

การนำของเสียซิลิกาไปใช้ประโยชน์ในการผลิตซีโอไฟลิเมอร์มอร์ดาร์

นางสาวชาลิสา วีสมหมาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



UTILIZATION OF SILICA WASTE FOR GEOPOLYMER MORTAR PRODUCTION

Miss Chalisa Veesomei

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การนำของเสียซิลิกาไปใช้ประโยชน์ในการผลิต
ซีโอไฟลิเมอร์มอร์ดาร์

โดย

นางสาวชาลิสา วิสมหมาย

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

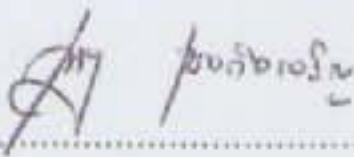
รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนिरังวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงรัตน์ อินทร)

ชาลิสา วิสมหมาย: การนำของเสียซิลิกาไปใช้ประโยชน์ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
(UTILIZATION OF SILICA WASTE FOR GEOPOLYMER MORTAR PRODUCTION)
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ, 115 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกากของเสียซิลิกามาใช้ประโยชน์ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของของเสียซิลิกา สภาวะที่เหมาะสมในการนำของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม อัตราส่วนของเสียซิลิกาต่ออะลูมินาบริสุทธิ์เท่ากับ 1 ต่อ 1, 2 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 ซึ่งเป็นตัวแปรฐานในผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ A1(60:20:20), A2(60:10:20), B1(70:20:10) และ B2(70:10:20) ทำการเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ขนาด 5×5×5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของของเสียซิลิกา พบว่ามีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกาไดออกไซด์ร้อยละ 71.3 ผลการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟเฟรคชั่น พบว่าของเสียซิลิกามีลักษณะเป็นของแข็งอสัณฐาน ผลการทดสอบการชะละลายด้วยวิธีการสกัดสารพบว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งแสดงว่าของเสียซิลิกาไม่จัดเป็นของเสียอันตรายและผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของเสียซิลิกาต่ออะลูมินาบริสุทธิ์ คือ 2:1 สัดส่วนของวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสม คือ อัตราส่วน B2(70:10:20) สามารถรับกำลังรับแรงอัด 190 กก./ซม.² ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบ คือ 180 กก./ซม.² ในวันแรกของการทดสอบและอัตราส่วน A1(60:20:20) ผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ในวันที่ 3 ของการทดสอบ โดยสามารถรับกำลังรับแรงอัด 194 กก./ซม.² และผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคที่เกิดขึ้นเป็นการยืนยันผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด และค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ A1(60:20:20) เท่ากับ 2.49 บาทต่อก้อน และ B2(70:10:20) เท่ากับ 3.93 บาทต่อก้อน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนิพนธ์.....ชาลิสา วิสมหมาย.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
.....

5370225021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : SILICA WASTE; RECYCLE; USED SILICONE COMPOUND; POZZOLAN MATERIAL.

CHALISA VEESOMAI : UTILIZATION OF SILICA WASTE FOR GEOPOLYMER MORTAR PRODUCTION. ADVISOR: ASSOC.PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D., 115 pp.

This research investigated the utilization of silica waste as raw material for geopolymer production. The general physical and chemical properties of silica waste were analyzed. The optimum conditions for mortar in the production of geopolymer mortar with silica waste compared to the cement mortar controls were studied. The experiments was carried out by varying the silica waste to pure alumina ratio equals to 1:1, 2:1 and 3:1, binder to sodium hydroxide to sodium silicate solution ratio equals to A1 (60:20:20), A2 (60:20:10), B1 (70:20:10) and B2 (70:10:20) on compressive strength of geopolymer mortar. The mortars were cast in 5*5*5 cubiccentimeters in cubic shape with curing temperature at 60 °C for 24 hours. The compressive strength of geopolymer mortars were tested at 1, 3, 7, 14, 28, 56 and 90 days. The results revealed that the chemical characteristics of silica waste contained an average of 71.3 percent of silicon dioxide. The results of phase analysis by x-ray diffraction indicated that silica waste was in amorphous phase. The leaching tests of heavy metals also indicated that the concentrations of all heavy metals were within the standard set by the Ministry of Industry, Thailand. Therefore, silica waste was considering as non hazardous waste. The results indicated that the optimum silica waste to pure alumina ratio was at 2:1. The sample obtained from binder to sodium hydroxide to sodium silicate solution ratio B2 (70:10:20), gave the compressive strength of 190 ksc and pass the compressive strength standard at 180 ksc after 1 day. The other samples ratio A1(60:20:20) gave the compressive strength of 194 ksc and pass the compressive strength standard at 180 ksc after 3 days. The cost estimation for the geopolymer mortar production at ratio A1 (60:20:20) and B2 (70:10:20) was equals to 2.49 and 3.93 bath/unit respectively.

