



โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

การศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและขี้เถ้าไม้ไผ่
(The Characteristic Study of Geopolymer Materials from Clay
Brick Waste and Bamboo Ash)

จัดทำโดย

นางสาวชาคริยา ศรีรักษา รหัสนิต 612091027

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.เสาวณีย์ สิงห์สโรทัย

โครงการวิจัยเล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

ปีการศึกษา 2564

การศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและขี้เถ้าไม้ไผ่
The Characteristic Study of Geopolymer Materials from Clay Brick
Waste and Bamboo Ash

นางสาวชาคริยา ศรีรักษา รหัสนิสิต 612091027

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ ดร.เสาวณีย์ สิงห์สโรทัย

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและขี้เถ้าไม้ไผ่ โดยศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของขี้เถ้าไม้ไผ่และอัตราส่วนการผสมระหว่างเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและขี้เถ้าไม้ไผ่ต่อสารละลายอัลคาไลน์ (โซเดียมไฮดรอกไซด์/โซเดียมซิลิเกต) ที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เพื่อที่จะพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งให้กลายเป็นจีโอพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสำหรับการนำมาใช้งานด้านการก่อสร้าง ซึ่งจะช่วยลดปัญหาขยะในสิ่งแวดล้อมได้ จากการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของขี้เถ้าไม้ไผ่ พบว่า ความร้อนและเวลาในการเผาเป็นตัวแปรสำคัญต่อสมบัติของขี้เถ้าไม้ไผ่ และเลือกใช้การเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (hrs) เมื่อนำขี้เถ้าไม้ไผ่ที่ได้ไปผสมกับเศษอิฐแดงเหลือทิ้งในสัดส่วนเท่ากับ 100:0 และ 90:10 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ (M) เป็นตัวประสานร่วมกับโซเดียมซิลิเกตในสัดส่วนเท่ากับ 60:40 จากนั้นนำขึ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ไปทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นเชิงปริมาตร พบว่าขึ้นตัวอย่างในอัตราส่วน 100:0 สามารถรับแรงอัดได้สูงกว่าที่อัตราส่วน 90:10 แต่ซึมน้ำได้น้อยกว่า และความหนาแน่นเชิงปริมาตรของขึ้นตัวอย่างทั้งสองอัตราส่วนมีค่าประมาณ $0.3-1.0 \text{ g/cm}^3$ ที่ได้คุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์ เศษอิฐแดง ขี้เถ้าไม้ไผ่

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิจัยฉบับนี้ทำให้ข้าพเจ้าได้รับความรู้ต่างๆ มากมายเกี่ยวกับการศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการนำวัสดุที่ได้จากกระบวนการผลิต และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเป็นวัสดุประสานในการทำอิฐมวลเบา ตลอดจนได้รับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ การให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้ กระบวนการคิดวิเคราะห์ การวางแผน รวมถึงตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่งจากอาจารย์ ดร.เสาวณีย์ สิงห์สโรทัย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ขอขอบพระคุณอาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องในการเขียนเล่มโครงการวิจัยฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบิดา มารดา และผู้ปกครองที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในสาขาวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ที่คอยให้คำปรึกษา คอยช่วยเหลือซึ่งกันและกัน ให้กำลังใจในการทำโครงการวิจัยฉบับนี้

ท้ายนี้ขอขอบคุณงานวิจัยทุกงาน และแหล่งข้อมูลทุกแหล่ง ที่ข้าพเจ้าได้นำมาอ้างอิงในการจัดทำโครงการวิจัยฉบับนี้

ชาคริยา ศรีรักษา

ผู้จัดทำ

คำนำ

โครงการวิจัยฉบับนี้ทำการศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์ที่ไม่ได้โดยศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของซีเมนต์ไม่ไฟและอัตราส่วนการผสมระหว่างเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์ไม่ไฟต่อสารละลายอัลคาไลน์ (โซเดียมไฮดรอกไซด์/โซเดียมซิลิเกต) ที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เพื่อที่จะพัฒนาอิฐมวลเบาจากจีโอพอลิเมอร์ให้มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานด้านการก่อสร้าง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของรายวิชาโครงการทางวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ 2 รหัสวิชา 1002402 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ โดยผู้จัดทำมีจุดประสงค์ในการนำเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์ไม่ไฟที่เหลือทิ้งจากการเกษตรมาทำการศึกษาองค์ประกอบและพัฒนาให้เป็นอิฐมวลเบาจีโอพอลิเมอร์สำหรับนำมาใช้ในงานก่อสร้าง

ผู้จัดทำหวังว่าโครงการวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์กับผู้อ่านหรือนักศึกษาที่กำลังหาข้อมูลเรื่องนี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ชาคริยา ศรีรักษา

ผู้จัดทำ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
คำนำ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ระยะเวลาดำเนินงาน.....	2
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 จีโอพอลิเมอร์.....	5
2.1.1 ความหมายของจีโอพอลิเมอร์.....	5
2.1.2 ปฏิกริยาการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์.....	7
2.1.3 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์.....	11
2.2 ไม้ไผ่.....	12
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมี.....	14
2.2.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	15
2.2.3 คุณลักษณะพิเศษของไม้.....	15
2.3 ซิลิกา.....	16
2.3.1 สมบัติของซิลิกา.....	16
2.3.2 รูปแบบซิลิกา.....	17

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.3.3 ประโยชน์ของซิลิกา.....	18
2.3.4 ลักษณะทางเคมีของซิลิกา.....	18
2.3.5 ซิลิกาที่มีอยู่ในพืช.....	18
2.4 อะลูมินา.....	19
2.5 อิฐ.....	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย	30
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.1.1 วัสดุและสารเคมี.....	30
3.1.2 อุปกรณ์.....	31
3.1.3 เครื่องมือและเครื่องทดสอบ.....	32
3.2 การเตรียมไม้ไผ่.....	33
3.3 การเตรียมเศษอิฐแดง.....	33
3.4 การเตรียมจีโอพอลิเมอร์ จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่.....	33
3.4.1 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาไม้ไผ่.....	33
3.4.2 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเผาไม้ไผ่.....	34
3.4.3 ขั้นตอนการเตรียมจีโอพอลิเมอร์.....	34
3.5 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์.....	35
3.5.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test).....	35
3.5.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	36
3.5.3 การทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Volumetric Density).....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	37
4.1 ผลการทดลองการเตรียมจีโอพอลิเมอร์.....	37
4.1.1 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาไม้ไผ่.....	37
4.1.2 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเผาไม้ไผ่.....	38

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.2 ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์	38
4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test)	38
4.2.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	40
4.2.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Volumetric Density).....	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	43
บรรณานุกรม	44
ประวัติย่อผู้จัดทำ	46

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization Process).....	6
ภาพที่ 2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของซิลิเกต (Silicate).....	8
ภาพที่ 3 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของอะลูมิเนต (Aluminate).....	8
ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดพอลิเซียเลต (Polysialate).....	9
ภาพที่ 5 ปฏิกิริยาเคมีการเกิดจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization).....	10
ภาพที่ 6 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	10
ภาพที่ 7 ลักษณะของไม้ไฟ.....	13
ภาพที่ 8 ลำไม้ไฟแก่.....	13
ภาพที่ 9 ลักษณะของอิฐมอญ.....	21
ภาพที่ 10 ลักษณะของอิฐบล็อก.....	22
ภาพที่ 11 ลักษณะของอิฐมวลเบา.....	23
ภาพที่ 12 ลักษณะของอิฐเซรามิก.....	24
ภาพที่ 13 ลักษณะของอิฐขาว.....	24
ภาพที่ 14 โซเดียมซิลิเกต (Na ₂ SiO ₃).....	30
ภาพที่ 15 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH).....	30
ภาพที่ 16 เตาเผาอุณหภูมิสูง.....	31
ภาพที่ 17 ตู้อบลมร้อน.....	31
ภาพที่ 18 แบบหล่อซิลิโคน.....	31
ภาพที่ 19 ตะแกรงร้อน.....	32
ภาพที่ 20 เครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่ง.....	32
ภาพที่ 21 เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง.....	32
ภาพที่ 22 อุปกรณ์การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	34
ภาพที่ 23 วัสดุที่ผ่านตะแกรงร้อน ขนาด 325 และจีโอพอลิเมอร์ที่กวนเป็นเนื้อเดียวกัน.....	34
ภาพที่ 24 ตัวอย่างในแบบหล่อซิลิโคน และตัวอย่างที่หุ้มด้วยแผ่นพลาสติก.....	35

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 25 บ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง	35
ภาพที่ 26 ลักษณะซี้เก้าไม้ไผ่ที่เผาเป็นเวลา 3 hrs ที่อุณหภูมิต่างๆ (a) อุณหภูมิ 600 °C (b) อุณหภูมิ 800 °C และ (c) อุณหภูมิ 1,000 °C	37
ภาพที่ 27 ลักษณะซี้เก้าไม้ไผ่เผาที่อุณหภูมิ 600 °C ที่เวลาต่างๆ (a) เวลาเผา 1 hr (b) เวลาเผา 2 hrs (c) เวลาเผา 3 hrs และ (d) เวลาเผา 6 hrs	38

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์ ดินขาวเผา ถ้ำลอย ทราบจากการหลอมโลหะ และตะกรันจากการหลอมเหล็ก.....	7
ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของชั้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 100:0	39
ตารางที่ 4 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของชั้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 90:10	39
ตารางที่ 5 แสดงน้ำหนักของชั้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสม 100:0	40
ตารางที่ 6 แสดงน้ำหนักของชั้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสม 90:10	41
ตารางที่ 7 แสดงค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของชั้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสม 100:0 .	41
ตารางที่ 8 แสดงค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของชั้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสม 90:10 .	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรส่งผลให้เกิดการขยายตัวของอุตสาหกรรมการก่อสร้าง โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือปูนซีเมนต์ทั่วไปซึ่งเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความแข็งแรงคงทน โดยในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้ความร้อนในการเผามากถึง 1,400-1,600 °C และในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตันจะสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เท่ากับ 0.96 ตันออกสู่บรรยากาศ รวมไปถึงอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ยังได้ปล่อยก๊าซกำมะถันออกไซด์ (SO₃) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) อีกด้วย ซึ่งก๊าซเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effects) และเกิดฝนกรดอีกด้วยนอกจากนี้กรมควบคุมมลพิษ (2560) รายงานว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากอุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศไทยมาจากอุตสาหกรรมซีเมนต์มากเป็นอันดับหนึ่งคิดเป็นสัดส่วนถึงร้อยละ 75 ซึ่งหมายความว่าถ้าลดการผลิตซีเมนต์ได้บางส่วน จะสามารถช่วยลดปริมาณการผลิต CO₂ ซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้ด้วย ดังนั้นการหาวัสดุที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างเพื่อลดการใช้พลังงานและลดปริมาณการเกิดก๊าซเรือนกระจก จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารละลายต่าง ความเข้มข้นสูงและสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอะลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) เป็นหลัก ซึ่งสารตั้งต้นสามารถได้จากธรรมชาติหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อาทิ ถ้ำลอยจากโรงงานไฟฟ้า ถ้ำกลบจากการเผาข้าวหรือกลบเพื่อทำถ่าน เป็นต้น โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) มีความแข็งแรง สามารถก่อตัวและมีความเสถียรรวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยในกระบวนการผลิตจีโอพอลิเมอร์มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้พลังงานน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้จีโอพอลิเมอร์ยังมีคุณสมบัติที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในหลายประการ เช่น มีสมบัติในการตรึงโลหะที่ดี มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง มีการแข็งตัวที่รวดเร็วและมีความแข็งแรงที่ดี มีการทนกรดและซัลเฟตที่ดี มีการหดตัวต่ำ ใช้พลังงานต่ำในการผลิต และมีราคาถูกนอกจากประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างแล้ว จีโอพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านอื่นๆ ได้แก่ การบำบัดของเสีย การพิสูจน์

อักษรไฟ การก่อสร้าง วิศวกรรมอาหารและใช้เป็นวัสดุชีวภาพ (วราพร วงษ์เจริญสมบัติ และคณะ, 2020)

การส่งเสริมการใช้งานวัสดุประสานจากจีโอพอลิเมอร์ในวัสดุก่อสร้างเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน โดยเน้นที่วัสดุตั้งต้นที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่หาได้ง่าย ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมาก ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จึงมีเป้าหมายหลักในการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งอย่างซีเมนต์ไมไฟที่ผ่านการเผาโดยตรงและเศษอิฐแดงเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตอิฐในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้ในงานคอนกรีตบล็อก ให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม (มาตรฐาน มอก. 57-2533) ซึ่งกำหนดให้คอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 14 MPa โดยแต่ละก้อนต้องมีกำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 11 MPa (วิเชียร ซาลี, 2018)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์ไมไฟ
2. ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของซีเมนต์ไมไฟ
3. ศึกษาอัตราส่วนการผสมระหว่างเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์ไมไฟต่อสารละลายอัลคาไลน์
4. ศึกษาการทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นเชิงปริมาตรของอิฐมวลเบาที่เตรียมได้จากวัสดุจีโอพอลิเมอร์

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์ไมไฟ
2. ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์ไมไฟ
3. ทดสอบสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ อาทิเช่น ทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นเชิงปริมาตรของอิฐมวลเบา

1.4 ระยะเวลาดำเนินงาน

ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย เป็นเวลา 5 เดือน รวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวางแผนการทำงาน ออกแบบการทดลอง วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล จัดทำรูปเล่มโครงการวิจัย

กิจกรรมที่ 1

รวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วางแผนการทำงาน เตรียมวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

กิจกรรมที่ 2

เตรียมชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์จากไม้ไผ่

กิจกรรมที่ 3

ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อิฐมวลเบาจากจีโอพอลิเมอร์ และทดสอบสมบัติต่างๆ อาทิเช่น การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test) การดูดซึมน้ำ (Water absorption) และความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Density Testing)

กิจกรรมที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดลองตามสมบัติต่างๆ ที่ได้ทำการทดสอบในกิจกรรมที่ 3

