข จากนั้นนำดินตะกอนประปาไปบดลดขนาดด้วยเครื่องบดลดขนาดอนุภาค (Los Angeles Abrasion Machine) ใช้ลูกเหล็กแบบคละขนาดจำนวน 25 กิโลกรัม บดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ดินตะกอนประปาที่ผ่านการบดแล้วมีร้อยละการผ่านตะแกรงเบอร์ 325 อยู่ที่ 18.27 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 430-00 ซึ่งต้องมีอัตราการ ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.1 ดินตะกอนประปาที่เก็บจากโรงประปาบางเขน



(ก) หลังตากแห้งที่สภาวะปกติ

(ข) หลังอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3.2 ดินตะกอนประปา

จากนั้นนำตะกอนประปาที่ผ่านการบดแล้วไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ลักษณะของดินตะกอนประปาก่อนเผา และหลังเผาเป็นไปดังรูปที่ 3.3 ก และ ข ตามลำดับ เนื่องจากจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ ชาลินี อ่อนแสง (2555) และขวัญเรือน จันทวงศ์ (2557) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดินตะกอนประปา พบว่า ดินตะกอนประปาเมื่อเผาที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถสร้างกำลังรับแรงอัดได้มากที่สุด เนื่องจากการเผาเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ที่ปะปนอยู่ในดินตะกอนประปาออกไป นอกจากนี้ยังเป็นการปรับโครงสร้างของ อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) จากโครงสร้างแบบ 6 โคออร์ดิเนชัน (6-Coordination) ให้กลายเป็นโครงสร้างแบบ 4 หรือ 5 โคออร์ดิเนชัน (4, 5-Coordination) จากการศึกษาการเผาที่อุณหภูมิสูงมากกว่นีค่า กำลังอัดจะมีความแตกต่างกับการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพียงเล็กน้อยเท่านั้น (อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส เป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน) เพื่อทำให้เกิดการเผาที่ทั่วถึง การเผาแต่ละรอบจะใส่ตะกอนประปาเป็นชั้นบางๆ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวในการรับความร้อนได้มาก และทั่วถึง



(ก) ตะกอนประปาก่อนเผา

(ข) ตะกอนประปาหลังเผาที่ 800 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3.3 ตะกอนประปาหลังบด

ดินตะกอนประปาที่ผ่านการเผา และไม่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะนำมาทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี โดยไปทำการทดสอบหาองค์ประกอบของธาตุ โดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) โดยได้ทำการส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์หาที่สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

3.3.2 การเตรียมสารเคมี

ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความบริสุทธิ์อยู่ที่ร้อยละ 99.9 เป็นสารเคมีคุณภาพระดับปฏิบัติการในอุตสาหกรรม (Commercial Grade) สำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยปริมาณสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองจะสามารถคำนวณได้จากผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุ โดยนำค่าอัตราซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินัมออกไซด์ที่ได้มาใช้ในการคำนวณ เนื่องจากสารเคมีที่ใช้อยู่ในรูปของแข็งจึงต้องใช้น้ำปราศจากประจุ (Deionized Water) ทำละลายให้ได้ความเข้มข้นตามที่

3.4 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผสม

การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับจีโอพอลิเมอร์จะทำการประยุกต์ตามขั้นตอนการหาความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 187-11 จะทำการทดสอบหาปริมาณน้ำที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ที่ 0.2 0.25 และ 0.3 โดยค่าปริมาณน้ำที่มีความเหมาะสมจะอยู่ที่ระยะจมของเข็มเครื่องมือทดสอบเท่ากับ 10 มิลลิเมตร วิธีการทดสอบ คือ ชั่งดินตะกอนประมาณ 200 กรัม นำน้ำมาเทใส่บริเวณกึ่งกลาง ค่าแรกของการทดสอบควรใช้น้ำประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของตะกอน ปั่นให้เป็นก้อน เมื่อเป็นก้อนแล้วให้นำมาโยนสลัดมือซ้ายขวา จากนั้นนำก้อนดินตะกอนประปาผสมน้ำยัดใส่ภาชนะทดสอบปาดหน้าให้เรียบพร้อมกับตั้งเข็มของเครื่องทดสอบ (ไวแคต) ให้เป็นศูนย์ เมื่อตั้งค่าเครื่องมือพร้อมแล้วให้ปล่อยเข็มของเครื่องมือ และจับเวลา 30 วินาที เมื่อครบเวลาแล้วให้อ่านค่าระยะจมของเข็มไวแคตจากเครื่องมือทดสอบ เป็นอันเสร็จขั้นตอนการทดสอบ ทำซ้ำตามขั้นตอนเดิมให้ได้ค่าคอมระหว่างระยะจมของเข็มเครื่องมือทดสอบที่ 10 มิลลิเมตร

3.5 การเตรียมเส้นใย

ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยชนิดต่างๆ ที่มีความสำคัญในการนำมาใช้ในงานคอนกรีตเสริมเส้นใย หรือวัสดุเชื่อมผสานชนิดอื่น คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว การเสีรูป และการยึดติดกันของเส้นใยกับวัสดุเชื่อมผสาน ซึ่งลักษณะเหล่านี้จะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน ขนาดของเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ คือ มีความยาวเส้นใย 2.5 และ 5 เซนติเมตร อัตราส่วนผสมระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย คือ ร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของดินตะกอนประปาจากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.5 พบว่า ความยาวของเส้นใยที่เหมาะสมในการผสมกับวัสดุเชื่อมผสาน คือ ประมาณ 2.5 เซนติเมตร ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกใช้ความยาวเส้นใยที่ 2.5 และ 5 เซนติเมตร ในการผสมกับจีโอพอลิเมอร์เพื่อทำการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมลักษณะของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วเป็นไปดังรูปที่ 3.4 ก และ ข



ก) เส้นใยพอลิเอทิลีน

ข) เส้นใยแก้ว

รูปที่ 3.4 เส้นใย

ส่วนการทดสอบสมบัติพื้นฐานของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วจะทำการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) ค่าการดูดซึมน้ำของเส้นใย จะทำการทดสอบ โดยนำเส้นใยไปแช่น้ำหนัก บันทึกราค่าน้ำหนักของเส้นใย หลังจากนั้นนำเส้นใยไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำกระดาษซับน้ำออกให้หมดที่สุด วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วให้อามาชั่งน้ำหนักเพื่อหาผลต่างระหว่างน้ำหนักก่อน และหลังการแช่น้ำ ทั้งนี้เพื่อความแน่นอนของผลการทดลองที่ได้จะทำการทดลองซ้ำตามวิธีเดิมอีกครั้ง
- 2) การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเส้นใย จะทำการทดสอบ 2 สภาวะ คือ สภาวะที่เส้นใยไม่ผ่านการแช่ต่างเข้มข้น และที่สภาวะเส้นใยผ่านการแช่ต่างเข้มข้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สาเหตุที่ทำการแช่ในต่างเข้มข้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันนั้นจะต้องใช้ต่างเข้มข้นสูงในการทำปฏิกิริยานั้นเอง การทดสอบแรงดึงของเส้นใยดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D 38-22
- 3) การยืดตัวของเส้นใย จะทำการทดสอบที่ 2 สภาวะเช่นเดียวกันกับการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเส้นใย มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ASTM D 38-22
- 4) การหาค่าความหนาแน่น จะใช้หลักการแทนที่น้ำของอาร์คิมิดีสในการทดลอง เนื่องจากเส้นใยมีน้ำหนักที่เบาเมื่อเทียบกับเหล็ก หรือหิน จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับงานคอนกรีตเสริมเส้นใย (ศราวิน ปัญจะผลินกุล, 2548) จะใช้กระบอกตวงที่มีเส้นรอบวงน้อยมาใช้ในการทดลอง เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

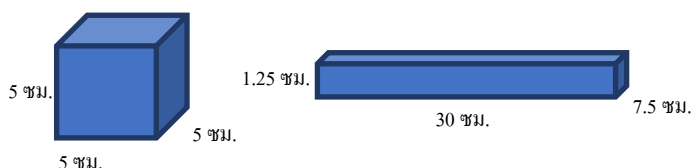
3.6 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์

นำดินตะกอนประปาที่ผ่านการเผาแล้วตามหัวข้อ 3.3.1 มาผสมกับสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในปริมาณที่ได้คำนวณไว้ หลังจากนั้นให้ทำการผสมวัตถุดิบลงในหม้อผสม เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ กวนผสมด้วยเครื่องกวนผสมที่ความเร็วรอบต่ำเป็นเวลา 1-3 นาที (เพื่อให้สารละลายผสมกับดินตะกอนประปา) และกวนต่อที่ความเร็วรอบสูงเป็นเวลา 9-13 นาที (ระหว่าง 3 นาทีแรกของการกวนผสมให้ทำการใส่เส้นใยลงไปทำการกวนผสม) เป็นอันเสร็จกระบวนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยค่าอัตราส่วนผสมต่างๆ เป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา

ปริมาณ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	ปริมาณดิน ตะกอน ประปา (กรัม)	ปริมาณ NaOH (กรัม)	ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	ปริมาณเส้น ใย (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความยาวเส้น ใย (เซนติเมตร)
0.2	200	28.56	47.7	1 2 และ 3	2.5 และ 5
0.25	200	35.5	46.2	1 2 และ 3	2.5 และ 5
0.3	200	42.56	45.5	1 2 และ 3	2.5 และ 5

จากนั้นทำการหล่อแบบ 2 ขนาด เพื่อทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม คือ ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังอัด และขนาด $7.5 \times 30 \times 1.25$ เซนติเมตร เพื่อใช้สำหรับการทดสอบกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาเสริมเส้นใย โดยมีมิติต่างๆ ของก้อนตัวอย่างเป็นดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขนาดแบบหล่อจีโอพอลิเมอร์

เมื่อตัวอย่างเริ่มก่อตัวแล้ว ให้ทำการห่อตัวอย่างด้วยพลาสติก และทำการบ่มก้อนจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิขณะทดลอง) เป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน สาเหตุที่ทำการบ่มถึงแค่ 28 วัน เนื่องจากระยะเวลาในการบ่มที่ 28 วัน ทำให้ค่ากำลังเชิงกลของก้อนคอนกรีตเพิ่มขึ้นค่อนข้างคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ปิติ สุขคนธสุขกุล, 2556) และทำการบ่มด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อทราบผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการบ่มในอุณหภูมิที่แตกต่างกันแล้วนั้น ในการทดลองผสมเส้นใยทั้งสองชนิด จะเลือกวิธีการบ่มที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดในการทดลองต่อไป

3.7 การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา

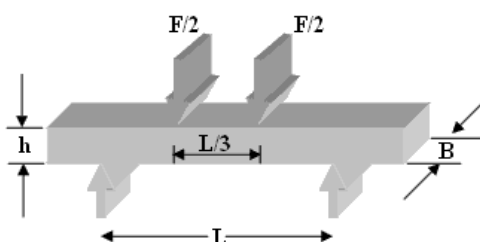
การทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาเสริมเส้นใย จะแบ่งการทดสอบก่อนตัวอย่างออกเป็น 6 การทดสอบ คือ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าความหนาแน่น ค่าองค์ประกอบของธาตุ และโครงสร้างระดับจุลภาคของก๊อนตัวอย่างรายละเอียดของการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมเป็นดังนี้

3.7.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

นำตัวอย่างที่มี และไม่มีการผสมเส้นใยขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ที่มีอายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน มาทำการทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression Machine) ตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109 M-99 จากนั้นนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) อยู่ในช่วงไม่เกิน 28 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2555) เพื่อให้ได้ค่าผลการทดลองที่ถูกต้องมากที่สุด

3.7.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

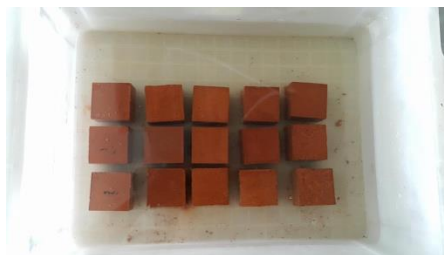
นำตัวอย่าง ขนาด $7.5 \times 30 \times 1.25$ เซนติเมตร ที่มีอายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน มาทำการทดสอบด้วยวิธีทดสอบการรับกำลังดัดแบบ 4 จุด ตามมาตรฐาน ASTM C 78-00 โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี รูปการรับแรงดัดเป็นดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การทดสอบการรับแรงดัดแบบ 4 จุด (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ, 2558)

3.7.3 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ

จะใช้ก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ที่มีอายุการบ่มมากกว่า 28 วัน โดยนำก้อนตัวอย่างไปอบด้วยลมเย็นจนก้อนตัวอย่างแห้งแล้วไปชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นนำก้อนตัวอย่างที่แห้งสนิทไปแช่ในน้ำประปาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วให้นำก้อนตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (ASTM C 642-13) รูปการณ้แช่ตัวอย่างเป็นไปดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ

3.7.4 การทดสอบค่าความหนาแน่นสุทธygของก้อนตัวอย่าง

การหาค่าความหนาแน่นจะใช้ก้อนตัวอย่างชุดเดียวกับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัด ซึ่งการทดสอบจะทำการวัดขนาดก้อนตัวอย่างทั้งความกว้าง ความยาว และความสูง รวมถึงน้ำหนักของก้อนตัวอย่าง ค่าความหนาแน่นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1

$$\text{ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)} = \frac{\text{น้ำหนักก้อนตัวอย่าง (กก.)}}{\text{ปริมาตรของก้อนตัวอย่าง (ลบ.ม.)}} \quad (3.1)$$

3.7.5 การทดสอบหาองค์ประกอบของธาตุ (XRF)

นำตัวอย่างดินตะกอนประปาที่ผ่าน และไม่ผ่านการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาทำการศึกษา โดยจะใช้ปริมาณตัวอย่าง 10 กรัม สำหรับการทดสอบ จากนั้นจะนำตัวอย่างส่งทดสอบ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องมือจากบริษัท Oxford รุ่น INCA-xart

3.7.6 การทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค (SEM)

นำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 มาทำการทดสอบ โดยจะนำตัวอย่างที่มี และไม่มีการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว มาทำการศึกษาลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้น และระยะของช่องว่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับเส้นใย การเตรียมตัวอย่างจะต้องทำการลดขนาดตัวอย่างให้มีขนาด ไม่เกิน $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างไปทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนทำการทดสอบด้วยเครื่องมือจากบริษัท JEOL รุ่น JSM-6610 LV

บทที่ 4 อภิปรายผล

เมื่อเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ และทราบถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดแล้ว บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบสมบัติของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ผลการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมทางด้านกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาเสริมแรงด้วยเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ซึ่งผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นไปดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาสมบัติทางเคมี และทางวิศวกรรมของวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยเป็นดังต่อไปนี้

4.1.1 การศึกษาสมบัติทางเคมีของดินตะกอนประปา

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

องค์ประกอบธาตุ	ดินตะกอนประปาเผา (ร้อยละ)	ฝุ่นกระจก (ร้อยละ)	เถ้าถ่านหินบิทูมินัส (ร้อยละ)
SiO ₂	53.3	69	60.1
Al ₂ O ₃	31.8	1.23	28.70
Fe ₂ O ₃	8.83	0.15	4.70
K ₂ O	2.28	0.13	1.25
TiO ₂	0.8	-	1.56
CaO	0.61	10.1	1.45
P ₂ O ₅	0.48	-	0.52
Na ₂ O	0.21	14.8	0.38
MgO	0.95	4.14	0.47
SO ₃	0.53	0.45	2.10
MnO	0.21	-	-

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาที่ผ่าน และไม่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และฝุ่นกระจกด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาที่ผ่าน และไม่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีอัตราส่วนของ SiO₂/Al₂O₃ ใกล้เคียงกัน คือ 1.79 และ 1.68 ตามลำดับ ส่วนการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นกระจก พบว่า มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นองค์ประกอบหลัก เช่นเดียวกับดินตะกอนประปา แต่ฝุ่นกระจกจะมีอัตราส่วนของ SiO₂/Al₂O₃ สูงกว่าดินตะกอนประปาที่ผ่าน และไม่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วน SiO₂/Al₂O₃ ของฝุ่นกระจกเท่ากับ 56.1 ส่วนองค์ประกอบธาตุของเถ้าถ่านหินบิทูมินัสมีค่าอัตราส่วน SiO₂/Al₂O₃ เท่ากับ 2.13 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมต่อการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์จึงไม่จำเป็นต้องปรับอัตราส่วน SiO₂/Al₂O₃ ก่อนการสังเคราะห์

4.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางวิศวกรรมของเส้นใย

ในการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของเส้นใยจะทำการศึกษาที่ 2 สภาวะ คือ ที่สภาวะปกติ และ สภาวะที่เส้นใยผ่านการแช่ในสารละลายต่างเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สาเหตุที่ต้องศึกษาสมบัติของเส้นใยที่ผ่านการแช่ในสารละลายต่างเข้มข้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้เส้นใยพอลิเอทิลีน และ เส้นใยแก้วจะถูกนำมาผสมในจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันจะใช้ต่างเข้มข้นสูงในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องมีการทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเส้นใยที่ผ่านการแช่ในสารละลายต่างเข้มข้นด้วย โดยทำการศึกษาสมบัติทางด้านการดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงดึง การยืดตัว และความหนาแน่นของเส้นใยทั้ง 2 ชนิด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางวิศวกรรมของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว

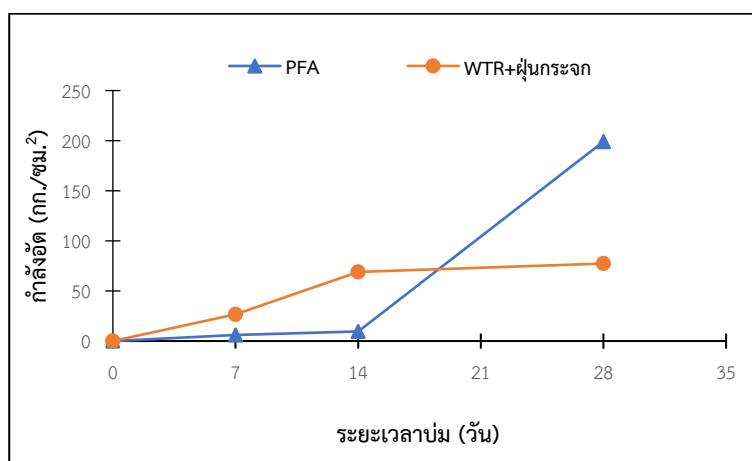
ตัวอย่าง	สภาวะ	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	กำลังรับแรง ดึงสูงสุด (นิวตัน/มม. ²)	การยืดตัว (ร้อยละ)	ความหนาแน่น (กรัม/ซม. ³)
เส้นใยพอลิเอทิลีน	แช่ต่าง	0.04	707	11.00	0.96
	ไม่แช่ต่าง		698	11.20	
เส้นใยแก้ว	แช่ต่าง	0.12	563	4.29	2.14
	ไม่แช่ต่าง		581	4.98	

จากตารางที่ 4.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางวิศวกรรมของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วมีค่าน้อยมาก โดยมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของเส้นใย ส่วนการศึกษากำลังดึงสูงสุดของเส้นใย พบว่า เส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วที่ไม่ผ่านการแช่สารละลายต่างเข้มข้นจะสามารถรับกำลังดึงได้สูงเท่ากับ 698 และ 581 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และมีค่าการยืดตัวเท่ากับร้อยละ 11.2 และ 4.98 ตามลำดับ เมื่อนำเส้นใยทั้ง 2 ชนิดไปทำการแช่ในสารละลายต่างเข้มข้น พบว่า มีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 707 และ 563 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และค่าการยืดตัวเท่ากับร้อยละ 11 และ 4.29 ตามลำดับ ซึ่งค่ากำลังดึงสูงสุด และร้อยละการยืดตัวมีค่าไม่แตกต่างกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการแช่ต่าง แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายต่างไม่ได้มีผลต่อกำลังรับแรงดึง และค่าการยืดตัวของของเส้นใย

4.2 ผลของปริมาณ และความยาวของเส้นใยต่อการพัฒนากำลังอัดของ จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา และเถ้านหินบิทุมินัส