Department : Environmental Engineering Student's Signature Chalisa Veesomai
Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature Petchporn. C
Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ เป็นอย่างสูง ที่ประสิทธิ์ประสาทถ่ายทอดวิชาความรู้ทางวิชาการแก่ผู้วิจัยในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ โดยให้ความรู้ แนะนำให้คำปรึกษาตลอดจนช่วยอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงรัตน์ อินทร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล และ อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษา ความรู้และชี้แนะจนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความรู้ คำชี้แนะและคำปรึกษา

ขอขอบคุณโรงงาน รีไซเคิลกากของเสีย ที่ให้ความอนุเคราะห์ของเสียซิลิกามาเป็นวัตถุดิบ และข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ บริษัท ทีพีไอ จำกัด (มหาชน) ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ คำอธิบายตลอดจนสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ” ผู้วิจัยจึงใคร่ขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัย ขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้คำปรึกษา คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คอนกรีต.....	4
2.2 ประเภทของคอนกรีต.....	6
2.3 วัสดุใหม่สำหรับงานคอนกรีต.....	6
2.3.1 กรรมวิธีการผลิต.....	6
2.3.2 ประโยชน์และการใช้งาน.....	8
2.4 จีโอโพลิเมอร์.....	10
2.4.1 ผลิตผลจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Products).....	14
2.4.2 คุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	16
2.5 กำลังอัดคอนกรีต.....	23
2.5.1 กำลังอัดมอร์ตาร์.....	23
2.5.2 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม.....	24
2.5.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์.....	24

	หน้า
2.6 ปูนซีเมนต์.....	24
2.6.1 ชนิดของปูนซีเมนต์.....	25
2.6.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์.....	28
2.6.3 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์.....	30
2.7 ของเสียซิลิกา.....	33
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
2.8.1 ด้านปูนซีเมนต์และคอนกรีต.....	37
2.8.2 ด้านจีโอโพลิเมอร์.....	40
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	50
3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
3.1.1 วัสดุดิบ.....	51
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	51
3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	51
3.2 ตัวแปรที่ใช้ทดลอง.....	54
3.2.1 ตัวแปรอิสระ.....	54
3.2.2 ตัวแปรตาม.....	54
3.2.3 ตัวแปรควบคุม.....	54
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	55
3.3.1 การทดลองตอนที่ 1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย.....	55
3.3.1.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุดิบ.....	55
3.3.1.2 การออกแบบส่วนผสม.....	55
3.3.1.3 การเตรียมวัสดุผสม.....	55
3.3.2 การทดลองตอนที่ 2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐาน ของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	55
3.3.2.1 ทดสอบการชะละลายโลหะหนัก.....	55
3.3.2.2 วิเคราะห์การกระจายขนาดคละของวัสดุ.....	56
3.3.2.3 วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ.....	56

3.3.3 การทดลองตอนที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	56
3.3.4 การทดลองตอนที่ 4 การทดลองการชะละลายของโลหะหนัก.....	58
3.3.5 การทดลองตอนที่ 5 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้น.....	58
3.4 ผังสรุปงานวิจัย.....	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	60
4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	60
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	60
4.1.2 ผลการศึกษการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	65
4.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	65
4.2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	66
4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในการผลิตโดยใช้ของเสียซีลิกา.....	73
4.4 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของของเสียซีลิกาในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	89
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบ.....	90
ภาคผนวก ก.1 การทดสอบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้วโดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET).....	91
ภาคผนวก ก.2 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (มาตรฐาน ASTM C109-07, 2008).....	92
ภาคผนวก ข การทดสอบการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค.....	94