กิจกรรมที่ 5

สรุปผลการทดลอง จัดทำรูปเล่มโครงงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

กิจกรรมที่ 6

นำเสนอผลของโครงงานวิจัย

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

เริ่มตั้งแต่วันที่ 20 ธันวาคม 2564 จนถึงวันที่ 20 เมษายน 2565 โดยมีแผนการดำเนินงานวิจัยดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการทำงาน/เดือน	พ.ศ. 2565				
	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. รวบรวมข้อมูล และศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วางแผนการทำงาน	/	/	/	/	/
2. ออกแบบการทดลอง วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	/	/	/	/	
3. เตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์จากไม้ไผ่			/	/	/
4. นำจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มาขึ้นรูปเป็นอิฐมวลเบา และทดสอบสมบัติต่างๆ					/

5. วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง และจัดทำรูปเล่ม					/
6. นำเสนอผลของโครงการวิจัย					/

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบความเป็นไปได้ในการเตรียมวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์จากเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์
2. ได้ทราบตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติของซีเมนต์
3. ได้ทราบอัตราส่วนการผสมระหว่างเศษอิฐแดงเหลือทิ้งและซีเมนต์ต่อสารละลายอัลคาไลน์
4. ได้ทราบถึงสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นเชิงปริมาตรของอิฐมวลเบาที่เตรียมได้จากวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์

บทที่ 2

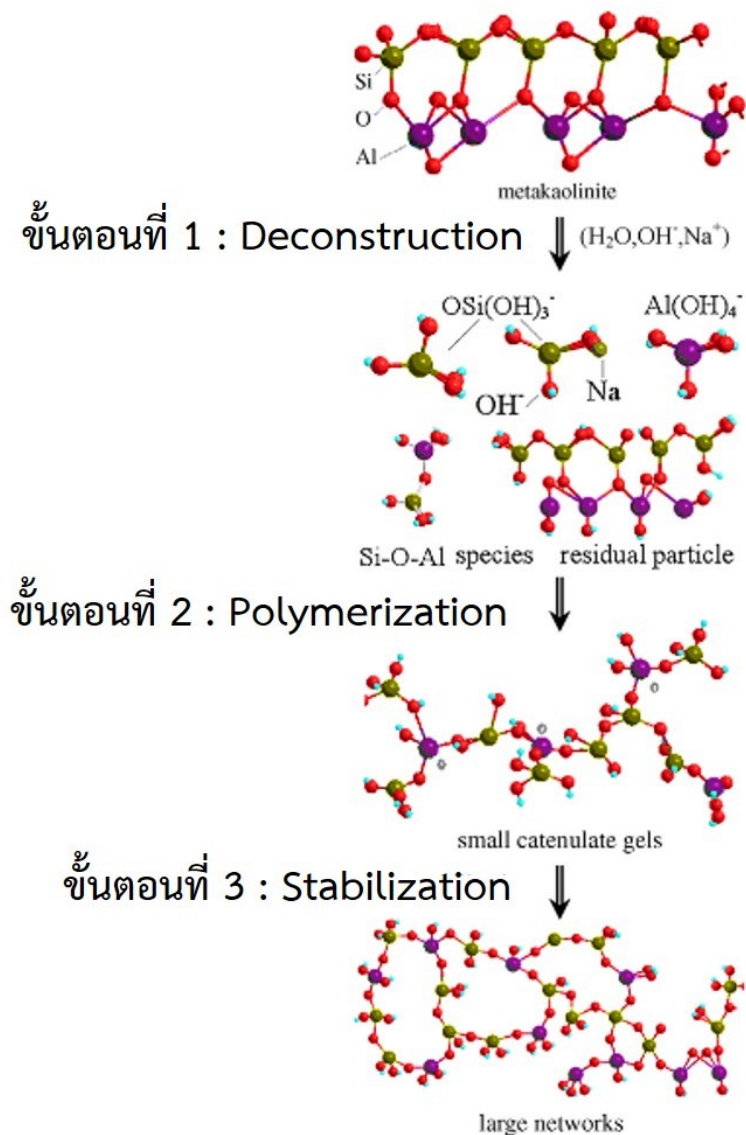
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอพอลิเมอร์

2.1.1 ความหมายของจีโอพอลิเมอร์

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) หรือเรียกอีกอย่างว่า พอลิซียเลต (Polysilate) จีโอพอลิเมอร์ เป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1970 โดยศาสตราจารย์โจเซฟ เดวิดคอฟ นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส โดยจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่เกิดจากการทำปฏิกิริyajีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) ของสารตั้งต้นที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก ได้แก่ ดินขาวเผา (Metakaolin) เถ้าลอย (Fly Ash) หรือ เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) ซึ่งสารตั้งต้นดังกล่าวอาจผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การบด หรือ การเผา เพื่อเพิ่มความสามารถของวัสดุในการเกิดปฏิกิริyajีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) และถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายต่างที่มีความเป็นด่างสูง ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อชะอะลูมินาและซิลิกาออกจากสารตั้งต้นแล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้จีโอพอลิเมอร์สามารถก่อตัวและให้กำลังอัดได้ (พีรัช ธเนศฐิติวัชร, 2558)

โดยปฏิกิริยาในการเกิดจีโอพอลิเมอร์เป็นกระบวนการที่ปล่อยความร้อนออกมา (Exothermic process) แบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ในขั้นตอนแรกคือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Deconstruction) เป็นการก่อตัวของเครือข่ายอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ซึ่งทำให้เกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ขั้นตอนที่สองคือการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบเจลของจีโอพอลิเมอร์จากอะลูมินาและซิลิกาในสารตั้งต้นกับสารละลายต่าง และขั้นตอนสุดท้าย คือ การคงรูป (Stabilization) โดยเกิดขึ้นหลังจากการเก็บรักษาตัวอย่างเป็นเวลา 24 hrs ในช่วงอุณหภูมิคงที่ทำให้เครือข่ายของจีโอพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเจลขนาดเล็กถูกเปลี่ยนเป็นเครือข่ายขนาดใหญ่ จากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างนี้เอง ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความเสถียรมากขึ้น (Yip et al., 2005) แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization Process)

ที่มา : Yao et al., 2009

สารตั้งต้นที่ใช้ในการทำจีโอพอลิเมอร์สามารถนำมาจากธรรมชาติ เช่น หินบะซอลต์ (Basalt) และดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นต้น หรือจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมและการเกษตร เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) ทราจจากการหลอมโลหะ (Waste Foundry Sand) และตะกรันจากการหลอมเหล็ก (Electric arc Furnace Slag) เป็นต้น โดยสมบัติจากสารตั้งต้นที่กล่าวมานี้มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) จึงได้มีการนำสารตั้งต้นไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์ ดินขาวเผา เถ้าลอย ทราายจากการหลอมโลหะ และตะกรันจากการหลอมเหล็ก

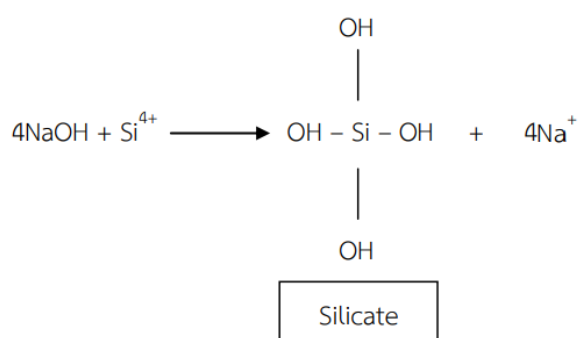
องค์ประกอบทางเคมี	สารตั้งต้น (%)				
	หินบะซอลต์(Bredikhin et al., 2017)	ดินขาวเผา (Rovnaník, 2010)	เถ้าลอย (Apithanyasai, 2018)	ทราายจากการหลอมโลหะ (Apithanyasai, 2018)	ตะกรันจากการหลอมเหล็ก (Apithanyasai, 2018)
SiO ₂	49.88	55.01	38.0	78.81	8-18
Al ₂ O ₃	10.09	40.94	19.0	6.32	3-10
CaO ₂	9.35	0.14	20.0	1.88	25-30

จีโอพอลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน กล่าวคือ โครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานของสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกา และแคลเซียมออกไซด์ แต่การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จะเกิดจากปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondenzation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) โดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านั้นแตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์

2.1.2 ปฏิกิริยาการเกิดสารจีโอพอลิเมอร์

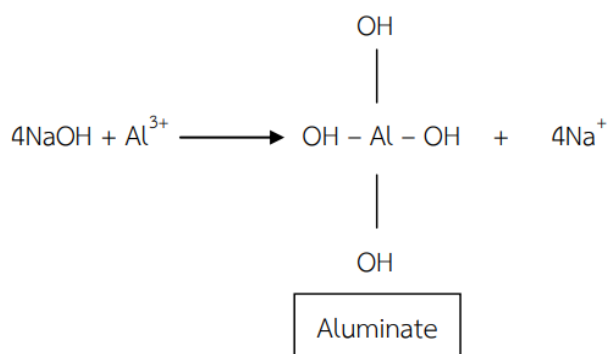
สารจีโอพอลิเมอร์เป็นสารจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) และสารกึ่งผลึก (Semi-Crytalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอพอลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีอะลูมินาและซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายอัลคาไลน์สามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่าอุณหภูมิปกติ และก่อตัวให้กำลังรับแรงได้ดีโดยปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน

1. การชะละลาย (Dissolution) เกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ ออกมา โดยอะลูมิเนียมและซิลิกอนจะถูกชะละลายออกมามากเนื่องจากเป็นสารหลักมีรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้าของ Si และ Al ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน (O) ซึ่งหน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวและมีการจัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะของเจล การเกิดปฏิกิริยาเคมีของซิลิเกต (Silicate) และอะลูมิเนต (Aluminate) ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของซิลิเกต (Silicate)

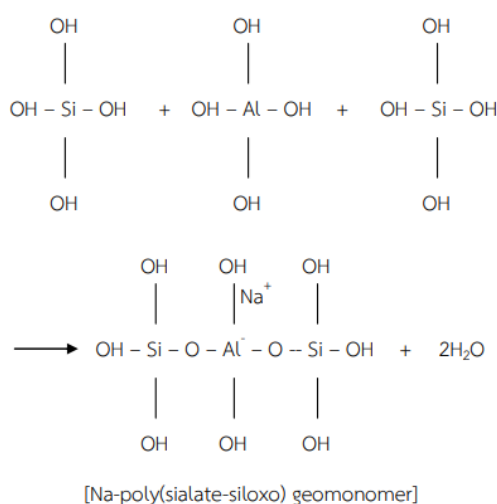
ที่มา : Hench, L., 1998



ภาพที่ 3 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของอะลูมิเนต (Aluminate)

ที่มา : Hench, L., 1998

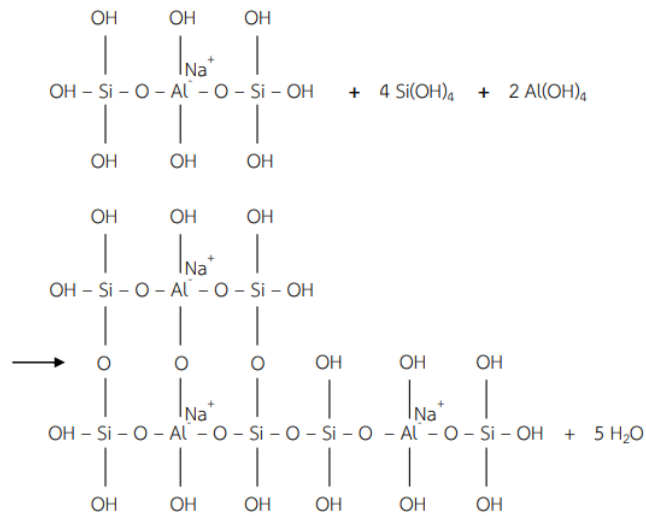
2. การทำปฏิกิริยาควบแน่นและลูกโซ่ (Condensation-Polymerization) ในปฏิกิริยาการควบแน่นจะเกิดการรวมตัวกันของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเบื้องต้นกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นและปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมา หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (Meta-Stable) ที่มีปริมาณ Al สูงเมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยพีระมิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สามและสี่หน่วย ซึ่งได้แก่ พอลิเซียเลต (Polysialate, PS) พอลิเซียเลตซิลอกโซ (Polysialate Siloxo, PSS) และพอลิเซียเลต-ไดซิลอกโซ (Polysialate Disiloxo, PSDS) ตามลำดับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังแสดงในภาพที่ 4



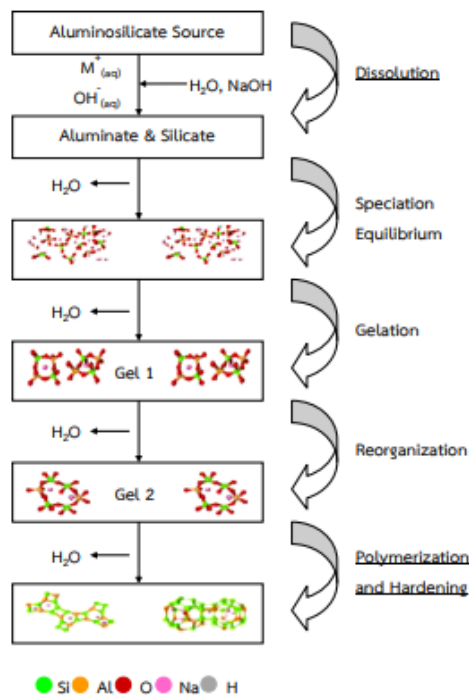
ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดพอลิเซียเลต (Polysialate)

ที่มา : Hench, L., 1998

จากนั้นจะทำปฏิกิริยาลูกโซ่ทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมขวางกันมากขึ้นในลักษณะของพอลิเมอร์ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้ การเกิดปฏิกิริยาเคมี การเกิดจีโอพอลิเมโรเซชันแสดงในภาพที่ 5 และแบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมโรเซชัน ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจีโอพอลิเมอร์เซชัน (Geopolymerization)
 ที่มา : Hench, L., 1998