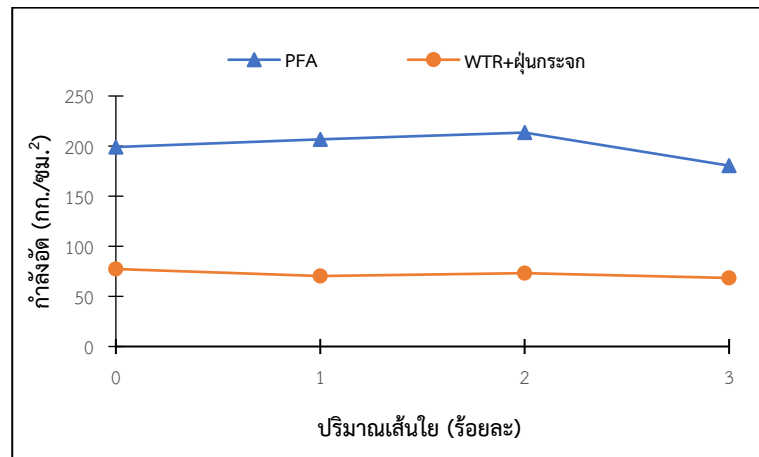
ผลของปริมาณ และความยาวของเส้นใยต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จาก ตะกอนประปา และเถ้านหินบิทุมินัสเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วเป็นดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปา และเถ้าน หินบิทุมินัส



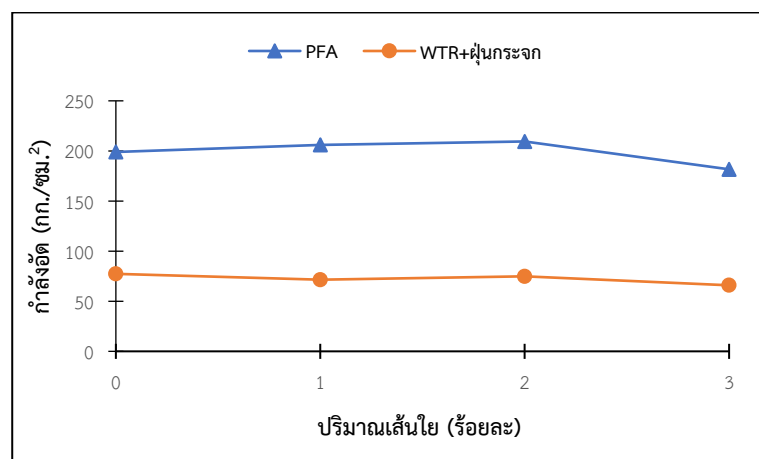
รูปที่ 4.1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก และเถ้านหินบิทุมินัสที่อายุ การบ่มต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก และเถ้านหินบิทุมินัสที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน พบว่า ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอน ประปาผสมฝุ่นกระจกจะมีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วง 7-14 วันแรก หลังจากนั้นค่ากำลังอัด จะเริ่มคงที่เมื่อผ่านอายุการบ่มไปแล้ว 28 วัน โดยมีพฤติกรรมคล้ายกับการบ่มคอนกรีต ซึ่งต่างจาก จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอย ค่ากำลังอัดจะเกิดการพัฒนายาวช้าๆในช่วงอายุการบ่ม 0-14 วัน หลังจากนั้นค่ากำลังอัดจะเกิดการพัฒนายาวรวดเร็ว เนื่องจากในเถ้านหินบิทุมินัสมีปริมาณ แคลเซียมออกไซด์อยู่สูง ในกระบวนการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จึงเกิดปฏิกิริยาขึ้น 2 ปฏิกิริยาควบคู่ กัน คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ค่ากำลังอัดของ จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินบิทุมินัสในช่วง 7-14 วัน ของอายุการบ่มมีค่ากำลังอัดเกิดขึ้นต่ำ การจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก โดยค่ากำลังอัดสูงสุดของจีโอพอลิเมอร์ จากตะกอนผสมฝุ่นกระจก และเถ้านหินบิทุมินัส มีค่าเท่ากับ 77.34 และ 199.05 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร



รูปที่ 4.2 อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา และเถ้านหินบิทุมินัสที่อายุการบ่ม 28 วัน

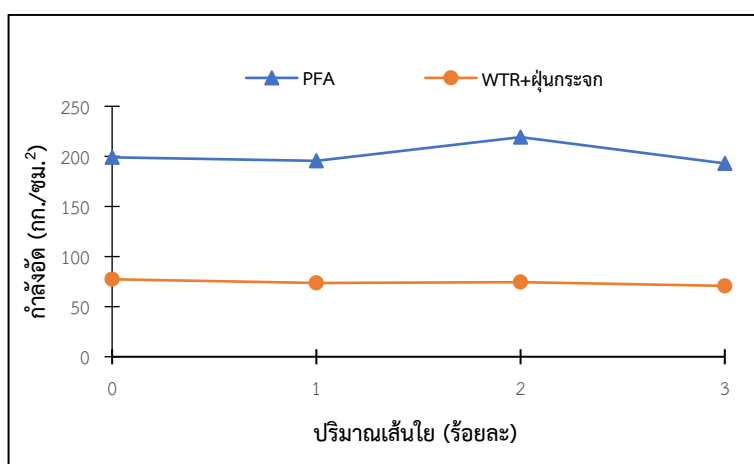
จากรูปที่ 4.2 เมื่อทำการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกที่มีความยาวเส้นใยพอลิเอทิลีน 2.5 เซนติเมตร อัตราส่วนผสมเส้นใย คือ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 70.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร เป็นร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ลงในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา พบว่า ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกในอัตราส่วนผสมที่ไม่มากเกินไป จะไม่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้น ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับการผสมหิน และ ทราयरรวมคอนกรีตในอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ส่วนการใช้เถ้านหินบิทุมินัสเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ พบว่า เมื่อผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นในทุกอัตราส่วนผสมมีความคล้ายคลึงกับการใช้ตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเป็นวัสดุหลักในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินบิทุมินัสเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร ในทุกอัตราส่วนผสมมีค่ากำลังอัดประมาณ 212 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.3 อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาว 5 เซนติเมตร ในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา และเถ้านหินบิทุมินัส ที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4.3 เมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยพอลิเอทิลีนจาก 2.5 เป็น 5 เซนติเมตร ในการเสริมกำลังสำหรับจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจก และเถ้าลอย พบว่า พฤติกรรมที่เกิดขึ้นมีความคล้ายคลึงกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนความยาว 2.5 ในรูปที่ 4.2 โดยที่ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา และเถ้าถ่านหินบิทูมินัส เสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนความยาว 5 เซนติเมตร ในทุกอัตราส่วนผสมมีค่าประมาณ 70 และ 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

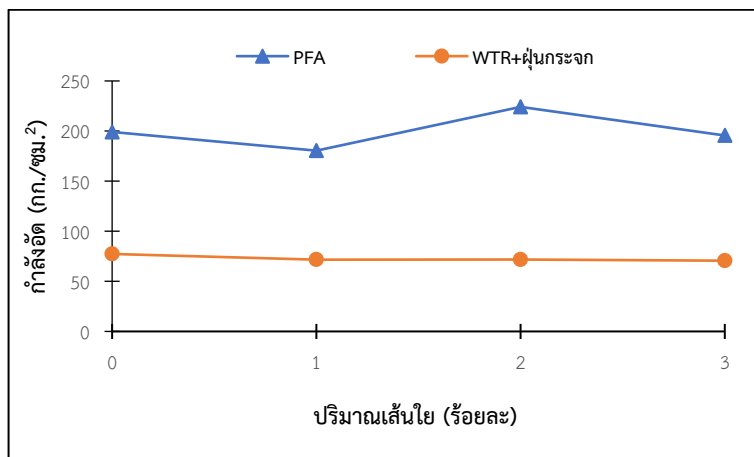
จากผลการทดสอบค่ากำลังอัดในรูปที่ 4.2 และ 4.3 สามารถสรุปได้ว่า ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นจากการใช้เถ้าถ่านหินบิทูมินัส มาสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์จะมีค่าสูงกว่าการใช้ตะกอนประปามาสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์อยู่ประมาณ 2 เท่า และเมื่อทำการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาวเส้นใย 2.5 และ 5 เซนติเมตร ร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังอัดที่ได้จะมีค่าไม่แตกต่างกับจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน



รูปที่ 4.4 อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา และ
เถ้าถ่านหินบิทูมินัส ที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4.4 เมื่อทำการผสมเส้นใยแก้วที่มีความยาวเส้นใยเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจก ในอัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาวเส้นใยเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจก ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าเท่ากับ 73.72 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วเป็นร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างจากการผสมเส้นใยแก้วในอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจก ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 74.52 และ 70.74 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนการใช้เถ้าถ่านหินบิทูมินัสเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์แทนตะกอนประปาสมฝุ่นกระจก พบว่า ที่อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสมเส้นใยแก้ว ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 195.59 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วเป็นร้อยละ 2 พบว่า เป็นอัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดเกิดขึ้นสูงที่สุด เท่ากับ 219.22 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่า

กำลังอัดจะลดลงเมื่อเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส ค่ากำลังอัดที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 193 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สาเหตุที่อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดเกิดขึ้นต่ำที่สุด เนื่องจาก ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีปริมาณเส้นใยแก้วมากเกินไป จึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใย และจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสขึ้นมากส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง



รูปที่ 4.5 อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วที่ความยาว 5 เซนติเมตร ในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา และเถาถ่านหินปิทูมินัส ที่อายุการบ่ม 28 วัน

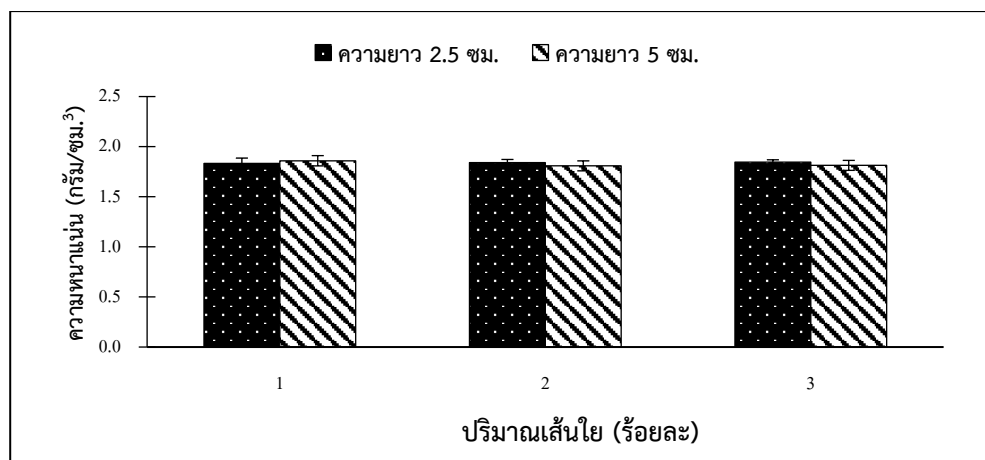
จากรูปที่ 4.5 เมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยแก้วจาก 2.5 เป็น 5 เซนติเมตร และทำการผสมลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสวมฝุ่นกระจก พบว่า ค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยแก้วที่มีความยาวเส้นใยเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสวมฝุ่นกระจก ในทุกอัตราส่วนผสมเส้นใยแก้ว ส่วนการใช้เถาถ่านหินปิทูมินัสเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ พบว่ามีแนวโน้มของการพัฒนาค่ากำลังอัดคล้ายคลึงกับการผสมเส้นใยโพลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส ที่ความยาวเส้นใยโพลิเอทิลีน 5 เซนติเมตร ในรูปที่ 4.3

ดังนั้นจากผลการทดสอบค่ากำลังอัดที่ได้สามารถสรุปได้ว่าการผสมเส้นใย โพลิเอทิลีน หรือเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาหรือเถาถ่านหินปิทูมินัส ในทุกอัตราส่วนผสมของเส้นใยไม่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดที่เกิดขึ้น แสดงว่าเส้นใยทั้ง 2 ชนิดสามารถใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในการสังเคราะห์เป็นจีโอ พอลิเมอร์ได้

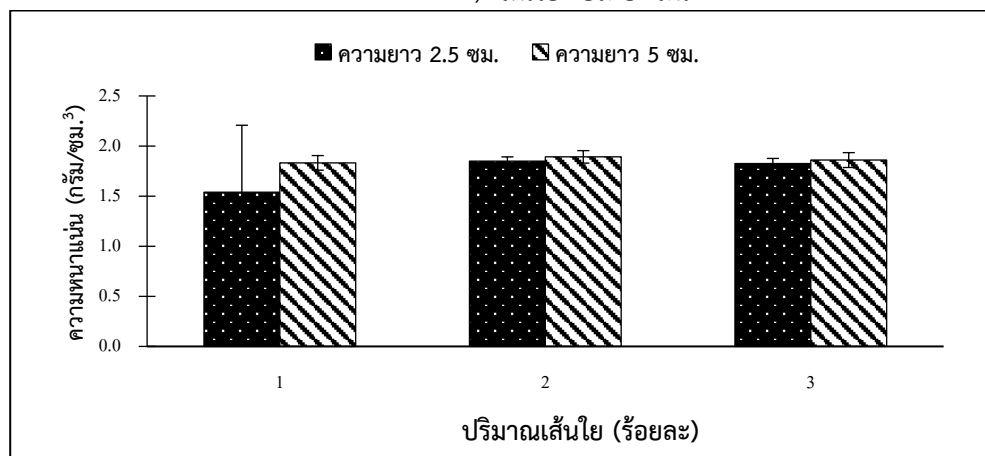
4.3 ผลของปริมาณ และความยาวของเส้นใยต่อสมบัติทางด้านความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา และเถา ถ่านหินปิทูมินัส

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของปริมาณ และความยาวเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วที่มี ผลต่อความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา และเถา ถ่านหินปิทูมินัสที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนผสมของเส้นใยทั้ง 2 ชนิด เท่ากับร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ความยาว เส้นใย 2.5 และ 5 เซนติเมตร ผลการทดสอบที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

4.3.1 ปริมาณ และความยาวของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติด้านความ หนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา



ก) เส้นใยพอลิเอทิลีน



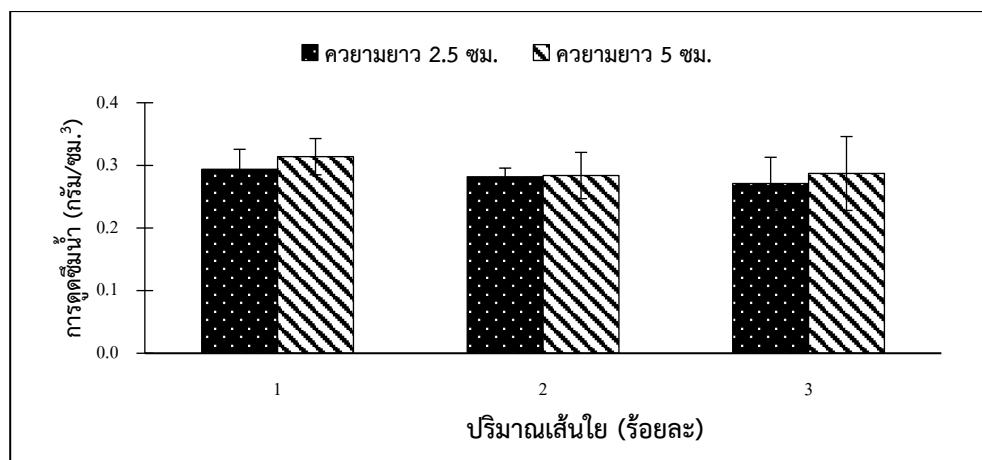
ข) เส้นใยแก้ว

รูปที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมเส้นใย พอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ที่อยู่การบ่ม 28 วัน

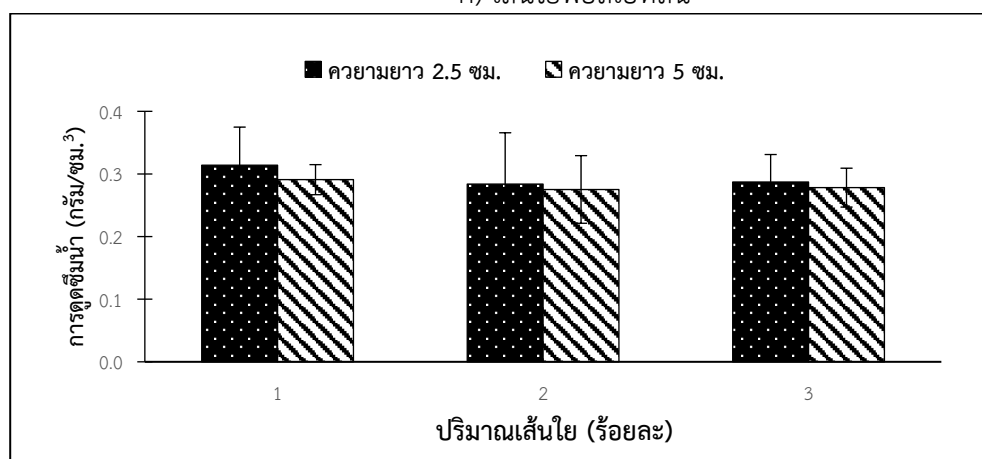
จากรูปที่ 4.6 ก) แสดงผลของปริมาณเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอน ประปาต่อสมบัติทางด้านความหนาแน่น พบว่า ที่ความยาวเส้นใยพอลิเอทิลีน 2.5 เซนติเมตร อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.83 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงไปในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาเป็น ร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับอัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มความยาวของเส้นใยพอลิเอทิลีนจาก 2.5 เป็น 5 เซนติเมตร พบว่า ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาในทุกอัตราส่วนผสมของเส้นใยพอลิเอทิลีนมีค่า ใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร เนื่องจากอัตราส่วนเส้นใยพอลิเอ ทิลีนที่ใช้ในการผสมในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ดังนั้นค่าความ หนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาที่ได้จาก 2 ช่วงความยาวเส้นใยจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อทำการผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาตามรูปที่ 4.6 ข) พบว่า ค่าความหนาแน่นยังคงมีค่าใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากดิน ตะกอนประปาทุกอัตราส่วนผสมเส้นใย และทุกช่วงความยาวเส้นใย เช่นกัน ดังนั้นการผสมเส้นใยพอลิ เอทิลีน หรือเส้นใยแก้ว ทุกช่วงความยาวเส้นใย และทุกอัตราส่วนผสมลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอน ประปาจะไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา

4.3.2 ปริมาณ และความยาวของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา



ก) เส้นใยพอลิเอทิลีน



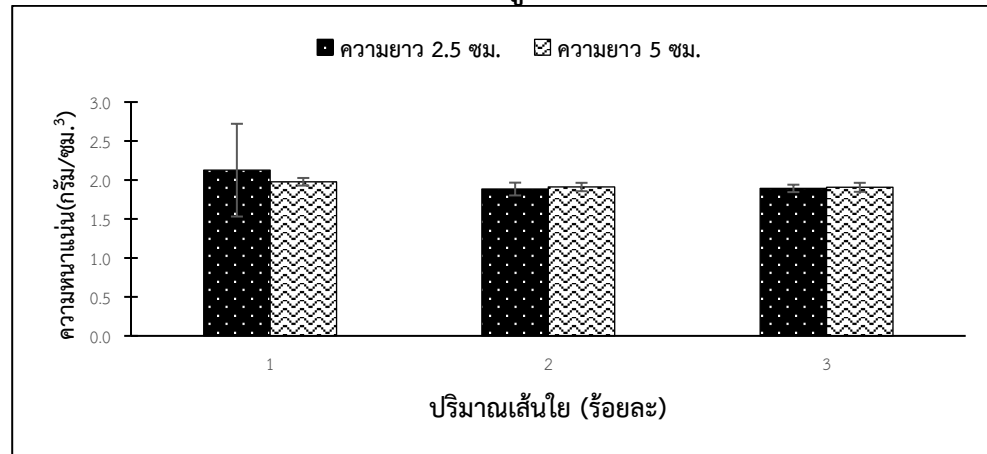
ข) เส้นใยแก้ว

รูปที่ 4.7 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ที่อยู่การบ่ม 28 วัน

