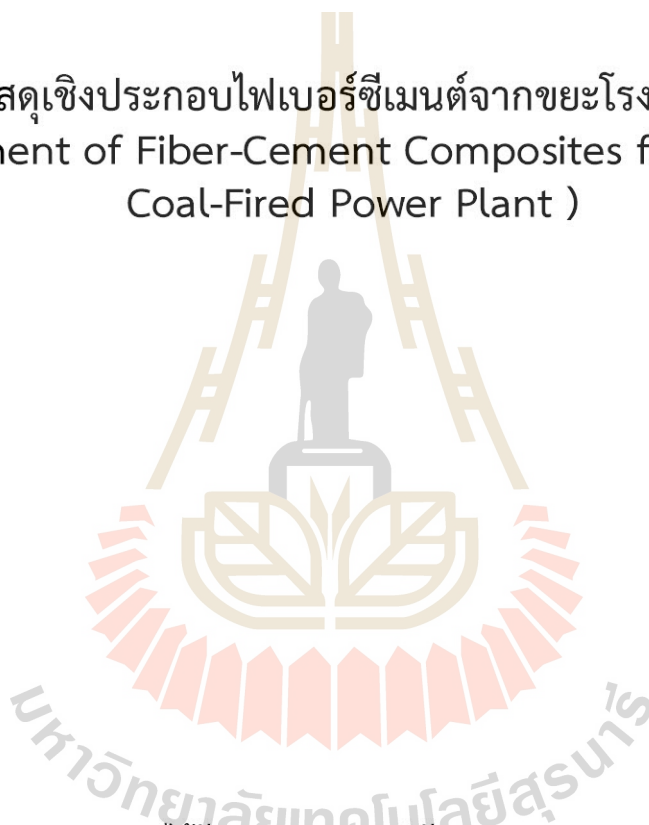




รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์จากขยะโรงไฟฟ้าถ่านหิน
(Development of Fiber-Cement Composites from Waste of
Coal-Fired Power Plant)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์จากขยะโรงไฟฟ้าถ่านหิน
(Development of Fiber-Cement Composites from Waste of
Coal-Fired Power Plant)

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนูรัตน์ ภูวานคำ

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2564

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ด้วยการสนับสนุนในครั้งนี้ ผู้วิจัยสามารถนำแนวคิดที่มีออกมาสู่การทำวิจัยจริงจนประสบผลสำเร็จ ทำให้ได้องค์ความรู้ในการนำถ้ำลอยซึ่งเป็นขยะจากโรงไฟฟ้าถ่านหินมาพัฒนาเป็นวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์ องค์ความรู้ที่ได้นำมาซึ่งแนวทางในการจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหินอย่างยั่งยืน ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.วิระยุทธ ลอประยูร และ รองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี ลอประยูร ผู้ให้แนวคิดและเป็นแบบอย่างในการทำงานที่ดีแก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณ นางสาวจิระพา ฐานะ ภรรยาของผู้วิจัยที่คอยดูแลเรื่องส่วนตัวและความเป็นอยู่ของผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างราบรื่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนรรตน์ ภูวานคำ

ผู้วิจัย

พฤษภาคม 2564

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

ไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุเชิงประกอบ (Composite material) มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement ,OPC) เป็นองค์ประกอบหลักและมีเส้นใย (Fibers) เป็นวัสดุเสริมแรง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหนึ่งในวัสดุหลักที่สำคัญที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดในโลก แต่ในปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากกระบวนการในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น ต้องใช้พลังงานความร้อนสูงและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกสู่ชั้นบรรยากาศจำนวนมาก นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามพัฒนาวัสดุที่มีชื่อว่า จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นวัสดุทางเลือกใหม่ที่ได้รับ ความสนใจมากในปัจจุบันเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีอะลูมิเนียมซิลิเกตเป็นองค์ประกอบ รวมถึงเถ้าลอยซึ่งเป็นของเสียที่ได้จากขยะโรงไฟฟ้าถ่านหิน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์ โดยใช้จีโอพอลิเมอร์ซึ่งสังเคราะห์จากเถ้าลอยเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ และเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ (Bamboo fiber)

ผลการศึกษาพบว่า เพื่อให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูงจำเป็นต้องเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และสามารถบ่มได้ที่อุณหภูมิห้อง จีโอพอลิเมอร์ที่ปราศจากการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จำเป็นต้องใช้ความร้อนจากภายนอกในการบ่มเพื่อให้ได้ความแข็งแรงที่เหมาะสมต่อการใช้งาน เส้นใยไผ่สามารถสังเคราะห์ได้โดยการนำไม้ไผ่ไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นเวลา 3 วัน เมื่อเติมเส้นใยไผ่ร้อยละ 3 โดยปริมาตร ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) และความทนต่อการดัดงอ (Flexural strength) ของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น โดยความทนต่อการดัดงอมีค่าใกล้เคียงกับค่าตามมาตรฐานสำหรับอุตสาหกรรมไฟเบอร์ซีเมนต์

Abstract

Fiber cement is widely used in the construction industry, is a composite material made of Ordinary Portland Cement (OPC) reinforced with fibers. OPC is one of the most used materials in the world. However, OPC is an environmentally unfriendly material. The production process of OPC requires high energy consumption and releases large amounts of carbon dioxide (CO₂). Geopolymer is an excellent candidate for using as a cement replacement material. Geopolymer can be synthesized from various kinds of aluminosilicate materials including fly ash (FA) which is a waste from the coal power plant. The aim of this work is to develop fiber cement composite materials. Synthesized geopolymer from FA is used as a cement replacement material, and bamboo fibers are used as reinforcement materials.

The results show that the addition of small amounts of OPC is required to obtain high strength of FA-geopolymer. By adding 5 wt% of OPC, strength of FA-geopolymer is higher than that of OPC after curing at room temperature. However, to obtain high strength, external heat curing is required for FA-geopolymer without OPC addition. Bamboo fiber is synthesized by submerging the bamboo tree in a sodium hydroxide solution concentration of 10 M for 3 days. By adding bamboo fiber 3 vol%, the compressive strength and flexural strength of FA-geopolymer are increased. Flexural strength of the bamboo fiber-geopolymer composites is close to the standard of the fiber-cement industry.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ (ไทย).....	ข
บทคัดย่อ (อังกฤษ).....	ค
สารบัญ	ง
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 จีโอพอลิเมอร์	5
2.1.1 สมบัติทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์	5
2.1.2 การทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์	6
2.1.2.1 กระบวนการชะละลาย.....	6
2.1.2.2 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไอโซไซยาเนต.....	6
2.1.3 ความแตกต่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	8
2.2 ปูนซีเมนต์.....	9
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	9
2.2.2 สมบัติของสารประกอบหลัก.....	10
2.2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง	11
2.2.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สอง.....	11
2.2.2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สาม.....	12
2.2.2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สี่.....	12
2.2.2.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า.....	12
2.3 เถ้าลอย	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย.....	13
2.3.2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย.....	14
2.3.3 ลักษณะรูปร่างเถ้าลอย.....	14
2.3.4 ขนาดและความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย	15
2.3.5 ดัชนีการพัฒนากำลังของเถ้าลอย	15
2.3.6 ความต้องการน้ำ	16
2.3.7 ความสม่ำเสมอ	16
2.3.8 แฟคเตอร์ผลคูณ.....	16
2.4 ดินขาว.....	16
2.5 วัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์.....	17
2.6 เส้นใยไฟ.....	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	24
3.1.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด	24
3.1.2 โซเดียมซัลไฟด์ชนิดสารละลาย	25
3.2 การดำเนินการทดลอง	25
3.2.1 การเตรียมเถ้าลอยและแคลไซต์เกรดลิน	26
3.2.2 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและแคลไซต์เกรดลิน.....	26
3.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าลอยและแคลไซต์เกรดลิน.....	27
3.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะและรูปร่างของเถ้าลอย	28
3.2.5 การเตรียมต่างสำหรับใช้ทำปฏิกิริยา	29
3.2.6 การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด	30
3.2.7 การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบความทนต่อการดัดงอ	30
3.2.8 การวัดเวลาในการก่อตัว.....	30
3.2.9 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.10 การทดสอบความทนต่อการดึง.....	32
3.2.11 การวัดความหนาแน่น	33
3.2.12 การทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์.....	33
3.2.13 การสังเคราะห์เส้นใยไฟ.....	34
3.2.14 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์	34
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	35
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยและแคลไซน์เกอลิน.....	35
4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของเส้นใย	35
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเส้นใย และแคลไซน์เกอลิน	36
4.4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของ จีโอพอลิเมอร์	38
4.4.1 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัด ของจีโอพอลิเมอร์	38
4.4.2 ผลความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาการ ก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์	39
4.5 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์	39
4.5.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์	40
4.5.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์	41
4.6 ผลการแทนที่เส้นใยด้วยแคลไซน์เกอลินต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์	41
4.6.1 ผลการแทนที่เส้นใยด้วยแคลไซน์เกอลินต่อค่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์	42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.2	ผลการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์แกลีนต่อ เวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์.....	43
4.7	ผลการแทนที่ผงจีโอพอลิเมอร์ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์	44
4.7.1	ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังรับแรงอัด และเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์.....	45
4.7.2	ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อความหนาแน่น ของจีโอพอลิเมอร์	46
4.7.3	ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อโครงสร้างจุลภาค (Microsturctur) ของจีโอพอลิเมอร์.....	48
4.8	การสังเคราะห์เส้นใยไฟไฟเพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับจีโอพอลิเมอร์.....	49
4.9	ผลการเติมเส้นใยไฟไฟต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์.....	51
4.9.1	ผลการเติมเส้นใยไฟไฟต่อกำลังรับแรงอัดและความทนต่อการดัดงอ ของจีโอพอลิเมอร์	51
4.9.2	ผลการเติมเส้นใยไฟไฟต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์	53
4.9.3	ผลการเติมเส้นใยไฟไฟต่อโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์	54
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	55
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	56
	รายการอ้างอิง.....	57
	ประวัติผู้เขียน.....	63
	ภาคผนวก	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการก่อสร้าง เช่น ใช้เป็นไม้เทียม ใช้ทำแผ่นฝ้าผนังเพดาน และ วัสดุตกแต่งอื่นๆอีกมากมาย ไฟเบอร์ซีเมนต์จัดเป็นวัสดุเชิงประกอบชนิดหนึ่งซึ่งมีปูนซีเมนต์เป็นเนื้อหลักเรียกว่าเมทริกซ์ (matrix) และถูกเสริมแรง (Reinforcement) ด้วยเส้นใยจากพืชหรือเส้นใยสังเคราะห์ โดยปกติแล้วปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่สามารถรับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงและแรงคดงอได้ไม่ดี การใช้เส้นใยต่างๆเป็นวัสดุเสริมแรงจะช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงคดงอของปูนซีเมนต์ให้สูงขึ้น ทำให้สามารถนำวัสดุดังกล่าวไปใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานสูง และกระบวนการผลิตยังมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในปริมาณมาก ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นสาเหตุของปัญหาสภาวะโลกร้อน ปัจจุบันมีการวิจัยวัสดุชนิดใหม่เพื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์วัสดุดังกล่าวเรียกว่า จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอพอลิเมอร์ได้รับความสนใจและมีการทำการวิจัยกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์แต่ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่า และกระบวนการผลิตยังปลอดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จึงถูกคาดหวังว่าจะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในอนาคต จีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ สารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา (Reactive solution) และผงจีโอพอลิเมอร์ เมื่อนำผงจีโอพอลิเมอร์ผสมกับสารละลายจะเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงและมีลักษณะคล้ายปูนซีเมนต์ ผงจีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) เป็นส่วนประกอบ ซึ่งเถ้าลอย (Fly ash) เป็นวัตถุดิบชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้

เถ้าลอยเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง คุณสมบัติและองค์ประกอบของเถ้าลอยขึ้นกับธรรมชาติของถ่านหินที่นำมาใช้และลักษณะของเตาเผา ในประเทศไทยโรงไฟฟ้าถ่านหินที่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โรงไฟฟ้างังกล่าวทำการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เป็นเชื้อเพลิง ประเมินการว่าในหนึ่งปีโรงไฟฟ้าแม่เมาะผลิตเถ้าลอยมากกว่า 3 ล้านตัน ดังนั้นหากรวมการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหินทั่วประเทศในหนึ่งปีจะมีการผลิตเถ้าลอยในปริมาณมหาศาล อันจะก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมาในอนาคต อย่างไรก็ตามจากสภาวะความไม่มั่นคงทางพลังงานทำให้ภาครัฐพยายามผลักดันให้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินมากขึ้น แต่โรงไฟฟ้างังกล่าวมักได้รับการต่อต้านจากชุมชน

โดยรอบเนื่องจากของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งคือ เถ้าลอย เนื่องจากส่งผลเสียต่อสถานะแวดล้อมโดยรอบชุมชน ดังนั้นหากมีการจัดการของเสียดังกล่าวให้เหมาะสม การต่อต้านการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากชุมชนจะลดลง อันจะส่งผลให้ประเทศสามารถเพิ่มกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานได้

การนำเถ้าลอยไปใช้ผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์นับเป็นหนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ มีงานวิจัยหลายชิ้นรายงานว่เถ้าลอยสามารถนำไปใช้พัฒนาเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดได้เทียบเท่าหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามจุดอ่อนที่สำคัญของจีโอพอลิเมอร์คือไม่สามารถรับแรงดึงได้ ทำให้การใช้งานถูกจำกัดแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการใช้เส้นใยเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับจีโอพอลิเมอร์ เส้นใยสำหรับใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ เส้นใยธรรมชาติและเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ จุดเด่นที่สำคัญของเส้นใยธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์แล้วคือมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถผลิตได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่า มีเส้นใยธรรมชาติหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ หนึ่งในเส้นใยเหล่านั้นคือเส้นใยไผ่ (Bamboo fiber) ซึ่งสามารถผลิตได้จากไม้ไผ่ เส้นใยไผ่มีความแข็งแรงสูงสามารถทนต่อแรงดึงและแรงดัดงอได้ดี ดังนั้นเส้นใยไผ่จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถนำมาใช้พัฒนาเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับจีโอพอลิเมอร์ได้

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์จากเถ้าลอยซึ่งเป็นขยะจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน เพื่อลดปัญหาการจัดการขยะจากโรงไฟฟ้าถ่านหินอย่างยั่งยืน และเพื่อพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อันเป็นการปูพื้นฐานในการสร้างองค์ความรู้ใหม่ด้านเทคโนโลยีสะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ผลของงานวิจัยยังจะส่งผลให้เกิดการขับเคลื่อนประเทศเพื่อเตรียมพร้อมสู่การเป็นเศรษฐกิจและสังคมคาร์บอนต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1. เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์จากเถ้าลอยและเยื่อไม้หรือเยื่อกระดาษ
- 1.2.2. เพื่อหาลักษณะของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำปฏิกิริยากับเถ้าลอยและเยื่อไม้หรือเยื่อกระดาษ เพื่อให้ได้วัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน
- 1.2.3. เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการบ่ม (อุณหภูมิ) วัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยและเยื่อไม้หรือเยื่อกระดาษ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1. ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ของเถ้าลอยและเยื่อไม้หรือเยื่อกระดาษ ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของอนุภาคเถ้าลอย และองค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น
- 1.3.2. ตรวจสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์จากเถ้าลอย ได้แก่ สัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารละลายกับเถ้าลอยและเยื่อไม้ และสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าลอยกับเยื่อไม้หรือเยื่อกระดาษ
- 1.3.3. ตรวจสอบลักษณะของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำปฏิกิริยา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย สัดส่วนในการผสมสารละลาย และ ปริมาณที่เหมาะสม
- 1.3.4. ตรวจสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบ่มวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์ ได้แก่ อุณหภูมิ ในการบ่ม
- 1.3.5. ทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยและเยื่อไม้ ได้แก่ ความแข็งแรง ความหนาแน่น ปริมาณการดูดซึมน้ำ และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1. ด้านวิชาการ งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยใหม่ และเป็นองค์ความรู้ที่มีประโยชน์ด้านการจัดการของเสียที่เป็นประโยชน์ไม่เพียงแต่เฉพาะในประเทศไทย แต่ยังเป็นประโยชน์ต่อทุกประเทศทั่วโลกที่มีการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ งานวิจัยชิ้นนี้ยังเป็นการพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นวัสดุที่ไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้งานและกระบวนการผลิต จึงเป็นงานวิจัยที่เป็นการปูพื้นฐานให้ประเทศเพื่อนำไปสู่การเป็นเศรษฐกิจและสังคมคาร์บอนต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- 1.4.2. ด้านนโยบาย งานวิจัยชิ้นนี้สอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศและนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติในหลายๆ ด้านโดยเฉพาะอย่างยิ่งยุทธศาสตร์การวิจัยรายประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมด้านการเติบโตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในประเด็นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG)

- 1.4.3. ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ งานวิจัยนี้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินนับเป็นเงินหลายล้านบาทต่อปี นอกจากนี้ยังเป็นการนำของเสียมาเพิ่มมูลค่าและใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
- 1.4.4. ด้านสังคมและชุมชน งานวิจัยชิ้นนี้จะช่วยลดปริมาณการสะสมของเถ้าลอยซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน อันจะส่งผลให้ชุมชนโดยรอบโรงงานไฟฟ้ามีสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น นอกจากนี้ในระยะยาวงานวิจัยชิ้นนี้ยังจะทำให้ได้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการช่วยลดปัญหาสภาวะโลกร้อน อันจะส่งผลให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมและชุมชนในวงกว้าง
- 1.4.5. ดังที่ได้กล่าวในเบื้องต้นว่างานวิจัยชิ้นนี้ไม่เพียงแต่เกิดประโยชน์ต่อประเทศไทยเท่านั้น แต่ยังเป็นประโยชน์ต่อทุกประเทศทั่วโลกที่ผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน ดังนั้นผลของงานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นข้อมูลที่สำคัญและมีความจำเป็นต้องนำไปเผยแพร่ให้กับหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการนำผลงานวิจัยที่ได้ไปเผยแพร่โดยการนำไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในและนอกประเทศ เช่น วารสารด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม วารสารในกลุ่มของวัสดุศาสตร์ วารสารในกลุ่มของวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น และมีความจำเป็นต้องทำการจดสิทธิบัตรผลงานวิจัยที่ได้เพื่อรักษาผลประโยชน์ของประเทศ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอพอลิเมอร์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) เป็นวัสดุที่ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ผลิตโดยการเผาแคลไซน์ (Calcined) สารประกอบ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) ที่อุณหภูมิประมาณ 1450 องศาเซลเซียส (K. Svinning, 2006) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวต้องใช้เชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก อีกทั้งยังก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในปริมาณมหาศาล ก๊าซดังกล่าวเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน จากผลกระทบดังกล่าวส่งผลให้นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุชนิดหนึ่งที่มีความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันคือ “จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)”

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างสามมิติโดยจะอยู่ในรูปของอสัณฐาน (Amorphous) มีสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) เป็นองค์ประกอบหลัก (ซิลิกา และ อะลูมินา) โดยสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตจะถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูงได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยให้ความร้อนเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวสามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ หลังจากการเกิดปฏิกิริยาแล้วจะได้วัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ (J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, 2009) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีศักยภาพและมีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานจีโอพอลิเมอร์ถูกค้นพบโดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 จากนั้นในปี 1972 J. Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ตั้งชื่อวัสดุชนิดนี้ว่า “จีโอพอลิเมอร์”

2.1.1 สมบัติทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์

วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเข้มข้นของอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) และ/หรืออัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkaline silicate) กับสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) (P. Duxson et.al., 2007) จีโอพอลิเมอร์มีสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่า และปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยมาก (J. L. Provis et.al., 2009) นอกจากนี้ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังทนต่อความเป็นกรด (Acid resistance) ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (J. Davidovits, 1987) และมีสมบัติในการยับยั้งการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะหนัก (J.S.G. van Jaarsveld et.al., 1995) ทำให้จีโอพอลิเมอร์ถูกนำไปใช้งานในการเก็บกักโลหะเป็นพิษ (J. Davidovits, 1994) จีโอพอลิเมอร์ยังมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการเหมาะต่อการ

นำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้หลากหลายเช่น มีความทนทานต่อสภาวะซัลเฟต (Sulfate resistance) มีความทนทานต่อสภาวะเยือกแข็ง (Freeze-thaw resistance) ทนทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance) มีความทนไฟ (Fire resistance) นอกจากนั้น P.G. Malone (1986) ได้รายงานว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ มีความแข็งแรงที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และยังมีฤทธิ์ต้านการหดตัวภายหลังจากการแข็งตัวน้อยกว่า (P.G. Malone, 1986)