ภาพที่ 6 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์เซชัน
 ที่มา : Geopolymer Institute

ภายหลังจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันจะได้ของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นอสัณฐาน โดยทั่วไปของแข็งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ของแข็งที่มีลักษณะเป็นผลึก (Crystalline Solid) เป็นของแข็งที่มีพื้นผิวที่ทำมุมกันด้วยค่าที่แน่นอน ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอนุภาคของของแข็ง ผลึกที่มีขนาดใหญ่เมื่อทำให้เล็กลงก็ยังคงรักษาลักษณะรูปผลึกเดิมอยู่ สารบางอย่างอาจมีรูปผลึกได้หลายแบบซึ่งเราจะเรียกว่าปรากฏการณ์อัญรูป (Polymorphism) เช่น เพชร แกรไฟต์ สารบางชนิดอาจจะมีรูปร่างผลึกที่เหมือนกันได้ ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ภาวะรูปร่างเหมือน (Isomorphism)

2. ของแข็งอสัณฐาน (Amorphous Solid) หรือของแข็งที่ไม่มีรูปผลึก อนุภาคเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เช่น แก้ว พอลิเมอร์ ยางธรรมชาติ ซึ่งมีสมบัติทั่วไปคล้ายผลึก แตกต่างกันที่ไม่มีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน จึงมีสมบัติที่เรียกว่า Isotropy คือ ค่าดรรชนีหักเห การนำไฟฟ้า และคุณสมบัติอื่นๆ จะเหมือนกันหมดทุกทิศทาง นอกจากนี้ของแข็งอสัณฐานจะมีจุดหลอมเหลวไม่เด่นชัดเมื่อได้รับความร้อนจะค่อยๆ อ่อนตัวจนกระทั่งไหลได้ อุณหภูมิการหลอมตัวอยู่ในช่วงที่ยาว ต่างจากผลึกซึ่งจะมีจุดหลอมเหลวเด่นชัดและอุณหภูมิการหลอมตัวอยู่ในช่วงที่แคบ

2.1.3 การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วย

1. สารปอซโซลานตั้งต้น (Pozzolanic) คือวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถละลายได้ง่าย วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์ที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (Artificial Pozzolan) และปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าหนัก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ปอซโซลานจากธรรมชาติ ได้แก่ ดินโดอะตอมลำปาง เถ้าภูเขาไฟดินขาว ซึ่งวัสดุเหล่านี้ก่อนนำไปใช้งานต้องผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การเผา การทำให้แห้ง เป็นต้น

2. อัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ ที่นิยมใช้กันได้แก่ สารละลายเบสอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ หมู่ 1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) สารทั้ง 2 ชนิดสามารถให้ความเป็นด่างสูงและใช้ได้ดี โดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้จีโอพอลิเมอร์คุณภาพดีกว่าแต่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเป็นที่นิยมมากกว่า เนื่องจากมีราคาไม่แพงหาได้ง่าย โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2518) คือ

2.1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเหลว หมายถึง สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ ลักษณะเป็นของเหลว ไม่มีสี

2.2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดแข็ง หมายถึง โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็งมีลักษณะเป็นเม็ด ลักษณะทั่วไป เป็นของแข็ง สีขาวสะอาด สามารถนำมาละลายตามความเข้มข้นที่ต้องการได้

3. สารประกอบซิลิเกต ที่ใช้กันเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นต่าง ลักษณะทั่วไปเป็นสีเทาอ่อนถึงสีเทาเข้ม โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)

4. น้ำ สารจีโอพอลิเมอร์ต้องการน้ำเพื่อให้ส่วนผสมสามารถผสมเข้ากันได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำกลั่น

2.2 ไม้ไผ่

ไม้จัดอยู่ในวงศ์หญ้า (Graminae) ไม้ทั่วโลกมีอยู่ 90 สกุล 1,030 ชนิด สำหรับในประเทศไทยมีไม้ขึ้นอยู่ 15 สกุล 82 ชนิด ไม้ไผ่เป็นไม้ที่มีประโยชน์ต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก ทั้งในรูปของอาหาร ผลิตภัณฑ์ เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ตลอดจนสิ่งก่อสร้าง ในส่วนของการใช้ประโยชน์เป็นสิ่งก่อสร้างนั้น ไม้ไผ่เป็นที่นิยมมากเนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีลวดลายสวยงาม เนื้อแน่น ทนน้ำ ทนแดด มีความแข็งแรง ความเหนียวและยืดหยุ่นที่เหมาะสมกับทุกสภาพอากาศ ไม้ไผ่จึงเป็นไม้ที่มีศักยภาพในการก่อสร้างเทียบเท่ากับไม้ทั่วไป สามารถนำไปทดแทนไม้ในการก่อสร้างที่อยู่อาศัยตั้งแต่ขนาดเล็ก เช่น ศาลากลางน้ำ กระโจม บ้านพักอาศัย ตลอดจนโรงงานขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังพบว่ามีการใช้ประโยชน์ไม้ไผ่เป็นเครื่องดนตรีหลายชนิด เช่น ซอ ระนาด ขลุ่ย โหวด อังกะลุง แคน เป็นอาวุธสมัยโบราณ เช่น คันธนู ลูกธนู ลูกดอก กระบอง ตะพุด เป็นสมุนไพรรักษาโรคต่างๆ ได้หลายโรค ส่วนประโยชน์ทางอื่นนั้น ในบริเวณป่าไผ่หรือสวน ป่าไผ่ช่วยในการป้องกันความรุนแรงของลมพายุป้องกันการชะล้างดินทำให้อากาศไม่เย็นหรือร้อนเกินไปและยังเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ต่างๆ จำพวกแมลงและนก

ลักษณะโครงสร้างภายในเนื้อไม้ แบ่งได้เป็นลักษณะโครงสร้างของเนื้อไม้อย่างหยาบ เป็นลักษณะโครงสร้างของเนื้อที่เห็นได้ด้วยเลนส์ขยาย (Hand Lens) ได้แก่ ด้านหน้าตัด ด้านรัศมี ด้านสัมผัส วงปี แก่น กระพี้ ความละเอียดของเนื้อไม้ และเสี้ยนไม้ เป็นต้น การศึกษาสมบัติทางกายภาพอย่างหยาบ ส่วนลักษณะโครงสร้างของเนื้อไม้อย่างละเอียด คือลักษณะโครงสร้างทางกายวิภาค

ของเนื้อไม้ (Wood Anatomy) เป็นลักษณะโครงสร้างของเนื้อไม้ที่เห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ได้แก่ ชนิด ขนาด จำนวนของเซลล์ การเรียงตัว การกระจาย การทำหน้าที่ของเซลล์ ตลอดจนการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผนังเซลล์ ความแข็งแรงของโมเลกุลเซลลูโลสและ การศึกษาสมบัติทางกายภาพอย่างละเอียด



ภาพที่ 7 ลักษณะของไม้ไผ่

ที่มา : <https://www.technologychaoban.com>



ภาพที่ 8 ลำไม้ไผ่แก่

ที่มา : <https://www.technologychaoban.com>

วิรัช (2560) สรุปว่าลักษณะโครงสร้างของไม้ไผ่แตกต่างจากลักษณะโครงสร้างของไม้ใบกว้าง และไม้ในตระกูลสน เนื่องจากไม้ไผ่ประกอบด้วยมัดท่อน้ำ ท่ออาหาร กระจายอยู่ในพวงเรงคิม่าเป็นเนื้อเยื่อพื้น และประกอบด้วยเซลล์ที่เรียงตัวตามยาวล้วน ไม่มีเซลล์ที่เรียงตัวตามขวางหรือเซลล์รัศมี

มัดท่ออาหารซึ่งประกอบด้วยกลุ่มไฟเบอร์เป็นส่วนใหญ่ มีขนาดและจำนวนแปรผันไปตามความหนาของผนังปล้อง กล่าวคือจะมีขนาดเล็กและมีจำนวนมากในส่วนนอกของผนังปล้อง และค่อยๆ เปลี่ยนไปในส่วนกลางและส่วนในผนังปล้อง ผนังของไฟเบอร์มีลักษณะเป็นชั้นโดยที่จำนวนชั้นและความหนาของชั้นจะแตกต่างกันออกไป โดยไม่มีรูปแบบที่แน่นอน มุมของไฟบริคที่เรียงตัวในชั้นต่างๆ จะแตกต่างกันไปโดยชั้น บางทีจะเรียงตัวเกือบตั้งฉากกับแกนของเซลล์ แต่ชั้นหนาเรียงตัวเกือบขนานกับแกนของเซลล์ สำหรับเซลล์ชนิดอื่นส่วนใหญ่ก็มีผนังเป็นชั้นเช่นเดียวกัน แต่จำนวนชั้นและความหนาของชั้นแตกต่างกับของไฟเบอร์

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีหลักๆ ของไม้ไผ่คล้ายคลึงกันกับกับที่พบในไม้สน และไม้ใบกว้าง แต่ปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันไป

1. เซลลูโลส

เซลลูโลสของไม้ไผ่คล้ายคลึงกับเซลลูโลสที่ได้จากแหล่งอื่นๆ กล่าวคือ เซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของเบตาดีแอนไฮโดรกลูโคไพราโนสที่มาต่อกันยาวเป็นเส้น โมเลกุลเหล่านี้เชื่อมติดกันโดยการยึดระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่หนึ่งและสี่และมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ

2. เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสของไม้ไผ่จากญี่ปุ่นและอินเดียพบว่า ประกอบด้วยไซโลส แอลอร่าบิโนสดีกลูโคส ดีกาแลคโตส ดีเมนโนส และกรดดีกลูควิโรนิก ไซเลนในไม้ไผ่ประกอบด้วยโมเลกุลที่ต่อกันในคาร์บอนตำแหน่งที่หนึ่งและสี่ เป็นแกนยาวของเบตาดีไฮโลไพราโนส ซึ่งมีแอลอร่าบิโนฟูราโนส และกรดโพรีโอเมธิลกลูควิโรนิกมาต่อเป็นแขนงที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองและสาม Karnik และคณะ พบไซเลนชนิดเดียวกันนี้ในไม้ไผ่ป่า ซึ่งมีอัตราส่วนของกรดกลูควิโรนิกต่อไซโลสประมาณ 1:8 ต่อมา Bose ได้รายงานว่าอัตราส่วนอันเดียวกันในไม้ไผ่ชนิดเดียวกันกับข้างต้น ต่างกันตรงที่กรดดีกลูควิโรนิกต่อเป็นแขนงที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองเท่านั้น ระดับพอลิเมอร์ไฮดรอกซีของไซเลนในไม้ไผ่มีประมาณ 170 ซึ่งคำนวณจากการวัดความหนืดในคิวพริเอโรลีน ไดอะมีน และไดเมธิลซัลโฟไซด์

3. ลิกนิน

ลิกนินในไม้ไผ่เป็นพอลิเมอร์ของสารพวกโพลีฟีนอลิคมมาต่อกันทั้งสามมิติและมีลักษณะเป็นอสัณฐาน ประกอบด้วยโมเลกุลชนิดต่างๆ ของฟีนิลโพรเพน คือ กัวเอียซิล ไซริงจิล และพีไฮดรอกซี ฟีนิลโพรเพน ซึ่งแตกต่างจากลิกนินในไม้สนและไม้ใบกว้าง สัดส่วนขององค์ประกอบทั้งสามนี้ในรูปของคลาโซนลิกนินในไม้ญี่ปุ่น

4. ธาตุอินทรีย์

ปริมาณของแร่ธาตุหรือสารอินทรีย์ในไม้มักวัดเป็นปริมาณซีเถ้าซึ่งเหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 575 ± 25 °C จนกระทั่งคาร์บอนถูกเผาไปหมดปริมาณซีเถ้าในไม้ไม่มีอยู่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับไม้ชนิดอื่น ปริมาณซีเถ้าของไม้ใฝ่อยู่ระหว่าง 2.4-9.7 % ของน้ำหนักอบแห้งของไม้ใฝ่ องค์ประกอบส่วนใหญ่ของซีเถ้าเป็นซิลิกา ซึ่งมีอยู่ในปริมาณ 50-70 % ของปริมาณซีเถ้าทั้งหมด ปริมาณของซีเถ้ามีสูงขึ้นในส่วนของลำไม้ใฝ่แก่และนอกจากจะพบซิลิกา ยังพบโพแทสเซียม และโซเดียมในไม้ใฝ่อีกด้วย

2.2.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

1) ลำต้น

เป็นไม้ผลัดใบ ความสูงตั้งแต่ 6-18 m เส้นผ่าศูนย์กลาง 3-9 cm ต้นอ่อนลำต้นจะมีสีเขียวคล้ำ ต้นแก่จะมีสีเขียวด้านหรือเขียวอมเหลือง ข้อจะพองเล็กน้อย ปล้องยาวประมาณ 15-50 cm ลำปล้องมีเนื้อหนาหรือแข็ง ลำต้นตรงโคนมักจะมีปล้องหนา

2) ใบ

ปลายใบเรียวแหลม โคนใบเป็นรูปมนป้าน ขนาดใบยาว 12-30 cm กว้าง 1.0-2.5 cm ลักษณะใบท้องใบมีขนอ่อนแน่น มีเส้นลายใบ ขอบใบสากคม ไม่เห็นครีบบใบ กระจังใบโค้ง ปลายใบมีลักษณะเป็นรูปมนหรือกลมมีหยัก กาบใบข้างนอกไม่มีขน

3) ดอก

ช่อดอกยาวประมาณ 1 cm ดอกย่อยสมบูรณ์ 2-3 ดอก เกสรตัวผู้ 6 อัน และตัวเมีย 1 อัน

4) กาบหุ้มลำ

กาบหุ้มลำในปล้อง สั้นประมาณ 8-30 cm ข้างนอกกาบจะมีขนแข็งสีน้ำตาล ในพื้นที่ที่แห้งแล้งอาจจะมีขน ขณะที่ต้นยังอ่อนกาบหุ้มลำเสียงจะมีสีเขียวอมเหลือง ครีบกาบเล็ก กระจังกาบแคบหยัก ใบยอดกาบเป็นรูปสามเหลี่ยมแคบ