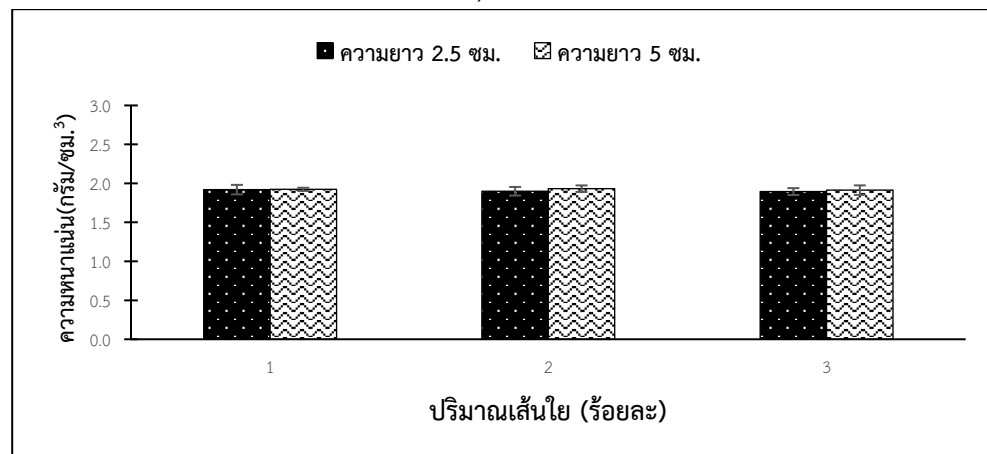
จากรูปที่ 4.7 ก) พบว่า เมื่อผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ความยาว 2.5 เซนติเมตร อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ลงในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปามีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.29 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนเป็นร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าใกล้เคียงกับจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาที่อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเท่ากับ 0.28 และ 0.29 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยพอลิเอทิลีนไปเป็น 5 เซนติเมตร พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา ที่ความยาว 2.5 เซนติเมตร ทุกอัตราส่วนผสม และเมื่อทำการผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาดังรูปที่ 4.7 ข) พบว่า ที่ความยาวเส้นใยแก้วทั้ง 2.5 และ 5 เซนติเมตร ทุกอัตราส่วนผสมมีค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกันกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา เนื่องจากค่าการดูดซึมน้ำของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วจากการทดลองในตารางที่ 4.2 มีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่าการดูดซึมน้ำที่เกิดขึ้นจึงขึ้นอยู่กับจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาเพียงอย่าง

เดียว ค่าการดูดซึมน้ำที่ได้ในการผสมเส้นใยทั้ง 2 ชนิด ในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา จึงมีค่าใกล้เคียงกันนั่นเอง

4.3.3 ปริมาณ และความยาวของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติด้านความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินบิทูมินัส



ก) เส้นใยพอลิเอทิลีน



ข) เส้นใยแก้ว

รูปที่ 4.8 ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินบิทูมินัสผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ที่อยู่การบ่ม 28 วัน

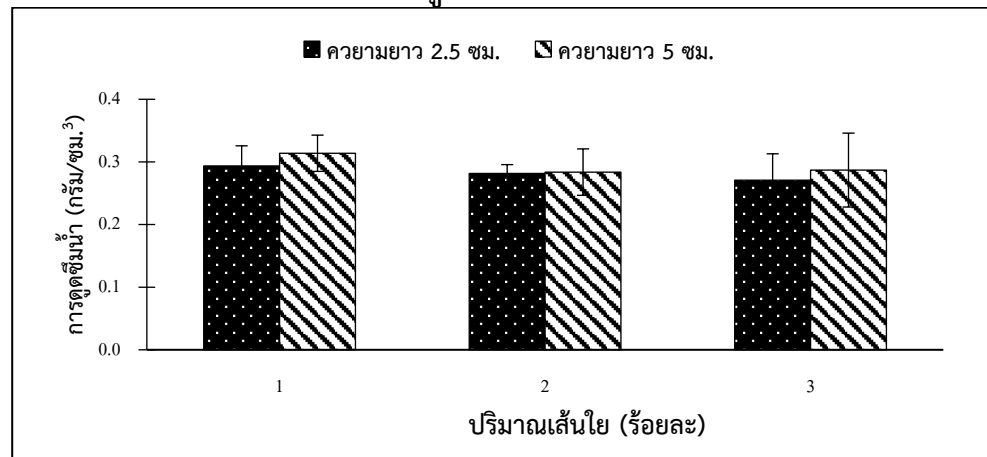
จากรูปที่ 4.8 ก) ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินบิทูมินัสผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน พบว่า ที่อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใยเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินบิทูมินัส มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนเป็นร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความหนาแน่นมีค่าต่ำลงเล็กน้อย เนื่องจากการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในจีโอพอลิเมอร์ จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยพอลิเอทิลีนจาก 2.5 เป็น 5 เซนติเมตร พบว่า ค่าความหนาแน่นที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับการผสมเส้นใย

พอลิเอทิลีนที่มีความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร ในทุกอัตราส่วนผสม ลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส

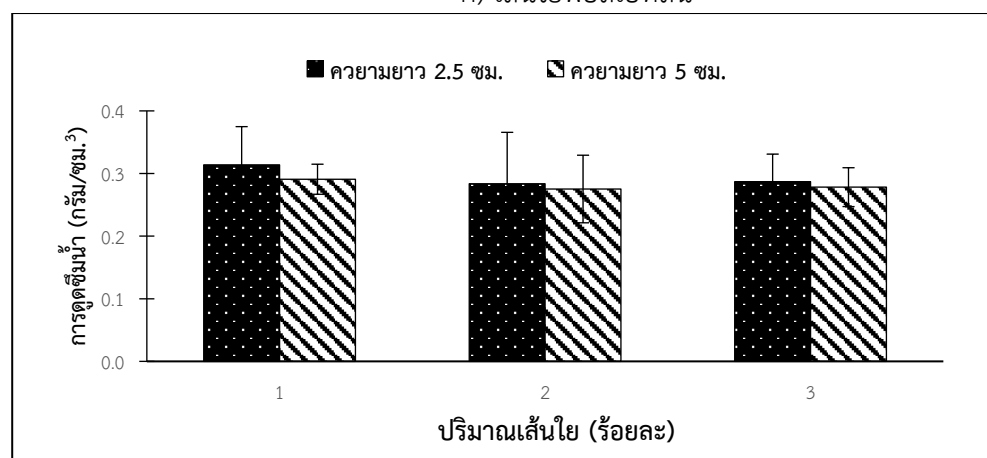
ส่วนการผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสตามรูปที่ 4.8 ข) พบว่า ผลของค่าความหนาแน่นมีค่าประมาณ 1.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในทุกอัตราส่วนผสมเส้นใยแก้ว และทุกช่วงความยาวของเส้นใย ซึ่งมีผลการทดลองคล้ายคลึงกับผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาในรูปที่ 4.6

จากผลการทดสอบค่าความหนาแน่นทำให้ทราบได้ว่า การใช้ตะกอนประปา หรือ เถาถ่านหินปิทูมินัส มาสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ และเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีน หรือเส้นใยแก้ว ที่มีความยาวเส้นใยที่แตกต่างกัน ในอัตราส่วนผสมเส้นใยต่างๆ จะไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ มากนัก

4.3.4 ปริมาณ และความยาวของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส



ก) เส้นใยพอลิเอทิลีน



ข) เส้นใยแก้ว

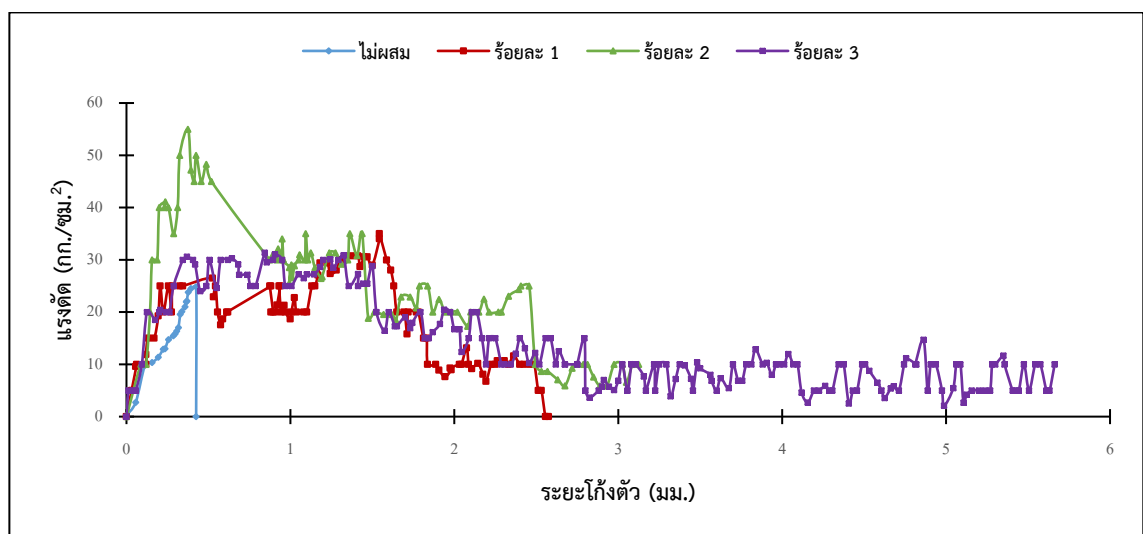
รูปที่ 4.9 ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ที่อยู่การบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 4.9 ก) พบว่า เมื่อผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ลงในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินปิโตรมิเนสส์ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนเป็นร้อยละ 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าใกล้เคียงกับจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิโตรมิเนสส์ที่อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเท่ากับ 0.28 และ 0.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยพอลิเอทิลีนไปเป็น 5 เซนติเมตร พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์เถาถ่านหินปิโตรมิเนสส์ที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ทุกอัตราส่วนผสม ส่วนการผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาตามรูปที่ 4.9 ข) พบว่า ที่ความยาวเส้นใยแก้วทั้ง 2.5 และ 5 เซนติเมตร ทุกอัตราส่วนผสมเส้นใยมีค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกันกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิโตรมิเนสส์ เนื่องจากค่าการดูดซึมน้ำของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วจากการทดลองในตารางที่ 4.2 มีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่าการดูดซึมน้ำที่เกิดขึ้นจึงขึ้นอยู่กับจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาเพียงอย่างเดียว ค่าการดูดซึมน้ำที่ได้ในการผสมเส้นใยทั้ง 2 ชนิด ในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิโตรมิเนสส์จึงมีค่าใกล้เคียงกัน

4.4 ผลการทดสอบกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกและเถาถ่านหินปิโตรมิเนสส์

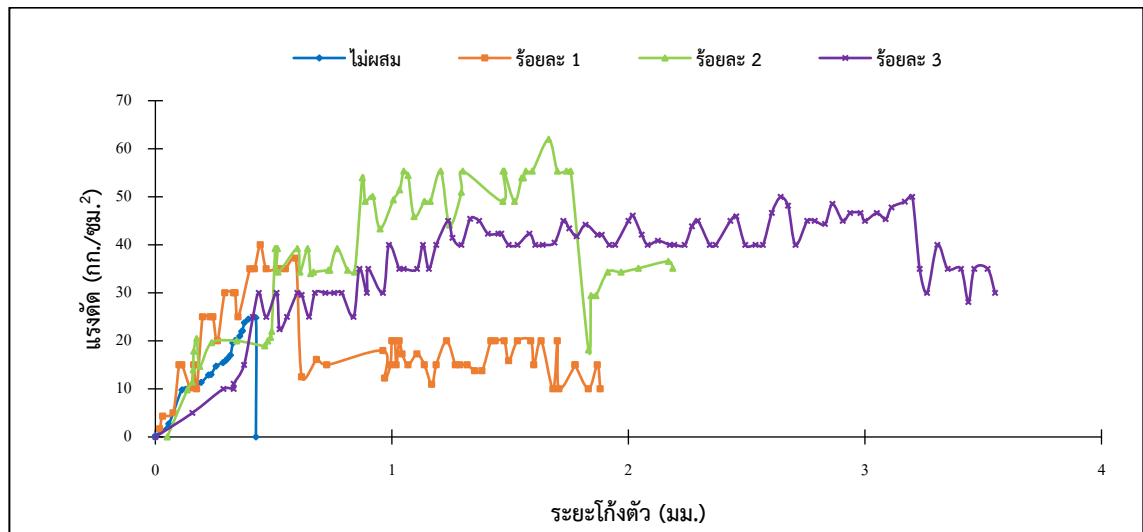
ในการทดสอบจะกำลังดัดจะใช้ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ขนาด $7.5 \times 30 \times 1.25$ เซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยเป็นดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติการรับกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา



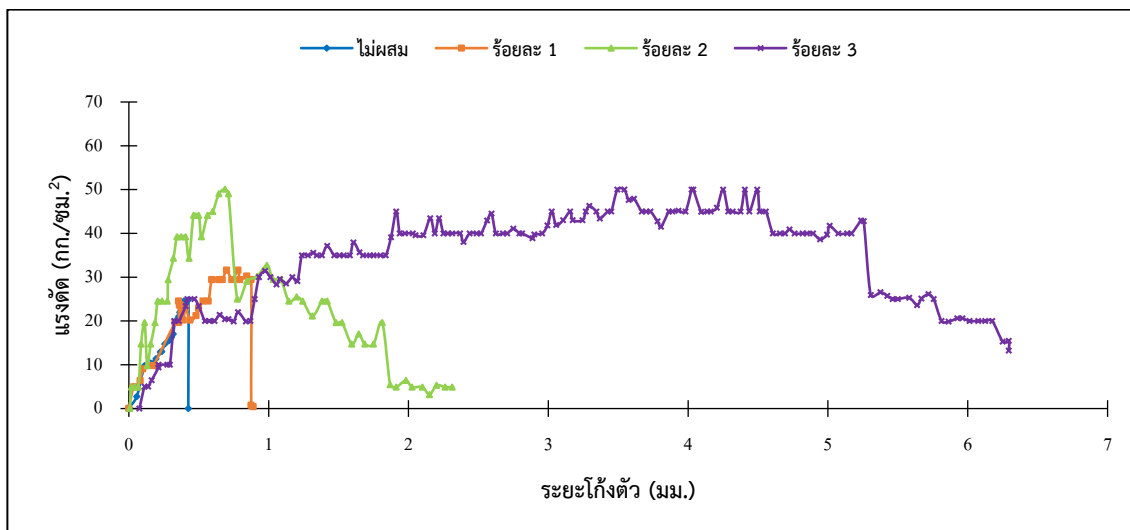
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างพฤติกรรมผลการรับกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.10 แสดงพฤติกรรมการรับกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่น กระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีน ที่ความยาวเส้นใยพอลิเอทิลีน 2.5 เซนติเมตร พบว่า พฤติกรรมการรับกำลังดัดของ จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีค่าการวิบัติครั้งแรกที่ระยะการโก่งตัว 0.29 มิลลิเมตร โดยมีค่ากำลังดัดเท่ากับ 24.62 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หลังจากเกิดการวิบัติครั้งแรกแล้วเส้นใยพอลิเอทิลีนจะทำหน้าที่รับกำลังดัดแทนจีโอพอลิเมอร์จนมีระยะการโก่งตัวเท่ากับ 1.54 มิลลิเมตร จะเกิดค่ากำลังดัดสูงขึ้นเท่ากับ 34.98 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อค่ากำลังดัดสูงสุดเกิดขึ้นแล้ววัสดุจะเกิดการวิบัติอย่างฉับพลันทันที เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยพอลิเอทิลีนเป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่า จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกสามารถรับกำลังดัดได้สูงขึ้น โดยมีค่ากำลังดัดสูงสุดเกิดขึ้นเท่ากับ 54.98 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะการโก่งตัว 0.38 มิลลิเมตร จากนั้นเส้นใยพอลิเอทิลีนยังคงทำหน้าที่รับกำลังดัดได้อย่างต่อเนื่องจนถึงช่วงระยะการโก่งตัวที่ 2.61 มิลลิเมตร จีโอพอลิเมอร์ถึงจะเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน ส่วนการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังดัดสูงสุดที่มีค่าเท่ากับ 30.58 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะการโก่งตัว 0.36 มิลลิเมตร สาเหตุที่ค่ากำลังดัดของอัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาสมฝุ่นกระจก มีค่ากำลังดัดสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกที่ไม่มีการผสมเส้นใย เพราะสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์สามารถรับกำลังดัดได้น้อย แต่เมื่อทำการผสมเส้นใยลงไปเส้นใยจะทำหน้าที่รับกำลังดัดแทนจีโอพอลิเมอร์ เมื่อวัสดุเกิดการวิบัติครั้งแรกแล้ว ส่งผลให้ค่ากำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกมีค่าสูงขึ้นเมื่อทำการผสมเส้นใย ส่วนค่ากำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังดัดสูงกว่าค่ากำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพราะที่อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีปริมาณเส้นใยอยู่ในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกน้อยเกินไป เมื่อวัสดุเกิดการวิบัติครั้งแรกแล้วเส้นใยจะรับกำลังดัดต่อได้น้อยส่งผลให้ค่ากำลังดัดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนจากร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังดัดกลับมีค่าลดลง เนื่องจาก 2 สาเหตุ สาเหตุที่ 1 เนื่องจากที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเป็นปริมาณอัตราส่วนผสมเส้นใยที่มากเกินไป ส่งผลให้วัสดุเชื่อมประสาน (จีโอพอลิเมอร์) มีปริมาณลดลง และสาเหตุที่ 2 คือ เนื่องด้วยสมบัติของเส้นใยพอลิเอทิลีนมีค่าความชอบน้ำต่ำ จึงส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยพอลิเอทิลีน และจีโอพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้ไม่ดีส่งผลให้ค่ากำลังดัดมีค่าลดลง



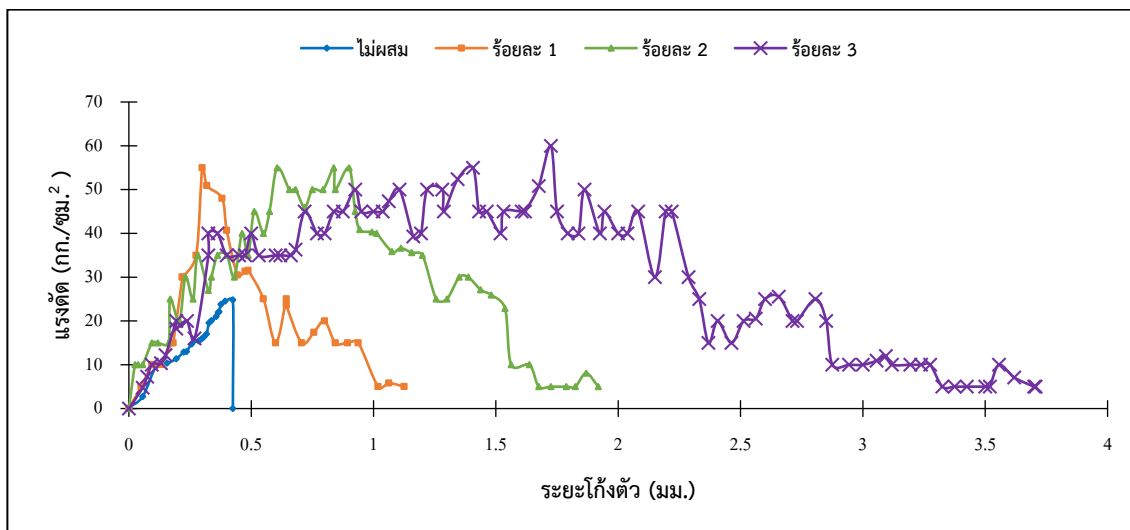
รูปที่ 4.11 ตัวอย่างกำลังตัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.11 เมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยพอลิเอทิลีนเป็น 5 เซนติเมตร ทุกอัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน พบว่า จุดที่เกิดการวิบัติครั้งแรกของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนอยู่ที่ระยะการโก่งตัวประมาณ 0.30 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกพบว่า ค่ากำลังตัดสูงสุดเท่ากับ 39.98 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะการโก่งตัว 0.44 มิลลิเมตร จากนั้นวัสดุจะเกิดการวิบัติอย่างฉับพลันหลังจากการเกิดกำลังตัดสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยที่ผสมต่ำจึงทำให้สามารถรับกำลังตัดได้น้อยจากนั้นได้ทำการเพิ่มอัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนเป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่า จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนสามารถรับกำลังตัดได้สูงสุดถึง 61.96 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะการโก่งตัว 1.66 มิลลิเมตร และถ้าเพิ่มอัตราส่วนผสมของเส้นใยพอลิเอทิลีนไปเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังตัดที่ได้มีแนวโน้มจะลดลง เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มากเกินไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 4.11 และเส้นใยพอลิเอทิลีนยังมีการจัดเรียงตัวตัวกันไม่ได้ดีเท่าที่ควร เนื่องจากเส้นใยพอลิเอทิลีนไม่สามารถคงรูปเป็นเส้นตรงได้ จึงส่งผลให้ค่ากำลังตัดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำลง



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างค่ากำลังตัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วที่มีความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

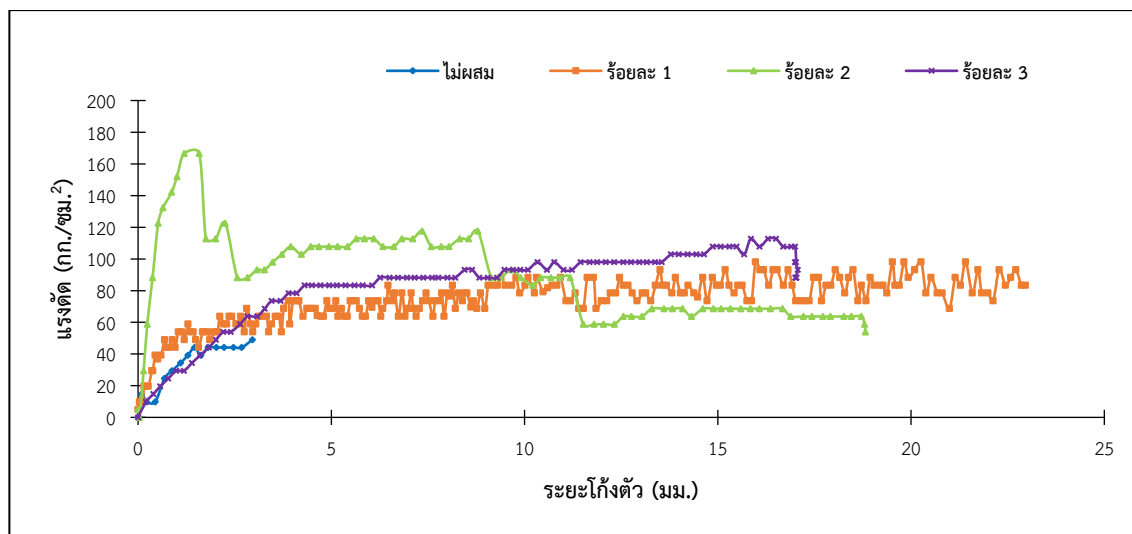
รูปที่ 4.12 แสดงพฤติกรรมการรับกำลังตัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วที่มีความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีรูปแบบพฤติกรรมเหมือนกับตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกที่ไม่มีการเสริมเส้นใย แต่ค่ากำลังตัดสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการผสมเส้นใยอยู่ 6.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนที่อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังตัดสูงสุดเท่ากับ 50.11 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เกิดที่ระยะการโก่งตัว 0.69 มิลลิเมตร และเมื่อตัวอย่างรับกำลังตัดสูงสุดแล้วค่ากำลังตัดจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงระยะการโก่งตัวที่ 1.83 มิลลิเมตร ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วจะเกิดการวิบัติอย่างถาวร จากนั้นถ้าทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วไปเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า มีค่ากำลังตัดสูงสุดเกิดขึ้นใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แต่ส่วนที่มีความแตกต่างกัน ก็คือ ที่อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อจีโอพอลิเมอร์รับกำลังตัดสูงสุดแล้ว เส้นใยแก้วที่ผสมลงไปจะยังสามารถทำหน้าที่รับกำลังตัดได้อย่างต่อเนื่องจนถึงระยะการโก่งตัวที่ 5.31 มิลลิเมตร ตัวอย่างถึงจะเกิดการวิบัติอย่างถาวร ดังนั้นจากผลการทดลองในรูปที่ 4.11 สามารถสรุปได้ว่า การผสมเส้นใยแก้วที่มีความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ลงไปในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก สามารถทำให้เกิดการรับแรงตัดหลังจากตัวอย่างเกิดการวิบัติไปแล้วได้ยาวนานมากที่สุด เนื่องจากเส้นใยแก้วสามารถคงรูปเป็นเส้นตรงได้ดี ดังนั้นที่อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จึงสามารถรับกำลังตัดได้สูงกว่าที่อัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งต่างจากการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างค่ากำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วที่ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

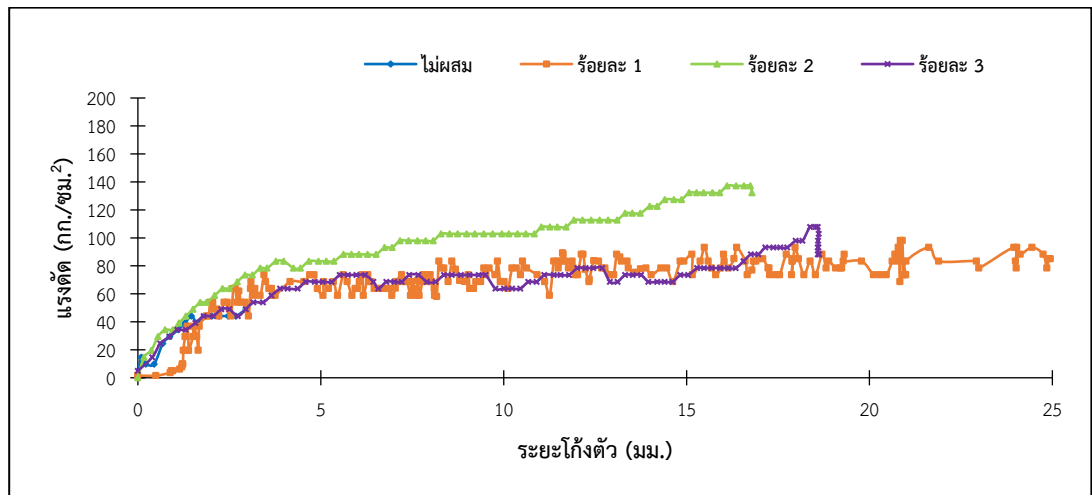
จากรูปที่ 4.13 เมื่อเพิ่มความยาวเส้นใยแก้วจาก 2.5 เป็น 5 เซนติเมตร ในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก พบว่า ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเมื่อตัวอย่างเกิดค่ากำลังดัดสูงสุดแล้ว ตัวอย่างจะเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าการโคงตัวอยู่ที่ประมาณ 0.88 มิลลิเมตร และถ้าเพิ่มอัตราส่วนผสมของเส้นใยแก้วเป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังดัดสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยแก้วที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แต่ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนักตัวอย่างยังสามารถรับกำลังดัดได้อย่างต่อเนื่องจนถึงระยะการโคงตัวเท่ากับ 1.56 มิลลิเมตร ตัวอย่างถึงจะเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน ส่วนการใช้อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังดัดสูงสุดมีค่าสูงที่สุด คือ 59.97 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนักสามารถรับค่าการโคงตัวได้สูงถึง 2.88 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าค่ากำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกที่ความยาวเส้นใยแก้ว 5 เซนติเมตรค่ากำลังดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยแก้วที่ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร ลงในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก

4.4.2 ผลของเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วต่อสมบัติการรับกำลังดัดของ จีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินบิทูมินัส



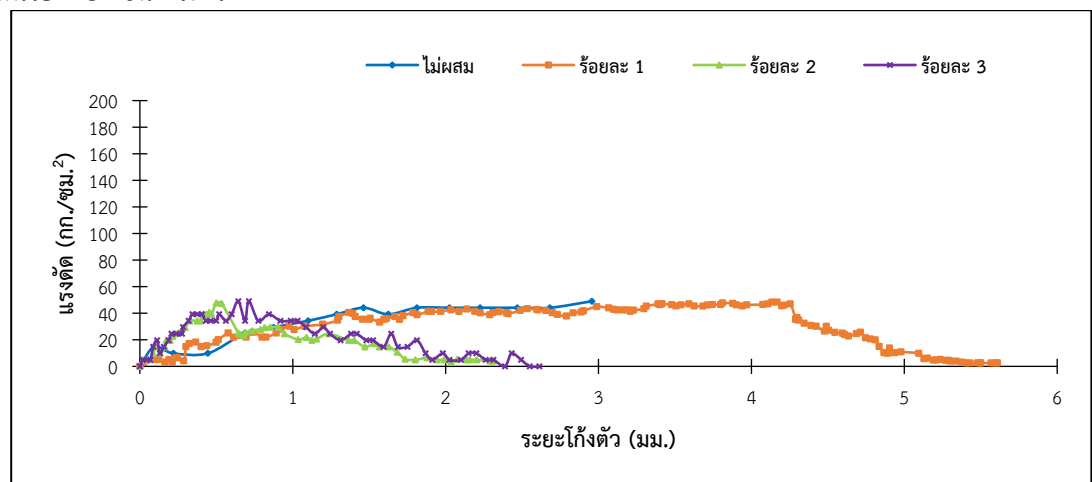
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินบิทูมินัสเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่มีความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.14 ค่ากำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินบิทูมินัสที่ไม่มีการผสมเส้นใยพบว่า มีค่ากำลังดัดสูงสุดเท่ากับ 49 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะการโก่งตัว 2.96 มิลลิเมตร เมื่อเกิดกำลังดัดสูงสุดแล้ววัสดุจะเกิดการวิบัติทันที และเมื่อทำการเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนความยาว 2.5 เซนติเมตรที่อัตราส่วนผสมเส้นใย ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังดัดสูงสุดยังมีค่าใกล้เคียงกันกับจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหิน บิทูมินัสที่ไม่มีการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน แต่เมื่อเกิดค่ากำลังดัดสูงสุดแล้ววัสดุจะยังสามารถรับกำลังดัดได้อย่างต่อเนื่องอีกระยะหนึ่ง เพราะเส้นใยพอลิเอทิลีนที่ผสมเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินบิทูมินัสยังทำหน้าที่รับแรงดัดได้อย่างต่อเนื่อง จากนั้นถ้าทำการเพิ่มอัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนเป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบว่า จีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินสามารถรับกำลังดัดได้สูงที่สุดเท่ากับ 166.62 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะการโก่งตัวเท่ากับ 1.58 มิลลิเมตร จากนั้นค่ากำลังดัดจะมีค่าลดลงประมาณ 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และวัสดุจะเกิดการวิบัติอย่างถาวรที่ระยะการโก่งตัวเท่ากับ 18.82 มิลลิเมตร ส่วนการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินบิทูมินัส พบว่า พฤติกรรมการรับกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์มีความคล้ายคลึงกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร เนื่องจากที่อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเป็นอัตราส่วนผสมที่มากเกินไปจึงส่งผลให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในจีโอพอลิเมอร์ส่งผลให้ค่ากำลังดัดเกิดขึ้นต่ำลง



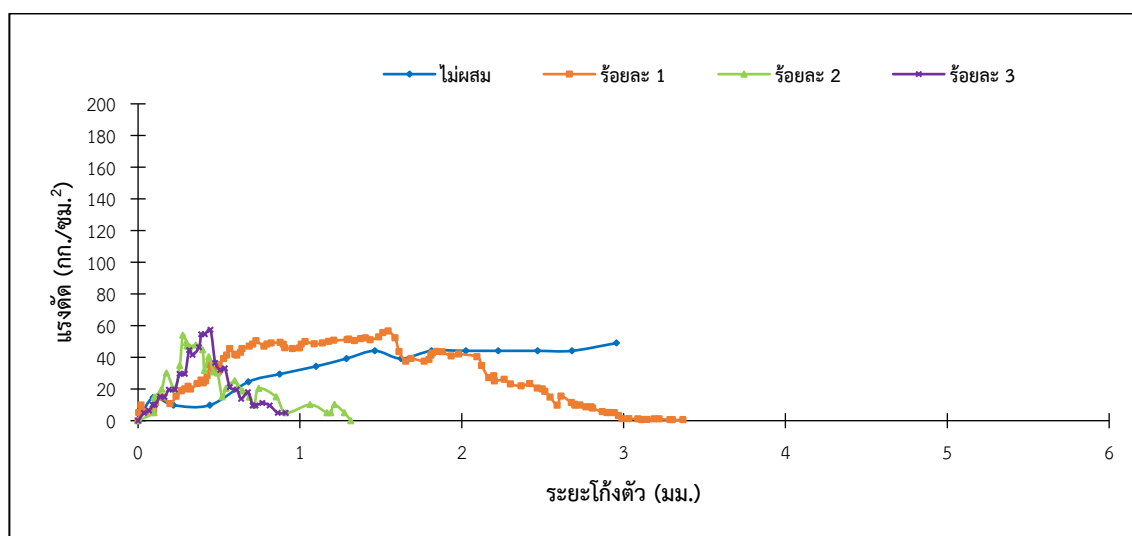
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินปิทูมินัสเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีน ที่ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดความยาวเส้นใยพอลิเอทิลีนจาก 2.5 เป็น 5 เซนติเมตร และทำการผสมลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย ตามรูปที่ 4.15 พบว่า ที่อัตราส่วนผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีพฤติกรรม และค่ากำลังรับแรงดัดใกล้เคียงกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร และค่ากำลังดัดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่การผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 2 โดยน้ำหนักเช่นเดียวกับผลการทดลองในรูปที่ 4.14 แต่ค่ากำลังดัดสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่าผลการทดลองในรูปที่ 4.14 อยู่ประมาณ 34 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สาเหตุที่การผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน ที่ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตรมีค่ากำลังดัดต่ำกว่าการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนความยาว 2.5 เซนติเมตร ลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหินปิทูมินัส เนื่องจากการผสมเส้นใยที่มีความยาว 5 เซนติเมตร ในขั้นตอนการกวนผสมเส้นใยจะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนส่งผลให้เกิดช่องว่างขึ้นค่ากำลังดัดจึงลดต่ำลง ส่วนการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถ้านหินปิทูมินัส พบว่า ผลการทดสอบกำลังดัดมีค่าคล้ายคลึงกับการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักที่ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้านหินปิทูมินัสเสริมเส้นใย แก้วที่ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.16 เมื่อทำการผสมเส้นใยแก้วที่ความเส้นใยเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสม ร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส พบว่า ค่ากำลังดัดที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันเป็นอย่างมากในทุกอัตราส่วนผสมเส้นใยแก้ว และเมื่อวัสดุเกิดการวิบัติแล้วจะสามารถรับค่าการโก่งตัวได้ต่ำกว่าการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส เนื่องจากการผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส และทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน แล้ว พบค่าเส้นใยแก้วที่ทำการผสมลงไปในจีโอพอลิเมอร์เกิดการละลายหายไปเป็นจำนวนมาก โดยไม่ทราบสาเหตุ จึงทำให้ค่ากำลังดัดที่เกิดขึ้นในการผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสมีค่าลดลง



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างกำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสเสริมเส้นใยแก้วที่ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

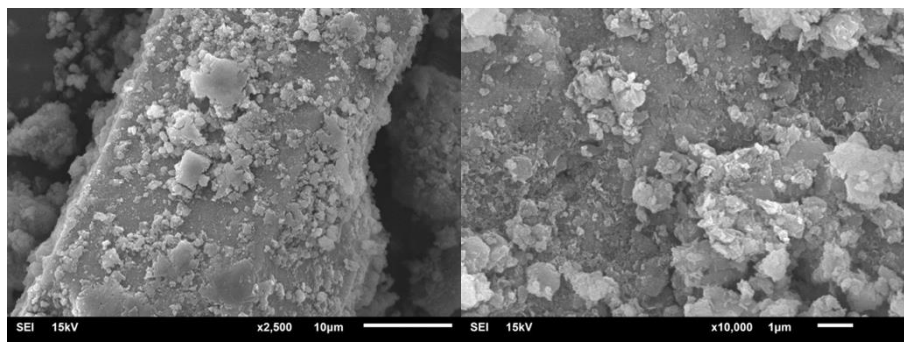
จากรูปที่ 4.17 เมื่อทำการผสมเส้นใยแก้วที่มีความยาว 5 เซนติเมตรลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส พบว่า ในทุกอัตราส่วนผสมเส้นใยแก้วค่ากำลังรับแรงดัดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าผลการทดลองในรูปที่ 4.16 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เส้นใยแก้วไม่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ร่วมกับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างมากขึ้นเส้นใยแก้วจะเกิดการละลายจนทำให้ค่ากำลังดัดมีค่าต่ำลง

จากผลการทดสอบค่ากำลังดัดทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาในทุกอัตราส่วน และทุกช่วงความยาวของเส้นใยทั้ง 2 ชนิด สามารถทำให้เกิดการพัฒนาค่ากำลังดัดได้ ส่วนการใช้เถาถ่านหินปิทูมินัสมาสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ และเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนจะสามารถเพิ่มค่ากำลังดัดได้ แต่การผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสจะไม่ทำให้ค่ากำลังดัดเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสมเส้นใย

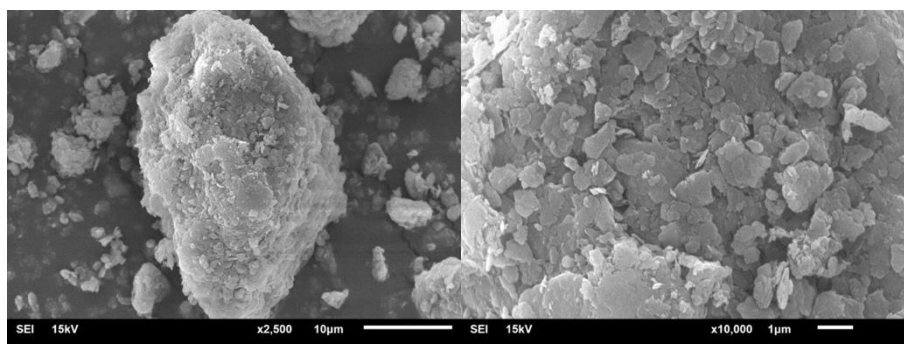
4.5 โครงสร้างระดับจุลภาค

ผลการทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคจะใช้ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมฝุ่นกระจก และผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว ที่อายุการบ่มตัวอย่างมากกว่า 28 วัน ผลการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

4.5.1 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินตะกอนประปา



ก) ดินตะกอนประปาไม่เผา



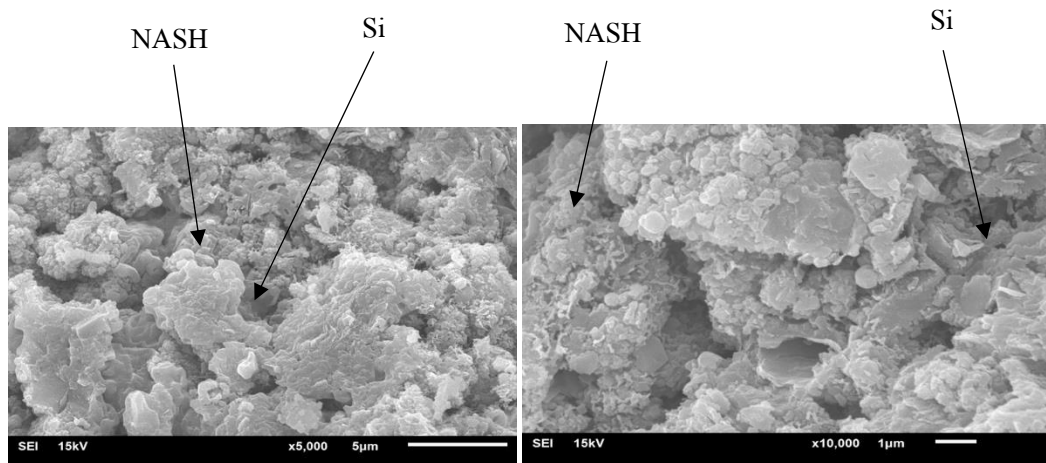
ข) ดินตะกอนประปาเผา

รูปที่ 4.18 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินตะกอนประปา

จากรูปที่ 4.18 เป็นโครงสร้างระดับจุลภาคของดินตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน ที่ผ่าน และไม่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า พื้นผิวของตัวอย่างจะมีลักษณะเป็นเกล็ด (ไม่ละเอียดมากนัก) เมื่อเพิ่มกำลังขยายขึ้นเป็น 10,000 เท่า จะเห็นรายละเอียดของโครงสร้างดินตะกอนประปาเพิ่มมากขึ้น โดยโครงสร้างของดินตะกอนประปาหลังผ่านการบดจะมีลักษณะทางกายภาพคล้ายกับลักษณะทางกายภาพของดินขาว (ธัญรัตน์ เลิศโฆษิตพงศ์, 2553)