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่เป็นของเสียเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและวัตถุดิบตามธรรมชาติที่หาได้ง่ายซึ่งที่ผ่านมาวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้สังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์มี 3 ชนิดได้แก่ ตะกรันเหล็ก (Arc furnace slag) เป็นวัสดุไม่มีพิษสามารถสังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถใช้ในงานทนไฟ (T.W. Cheng et.al., 2003) วัตถุดิบชนิดที่สองคือแคลไซน์เกาลิน (Calcined Kaolin) เป็นวัตถุดิบที่มีรูปอสัญฐานได้จากการเผาเกาลินไนต์ (Kaolinite clay) เพื่อไล่น้ำในโครงสร้างของดินออกที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส (K. Ganesan et.al., 2007) แคลไซน์เกาลินมีผลในการช่วยลดเวลาในการแข็งตัวและช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ให้กับจีโอพอลิเมอร์ (M.D. Safiuddin et.al., 2010), (S. Abhilash et.al., 2011) และวัสดุชนิดสุดท้ายคือ เถ้าลอย เป็นผลผลิตพลอยได้ (By-product) จากโรงไฟฟ้าถ่านหินมีซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ

2.1.2 การทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูงกับออกไซด์ของซิลิกอนและอะลูมิเนียม สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง สามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

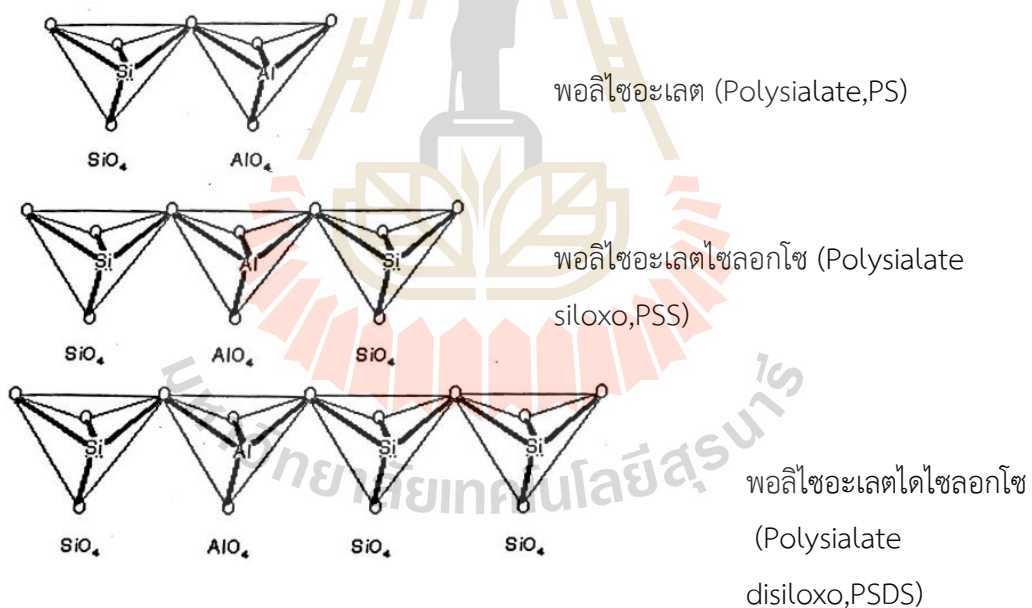
2.1.2.1 กระบวนการชะละลาย (Dissolution)

เมื่อวัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นสารประกอบออลูมิโนซิลิเกตถูกผสมเข้ากับสารละลายต่างความเข้มข้นสูง สารประกอบดังกล่าวจะถูกชะละลายแตกตัวเป็นออลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) ที่เป็นสารหลักออกมาจากวัตถุดิบตั้งต้นเมื่อเกิดการชะละลายวัตถุดิบมากขึ้นพื้นผิวของวัตถุดิบจะเกิดเป็นหลุมช่องว่างจำนวนมากทำให้สารละลายสามารถเข้าไปทำการชะละลายให้แตกตัวออกมาได้อย่าง่ายยิ่งขึ้น (A. Frenandez et.al., 2004)

2.1.2.2 ปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และการแข็งตัว (Hardness)

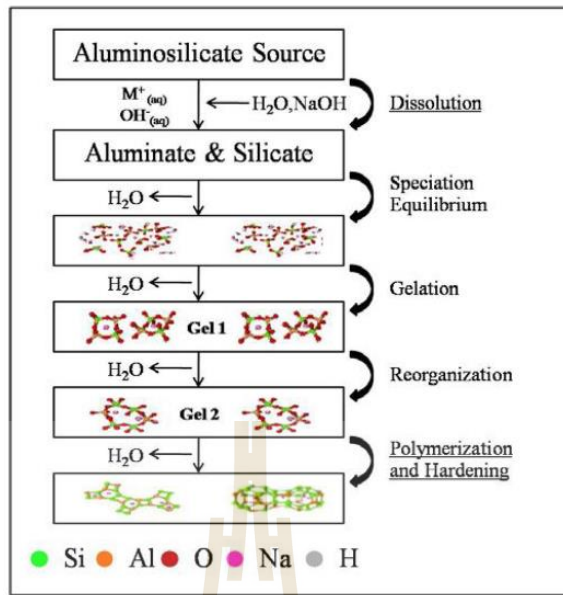
จากปฏิกิริยาเบื้องต้นจะได้ผลผลิตเป็นหน่วยพรีสมิตสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si^{4+} และ Al^{3+} ที่เกิดการโคออร์ดิเนตกันแบบ 4 แขนกับออกซิเจน (O) หน่วยเหล่านี้จะกระจัดกระจายอยู่ในรูปแบบพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมต่อขวางกันจะได้หน่วยกึ่งเสถียร (meta-stable) ในช่วงเริ่มแรกจะมี Al ปริมาณมากและเมื่อเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วย

ที่มี Si ปริมาณมาก โครงสร้างหลักๆจึงประกอบไปด้วย พีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วยได้แก่พอลิไซอะเลต (Polysialate), พอลิไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate siloxo), พอลิไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate disiloxo) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันแสดงในภาพที่ 2.2 (P. Duxson, et al., 2007) ผงจีโอพอลิเมอร์ถูกผสมเข้ากับสารละลายอัลคาไลโดยอัลคาไลไอออนและไฮดรอกซิลไอออนจะเป็นตัวเข้าไปสลายพันธะของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต อะลูมินตและซิลิเกตที่ถูกสลายพันธะจะเกิดการแตกตัวและเกิดสมดุลขึ้นใหม่ และจัดเรียงตัวก่อตัวเป็นเจลของโครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกตจากนั้นจะขึ้นรูปเป็นโครงสร้างแบบสายโซ่และแข็งตัว โดยมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ (1) อัลคาไลจะเข้าสลายพันธะโครงสร้างของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตเกิดการแตกตัวในขั้นตอนนี้ (2) เริ่มเกิดการสร้างสมดุลและจัดเรียงโครงสร้างขึ้นใหม่ (3) เกิดการควบแน่นและจัดเรียงโครงสร้างตัวเป็นเจลของโครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกต (4) เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ (5) เกิดการควบแน่นแบบโพลีคอนเดนเซชันและแข็งตัว



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างการเชื่อมพันธะของพอลิไซอะเลตที่มี Si:Al =1 (PS), Si:Al =2 (PSS) และ Si:Al=3 (PSDS) ตามลำดับ (Davidovits, 1988b)

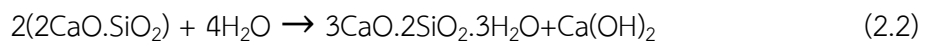
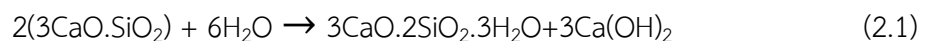
จากการทำปฏิกิริยาถูกโซโมเลกุลจะมีการเชื่อมขวางและต่อกันมากขึ้นในลักษณะของเส้นใยพอลิเมอร์(Polymer Chain) ส่งผลให้โครงสร้างเกิดความสามารถรับกำลังแรงอัดได้

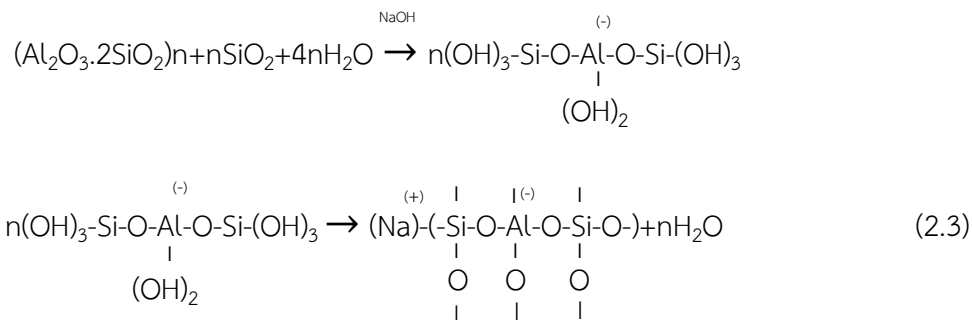


ภาพที่ 2.2 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน
(Jimenez, et . al., 2004 และ Hench,1998)

2.1.3 ความแตกต่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ลักษณะโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์มีความแตกต่างจากลักษณะโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตรงที่องค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน การเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์นั้นจะไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) เหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement hydration) ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 เนื่องจากวัตถุประสงค์ตั้งต้นแตกต่างกัน จีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างหลักเป็นแบบสามมิติที่มีซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) และ ออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบโดยการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization) จะเกิดจากการสลายตัวของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตภายใต้สภาวะความเป็นด่างสูงจึงเป็นการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดการจับตัวและจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer Chain) ดังสมการที่ 2.3 โดยปกติแล้วการจะเกิดสายโซ่พอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็วนั้นจำเป็นต้องใช้ความร้อนเป็นตัวช่วยในการเร่งปฏิกิริยา





2.2 ปูนซีเมนต์

เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน วัสดุที่สำคัญที่นำมาผลิตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น ได้แก่ วัสดุที่มีส่วนประกอบของปูนขาว (Lime) มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO₃) วัสดุเหล่านี้สามารถพบได้ตามแหล่งธรรมชาติ เช่น หินปูน (Limestone) หินชอล์ก (Chalk) ดินขาว (Kaolinite) รวมถึงวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีของ ซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ แหล่งวัสดุสามารถพบตามธรรมชาติ ได้แก่ ดินดำ (Clay) ดินดาน (Shale) หินชนวน (Slate) และวัสดุที่ใช้ปรับแต่งสมบัติ (Corrective Materials) เป็นต้น

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แบ่งออกเป็นสองระบบได้แก่ กระบวนการผลิตระบบเปียก (Wet process) และกระบวนการผลิตระบบแห้ง (Dry process) โดยนำวัตถุดิบตามธรรมชาติมาทำการบดให้ละเอียดผสมตามสัดส่วนให้เข้ากันด้วย Wet process หรือ Dry process แล้วเผาด้วยเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ความร้อนจากเตาเผาจะทำให้น้ำระเหยออกสู่อากาศภายนอกเหลือแต่เม็ดดินจนถึงอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้สารประกอบแคลเซียมอะลูมินาเตและเฟอร์ไรต์ (Calcium aluminat and ferrite) และเกิดปฏิกิริยาสมบูรณที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 1400-1600 องศาเซลเซียส เกิดการหลอมตัวรวมกันเป็นเม็ดซีเมนต์ จากนั้นจะถูกลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลต่ออัตราการเกิดผลึก (Crystal) ในเม็ดปูน เมื่อได้เม็ดปูนแล้วจะถูกนำมาบดและเติมแร่ยิปซัมเพื่อช่วยในการหน่วงเวลาการก่อตัวของซีเมนต์

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (แสดงในตารางที่ 2.1) ซึ่งองค์ประกอบหลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO₂), อะลูมินา (Al₂O₃) และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันแล้วได้มากกว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รองและอื่นๆผสมอยู่ด้วย ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), โซเดียมออกไซด์ (Na₂O), โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O), ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃), ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) และ ฟอสฟอรัส

เพนทอกไซด์ (P_2O_5) เมื่อทำการเผาออกไซด์เหล่านี้แล้วจะได้สารประกอบ 4 ชนิด ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต องค์กรประกอบทางเคมีคือ $3CaO \cdot SiO_2$ และย่อว่า C_3S , ไดแคลเซียมซิลิเกตองค์กรประกอบทางเคมีคือ $2CaO \cdot SiO_2$ และย่อว่า C_2S , ไตรแคลเซียมอลูมิเนต องค์กรประกอบทางเคมี คือ $3CaO \cdot Al_2O_3$ และย่อว่า C_3A , เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ องค์กรประกอบทางเคมี $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ และย่อว่า C_4AF

ตารางที่ 2.1 องค์กรประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549)

องค์กรประกอบทางเคมี	องค์กรประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		
	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ค่าเฉลี่ย
CaO	C	60-67	64.4
SiO ₂	S	17-25	20.0
Al ₂ O ₃	A	3-8	5.8
Fe ₂ O ₃	F	0.5-6.0	3.2
MgO	M	0.1-4.0	0.5
Na ₂ O	N	0.1-1.8	0.5
K ₂ O	K	0.1-1.8	0.5
SO ₃	S̄	0.5-3.0	2.6
สารประกอบอื่น ๆ	-	1.0-3.0	1.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition)	LOI	0.1-3.0	1.0
กากที่ไม่ละลายในกรดและต่าง (insoluble residue)	L	0.2-0.8	0.5

2.2.2 สมบัติของสารประกอบหลัก

ตัวกำหนดสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีมากถึงร้อยละ 90 ได้แก่ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ซึ่งสมบัติสามารถสรุปได้ดังนี้คือ C_3S ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปริมาณมากที่สุดประมาณร้อยละ 45-55 จะให้สีเทาแก่สามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสซึ่งการสลายตัวจะเป็นไปอย่างค่อนข้างช้าและเมื่อลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 700 องศาเซลเซียส จะเกิดความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัวให้กำลังรับแรงอัด

ค่อนข้างดีโดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก ในขณะที่เกิดการก่อตัวนั้นเป็นปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำ เรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดการคายความร้อนขึ้นประมาณ 500 จูล/กรัม เรียกว่า ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of hydration)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มี C_2S อยู่โดยประมาณร้อยละ 15-35 โดยทั่วไป C_2S จะมีความบริสุทธิ์ 4 รูปแบบได้แก่ α - C_2S เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิลดลงจะเปลี่ยนสภาพเป็น β - C_2S และเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิกัดจะเปลี่ยนสภาพเป็น β - C_2S ปกติแล้ว C_2S ที่ปะปนอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะไม่มีความบริสุทธิ์เนื่องจากมีสารอื่นๆผสมอยู่ด้วย ส่งผลให้ไม่เกิดการเปลี่ยนสภาพจาก β - C_2S เป็น C_2S ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ β - C_2S มีความเสถียรที่อุณหภูมิปกติ กำลังแรงรับอัดที่ให้เป็นไปค่อนข้างช้ามาก คือหลังจากทำปฏิกิริยากับน้ำจะเริ่มให้กำลัง แรงรับอัดหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไปและความร้อนจากปฏิกิริยาเมื่อผสมกับน้ำจะไม่สูงเทียบเท่า C_3S

ลักษณะรูปร่างของ C_3A มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมีสีเทาอ่อนกว่า C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีอยู่โดยประมาณร้อยละ 7-15 เมื่อผสมกับน้ำแล้วจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว เกิดการก่อตัวขึ้นทันทีสามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ภายในหนึ่งวัน ความร้อนจากปฏิกิริยาเมื่อผสมกับน้ำจะสูงมากในขณะที่ C_4AF ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีอยู่โดยประมาณร้อยละ 5-10 เมื่อผสมกับน้ำแล้วจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเหมือนกับ C_3A แต่ความร้อนจากปฏิกิริยากับน้ำจะมีค่าปานกลางไม่สูงเทียบเท่า C_3A สามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ภายในหนึ่งวันเช่นกัน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆให้เหมาะสมต่อการใช้งานประเภทต่างๆกำหนดให้มีมาตรฐาน ASTM C-150 และมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 1 ดังต่อไปนี้

2.2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง

เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) คุณภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C-150 TYPE 1 และมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 1-2555 ประเภทหนึ่ง ให้ความร้อนและกำลังแรงอัดปานกลางใช้ในงานคอนกรีตทั่วไปเช่นงานคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็ก งานก่อสร้างสะพาน ถนนหรือผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมที่รับแรงอัดประเภทต่างๆ

2.2.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สอง

เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดัดแปลง (Modified Portland Cement) ให้ความร้อนต่ำกว่าแต่ให้กำลังแรงอัดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งใช้สำหรับงานโครงสร้างที่ต้องการความทนทานต่อการแทรกซึมของซัลเฟตจากสภาพแวดล้อมระดับปานกลางเช่น

น้ำเสียจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม น้ำในดินและน้ำใต้ดิน งานหล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่
ต่อม่อสะพาน เป็นต้น

2.2.2.3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่สาม

เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ก่อตัวเร็ว (High Early Strength Portland Cement) คุณภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C-150 TYPE 3 และใน
มาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 1-2555 ให้กำลังอัดเร็วในระยะแรก
ลักษณะเป็นผงละเอียดขนาดเล็กและมีปริมาณ C_3S มากกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาทำให้เกิด
ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและให้ความร้อนสูง เหมาะกับการนำไปใช้กับงานคอนกรีตที่ต้องการ
รับน้ำหนักและถอดแบบเร็วด่วน เช่นเสาเข็มคอนกรีต แผ่นพื้น คาน และเสาไฟฟ้า เป็นต้น

2.2.2.4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทประเภที่สี่

เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) คุณภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C595 เหมาะสำหรับงาน
คอนกรีตที่มีปริมาณเทครั้งละมากๆ ขณะก่อตัวให้ความร้อนต่ำ เนื่องจากมี C_3S น้อยกว่าปูนซีเมนต์
พอร์ตแลนด์ธรรมดา ใช้ในการก่อสร้างเขื่อนซึ่งการขึ้นโครงสร้างจำเป็นต้องใช้คอนกรีตจำนวนมากใน
การก่อสร้างแต่ละครั้งและเกิดคายความร้อนสะสมภายในสูงทำให้คอนกรีตภายในเกิดการขยายตัว
และเกิดการแตกร้าวตามมา การใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะช่วยควบคุมความร้อนขณะเกิด
การก่อตัวให้เป็นไปอย่างช้าๆ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตประเภทนี้จะค่อยๆเพิ่มขึ้น ปูนซีเมนต์พอร์ต
แลนด์ประเภที่สี่นี้ยัง ไม่มีการผลิตและจำหน่ายภายในประเทศ

2.2.2.5 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ห้า

เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) คุณภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C-150 TYPE 5 และ
มาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 1-2555 ประเภทห้า มีระยะเวลาการก่อ
ตัวและแข็งตัวช้ากว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง มี C_3A น้อยมาก ใช้สำหรับงานโครงสร้างที่
อยู่บริเวณน้ำเค็ม หรือโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณที่มีดินเค็ม เช่น งานโครงสร้างท่าเทียบเรือ สะพานปลา
อาคาร และสิ่งปลูกสร้างต่างๆริมทะเล เป็นต้น

2.3 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly ash) เป็นขยะจากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง
เริ่มถูกนำมาใช้ในราวปี ค.ศ.1930 เป็นถ่านหินขนาดเล็กมีขนาดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรไปจนถึง
ประมาณ 200 ไมโครเมตร สาเหตุที่เรียกว่าเถ้าลอยเนื่องจากเป็นขี้เถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการ
เผาไหม้ของถ่านหินหรือลิกไนต์ โดยจะปลิวปะปนไปกับก๊าซร้อนและออกสู่ชั้นบรรยากาศภายนอก

ทางด้านปล่องควันของโรงงานผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหินจึงเรียกว่าเถ้าลอย ซึ่งหากมีปริมาณเถ้าปลิวปะปนในชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมากอาจส่งผลก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศได้ ดังนั้นโรงงานผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหินจึงมีการติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตัดแยกก๊าซร้อนและเถ้าลอยให้ออกจากกันก่อนปล่อยก๊าซร้อนออกสู่บรรยากาศ เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล เถ้าลอยมีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อเถ้าลอยอยู่ในสภาพที่แห้งหรือเป็นผงฝุ่น จะไม่มีสมบัติในการเชื่อมเกาะหรือยึดเกาะกันระหว่างอนุภาค และเมื่อเถ้าลอยสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เกิดเป็นสารใหม่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน (Cementitious) ความสามารถในการเชื่อมประสานและลักษณะต่างๆของเถ้าลอยนั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหินและปัจจัยอื่นๆเช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ช่วงระยะเวลาในการเผา ดังนั้นคุณภาพและลักษณะรูปร่างต่างๆรวมถึงความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหินด้วยเช่นกัน

2.3.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้จำแนกประเภทของเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