5) หน่อ

หน่ออ่อน ค่อนข้างยาว แตกหน่อจำนวนมาก เปลือกหุ้มหน่ออ่อนเป็นสีแดงอมม่วง มีขนทั่วมองเห็นชัดเจน เนื้อหน่อรับประทานได้ ขยายพันธุ์ด้วยหน่อ หรือแขนงที่แตกออกจากลำต้น

2.2.3 ลักษณะพิเศษของไม้

1) ไม้โตเร็วสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ภายในเวลา 1-4 ปี และใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน ตั้งแต่ราก ไม้เป็นสมุนไพรอย่างหนึ่งที่ใช้เป็นยารักษาโรคได้ หน่อไม้หรือหน่อไม้ใช้ทำอาหาร กาบหรือใบไม้ใช้ห่ออาหารหรือหมักปุ๋ย กิ่งและแขนงใช้ทำรั้ว ลำต้นใช้ประโยชน์ได้สารพัดอย่าง ตั้งแต่นำมาใช้ปลูกสร้างที่พักอาศัยและแปรรูปเป็นเครื่องจักรสารและเครื่องมือเครื่องใช้นานาชนิดจนถึงนำมาใช้

เกี่ยวกับความเชื่อและพิธีกรรมต่างๆ ตั้งแต่เกิดจนตาย ดังนั้นชาวบ้านจึงมักปลูกไผ่ตามหัวไร่ปลายนา และปลูกไว้รอบๆ บ้าน เพื่อใช้เป็นรั้วบ้านและป้องกันพายุ เพราะไม้ไผ่จะลู่ตามลมไม่หักโค่นเหมือนไม้อื่น หากปลูกไผ่ไว้ตามริมแม่น้ำลำคลองจะช่วยชะลอความเร็วของกระแสน้ำไม่ให้ดินพังทลายง่าย นอกจากนี้ไผ่ยังใช้เป็นอาหารในครัวเรือนได้ด้วย

2) ไม้มีลำต้นตรงและกลวงคล้ายหลอดและมีปล้องข้อคั่นเป็นปล้องๆ จึงใช้เป็นภาชนะประเภทกระบอก ถ้วย สำหรับใส่ของเหลว เช่น ใช้เป็นกระบอกน้ำ กระบอกน้ำตาล ซึ่งใช้กันทั่วไปในหลายประเทศ ลักษณะพิเศษของไม้ไผ่นี้สามารถนำมาใช้สร้างอาคารที่พักอาศัยได้ โดยนำมาทำเป็นโครงสร้างของบ้านเรือน ใช้เป็นพื้นเรือน ฝาเรือน ใช้ทำรางน้ำ ท่อน้ำ และทำเครื่องดนตรีประเภทขลุ่ยได้ดีอีกด้วย

3) เนื้อไม้เป็นเส้นตรงมีความยืดหยุ่นในตัวเองและสามารถคืนสู่สภาพเดิมได้ เมื่อนำไม้ไผ่มาแปรรูปก็ยังสามารถใช้ประโยชน์ได้ดี เพราะเนื้อไม้ไผ่เป็นเส้นตรง นำมาจักเป็นปื้นบางๆ หรือเหลาเป็นเส้นได้ดี จึงใช้ทำเครื่องจักรสานนานาชนิด ทั้งเครื่องจักรสานที่มีขนาดใหญ่ แข็งแรงมั่นคงสำหรับใช้งานหนักจนถึงเครื่องจักรสานขนาดเล็กที่มีความปราณีตบอบบาง เพราะคุณสมบัติที่มีความยืดหยุ่น จึงเหมาะที่จะใช้เป็นเครื่องหาบหรือหาม เช่น คาน คันธนู และเมื่อแปรรูปเป็นดอกก็ยังคงมีความยืดหยุ่น คืนรูปทรงเดิมได้ง่าย จึงทำให้ภาชนะจักสานที่ทำจากไม้ไผ่มีคุณสมบัติพิเศษต่างไปจากภาชนะที่ทำจากวัสดุชนิดอื่น

4) ไม้ไผ่มีความสวยงามในตัวเอง ไม่ว่าจะเป็นผิวที่มีสีต่างกันเมื่อแห้งแล้วมักจะมีสีเหลืองอยู่เช่นนั้นตลอดไป ด้วยคุณสมบัติพิเศษนี้ ชาวเอเชียจึงใช้เหล็กหรือโลหะเผาไฟจนร้อนแล้วเขียนตัวอักษรหรือลวดลายลงบนผิวไม้ไผ่ (Bamboo Pyrographic) เช่น จีนจารึกบทกวีบนผิวไม้ไผ่ ชาวญี่ปุ่นใช้เขียนชื่อเจ้าของบ้านแขวนไว้หน้าบ้านและจารึกบทกวีแขวนไว้สองข้างประตูเรือนน้ำชา (Tea House) ชาวเกาหลีใช้เขียนเป็นลวดลายบนเครื่องใช้ เช่นเดียวกับชาว батаก (Batak) ในประเทศอินโดนีเซีย ใช้เหล็กเผาไฟ ขูด ขีด เขียน ลงบนกระบอกไม้ไผ่ สำหรับเก็บยาหรือทำเป็นปฏิทิน นอกจากนี้ไม้ไผ่ยังมีผิวสวยแล้ว เนื้อไม้ยังมีลักษณะพิเศษต่างจากเนื้อไม้อื่นคือ มีเส้นยาวขนานกันเป็นเส้น (สุทัศน์ เล้าสกุล, 2560)

2.3 ซิลิกา

2.3.1 สมบัติของซิลิกา

ชื่อทั่วไป : Silica สูตรโมเลกุล SiO_2 น้ำหนักโมเลกุล 60.1 สถานะเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ความถ่วงจำเพาะ 2.2-2.6 จุดเดือดมากกว่า $2,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ จุดหลอมเหลว $1,713\text{ }^{\circ}\text{C}$ การละลายจะไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อย และไม่ละลายในกรดทุกชนิด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก ตัวซิลิกาไม่ลุกติดไฟ

2.3.2 รูปแบบซิลิกา

ซิลิกาโดยทั่วไปมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ

1) ซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) เป็นซิลิกาที่พบในรูปแบบสินแร่ มีการจัดเรียงอะตอมของโครงสร้างอย่างมีระเบียบและต่อเนื่อง มีรูปร่างเป็นระบบผลึกที่แน่นอนภายใต้ความดันปกติ มี 3 รูปแบบ

1.1) ควอร์ต (Quartz) เป็นรูปที่พบมากที่สุด อุณหภูมิเสถียรน้อยกว่า 870 °C

1.2) ไทรดิมิท (Tridymite) อุณหภูมิเสถียรที่ 870-1,470 °C

1.3) คริสโตบาไลท์ (Cristobalite) อุณหภูมิเสถียรที่ 1,470 °C และหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,713 °C

ผลึกทั้ง 3 รูปนี้สามารถเปลี่ยนไปมาระหว่างกันได้โดยการให้ความร้อนหรือลดอุณหภูมิ ซึ่งการเปลี่ยนแปลง (Inversion) มี 2 รูปแบบ คือ แบบที่หนึ่งจะมีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างใหม่ ส่วนแบบที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบรวดเร็ว พันธะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแต่สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้เร็ว

2) ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) เป็นซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต (Biogenic Silica) และสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปไม่แน่นอน ไม่เป็นผลึก มีการจัดเรียงอะตอมภายในโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ อาจอยู่ในรูปของไฮเดรต (Hydrate) หรือแอนไฮเดรต (Anhydrate) มีพันธะหลายรูปแบบ

การสังเคราะห์จะสามารถสังเคราะห์ได้จากการให้ความร้อนจนมีสถานะเป็นไอและการตกตะกอนสารละลาย แบ่งเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ ได้แก่

2.1) วิเทรียสซิลิกา (Vitreous Silica) หรือซิลิกาแก้ว (Silica Glass) เป็นของแข็ง ไม่มีรูพรุน ผลิตได้จากการหลอมเหลวผลึกซิลิกาอสัณฐานแล้วปล่อยให้ตัว

2.2) ซิลิกาเจล (Silica Gel) มีลักษณะแข็ง มีรูพรุนสูง มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด และมีพื้นที่ผิวสูง

2.3) ซิลิกาผง (Powder Silica) เป็นซิลิกาที่เตรียมได้จากสภาวะกลายเป็นไอ และการตกตะกอนของสารละลายที่มีลักษณะการฟุ้งกระจายของอนุภาคสูงเมื่อดกตะกอนจะได้ซิลิกาที่มีขนาดเล็กมาก และมีพื้นที่ผิวสูง

2.3.3 ประโยชน์ของซิลิกา

ประโยชน์ของซิลิกา มีดังนี้

- 1) ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับเป็นส่วนผสมในวัสดุก่อสร้าง
- 2) ใช้เป็นองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3) ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง และความหนาแน่นในผลิตภัณฑ์ยาง พลาสติก และพอลิเมอร์ เป็นต้น
- 4) ใช้เป็นสารเพิ่มแรงยึดติดในผลิตภัณฑ์กาว
- 5) ใช้เป็นสารลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของแข็งที่แขวนลอยในของเหลว
- 6) ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดในผลิตภัณฑ์หลายชนิด
- 7) ใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ทำให้สารที่ไม่ละลายเข้ากันผสมเข้ากันได้ดี เช่น น้ำกับน้ำมัน
- 8) ใช้เป็นสารป้องกันการเกิดโฟม
- 9) ใช้เป็นสารปรับสภาพพื้นผิวให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ
- 10) ใช้เป็นสารเพิ่มความเงา
- 11) ใช้เป็นสารลดความชื้น
- 12) ใช้เป็นสารเติมแต่ง

2.3.4 ลักษณะทางเคมีของซิลิกา

ซิลิกามีสมบัติทางเคมีที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติ และไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีหลายชนิด แต่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ โดยซิลิกาชนิดอสัณฐานจะไวต่อปฏิกิริยามากกว่าซิลิกาชนิดผลึกเพราะซิลิกาอสัณฐานมีพื้นที่ผิวมากกว่า ส่วนสารละลายกรดจะไม่มีผลต่อซิลิกา ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก ทั้งนี้ซิลิกาในรูปแบบที่ต่างกันจะเกิดปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริกได้ ขึ้นกับความหนาแน่นเป็นหลัก โดยซิลิกาที่มีความหนาแน่นสูงจะเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่าซิลิกาที่มีความหนาแน่นต่ำ (ซิลิกา, 2560)

2.3.5 ซิลิกาที่มีอยู่ในพืช

เนื่องด้วยซิลิกา (SiO_2) มีโครงสร้างหลักเป็นซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) ซิลิกอนพบในพืชหลากหลายชนิดซึ่งสามารถจำเพาะได้ดังนี้

- 1) ความสำคัญของธาตุซิลิกอนในพืช

ซิลิกอน (Silicon: Si) เป็นธาตุอาหารที่มีอยู่ในดินตามธรรมชาติ มีมากเป็นอันดับสองรองจากออกซิเจน ถึงแม้ว่าซิลิกอนไม่จัดเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตและ

พัฒนาการของพีช แต่มีผลการศึกษาและวิจัยความสำคัญของซิลิกอนในพีชจำนวนมาก โดยพีชสามารถสะสมซิลิกอนได้มากน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของพีช ความสามารถของรากพีชในการดูดซับซิลิกอนจากดิน และปริมาณ ซิลิกอนในดิน เป็นต้น โดยพบว่าพีชแต่ละชนิดจะสะสมซิลิกอนแตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.1-1 % ของน้ำหนักแห้ง ตัวอย่างพีชที่ต้องการซิลิกอนมีดังนี้

1.1) ข้าว ซิลิกอนทำให้ต้นข้าวมีระบบรากที่แข็งแรงสมบูรณ์ มีรากจำนวนมาก ต้นข้าวเจริญเติบโตดี แตกกอมาก ต้นไม่ล้ม ใบข้าวตั้งขึ้น สามารถรับแสงแดดได้อย่างทั่วถึง อากาศถ่ายเทดี ช่วยลดการเกิดโรคและลดการสะสมของแมลง ทำให้การเจริญเติบโตลดลง ข้าวที่ขาดซิลิกอนต้องการน้ำมากขึ้นความต้านทานต่อโรคราน้ำค้างลดลง

1.2) อ้อย ผลผลิตภัณฑจากซิลิกอน สามารถปรับสภาพดินในแปลงให้ร่วนซุย แก่ดินกรดและป้องกันการเป็นพิษของเหล็กและแมงกานีส ทำให้อ้อยมีรากยาวขึ้น มีหน่อมากแตกกอมากขึ้น อ้อยเจริญเติบโตแข็งแรงใบตั้งชันรับแสงแดดได้มาก จึงไปเพิ่มอัตราการสังเคราะห์แสง ลำเลียงน้ำตาลจากใบไปเก็บสะสมไว้ที่ลำต้นได้มากขึ้นมีความหวานมากขึ้นผลผลิตเพิ่มถึง 55 %

1.3) มันสำปะหลัง ประโยชน์ของผลผลิตภัณฑจากซิลิกอนต่อการปลูกมันสำปะหลังอย่างหนึ่ง คือ ช่วยปรับสภาพดินให้ร่วนซุย โปร่งพูน มันสำปะหลังจึงลงหัวได้สะดวก เก็บเกี่ยวได้ง่าย ช่วยดูดซับปุ๋ย ลดการถูกชะล้าง ปรับค่าความเป็น กรด-ด่าง ไม่ให้สูงเกินไป เพราะมันสำปะหลังไม่ทนต่อสภาพดินด่าง