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์และ เฟสที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	96
ภาคผนวก ง การคำนวณความถ่วงจำเพาะและการคำนวณสัดส่วนของมอร์ตาร์ ในอัตราส่วนต่างๆ.....	99
ภาคผนวก จ การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนต่างๆ และการ แปรหน่วยกำลังรับแรงอัด	102
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลผลการวิเคราะห์โลหะหนัก.....	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคนกรีต.....	5
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุต่างๆ.....	12
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุต่างๆ ในงานจีโอโพลิเมอร์.....	20
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์.....	22
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์.....	29
ตารางที่ 3.1 การหาอัตราส่วนปริมาณของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์.....	57
ตารางที่ 3.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในสถานะต่างๆ.....	57
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนปริมาณอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด.....	57
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกา.....	61
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นฐานของวัสดุ.....	62
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดผลึกของของเสียซิลิกา (หลังบด) และ อะลูมินาบริสุทธิ์.....	64
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักของเสียซิลิกาเปรียบเทียบกับ ค่ามาตรฐาน.....	65
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าในอัตราส่วน A1 (60:20:20), B2 (70:10:20) และมอร์ต้าซีเมนต์ควบคุม ที่ระยะเวลาการทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน.....	70
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับงานวิจัยอื่น.....	72
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักของของเสียซิลิกา.....	73
ตารางที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าจากของเสียซิลิกา (บาท/ ก้อน).....	76
ตารางที่ 4.9 ค่าใช้จ่ายพลังงานของเสียซิลิกาและทราย (บาท/กก.).....	77
ตารางที่ ผ1 การหาค่ากำลังรับแรงอัดให้กระทำในช่วงเวลาตลาดเคลื่อนยอมนับได้.....	93
ตารางที่ ผ2 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดผลึกของของเสียซิลิกา (หลังบด) และ อะลูมินาบริสุทธิ์.....	95
ตารางที่ ผ3 ผลวิเคราะห์หาปริมาณปริมาตรของของเสียซิลิกา.....	97
ตารางที่ ผ4 การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของของเสียซิลิกา.....	100
ตารางที่ ผ5 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าต่อก่อน.....	101

ตารางที่ ๗6.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน A1 (60:20:20).....	103
ตารางที่ ๗6.2 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน A1 (60:20:20) ต่อ.....	104
ตารางที่ ๗7.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน B2 (70:10:20).....	105
ตารางที่ ๗7.2 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสาน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน B2 (70:10:20) ต่อ.....	106
ตารางที่ ๗8.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์คอนกรีตควบคุม โดยออกแบบให้สามารถ รับกำลังรับแรงอัดได้ 180 กก./ซม ²	107
ตารางที่ ๗8.2 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์คอนกรีตควบคุม โดยออกแบบให้สามารถ รับกำลังรับแรงอัดได้ 180 กก./ซม ² ต่อ.....	108
ตารางที่ ๗9 แสดงค่าความเข้มข้นต่ำสุดของธาตุสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) และ ทองแดง (Cu) ของเครื่องอินดักทีฟลิคเปิดพลาสมา.....	113
ตารางที่ ๗10 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักของของเสียซิลิกา.....	114
ตารางที่ ๗11 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	114

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization).....	12
ภาพที่ 2.2 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปฏิกิริยา Geopolymerization.....	13
ภาพที่ 2.3 แสดงภาพขยายขนาดไมโครของลักษณะโครงสร้างของมอร์ตาร์เปรียบเทียบกับ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	13
ภาพที่ 2.4 ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีของเสียซิลิกา.....	13
ภาพที่ 2.5 ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	14
ภาพที่ 2.6 อิฐทนไฟ ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	15
ภาพที่ 2.7 นำไปประยุกต์ใช้ในการทำฟิวส์ไฟฟ้าผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	15
ภาพที่ 2.8 วัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงาม ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์.....	16
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไฮอะเลต.....	18
ภาพที่ 2.10 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลิไฮอะเลต.....	19
ภาพที่ 2.11 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของไฮเดียมโพลิไฮอะเลต.....	19
ภาพที่ 2.12 แสดงกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์.....	31
ภาพที่ 2.13 กระบวนการดีโพลิเมอร์ไรเซชัน.....	33
ภาพที่ 2.14 โครงสร้างสารประกอบซิลิโคน (Silicone).....	34
ภาพที่ 2.15 แสดงปริมาณวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรีไซเคิลกากของเสีย.....	36
ภาพที่ 3.1 ทราแม่ น้ำละเอียด.....	53
ภาพที่ 3.2 ของเสียซิลิกา.....	53
ภาพที่ 3.3 โครงสร้างอะลูมินาบริสุทธิ์ (Al_2O_3).....	53
ภาพที่ 3.4 เครื่องบดขนาดเล็ก.....	53
ภาพที่ 3.5 เครื่องร่อนเย้าคัดขนาด.....	53
ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	54
ภาพที่ 3.7 เครื่องชั่งน้ำหนักมอร์ตาร์.....	54
ภาพที่ 3.8 แบบหล่อก่อผนังตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 x 5x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร.....	54
ภาพที่ 3.9 ผังสรุปงานวิจัย.....	59
ภาพที่ 4.1 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของของเสียซิลิกา.....	63