2.3.1.1 ประเภทชั้นคุณภาพเอฟ (Class F) คือเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินชนิดแอนทราไซต์และชนิดบิทูมินัส โดยมีปริมาณของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยในชั้นคุณภาพเอฟ จะมีปริมาณ CaO ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงเรียกกันทั่วไปว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ ในขณะที่ซิลิกาปริมาณสูงนั้นได้มาจากดินเหนียวและ ควอร์ตซ์ที่มีอยู่ในถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ และชนิดบิทูมินัสจึงส่งผลให้เถ้าลอยชั้นคุณภาพเอฟมีซิลิกาสูง (R. Siddique, 2003)

2.3.1.2 ประเภทชั้นคุณภาพซี คือเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหิน ชนิดลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) โดยออกไซด์รวมกันมากกว่าร้อยละ 50 มีสมบัติอื่นตามมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าลอยประเภทนี้มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณสูงจึงเรียกเถ้าลอยชนิดนี้ว่าเถ้าลอยคุณภาพสูง

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

องค์ประกอบทางเคมี	ชั้นคุณภาพเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพเอฟ	ชั้นคุณภาพซี
ผลรวมของปริมาณซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ ($\text{SiO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) Min%	70.0	50.0
ชั้นเฟอร์โตรอกไซด์ (SO_3) Max%	5.0	5.0
ปริมาณความชื้นไม่เกิน Max%	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI) Max%	6.0	6.0
อัลคาไลในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) Max%	1.5	1.5

2.3.2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

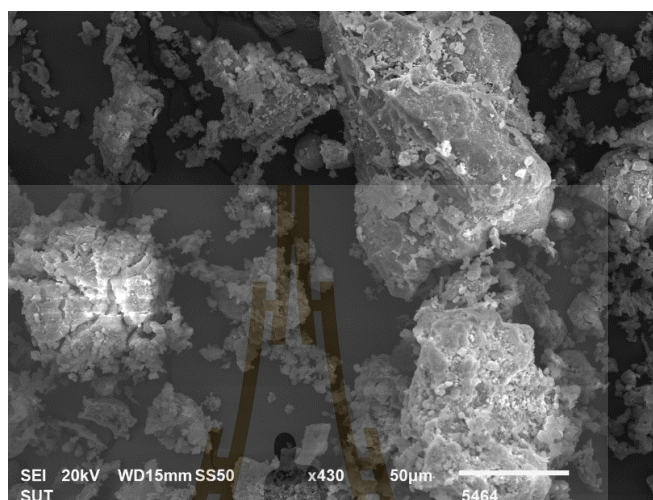
สมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอยอาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น กระบวนการเผาไหม้ หากมีการเผาถ่านหินร่วมกับน้ำมันเตามักจะมีการเติมวัสดุบางอย่างเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ และลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบสมบัติต่างๆของเถ้าลอยก่อนนำไปใช้งานจึงมีความจำเป็น โดยมาตรฐานที่ใช้ควบคุมสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยได้แก่มาตรฐาน ASTM C618

2.3.3 ลักษณะรูปร่างเถ้าลอย

โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยส่วนใหญ่จะมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมในบางครั้งอาจพบเห็นเถ้าลอยลักษณะมีรูพรุนหรือพบเป็นลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนฉิวขรุขระเนื่องจากการเผาในระบบฟลูอิดไดซ์เบดทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากพอที่จะทำให้เกิดการหลอมตัวของซิลิกาส่งผลให้มีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่เกิดการหลอมละลาย ดังนั้นจึงทำให้มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยจะมีความแตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างสิ้นเชิงโดยลักษณะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นเป็นแท่งเข็มหรือเป็นเหลี่ยมสานตัวกันเกิดความแข็งแรงภายในสามารถรับกำลังแรงอัดได้

เมื่อทำการถ่ายภาพอนุภาคเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ที่ทำการเผาโดยบริษัท ดับเบิล เอ (1991) จำกัด (มหาชน) จังหวัดปราจีนบุรี ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบรูปร่างเถ้าลอยทั้งที่เป็นทรงกลมและรูปร่างที่ไม่แน่นอนขนาดคละกัน ดังภาพที่ 2.3 ภายในเถ้าลอยยังประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นโพรงเรียกว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) เกิดจากก๊าซในขณะที่กำลังเผาไหม้ (CS. Poon et al., 2003., PK. Kolay et al., 2001) อีกทั้งยังมีเถ้าลอยที่มีความกลวงด้านในและมีอนุภาคของเถ้าลอยขนาดเล็กๆแทรกอยู่

ภายในเรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) (SV.Vassilev et al., 2003.) การเผาเถ้าลอยที่อุณหภูมิสูง จึงทำให้เถ้าลอยนั้นมีองค์ประกอบหลักเป็นแก้ว (Aluminosilicate glass) และเนื่องจากการเผาที่ อุณหภูมิสูงส่งผลให้เถ้าลอยมีสมบัติทนความร้อนได้ดีและมีน้ำหนักเบา



ภาพที่ 2.3 รูปร่างของเถ้าลอยซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.3.4 ขนาดและความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

อนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอนไปจนถึง 200 ไมครอนโดยคิดเฉลี่ยแล้วเถ้าลอยจะมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 15-30 ไมครอน ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ใช้วิธีทดสอบ เช่นเดียวกับการทดสอบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน ASTM C118 (L. Jiang, et al., 2001) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.9-2.9 (Siddique, 2003, N. Bouzoubaa et.al., 2003, P. Chindaprasirt et.al., 2004) ซึ่งจะพบว่าต่ำกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยที่สูงนั้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากปริมาณร้อยละของ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่ผสมอยู่ในปริมาณมากนอกเหนือจากนั้นยังพบว่าความถ่วงจำเพาะจากการเผาเถ้าลอยในรอบเดียวกันหากอนุภาคของเถ้าลอยมีความละเอียดจะส่งผลให้มีความถ่วงจำเพาะที่สูงกว่าอนุภาคเถ้าลอยที่มีความหยาบ

2.3.5 ดัชนีการพัฒนากำลังของเถ้าลอย

ดัชนีการพัฒนากำลัง (Strength Activity Index) เป็นการวัดความเป็นปอซโซลานของเถ้าลอยสามารถทำการวัดได้หลายวิธี การหาค่าดัชนีการพัฒนากำลังใช้การวัดตามมาตรฐาน ASTM C618 เป็นการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 หรือ 28 วันใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน C311 โดยใช้มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109 มอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปริมาณ 400 กรัม เถ้าลอย 100 กรัม ทราຍมาตรฐาน (Graded standard sand) 1,375 กรัม และ ผสมน้ำที่ให้ค่าการไหลผ่าน ± 5 ของการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ควบคุมตามมาตรฐาน ASTM C618 ทำ การควบคุมส่วนผสมอย่างต่ำร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน

2.3.6 ความต้องการน้ำของเถ้าลอย

ในเรื่องความต้องการน้ำของเถ้าลอยถูกระบุตามมาตรฐาน ASTM C618 โดย มาตรฐาน ASTM C311 ระบุให้ใช้ส่วนผสมเดียวกันกับการทดสอบหาดัชนีการพัฒนากำลังเถ้าลอยที่มี อนุภาคเป็นทรงกลมจะช่วยให้ส่วนผสมมีความลื่นไหลได้ดีจึงส่งผลทำให้ส่วนผสมนั้นมีความต้องการน้ำ ต่ำ การที่ส่วนผสมมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นนั้นหมายถึงเถ้าลอยมีรูปร่างที่ไม่เป็นทรงกลม หรือ มีผิวที่ ขรุขระและมีรูพรุนมากจึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน

2.3.7 ความสม่ำเสมอของเถ้าลอย

ความสม่ำเสมอของเถ้าลอย ได้มีการกำหนดให้ตรวจสอบสองส่วนได้แก่ปริมาณร้อยละที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C311 และความหนาแน่น (Density) ตาม มาตรฐาน ASTM C118 โดยกำหนดให้ใช้เถ้าลอย 50 กรัม แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 64 กรัม ระบุ ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นไม่เกินร้อยละ 5 และความหนาแน่นของตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะต้องไม่ แตกต่างจากค่าเฉลี่ยสิบตัวอย่างที่ทำการทดสอบก่อนหน้า หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด หากทำการทดสอบจำนวนไม่ถึงสิบตัวอย่าง

การทดสอบปริมาณร้อยละของเถ้าลอยที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C430 โดยระบุให้ปริมาณร้อยละของเถ้าลอยที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกิน ร้อยละ 5 ตามมาตรฐาน ASTM C618 ความหนาแน่นของตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะต้องไม่แตกต่าง จากค่าเฉลี่ยสิบตัวอย่างที่ทำการทดสอบก่อนหน้า หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมดหากทำ การทดสอบจำนวนไม่ถึงสิบตัวอย่าง

2.3.8 แฟคเตอร์ผลคูณ (Multiple factor)

แฟคเตอร์ผลคูณคือค่าแสดงความระเอียดของเถ้าลอยค่าหนึ่ง ซึ่งหาได้จากผลคูณ ระหว่างปริมาณกาค้ำตะแกรงเบอร์ 325 กับค่าน้ำหนักที่หายไปหลังการเผา ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C618 กำหนดให้แฟคเตอร์ผลคูณต้องไม่เกิน 255 ทั้งนี้ค่าดังกล่าวใช้ได้กับเถ้าลอยชั้นคุณภาพ เอฟเท่านั้น

2.4 ดินขาว

ดินขาว (Kaolinite) เป็นดินชนิดปฐมภูมิ (Primary Clay) ได้จากกระบวนการทำเหมืองแบบ เปิด (Open-cast Pits) โดยใช้น้ำแรงดันสูงในการฉีกชะล้างดิน จากนั้นน้ำจะพัดพาเอาดินและ

สิ่งเจือปนไปยังด้านล่างของเหมือง จากจุดนี้ น้ำดินจะถูกผสมกับสารแขวนลอยและถูกบีบไปยังถังตกตะกอนขนาดใหญ่ซึ่งสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกตกตะกอนแยกออกไป ทำให้ในสารแขวนลอยดังกล่าวเหลือเพียงอนุภาคของดินและสิ่งเจือปนที่มีขนาดเล็กกว่าเท่านั้น ในขั้นตอนต่อมาสิ่งเจือปนในน้ำดินจะถูกแยกออกด้วยเครื่องไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclones) สารแขวนลอยจะเกิดการหมุนเหวี่ยงอยู่ภายในทำให้สิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ถูกแรงเหวี่ยงหมุนออกมาอยู่ที่บริเวณด้านข้างของไฮโดรไซโคลอนจากนั้นจะตกลงสู่ด้านล่างและถูกกำจัดออกสู่ด้านบนออกไป อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าซึ่งจะอยู่บริเวณตรงกลางของแรงเหวี่ยงหมุนจะถูกเหวี่ยงไปทางด้านบนรวมเป็นองค์ประกอบของดินต่อไป หากทำการหมุนเหวี่ยงน้ำดินด้วยกระบวนการไฮโดรไซโคลอนต่อไป สิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาด 30 ไมครอนจะถูกแยกออกเหลือไว้เพียงส่วนของวัตถุดิบที่มีความละเอียดมาก ๆ และมีองค์ประกอบที่เป็นส่วนของดินรวมอยู่มากกว่า 95%

การใช้ไฮโดรไซโคลอนเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนดังกล่าวให้ออกไปจากเนื้อดิน จะทำการกำจัดที่ขนาดอนุภาคละเอียดขึ้นที่ประมาณ 15 ไมครอน ทำให้ดินที่ได้มีความขาวและมีความบริสุทธิ์ที่ค่อนข้างสูง ดินที่ได้จะถูกนำมาผ่านกระบวนการแยกน้ำออกจากเนื้อดินโดยการตกตะกอนหรือการอัดกรอง (Filter Pressing) และผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเตาชนิดพิเศษในขั้นตอนสุดท้าย

ปริมาณสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในเนื้อดินมีปริมาณที่น้อยทำให้ดินขาว (China Clays) มีสมบัติหลังเผาที่ดี ให้สีหลังเผาที่ขาวมากซึ่งจะตรงกันข้ามกับดินประเภททุติยภูมิ (Secondary Clays) ที่พบโดยส่วนใหญ่เนื่องจากดินประเภทนี้มีสิ่งเจือปนอยู่ในปริมาณมากทำให้ดินมีสีที่ขาวนวลหลังเผาและดินจากบางแหล่งอาจจะให้สีหลังเผาเป็นสีงาช้าง (Ivory) สีฟางข้าว (Straw) สีน้ำตาล (Brown) หรือสีแดง (Red) ซึ่งแล้วแต่แหล่งที่มาของดินนั้นๆ

ดินขาวโดยทั่วไปจะมีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ทำให้ความเหนียว (Plasticity) และความแข็งแรงก่อนเผา (Unfired Strength) น้อยกว่าดินที่จัดอยู่ในประเภทดินทุติยภูมิ (Secondary Clays) ดังนั้นในเนื้อดินประเภท Bone China ซึ่งจำเป็นจะต้องให้ได้สีของเนื้อดินหลังเผาที่มีความขาว ผู้ผลิตจะใช้ดินประเภททุติยภูมิ (Secondary Clays) เป็นส่วนประกอบได้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งจะทำให้เนื้อดินมีความเหนียว (Plasticity) และความแข็งแรงก่อนเผา (Unfired Strength) ที่เพิ่มขึ้น และอย่างที่ทราบคืออยู่แล้วว่าในทางทฤษฎีนั้นดินเคโอลินต์ (Kaolinite) บริสุทธิ์จะมีองค์ประกอบทางเคมีตามสูตร $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

2.5 วัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์

วัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุที่มีซีเมนต์เป็นเนื้อหลักและถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มความทนต่อแรงดัดงอ (Flexural strength) ให้กับซีเมนต์ เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าซีเมนต์เป็นวัสดุที่รับแรงอัด (Compressive stress) ได้ดีมากแต่มีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile

stress) ที่ต่ำมาก ดังนั้นเส้นใยชนิดต่างๆ ที่ทนต่อแรงดึงได้ดีจึงถูกเติมเข้าไปในซีเมนต์เพื่อเพิ่มความทนต่อแรงดึงให้กับซีเมนต์ เส้นใยที่ถูกใช้เพิ่มความทนต่อแรงดึงของซีเมนต์มี 2 กลุ่มได้แก่เส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์เช่นเส้นใยเหล็ก เส้นใยแก้ว และเส้นใยพอลิเมอร์ เป็นต้น และ กลุ่มที่ 2 เป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติเช่นเส้นใยที่ได้จากแรียหิน เป็นต้น ปัจจุบันเส้นใยจากธรรมชาติได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างกว้างขวางในการนำมาใช้เพื่อเพิ่มความทนต่อแรงดึงให้กับซีเมนต์เนื่องจากใช้พลังงานในการสังเคราะห์ที่ต่ำกว่า และมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่มากกว่าเส้นใยที่ได้จากการสังเคราะห์ เส้นใยไผ่เป็นหนึ่งในเส้นใยธรรมชาติที่ได้รับความนิยมในการนำมาเพิ่มความทนต่อแรงดึงของซีเมนต์ เนื่องจากเส้นใยไผ่ทนต่อแรงดึงได้ดี มีราคาถูก น้ำหนักเบา และง่ายต่อการตัดแต่ง (Adel และคณะ, 2021)

2.6 เส้นใยไผ่ (Bamboo fiber)

ไผ่ไผ่สามารถเติบโตได้ทุกทวีปทั่วโลกเป็นไม้ที่อยู่ในสกุลเดียวกับกล้วย มีสายพันธุ์แตกต่างกันมากกว่าหนึ่งพันสายพันธุ์ ไผ่ไผ่เป็นไม้ชนิดโตเร็วภายในระยะเวลา 5 ปีหลังจากการปลูกจะโตเต็มที่ และสามารถนำมาใช้งานได้ องค์ประกอบส่วนใหญ่ของไผ่ไผ่ประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) ประมาณร้อยละ 26-45 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ประมาณร้อยละ 30 ลิกนิน (Lignin) ประมาณร้อยละ 21-31 ไขมัน (Oil) และ ไช (Wax) ไผ่ไผ่เป็นไม้ที่มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูง ไผ่ไผ่ถูกนำมาใช้งานในชีวิตประจำวันมาอย่างช้านาน นอกจากนี้ไผ่ไผ่ยังถูกใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรงในคอนกรีตเช่นเดียวกับเหล็กเส้นเนื่องจากไผ่ไผ่มีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่สูง ในทำนองเดียวกันยังมีงานบางประเภท ที่แยกเอาเฉพาะเส้นใยไผ่เพื่อนำไปใช้เสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปเสริมแรงในซีเมนต์ Noori et al. (2021) รายงานว่าเส้นใยไผ่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับเส้นใยสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยไผ่เป็นวัสดุเสริมแรงขึ้นอยู่กับลักษณะและตำแหน่งของเส้นใยไผ่ เช่น ปริมาณรูพรุนภายในเส้นใยไผ่ ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยไผ่กับเมทริกซ์ (Matrix) ความทนทานต่อความชื้นของไผ่ไผ่ ดังนั้นกระบวนการในการผลิตเส้นใยไผ่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการนำเส้นใยไผ่มาใช้ในงานทางวิศวกรรม

เส้นใยไผ่เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ผลิตจากไผ่ไผ่ โดยทั่วไปสามารถผลิตได้ 2 วิธี ได้แก่การผลิตโดยอาศัยแรงเชิงกลและการใช้สารเคมี การผลิตเส้นใยไผ่ด้วยวิธีการเชิงกลสามารถทำได้โดยการสับหรือย่อยไผ่ไผ่ให้เป็นชิ้นหรือเป็นเส้นเล็กๆ ในขณะที่การผลิตเส้นใยไผ่ด้วยวิธีทางเคมีทำโดยการใช้สารเคมีเช่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการแยกเส้นใยไผ่ออกจากไผ่ไผ่ (Khalil, 2012)

กระบวนการผลิตเส้นใยไผ่ด้วยกระบวนการทางเคมีเป็นหนึ่งในไม่กี่กระบวนการที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้กับเส้นใยไผ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยไผ่

กับเมทริกซ์ โดยสารเคมีที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิตเส้นใยไผ่ด้วยวิธีการทางเคมีมีหลายชนิดเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรท์และเบนโซเอต เป็นต้น (Noori et al., 2021) อย่างไรก็ตาม สารที่นิยมใช้ในการผลิตเส้นใยไผ่จากไม้ไผ่ที่สุดคือสารในกลุ่มสารละลายแอลคาไลน์ กระบวนการผลิตเส้นใยไผ่โดยการนำไปแช่ในสารละลายแอลคาไลน์ถูกเรียกว่ากระบวนการ เมอซีไรเซชัน (Mercerization) การนำไม้ไผ่ไปแช่ด้วยสารละลายแอลคาไลน์เป็นการขจัดเอมิเซลลูโลส ลิกนิน ไขมัน และไขออกจากเส้นใยไผ่ นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังส่งผลให้ผิวของเส้นใยไผ่มีความความขรุขระมากขึ้น อันเป็นการปรับปรุงความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยไผ่กับเมทริกซ์ให้ดีขึ้น กระบวนการผลิตเส้นใยไผ่ด้วยกระบวนการทางเคมีเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและมีราคาถูก ทำให้ได้เส้นใยที่สามารถนำไปใช้ในงานวิศวกรรมได้ดี

การผลิตเส้นใยไผ่ด้วยกระบวนการเมอซีไรเซชันจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้กับวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ กระบวนการเมอซีไรเซชันทำได้โดยการนำไม้ไผ่ไปหั่นให้เป็นท่อนไม้ไผ่ จากนั้นจึงนำไปแช่ในสารละลายแอลคาไลน์ที่ถูกควบคุมความเข้มข้นตามเวลาและภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด การวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยไผ่ที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมต่างๆของเส้นใยไผ่ การทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยไผ่ที่สำคัญประกอบด้วยการทดสอบความต้านทานรับแรงอัด ความทนต่อการดึง ความสามารถทนต่อแรงดึงรวมถึงความสามารถทนต่อแรงกระแทก เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิจึงความร้อน (Thermal Gravimetric Analysis, TGA) และการวัดปริมาณความร้อนด้วยการกราดวิเคราะห์เชิงผลต่าง (Differential scanning calorimetry, DSC) ถูกใช้ในการศึกษาความทนทานต่อความร้อนของเส้นใยไผ่ เครื่องมือทดสอบขั้นสูงเช่น เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ไมโครสโคป (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) และเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer, XRD) ถูกใช้ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยไผ่ มีการศึกษาเส้นใยไผ่ที่ถูกผลิตด้วยวิธีการเคมีอย่างกว้างขวางแต่เกือบทั้งหมดเน้นศึกษาถึงการผลของสารละลายแอลคาไลน์ต่อคุณสมบัติของเส้นใยไผ่ Noori et al. (2021) รายงานว่าการนำไม้ไผ่ไปผ่านกระบวนการแช่ด้วยสารละลายแอลคาไลน์ส่งผลให้น้ำหนักของไม้ไผ่หายไปและพบว่าสีของเส้นใยไผ่จะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนที่เป็นไขมันและไขถูกขจัดออกไป นอกจากนี้การนำไม้ไผ่ไปแช่ในสารละลายต่างๆยังส่งผลให้ความหนาแน่นของเส้นใยไผ่ลดลงและทำให้พื้นผิวของเส้นใยไผ่มีความขรุขระมากขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นใยไผ่ที่ไม่ผ่านกระบวนการ (Noori et al, 2021) ความขรุขระที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยไผ่ เกิดจากสิ่งเจือปนและไขที่อยู่พื้นผิวของเส้นใยไผ่ถูกขจัดออกไปเป็นผลให้เส้นใยไผ่สามารถยึดเกาะได้ดีกับเมทริกซ์ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไผ่ให้มีความขรุขระมากขึ้นด้วยการแช่ในสารละลายต่างๆมีความจำเป็นต่อการนำเส้นใยไผ่ไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรง

กระบวนการผลิตเส้นใยไฟเบอร์โดยการนำไปแช่ในสารละลายแอลคาไลน์นับเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการผลิตและยังช่วยปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไฟเบอร์ ช่วยทำความสะอาดและขจัดสิ่งเจือปนที่พื้นผิวของเส้นใยไฟเบอร์ เพิ่มความขรุขระและเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยไฟเบอร์กับเมทริกซ์

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์โดยใช้จีโอพอลิเมอร์ซึ่งสังเคราะห์จากขยะโรงไฟฟ้าถ่านหิน (ถ่านลอย) เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ และเสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์ ที่ผ่านมามีงานวิจัยหลายฉบับที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยฉบับนี้โดย ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญาจินดาประเสริฐ (2005) ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากถ่านลอยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลค่ากำลังรับแรงอัดของ จีโอพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น T.W. Cheng และ J.P. Chiu (2003) ค้นพบว่าความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนเหล็กมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการก่อตัว สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์ D. Hardjito and B.V. Rangan (2005) ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากถ่านลอยพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามไปด้วย ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2005) ได้ศึกษาการแช่ถ่านลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการละลายของ Si และ Al ในถ่านลอยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาที่แช่อยู่ในสารละลายซึ่งระยะเวลาในการแช่สารละลายมีผลต่อการละลายของ Al มากกว่าการละลายของ Si

P. Chindaprasirt et.al. (2012) ศึกษาผลของปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อระยะเวลาในการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากถ่านลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ มีผลทำให้เวลาในการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งแตกต่างจากลักษณะของจีโอพอลิเมอร์โดยทั่วไปที่เมื่อปริมาณของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เวลาในการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มซิลิกอนไดออกไซด์จะมีผลในการหน่วงเวลาการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ E. Nimwinya และคณะ (2016) ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาพบว่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่สูงขึ้นส่งผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการควบแน่นของพันธะระหว่างซิลิกาต่อบะลูมินาที่ใช้ระยะเวลาการควบแน่นเร็วกว่าพันธะระหว่างซิลิกาต่อกับซิลิกา และยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา รวมถึงเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ให้ถึงจุดที่เหมาะสมจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น Polomo et.al. (1999) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากถ่านลอยพบว่า มีตัวแปรหลายตัวที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับ

แรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ซึ่ง ได้แก่ อุณหภูมิของการบ่ม เวลาในการก่อตัว และชนิดของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา นอกจากนี้คณะวิจัยยังพบว่าอุณหภูมิการบ่มที่ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูงอยู่ในช่วง 60-90 องศาเซลเซียส Hardjito et.al. (2004) ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของ ซิลิกาและอะลูมินาพบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่สามารถรับแรงอัดได้สูงที่สุดที่ได้จากการผสมเถ้าลอยกับ สารเร่งปฏิกิริยาและใช้ความร้อนอยู่ในช่วง 60 – 90 องศาเซลเซียสในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งที่ใช้เป็นสารพวกอัลคาไลน์ซิลิเกต และอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดที่ได้จะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรเช่น ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรืออัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น Wang และ Cheng (2003) ได้ทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติด้านความทนไฟในการทดลองพบว่าจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้องในช่วงระยะเวลา 9.5 ชั่วโมง หลังจากทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน และทำการวัดค่ากำลังรับแรงอัดและสมบัติความทนไฟพบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 64 MPa โดยค่ากำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาเพิ่มสูงขึ้นไปจนถึงการบ่ม 7 วัน หลังจากนั้นปฏิกิริยาที่ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงจะเกิดน้อยมาก สำหรับการทนไฟที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ที่ด้านหน้าตัวอย่างความหนา 10 มิลลิเมตร ใช้เวลาเท่ากับ 30 นาที ทำการวัดอุณหภูมิที่ด้านหลังตัวอย่างได้เท่ากับ 440-470 องศาเซลเซียส พบว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงและสามารถทนไฟได้ สำเร็จ รักซ้อน และคณะ (2011) ศึกษาผลของปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จาก เถ้าลอยพบว่า อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 1.5:1 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12.5 โมลาร์ ให้กำลังรับแรงอัดที่สูงเมื่อเทียบกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 5, 7.5 และ 10 โมลาร์ ส่วนปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 โมลาร์ กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่ต่ำลง Charin Sanawong (2010) และคณะ ทำการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความทนแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมคงที่เท่ากับ 1.98 และบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องผลการศึกษาพบว่าความทนแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นและจะมีค่าลดลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ Charin Sanawong (2011) และคณะ ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์

ของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยโดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารละลายทำปฏิกิริยา ผลการวิจัยพบว่าจีโอพอลิเมอร์มีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ได้สูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น สกวรรณ ทานจิตสุวรรณ และคณะ (2015) ทำการศึกษาผลกระทบของการแทนที่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำและเถ้าลอยแคลเซียมสูง โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอย ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การศึกษานี้ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นสารละลายทำปฏิกิริยาโดยใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณของเหลวร้อยละ 33 และปริมาณวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 57 โดยน้ำหนัก ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดสอบพบว่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น Palomo (2001) และคณะ ได้เสนอแนะว่าการกระตุ้นเถ้าลอยกับวัสดุผสมจะมีความแตกต่างกัน 2 รูปแบบคือ วัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์และแคลเซียมจะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยาประเภทต่างที่มีความเข้มข้นต่ำ สารที่ได้จากปฏิกิริยานี้คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) ในขณะที่ซิลิกอน และอะลูมิเนียมจะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยาประเภทต่างความเข้มข้นสูงจะได้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) และเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์คือความร้อน ดังนั้น จึงต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิซึ่งอาจจะทำให้สูญเสียน้ำบางส่วนเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการก่อตัวที่อุณหภูมิห้องก็สามารถทำได้โดยใช้แหล่งวัสดุที่ผ่านการ แคลไซน์ที่ได้จากดินบริสุทธ์เช่น แคลไซน์เกาลิน Swanepoel และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยเป็นสารตั้งต้นร่วมกับแคลไซน์เกาลิน และใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายทำปฏิกิริยา จากนั้นทำการบ่มเพื่อเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่ากำลังแรงอัดสูงสุด คือ 8 MPa อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) ได้ทำการเตรียม จีโอพอลิเมอร์จากแคลไซน์เกาลินผสมกับเถ้าลอยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียมแคลไซน์เกาลินเพื่อใช้ผสมกับเถ้าลอยคือ 600 องศาเซลเซียส และปริมาณของแคลไซน์เกาลินที่สามารถใช้ผสมกับเถ้าลอยได้มากที่สุดคือร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หากใช้แคลไซน์เกาลินมากกว่าปริมาณดังกล่าวจะส่งผลให้ความทนแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง Abideng Hawa (2013) ได้ทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากแคลไซน์เกาลินสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยาเพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต ที่ต้องการการแข็งตัวที่รวดเร็วในการทดลองใช้ปริมาณน้ำร้อยละ 31, 35 และ 39 โดยน้ำหนักของแคลไซน์เกาลินและบ่มร้อนเป็นเวลา 0.5, 1, 2 และ 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 80 องศา

เซลเซียส ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2, 6, 24 ชั่วโมง, 7 และ 28 วัน จากการทดสอบพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ปริมาณน้ำร้อยละ 31 โดยน้ำหนักของแคลไซน์เกอลินบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 37 MPa J. Xie และคณะ (2009) ได้ทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากแคลไซน์เกอลิน แก้วลอยโรงไฟฟ้าประเทศจีน และตะกรันเหล็ก พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากส่วนผสมระหว่าง แคลไซน์เกอลิน แก้วลอย และตะกรันเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 14, 43 และ 43 โดยน้ำหนักตามลำดับให้ความแข็งแรงสูงถึง 31.6 MPa จีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ยังสามารถเก็บกักโลหะหนักเช่น Pb Cu Cr และ Ni ไว้ในตัวได้ P. Chindaprasirt และคณะ (2012) ศึกษาผลของปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีผลต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากแก้วลอยชั้นคุณภาพพี พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ SiO_2 หรือ Al_2O_3 มีผลทำให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่ลดลง แตกต่างจากลักษณะของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากแก้วลอยชั้นคุณภาพเอฟ เมื่อเพิ่มปริมาณของ Al_2O_3 จะมีผลให้เวลาในการก่อตัวของ จีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นแต่หากปริมาณ SiO_2 เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลง

แม้มีงานวิจัยหลายชิ้นที่นำเส้นใยธรรมชาติมาใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับซีเมนต์ (A. B. Akinyemi และคณะ, 2020; C. B. Fokam และคณะ, 2021; A. Noori และคณะ, 2021; Ouyang และคณะ, 1991; V. C. Correia และคณะ 2014) แต่มีงานวิจัยน้อยมากที่ทำการศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์โดยการใช้เส้นใยจากธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย เป็นผลงานโดดเด่นด้านการปรับปรุงความต้านทานแรงอัด การทดลองใส่เส้นใยฝ้ายในแก้วลอยในปริมาณ 0 wt.%, 0.3 wt.%, 0.5 wt.%, 0.7 wt.%, และ 1 wt.% ผลการทดสอบพบว่าที่ 0 wt.% วัสดุให้กำลังอัดเพียง 19 MPa ในขณะที่การใส่เส้นใยฝ้าย 0.5 wt.% วัสดุเชิงประกอบให้กำลังอัดสูงสุดที่ 46 MPa และจะกำลังอัดจะลดลงตามลำดับ (T. Alomayri และ I.M. Low, 2013)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์	ผู้ผลิต	รุ่น
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)	-	QUANTA 450
ไอออนสปัตเตอร์ริง (Ion sputtering device)	Joel	JFC-1110E
เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction; XRD)	Bruker	D2
เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence; XRF)	Horiba	XGT-5200
ตู้อบความร้อน (Drying oven)	Binder	ED240
กิลล์มอร์นีดเดิลส์ (Gilmore needle ASTM C266)	Humboldt	H-3150
ตะแกรงคัดขนาด	Retsch	-

ตารางที่ 3.2 แสดงสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	ชนิดเกรด/	ผู้ผลิต
แก้วลอย	-	บมจ ดับเบิล เอ.(1991)
ดินขาวระนอง	-	-
สารละลายโซเดียมซิลิเกต	Commercial Grade	Kanto Chemical Co.,Ltd.
โซเดียมไฮดรอกไซด์	Industry Grade 98%	Union Science Co.,Ltd.
ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์	type 1	Siam City Cement Co.,Ltd.

3.1.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด (Sodium hydroxide pellets)

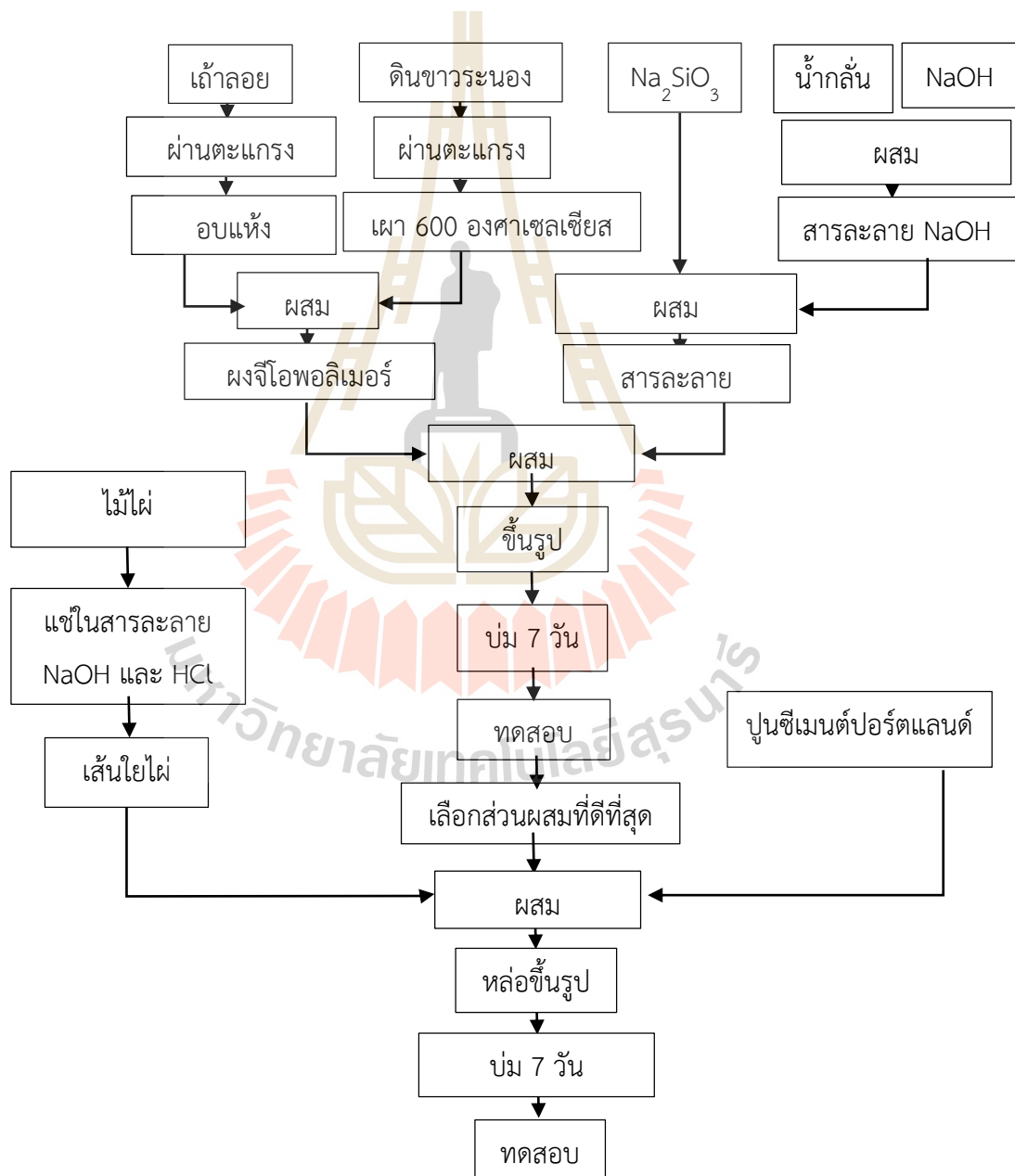
ในการทดลองใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด สูตรเคมี NaOH เกรดอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์น้อยกว่าหรือเทียบเท่าร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก สิ่งเจือปนอื่นๆร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (ข้อมูลจากบริษัท ยูเนียน ซายน์ จำกัด)

3.1.2 โซเดียมซิลิเกตชนิดสารละลาย (Sodium silicate solution)

โซเดียมซิลิเกตชนิดสารละลายสูตรเคมี Na_2SiO_3 องค์ประกอบหลักโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 16.3 โดยน้ำหนัก ซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 34.2 โดยน้ำหนัก และน้ำ (H_2O) ร้อยละ 49.5 โดยน้ำหนัก

3.2 การดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินการทดลองแสดงในภาพที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 แสดงขั้นตอนและวิธีการทดลองของงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมเถ้าลอยและแคลไซน์เกาหลี

3.2.1.1 เถ้าลอยจาก บริษัท ดับเบิล เอ (1991) จำกัด (มหาชน) จังหวัดปราจีนบุรี ถูกนำไปผ่านตะแกรงเบอร์ 120 Mesh เพื่อแยกสิ่งสกปรกออกก่อน

3.2.1.2 นำเถ้าลอยที่ผ่านการคัดขนาดและแยกสิ่งสกปรกออกแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิท

3.2.1.3 นำดินขาวระนองผ่านตะแกรงเบอร์ 120 Mesh เพื่อคัดขนาดผงดินและแยกสิ่งสกปรก

3.2.1.4 นำผงดินขาวเข้าเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเผาแช่ 3 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อนที่ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.2.2 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและแคลไซน์เกาหลี

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF) อาศัยหลักการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบชิ้นงานตัวอย่างส่งผลให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการปล่อยโฟตอนที่ความยาวคลื่นเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิดออกมา แล้วระบบทำการวัดค่ารังสีที่กระเจิงออกมาแล้วทำการประมวลผล

เครื่องมือ : X-ray fluorescence (XRF) ดังแสดงในภาพที่ 3.2

ผู้ผลิต : HORIBA

รุ่น : XGT-5200



ภาพที่ 3.2 แสดงเครื่อง X-ray fluorescence (XRF)

วิธีการทดสอบ

3.2.2.1 เติมตัวอย่างและแคลไซต์ลงในอุปกรณ์เตรียมตัวอย่าง (Sample holder)

3.2.2.2 นำอุปกรณ์เตรียมตัวอย่างและแคลไซต์ใส่เข้าที่วางในเครื่อง XRF

3.2.2.3 ควบคุมการทดสอบด้วยระบบคอมพิวเตอร์

3.2.2.4 บันทึกผลการทดลองแล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

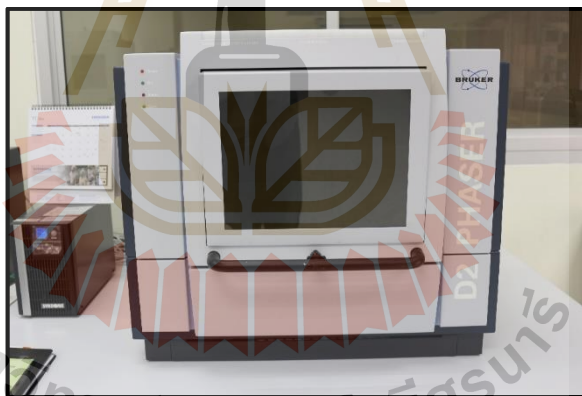
3.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของตัวอย่างและแคลไซต์

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) โดยเมื่อปล่อยรังสีเอ็กซ์ให้กระทบกับผลึกของชิ้นงานตัวอย่างจะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี การเลี้ยวเบนในช่วงมุมตกกระทบจะเป็นรูปแบบเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด

เครื่องมือ : X-ray diffractometer (XRD) ดังแสดงในภาพที่ 3.3

ผู้ผลิต : BRUKER

รุ่น : D2



ภาพที่ 3.3 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

วิธีการทดสอบ

3.2.3.1 เติมตัวอย่างและแคลไซต์ลงในช่องว่างของอุปกรณ์เตรียมตัวอย่างให้เต็มช่อง

3.2.3.2 ใช้แผ่นกระจกกดคลึงตัวอย่างและแคลไซต์ในอุปกรณ์เตรียมตัวอย่างให้แน่นและเรียบ

3.2.3.3 นำอุปกรณ์ใส่ตัวอย่างประกอบเข้าชุดแล้วนำเข้าเครื่องตรวจวิเคราะห์

3.2.3.4 บันทึกผลการทดลองแล้วนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป

3.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะและรูปร่างของเถ้าลอย

การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของชิ้นงานมีความจำเป็นต้องอาศัยการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับพื้นผิวของชิ้นงาน การสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนนั้นจะเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ซึ่งจะถูกนำมาแปลงเป็นสัญญาณและแสดงผลทางจอภาพ สามารถบันทึกและนำไปวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุได้โดยอิเล็กตรอนที่จะสามารถสะท้อนได้ก็ต่อเมื่อชิ้นงานมีพื้นผิวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยโลหะทองคำ

เครื่องมือ : Ion sputtering device ดังแสดงในภาพที่ 3.4

ผู้ผลิต : Joel

รุ่น : JFC-1110E



ภาพที่ 3.4 แสดงเครื่อง Ion sputtering device

วิธีการทำงาน

3.2.4.1 ติดเทปคาร์บอนบนแท่นติดชิ้นงาน (Stub)

3.2.4.2 โรยผงเถ้าลอยบริเวณเทปคาร์บอน

3.2.4.3 ใช้ลูกยางเป่าฝุ่นหรืออนุภาคส่วนเกิน

3.2.4.4 นำแท่นติดชิ้นงานเข้าเครื่อง Ion sputtering device ฉาบด้วยทอง

เครื่องมือ : Scanning electron microscope (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 3.5