2) ปริมาณของซิลิกาที่สกัดได้จากพีช

ซิลิกาเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในพีชหลายชนิด เช่น ต้นอ่อนของทานตะวัน ข้าวชนิดต่างๆ และแกลบ เป็นต้น ชนิดพีชที่ให้ปริมาณซิลิกาสูงสุด คือ ข้าวหรือแกลบข้าวจะมีปริมาณซิลิกา 93 % โดยน้ำหนัก และพีชที่ให้ซิลิการองลงมาคือ ข้าวสาลี มีซิลิกาประมาณ 91 % โดยน้ำหนัก ฝั่ มีซิลิกา 57 % โดยน้ำหนัก และทานตะวันมีซิลิกาท่ำสุดประมาณ 25 % โดยน้ำหนัก ถึงแม้ว่าฝั่จะมีซิลิกาไม่มากเท่ากับแกลบแต่ฝั่สามารถหาได้ง่าย การนำมาใช้สกัดซิลิกาทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อวัตถุดิบนั่นเอง

2.4 อะลูมินา

สมบัติของอะลูมินา

ชื่อทั่วไป : Alumina สูตรโมเลกุล Al_2O_3 จัดเป็นออกไซด์ที่มนุษย์ใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ดึกดำบรรพ์จนกระทั่งถึงปัจจุบัน และยังคงถูกพัฒนานำมาใช้งานมากขึ้นในอนาคต อะลูมินาบริสุทธิ์จะมีความถ่วงจำเพาะ 3.4-4.0 จุดหลอมเหลว 2,030 °C ความแข็ง (Mohs scale) เท่ากับ 9

อะลูมินาในธรรมชาติจัดเป็นแร่ธาตุ ที่พบในรูปของ Corundum (Al_2O_3) Diaspore $AlO(OH)$ Gibbsite $Al(OH)_3$ และ Bauxite ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) โดยแร่ Corundum ที่พบจะเป็นรัตนชาติ เช่น ทับทิม (Ruby) ไพลิน (Sapphire) บุษราคัม (Yellow Sapphire) เป็นรูปแบบของ Corundum ที่มีมลทินในขณะที่ Corundum ที่ไม่มีมลทินจะไม่มีสี อะลูมินาบริสุทธิ์ และอะลูมินาสามารถสกัดได้จากแร่ Bauxite และดินลูกรัง โดยวิธีของ Bayer (Bayer process) คือ นำแร่มาบดแล้วหลอมด้วยโซดาไฟ (Caustic Soda) จากนั้นแยกตะกอนที่ได้ออกมาแล้วเผาอะลูมินาจะพบในรูปแอลฟา (α) แกมมา (γ) และ เบต้า (β) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแอลฟาอะลูมินา และแกมมาอะลูมินา ในอุณหภูมิที่ไม่เกิน $500^\circ C$ อะลูมินาจะอยู่ในรูปแกมมา หากนำไปเผาให้อุณหภูมิสูงถึง $1,150-1,200^\circ C$ จะเปลี่ยนอยู่ในรูปของแอลฟา แต่เบต้าอะลูมินาจะอยู่ในรูปของสารประกอบโซเดียมคือ Sodium Aluminate ($Na_2O \cdot 11Al_2O_3$) เนื่องจากสมบัติของอะลูมินาที่มีค่าความแข็งสูง มีความหนาแน่นสูง มีความต้านทานต่อการขีดสีและสึกกร่อนสูง ทนต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดี และมีความทนไฟสูง จึงสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเครื่องขัดถู (Abrasive) อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมเซรามิกและอื่นๆ ซึ่งแนวโน้มในการนำอะลูมินาไปใช้งานก็ได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อุตสาหกรรมที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมหนึ่งที่น่าเอาอะลูมินาไปพัฒนาใช้คืออุตสาหกรรมเซรามิก ทั้งเซรามิกดั้งเดิมที่ใช้วัตถุดิบในธรรมชาติซึ่งมีอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ และเซรามิกสมัยใหม่ โดยในอุตสาหกรรมเซรามิกสมัยใหม่สามารถนำอะลูมินาที่ได้จากการสังเคราะห์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายประเภท เช่น อุปกรณ์ประกอบชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์กึ่งตัวนำ ไฟฟ้า อุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้า อุปกรณ์ส่วนประกอบในจรวด เครื่องมือตัดแต่ง อุปกรณ์ทางการแพทย์ อวัยวะเทียม เครื่องมือ วิทยาศาสตร์ เป็นต้น อะลูมินาที่นำมาใช้ในเซรามิกสมัยใหม่นั้นจะใช้ทั้งที่เป็นผงเป็นผลึกเดี่ยว เป็นฟิล์มบางๆ เป็นเส้นใยและที่เป็นรูปทรง โดยผงอะลูมินาจะเป็นที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการขึ้นรูปแบบต่างๆ ได้ดี ทั้งนี้ผงอะลูมินาที่นำมาใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงและมีความละเอียดมากเพราะสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลของอะลูมินาสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการกำจัดมลทินต่างๆ ออกไป เช่น ซิลิกาที่ปนเปื้อนจะมีผลต่อการควบคุมโครงสร้างจุลภาคต่ออัตราการสึกกร่อนของอะลูมินารวมทั้งมีผลต่อการเชื่อมผนัง (Sintering) และแคลเซียมที่ปนเปื้อนมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของอะลูมินาลดลง

2.5 อีฐ

อีฐเป็นวัสดุก่อสร้างพื้นฐานสำหรับการก่อสร้างอาคารทั่วไป ซึ่งถูกใช้งานมาอย่างยาวนาน ตั้งแต่ในอดีต และในปัจจุบันมักจะนำอีฐไปตกแต่งหรือต่อเติมอาคารที่พักอาศัย เพราะอีฐเป็นวัสดุที่ดูเป็นธรรมชาติ อีฐบางชนิดเหมาะกับการก่อโชว์แนว และอีฐบางชนิดยังช่วยประหยัดพลังงานและลด

ความร้อนในที่พักอาศัยได้อีกด้วย ซึ่งทำให้อิฐเป็นวัสดุที่เหมาะสมอย่างยิ่งกับสำหรับประเทศซึ่งอยู่ในโซนร้อนชื้น ที่อากาศร้อนและฝนตกบ่อย

2.5.1 ประเภทของอิฐ

1. อิฐมอญ



ภาพที่ 9 ลักษณะของอิฐมอญ

ที่มา : <https://www.thaiwatsadu.com>

อิฐมอญเป็นอิฐที่มีลักษณะสีส้มแดง หรือที่เรามักเรียกกันว่าสีส้มอิฐ มีต้นกำเนิดมาจากชาวมอญที่ย้ายถิ่นฐานเข้ามาอยู่ในประเทศไทย กระบวนการผลิตและส่วนประกอบทำมาจากดินเหนียวและแกลบ ผสมใส่แบบพิมพ์แล้วนำมาเผาเพื่อคงรูปอิฐที่อุณหภูมิ 700-800 °C เป็นวัสดุที่ใช้มาอย่างยาวนาน มักจะเห็นได้บ่อยในงานสถาปัตยกรรมเก่าแก่ เช่น วัดวาอาราม และอิฐมอญก็ยังเป็นวัสดุที่นิยมใช้มาจนถึงปัจจุบัน อิฐมอญเป็นอิฐที่สามารถผลิตได้เองในประเทศไทย ราคาต่อก้อนถูกมาก และที่สำคัญคือช่างค่อนข้างมีความชำนาญและคุ้นเคยในการก่ออิฐประเภทนี้

อิฐมอญเหมาะกับการก่อสร้างอาคารที่ไม่สูง เช่น บ้านพักอาศัย 1-2 ชั้น มักจะถูกเลือกใช้ในบริเวณที่โดนความชื้นบ่อยครั้ง เช่น ห้องน้ำ ห้องครัว ผนังส่วนที่โดนฝนสาดโดยตรง หรือส่วนที่ต้องรับน้ำหนัก เช่น อ่างล้างหน้า ท็อปโตะ ซึ่งถือว่าเป็นอิฐที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศบ้านเรา เพราะมีคุณสมบัติเรื่องการทนร้อนทนฝนได้ดี ในงานออกแบบสมัยใหม่ มักถูกนำไปประยุกต์กับการตกแต่งหลากหลาย เช่น การตกแต่งสไตล์พื้นถิ่น ทropicอล หรือแม้แต่อินดรัสเทียล เน้นการก่ออิฐโชว์แนว เพื่อให้ได้เสน่ห์ของสัจจะวัสดุ กลิ่นอายของความเป็นธรรมชาติ ความสวยงามที่เป็นเนื้อแท้ อิฐมอญมีข้อจำกัดในเรื่องของน้ำหนัก และการกักเก็บความร้อน จึงมักไม่เหมาะกับบ้านหรืออาคารสูง

เท่าไหร่ น้ำหนักของอิฐมอญจะอยู่ที่ 180 Kg/m^3 (น้ำหนักรวมปูนฉาบ 2 ด้าน) ทำให้ค่อนข้างเปลืองงบประมาณเรื่องของโครงสร้าง และค่าแรงงานก่อสร้าง อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ระบายความร้อนได้ไม่ดีมากนัก ดังนั้น การก่อผนังด้วยอิฐมอญ จึงมีเทคนิคอย่างหนึ่งคือการก่อผนัง 2 ชั้น โดยจะต้องเว้นช่องว่างระหว่างอิฐแต่ละชั้นอย่างน้อย 5 cm เพื่อให้เกิดช่องว่างมีอากาศถ่ายเทพร้อมกับทำช่องระบายความร้อนให้กับอิฐชั้นนอกเพื่อให้ความร้อนถ่ายเทออกจากตัวบ้าน ดังนั้นอิฐมอญที่ไม่ได้คุณภาพจากขั้นตอนการผลิตหรือการขึ้นรูปที่ไม่ได้มาตรฐาน ถูกเทกองทิ้งเป็นเศษอิฐที่ทับถมกันในบ่อ หรือกองทิ้งบนผิวดินเป็นจำนวนมาก และไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้สมบัติของอิฐมอญที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป ขึ้นกับสมบัติของดินที่ใช้ในขบวนการผลิต หากดินที่ใช้ในการผลิตอิฐมอญมีปริมาณทรายมากเกินไปจะทำให้อิฐมอญมี ความเปราะแตกหักได้ง่าย หากดินที่ใช้ในการผลิตมีธาตุดินเหนียวมากเกินไปจะทำให้ก้อนดินเกิดการหดตัวแตกร้าวได้ง่าย ซึ่งจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการนำดินไปตากแดดให้แห้งก่อนขั้นตอนการนำไปเผาในเตาเผาอิฐ ในการผลิตอิฐมอญจากดินเหนียวจะผสมดินเหนียวกับเถ้าแกลบ ซึ่งเถ้าแกลบจะทำหน้าที่ช่วยกระจายความร้อนให้การเผาไหม้ของดินเหนียวเกิดได้อย่างทั่วถึง ดินเหนียวจะถูกเผาในเตาเผาอิฐที่อุณหภูมิสูงประมาณ $750-800 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นระยะเวลา 7-15 วัน ดังนั้นในเศษอิฐมอญจึงมีสารประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ ซึ่งอาจมีสมบัติที่จะใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้

2. อิฐบล็อก



ภาพที่ 10 ลักษณะของอิฐบล็อก

ที่มา : <https://www.homeandfac.com>

อิฐบล็อกเป็นอิฐที่ทำจากปูนซีเมนต์และทราย ซึ่งถูกผลิตในลักษณะอุตสาหกรรมมากกว่าอิฐมอญ ส่วนใหญ่จะมีสีเทาตามสีของส่วนประกอบที่ใช้ผลิต โดยมีลักษณะเด่นคือมีรูกลวงตรงกลางช่วยให้น้ำหนักเบาขึ้น และช่วยถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าอิฐมอญ โดยนิยมใช้กับงานก่อสร้างทั่วไป เหมาะสำหรับงานที่เน้นการคุมค่าใช้จ่าย เพราะราคาถูกและใช้เวลาสร้างเร็วกว่าอิฐมอญ

3. อิฐมวลเบา



ภาพที่ 11 ลักษณะของอิฐมวลเบา

ที่มา : <http://www.napapunsupply.com>

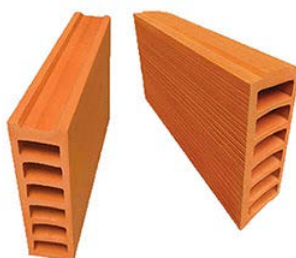
อิฐมวลเบาผลิตจากวัตถุดิบหลายชนิด ได้แก่ ทราย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวน้ำยิบซั่ม และผงอลูมิเนียมที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มพองอากาศนำมาผสมกันในปริมาณที่เหมาะสม และผ่านการอบไอน้ำด้วยแรงดันสูง ลักษณะเด่นของอิฐมวลเบา คือภายในจะมีพองอากาศเล็กๆ เป็นรูพรุนที่อยู่ในเนื้อวัสดุมากถึง 75 % ซึ่งส่งผลทำให้อิฐชนิดนี้มีน้ำหนักเบากว่าอิฐหลายชนิด รวมถึงพองอากาศเหล่านี้ยังเป็นฉนวนกันความร้อนได้เป็นอย่างดี

ถึงแม้ราคาต่อก่อนของอิฐมวลเบาจะแพงกว่าอิฐมอญ แต่เมื่อเทียบสัดส่วนกันแล้วอิฐมวลเบาจะช่วยในเรื่องของการประหยัดค่าโครงสร้าง และจำนวนของอิฐที่ใช้ เนื่องจากอิฐมวลเบา มีขนาดใหญ่กว่าอิฐมอญ แต่น้ำหนักเบา และจำนวนอิฐที่ใช้ต่อตารางเมตรก็น้อยกว่า อีกทั้งความเสียหายระหว่างการขนส่ง หรือขนย้ายก็น้อยกว่า จึงเหมาะกับการติดตั้งในงานโครงการ อาคารสูง หรือบ้านพักอาศัยเพราะนอกจากเรื่องน้ำหนักเบาแล้ว ช่วยประหยัดงบประมาณค่าโครงสร้าง อิฐมวลเบา ยังช่วยประหยัดพลังงาน ทำให้บ้านเย็น ลดการใช้เครื่องปรับอากาศ และช่วยเก็บเสียงได้

แต่อิฐมวลเบาก็จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการใช้อุปกรณ์การก่อที่ต้องเป็นอุปกรณ์เฉพาะสำหรับอิฐมวลเบา และจำเป็นต้องให้ช่างที่มีความรู้ความเข้าใจในการก่ออิฐประเภทนี้ การก่ออิฐมวลเบา จะเป็นการก่อในลักษณะก่อสลับ โดยที่ช่างจะทำการก่อแถวแรกให้จบ เป็นการวางระยะ