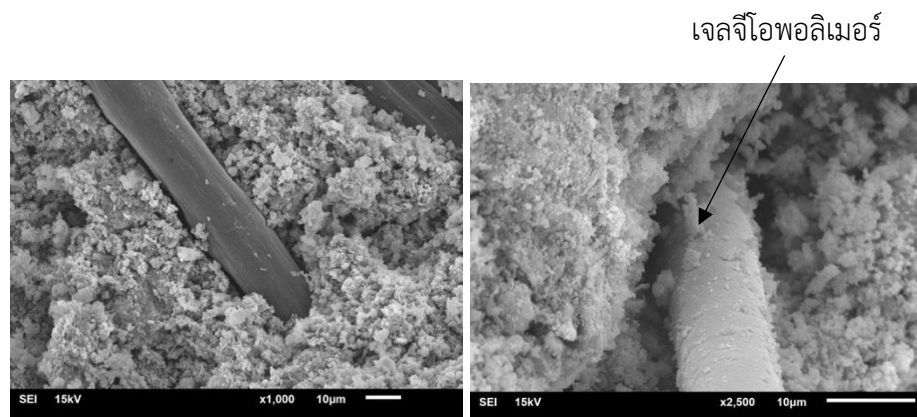
4.5.2 โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใย

การนำเอาฝุ่นกระจกมาผสมร่วมกับตะกอนประปาเพื่อปรับอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น และทำให้วัสดุจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์สามารถรับกำลังตัดได้ พฤติกรรมของวัสดุสังเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังผลการทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคต่อไปนี้



รูปที่ 4.19 โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก

จากรูปที่ 4.19 จะสังเกตได้ว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกมีเจลของ Sodium aluminum silicate hydrate เกิดขึ้นเช่นกัน โดยการทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่า มีความคล้ายคลึงกัน แต่ลักษณะทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกมีลักษณะหนาแน่นมากกว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปา และการผสมฝุ่นกระจกลงไปในจีโอพอลิเมอร์ยังทำให้อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาเพียงอย่างเดียว



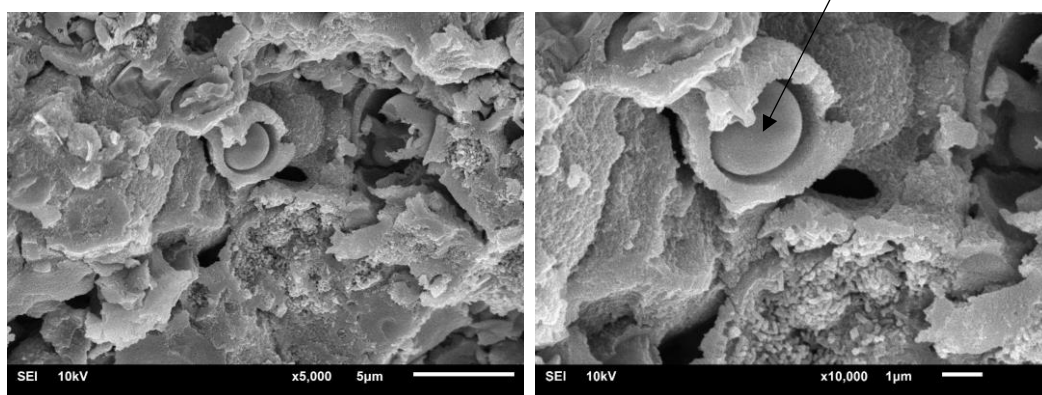
รูปที่ 4.20 โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าถ่านหินบิทูมินัส

จากรูปที่ 4.20 แสดงลักษณะทางกายภาพระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินบิทูมินัสที่อายุการบ่มตั้งแต่ 28 วัน ขึ้นไป เมื่อมีการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน พบว่า เส้นใยพอลิเอทิลีน ไม่มีเจลของจีโอพอลิเมอร์เกาะติดที่เส้นใยพอลิเอทิลีน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์ที่จากดินตะกอนประปาไม่ยึดเกาะกับเส้นใยพอลิเอทิลีนมากเท่าที่ควรซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา จึงเป็นสาเหตุให้การพัฒนากำลังอัดมีค่าต่ำ ส่วนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการผสมเส้นใยแก้วจากการศึกษา พบว่า ผิวของเส้นใยแก้วอาจจะมีเจลจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินบิทูมินัสเกาะรอบเส้นใย แสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยแก้วได้ดีกว่าเส้นใยพอลิเอทิลีน เป็นสาเหตุให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมเส้นใยแก้วมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนอยู่เล็กน้อย

4.5.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินบิทูมินัสเสริมเส้นใย

การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินบิทูมินัสเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้วนั้น จะมีรูปแบบการศึกษาที่เหมือนกับการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยทุกประการ โดยผลการศึกษาเป็นไปดังต่อไปนี้

โครงสร้างของโพรงจีโอพอลิเมอร์

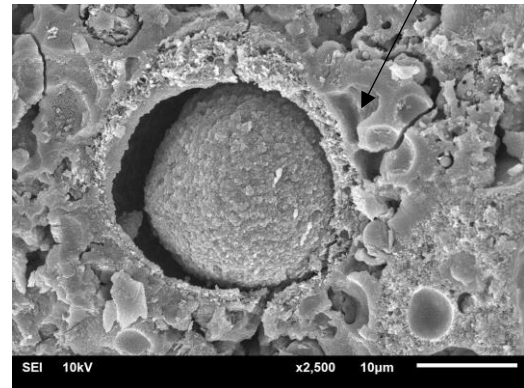
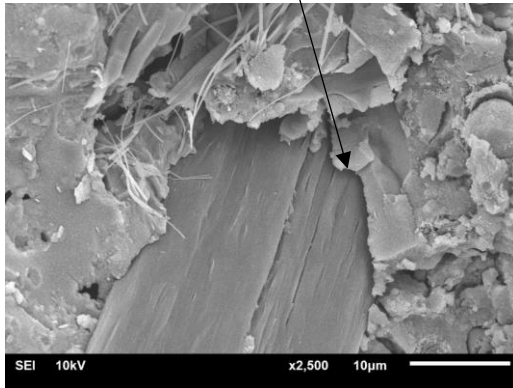


รูปที่ 4.21 โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินบิทูมินัส

จากรูปที่ 4.21 เมื่อนำเถาถ่านหินบิทูมินัสมาผสมร่วมกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่า เจลของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์จะไปล้อมรอบกับโครงสร้างของ Na^+ และทำให้เกิดเป็นโพรงขึ้นดังรูป ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2560)

ช่องว่างระหว่างเส้นใยพอลิเอทิลีน และจีโอพอลิเมอร์

เส้นใยแก้วเกิดการละลายหายไป



รูปที่ 4.22 โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าถ่านหินบิทูมินัสเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีน และเส้นใยแก้ว

จากรูปที่ 4.22 เมื่อผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินบิทูมินัส พบว่าระยะห่างระหว่างเส้นใยพอลิเอทิลีน และจีโอพอลิเมอร์มีระยะห่างที่น้อยกว่า (สังเกตด้วยตาเปล่า) การผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก แต่เมื่อผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินบิทูมินัส พบว่า เส้นใยแก้วหายไปโดยไม่ทราบสาเหตุอาจจะเป็นเพราะเส้นใยเกิดการละลาย ด้วยเหตุผลนี้จึงใช้อธิบายผลการทดลองค่ากำลังรับแรงดัดได้ ว่าการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินบิทูมินัสถึงมีค่ากำลังดัดสูงกว่าการผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินบิทูมินัส

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา พบว่า ค่ากำลังอัดเกิดขึ้นสูงในตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสมเส้นใยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 77.34 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อผสมเส้นใยพอลิเอทิลีน หรือเส้นใยแก้วลงไปในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าต่ำลง โดยที่อัตราส่วนผสมของเส้นใยแต่ละชนิดไม่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แต่อย่างใด ส่วนการใช้เถาถ่านหินปิทูมินัสเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์นั้นค่ากำลังอัดที่อัตราส่วนผสมเส้นใยแตกต่างกัน และทุกช่วงความยาวของเส้นใยทั้ง 2 ชนิด มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เหตุผลที่ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา เพราะองค์ประกอบของเถาถ่านหินปิทูมินัสมีอัตราส่วนของ CaO อยู่ในปริมาณมากจึงเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันควบคู่กับปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสมีค่ากำลังอัดสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา

จากผลการศึกษาค่ากำลังดัด พบว่า ค่ากำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจุกสูงที่สุดจะเกิดที่อัตราส่วนผสมของเส้นใยพอลิเอทิลีนความยาว 5 เซนติเมตร ที่ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะทำให้เกิดค่ากำลังดัดสูงที่สุด คือ 61.97 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังดัดของการผสมเส้นใยแก้วความยาว 5 เซนติเมตร ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่ากำลังดัดอยู่ที่ 59.97 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนการใช้เถาถ่านหินปิทูมินัสเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ พบว่า ค่ากำลังดัดสูงที่สุดอยู่ที่การผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใยเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร มีค่ากำลังดัดเท่ากับ 166 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนการผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสจะทำให้รับกำลังดัดได้น้อยเนื่องจากเส้นใยเกิดการละลาย

ผลการทดลองค่าความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของวัสดุจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย พบว่าการเสริมเส้นใยไม่ว่าจะเป็นเส้นใยพอลิเอทิลีน หรือเส้นใยแก้ว ทุกอัตราส่วนผสม และทุกช่วงความยาวเส้นใยลงในจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจุก หรือจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส จะไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำจะมีประมาณเท่ากับ 1.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 0.28 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

ผลการทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่า การเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนลงในจีโอพอลิเมอร์ผสมฝุ่นกระจุก และจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสจะส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับจีโอพอลิเมอร์มากกว่าการผสมเส้นใยแก้ว จึงทำให้ค่ากำลังดัดที่อัตราการผสมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 3 ลดลง และเมื่อทำการทดสอบที่บริเวณพื้นผิวของจีโอพอลิเมอร์ยังพบผลึกของเจล Sodium aluminum silicate hydrate ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ส่วนการผสมเส้นใยแก้วลงในจีโอพอลิ

เมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัส พบว่า เมื่อระยะเวลาบ่มมากขึ้นเส้นใยแก้วจะเกิดการละลายโดยไม่ทราบสาเหตุ

ดังนั้นจากผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าตะกอนประปา และเถาถ่านหินปิทูมินัสสามารถนำมาใช้สังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ และการใช้เส้นใยพอลิเอทิลีนกับเส้นใยแก้วยังสามารถช่วยในการพัฒนาค่ากำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์ได้ โดยจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากการศึกษาครั้งนี้กำลังรับแรงอัดได้สูงกว่าอิฐมวลเบาอยู่ประมาณ 2 เท่า แต่มีน้ำหนักมากกว่าอิฐมวลเบาประมาณร้อยละ 25 ส่วนค่ากำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากดินตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยสามารถรับกำลังดัดได้น้อย แต่เพียงพอที่จะสามารถใช้สร้างเป็นงานรูปปั้น หรืองาน GRC บางชนิด ที่มีโครงสร้างรับกำลังดัดไม่มากนักได้ แต่จีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินปิทูมินัสสามารถรับกำลังดัดได้สูงใกล้เคียงกับคาน และเสาในโครงสร้างอาคารขนาดเล็กจึงสามารถใช้ทดแทนคอนกรีตเสริมเหล็กได้ นอกจากนี้การผสมเส้นใยลงไปในจีโอพอลิเมอร์จะเป็นการลดปริมาณ ขนาด และน้ำหนักของโครงสร้างเหล็กให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นเล็กลงได้ ส่งผลให้มีต้นทุนในการก่อสร้างต่ำลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาการนำเอาวัสดุอื่นๆ นอกเหนือจากฝุ่นกระจกมาใช้ในการปรับอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพื่อศึกษาความแตกต่างของกำลังที่เกิดขึ้นจากวัสดุสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์
- 2) ควรมีชนิดของเส้นใยที่ใช้ในการศึกษาเพิ่มเติม เช่น เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) หรือเส้นใยคาร์บอน

เอกสารอ้างอิง

- [1] การประปาส่วนภูมิภาค, 2558, **ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา** [Online], Available: <http://www.pwa.co.th/contents/service/treatment> [9 มกราคม 2560].
- [2] การประปานครหลวง, 2559, **โรงงานผลิตน้ำบางเขนการประปา**นครหลวง [Online], Available: http://www.mwa.co.th/ewt_news.php?nid=1913 [9 มกราคม 2650].
- [3] ขวัญเรือน จันทวงศ์, 2557, **ผลของอุณหภูมิ และความชื้นชั้นต่างต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา**, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4] จเร ชุมอักษร, 2550, **การพัฒนาวัสดุผสมจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใย**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [5] ชาลินี อ่อนแสง, 2555, **ผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา และชนิดของต่างต่อการพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา**, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [6] ทวีชัย สำราญวานิช, อภินันท์ ภูซัน, และสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา, 2550, “พฤติกรรม และวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย”, **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.**, ปีที่ 30, ฉบับที่ 2.
- [7] ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย, 2559, **คอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น**, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร.
- [8] เทวณันท์ ทองหยาด, 2553, **ผลของชนิดและความชื้นชั้นของต่างต่อการพัฒนา กำลังอัดของ ตะกอนประปา**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [9] ธัญรัตน์ เลิศโมชิตพงศ์, 2553, **การสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินไคอะตอมล่ำปาง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- [10] นันทชัย ชูศิลป์, ชนาภัทร คุ่มภัย, ชาญณรงค์ ศรีแปลก และวิไล สิตพงศ์, 2556, “สมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์เสริมเส้นใยตาลโตนด”, **การพัฒนาชุมชน และคุณภาพชีวิต**, ปีที่ 2, หน้า 89-99.
- [11] นภารัตน์ ไวยเจริญ, 2556, **การตรึงโลหะหนักในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากกากเหลือทิ้งโรงประปา**, วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [12] บรรเลง ศรีนิล, 2547, **เทคโนโลยีพลาสติก**, พิมพ์ครั้งที่ 16, กรุงเทพมหานคร.
- [13] ปิติ สุขนธสุขกุล, 2556, **คอนกรีต**, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร.
- [14] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547, **ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต**, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร.
- [15] พัทธภรณ์ ธรรมบำรุง, 2558, **การศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากดินขาว เถ้าปาล์ม และของเสียกากขี้แป้ง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [16] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2555, **ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต**, [Online], Available <https://ridtirud.files.wordpress.com/2016/04/e0b881e0b8b2e0b8a3e0b8ade0b8ade0b8ade0b881e0b981e0b89ae0b89ae0b8aae0b988e0b8a7e0b899e0b89ce0b8aae0b8a7e0b899e0b89ce0b8aae0b8a1e0b884e0b8ade0b899e0b881e0b8a3e0b8b5.pdf> [5 เมษายน 2561].
- [17] ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2551, **วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Material)**, [Online] Available: : http://www.thaitca.or.th/index.php?option=com_content&view=section&id=8&Itemid=55 [9 ธันวาคม 2559].
- [18] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2558, **ทดสอบกำลังดัดแบบ 4 จุด** [Online], Available: <https://www.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/2014-09-12-03-39-42/20-bending-test1> [23 มกราคม 2560].
- [19] ศราวิน ปัญจะพลินกุล, 2548, **การศึกษาวัสดุซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืช**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- [20] สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ, ธนากร ภูเงินชา และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2558, “วัสดุจีโอโพลิเมอร์ทางเลือกใหม่สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง”, **วารสารคอนกรีต**, ปีที่ 8, ฉบับที่ 24.
- [21] สุจินันท์ ยัมคมขำ, 2546, **การศึกษาความเป็นไปได้ของการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมกระดาษมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 16.
- [22] สำเริง รักซ้อน และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2555, **ทฤษฎีและการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี**, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพมหานคร.
- [23] แสงจันทร์ ยมเกิด, 2546, **การปรับปรุงคุณภาพของดินขาวจากจังหวัดระนอง โดยกลวิธีโพลิเมอร์ไรเซชัน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [24] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2560, **วัสดุจีโอโพลิเมอร์**, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร. หนังสือ
- [25] อมรรัตน์ สุริยวิจิตรเศรษฐ์, 2559, **การศึกษาการใช้เส้นใยพลาสติกที่ใช้แล้วแบบส้นผสมในคอนกรีต**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [26] Korniejenko, K., Fraczek, E., Pytlak, E. and Adamski, M., 2016, “Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers”, **Procedia Engineering**, Vol. 151, pp. 388–393.
- [27] Provis, J. L. and Deventer, L. S. J. V., 2009, Structures, Processing, **Properties and Industrial Applications**, 1st, pp. 95-96.
- [28] Tanyildizi, H. and Yonar, Y., 2016, “Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature”, **Construction and Building Materials**, Vol. 126, pp. 381–387.
- [29] Wailjarean, N., Asavapisit, S. and Sombatsompop, K., 2013, “Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals”, **Constuction and Building MATERIALS**, Vol. 50, pp. 486-491.
- [30] Zhang, P., 2013, “Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume”, **Composites: Part B**, Vol. 45, pp. 1587–1594.