ผู้ผลิต : Joel

รุ่น : JSM-6010LV



ภาพที่ 3.5 แสดงเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

วิธีการทดสอบ

3.2.4.5 นำตัวอย่างชิ้นงานตัวอย่างติดกับแท่นติดชิ้นงาน

3.2.4.6 เคลือบผิวของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง Ion sputtering device

3.2.4.7 นำตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบด้วยทองแล้วเข้าเครื่อง SEM

3.2.5 การเตรียมต่างสำหรับใช้ทำปฏิกิริยา

3.2.5.1 เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยผสมเม็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำกลั่นให้ได้สารละลายความเข้มข้น 5,10 และ 15 โมลาร์

3.2.5.2 ทิ้งสารละลายในข้อ 3.2.5.1 ให้เย็น

3.2.5.3 เติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.5.2 ในสัดส่วนสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.5,1.0,1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ทำการผสมให้เข้ากันแล้วทิ้งสารละลายไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน

3.2.6 การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.2.6.1 ผสมเถ้าลอยและแคลไซน์เกอลินให้ได้สัดส่วนเถ้าลอยต่อแคลไซน์เกอลิน เป็น 100:0, 50:50, 40:60, 30:70 และ 0:100 โดยน้ำหนัก

3.2.6.2 ผสมสารละลายที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.5.4 กับผงที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.6.1

3.2.6.3 ขึ้นรูปชิ้นงานโดยการเติมส่วนผสมลงในแบบหล่อลูกบาศก์ที่มีขนาด ความกว้างxยาวxสูง เป็น 50x50x50 มิลลิเมตร ตามลำดับ และทำการไล่ฟองอากาศออก ตามมาตรฐาน ASTM C109

3.2.6.4 จีโอพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปแล้วจะถูกนำไปบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน

3.2.7 การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบความทนต่อการดัดงอ

3.2.7.1 ผสมผงจีโอพอลิเมอร์ซึ่งประกอบด้วยเถ้าลอย แคลไซน์เกอลิน และ ปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 1:1:0.1 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปผสมกับสารละลายที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.5.4

3.2.7.2 นำของผสมจากข้อที่ 3.2.7.1 ไปใส่ในแบบโลหะที่มีขนาด 15x150x10 มิลลิเมตร และทำการไล่ฟองอากาศออกตามมาตรฐาน ASTM C109

3.2.7.3 นำชิ้นงานไปบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน

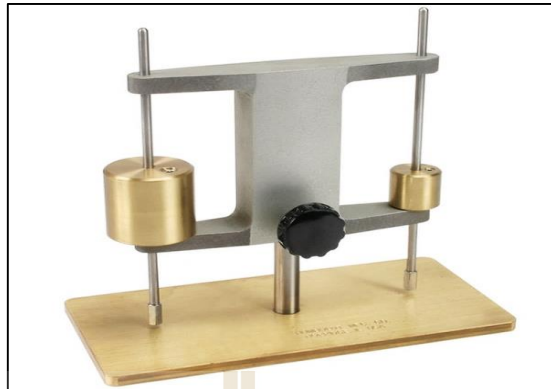
3.2.8 การวัดเวลาในการก่อตัว

เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ ทดสอบโดยกิลล์มอร์นีดเดิลส์ ตามมาตรฐาน ASTM C266 เข็มที่ใช้สำหรับวัดเวลาในการก่อตัวมีน้ำหนัก 113.4 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มมีขนาด 2.12 มิลลิเมตร และเข็มวัดเวลาสิ้นสุดการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีน้ำหนัก 453.6 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มมีขนาด 1.06 มิลลิเมตร เวลาในการก่อตัวถูกบันทึกเมื่อปลายเข็มทั้งสองไม่สามารถกดชิ้นงานให้เป็นรอยเต็มวงกลมได้

เครื่องมือ : Gilmore needle ดังแสดงในภาพที่ 3.6

ผู้ผลิต : Humboldt

รุ่น : H-3150



ภาพที่ 3.6 แสดงเครื่อง Gilmore needle

วิธีการทดสอบ

- 3.2.8.1 วัดค่าเวลาในการเริ่มก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์โดยการยกเข็มฝังเริ่มก่อตัวขึ้นแล้วนำชิ้นงานวางลงที่แน่นอน
- 3.2.8.2 ปลดเข็มให้ปลายเข็มสัมผัสกับชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์เบาๆและปล่อยมือ
- 3.2.8.3 ทำการจดบันทึกเวลาเมื่อปลายเข็มไม่สามารถกดผิวชิ้นงาน ให้เป็นรอยเต็มวงกลมได้
- 3.2.8.4 วัดค่าเวลาสิ้นสุดการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์โดยทำการยกเข็มฝังสิ้นสุดการก่อตัวขึ้น ทำซ้ำข้อที่ 3.2.8.2–3.2.8.3
- 3.2.8.5 บันทึกผลการทดลองที่ได้ แล้วนำผลไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.9 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M โดยเครื่อง Universal testing machine

วิธีการทดสอบ

- 3.2.9.1 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดจำนวนชิ้นงานสูตรละ 3 ชิ้นตัวอย่าง วางบริเวณจุดกึ่งกลางแผ่นพื้นด้านล่างของเครื่อง
- 3.2.9.2 เริ่มออกแรงกดชิ้นงาน
- 3.2.9.3 เมื่อชิ้นงานตัวอย่างเริ่มแตกบันทึกแรงกดแล้วนำไปคำนวณค่ากำลังรับแรงอัดในหน่วยเมกะปาสคาล (MPa) ตามสมการที่ (3.1)

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

กำหนดให้	f_m	คือ ค่ากำลังรับแรงอัดในหน่วย [MPa]
	P	คือ ค่าแรงอัดสูงสุดในหน่วย [N]
	A	คือ พื้นที่รับแรงของชิ้นงานตัวอย่างในหน่วย [mm ²]

3.2.10 การทดสอบความทนต่อแรงดัดงอ

การทดสอบความแข็งแรงของเนื้อผลิตภัณฑ์จะดำเนินการทดสอบตามวิธีที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ISO10545-4 โดยนำชิ้นงานที่ได้จากข้อที่ 3.2.7 ไปวางบนเครื่องทดสอบโดยมีลักษณะการวางชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 แสดงการจัดวางชิ้นงานก่อนการทดสอบความแข็งแรง

ให้แรงกดบนชิ้นงานด้วยอัตราเร็วที่ทำให้ความเค้นของของชิ้นงานเพิ่มขึ้นในอัตรา 1 ± 0.2 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที จนชิ้นงานหัก ค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน (σ) คำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ

F คือ แรงกดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก (นิวตัน)

L คือ ระยะห่างของแท่งรอง การทดลองนี้ทุกตัวอย่างถูกตั้งค่าระยะห่างเท่ากับ 20 มิลลิเมตร

b คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

d คือ ความหนาของชั้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

3.2.11 การวัดความหนาแน่น

ชิ้นงานตัวอย่างถูกวัดความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM C373-88 วิธีการวัดความหนาแน่นมีดังต่อไปนี้

3.2.11.1 นำชิ้นงานตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ผ่านการบ่มไปอบในตู้อบที่ตั้งอุณหภูมิไว้ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง (W_D)

3.2.11.2 นำชิ้นงานแช่ลงในน้ำกลั่นแล้วนำใส่หม้อดูดสุญญากาศเพื่อไล่อากาศออกจากชิ้นงานเป็นเวลา 6-12 ชั่วโมงและเพื่อให้น้ำแทรกซึมเข้าไปภายในชิ้นงานโดยควบคุมให้น้ำท่วมชิ้นงานตลอดเวลา

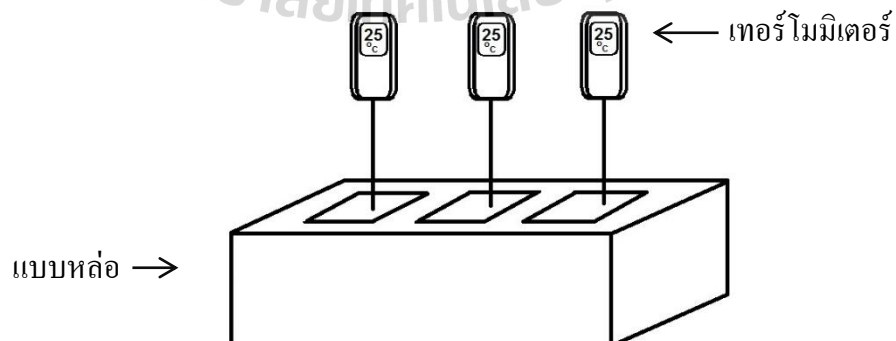
3.2.11.3 นำชิ้นตัวอย่างในข้อที่ 3.2.9.2 มาทำการชั่งน้ำหนักแขวนลอยในน้ำ (W_{SS}) และชั่งน้ำหนักอิมมิดีด้วยน้ำ (W_S) โดยใช้ผ้าซับน้ำบริเวณผิวภายนอกของชิ้นงานออกแล้วจึงทำการชั่งน้ำหนัก

3.2.11.4 นำผลที่ได้ไปคำนวณค่าความหนาแน่น ดังสมการที่ (3.3)

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{W_D}{(W_S - W_{SS})} \quad (3.3)$$

3.2.12 การทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

อุณหภูมิการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) โดยมีวิธีการวัดแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แสดงวิธีการวัดอุณหภูมิ

วิธีการวัดอุณหภูมิ

3.2.12.1 วัดอุณหภูมิของจีโอพอลิเมอร์โดยการวางเข็มของเทอร์โมมิเตอร์ให้สัมผัสกับชิ้นงาน

3.2.12.2 ดันปลายเข็มเทอร์โมมิเตอร์ให้เข้าไปอยู่ภายในกึ่งกลางของชิ้นงานโดยทำการวัดอุณหภูมิ ตัวอย่างสูตรละ 3 ชิ้นงาน

3.2.12.3 ทำการบันทึกอุณหภูมิที่เวลาต่างๆแล้วนำมาผลไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.13 การสังเคราะห์เส้นใยไฟ

เส้นใยไฟถูกสังเคราะห์โดยการนำไม้ไฟไปแช่ในสารละลาย NaOH และ สารละลาย ไฮโดรคลอริก (Hydrochloric; HCl) โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.13.1 สับไม้ไฟเป็นแผ่นเล็กๆ ขนาด 1x10x100 มิลลิเมตร

3.2.13.2 นำไม้ไฟที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.12.1 ไปแช่ในสารละลาย NaOH และ HCl ความเข้มข้น 1.25, 2.50, 3.75 และ 10 โมลาร์ เป็นเวลา 3, 7 และ 14 วัน

3.2.13.3 นำไม้ไฟจากข้อที่ 3.2.12.2 ไปล้างด้วยน้ำหลายๆ ครั้งจากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นเป็นเวลา 30 วินาที ก่อนนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 60 mesh

3.2.14 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์

วัสดุจีโอพอลิเมอร์จะถูกทำการตรวจสอบพื้นผิวรอยแตก (Fracture face) โดยการหักชิ้นงานแล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยมีวิธีการดังอธิบายในข้อที่ (3.2.4)

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยและแคลไซต์แกลีน

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยและแคลไซต์แกลีนด้วยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF) แสดงในตารางที่ 4.1 จากผลการทดลองพบว่าแก้วลอยมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบร้อยละ 33.19 และ 19.68 ตามลำดับแก้วลอยซึ่งมีอะลูมินาและซิลิกาเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนดังกล่าวจัดอยู่ในชั้นคุณภาพซี (Class C) ตามมาตรฐาน ASTM C618

แคลไซต์แกลีนหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบร้อยละ 49.40 และ 48.48 ตามลำดับ ด้วยการผสมแคลไซต์แกลีนกับแก้วลอยจะส่งผลให้สามารถควบคุมปริมาณอัตราส่วนระหว่างซิลิกอน (Si) ต่ออะลูมิเนียม (Al) ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งาน เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เช่น ความแข็งแรง ระยะเวลาในการก่อตัว และปริมาณรูพรุน เป็นต้น

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบด้วยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

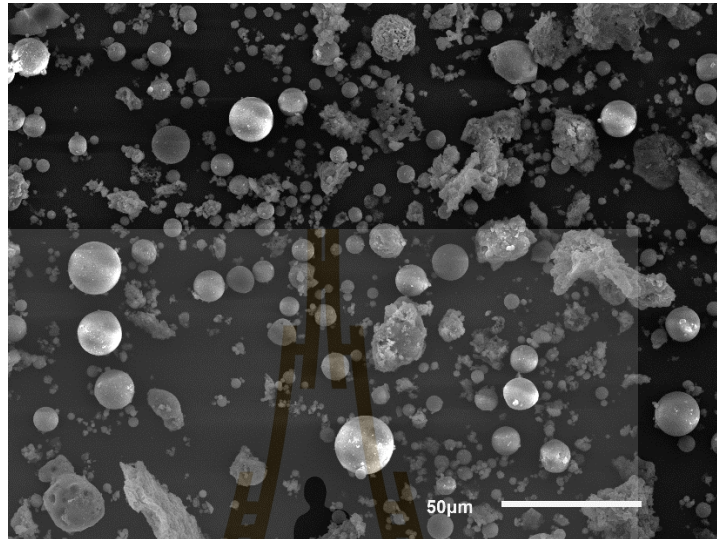
วัสดุดิบ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CdO	Etc.
แคลไซต์แกลีน	48.5	49.4	1.0	0.1	-	0.1	0.7	-	-	-	0.2
แก้วลอย*	19.7	33.2	2.3	2.4	11.9	4.4	10.7	0.8	3.9	9.8	0.9

แก้วลอย จาก บริษัท ดับเบิล เอ (1991) จำกัด (มหาชน)

4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของแก้วลอย

อนุภาคของแก้วลอยซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) แสดงในภาพที่ 4.1 ลักษณะอนุภาคของแก้วลอยโดยส่วนใหญ่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular) และอนุภาคบางส่วนมีลักษณะเป็นทรงกลม (Sphere) โดยทั่วไปแล้วแก้วลอยที่

สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างเพื่อเปลี่ยนเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ดี นั้นมักมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม (A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo ,M. Criado, Fuel.,2003,2005)



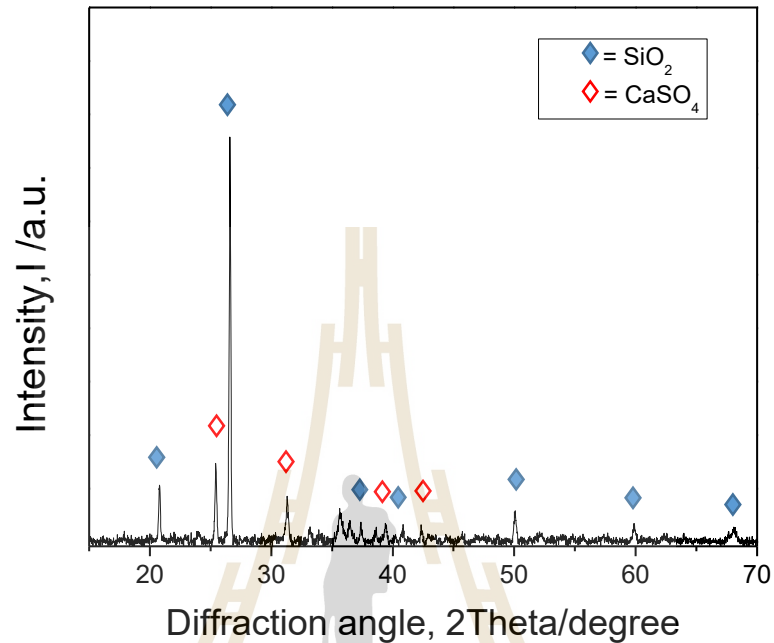
ภาพที่ 4.1 รูปร่างของเถ้าลอยซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1000 เท่า

4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าลอย และแคลไซต์เกาลิน

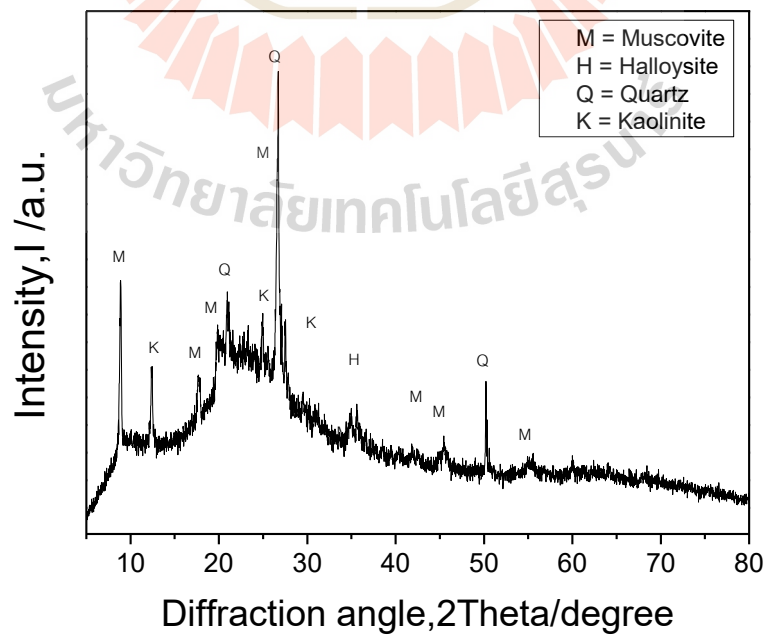
ภาพที่ 4.2 และ ภาพที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าลอยและแคลไซต์เกาลินด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) ตามลำดับจากภาพพบว่าเถ้าลอยมีผลึกของควอตซ์และแคลเซียมซิลเฟต เป็นองค์ประกอบหลัก จากรูปร่างของเถ้าลอย (ดังแสดงในภาพที่ 4.1) และผลของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ แสดงให้เห็นว่า เถ้าลอยที่ใช้ในการทดลองนี้จัดอยู่ในกลุ่มเถ้าลอยที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลด์ได้ยาก โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยที่เกิดปฏิกิริยาได้ดีมักอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) และอยู่ในรูปทรงกลม (ปริญาญา จินดาประเสริฐ, 2549) ในขณะที่เถ้าลอยที่เกิดปฏิกิริยาได้ยากมักมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอและอยู่ในรูปผลึกเนื่องจากเตาที่ใช้ในการเผาถ่านหินมีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เถ้าลอยถูกหลอมให้อยู่ในรูปอสัณฐาน

ในขณะที่รูปแบบพีคของแคลไซต์เกาลิน (ภาพที่ 4.3) แสดงลักษณะของเฟสอสัณฐาน (Amorphous phase) และผลึกของมัสโคไวท์ (Muscovite), แฮลลอยไซต์ (Halloysite), ควอตซ์

(Quartz), และเกาลินไนท์ (Kaolinite) ซึ่งเป็นรูปแบบที่แสดงถึงความพร้อมของแคลไซต์ใน การทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline solution) (กนกวรรณ และคณะ, 2533)



ภาพที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ทางเฟสของน้ำล่อย



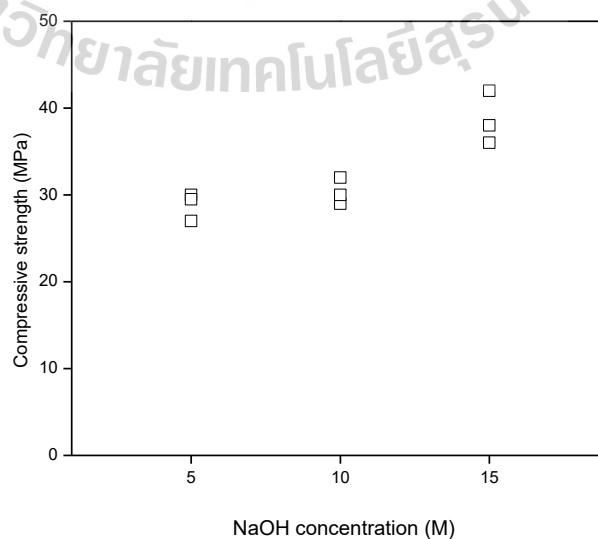
ภาพที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ทางเฟสของแคลไซต์เกาลิน

4.4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

การศึกษาผลความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ทุกตัวอย่างจะถูกเตรียมด้วยสภาวะควบคุมเดียวกันได้แก่อัตราส่วนแคลไซน์เกาลินต่อเถ้าลอยที่ 50:50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 อัตราส่วนผงต่อสารละลายที่ 1:1 เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการผสมและการขึ้นรูปชิ้นงาน อุณหภูมิในการบ่มชิ้นงานที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 7 วันตัวแปรดังกล่าวที่นำมาใช้ในการทดลองถูกอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ส่งผลต่อสมบัติที่ดีของจีโอพอลิเมอร์ (ณัฐ มากุล และคณะ, 2556, อาภากร พรหมเพชร, 2556, ชรินทร์ เสนาวงษ์, 2554, Abideng Hawa, 2556, Hai Yan Zhang, 2014) โดยการทดลองใช้ชิ้นงานตัวอย่างจำนวนสูตรละ 3 ชิ้น ในการทดสอบค่าต่างๆ