เพื่อให้สามารถก่อสร้างแนวที่ 2 ได้ง่าย เนื่องจากอิฐมวลเบาเป็นอิฐที่ฉาบค่อนข้างบาง และไม่นิยมมา
 แก้งานที่หลัง จึงต้องวัดระยะและวางแผนให้ดี

4. อิฐเซรามิก

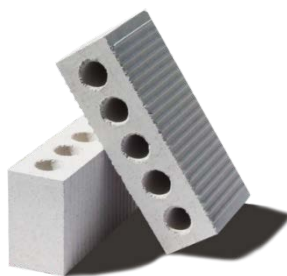


ภาพที่ 12 ลักษณะของอิฐเซรามิก

ที่มา : <http://www.thanasarn.co.th>

อิฐเซรามิกหรืออิฐพันปี เป็นอิฐที่มีลักษณะสีส้มแดงคล้ายกับอิฐมอญ นอกจากนี้ที่
 คล้ายกัน กระบวนการผลิตหรือส่วนผสมก็มีความคล้ายคลึงกัน เพราะอิฐเซรามิกทำจากดินเผาที่ผ่าน
 กระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 1,000 °C จึงทำให้ได้อิฐที่มีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำเพราะรูพรุนน้อย
 และมีความแข็งแรงสูงกว่าอิฐมอญซึ่งผ่านกระบวนการเผาที่ความร้อน 700-800 °C อิฐเซรามิกมี
 ระบบอินเตอร์ล๊อคที่ทำให้การติดตั้งเป็นไปได้อย่างง่ายดาย จบงานได้ไวผนังจะดูเป็นระเบียบ
 เรียบร้อยและฉาบบางได้ หรือสามารถก่อเป็นผนังโชว์แนวได้

5. อิฐขาว



ภาพที่ 13 ลักษณะของอิฐขาว

ที่มา : <https://www.kscontrade.com>

อิฐขาวเป็นอิฐที่มีส่วนผสมคือปูนขาวและทราย ผ่านกระบวนการอัดด้วยเครื่องจักรที่มีความกดตันสูง 500 ตัน แล้วอบด้วยความร้อนสูง ซึ่งอิฐขาวเป็นอิฐที่ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่พัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนอิฐมอญและอิฐบล็อก ลักษณะของเนื้ออิฐเป็นสีขาว เรียบเนียน และมีความหนาแน่นมาก จึงทำให้น้ำซึมผ่านได้ยาก และไม่อมความชื้น สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดถึง 180 Kg/cm^3 มีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนและป้องกันเสียงได้ดี สามารถลดรอยร้าวในการฉาบได้เพราะมีการดูดซึมน้ำน้อย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พัชรภรณ์ (2015) ได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมเถ้าปาล์มและของเสียกากชี้แบ่ง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม การศึกษาประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินขาว เถ้าปาล์ม และกากชี้แบ่ง อุณหภูมิในการเผาดินขาว ผลของกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ และคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่แทนที่ดินขาวเผาด้วยเถ้าปาล์มและกากชี้แบ่งอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 0 10 และ 20 โดยน้ำหนัก โดยเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา เถ้าปาล์มกากชี้แบ่ง สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่ 5 10 และ 15 M และอัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5 1.5 และ 2.5 โดยน้ำหนัก หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ในแบบหล่อขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ และทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 hrs ทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มในอากาศที่อายุ 7 14 28 และ 90 วัน จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิในการเผาดินขาวที่เหมาะสมคือ 750°C เป็นเวลา 3 hrs โดยกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาในการบ่ม 90 วัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีการพัฒนากำลังอัดมากกว่า $1,000 \text{ Kg/cm}^3$ นอกจากนี้ยังพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมของเสียกากชี้แบ่ง 20 % มีน้ำหนักเบา และทนความร้อนได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมอื่น โดยมีกำลังอัดอยู่ในช่วง $100\text{-}400 \text{ Kg/cm}^3$ สามารถนำไปพัฒนาเป็นอิฐมวลเบาและอิฐทนไฟได้

รศ.ดร.วันชัย สະตะ และคณะ (2017) การผลิตวัสดุชนิดขั้นใหม่ หรือที่เรียกว่า “คอนกรีตมวลเบา (Lightweight aggregate concrete)” นอกจากจะใช้เศษคอนกรีตเศษอิฐจากการทุบทิ้งแล้วยังใช้ประโยชน์ของ “เถ้าลอย” อีกด้วย โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นโรงงานที่ผลิต

ไฟฟ้าจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ นอกจากจะทำให้เกิดความร้อนแล้วยังส่งผลทำให้เกิดขยะในเวลาเดียวกัน และเพราะอนุภาคที่เล็กของถ่านล้อย จึงมีสมบัติเหมาะสมและประโยชน์นำการไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งถ้าใช้อย่างเหมาะสมจะทำให้คอนกรีตมีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น ทำงานได้ง่ายขึ้นและเพิ่มความทนทานให้แก่คอนกรีต ทำให้ราคาโดยรวมของคอนกรีตถูกลง จากการศึกษาของทีมวิจัย งานที่ผ่านมาที่ใช้จีโอพอลิเมอร์จากถ่านล้อยเป็นวัสดุประสานและมวลรวมเบา จากวัสดุเหลือทิ้ง คือ ถ่านหิน เศษคอนกรีตบล็อก เศษอิฐมอญ และเศษยางรถยนต์ พบว่าจีโอพอลิเมอร์ 0.20-0.65 W/m-K ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ทั่วไป ส่วนกำลังอัดมีค่าในช่วง 1.0-19.0 MPa ซึ่งคอนกรีตที่ใช้ถ่านหินเป็นส่วนผสมสามารถนำไปประยุกต์เป็นคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้างได้ ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาที่ทำจากเศษอิฐมอญ เศษคอนกรีตบล็อก และเศษยางรถยนต์มีกำลังอัดไม่สูง เหมาะสำหรับนำไปใช้ในคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานผนังหรือฉนวนกันความร้อน

วิเชียร ชาลี (2019) ได้ศึกษาการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักจากจีโอพอลิเมอร์จากถ่านล้อยของโรงงานโดยตรง โดยทำการทดสอบกำลังอัด และการดูดซึมน้ำ โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากถ่านล้อยที่ไม่ผ่านการบดและถ่านหิน (ถ่านล้อย:ถ่านหิน เท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งกำหนดอัตราส่วนระหว่าง Si/Al คงที่ และใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 12 14 16 และ 18 M และใช้ปริมาณหินฝุ่นเป็นมวลรวมแทนที่ในอัตราส่วน (ถ่านล้อย+ถ่านหิน) หินฝุ่น เท่ากับ 1:4 1:6 และ 1:8 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นทำการอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในเครื่องอัดคอนกรีตบล็อก โดยบ่มจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่อุณหภูมิห้อง และบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 hrs จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ ในการศึกษาจะทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่นที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตลอดจนทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน ผลจากการศึกษาพบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกจากถ่านล้อยผสมถ่านหินมีกำลังอัดสูงขึ้นและการดูดซึมน้ำมีค่าลดลงโดยเห็นผลชัดเจนในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกที่ใช้มวลรวมปริมาณต่ำมากกว่าปริมาณสูง การใช้มวลรวมผสมในจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกลดลง ตลอดจนการบ่มที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 hrs ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตบล็อกสูงกว่าที่บ่มในอุณหภูมิห้องอย่างชัดเจน โดยบ่มที่อุณหภูมิสูง

ประสิทธิภาพต่อการเพิ่มของกำลังอัดในกลุ่มที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำมากกว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง

นภารัตน์ และสุวิมล (2019) ได้ทำการศึกษาโดยนำตะกอนประปากับเถ้าน้ำมันปาล์มน้ำมันมาสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ เพื่อคัดเลือกอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสม โดยแปรผลจากการพัฒนา กำลังรับแรงอัด และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของก้อนจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ ภายหลังจากบ่มสูงสุด 60 วัน โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ระดับโครงสร้างจุลภาคได้แก่ เทคนิค X-ray fluorescence (XRF) X-ray Diffractometer (XRD) และ Scanning Electron Microscope (SEM) ผลการวิจัยสรุปได้ว่า อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์เท่ากับ 2.50 (อัตราส่วนที่ใช้ในหารทดสอบคือ 1.77 2.00 2.50 และ 3.00) สามารถเกิดผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์ภายใต้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันได้ และให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเท่ากับ 40.56 Kg/cm^3 ส่วนการใช้เทคนิค XRD และ SEM แสดงการเปลี่ยนแปลงภายใต้โครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกต สามารถบ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันและผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ได้ สรุปได้ดังนี้ เทคนิค XRD พบโครงสร้างผลึกของสารประกอบ Sodium Aluminium Silicate Hydrate ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}\cdot 216\text{H}_2\text{O}$ NASH) แทนที่ฟีกของ Quartz และ Potassium Aluminium Silicate (KAlSi_2O_6) ตลอดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุม 2 theta เทคนิค SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของจีโอพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นเจลหรือผลึกมีรูปร่างแตกต่างกัน ซ้อนทับหลายชั้น กระจัดกระจายทั่วทั้งก้อนจีโอพอลิเมอร์ สลับกันบางส่วนยังคงปรากฏเป็นช่องโหว่หรือรูพรุน มีทั้งผิวหน้าเรียบและขรุขระ และปรากฏตำแหน่งของ Silicon Aluminium และ Sodium ในตำแหน่งเดียวกัน แสดงการจับกันภายในโครงสร้างของ NASH ดังนั้น การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปร่วมกับเถ้าน้ำมันปาล์มน้ำมันจึงสามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัดได้ เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแสดงถึงการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอพอลิเมอร์ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม

วันโชค เครือหงส์ และคณะ (2019) บทความนี้รายงานผลของการเผาที่อุณหภูมิสูงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เถ้าลอยแคลเซียมสูงซึ่งเตรียมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 M อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6 นำจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 ถึง $800 \text{ }^\circ\text{C}$ มาทดสอบกำลังอัด กำลังดัด และโครงสร้างจุลภาค พบว่า การเผาจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อุณหภูมิ $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ทำให้สีของก้อนตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป เมื่อใช้อุณหภูมิการเผาที่ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ตัวอย่างเกิดรอยร้าว กำลังอัดและ

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์มีค่าร้อยละ 25 และ 9 ของตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ ความพรุนของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เถ้าลอยแคลเซียมสูงหลังการเผาที่อุณหภูมิสูงมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกระจายของโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่และโพรงอากาศของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ซึ่งเผาที่อุณหภูมิสูงมีปริมาณมากขึ้น ขณะที่โพรงคาปิลารีขนาดกลางและโพรงเจลมีปริมาณลดลง การเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ทำให้จีโอพอลิเมอร์เพสต์เสียหายมีรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นและโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์เจลถูกทำลาย

นิชา สุระกิจ (2020) ศึกษาผลของปริมาณโพม และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโพม โดยทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโพมจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ NaOH โดยใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 12 14 16 และ 18 M ใช้เม็ดโพมเป็นมวลรวมในส่วนผสมในอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเม็ดโพม เท่ากับ 1:1(S) 1:1.5(M) และ 1:2(L) โดยปริมาตร หลังจากนั้นทำการหล่อจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโพมในแบบหล่อขนาด 100x100x100 mm บ่มตัวอย่างในอากาศ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 14 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโพมมีค่าเพิ่มขึ้นตามตามปริมาณความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้นไม่เกิน 14 M และมีค่าลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของ NaOH ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 18 M ตลอดจนปริมาณโพมที่มากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโพมลดลง การศึกษาครั้งนี้พบว่า ส่วนผสมที่ใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 14 M และใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อโพมเท่ากับ 1:1 โดยปริมาตร ให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตโพมสูงที่สุด

ทรงสุตา วิจารณ์ (2020) บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของการนำเศษอิฐมอญมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัสดุแทนมวลรวมละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เศษอิฐมอญบดที่มีขนาดละเอียดใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ถูกนำมาใช้แทนที่ทรายบางส่วน ในขณะที่เศษอิฐมอญบดขนาดละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 325 จะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานทดแทน การแทนที่ทรายด้วยเศษอิฐมอญในปริมาณร้อยละ 25 ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมตั้งแต่อายุบ่มที่ 7 วันขึ้นไป ส่วนการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐมอญบดในปริมาณร้อยละ 20 สามารถเร่งการพัฒนา กำลังอัดของมอร์ต้าให้เทียบเท่ากับมอร์ต้าควบคุมอายุบ่ม 28 วัน ในสภาพการบ่มปกติได้ภายใน 24 hrs ด้วยการบ่มแบบอบไอน้ำ ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซิลิกาที่มีโครงสร้างเป็นผลึกในเศษอิฐมอญกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ไซต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ภายใต้แรงดันที่สูงของไอน้ำ ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เชื่อมประสานเพิ่มมากขึ้น

กรกนก จอยนอก และคณะ (2020) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุอัลคาไลน์ผงเพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานก่อสร้าง วัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์เพสต์ประกอบด้วยแก้วลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในแก้วลอยร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 M และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายอัลคาไลน์กระตุ้น ศึกษาอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และ 0.5 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 2.0 ในแต่ละส่วนผสมและบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 ถึง 60 °C นำวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์เพสต์ที่เตรียมได้มาบดและเรียกว่าวัสดุอัลคาไลน์ผงเพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานก่อสร้าง สำหรับวัสดุเชื่อมประสานในงานก่อสร้างประกอบด้วยวัสดุอัลคาไลน์ผง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซิลิกาฟุ่ม โดยมีการแทนที่วัสดุอัลคาไลน์ผงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซิลิกาฟุ่มที่ร้อยละ 40 และ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 M โดยกำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ในทุกส่วนผสมและบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง จากผลการศึกษาค่ากำลังอัดของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์เพสต์พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในวัสดุประสาน และผลการศึกษาค่าระยะเวลาก่อตัวของวัสดุอัลคาไลน์ผงพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์เพสต์ ส่งผลทำให้วัสดุอัลคาไลน์ผงมีการก่อตัวที่รวดเร็ว และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการบ่มของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์เพสต์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้วัสดุอัลคาไลน์ผงมีการก่อตัวที่ต่ำลง จากการศึกษาข้างต้นจะเป็นข้อมูลในการพัฒนาวัสดุอัลคาไลน์ผงในงานก่อสร้างต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