ภาคผนวก

ก.การทดสอบความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำเส้นใย

ตารางที่ ก.1 ความหนาแน่นของเส้นใยทั้งสองชนิด

ชนิดเส้นใย	ครั้งที่	ค่าที่ได้จากการทดลอง (g)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ค่าตามทฤษฎี (g/cm ³)
โพลีเอทิลีน	1	A = 1,274.02	0.931	0.97
		B = 1,367.1		
	2	A = 1,281.3	0.990	
		B = 1,384.28		
แก้ว	1	A = 1,275.11	2.113	2.56
		B = 1,486.45		
	2	A = 1,283.37	2.173	
		B = 1,500.69		

ตารางที่ ก.2 ค่าการดูดซึมน้ำของเส้นใยทั้งสองชนิด

ชนิดเส้นใย	ครั้งที่	ค่าที่ได้จากการทดลอง (g)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าตามทฤษฎี(ร้อยละ)
โพลีเอทิลีน	1	A = 100.07	7	น้อยมาก 10
		B = 100.14		
	2	A = 100.075	1.6	
		B = 100.091		
แก้ว	1	A = 100	13.2	17
		B = 100.132		
	2	A = 100.01	11.6	
		B = 100.126		

ข. ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาผสม ฝุ่นกระจก

ตารางที่ ข.1 ตะกอนประปาผสมฝุ่นกระจก ตัวอย่างมาตรฐาน

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	223	25	4.8	120	1.858	600	24.000
	2	223	25	5	125	1.784	650	26.000
	3	224	24	4.9	117.6	1.905	637	26.542
	4	223	24.5	4.9	120.05	1.858	701	28.612
	5	223	24.5	4.9	120.05	1.858	614	25.061
	6	220	24.5	4.8	117.6	1.871	717	29.265
						1.855		26.580
14	1	221	24	4.9	117.6	1.879	1752	73.000
	2	225	24.5	5	122.5	1.837	1595	65.102
	3	220	25	4.8	120	1.833	1628	65.120
	4	223	25	4.9	122.5	1.820	1700	68.000
	5	225	24.5	4.8	117.6	1.913	1822	74.367
	6	224	24.5	5	122.5	1.829	1668	68.082
						1.852		68.945
28	1	222	24.5	4.8	117.6	1.888	2031	82.898
	2	223	25	4.8	120	1.858	1829	73.160
	3	223	24	4.9	117.6	1.896	1946	81.083
	4	223	24	4.9	117.6	1.896	1822	75.917
	5	225	25	5	125	1.800	1930	77.200
	6	220	25	5	125	1.760	1844	73.760
						1.850		77.336

ตารางที่ ข.2 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	220	25	4.8	120	1.833	510	20.400
	2	222	25	4.9	122.5	1.812	626	25.040
	3	222	24	4.9	117.6	1.888	538	22.417
	4	223	24.5	4.9	120.05	1.858	514	20.980
	5	222	24.5	4.8	117.6	1.888	637	26.000
	6	221	24.5	5	122.5	1.804	531	21.673
14						1.847		22.752
	1	224	24.5	5	122.5	1.829	1477	60.286
	2	220	24	4.8	115.2	1.910	1586	66.083
	3	220	24	4.8	115.2	1.910	1692	70.500
	4	221	25	4.9	122.5	1.804	1495	59.800
	5	224	25	4.9	122.5	1.829	1573	62.920
28	6	224	25	5	125	1.792	1539	61.560
						1.845		63.525
	1	220	25	4.9	122.5	1.796	1726	69.040
	2	219	24.5	5	122.5	1.788	1817	74.163
	3	219	25	4.8	120	1.825	1688	67.520
	4	220	25	4.9	122.5	1.796	1728	69.120
	5	219	24.5	4.8	117.6	1.862	1687	68.857

ตารางที่ ข.3 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 2 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	226	24	4.9	117.6	1.922	567	23.625
	2	225	23.5	4.8	112.8	1.995	702	29.872
	3	225	24.5	5	122.5	1.837	625	25.510
	4	224	25	4.7	117.5	1.906	579	23.160
	5	224	24	4.8	115.2	1.944	544	22.667
	6	221	24.5	4.9	120.05	1.841	641	26.163
						1.907		25.166
14	1	224	24	5	120	1.867	1580	65.833
	2	224	25	4.9	122.5	1.829	1723	68.920
	3	225	24	4.9	117.6	1.913	1606	66.917
	4	223	24.5	4.9	120.05	1.858	1661	67.796
	5	223	24.5	4.9	120.05	1.858	1505	61.429
	6	233	24.5	4.8	117.6	1.981	1658	67.673
						1.884		66.428
28	1	221	25	4.8	120	1.842	1977	79.080
	2	223	25	5	125	1.784	1783	71.320
	3	223	24	5	120	1.858	1820	75.833
	4	220	24	5	120	1.833	1711	71.292
	5	221	24.5	4.9	120.05	1.841	1636	66.776
	6	221	25	4.7	117.5	1.881	1871	74.840
						1.840		73.190

ตารางที่ ข.4 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 3 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	219	25	4.9	122.5	1.788	484	19.360
	2	220	23.5	4.9	115.15	1.911	519	22.085
	3	225	25	5	125	1.800	469	18.760
	4	225	24	4.7	112.8	1.995	422	17.583
	5	225	24.5	4.8	120.05	1.874	396	16.163
	6	223	24.5	4.9	-	-	571	23.306
						1.873		19.543
14	1	225	24.5	5	122.5	1.837	1572	64.163
	2	225	25	4.8	120	1.875	1361	54.440
	3	223	25	5	125	1.784	1428	57.120
	4	224	24.5	4.9	120.05	1.866	1299	53.020
	5	224	25	4.9	122.5	1.829	1412	56.480
	6	221	24	4.9	117.6	1.879	1476	61.500
						1.845		57.787
28	1	219	24.5	4.8	117.6	1.862	1586	64.735
	2	221	24	4.9	117.6	1.879	1709	71.208
	3	225	25	4.9	122.5	1.837	1831	73.240
	4	223	24.5	5	122.5	1.820	1633	66.653
	5	223	25	4.9	122.5	1.820	1775	71.000
	6	222	25	4.8	120	1.850	1588	63.520
						1.845		68.393

ตารางที่ ข.5 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	224	24.5	4.7	115.15	1.945	732	29.878
	2	226	24.5	4.8	117.6	1.922	681	27.796
	3	228	24.5	5	122.5	1.861	695	28.367
	4	225	24	4.9	117.6	1.913	597	24.875
	5	225	25	4.9	122.5	1.837	719	28.760
	6	225	25	4.8	120	1.875	701	28.040
						1.892		27.953
14	1	223	24	5	120	1.858	1469	61.208
	2	223	25	4.9	122.5	1.820	1411	56.440
	3	223	24.5	4.7	115.15	1.937	1640	66.939
	4	223	25	4.8	120	1.858	1438	57.520
	5	225	24	4.8	115.2	1.953	1521	63.375
	6	222	24.5	4.8	117.6	1.888	1478	60.327
						1.886		60.968
28	1	224	25	5	125	1.792	1799	71.960
	2	224	24.5	5	122.5	1.829	1820	74.286
	3	226	24.5	4.8	117.6	1.922	1692	69.061
	4	222	24	5	120	1.850	1708	71.167
	5	221	24	4.8	115.2	1.918	1741	72.542
	6	221	24	5	120	1.842	1675	69.792
						1.859		71.468

ตารางที่ ข.6 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 2 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	221	25	4.9	122.5	1.804	568	22.720
	2	226	24.5	4.8	117.6	1.922	640	26.122
	3	224	24.5	4.7	115.15	1.945	632	25.796
	4	225	24	4.9	117.6	1.913	492	20.500
	5	221	25	5	125	1.768	576	23.040
	6	224	25	4.8	120	1.867	693	27.720
						1.870		24.316
14	1	220	24	5	120	1.833	1501	62.542
	2	219	24	4.8	115.2	1.901	1587	66.125
	3	222	24.5	4.9	120.05	1.849	1675	68.367
	4	221	25	5	125	1.768	1402	56.080
	5	218	24.5	5	122.5	1.780	1660	67.755
	6	223	24	4.8	115.2	1.936	1688	70.333
						1.844		65.200
28	1	219	23.5	4.9	115.15	1.902	1750	74.468
	2	223	25	5	125	1.784	1948	77.920
	3	220	25	5	125	1.760	1697	67.880
	4	220	25	4.9	122.5	1.796	1899	75.960
	5	219	24.5	5	122.5	1.788	1828	74.612
	6	218	24	5	120	1.817	1874	78.083
						1.808		74.821

ตารางที่ ข.7 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 3 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	223	24.5	4.9	120.05	1.858	471	19.224
	2	227	25	4.8	120	1.892	467	18.680
	3	229	24	5	120	1.908	495	20.625
	4	229	24.5	4.9	120.05	1.908	446	18.204
	5	226	25	4.8	120	1.883	525	21.000
	6	222	24	5	120	1.850	338	14.083
						1.883		18.636
14	1	224	24.5	5	122.5	1.829	1380	56.327
	2	221	24.5	5	122.5	1.804	1499	61.184
	3	226	25	5	125	1.808	1372	54.880
	4	223	25	4.9	122.5	1.820	1408	56.320
	5	220	24	4.9	117.6	1.871	1473	61.375
	6	225	25	4.9	122.5	1.837	1281	51.240
						1.828		56.888
28	1	219	24	4.8	115.2	1.901	1778	74.083
	2	217	24.5	4.9	120.05	1.808	1526	62.286
	3	220	25	4.9	122.5	1.796	1680	67.200
	4	218	24.5	5	122.5	1.780	1611	65.755
	5	220	25	5	125	1.760	1673	66.920
	6	220	25	4.8	120	1.833	1482	59.280
						1.813		65.921

ตารางที่ ข.8 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 1 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	226	24	5	120	1.883	703	29.292
	2	222	24	4.9	117.6	1.888	586	24.417
	3	225	24	5	120	1.875	622	25.917
	4	225	25	4.8	120	1.875	710	28.400
	5	224	24.5	5	122.5	1.829	633	25.837
	6	225	24.5	5	122.5	1.837	528	21.551
						1.864		25.902
14	1	223	23.5	5	117.5	1.898	1664	70.809
	2	221	25	4.9	122.5	1.804	1597	63.880
	3	224	24	4.8	115.2	1.944	1597	66.542
	4	224	24	5	120	1.867	1616	67.333
	5	225	24.5	4.8	117.6	1.913	1683	68.694
	6	223	25	4.7	117.5	1.898	1514	60.560
						1.887		66.303
28	1	221	24.5	4.9	120.05	1.841	1833	74.816
	2	219	24.5	5	122.5	1.788	1891	77.184
	3	22	25	5	125	0.176	1753	70.120
	4	218	25	5	125	1.744	1836	73.440
	5	220	24	5	120	1.833	1762	73.417
	6	222	24.5	4.9	120.05	1.849	1797	73.347
						1.539		73.721

ตารางที่ ข.9 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 2 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	228	23.5	4.8	112.8	2.021	691	29.404
	2	228	24.5	4.7	115.15	1.980	528	21.551
	3	225	24	4.9	117.6	1.913	683	28.458
	4	223	25	4.8	120	1.858	624	24.960
	5	225	24.5	4.8	117.6	1.913	717	29.265
	6	225	24.5	4.7	115.15	1.954	597	24.367
						1.940		26.334
14	1	227	25	5	125	1.816	1623	64.920
	2	224	24	5	120	1.867	1479	61.625
	3	224	24.5	4.8	117.6	1.905	1710	69.796
	4	227	23.5	4.9	115.15	1.971	1681	71.532
	5	223	23.5	4.9	115.15	1.937	1666	70.894
	6	224	25	4.9	122.5	1.829	1594	63.760
						1.887		67.088
28	1	219	24.5	4.7	115.15	1.902	1796	73.306
	2	223	24.5	4.8	117.6	1.896	1822	74.367
	3	221	25	4.8	120	1.842	1864	74.560
	4	221	25	4.9	122.5	1.804	1927	77.080
	5	221	25	4.8	120	1.842	1870	74.800
	6	222	24.5	5	122.5	1.812	1788	72.980
						1.850		74.516

ตารางที่ ข.10 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 3 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	223	26	4.9	127.4	1.750	415	15.962
	2	227	24.5	4.8	117.6	1.930	653	26.653
	3	227	25	4.9	122.5	1.853	467	18.680
	4	223	25	4.8	120	1.858	482	19.280
	5	225	26	5	130	1.731	475	18.269
	6	225	24	4.7	112.8	1.995	522	21.750
						1.853		20.099
14	1	223	24.5	5	122.5	1.820	1334	54.449
	2	223	25	4.9	122.5	1.820	1490	59.600
	3	223	25	5	125	1.784	1418	56.720
	4	223	24	4.8	115.2	1.936	1566	65.250
	5	226	24	4.9	117.6	1.922	1320	55.000
	6	222	25	4.9	122.5	1.812	1461	58.440
						1.849		58.243
28	1	224	24.5	5	122.5	1.829	1656	67.592
	2	221	25	5	125	1.768	1733	69.320
	3	224	25	5	125	1.792	1781	71.240
	4	224	24.5	5	122.5	1.829	1787	72.939
	5	222	25	4.9	122.5	1.812	1696	67.840
	6	221	24	4.8	115.2	1.918	1812	75.500
						1.825		70.738

ตารางที่ ข.11 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 1 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	229	23.5	4.9	115.15	1.989	474	20.170
	2	226	24	4.8	115.2	1.962	534	22.250
	3	225	24.5	5	122.5	1.837	777	31.714
	4	223	24	4.8	115.2	1.936	566	23.583
	5	229	24.5	4.9	120.05	1.908	652	26.612
	6	225	24.5	4.7	115.15	1.954	418	17.061
						1.931		23.565
14	1	221	25	4.9	122.5	1.804	1600	64.000
	2	224	24	5	120	1.867	1554	64.750
	3	222	24	4.9	117.6	1.888	1538	64.083
	4	222	24.5	4.9	120.05	1.849	1719	70.163
	5	226	24.5	4.9	120.05	1.883	1650	67.347
	6	225	25	4.8	120	1.875	1468	58.720
						1.861		64.844
28	1	221	24	5	120	1.842	1765	73.542
	2	219	25	5	125	1.752	1698	67.920
	3	220	25	5	125	1.760	1692	67.680
	4	222	24.5	5	122.5	1.812	1761	71.878
	5	218	23.5	4.9	115.15	1.893	1825	77.660
	6	223	24	4.8	115.2	1.936	1707	71.125
						1.832		71.634

ตารางที่ ข.12 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 2 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	221	25	5	125	1.768	710	28.400
	2	227	24.5	5	122.5	1.853	622	25.388
	3	225	25	5	125	1.800	525	21.000
	4	223	24.5	4.9	120.05	1.858	727	29.673
	5	221	24.5	4.7	115.15	1.919	689	28.122
	6	228	24	4.8	115.2	1.979	527	21.958
						1.863		25.757
14	1	219	24	4.9	117.6	1.862	1431	59.625
	2	222	24.5	5	122.5	1.812	1668	68.082
	3	224	24.5	4.7	115.15	1.945	1782	72.735
	4	221	24.5	4.9	120.05	1.841	1577	64.367
	5	221	24	4.9	117.6	1.879	1411	58.792
	6	221	25	4.9	122.5	1.804	1705	68.200
						1.857		65.300
28	1	225	24.5	4.7	115.15	1.954	1817	74.163
	2	220	24.5	4.7	115.15	1.911	1903	77.673
	3	224	24.5	4.7	115.15	1.945	1762	71.918
	4	218	24.5	4.7	115.15	1.893	1624	66.286
	5	223	25	5	125	1.784	1893	75.720
	6	224	24	5	120	1.867	1555	64.792
						1.892		71.759

ตารางที่ ข.13 ตะกอนประปาสมฝุ่นกระจกเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 3 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	225	24.5	4.9	120.05	1.874	641	26.163
	2	225	25	4.9	122.5	1.837	695	27.800
	3	224	25	5	125	1.792	849	33.960
	4	225	25	4.7	117.5	1.915	728	29.120
	5	225	25	5	125	1.800	616	24.640
	6	225	24	4.9	117.6	1.913	509	21.208
						1.855		27.149
14	1	220	23.5	4.8	112.8	1.950	1395	59.362
	2	221	24	4.7	112.8	1.959	1369	57.042
	3	224	25	4.7	117.5	1.906	1537	61.480
	4	220	24.5	4.8	117.6	1.871	1740	71.020
	5	220	24.5	4.8	117.6	1.871	1466	59.837
	6	222	25	4.9	122.5	1.812	1308	52.320
						1.895		60.177
28	1	217	24	4.6	110.4	1.966	1876	78.167
	2	218	24	4.8	115.2	1.892	1572	65.500
	3	218	25	5	125	1.744	1725	69.000
	4	219	24.5	4.9	120.05	1.824	1649	67.306
	5	218	24	4.9	117.6	1.854	1777	74.042
	6	221	25	4.7	117.5	1.881	1740	69.600
						1.860		70.602

ค. ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอน ประปาผสมฝุ่นกระจก

ตารางที่ ค.2 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่
อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	246	215	125	0.248	14.419
2	247	211	120.05	0.300	17.062
3	245	206	120	0.325	18.932
4	243	210	115.15	0.287	15.714
5	248	214	125	0.272	15.888
6	250	209	124	0.331	19.617

ตารางที่ ค.3 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่
อัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	246	213	117.6	0.281	15.493
2	241	207	117.6	0.289	16.425
3	244	210	120	0.283	16.190
4	244	213	115.15	0.269	14.554
5	245	212	125	0.264	15.566
6	244	209	115.15	0.304	16.746

ตารางที่ ค.4 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่
อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	247	211	110.592	0.326	17.062
2	245	212	110.541	0.299	15.566
3	250	218	115.15	0.278	14.679
4	249	217	115.15	0.278	14.747
5	247	222	117.649	0.212	11.261
6	247	219	120	0.233	12.785

ตารางที่ ค.5 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่
อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	248	215	110.541	0.299	15.349
2	247	215	117.649	0.272	14.884
3	245	211	120	0.283	16.114
4	249	213	125	0.288	16.901
5	243	214	120.05	0.242	13.551
6	250	223	120	0.225	12.108

ตารางที่ ค.6 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่
อัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	245	210	120	0.292	16.667
2	241	212	120	0.242	13.679
3	252	211	120	0.342	19.431
4	249	212	125	0.296	17.453
5	246	215	120.05	0.258	14.419
6	249	211	120	0.317	18.009

ตารางที่ ค.7 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่
อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	246	214	117.649	0.272	14.953
2	246	216	117.6	0.255	13.889
3	249	210	210	0.186	18.571
4	252	217	110.541	0.317	16.129
5	250	211	125	0.312	18.483
6	255	214	115.592	0.355	19.159

ตารางที่ ค.8 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยแก้วที่อัตรา
ส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	241	209	110.592	0.289	15.311
2	243	206	120.05	0.308	17.961
3	250	200	117.6	0.425	25.000
4	247	217	117.6	0.255	13.825
5	244	204	120	0.333	19.608
6	248	214	125	0.272	15.888

ตารางที่ ค.9 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยแก้วที่อัตรา
ส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	249	200	117.6	0.417	24.500
2	243	216	117.6	0.230	12.500
3	253	213	117.6	0.340	18.779
4	241	211	120	0.250	14.218
5	244	222	115.15	0.191	9.910
6	247	214	120.05	0.275	15.421

ตารางที่ ค.10 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยแก้วที่อัตรา
ส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	255	215	110.592	0.362	18.605
2	250	216	125	0.272	15.741
3	251	213	120	0.317	17.840
4	251	219	120	0.267	14.612
5	249	219	120	0.250	13.699
6	250	220	117.6	0.255	13.636

ตารางที่ ค.11 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยแก้วที่อัตรา
ส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	248	210	120.05	0.317	18.095
2	248	214	120	0.283	15.888
3	249	213	110.541	0.326	16.901
4	245	211	120	0.283	16.114
5	245	212	120	0.275	15.566
6	247	206	125	0.328	19.903

ตารางที่ ค.12 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยแก้วที่อัตรา
ส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	251	214	110.592	0.335	17.290
2	250	209	117.649	0.348	19.617
3	248	219	120	0.242	13.242
4	249	217	125	0.256	14.747
5	246	215	120.05	0.258	14.419
6	243	218	117.649	0.212	11.468

ตารางที่ ค.13 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์เสริมเส้นใยแก้วที่อัตรา
ส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	247	215	115.15	0.278	14.884
2	248	213	125	0.280	16.432
3	246	217	117.6	0.247	13.364
4	248	215	120	0.275	15.349
5	249	219	117.649	0.255	13.699
6	250	213	110.541	0.335	17.371

ง. ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ ง.1 เถ้าถ่านหิน ตัวอย่างมาตรฐาน

อายุ การ บ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	-	25.5	-	-	-	143.5	5.627
	2	-	24.5	-	-	-	170.0	6.939
	3	-	24.99	-	-	-	137.9	5.518
	4	-	25.5	-	-	-	155.1	6.082
	5	-	25.5	-	-	-	163.8	6.424
	6	-	25.5	-	-	-	155.3	6.090
							-	6.113
14	1	229	24.01	4.8	115.248	1.987	802.8	33.436
	2	228	23.52	4.9	115.248	1.978	531.0	22.577
	3	223	22.56	4.8	108.288	2.059	714.3	31.662
	4	220	22.08	4.9	108.192	2.033	821.1	37.188
	5	215	21.6	4.8	103.68	2.074	618.2	28.620
	6	223	23.04	4.9	112.896	1.975	562.0	24.392
						2.059		352.605
28	1	227	24.5	4.9	120.05	1.891	50.0	208.034
	2	226	24	4.9	117.6	1.922	50.0	212.368
	3	230	25	5	125	1.840	47.0	191.641
	4	224	24	4.8	115.2	1.944	45.0	191.131
	5	231	25	5	125	1.848	50.0	203.874
	6	221	24.5	4.8	117.6	1.879	45.0	187.231
						1.887		199.047

ตารางที่ ง.2 แก้วถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	227	24.5	4.9	120.05	1.891	454	18.531
	2	230	24	4.9	117.6	1.956	358	14.917
	3	237	24.5	4.9	120.05	1.974	439	17.918
	4	237	24.5	4.8	117.6	2.015	470	19.184
	5	238	23.5	4.8	112.8	2.110	429	18.255
	6	235	24	5	120	1.958	450	18.750
						1.984		17.926
14	1	232	25	4.8	120	1.933	1126	45.040
	2	232	24	4.9	117.6	1.973	1330	55.417
	3	235	24	4.8	115.2	2.040	1074	44.750
	4	231	23.5	4.9	115.15	2.006	1205	51.277
	5	231	24.5	4.8	117.6	1.964	1360	55.510
	6	229	24.5	4.9	120.05	1.908	1231	50.245
						1.971		50.373
28	1	232	25	4.9	122.5	1.894	49	199.796
	2	230	25	4.9	122.5	1.878	51	207.951
	3	230	24.5	5	122.5	1.878	47	195.552
	4	233	24.5	5	122.5	1.902	48	199.713
	5	237	24	5	120	1.975	45	191.131
	6	<u>228</u>	24.5	5	122.5	1.861	<u>47</u>	195.552
						1.898		198.283