	หน้า
ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของของเสียซีลิกา (หลังบด).....	64
ภาพที่ 4.3 ผลการกระจายขนาดคละของอะลูมินาบริสุทธิ์.....	64
ภาพที่ 4.4 ภาพของของเสียซีลิกาขยาย 5000 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ สแกน.....	66
ภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะผิวดรูปทรงลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของอัตราส่วนเสียซีลิกาและ อะลูมินาบริสุทธิ์ ที่ 30:30 และ 35:35 (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:20:10).....	67
ภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะผิวดรูปทรงลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของอัตราส่วนเสียซีลิกาและ อะลูมินาบริสุทธิ์ ที่ 45:15 และ 53:17 (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:20:10).....	67
ภาพที่ 4.7 แสดงลักษณะรูปทรงลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของอัตราส่วนเสียซีลิกาและ อะลูมินาบริสุทธิ์ ที่ 40:20 และ 47:23 (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:20:10).....	67
ภาพที่ 4.8 แสดงลักษณะผิวดรูปทรงลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของ (ก) อัตราส่วน A2 (60:10:20) และ (ข) อัตราส่วน B1 (70:20:10).....	69
ภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของ (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:10:20).....	69
ภาพที่ 4.10 ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ซีเมนต์ควบคุม อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ อัตราส่วน B2 (70:10:20).....	69
ภาพที่ 4.11 แสดงกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง.....	71
ภาพที่ 4.12 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคขยาย 2500 เท่าของ (ก) มอร์ตาร์อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) มอร์ตาร์อัตราส่วน B2 (70:10:20).....	74
ภาพที่ 4.13 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคขยาย 5000 เท่าของ (ก) มอร์ตาร์อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) มอร์ตาร์อัตราส่วน B2 (70:10:20).....	74
ภาพที่ ผ1 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของของเสียซีลิกา (ก่อนบด).....	95
ภาพที่ ผ2 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของอะลูมินาบริสุทธิ์.....	95
ภาพที่ ผ3 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของของเสียซีลิกา.....	98
ภาพที่ ผ4 กราฟการเทียบกำลังรับแรงอัดจากรูปทรงกระบอกเป็นรูปทรงลูกบาศก์ ในหน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc).....	111

ภาพที่ ๕5 กราฟแสดงค่ามาตรฐานความเข้มข้นของธาตุโครเมียม (Calibration Curve)...	113
---	-----

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุส่วนประกอบที่สำคัญของคอนกรีตและมอร์ตาร์ ซึ่งได้มาจากกระบวนการเผาสารซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1400 – 1600 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดให้ละเอียดตามความต้องการ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานสูงมากในกระบวนการผลิต อันเป็นผลกระทบจากกระบวนการผลิตดังกล่าวจะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงมีการนำวัสดุทดแทนมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและมอร์ตาร์ให้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์ส่วนใหญ่มีการใช้เถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้น แต่เถ้าถ่านหินมีส่วนประกอบของ CaO ในปริมาณสูง จึงเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันเป็น CSH ซึ่งเป็นโครงสร้างที่อ่อนแอกว่าจีโอโพลิเมอร์ ทำให้ความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดน้อยลง งานวิจัยนี้ได้ใช้ของเสียซิลิกาเป็นสารตั้งต้น ซึ่งความมุ่งหมายที่จะพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ให้สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้มากขึ้น ปัจจุบันสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วมีปริมาณกว่า 1,000 ตันต่อปี และได้มีการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่โดยกระบวนการดีโพลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งในกระบวนการรีไซเคิลดังกล่าวจะเกิดของเสียซิลิกาประมาณร้อยละ 30-40 หรือประมาณ 300-400 ตันต่อปี (โรงงานรีไซเคิลกากของเสีย, สัมภาษณ์, 30 มีนาคม 2554) จากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียอุตสาหกรรมที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดและจัดการ และผลกระทบจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงได้มีการสนับสนุนให้ศึกษาถึงการหมุนเวียนวัสดุที่ไม่ใช้แล้วและการนำของเสียมาใช้เป็นส่วนผสมของวัตถุดิบจากวัสดุของเสียที่ไม่ใช้แล้ว เพื่อลดปริมาณของเสียหรือของเสียที่เป็นมลพิษลงได้ ของเสียซิลิกาดังกล่าวมีลักษณะสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน งานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุงและพัฒนาสารประกอบซิลิกาที่ใช้แล้วนี้ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นโดยส่วนผสมทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย

โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Nazari และคณะ, 2011) สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ เพื่อใช้ในการก่อสร้าง โดยศึกษาการปรับอัตราส่วนผสมวัสดุซึ่งผ่านการคำนวณมาเป็นส่วนผสมเพื่อให้ได้องค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมและมีคุณภาพดีขึ้นในการประยุกต์ใช้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของของเสียซิลิกาเพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

1.2.2 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสัดส่วนที่เหมาะสมของของเสียซิลิกาในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

1.2.3 ศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี โครงสร้างทางจุลภาคของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

1.2.4 ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากของเสียซิลิกาเพื่อใช้ในการก่อสร้าง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำของเสียซิลิกาที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ได้จากการผลิตสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง โดยมีขอบเขตการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบ ด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) เปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้นในวัตถุดิบ ด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัลเปิลพลาสมา (ICP)

1.3.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการนำของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยแปรเปลี่ยนสัดส่วนของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ในการผสมเพื่อเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร) ในอัตราส่วน 60 และ 70 โดยน้ำหนักส่วนผสม

1.3.3 ศึกษาคุณภาพของมอร์ตาร์ ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ การชะละลายและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

(Scanning Electron Microscopy, SEM) ของอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

1.3.4 ศึกษาการประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียซิลิกามาผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพื่อใช้ในการก่อสร้าง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นการนำของเสียซิลิกาที่เกิดจากกระบวนการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เชิงประยุกต์เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และสามารถใช้ได้ในการก่อสร้าง

1.4.2 เป็นการลดปริมาณของเสียหรือของเสียที่เป็นมลพิษซึ่งเกิดขึ้นในปัจจุบันลงได้

1.4.3 ทราบถึงผลของตัวแปรต่างๆในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากของเสียซิลิกาที่เกิดจากกระบวนการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วมาใช้

1.4.4 เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาและพัฒนาด้านจีโอโพลิเมอร์จากของเสียซิลิกาที่เกิดจากกระบวนการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วมาใช้ในอนาคต

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ของเสียซิลิกาที่ได้จากการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการทำไอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุส่วนประกอบที่สำคัญของคอนกรีตและมอร์ตาร์ซึ่งได้มาจากกระบวนการเผาสารซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ ประมาณ 1400–1600 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดให้ละเอียดตามความต้องการปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานสูงมากในกระบวนการผลิตเริ่มตั้งแต่การระเบิดวัสดุต้นแหล่งกำเนิด การย่อย การลำเลียง การเผาตลอดจนการบดให้ละเอียดจนถึงผลกระทบจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงมีการนำวัสดุทดแทนมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและมอร์ตาร์ให้ดียิ่งขึ้น

2.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัสดุธรรมชาติเกิดจากการผสมกันระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ มวลรวมหยาบมวลรวมละเอียดและน้ำ อาจมีสารผสมเพิ่มอื่นๆ ตามความจำเป็นคอนกรีตต้านทานแรงอัดได้ดีแต่ต้านทานแรงดึงได้ต่ำมากในทางปฏิบัติจึงไม่ออกแบบให้คอนกรีตต้านทานแรงดึง ปัจจัยและคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตขึ้นอยู่กับชนิดและคุณภาพของวัสดุ(ซีเมนต์มวลรวมและน้ำ) ชนิดและคุณภาพของซีเมนต์มีผลต่อปฏิกิริยาเคมี (ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำหรือ Hydration) และการให้กำลังคุณภาพมวลรวมนั้นขึ้นอยู่กับรูปร่างขนาดสัดส่วนความสะอาดและความคงทนปริมาณหรือร้อยละของซีเมนต์ในส่วนผสม อัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์ (water/cement ratio) วิธีและเวลาผสม (Mixing method and time) การเท (Placing) การเขย่าหรือสั่น (Vibration) และการบ่ม (Curing) ล้วนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของคอนกรีตเกี่ยวเนื่องกับสภาพทางกายภาพของคอนกรีตภายใต้สภาวะหรือเงื่อนไขบางอย่าง