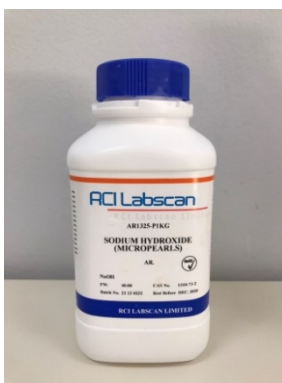
3.1.1 วัสดุและสารเคมี

- 1) ไม้ไผ่ จากตำบลเขาแก้ว อำเภอลานสกา จังหวัดนครศรีธรรมราช
- 2) เศษอิฐแดง จากโรงงานผลิตอิฐ ตำบลโมคลาน อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช
- 3) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ยี่ห้อ Panreac ผลิตจากประเทศสเปน



ภาพที่ 14 โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

- 4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริสุทธิ์ร้อยละ 99 ยี่ห้อ RCI Labscan ผลิตจากประเทศเยอรมัน



ภาพที่ 15 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.1.2 อุปกรณ์

- 1) เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace) ยี่ห้อ CARBOLITE GERO รุ่น CWF11/23



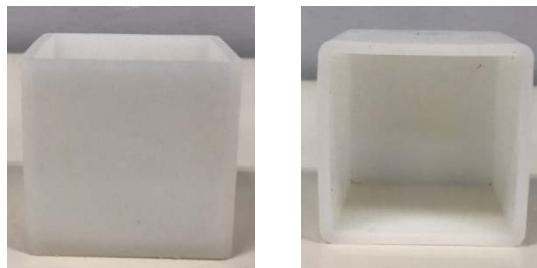
ภาพที่ 16 เตาเผาอุณหภูมิสูง

- 2) ตู้อบลมร้อน (Oven)



ภาพที่ 17 ตู้อบลมร้อน

- 3) แบบหล่อซิลิโคน (Silicon Mold)



ภาพที่ 18 แบบหล่อซิลิโคน

4) ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 325 mesh



ภาพที่ 19 ตะแกรงร่อน

5) ถาดผสม

3.1.3 เครื่องมือและเครื่องทดสอบ

1) เครื่องชั่งดิจิทัล 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ AND รุ่น FX-2000i



ภาพที่ 20 เครื่องชั่งดิจิทัล 2 ตำแหน่ง

2) เครื่องชั่งดิจิทัล 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ AND รุ่น GR-200



ภาพที่ 21 เครื่องชั่งดิจิทัล 4 ตำแหน่ง

3) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression testing Machines)

3.2 การเตรียมไม้ไผ่

- 1) ตัดไม้ไผ่ และนำไม้ไผ่ไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้น
- 2) ตัดไม้ไผ่ให้เป็นท่อนเล็กๆ ความยาวประมาณ 30 cm
- 3) นำท่อนไม้ไผ่มาผ่าแบ่งย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ ให้มีขนาดโดยประมาณ 8-10 cm พร้อมเข้าสู่กระบวนการเตรียมซีเมนต์ไม้ไผ่

3.3 การเตรียมเศษอิฐแดง

- 1) นำเศษอิฐแดงที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตอิฐบล็อกมาย่อยให้มีขนาดเล็กลงเป็นผงละเอียด
- 2) นำผงเศษอิฐแดงที่ได้มาร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 325 mesh เพื่อคัดขนาดผงที่ผ่านตะแกรงไปใช้งาน
- 3) ก่อนนำไปผสมเข้ากับซีเมนต์ไม้ไผ่นำผงอิฐที่ผ่านการคัดขนาดแล้วไปอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100 ± 5 °C เป็นเวลา 24 hrs ก่อนนำไปผสมเข้ากับซีเมนต์ไม้ไผ่

3.4 การเตรียมจีโอพอลิเมอร์ จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

3.4.1 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาไม้ไผ่

โดยเริ่มจากนำไม้ไผ่ที่เตรียมไว้มาชั่งน้ำหนักประมาณ 100-150 g ใส่ในงานเซรามิก หลังจากนั้นนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 800 และ 1,000 °C เป็นเวลา 3 hrs และปล่อยให้ซีเมนต์ไม้ไผ่ที่ได้เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิปกติภายในเตาเผา แล้วนำซีเมนต์มาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักที่หายไป โดยคำนวณจากสมการ

$$\text{ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป} = \frac{(\text{น้ำหนักไม้ไผ่} - \text{น้ำหนักซีเมนต์})}{(\text{น้ำหนักไม้ไผ่})} \times 100 \quad (1)$$

3.4.2 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเผาไม้ไผ่

โดยเริ่มจากนำไม้ไผ่ที่เตรียมไว้มาชั่งน้ำหนักประมาณ 100-150 g ใส่ในจานดินเผา หลังจากนั้นนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 2 3 และ 6 hrs และปล่อยให้ซี่ไผ่ไม้ไผ่ที่ได้เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิปกติภายในเตาเผา แล้วนำซี่ไผ่มาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักที่หายไปโดยคำนวณจากสมการที่ (1)

3.4.3 ขั้นตอนการเตรียมจีโอพอลิเมอร์

1) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้มีความเข้มข้นที่ 14 M



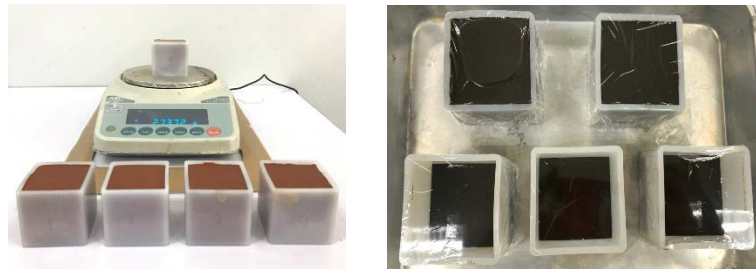
ภาพที่ 22 อุปกรณ์การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2) ทำการผสมสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมจีโอพอลิเมอร์ โดยเริ่มจากการนำผงอิฐแดงและผงซี่ไผ่ไม้ไผ่ที่เตรียมไว้ลงในถาดและผสมผงให้เข้ากันในอัตราส่วน 100:0 และ 90:10 จากนั้นเติมสารละลายผสมระหว่าง NaOH และ Na_2SiO_3 ในอัตราส่วน 60:40 แล้วกวนให้ส่วนผสมทั้งหมดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน



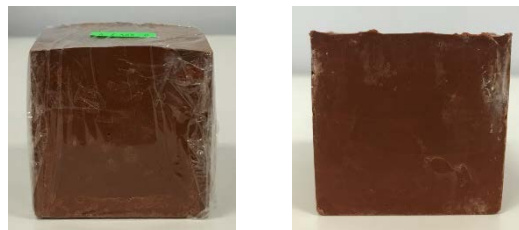
ภาพที่ 23 วัสดุที่ผ่านตะแกรงร่อน ขนาด 325 และจีโอพอลิเมอร์ที่กวนเป็นเนื้อเดียวกัน

3) นำจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันเทใส่ในแบบหล่อซิลิโคนรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 cm ตั้งทิ้งไว้ 1 hr จากนั้นห่อแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติก เพื่อป้องกันการระเหยของสารละลายต่างในขณะบ่มตัวอย่างด้วยความร้อน ก่อนนำเข้าบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 hrs



ภาพที่ 24 ตัวอย่างในแบบหล่อซิลิโคน และตัวอย่างที่หุ้มด้วยแผ่นพลาสติก

4) นำออกจากตู้อบ ตั้งให้เย็นตัวลง ถอดออกจากแบบหล่อ แล้วทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องต่อไปอีกเป็นระยะเวลา 7 วัน จากนั้นวัดขนาดและชั่งน้ำหนักขึ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ได้ และนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป



ภาพที่ 25 บ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง

3.5 การทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

3.5.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test) นำตัวอย่างเงื่อนไขละ 3 ชิ้น ไปทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 59-2516 และคำนวณหา กำลังรับแรงอัดจากสมการที่ 2

$$P = \frac{F}{A} \quad (2)$$

โดย P คือ กำลังรับแรงอัด มีหน่วยเป็น (kg/cm²)

F คือ แรงอัด มีหน่วยเป็น (kg)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง มีหน่วยเป็น (cm²)

3.5.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C642-97 ดังขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) นำตัวอย่างเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 hrs และชั่งน้ำหนักบันทึกค่าไว้
- 2) แช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 hrs นำขึ้นมาแล้วใช้ผ้าซับน้ำพอหมาดๆ หลังจากนั้นชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาร้อยละของการดูดซึมน้ำด้วยสมการที่ 3

$$\text{ร้อยละของการดูดซึมน้ำ} = \frac{W - W_s}{W_s} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_s คือ น้ำหนักก่อนตัวอย่างอบแห้ง มีหน่วยเป็น (g)

W คือ น้ำหนักก่อนตัวอย่างหลังแช่น้ำ 24 hrs มีหน่วยเป็น (g)

3.5.3 การทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Volumetric Density) ดำเนินการตามมาตรฐาน มอก. 2541:1 และคำนวณหาค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 4

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (4)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของอิฐ มีหน่วยเป็น (g/cm³)

M คือ มวลของอิฐ มีหน่วยเป็น (g)

V คือ ปริมาตรของอิฐ มีหน่วยเป็น (cm³)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการเตรียมจีโอพอลิเมอร์ จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

4.1.1 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาไม้ไผ่

จากผลการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาไม้ไผ่ที่ 600 800 และ 1,000 °C เป็นเวลา 3 hrs ด้วยจานเซรามิก ดังภาพที่ 26 พบว่าซีเมนต์ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่างกันลักษณะของซีเมนต์ที่ได้มีความแตกต่างกัน โดยเผาที่อุณหภูมิ 600 °C (ภาพที่ 26 (a)) ซีเมนต์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาวอมเทามีการจัดเรียงตัวกันเป็นแนวยาว และมีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 95.46 % เผาที่อุณหภูมิ 800 °C (ภาพที่ 26 (b)) ซีเมนต์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยโค้งงอมีสีขาวอมแดงจัดเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบ และมีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 98.82 % เผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C (ภาพที่ 26 (c)) ซีเมนต์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงกรอบและเป็นเส้นใยหยาบมีสีขาวอมดำจัดเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบ และมีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 98.53 % ดังนั้น จึงเลือกเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เนื่องจากซีเมนต์ที่ได้มีลักษณะตามที่กล่าวมาข้างต้น และมีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปน้อยที่สุด ส่งผลให้ได้ปริมาณซีเมนต์มากกว่าการเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1,000 °C



(a)



(b)

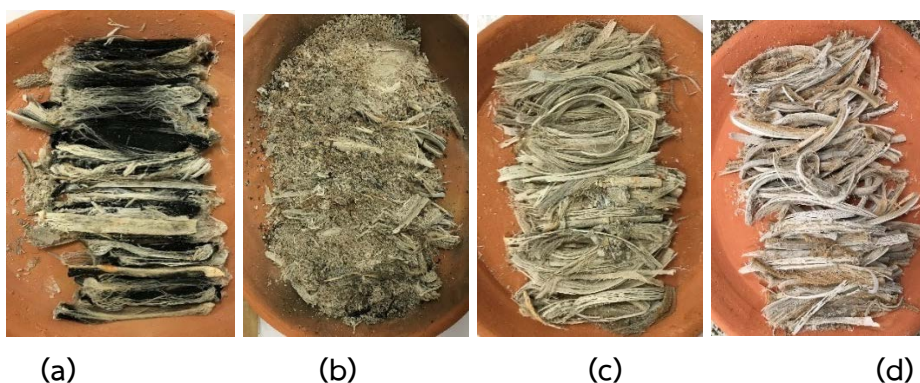


(c)

ภาพที่ 26 ลักษณะซีเมนต์ไม้ไผ่ที่เผาเป็นเวลา 3 hrs ที่อุณหภูมิต่างๆ (a) อุณหภูมิ 600 °C
(b) อุณหภูมิ 800 °C และ (c) อุณหภูมิ 1,000 °C

4.1.2 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ไฟ

จากการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเผาไหม้ไฟที่ 1 2 3 และ 6 hrs ที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยจานดินเผา ดังภาพที่ 27 พบว่า ชี้เถ้าที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิเท่ากันแต่เวลาที่ใช้ในการเผาต่างกัน ลักษณะของชี้เถ้าที่ได้มีความแตกต่างกัน โดยเผาที่เวลา 1 hr (ภาพที่ 27 (a)) ชี้เถ้าที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนผสมเส้นใยมีความชื้นและมีสีดำ ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 97.45 % เผาที่เวลา 2 hrs (ภาพที่ 27 (b)) ชี้เถ้าที่ได้มีลักษณะเป็นผงและเส้นใยที่จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีสีเทา ผสมดำเล็กน้อย ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 98.34 % เผาที่เวลา 3 hrs (ภาพที่ 27 (c)) ชี้เถ้าที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาวอมเทา มีการจัดเรียงตัวกันเป็นแนวยาว ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 95.63 % และเผาที่เวลา 6 hrs (ภาพที่ 27 (d)) ชี้เถ้าที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาวอมแดง มีการจัดเรียงตัวกันเป็นแนวยาว ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 96.59 % ดังนั้น จึงเลือกใช้เวลาในการเผาที่เวลา 3 hrs เนื่องจากชี้เถ้าที่ได้มีลักษณะตามที่กล่าวมาข้างต้น และมีร้อยละของน้ำหนักที่หายไปน้อยที่สุด ส่งผลให้ได้ปริมาณชี้เถ้ามากกว่าหารเผาที่เวลา 1 2 และ 6 hrs