4.4.1 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

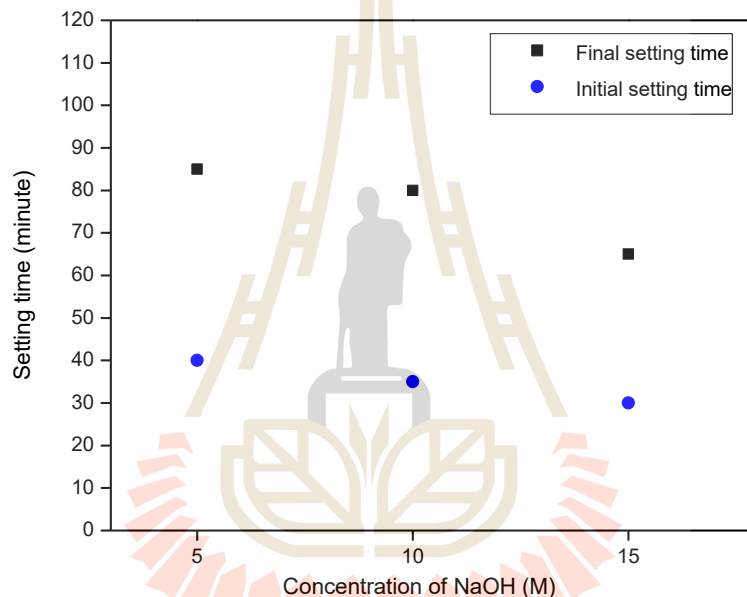
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์แสดงในภาพที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าสูงขึ้นโดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงถึง 42 MPa เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการชะล้างพันธะของซิลิกาและอะลูมินาจากสารตั้งต้น (เถ้าลอยผสมแคลไซน์เกาลิน) ให้แตกตัวเป็นไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมได้มากขึ้น (Ekkasit, N., 2016) ทำให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น จากนั้นโซเดียมซิลิเกตจะทำหน้าที่ในการจัดเรียงพันธะใหม่ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นจีโอพอลิเมอร์ขึ้น



ภาพที่ 4.4 แสดงผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

4.4.2 ผลความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์แสดงในภาพที่ 4.5 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาในการก่อตัวมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง ส่งผลให้กระบวนการแตกตัว หรือ ความสามารถในการชะละลายไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมได้ดีขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2005) ส่งผลให้อะลูมิเนียมไอออนและซิลิกอนไอออนมีปริมาณมากขึ้น ทำให้กระบวนการจัดเรียงตัวเพื่อสร้างพันธะใหม่เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว (บุรฉัตร ฉัตรวีระ และคณะ, 2555) เวลาในการก่อตัวของ จีโอพอลิเมอร์จึงลดลง



ภาพที่ 4.5 แสดงผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

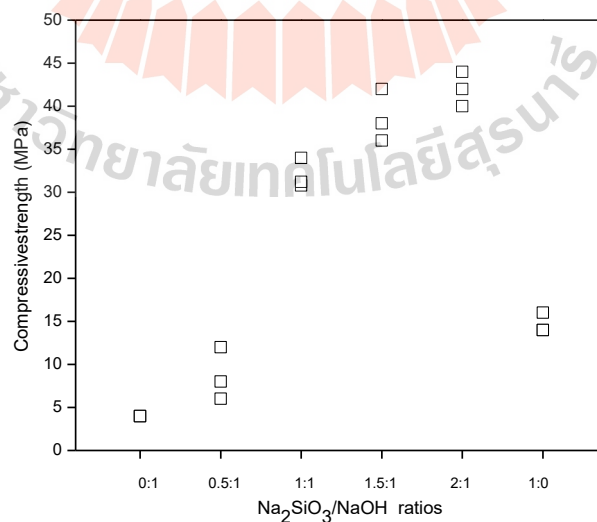
4.5 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

การศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการควบคุมตัวแปรอื่นๆที่จะส่งผลต่อสมบัติทางกลของ จีโอพอลิเมอร์ ในการศึกษาสภาวะดังกล่าวได้ทำการควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ให้คงที่โดยทำการควบคุมอัตราส่วนแคลไซน์เกาลินต่อเถ้าลอยที่ 50:50 โดยน้ำหนัก (อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา) ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 โมลาร์ (อ้างอิงจากผลการทดลองในข้อ 4.4) อัตราส่วนผงต่อสารละลายที่ 1:1 (อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา) และอุณหภูมิในการบ่มชิ้นงานที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน ทุกชิ้นงาน (อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา) โดยการทดลองใช้ชิ้นงานตัวอย่างจำนวนสูตรละ 3 ชิ้น ในการทดสอบค่าต่างๆ

4.5.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

เมื่ออัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น (โซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.6 บทบาทของโซเดียมซิลิเกตในกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันคือ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (Binder) เพื่อสร้างสายโซ่จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer chain) (S.E. Wallah and B.V. Rangan, 2006) การเพิ่มปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีผลให้ตัวเชื่อมประสานพันธะเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถเชื่อมประสานพันธะใหม่ได้ดี และสร้างความแข็งแรงให้กับพันธะรวมถึงทำให้กระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น

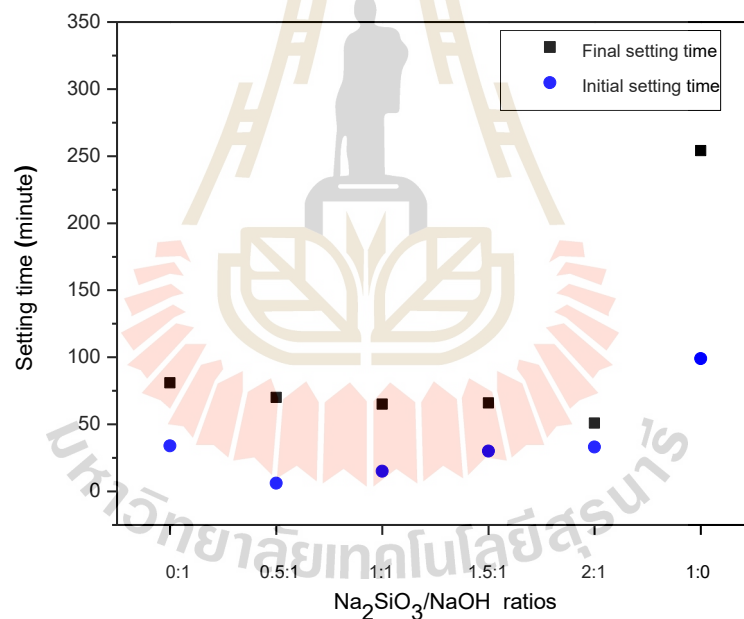
อย่างไรก็ตาม จีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้โซเดียมซิลิเกตหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงลำพัง (อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1:0 และ 0:1 ตามลำดับ) เนื่องจากเมื่อขาดโซเดียมไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้กระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันขาดสารที่ทำหน้าที่ในการแยกไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียม ในทำนองเดียวกัน เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว กระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันก็จะขาดสารที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียม เพื่อให้เกิดพันธะใหม่ ดังนั้นการที่จะได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงจึงต้องใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับโซเดียมซิลิเกต ไม่สามารถใช้สารละลายชนิดใดชนิดหนึ่งตามลำพัง



ภาพที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

4.5.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์แสดงในภาพที่ 4.7 เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์สัมพันธ์กับการเกิดกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งอาศัยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวชะละลายอะลูมิเนียมและซิลิกอนจากสารตั้งต้น (แก้วลอยผสมกับดินขาวเผา) และใช้โซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานก่อให้เกิดพันธะใหม่ จากผลการทดลองพบว่าหากขาดสารข้างต้นตัวใดตัวหนึ่งจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ใช้เวลาในการก่อตัวนาน ในทางกลับกัน เมื่อใช้สารละลายทั้งสองร่วมกันเวลาที่ใช้ในการก่อตัวมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Eslam Gomaa, et al., 2017, P. Duxson et al., 2007, Ekkasit N., 2016)



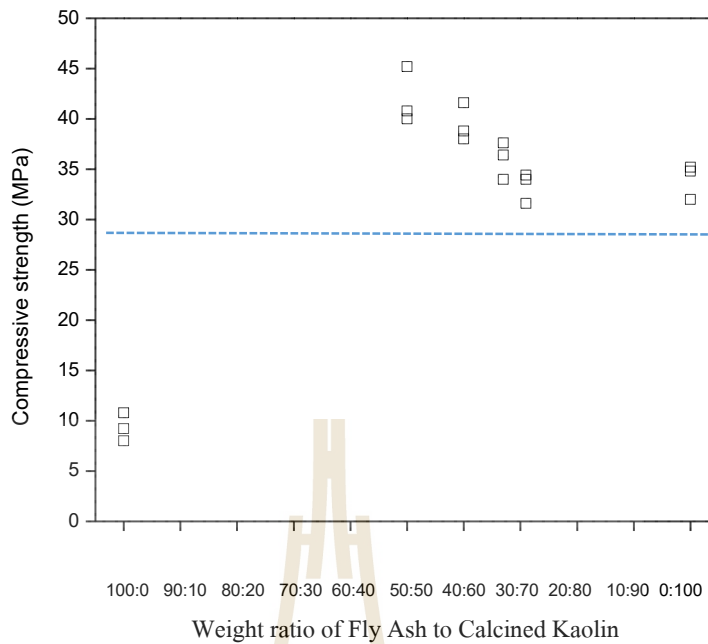
ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

4.6 ผลการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์ในเกาลินต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

ตัวอย่างทุกตัวอย่างถูกเตรียมด้วยสภาวะควบคุมเดียวกันอันได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 15 โมลาร์ (อ้างอิงจากผลการทดลองข้อ 4.4) อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 2:1 (อ้างอิงจากผลการทดลองข้อ 4.5) อัตราส่วนผงวัตถุติดต่อสารละลายมีค่าเท่ากับ 1:1 (อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา) ทุกตัวอย่างถูกบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน โดยการทดลองใช้ชิ้นงานตัวอย่างจำนวนสุตรละ 3 ชิ้น ในการทดสอบค่าต่างๆ

4.6.1 ผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์ในเกาลินต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ แสดงในภาพที่ 4.8 เมื่อใช้เถ้าลอย 100 % เป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์พบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 9 MPa ซึ่งค่าดังกล่าวต่ำกว่าค่าความแข็งแรงขั้นต่ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดหลังบ่ม 7 วันเท่ากับ 28 MPa หากใช้แคลไซต์ในเกาลินเพียงอย่างเดียว 100 % หลังการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดวัดค่าได้ 34 MPa กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์ในเกาลินในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเฉลี่ยที่ 42 MPa) เนื่องจากแคลไซต์ในเกาลินสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้ดี ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) เกิดได้ดีขึ้น (Zuhua et al., 2014) อีกทั้งการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์ในเกาลินยังมีผลในการปรับสัดส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si:Al) ให้มีค่าเข้าใกล้อัตราส่วน 2:1 ถึง 3:1 (ดังแสดงในตารางที่ 4.2) ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ส่งผลให้ จีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูง (สมิทรและคณะ., 2551, Davidovits.,1988) อย่างไรก็ตาม เมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์ในเกาลินเกินกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสัดส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลง อาจเกิดสัดส่วนที่ไม่เหมาะสม (สัดส่วนที่เหมาะสมคือ 2:1) จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่าลดลง การเติมแคลไซต์ในเกาลินในเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 70 โดยน้ำหนักพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าใกล้เคียงกับการใช้แคลไซต์ในเกาลินเพียงอย่างเดียว 100 % อาจเนื่องมาจากสัดส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของเถ้าลอยที่เติมแคลไซต์ในเกาลินร้อยละ 70 โดยน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าต่างกันไม่มาก



ภาพที่ 4.8 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซน์เกาลินในปริมาณต่างๆโดย ----- แสดงค่ากำลังรับแรงอัดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อุณหภูมิห้อง

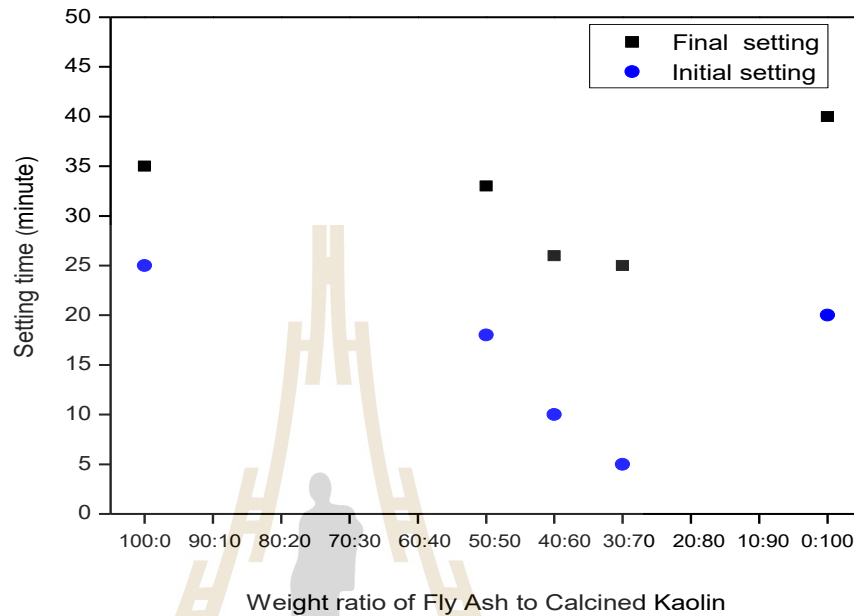
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณอัตราส่วน Si/Al

Composition (Weight%)		Si/Al ratio
Fly Ash	Calcine kaolin	
100	0	2.4
50	50	1.6
40	60	1.5
30	70	1.4
0	100	1.3

4.6.2 ผลการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซน์เกาลินต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

ภาพที่ 4.9 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์จากภาพพบว่าเมื่อปริมาณแคลไซน์เกาลินเพิ่มขึ้น เวลาในการก่อตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสัดส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมส่งผลโดยตรงต่อเวลา การก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ (E. Nimwinya et al.,2016) จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่แคลไซน์เกาลินเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้สัดส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลง แนวโน้มดังกล่าวส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากการ

ควบแน่นของพันธะระหว่างซิลิเกตกับอะลูมินेट ใช้เวลาในการควบแน่นเร็วกว่าพันธะระหว่างซิลิเกตกับซิลิเกต (P. Chindaprasirt, et al.,2012)



ภาพที่ 4.9 แสดงผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซน์เกาลินต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

4.7 ผลการแทนที่ผงจีโอพอลิเมอร์ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

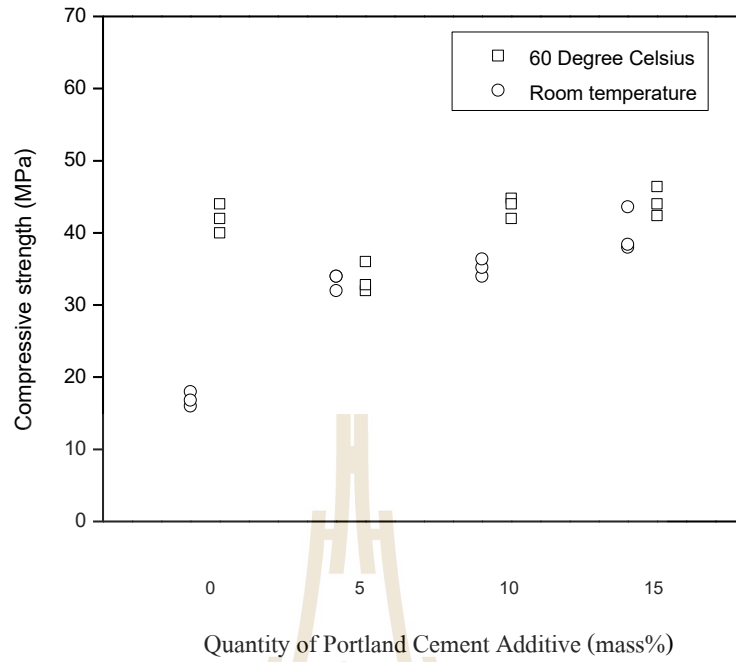
ผลของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ถูกแสดงในภาพที่ 4.10 โดยทำการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างทุกตัวอย่างถูกเตรียมด้วยสภาวะควบคุมเดียวกันอันได้แก่ อัตราส่วนระหว่างแคลไซน์เกาลินต่อเถ้าลอยเท่ากับ 50:50 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 2:1 อัตราส่วนผงวัสดุบดต่อสารละลายมีค่าเท่ากับ 1:1 ก่อนการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดตัวอย่างจะผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง (ตัวอย่างถูกทำทั้งสองอุณหภูมิ) เป็นระยะเวลา 7 วัน

4.7.1 ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดและเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

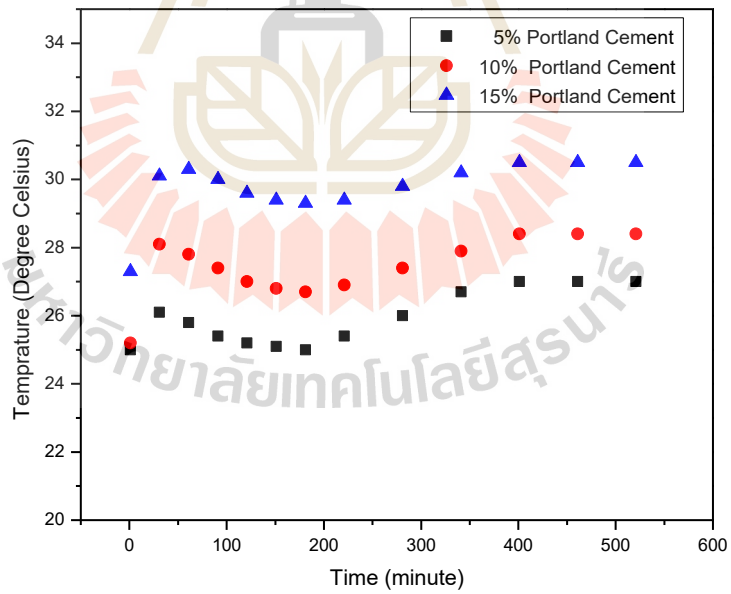
ผลการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วันแสดงในภาพที่ 4.10 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น การเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้แคลเซียมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดปฏิกิริยากับซิลิกา และอะลูมินา (จากแคลไซน์เกาลินและเถ้าลอย) ก่อให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Calcium aluminosilicate hydrate) คล้ายคลึงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต จะช่วยส่งเสริมให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงชันอย่างไรก็ตามในการทดลองพบว่าการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิห้องอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ช่วยบ่มจีโอพอลิเมอร์จากภายในจึงเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้องในขณะที่จีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีความต้องการอุณหภูมิในการบ่มเพียงพอแล้ว ดังนั้นอุณหภูมิจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์จึงมีผลกับการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างน้อย

นอกจากนี้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ส่งผลให้อุณหภูมิของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่ม ณ อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.11 จากภาพแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิขณะก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์นั้น มีลักษณะคล้ายคลึงกับการคายความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิที่สูงขึ้นดังกล่าวช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น ยิ่งไปกว่านี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังส่งผลให้เวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.12

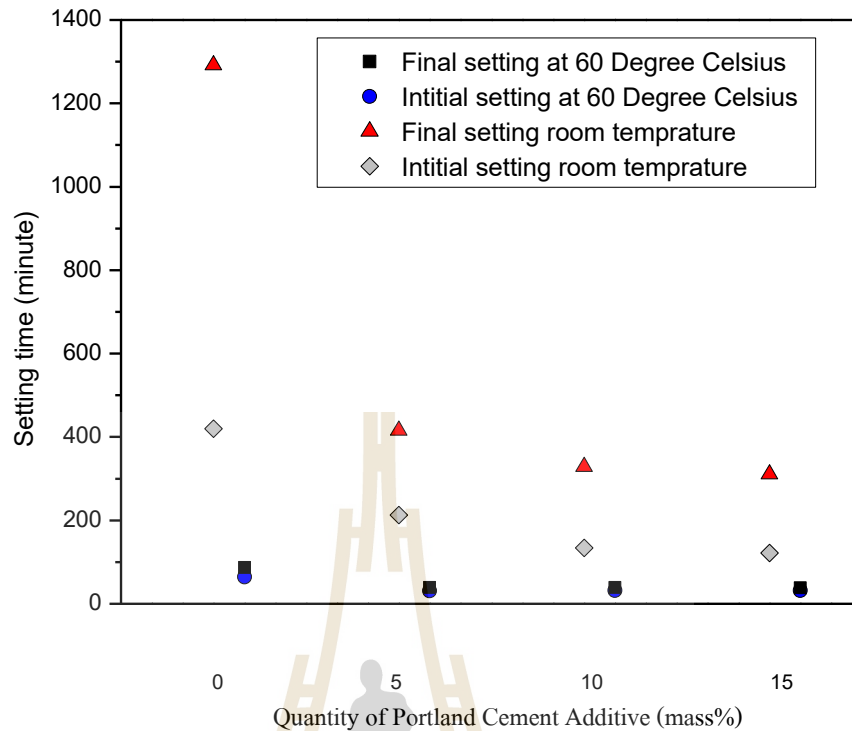
การวัดอุณหภูมิภายในชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 4.11 จะช่วยอธิบายเหตุผลที่ทำให้จีโอพอลิเมอร์สามารถบ่มที่อุณหภูมิห้องได้โดยการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณต่างๆพบว่าอุณหภูมิจากภายในที่ได้จากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ช่วยบ่มจีโอพอลิเมอร์ให้สามารถก่อตัวได้ ซึ่งอุณหภูมิภายในชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จะแปรผันตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เติมเข้าไป