ตารางที่ ง.3 แก้วถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 2 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	232	23.5	4.9	115.15	2.015	558	23.745
	2	233	24	4.9	117.6	1.981	539	22.458
	3	233	24	4.9	117.6	1.981	516	21.500
	4	236	23.5	4.8	112.8	2.092	569	24.213
	5	236	24	5	120	1.967	631	26.292
	6	231	24	4.8	115.2	2.005	628	26.167
						2.007		24.062
14	1	234	24	4.7	112.8	2.074	1449	60.375
	2	234	24	4.8	115.2	2.031	1347	56.125
	3	236	23.5	4.8	112.8	2.092	1439	61.234
	4	234	24.5	4.9	120.05	1.949	1517	61.918
	5	233	24	4.9	117.6	1.981	1356	56.500
	6	235	24.5	4.9	120.05	1.958	1336	54.531
						2.014		58.447
28	1	233	23.5	4.9	115.15	2.023	53	229.900
	2	229	25	4.9	122.5	1.869	45	183.486
	3	229	24	4.8	115.2	1.988	45	191.131
	4	230	24.5	5	122.5	1.878	50	208.034
	5	231	25	5	125	1.848	50	203.874
	6	<u>231</u>	24.5	4.9	120.05	1.924	<u>51</u>	212.195
						1.922		204.770

ตารางที่ ง.4 แก้วถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 3 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	229	25	4.9	122.5	1.869	449	17.960
	2	233	23.5	4.9	115.15	2.023	452	19.234
	3	233	24.5	4.9	120.05	1.941	414	16.898
	4	235	25	4.8	120	1.958	379	15.160
	5	233	24.5	4.8	117.6	1.981	322	13.143
	6	230	24.5	4.8	117.6	1.956	425	17.347
						1.955		16.624
14	1	234	24.5	5	122.5	1.910	1032	42.122
	2	234	24.5	4.7	115.15	2.032	1210	49.388
	3	231	24	4.9	117.6	1.964	1192	49.667
	4	232	24	4.8	115.2	2.014	1240	51.667
	5	232	23.5	4.7	110.45	2.100	1198	50.979
	6	235	25	4.8	120	1.958	1066	42.640
						1.997		47.744
28	1	232	24.5	4.9	120.05	1.933	43	178.909
	2	232	24.5	5	122.5	1.894	40	166.427
	3	233	25	4.9	122.5	1.902	40	163.099
	4	229	23.5	4.9	115.15	1.989	45	195.198
	5	230	24	4.8	115.2	1.997	45	191.131
	6	<u>230</u>	24.5	4.9	120.05	1.916	<u>44</u>	183.070
						1.938		179.639

ตารางที่ ง.5 ถ้ำถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 1 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	228	24.5	5	122.5	1.861	502	20.490
	2	231	25	4.9	122.5	1.886	411	16.440
	3	231	25	4.9	122.5	1.886	610	24.400
	4	232	25	5	125	1.856	403	16.120
	5	229	24.5	4.8	117.6	1.947	479	19.551
	6	230	24	4.7	112.8	2.039	494	20.583
						1.912		19.597
14	1	229	24	5	120	1.908	1053	43.875
	2	231	24.5	5	122.5	1.886	1105	45.102
	3	233	24.5	4.8	117.6	1.981	1062	43.347
	4	233	24.5	4.7	115.15	2.023	1170	47.755
	5	232	25	4.9	122.5	1.894	1192	47.680
	6	233	24	4.9	117.6	1.981	1140	47.500
						1.946		45.877
28	1	231	24.5	4.8	117.6	1.964	43	178.909
	2	231	24.5	4.9	120.05	1.924	40	166.427
	3	231	24	4.8	115.2	2.005	40	169.895
	4	230	24.5	5	122.5	1.878	41	170.588
	5	231	24.5	4.9	120.05	1.924	45	187.231
	6	<u>230</u>	25	4.8	120	1.917	<u>45</u>	183.486
						1.935		176.089

ตารางที่ ง.6 แก้วถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 2 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	228	25	4.8	120	1.900	614	24.560
	2	229	24	4.7	112.8	2.030	534	22.250
	3	228	25	5	125	1.824	521	20.840
	4	233	24.5	4.7	115.15	2.023	565	23.061
	5	228	24.5	5	122.5	1.861	604	24.653
	6	233	24.5	4.9	120.05	1.941	553	22.571
						1.930		22.989
14	1	232	24	5	120	1.933	399	16.625
	2	232	25	4.9	122.5	1.894	390	15.600
	3	231	24.5	4.8	117.6	1.964	443	18.082
	4	233	25	4.7	117.5	1.983	471	18.840
	5	233	23.5	4.8	112.8	2.066	397	16.894
	6	233	24	4.9	117.6	1.981	461	19.208
						1.970		17.541
28	1	231	24	5	120	1.925	48	203.874
	2	229	24.5	4.9	120.05	1.908	50	208.034
	3	229	25	4.7	117.5	1.949	55	224.261
	4	230	24.5	4.8	117.6	1.956	55	228.838
	5	230	25	4.8	120	1.917	47	191.641
	6	<u>231</u>	25	4.8	120	1.925	<u>47</u>	191.641
						1.930		208.048

ตารางที่ ง.7 แก้วถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนร้อยละ 3 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	234	23.5	5	117.5	1.991	318	13.532
	2	235	24	4.9	117.6	1.998	375	15.625
	3	233	24	4.9	117.6	1.981	285	11.875
	4	233	24.5	4.9	120.05	1.941	355	14.490
	5	233	24.5	5	122.5	1.902	304	12.408
	6	232	25	4.8	120	1.933	366	14.640
						1.958		13.762
14	1	231	25	4.8	120	1.925	1087	43.480
	2	233	25	4.8	120	1.942	1140	45.600
	3	233	24	4.8	115.2	2.023	1956	81.500
	4	234	23.5	4.9	115.15	2.032	1039	44.213
	5	231	24.5	4.9	120.05	1.924	1183	48.286
	6	231	24.5	4.9	120.05	1.924	988	40.327
						1.962		50.568
28	1	234	23.5	4.8	112.8	2.074	47	203.874
	2	230	24	5	120	1.917	35	148.658
	3	230	24.5	5	122.5	1.878	35	145.624
	4	231	25	5	125	1.848	35	142.712
	5	231	24.5	4.9	120.05	1.924	45	187.231
	6	<u>229</u>	24.5	4.9	120.05	1.908	<u>44</u>	183.070
						1.925		168.528

ตารางที่ ง.8 ถ้ำถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 1 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	231	24	4.9	117.6	1.964	257	10.708
	2	227	24.5	4.9	120.05	1.891	263	10.735
	3	232	24.5	4.8	117.6	1.973	282	11.510
	4	229	24	4.8	115.2	1.988	269	11.208
	5	228	23.5	4.8	112.8	2.021	287	12.213
	6	234	25	4.9	122.5	1.910	325	13.000
						1.958		11.562
14	1	230	24	4.8	115.2	1.997	1500	62.500
	2	234	24	4.7	112.8	2.074	1399	58.292
	3	233	24	5	120	1.942	1423	59.292
	4	232	24	4.9	117.6	1.973	1481	61.708
	5	229	24.5	4.9	120.05	1.908	1502	61.306
	6	231	23.5	4.9	115.15	2.006	1499	63.787
						1.983		61.148
28	1	228	25	4.8	120	1.900	50	203.874
	2	228	24.5	5	122.5	1.861	50	208.034
	3	230	24.5	5	122.5	1.878	53	220.516
	4	230	24.5	5	122.5	1.878	45	187.231
	5	230	24	4.9	117.6	1.956	45	191.131
	6	<u>231</u>	24.5	4.9	120.05	1.924	<u>45</u>	187.231
						1.899		199.670

ตารางที่ ง.9 ถ้ำถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 2 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	235	23.5	4.8	112.8	2.083	414	17.617
	2	228	23.5	4.9	115.15	1.980	347	14.766
	3	229	24	4.9	117.6	1.947	420	17.500
	4	238	24.5	4.8	117.6	2.024	386	15.755
	5	236	24	4.9	117.6	2.007	304	12.667
	6	236	24.5	5	122.5	1.927	332	13.551
						1.995		15.309
14	1	225	24.5	4.8	117.6	1.913	1614	65.878
	2	230	24	4.8	115.2	1.997	1701	70.875
	3	225	24	4.8	115.2	1.953	1727	71.958
	4	230	24.5	4.9	120.05	1.916	1533	62.571
	5	226	24	4.9	117.6	1.922	1698	70.750
	6	227	23.5	5	117.5	1.932	1783	75.872
						1.939		69.651
28	1	231	24	4.7	112.8	2.048	55	233.605
	2	233	24.5	4.9	120.05	1.941	55	228.838
	3	233	25	4.9	122.5	1.902	53	216.106
	4	235	24.5	4.9	120.05	1.958	50	208.034
	5	229	24.5	5	122.5	1.869	49	203.874
	6	<u>229</u>	25	4.8	120	1.908	<u>53</u>	216.106
						1.938		217.760

ตารางที่ ง.10 แก้วถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 3 ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	234	24.5	5	122.5	1.910	277	11.306
	2	232	24	4.9	117.6	1.973	293	12.208
	3	234	24.5	4.9	120.05	1.949	407	16.612
	4	229	24.5	4.9	120.05	1.908	353	14.408
	5	230	24	4.9	117.6	1.956	318	13.250
	6	238	24	4.8	115.2	2.066	200	8.333
						1.960		12.686
14	1	231	24.5	4.7	115.15	2.006	1655	67.551
	2	234	24.5	4.8	117.6	1.990	1505	61.429
	3	232	24.5	4.9	120.05	1.933	1663	67.878
	4	234	24	4.9	117.6	1.990	1483	61.792
	5	233	23.5	5	117.5	1.983	1699	72.298
	6	230	23.5	4.9	115.15	1.997	1708	72.681
						1.983		67.271
28	1	235	24	4.9	117.6	1.998	45	191.131
	2	233	25	5	125	1.864	45	183.486
	3	233	24.5	5	122.5	1.902	50	208.034
	4	230	24.5	5	122.5	1.878	54	224.677
	5	233	24.5	4.9	120.05	1.941	40	166.427
	6	<u>235</u>	23.5	4.9	115.15	2.041	<u>40</u>	173.509
						1.937		191.211

ตารางที่ ง.11 แก้วถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 1 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	224	24	4.6	110.4	2.029	219	9.125
	2	230	25	4.8	120	1.917	327	13.080
	3	230	25	4.9	122.5	1.878	302	12.080
	4	228	24	4.8	115.2	1.979	340	14.167
	5	228	25	5	125	1.824	299	11.960
	6	228	25	4.9	122.5	1.861	282	11.280
						1.915		11.949
14	1	231	24	4.9	117.6	1.964	1420	59.167
	2	231	24	4.8	115.2	2.005	1390	57.917
	3	324	24	4.8	115.2	2.813	1433	59.708
	4	231	24.5	4.8	117.6	1.964	1526	62.286
	5	231	24.5	5	122.5	1.886	1341	54.735
	6	232	24.5	5	122.5	1.894	1483	60.531
						2.088		59.057
28	1	230	25	5	125	1.840	45	183.486
	2	230	24	4.8	115.2	1.997	40	169.895
	3	230	24.5	4.8	117.6	1.956	45	187.231
	4	232	24	4.8	115.2	2.014	45	191.131
	5	232	24	4.9	117.6	1.973	46	195.379
	6	<u>233</u>	24.5	4.9	120.05	1.941	<u>41</u>	170.588
						1.953		182.952

ตารางที่ ง.12 แก้วถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 2 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	230	24.5	4.9	120.05	1.916	259	10.571
	2	230	24.5	5	122.5	1.878	299	12.204
	3	231	24.5	4.9	120.05	1.924	341	13.918
	4	230	25	4.9	122.5	1.878	330	13.200
	5	231	25	5	125	1.848	294	11.760
	6	231	25	4.8	120	1.925	421	16.840
						1.895		13.082
14	1	233	23.5	5	117.5	1.983	1783	75.872
	2	233	25	5	125	1.864	1613	64.520
	3	232	24.5	4.8	117.6	1.973	1507	61.510
	4	233	24.5	4.9	120.05	1.941	1629	66.490
	5	233	24	4.9	117.6	1.981	1512	63.000
	6	233	24	5	120	1.942	1650	68.750
						1.947		66.690
28	1	230	24.5	5	122.5	1.878	50	208.034
	2	231	25	4.9	122.5	1.886	48	195.719
	3	231	24	4.9	117.6	1.964	48	203.874
	4	232	23.5	5	117.5	1.974	45	195.198
	5	232	24.5	4.9	120.05	1.933	50	208.034
	6	<u>232</u>	24.5	4.9	120.05	1.933	<u>50</u>	208.034
						1.928		203.149

ตารางที่ ง.13 แก้วถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วร้อยละ 3 ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

อายุ การบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง ที่	น้ำหนัก (Kg)	หน้าตัด (cm ²)	ความสูง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	กำลัง	กำลัง (ksc)
7	1	233	24	4.9	117.6	1.981	477	19.875
	2	229	24.5	4.9	120.05	1.908	279	11.388
	3	228	25	5	125	1.824	321	12.840
	4	228	24	4.8	115.2	1.979	374	15.583
	5	229	24.5	4.9	120.05	1.908	296	12.082
	6	229	25	5	125	1.832	433	17.320
						1.905		14.848
14	1	230	24.5	4.8	117.6	1.956	1411	57.592
	2	230	24	5	120	1.917	1535	63.958
	3	230	24.5	4.9	120.05	1.916	1589	64.857
	4	231	24	4.9	117.6	1.964	1706	71.083
	5	230	24	4.9	117.6	1.956	1666	69.417
	6	230	25	4.8	120	1.917	1772	70.880
						1.938		66.298
28	1	233	24.5	5	122.5	1.902	42	174.749
	2	232	24	4.9	117.6	1.973	40	169.895
	3	232	24	4.9	117.6	1.973	47	199.626
	4	231	24	5	120	1.925	40	169.895
	5	233	23.5	5	117.5	1.983	40	173.509
	6	<u>231</u>	<u>23.5</u>	4.8	112.8	2.048	<u>45</u>	195.198
						1.967		180.479

จ. ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหิน

ตารางที่ จ.1 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	260	230	125	0.24	13.04
2	257	227	117.6	0.26	13.22
3	259	227	125	0.26	14.10
4	260	227	120.05	0.27	14.54
5	259	229	125	0.24	13.10
6	260	227	125	0.26	14.54

ตารางที่ จ.2 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	260	232	115.15	0.24	12.07
2	263	228	125	0.28	15.35
3	261	229	117.6	0.27	13.97
4	261	229	115.15	0.28	13.97
5	265	230	117.6	0.30	15.22
6	264	229	117.6	0.30	15.28

ตารางที่ จ.3 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	258	229	120.05	0.24	12.66
2	261	230	115.15	0.27	13.48
3	264	230	110.59	0.31	14.78
4	264	231	125	0.26	14.29
5	263	233	125	0.24	12.88
6	266	232	125	0.27	14.66

ตารางที่ จ.4 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	256	230	110.59	0.24	11.30
2	260	233	117.6	0.23	11.59
3	259	234	115.15	0.22	10.68
4	258	230	120.05	0.23	12.17
5	259	229	117.6	0.26	13.10
6	261	228	125	0.26	14.47

ตารางที่ จ.5 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	256	227	110.59	0.26	12.78
2	259	229	110.59	0.27	13.10
3	261	229	120.05	0.27	13.97
4	259	230	125	0.23	12.61
5	259	229	120.05	0.25	13.10
6	258	231	115.15	0.23	11.69

ตารางที่ จ.6 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยพอลิเอทิลีนที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	258	229	110.59	0.26	12.66
2	260	231	115.15	0.25	12.55
3	260	231	117.6	0.25	12.55
4	258	230	125	0.22	12.17
5	259	228	120.05	0.26	13.60
6	259	230	115.05	0.25	12.61

ตารางที่ จ.7 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	260	230	117.6	0.26	13.04
2	259	231	110.59	0.25	12.12
3	260	229	120.05	0.26	13.54
4	261	228	125	0.26	14.47
5	259	229	120.05	0.25	13.10
6	258	228	120.5	0.25	13.16

ตารางที่ จ.8 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	258	230	125	0.22	12.17
2	258	230	125	0.22	12.17
3	258	228	117.6	0.26	13.16
4	260	229	115.15	0.27	13.54
5	259	229	125	0.24	13.10
6	258	229	120.05	0.24	12.66

ตารางที่ จ.9 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	257	228	120.05	0.24	12.72
2	259	229	110.59	0.27	13.10
3	257	228	117.6	0.25	12.72
4	257	228	120.05	0.24	12.72
5	258	229	117.6	0.25	12.66
6	259	230	125	0.23	12.61

ตารางที่ จ.10 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	260	230	117.6	0.26	13.04
2	260	230	125	0.24	13.04
3	260	230	117.6	0.26	13.04
4	258	230	115.15	0.24	12.17
5	260	229	120.05	0.26	13.54
6	261	229	125	0.26	13.97

ตารางที่ จ.11 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	259	229	125	0.24	13.10
2	261	229	125	0.26	13.97
3	260	230	125	0.24	13.04
4	261	230	125	0.25	13.48
5	261	230	120.05	0.26	13.48
6	259	230	125	0.23	12.61

ตารางที่ จ.12 ค่าการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถาถ่านหินเสริมเส้นใยแก้วที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความยาวเส้นใย 5 เซนติเมตร

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักหลัง แช่ (g)	น้ำหนักหลัง อบ (g)	ปริมาตร (cm ³)	การดูดซึมน้ำ (g/cm ³)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
1	259	229	115.15	0.26	13.10
2	261	229	117.6	0.27	13.97
3	258	229	125	0.23	12.66
4	259	230	117.6	0.25	12.61
5	258	229	117.6	0.25	12.66
6	258	228	117.6	0.26	13.16

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาเสริมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ และเส้นใยแก้ว Synthesis of Geopolymer Composites from Water Treatment Residue(WTR) Reinforced with Polyethylene and Glass Fibers

นายชนะภัย พุ่มกุมาร¹ (Chanaphai Pumkumarn)¹

รศ.ดร.สุวิมล อัสวapisit² (Suwimol Asavapisit)²

¹นักศึกษา คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
chanaphai.p@hotmail.com

²รองศาสตราจารย์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
suwimol.asa@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่สังเคราะห์จากตะกอนประปาโดยใช้ตะกอนประปาจากโรงประปาบางเขนที่มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ คือ 1.67 และทำการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ เท่ากับ 0.25 โดยทำการผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ และเส้นใยแก้วที่ปริมาณ ร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักแห้ง และความยาวเส้นใยที่ใช้ คือ 2.5 และ 5 เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างไปทำการทดสอบกำลังอัด และคด โดยบ่มตัวอย่างที่ 7 14 28 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษาพบว่าจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีการผสมเส้นใยมีค่ากำลังอัดมากที่สุดเท่ากับ 70.79 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน ส่วนผลการทดสอบกำลังคดนั้น ไม่สามารถรับแรงคดได้ทุกช่วงอายุการบ่ม เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) พบผลึกของ Sodium aluminum silicate hydrate ซึ่งมีลักษณะคล้ายเจลทั่วทั้งชิ้นงาน ดังนั้นวัสดุจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาสามารถใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่ไม่ต้องการกำลังสูง เช่น กำแพง หรืองานตกแต่งพื้นสวน

ABSTRACT: This research studied the engineering properties of geopolymer synthesized from water treatment residue (WTR) reinforced with two types of fiber. WTR from Bang Khen Water Treatment Plant with an initial molar ratio of the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ equals to 1.67. The calcined WTR was then reacted with sodium hydroxide solution at $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar ratio of 0.25. Polyethylene and glass fibers are added at 1%, 2%, and 3% dry weight basis and the length of both fibers was controlled at 2.5 and 5 cm. Compressive and flexural strengths of samples cured under ambient condition were tested at the age of 7, 14, and 28 days. Results showed that the control sample (without both fibers) has the highest compressive strength of 70.79 kg/cm² at the age of 28 days. The value of flexural strength cannot be detected from all samples. Scanning Electron Microscope (SEM) micrographs reveals the presence of sodium aluminum silicate hydrate (NASH) in the form of gel which is diffuse over the sample. Accordingly, the geopolymer synthesized from WTR can be used for construction materials that do not need high strength such as wall or garden floor.