ภาพที่ 27 ลักษณะชี้เถ้าไหม้ไฟเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ที่เวลาต่างๆ (a) เวลาเผา 1 hr (b) เวลาเผา 2 hrs (c) เวลาเผา 3 hrs และ (d) เวลาเผา 6 hrs

4.2 ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Test)

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วนผสมระหว่างเศษอิฐแดงและชี้เถ้าไหม้ไฟที่ 100:0 และ 90:10 ดังแสดงดังตารางที่ 3 และ 4 พบว่า กำลังรับแรงอัดของชิ้น

ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสมที่ 100:0 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่อัตราส่วนผสมที่ 90:10 อันเนื่องมาจากระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มของอัตราส่วนผสมที่ 100:0 นานกว่าที่อัตราส่วนผสมที่ 90:10 ซึ่งระยะเวลาในการบ่มที่นานกว่าส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีความแข็งแรงมากขึ้นและสามารถรับแรงที่มากระทำได้สูงกว่า เพราะเตรียมมาจากเนื้อพื้นเดียวกัน มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีรูปร่างที่มีมิติแน่นอน ดังนั้นชิ้นตัวอย่างที่อัตราส่วนผสมที่ 100:0 จึงสามารถรับแรงที่มากระทำได้สูงกว่าที่อัตราส่วนผสมที่ 90:10 เพราะที่อัตราส่วนผสมนี้มีการผสมซีเมนต์ไม่ไผ่ลงไป 10 ส่วนใน 100 ส่วน ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีรูพรุนเกิดขึ้น เนื่องจากซีเมนต์ไม่ไผ่เข้าไปแทนที่เศษอิฐแดงบางส่วนทำให้ชิ้นตัวอย่างรับแรงที่มากระทำได้น้อยกว่า ซึ่งเป็นเหตุผลที่ตรงตามจุดประสงค์ข้างต้นของโครงการ เนื่องจากต้องการเตรียมอิฐมอญให้มีน้ำหนักเบาโดยมีการแทนที่ด้วยซีเมนต์ไม่ไผ่ให้กลายเป็นอิฐมวลเบาซึ่งมีน้ำหนักเบากว่า สามารถนำมาก่อสร้างได้ ความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้ถึง 30-50 kg/cm² ทนความร้อนได้ ส่วนอิฐมอญสามารถรับน้ำหนักได้เพียง 20-30 kg/cm² ผู้จัดทำจึงตัดสินใจที่จะทำอิฐมอญให้เป็นอิฐมวลเบาที่ผลิตจากเศษอิฐแดงเข้ากับซีเมนต์ไม่ไผ่ เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้มากกว่าอิฐมอญ เนื่องจาก อิฐมวลเบา มีลักษณะก้อนใหญ่กว่าอิฐมอญ สามารถก่อสร้างได้เร็ว ลดค่าแรงในการก่อและฉาบได้ถึง 1.5 บาทต่อตารางเมตร และสามารถช่วยลดต้นทุนที่ใช้ในการซื้อของก่อสร้างได้อีกด้วย

ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 100:0

ชิ้นตัวอย่าง	แรง (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	กำลังรับแรงอัด (kg/ cm ²)
1	536.4	25	21.46
2	524.3	25	20.97
3	575.2	25	23.01
เฉลี่ย	545.3	25	21.81

ตารางที่ 4 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 90:10

ชิ้นตัวอย่าง	แรง (kg)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	กำลังรับแรงอัด (kg/ cm ²)
1	451.8	25	18.07
2	437.1	25	17.48
3	482.5	25	19.30
เฉลี่ย	457.1	25	18.28

4.2.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วนผสมระหว่างเศษอิฐแดงและซีเมนต์ที่ไม่ใช่ที่ 100:0 และ 90:10 ในตารางที่ 5 และ 6 พบว่า ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างที่อัตราส่วนผสมที่ 100:0 มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำสูงกว่าที่อัตราส่วนผสมที่ 90:10 เนื่องจากเศษอิฐมีสมบัติความเป็นรูพรุนสูง จึงสามารถดูดซึมน้ำได้ดี เมื่อมีการแทนที่เศษอิฐแดงด้วยซีเมนต์ที่ไม่ใช่ที่อัตราส่วน 90:10 พบว่าชิ้นตัวอย่างมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำลดลง เนื่องจากซีเมนต์ไม่เฝ้เข้าไปแทนที่เศษอิฐแดงทำให้สมบัติความเป็นรูพรุนลดลง จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลงจะส่งผลดีให้กับอิฐมวลเบา และจากที่ศึกษามาอิฐมอญมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำได้มากกว่าอิฐมวลเบา เนื่องจากโครงสร้างภายในของอิฐมอญมีรูพรุนขนาดใหญ่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่วนอิฐมวลเบา มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำน้อยกว่าอิฐมอญ เนื่องจากโครงสร้างภายในของอิฐมวลเบา มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ ทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในชิ้นตัวอย่างได้น้อยจึงทำให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำน้อยกว่าอิฐมอญ ซึ่งนำผลตามตารางด้านล่างมาคำนวณตามสมการที่ 3 เพื่อดูค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ ร้อยละการดูดซึมน้ำที่อัตราส่วนผสมที่ 100:0 เท่ากับ 19.37 และร้อยละการดูดซึมน้ำที่อัตราส่วนผสมที่ 90:10 เท่ากับ 15.67

ตารางที่ 5 แสดงน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสม 100:0

ชิ้นตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลังอบ (g)	น้ำหนักหลังแช่น้ำ 24 hrs (g)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ
1	78.12	56.78	67.46	18.81
2	77.53	57.16	67.89	18.77
3	77.93	56.05	67.56	20.53
เฉลี่ย	77.86	56.66	67.64	19.37

ตารางที่ 6 แสดงน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสม 90:10

ชิ้นตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลังอบ (g)	น้ำหนักหลังแช่น้ำ 24 hrs (g)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ
1	77.50	56.02	65.41	16.76
2	77.58	55.87	64.22	14.95
3	77.65	56.09	64.68	15.31
เฉลี่ย	77.58	56.99	67.77	15.67

4.2.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Volumetric Density)

จากผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ในอัตราส่วนผสมระหว่างเศษอิฐแดงและซีเมนต์ที่ไม่ได้ที่ 100:0 และ 90:10 ในตารางที่ 7 และ 8 พบว่า ความหนาแน่นเชิงปริมาตรทั้ง 2 อัตราส่วนมีค่าคงที่เท่ากับ 0.62 g/cm^3 ซึ่งอยู่ภายใต้ชั้นคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของอิฐมวลเบา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ $0.3-1.0 \text{ g/cm}^3$ แบ่งเป็นชั้นคุณภาพได้เป็น 4 ชั้น คือ ชั้นคุณภาพ 2 4 6 และ 8 เพื่อเป็นประโยชน์สูงสุดในการเลือกใช้อิฐมวลเบาให้เลือกใช้ชั้นคุณภาพ 2 เพราะเหมาะสำหรับการก่อสร้าง ระบบโครงสร้างเสา-คาน เนื่องจากมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรน้อย และมีน้ำหนักเบาจึงเหมาะแก่การก่อสร้างได้ดีกว่าชั้นคุณภาพ 4 6 และ 8 เนื่องจากมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรมากกว่าและมีน้ำหนักมากกว่ารวมถึงมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่มากกว่าชั้นคุณภาพ 2 ซึ่งจะไม่ค่อยนิยมสำหรับการก่อสร้างเพราะอาจจะทำให้เกิดการซึมน้ำเสียหายได้

ตารางที่ 7 แสดงค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสม 100:0

ชิ้นตัวอย่าง	มวลของอิฐ (g)	ปริมาตร (cm^3)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
1	78.12	125	0.62
2	77.53	125	0.62
3	77.93	125	0.62
เฉลี่ย	77.86	125	0.62

ตารางที่ 8 แสดงค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนผสม 90:10

ชิ้นตัวอย่าง	มวลของอิฐ (g)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/ cm ³)
1	77.50	125	0.62
2	77.58	125	0.62
3	77.65	125	0.62
เฉลี่ย	77.58	125	0.62

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติของวัสดุตั้งต้นที่นำมาทำเป็นชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ จากเศษอิฐแดง และซีเมนต์ที่ไม่ใช่เป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ไม้ไฟมีองค์ประกอบหลักของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และเศษอิฐแดงมีองค์ประกอบหลักเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งมีสมบัติที่สามารถนำมาทำเป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ ในส่วนของไม้ไฟที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ $600\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 3 hrs จะทำให้ซีเมนต์ที่ไม่ใช่มีความเป็นอสัณฐานและมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่เป็นจำนวนมากสามารถนำมาเตรียมเป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ และยังสามารถใช้แทนวัสดุอื่นๆ เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิตอิฐมวลเบาได้

จากการศึกษาผลของกำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 100:0 มีค่าสูงกว่าที่อัตราส่วน 90:10 เนื่องจากเตรียมมาจากเศษอิฐแดงล้วนทำให้เกิดผลึกอย่างสมบูรณ์มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ มีรูปร่างที่แน่นอนและมีน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างมากกว่า จึงทำให้สามารถรับแรงที่มากกระทำได้ดี

จากการศึกษาผลของการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ พบว่า การดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 100:0 มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำสูงกว่าที่อัตราส่วน 90:10 เนื่องจากเศษอิฐมีสมบัติความเป็นรูพรุนมากจึงทำให้การดูดซึมน้ำได้ดี และเมื่อมีการแทนที่เศษอิฐด้วยซีเมนต์ที่ไม่ใช่ในอัตราส่วน 90:10 จะทำให้ความเป็นรูพรุนของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ลดลง จึงส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำลดลง

จากการศึกษาผลของความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ พบว่า ความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 100:0 มีค่าเท่ากับที่อัตราส่วน 90:10 เนื่องจากน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์หลังจากบ่มครบ 7 วัน มีน้ำหนักใกล้เคียงกันอยู่ที่ 77 g ซึ่งเมื่อคำนวณค่าความหนาแน่นทำให้ได้ผลที่ได้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.62 g/cm^3 ซึ่งอยู่ภายใต้ชั้นคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของอิฐมวลเบา

บรรณานุกรม

- รัตนศักดิ์ อุบลรัตน์และปริญญาจินดาประเสริฐ. (2008). การศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ราชภัทร รัตนวราหและประเสริฐอิมมาน. (2010) การศึกษาการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตพูนจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมเถ้าลอย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
- ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. (2011). “วัสดุรูพรุนคืออะไร Porous Materials”, วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2554
- บุรฉัตร ฉัตรวีระและณัฐ มากุล. (2012). สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยและเถ้าแกลบ:อิทธิพลของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH ภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 35 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2555.
- พัชราภรณ์ ธรรมบำรุง. (2015). “การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากดินขาว เถ้าปาล์ม และของเสียกากซีเมนต์ (The Characteristic Study of Geopolymer Material from Kaolin, Palm Ash and Concentrated Latex Waste Sludge)”, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- รศ.ดร.วันชัย สะตะ และคณะ. (2017). “วัสดุเหลือทิ้ง สู่คอนกรีตมวลเบา (Waste Material to Lightweight Concrete)”, หนังสือประชามวิจัย ฉบับที่ 136 ปีที่ 23 เดือน พฤศจิกายน-ธันวาคม 2560
- วิเชียร ชาลี. (2019). “การผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักโดยใช้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบโรงงานโดยตรง (Utilization of coarse original rice husk ash-based geopolymer in hollow load-bearing concrete masonry blocks)”, การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, 225-232.
- นิชา สุระกิจ. (2019). “จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโฟมจากเถ้าถ่านหิน (Geopolymer concrete foamed from coal ash)”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร, 29 (4), 437-446.

- นภารัตน์ ไวยเจริญ และสุวิมล อัครพิศิษฐ์. (2019). “การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากตะกอนประปา และเถ้าปาล์มน้ำมัน (Geopolymer synthesis from tap sludge and oil palm ash)”, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2019. 70-86.
- วันโชค เครือหงษ์ และคณะ. (2019). “ผลของการเผาที่อุณหภูมิสูงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เถ้าลอยแคลเซียมสูง”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 42 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2562, 109-122.
- ทรงสุดา วิจารณ์. (2020). “การศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของการนำเศษอิฐมอญมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในงานคอนกรีต (Preliminary Feasibility of Utilizing Clay Brick Debris as Partial Replacement for Fine Aggregate and Portland Cement in Concrete Works)”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 วันที่ 15-17 กรกฎาคม 2563.
- กรกนก จอยนอก และคณะ. (2020). “การศึกษาเบื้องต้นของผลอัลคาไลน์ (Fundamental Study of Alkali-Activated Powder)”, การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25 วันที่ 15-17 กรกฎาคม 2563.
- Sirikingkaew, S. (2015). Development of geopolymer facing bricks from synergistic use of fly ash (FA) and concrete residue (CR). (The Degree of Bachelor of Environmental Science, Chulalongkorn University).
- Siriruekratana, S. (2015). Development of geopolymer bricks from synergistic use of bagasse ash and concrete residue. (The Degree of Bachelor of Environmental Science, Chulalongkorn University).
- Timakul, P., Rattanaprasit, W., Aungkavattana, P. (2016). Improving compressive strength of fly ash based geopolymer composites by basalt fibers addition. Ceramics International. 42,6288-6295.
- Bhardwaj, B., Kumar, P. (2019). Comparative study of geopolymer and alkali activated slag concrete comprising waste foundry sand. Construction and Building Materials, 209, 555-565.

ประวัติย่อผู้จัดทำ



ชื่อ-นามสกุล	นางสาวชาคริยา ศรีรักษา รหัสนิสิต 612091027
วันเดือนปีเกิด	12 พฤศจิกายน 2542
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	19/2 ม.3 ต.เขาแก้ว อ.ลานสกา จ.นครศรีธรรมราช 80230
ระดับการศึกษา	อุดมศึกษาปีที่ 4
สถานที่ศึกษา	มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