ภาพที่ 4.10 แสดงผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในจีโอพอลิเมอร์ต่อค่ากำลังรับแรงอัด



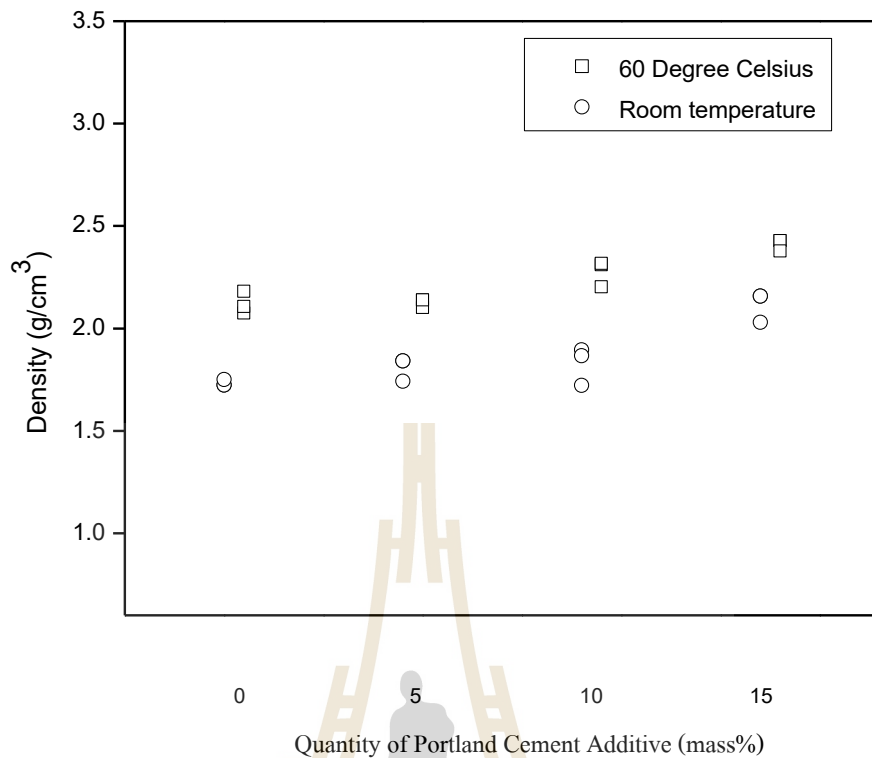
ภาพที่ 4.11 แสดงผลของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่ออุณหภูมิการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์



ภาพที่ 4.12 แสดงผลของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

4.7.2 ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์

ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์แสดงดังในภาพที่ 4.13 พบว่า การเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ทั้งตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอตโซลานิก (Pozolanic reaction) ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้รูพรุนในชิ้นงานลดลง (Anamika Singh. et al., 2015) อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ยังมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของปูนปอร์ตแลนด์ถึงเกือบ 2 เท่า (ความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับ 3.15 g/cm^3) ซึ่งความหนาแน่นที่ต่ำนี้นับเป็นข้อได้เปรียบของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ที่เหนือกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

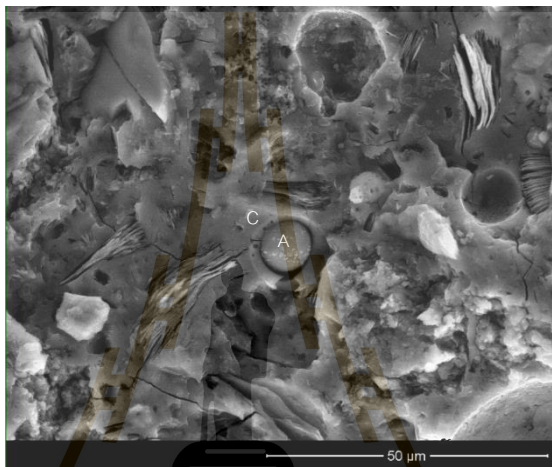


ภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับความหนาแน่นของแคลไซน์
กาลินแล้วลอยจีโอพอลิเมอร์

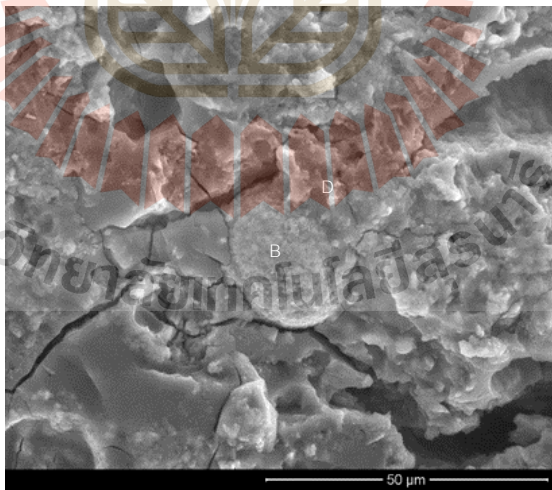
4.7.3 ผลของการเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ต่อโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์

ภาพที่ 4.14 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ภาพที่ 4.14 (ก) และ 4.14 (ข) แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่เติม และเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตามลำดับ พบว่าเมื่อเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เข้าไปในจีโอพอลิเมอร์ (ภาพที่ 4.14 ข) ส่งผลให้ลักษณะโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มมากขึ้นและมีเนื้อที่แน่นกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ เนื่องจากการเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะเป็นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมที่ช่วยเพิ่มผลผลิตของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Calcium aluminosilicate hydrate) อยู่ปะปนกับจีโอพอลิเมอร์ ทำให้แคลเซียมบางส่วนเกิดปฏิกิริยากับ ซิลิกาและอะลูมินาจากแคลไซน์กาลินและแล้วลอยเกิดเป็นเนื้อเดียวกันเกิดการแทรกซึมระหว่างรอยต่อของเกรนและรูพรุน จึงส่งผลต่อความหนาแน่นและส่งผลต่อการพัฒนาที่ดีขึ้นของจีโอพอลิเมอร์ (Guo et al., 2010) เมื่อพิจารณา จีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (ภาพ 4.14 ก.) ที่กำลังขยาย 3000 เท่าพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเนื้อไม่เรียบเนียนและไม่แน่น ยังคงมีแล้วลอยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่ภายในโครงสร้าง สามารถ

สังเกตได้จากผิวที่เรียบเนียนของแก้วลอย (A) และรอยต่อระหว่างแก้วลอย (C) กับจีโอพอลิเมอร์ ขณะเดียวกันจีโอพอลิเมอร์ที่ทำการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (ภาพ 4.14 ข.) พื้นผิวโครงสร้างจะมีลักษณะเชื่อมประสานและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าสังเกตได้จากบริเวณแก้วลอย (B) และรอยต่อระหว่างแก้วลอยกับจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแนบชิดกันหรือบางส่วนเป็นเนื้อเดียวกัน (D) ถึงแม้แก้วลอย (B) จะทำปฏิกิริยาไม่หมดแต่พื้นผิวถูกชะละลายไปบางส่วนแล้วบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าเมื่อทำการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



(ก) ไม่เติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

























(ข) เติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

ภาพที่ 4.14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จาก แก้วลอยผสมกับ แคลไซน์เกาลิน บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน (ก) ไม่เติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ข) เติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

4.8 การสังเคราะห์เส้นใยไฟเพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับจีโอพอลิเมอร์

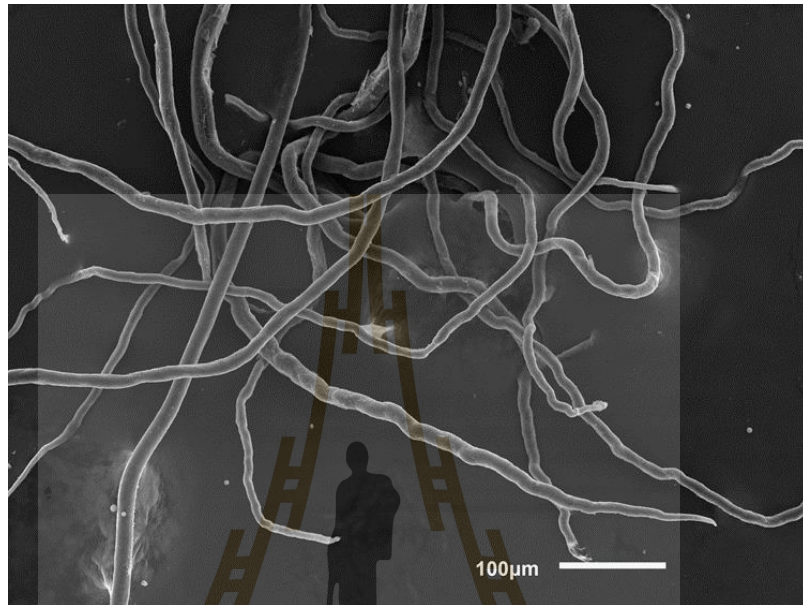
ผลการสังเคราะห์เส้นใยไฟโดยการนำไม้ไฟไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.25, 2.50, 3.75, และ 10 โมลาร์ เป็นเวลา 3, 7 และ 14 วันแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อลักษณะของเส้นใยไฟ

Solution	Concentration (molar)	Submerge time (day)		
		3	7	14
NaOH	1.25			
HCl				
NaOH	2.50			
HCl				
NaOH	3.75			
HCl				
NaOH	10			
HCl			-	-

การแช่ไม้ด้วยกรดไฮโดรคลอริกไม่สามารถแยกเส้นใยไฟออกจากเนื้อไม้ เฉพาะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่านั้นที่สามารถแยกเส้นใยไฟออกจากเนื้อไม้ได้ เส้นใยไฟสามารถแยกออกจากเนื้อไม้ได้โดยการแช่ไฟโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์เป็นเวลา 3 วัน ลักษณะของเส้นใยไฟหลังผ่านการปั่นและคัดขนาดด้วยตะแกรงคัดขนาดแสดงในภาพที่ 4.15 จากภาพพบว่าผิว

ของเส้นใยไม่เกิดความเสียหาย เส้นใยไฟที่ผ่านการสังเคราะห์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 10 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.15 แสดงลักษณะของเส้นใยไฟหลังผ่านการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์เป็นเวลา 3 วัน

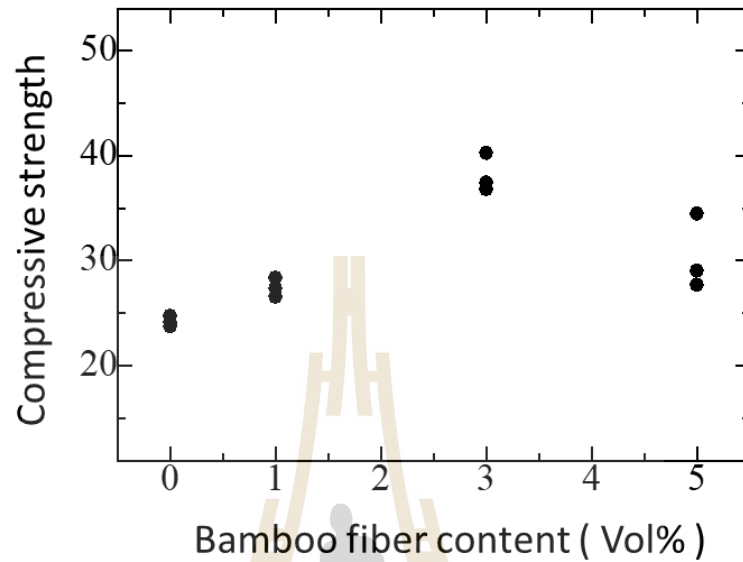
4.9 ผลการเติมเส้นใยไฟต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองเติมเยื่อไฟประกอบด้วยแก้วลอย ดินขาวเผา และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 1:1:0.1 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างทุกตัวอย่างถูกเตรียมด้วยสภาวะควบคุมเดียวกันอันได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 2:1 อัตราส่วนผงวัตถุติดต่อสารละลายมีค่าเท่ากับ 1:1 ก่อนการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและความสามารถทนต่อการดัดงอตัวอย่างจะผ่านการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7 วัน

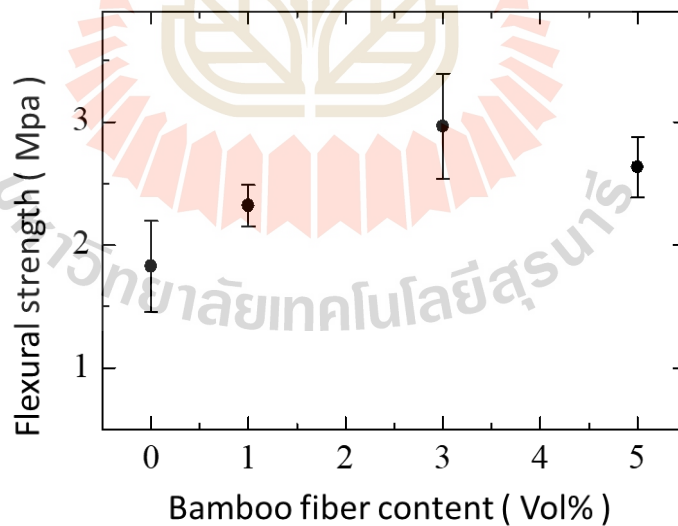
4.9.1 ผลของการเติมเส้นใยไฟต่อค่ากำลังรับแรงอัด และความทนต่อการดัดงอของจีโอพอลิเมอร์

ภาพที่ 4.16 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเติมเส้นใยไฟในปริมาณต่างๆ เมื่อเพื่อเส้นใยไฟในปริมาณร้อยละ 1 และ 3 โดยปริมาตรพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยไฟเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมเส้นใยไฟในปริมาณร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งผลของปริมาณเส้นใยไฟเบอร์ต่อความแข็งแรงต่อการโค้งงอของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มในทำนองเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.16 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเติมเส้นใยไฟเบอร์ในปริมาณต่างๆ



ภาพที่ 4.17 แสดงความแข็งแรงต่อการโค้งงอของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเติมเส้นใยไฟเบอร์ในปริมาณต่างๆ

เส้นใยไฟเบอร์มีความทนต่อแรงดึง (Tensile stress) ได้สูง ดังนั้นเมื่อนำไปผสมกับจีโอพอลิเมอร์เส้นใยไฟเบอร์จึงทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรงและมีผลในการช่วยเพิ่มความทนต่อการดัดงอให้กับจีโอพอลิเมอร์ ดังนั้น

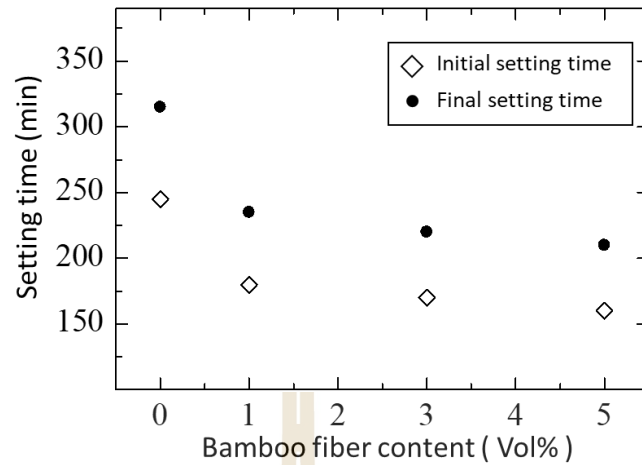
เมื่อเติมในปริมาณที่เหมาะสมกล่าวคือร้อยละ 1 และ 3 โดยปริมาตรจึงส่งผลให้ทั้งค่าค่ากำลังรับแรงอัด และความทนต่อการดัดงอของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมเส้นใยไฟเบอร์ในปริมาณมากส่งผลให้ปริมาณสารละลายสำหรับใช้ในการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์โรเซชันลดลงเนื่องจากสารละลายดังกล่าวถูกดูดซับด้วยเส้นใยไฟเบอร์ ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดและความแข็งแรงต่อการโค้งงอของจีโอพอลิเมอร์ลดลง ตารางที่ 4.4 แสดงความทนต่อการดัดงอของแผ่นซีเมนต์เส้นใยชนิดเรียบและแผ่นยิปซัมบอร์ดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) ด้วยการเติมเส้นใยไฟเบอร์ในจีโอพอลิเมอร์ร้อยละ 3 โดยปริมาตรความทนต่อการดัดงอของวัสดุมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นซีเมนต์เส้นใยแบบแผ่นเรียบ และแผ่นยิปซัมบอร์ด

ตารางที่ 4.4 แสดงความทนต่อการดัดงอของแผ่นซีเมนต์เส้นใยและวัสดุอื่น

ชนิดวัสดุ	ความทนต่อการดัดงอ	มาตรฐาน
แผ่นซีเมนต์เส้นใย:แผ่นเรียบ	4 MPa	มอก. 1427-2540
แผ่นยิปซัมบอร์ด	2-4 MPa	มอก. 219-2552

4.9.2 ผลของการเติมเส้นใยไฟเบอร์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

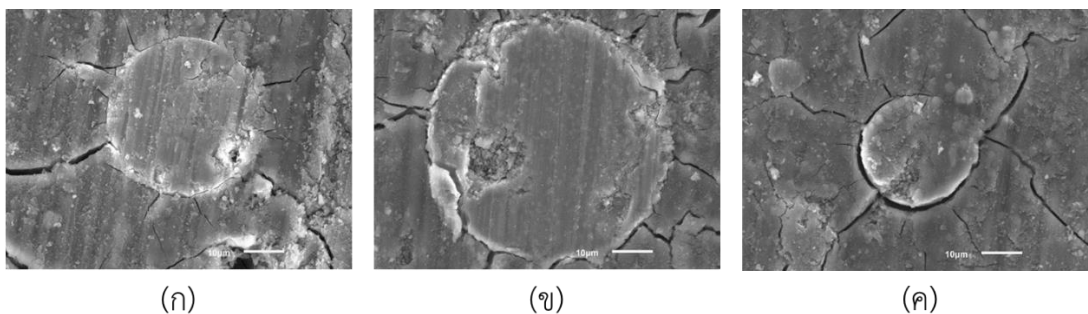
ผลของปริมาณเส้นใยไฟเบอร์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์แสดงในภาพที่ 4.18 เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยไฟเบอร์เพิ่มขึ้น มีผลในการลดเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์สัมพันธ์กับปฏิกิริยาระหว่างผงจีโอพอลิเมอร์และสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์จะลดลงเมื่อปริมาณของสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง เส้นใยไฟเบอร์ที่ถูกเติมเข้าไปในจีโอพอลิเมอร์จะดูดซับสารละลายต่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์โรเซชันไว้บางส่วน ทำให้ปริมาณสารละลายที่จะถูกใช้สำหรับทำปฏิกิริยากับผงจีโอพอลิเมอร์ลดลง เป็นเหตุให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยไฟเบอร์เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.18 แสดงผลของปริมาณเส้นใยไม้ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

4.9.3 ผลของการเติมเส้นใยไม้ต่อโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์

โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์-เส้นใยไม้แสดงในภาพที่ 4.19 โดยทั่วไปแล้วเส้นใยไม้เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการยึดเกาะกับซีเมนต์หรือจีโอพอลิเมอร์ได้ต่ำ การเพิ่มปริมาณเส้นใยไม้เกินกว่าร้อยละ 5 โดยปริมาตรส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยไม้และเนื้อจีโอพอลิเมอร์ลดลง ดังจะเห็นได้จากรอยต่อระหว่างเนื้อจีโอพอลิเมอร์และผิวของเส้นใยไม้ ในขณะที่การยึดเกาะระหว่างเส้นใยไม้และเนื้อจีโอพอลิเมอร์ยังเกิดได้ดีเมื่อการเติมเส้นใยไม้ในปริมาณน้อย (ร้อยละ 1 และ 3 โดยปริมาตร) การเติมเส้นใยไม้ในปริมาณมากส่งผลให้ปริมาณของสารละลายบางส่วนถูกดูดซับด้วยเส้นใยไม้ ทำให้ความแข็งแรงและความสามารถในการยึดเกาะระหว่างจีโอพอลิเมอร์และเส้นใยไม้ลดลง



ภาพที่ 4.19 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์-เส้นใยไม้ ในปริมาณร้อยละ 1 (ก), 3 (ข) และ 5 (ค) โดยปริมาตร

บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์ โดยใช้จีโอพอลิเมอร์ซึ่งสังเคราะห์จากขยะโรงไฟฟ้าถ่านหิน (เถาลอย) เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์และเสริมแรงด้วยเส้นใยไฟเบอร์จากการทดลองพบว่า เพื่อให้ได้ความแข็งแรงที่เหมาะสมต่อการใช้งานวัสดุจีโอพอลิเมอร์ต้องทำการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาคือ 15 โมลาร์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2:1 ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแคลไซน์เกาลินในส่วนผสม ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่พัฒนาได้มีค่าเฉลี่ย 42 MPa เมื่อแทนที่เถาลอยด้วยแคลไซน์เกาลินในสัดส่วนร้อยละ 1:1 โดยน้ำหนัก

เพื่อให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงที่เหมาะสมต่อการใช้งานและสามารถบ่มได้ที่อุณหภูมิห้องจำเป็นต้องผสมเถาลอยกับแคลไซน์ในสัดส่วนร้อยละ 1:1 โดยน้ำหนัก ร่วมกับการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อย ด้วยการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และใช้สารละลายซึ่งประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2:1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 33 MPa หลังบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสม นอกจากนี้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ยังมีน้ำหนักเบากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 2 เท่า

จากการศึกษาหาลักษณะของสารละลายที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาพบว่า ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์นั้น ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ โดยเมื่อสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์จำเป็นต้องใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะขาดสารละลายชนิดใดชนิดหนึ่งไม่ได้รับการใช้สารละลายชนิดเดียวในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลงอย่างมีนัยยะ

เวลาในการก่อตัวเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาในการทำงาน งานบางลักษณะต้องการเวลาในการก่อตัวที่รวดเร็ว เช่นงานซ่อมแซมรอยร้าว หรือรอยร้าวต่างๆ แต่งานบางลักษณะต้องการเวลาในการก่อตัวที่ช้าเพื่อให้มีเวลาเพียงพอต่อการทำงาน มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาในการก่อตัวของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นและปริมาณการแทนที่ของแคลไซน์เกาลินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาในการก่อตัวมีแนวโน้มที่ลดลง นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่าหากปราศจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตัวใดตัวหนึ่ง จะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ใช้เวลาในการก่อตัวนานมาก

เส้นใยไฟเบอร์สามารถสังเคราะห์ได้โดยการนำไมไฟไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นเวลา 3 วัน ด้วยการเติมเส้นใยไฟเบอร์ในปริมาณร้อยละ 1 และ 3 โดยปริมาตร มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดและความทนต่อการดัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้น ค่าความทนต่อการดัดของจีโอพอลิเมอร์เมื่อเติมเส้นใยไฟเบอร์ร้อยละ 3 โดยปริมาตร มีค่าใกล้เคียงกับความทนต่อการดัดของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถนำวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์-เส้นใยไฟเบอร์ไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์ สำหรับใช้ในงานก่อสร้างได้หลายชนิด เช่น ใช้ผลิตเป็นแผ่นฝ้าเพดาน แผ่นผนังกันห้องหรืออิฐฉนวนกันความร้อนและหากพิจารณาจากต้นทุนการผลิตแล้วจะพบว่า วัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์-เส้นใยไฟเบอร์ที่พัฒนาจากงานวิจัยนี้จะมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์ที่ใช้ตามท้องตลาดทั่วไป เนื่องจากเป็นวัสดุที่ผลิตจากของเสียในอุตสาหกรรม และหากพิจารณาในมิติด้านความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้วจะพบว่าวัสดุที่พัฒนาได้จากงานวิจัยนี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าวัสดุที่ใช้งานตามท้องตลาดทั่วไป จึงมีความเป็นไปได้สูงว่าวัสดุเชิงประกอบจีโอพอลิเมอร์-เส้นใยไฟเบอร์ที่พัฒนาจากงานวิจัยนี้จะมีความคุ้มค่าในการผลิตทั้งในมุมมองด้านเศรษฐศาสตร์และมุมมองด้านสิ่งแวดล้อม

นอกจากนี้วัสดุที่ถูกพัฒนาจากงานวิจัยนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภทได้อีกโดยการเพิ่มปริมาณซีเมนต์ในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ หรือแทนที่เถ้าลอยในงานวิจัยนี้ด้วยเถ้าลอยที่มีคุณภาพที่ดีกว่าและเพื่อความสะดวกต่อการใช้งานจริง งานวิจัยในอนาคตควรทำการศึกษาและพัฒนาส่วนผสมให้อยู่ในรูปแบบผงสำเร็จพร้อมใช้งาน

รายการอ้างอิง

- Abhilash S., Singh C. K. and Sharma A. K. 2011. Study of the properties of concrete by partial replacement of ordinary Portland cement by rice husk ash. International Journal of Earth Sciences and Engineering. 4(6), 965-968.
- Akinyemi A. B., Omoniyi E. T. and Onuzulike G., 2020. Effect of microwave assisted alkali pretreatment and other pretreatment methods on some properties of bamboo fibre reinforced cement composites. Construction and Building Materials, Volume 245, p. 118405.
- Alomayri T. and Low I. M. 2013. Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites. Journal of Asian Ceramic Societies. 1, 30-34.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C150-00: Standard Specification for Portland Cement, Annual Book of Standards, Philadelphia, 2001, Vol.04.01, 149-155.
- American Society for Testing and Materials, 2011. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C618, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2012. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM C109 C109M, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2013a. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM C138 C138M, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2013. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles. ASTM C266, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C311-00, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM, Vol.04.02, p.191-199.

- American Society for Testing and Materials, ASTM C618-00, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4.02, p. 310-313
- American Concrete Institute, ACI 232.2R-96, 2000, Use of fly ash in concrete, In 2000 ACI Manual of Concrete Practice, Part 2, Michigan, ACI.
- American Society for Testing and Materials, 2013. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles. ASTM C266, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2012. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM C109 C109M, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM D854, Philadelphia, United States of America.
- Bouharoun S., Leklou N. and Mounanga P. 2015. Use of asbestos-free fiber-cement waste as a partial substitute of Portland cement in mortar. Materials and Structures, 48, 1679-1687.
- Bouzoubaa N. and Fournier B. 2003. Optimization of fly ash content in concrete: Part 1: Non air entrained made without superplasticizer. Cement and Concrete Research. 33 (7), 1029-1037.
- Cheng T. W. and Chiu J. P. 2003. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. Minerals Engineering. 16, 205-210.
- Chindaprasirt P., Silva P. D., Crentsil K. S. and Hanjitsuwan S. 2012. Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. Journal of Material Science. 47, 4876-4883.
- Davidovits J. 1994. Properties of geopolymer Cements. Kiev State Technical University, Ukraine, 131-149.
- Davidovits J. 1999. Chemistry of geopolymeric systems terminology. Proceedingd: 2nd International Conference on Geopolymer. France, Paris:9-40.
- Davidovits J. and Davidovics M. 1988. Geopolymer room temperature ceramic matrix for composites, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 9, 835-842.

- Davidovits J. and Davidovics M. 1991. Geopolymer: Ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites, 36th International SAMPE Symposium, 36, 1939-1949.
- Davidovits J. 1994. Properties of geopolymer cements, first International Conference on Alkaline Cements and Concretes. 1, 131-149.
- Duxson P., Fernández J. A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo A. and Deventer J. S. J. V. 2007. Geopolymers technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*. 42, 2917-2933.
- Fokam C. B., Toumi E., Kenmeugne B., Wiryikfu N. C. and Mevaa L. 2021. Experimental study of the addition of oil palm mesocarp fiber on the physical and mechanical properties of fiber cement mortar composites. *Applied Sciences*, 3(85).
- Ganesan K., Rajagopal K. and Thangavelu K. 2007. Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 22, 1675-1683.
- Hawa A. and Eng M. 2013. Properties of metakaolin based geopolymer binder used in repair of concrete pavement, Princess of Naradhiwas University.
- Hardjito D., Wallah S., Sumajouw D. M. J., and Rangan B. V. 2004. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, 101(6), 467-472.
- Homwuttiwong S. and Sirivivatnanon V. 2004. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*. 34, 1087-1092.
- Ikpong A. A. and Okpala D. C. 1992. Strength characteristics of medium workability ordinary Portland cement-rice husk ash concrete. *Building and Environment*. 7(1):105-111.
- Jaarsveld J. S. G. V., Deventer J. S. J. V. and Lorenzer L. 1995. Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized fly ash. University of Stellenbosch Research Report.
- Jaarsveld J. G. S. V. and Deventer J. S. J. V. 1996. The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metal. *Minerals Engineering*. 10, 659-669.

- Jimenez A. F., Palomo A. and Criado M., Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model, *Cement and Concrete Research*, In Press, Corrected Proof, Available online 21 December 2004.
- Jumrat S. and Chatveera B. 2006. Influence of Mix Proportions on Physical and Dielectric Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar. *KMUTT Research and Development Journal*. 33, 145-162. (In Thai).
- Kannan V. and Ganesan K. 2014. Chloride and chemical resistance of self-compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*. 51, 225-234.
- Khalil H. P. S. A., Bhat I. U. H., Jawaid M., Zaidon A., Hermawan D. and Hadi Y. S. 2012. Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review, *Materials and Design*, 42: 353-368.
- Kolay P. K. and Singh D. N. 2001. Physical, chemical, mineralogical, and thermal properties of cenospheres from an ash lagoon. *Cement and Concrete Research*. 31 (4), 539-542.
- Nimwinya E., Arjhar W., Horpibulsuk S., ngerkham T. P. and Poowancum A. 2016. A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer, *Journal of Cleaner Production*, 119, 128-134.
- Noori A., Lu Y., Saffari P., Liu J. and Ke J. 2021. The effect of mercerization on thermal and mechanical properties of bamboo fibers as a biocomposite material: A review. *construction and Building Materials*, Issue 279, p. 122519.
- Paisitsrisawat P. and Rattanasak U. 2013. Effect of Silica Fume on the Properties of Fluidized Bed Combustion (FBC) Fly Ash Geopolymer. *The Journal of Industrial Technology*. 9, 10 -14.
- Palomo A., Macias A., Blanco M. T. and Puertas F. 1992. Physical, chemical and mechanical characterization of geopolymers. *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement*. New Delhi, India, 5, 505-511.
- Palomo A., Grutzeck M. W. and Blanco M. T. 1999. Alkali activated fly ashes cement for the future. *Cement and Concrete Research*. 29 (8), 1323-1329.

- Palomo A., Marcias A., Blanco M.T. and Puertas F. 1992. Physical, chemical and mechanical characterisation of geopolymers. Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement. 9: 505-511.
- Poowancum A., Nimwinya E., and Horpibulsuk S. 2015. Development of Room Temperature Curing Geopolymer from Calcined Water-Treatment-Sludge and Rice Husk Ash. *Calcined Clay for Sustainable Concrete* 1; 291-297.
- Poon C. S., Qiao X. C. and Lin Z. S. 2003. Pozzolanic properties of reject fly ash in blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1857-1865.
- Provis J. L. and Deventer J. S. J. V. 2009. *Geopolymers structure processing properties and industrial applications*. Woodhead Publishing Limited, United Kingdom.
- Provis J. L. 2014. Geopolymers and other alkali activated materials why how and what. *Materials and Structures*. 47, 11–25.
- Rashad A. M. 2013. Alkali-activated metakaolin: a short guide for civil engineer – a overview. *Construction and Building Materials*. 41: 751-765.
- Safiuddin M. D. and West J. S. 2010. Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*. 32, 708-717.
- Sanawong C., Somna K. and Chalee W. 2010. Compressive and Bond Strengths of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, Burapha University.
- Seanawong C. and Chalee W. 2011. Chloride Penetration of Fly Ash-based Geopolymer. *The Journal of KMUTNB*, 21(2).
- Siddique R. 2003. Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Research*. 33(4), 539-547.
- Swanepoel J. C. and Strydom C. A. 2002. Utilisation of fly ash in geopolymeric material. *Applied Geochemistry*, 17, 1143-1148.
- Svinning K. 2006. Design and manufacture of Portland cement application of sensitivity analysis in exploration and optimization part1 exploration. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*. 84, 177-187.

- Vassilev S. V., Menendez R., Diaz S. M. and Martinez T. M. R. 2004. Phase-mineral and chemical composition of fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 2. Characterization of ceramic cenosphere and salt concentrates. Fuel. 83, 585-603.
- Wang J. W. and Cheng T. W. 2003. Production Geopolymer Material by Coal Fly Ash. Proceeding of the 7th International symposium on East Asian Resource Recycling Thechnology, 10-14, Tainan, Taiwan.
- Xie J., Yin J., Chen J. and Xu J. 2009. Study on the geopolymer based on fly ash and slag. Proceeding of 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, 3, 578-581.
- กนกวรรณ ปันเขตร และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2533). “ผลของสารผสมเพิ่มต่อสมบัติจีโอพอลิเมอร์จาก เถ้าลอย”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 33 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน
- จิรัฐิติ บรรจงศิริ, “การศึกษากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน”, การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, อินทรชัย หอวิจิตร (2528). “การศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอย แม่-เมาะ”. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริ (2549). “เถ้าลอยในงานคอนกรีต” สมาคมคอนกรีตไทย
- รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554). “การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำและความต้านทาน คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมรวมหยาบจากการย่อย เศษคอนกรีตเก่า”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 34 ฉบับที่ 4
- สกลวรรณ ท่านจิตสุวรรณ, ธนากร ภูเงินชา และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2015). “สมบัติของเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปี ที่ 9 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2556
- สำเร็จ รักซ้อน และ วิโรจ พรหมเงิน (2552). “การพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อย” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร
- อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2550). “ปอซโซลาน”. กรมกองฟิสิกส์วิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005). การศึกษาสารจีโอโพลิเมอร์จาก เถ้าลอยและดินขาวเผา. การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ. 1:153-161.



ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนูรัตน์ ภูวานคำ

- การศึกษา/คุณวุฒิ : ปริญญาเอก : Doctor of Engineering
(Material Science and Engineering)
Nagaoka University of Technology, Japan
ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2011
- ปริญญาโท : Master of Engineering (Ceramic Engineering),
Suranaree University of Technology, Thailand
ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2006
- ปริญญาตรี : Bachelor of Engineering (Ceramic Engineering),
Suranaree University of Technology, Thailand
ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2002
- ตำแหน่งปัจจุบัน : อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก
- ประวัติการทำงาน : 2002-2003 Assistant Chief, Research and Development Division
Standard Insulator Co., Ltd., Thailand
2006-2011 Lecturer, Faculty of Industrial Technology, Valaya
Alongkorn Rajabhat University, Thailand
2011-Present Lecturer, School of Ceramic Engineering, Institute of
Engineering, Suranaree University of Technology

ผลงานทางวิชาการ / ผลงานวิจัย :

- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “Development of Low-Thermal-Expansion Silicon Carbide / Zirconium Tungstate Porous Ceramics”, Journal of American Ceramic Society, **93**[10], 2978-2980,(2010)
- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, Isaias Juarez Ramirez, Leticia M. Torres Martines, Zhengyi Fu, Soo Wahn Lee and Kozo Ishizaki, “Fabrication of Low Thermal Expansion SiC / ZrW₂O₈ Porous Ceramics”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **20**, 012010, (2010)
- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “Low-Temperature Glass Bonding for Development of Silicon Carbide / Zirconium Tungsten Oxide Porous Ceramics with Near Zero Thermal Expansion Coefficient”, Journal of American Ceramic Society, **94**[5], 1354-1356, (2011).
- Anurat Poowancum and Sukasem Watcharamaisakul, “Effect of Nano-oxide Addition on Mechanical Properties of Alumina-Mullite-Zirconia Composites” Advanced Materials Research Vol. 1102 (2015) pp 87-90
- Anurat Poowancum, Ekkasit Nimwinya and Suksun Horpibulsuk, “Development of Room Temperature Curing Geopolymer from Calcined Water-Treatment-Sludge and Rice Husk Ash”, Proceedings of the 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Springer, London, (2015).
- Anurat Poowancum and Suksun Horpibulsuk, “Development of Low Cost Geopolymer from Calcined Sedimentary Clay”, Proceedings of the 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Springer, London, (2015).
- Anurat Poowancum, Development of Dan Kwian Clay for Use in Ceramic Tile Industry”, Suranaree Journal of Science and Technology, **22** [1], 15-20, (2015).
- Ekkasit Nimwinya, Weerachai Arjharn, Suksun Horpibulsuk, Tanakorn Phoo-ngernkham and Anurat Poowancum, “A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer”, Journal of Cleaner Production, **119**, 128-134, (2016).
- Jakrapong Kumsap, Anurat Poowancum and Anucha Wannagon, “Redox Effects of Erbium Oxide Doped Industrial Soda-Lime Glasses by UV-VIS-NIR Study”, Key Engineering Materials, **702**, 121-124 (2016).

- Nuttapon Phachan, Siriwan Chokkha and Anurat Poowancum, “A sustainable cement replacement material from a coal-fired power plant waste”, Proceedings of The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment, Japan, (2017).

International Conferences:

- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “*Effects of Sintering Methods on Thermal Expansivity of SiC/ZrW₂O₈ Porous Materials*”, The CJK2009 Seminar and Summer Workshop, Jeju Island, Korea, 2009 (June 28 - July 3).
- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “*Fabrication of low thermal expansion SiC/ZrW₂O₈ porous ceramics*”, International Symposium on Multifunctional Ceramic Materials Based on Nanotechnology, Tokyo, Japan, 2010 (March 6-8).
- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “*Fabrication of Ultra Low Thermal Expansion SiC/ZrW₂O₈ Porous Ceramics*”, The Symposium on Hybrid Nano Materials Toward Future Industries, Nagaoka, Japan, 2010 (November 19-20).
- Anurat Poowancum, Koji Matsumaru, and Kozo Ishizaki, “*Low-Temperature Vitrified Bonding for Near Zero Thermal Expanding SiC/ZrW₂O₈ Porous Ceramics*”, The CJK2011 Meeting, Niigata, Japan, 2011 (June 3–5).
- Anurat Poowancum, Ekkasit Nimwinya and Suksun Horpibulsuk, “*Development of Room Temperature Curing Geopolymer from Calcined Water-Treatment-Sludge and Rice Husk Ash*”, The 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Lausanne, Switzerland, 2015 (June 23rd - 25th).
- Anurat Poowancum and Suksun Horpibulsuk, “*Development of Low Cost Geopolymer from Calcined Sedimentary Clay*”, The 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Lausanne, Switzerland, 2015 (June 23rd - 25th).
- Nuttapon Phachan, Siriwan Chokkha and Anurat Poowancum, “*A sustainable cement replacement material from a coal-fired power plant waste*”, The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment, Kobe, Japan, 2017 (June 8th -11th)

ภาคผนวก

ภาพตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

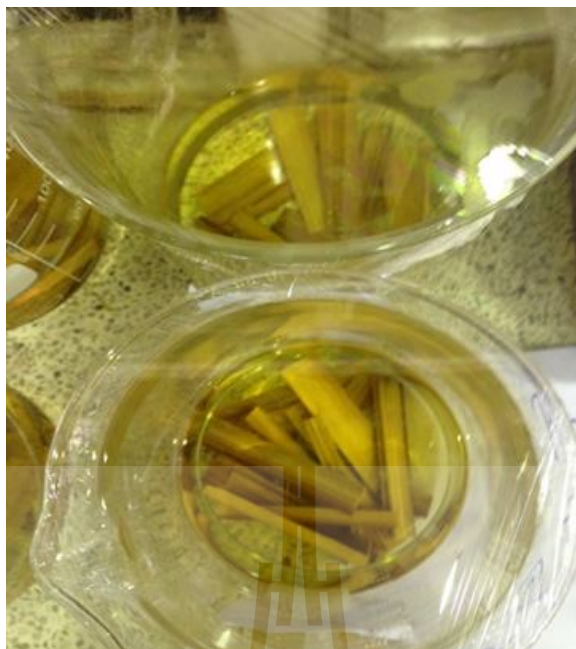




ภาพ ก การเตรียมไม้ไผ่เพื่อใช้ในสารละลาย



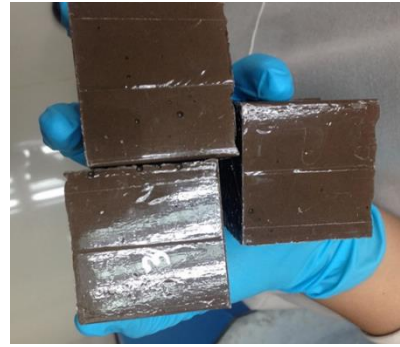
ภาพ ข การแช่ไม้ไผ่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ภาพ ค การแช่ไม้ไผ่ในสารละลาย HCl



ภาพ ง ไม้ไผ่ที่ผ่านการแช่ในสารละลาย



ภาพ จ ตัวอย่างสำหรับทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด



ภาพ ฉ ตัวอย่างสำหรับวัดความแข็งแรงต่อการโค้งงอ