KEYWORDS: Geopolymer, Polyethylene fiber, Glass fiber, Compressive strength, Flexural strength

1. บทนำ

วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ และ อะลูมิเนียม-ออกไซด์ เป็นส่วนประกอบหลัก เช่น เถ้าถ่านหิน ดินขาว ตะกอนประปา เป็นต้น จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์มีสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ แต่มีปฏิกิริยา และโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน และไม่ใช้ความร้อนในกระบวนการผลิตที่สูงเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ และมีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศสูงถึง 1 ตัน/ตันการผลิต (ประมาณ ร้อยละ 5-8 ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในโลก) [1] จีโอพอลิเมอร์มีสมบัติคงทนต่อการกัดกร่อนมากกว่าคอนกรีต เนื่องจากมีโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตที่แข็งแรง ทำให้สามารถใช้ในงานก่อสร้างบริเวณชายฝั่งได้ดี และทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่า [1] นอกจากนั้น

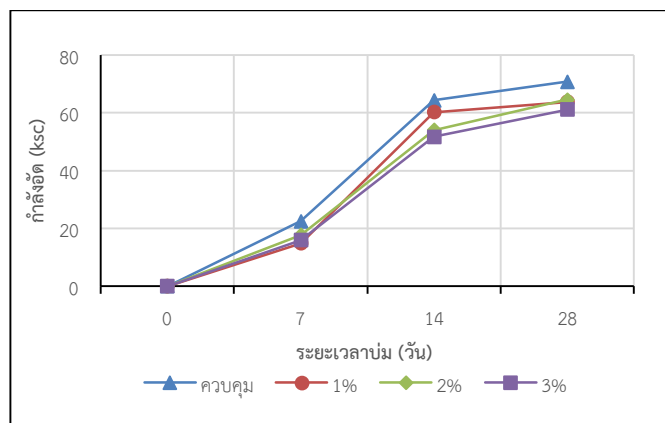
จีโอพอลิเมอร์ยังสามารถทนต่อความร้อนได้สูงกว่าปูนซีเมนต์ (ทนเปลวไฟที่อุณหภูมิประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส)

ในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาบางเขนจะมีตะกอนประปาที่ออกจากถังตกตะกอนประมาณ ปีละ 1 - 1.2 แสนตันตะกอนแห้ง [2] โดยที่ทางโรงงานผลิตไม่มีวิธีการกำจัด หรือวิธีการใช้ประโยชน์ ดังนั้นโรงผลิตน้ำประปาจึงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดดินตะกอนประปาออกจากพื้นที่ของโรงประปา ซึ่งถือเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายของทางหน่วยงานเป็นจำนวนมาก จากปัญหาในการกำจัดตะกอนดินประปา และปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมจากการผลิตปูนซีเมนต์ที่ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ดินตะกอนประปามาเป็นวัสดุตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์

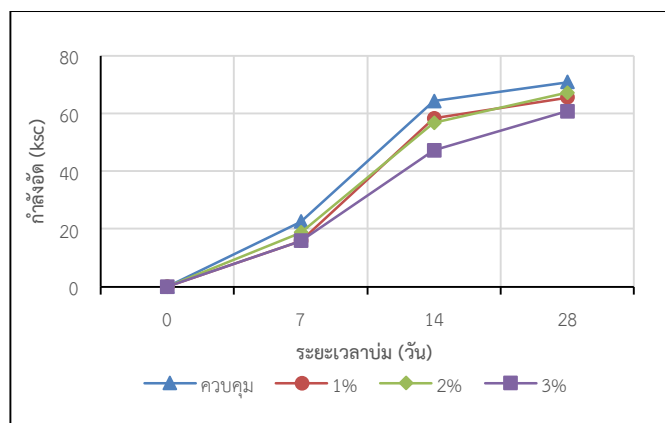
นอกจากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของ จีโอพอลิเมอร์ที่มีและไม่มีส่วนผสมเส้นใย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) และเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Energy Dispersive X-Ray Analyzer) เพื่อดูโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนประปา

4. ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของความยาว และปริมาณของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ต่อการพัฒนากำลังของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา



ก) เส้นใยพอลิเอสเตอร์ 2.5 เซนติเมตร



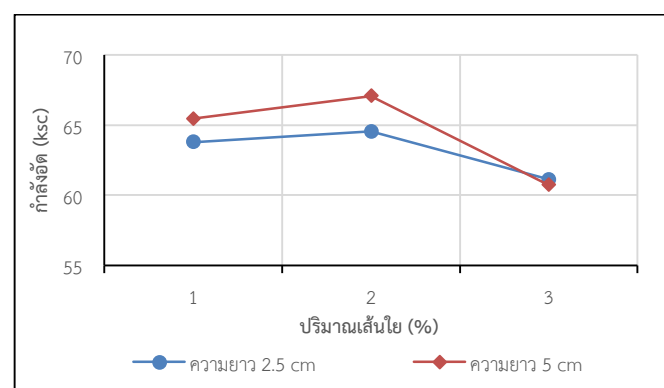
ข) เส้นใยพอลิเอสเตอร์ 5 เซนติเมตร

ภาพที่ 2 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาที่มีการผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ก) 2.5 เซนติเมตร
ข) 5 เซนติเมตร

จากภาพที่ 2 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาที่มีและไม่มีส่วนผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์จะมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 7 วันแรก ค่ากำลังอัดของทุกอัตราส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัดอย่างช้า และหลังจาก 7 วัน ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาที่ไม่มีการผสมเส้นใยมีการพัฒนากำลังอัดอย่าง

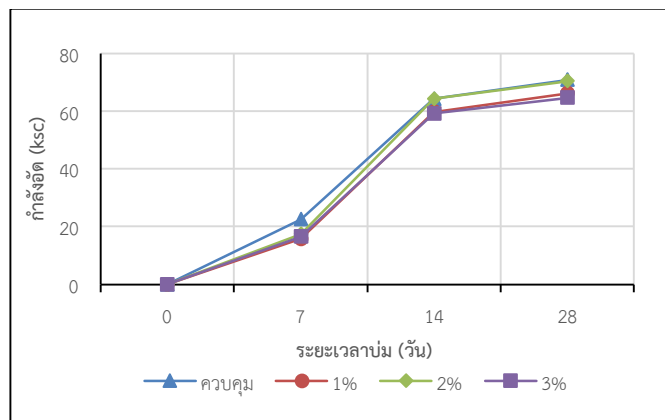
รวดเร็วจาก 22.4 เป็น 60.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มจาก 7 วัน เป็น 14 วัน และที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 70.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อมีการผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ในปริมาณร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาที่มีการผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ทุกอัตราส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสม

เมื่อเพิ่มความยาวของเส้นใยพอลิเอสเตอร์จาก 2.5 เป็น 5 เซนติเมตร (รูปที่ 2 ข) พบว่าการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น แต่ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่มีความยาว 5 เซนติเมตร มีค่าแตกต่างจากการผสมเส้นใยที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร อย่างไม่มีนัยสำคัญ

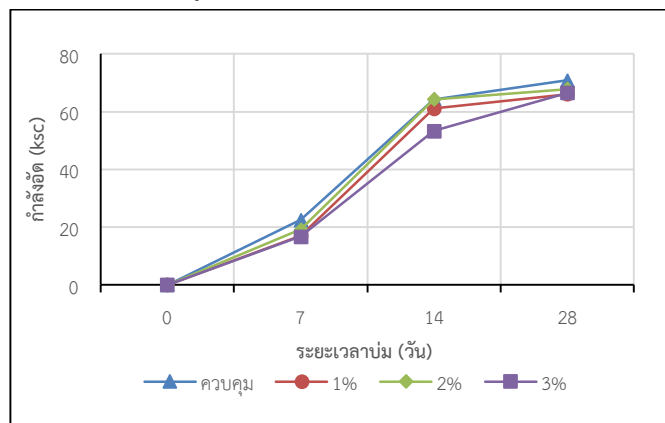


ภาพที่ 3 ปริมาณของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ส่งผลต่อกำลังอัดจากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่มีความยาว 2.5 และ 5 เซนติเมตร ที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า [8, 9, 10] เส้นใยแต่ละชนิดมีอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสมบัติของเส้นใยชนิดนั้น ๆ แต่ปริมาณที่เหมาะสมของเส้นใยพลาสติกคือร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก [11,12] และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจะมีการกระจายตัวได้ไม่ทั่วถึง ทำให้เกิดการพันกัน นอกจากนั้นเส้นใยพอลิเอสเตอร์ยังมีสมบัติการยึดติดกับจีโอพอลิเมอร์ได้ไม่ดี เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำของเส้นใย (Hydrophilic) [12] เป็นผลทำให้เกิดช่องว่างภายในก้อนตัวอย่างทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

4.2 ผลของความยาว และปริมาณของเส้นใยแก้ว ต่อ การพัฒนากำลังของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา



ก) เส้นใยแก้ว 2.5 เซนติเมตร



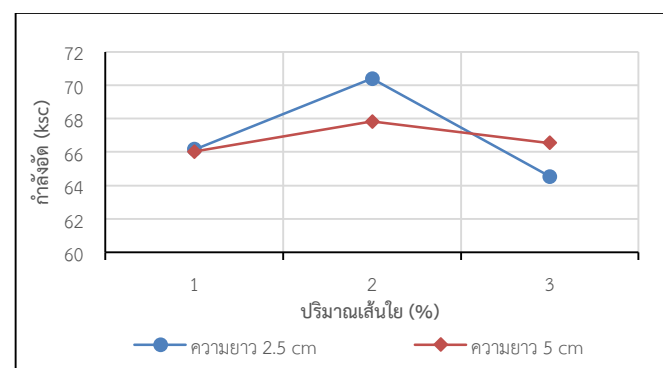
ข) เส้นใยแก้ว 5 เซนติเมตร

ภาพที่ 4 การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาที่มีการผสมเส้นใยแก้ว ก) 2.5 เซนติเมตร

ข) 5 เซนติเมตร

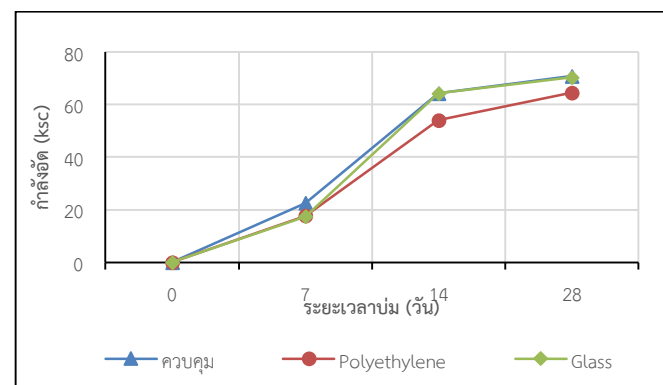
จากภาพที่ 4 เมื่อมีการผสมเส้นใยแก้วในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาที่มีความยาว 2.5 และ 5 เซนติเมตร ในปริมาณร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาที่มีการผสมเส้นใยทุกอัตราส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกับจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสม เนื่องจากเส้นใยแก้วสามารถยึดเกาะกับจีโอพอลิเมอร์ได้ดี จึงทำให้ ค่ากำลังอัดจึงใกล้เคียงกับจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสมเส้นใยแก้ว ส่วนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการผสมเส้นใยแก้วในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดต่ำที่สุด และเมื่อเพิ่มความยาวของเส้นใยแก้วจาก 2.5 เป็น 5 เซนติเมตร (รูปที่ 4 ข) พบว่า การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาที่มีและไม่มีการผสมเส้นใยแก้วที่มีความยาว 5 เซนติเมตร มีค่าต่างจากการผสมเส้นใยที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร อย่างไม่มีนัยสำคัญ

เช่นกัน แสดงให้เห็นว่า ความยาวของเส้นใยแก้วที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัด และเมื่อพิจารณาปริมาณในการผสมเส้นใยในจีโอพอลิเมอร์ (ภาพที่ 5) พบว่า ปริมาณเส้นใยแก้วที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปา มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ร้อยละ 2 ทั้งจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมเส้นใยแก้ว ความยาว 2.5 และ 5 เซนติเมตร



ภาพที่ 5 ปริมาณของเส้นใยแก้วที่ส่งผลต่อกำลังอัด

4.3 ผลของชนิดเส้นใยต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด



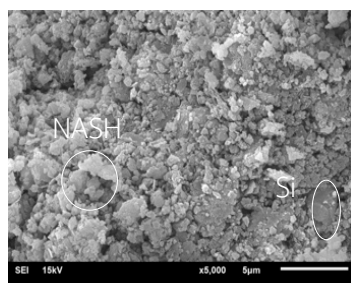
ภาพที่ 6 ผลของชนิดเส้นใยต่อกำลังอัด ที่ความยาวเส้นใย 2.5 เซนติเมตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของชนิดของเส้นใยที่ใช้ในการผสมในจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนประปา ที่มีการผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ และเส้นใยแก้วที่มีความยาว 2.5 และ 5 เซนติเมตร ในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (ภาพที่ 6) พบว่าค่ากำลังอัดของเส้นใยแก้วมีค่าใกล้เคียงกับจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสมเส้นใย และมีค่าสูงกว่าการผสมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ เนื่องจากคุณสมบัติของเส้นใยพอลิเอสเตอร์เป็นเส้นใยพลาสติกที่ไม่ชอบน้ำ และพื้นผิวของเส้นใยเรียบกว่า ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างจีโอพอลิเมอร์ และเส้นใยเกิดขึ้นได้ไม่ดี ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเกิดขึ้นต่ำตามไปด้วย [11]

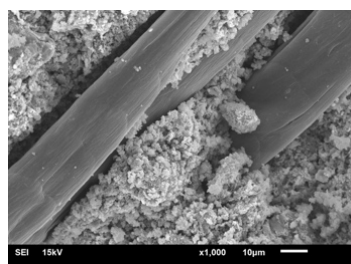
4.4 ผลการทดสอบกำลังอัด

ผลการทดสอบค่ากำลังอัด และการโค้งตัวของของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพอลิเอสทีลีน และแก้ว พบว่า ชิ้นงานเกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว อาจจะเป็นผลมาจากค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนประปาที่มีค่าที่ต่ำ และเมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยการทดสอบแบบ Three-pointed bending ร่วมกับความเร็วในการให้แรงกด ทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนประปาไม่สามารถวัดค่าได้ และเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปาพบว่า มีอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ค่อนข้างต่ำ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [13] พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2 จึงทำให้ไม่สามารถวัดค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ เสริมเส้นใยได้

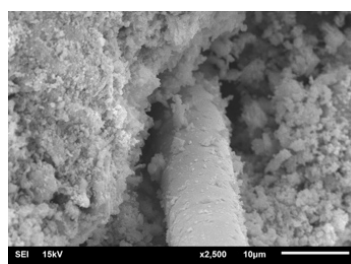
4.5 ผลการทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาค



ก) ตัวอย่างควบคุม



ข) ผสมเส้นใย PE ร้อยละ 2



ค) ผสมเส้นใยแก้ว ร้อยละ 2

ภาพที่ 7 โครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์

จากภาพที่ 7 แสดงลักษณะทางกายภาพในระดับโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่มีและไม่มี

ผสมเส้นใยพอลิเอสทีลีน และเส้นใยแก้ว ที่อายุ 28 วัน จากภาพที่ 7 ก) พบลักษณะของเจล Sodium aluminum silicate hydrate [3] เกาะกันกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของก้อนตัวอย่าง ซึ่งเกิดจากเจลในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งเป็นสาเหตุของการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์และเมื่อมีการผสมเส้นใยพอลิเอสทีลีนที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (ภาพที่ 7 ข) พบเส้นใยพอลิเอสทีลีน และเจลของจีโอพอลิเมอร์อยู่ล้อมรอบเส้นใย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากตะกอนประปาไม่ยึดเกาะกับเส้นใยพอลิเอสทีลีน ซึ่งเป็นสาเหตุให้การพัฒนากำลังอัด และกำลังดัดมีค่าต่ำ ส่วนจีโอพอลิเมอร์ที่มีการผสมเส้นใยแก้วที่มีความยาว 2.5 เซนติเมตร ในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงดัง ภาพที่ 7 ค) จากการศึกษาพบว่าเส้นใยแก้วที่ผสมมีเจลจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาเกาะรอบเส้นใย แสดงให้เห็นว่า จีโอพอลิเมอร์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยแก้วได้ดีกว่าเส้นใยพอลิเอสทีลีน ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมเส้นใยพอลิเอสทีลีน

5. สรุป

จากผลการทดสอบกำลังอัดของการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปาเสริมด้วยเส้นใยพอลิเอสทีลีน และเส้นใยแก้วที่มีความยาวเส้นใย 2.5 และ 5 เซนติเมตร ที่ปริมาณการผสมร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสมเส้นใยมีค่าสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 70.79 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อมีการผสมเส้นใยพอลิเอสทีลีน และเส้นใยแก้ว พบว่าความยาว และปริมาณเส้นใยที่ผสมในจีโอพอลิเมอร์ไม่มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ แต่เส้นใยแก้วจะมีค่ากำลังอัดสูงกว่าเส้นใยพอลิเอสทีลีน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาโครงสร้างในระดับจุลภาคที่พบว่า เส้นใยแก้วมีปริมาณเจลของจีโอพอลิเมอร์เกาะมากกว่าเส้นใยพอลิเอสทีลีน ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาสามารถสร้างกำลังดัดได้น้อยมากๆ และค่าการโค้งตัวเกิดขึ้นน้อยมากก่อนชิ้นงานจะเกิดการวิบัติ ดังนั้นจากผลของงานวิจัยในครั้งนี้จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนประปาเสริมด้วยเส้นใยนี้สามารถใช้ทดแทนงานก่อสร้างที่รับกำลังไม่มากนัก เช่น งานก่อกำแพง งานตกแต่งพื้นสวน เป็นต้น โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับอิฐมวลเบา แต่จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอน

ประปามีน้ำหนักที่มากกว่าอิฐมวลเบาอยู่เล็กน้อย จากปัญหาเรื่องการกำจัดดินตะกอนประปาออกจากโรงงาน การนำดินตะกอนประปามาทำการสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์นั้นสามารถช่วยแก้ไขปัญหานี้ และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดดินตะกอนประปาออกจากโรงงานได้ นอกจากนี้ยังลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมจากการผลิตปูนซีเมนต์อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2561 ภายใต้ชื่อโครงการ การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนดินประปาและเถาถ่านหินปิโตรลีนัสผสมเส้นใยสังเคราะห์

เอกสารอ้างอิง

- [1] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2560, วัสดุจีโอโพลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จัดพิมพ์โดย สมาคมคอลกริตแห่งประเทศไทย.
- [2] การประปานครหลวง [Internet], 2559. โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง. การประปานครหลวง. http://www.mwa.co.th/ewt_news.php?nid=1913.
- [3] ขวัญเรือน จันทวงษ์, 2557. ผลของอุณหภูมิ และความร้อนชื้นขึ้นต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนดินประปา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อม และวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [4] American Society for Testing and Materials, 2001. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (50 mm) Cube. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, 83-88.
- [5] American Society for Testing and Materials, 2001. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, 32-34.
- [6] สัณญา บุรา, 2548. การศึกษาการนำเส้นใยปอแก้วมาใช้ในงานคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [7] ศราวัน ปัญจะพลินกุล, 2548. การศึกษาวัสดุซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืช, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [8] ทวีชัย สำราญวสนิช, อภินันท์ ภูซัน, และสุรสิทธิ์ หมั่นวิชา, 2550. พฤติกรรม และวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเส้นใย. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ (30.), ฉบับที่ (2), หน้า345-362.
- [9] สัณญา บุรา, 2548. การศึกษาการนำเส้นใยปอแก้วมาใช้ในงานคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- [10] Harun Tanyildizi, and Yavuz Yonar, 2016, "Mechanical properties of geopolymers concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature", Construction and Building Materials, 2016 (Vol.126), pp.381-387.
- [11] Navid Ranjbar, Sapehr Talebian, Mehdi Mehrali, Carsten Kuenzel, Hendeik Simon, Cornelis Mestselaar, Mohd Zamin Jumaat., 2016, Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. Composites Science and Technology 2016, Vol. 122 pp.73-81.
- [12] Korniejenco K., Fraczek E., Pytlak E., Adamski M., 2016, Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers. Procedia Engineering 2016, Vol.151 pp.388-393.
- [13] ชาลินี อ่อนแสง, 2555. ผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา และชนิดของด่างต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อม และวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.