ได้แก่ความชื้นเหลว (Consistency) ของคอนกรีตสดความสามารถเทได้ (Workability) การก่อตัว (Setting) การแข็งตัว (Hardening) ความหนาแน่น (Density) หรือความพรุน (Porosity) ความทนทาน (Soundness) และการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงหรืออุณหภูมิเช่นการคืบ (Creep) และการหดตัว ดังนั้นคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตจึงเป็นผลโดยตรงต่อความสามารถใช้งานของคอนกรีตทั้งการต้านทานแรงและความทนทานอย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับคุณสมบัติทางกลหรือกลสมบัติ (Mechanical properties) ดังจะกล่าวในลำดับต่อไป

คอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะตามต้องการและเหมาะสมกับงาน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบประการหนึ่งของคอนกรีต คือเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น ไม้ อิฐ หรือเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 คอนกรีตเกิดจากการผสมซีเมนต์ และน้ำ ซึ่งทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นวัสดุประสาน รวมเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ กับทราย หิน หรือกรวด ที่เป็นวัสดุผสมหรือมวลรวม ส่วนผสมทั้งหมดจะแข็งตัวภายใน 24 ชั่วโมง และจะสามารถทนแรงอัดได้ดีขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุครบเท่าที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างเพื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน คอนกรีตโดยทั่วไปจะมีปริมาณของซีเมนต์เพสต์อยู่ประมาณร้อยละ 25-40 ซึ่งแยกออกเป็นปริมาณของซีเมนต์ร้อยละ 7-15 น้ำร้อยละ 14-21 และฟองอากาศแทรกอยู่ในช่องว่างประมาณร้อยละ 0.5-3 ที่เหลือจะเป็นปริมาณของวัสดุผสม (วินิต ช่อวิเชียร, 2544) สมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับคุณภาพของซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำและซีเมนต์ ซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่เสริมช่องว่างระหว่างวัสดุผสมหล่อลื่นคอนกรีตสดในขณะทำงานให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัวและป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ในขณะที่วัสดุผสมมีหน้าที่เป็นตัวแทรกประสานอยู่ในซีเมนต์เพสต์เนื่องจากมีราคาถูกและช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง (ชัชวาลย์ เศรษฐบุต, 2538)

ตารางที่ 2.1 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของคอนกรีต (ชัชวาลย์ เศรษฐบุต, 2540)

ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
1. สามารถหล่อขึ้นรูปร่างตามความต้องการได้ 2. ราคาถูก 3. มีความทนทานสูง 4. ทนไฟได้ดี และไม่ไหม้ไฟ 5. สามารถเทหล่อได้ในสภาพที่ก่อสร้าง	1. ความสามารถรับแรงดึงต่ำ 2. มีความยึดตัวต่ำ 3. มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร 4. อัตราการกัด่อน้ำหนักต่ำ

2.2 คอนกรีตที่ใช้เป็นโครงสร้างอาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ คือ

2.2.1 คอนกรีตล้วน (Plain Concrete) คือ คอนกรีตอย่างเดียวล้วนๆ ไม่มีวัสดุอื่นมาเสริมหรือประกอบเลย ได้แก่ โครงสร้างที่มีแต่แรงอัด เช่น ฐานเครื่องจักรที่หนาหลายๆ

2.2.2 คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) ใช้เหล็กเส้นเสริมร่วมกับคอนกรีตโดยหล่ออยู่ในเนื้อคอนกรีต เป็นโครงสร้างที่มีทั้งแรงอัดและแรงดึง เนื่องจากคอนกรีตมีคุณสมบัติต้านแรงอัดได้ดีมาก แต่มีข้อด้อยในการรับแรงดึง แต่เหล็กมีคุณสมบัติในการต้านทานแรงอัดและแรงดึงได้ดี ประกอบกับเหล็กและคอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวใกล้เคียงกัน

2.2.3 คอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete) เป็นคอนกรีตที่ถูกอัดแรงไว้ก่อนใช้งาน ทำโดยดึงเหล็กที่ทนแรงดึงสูงให้ยืดออก แล้วตัดเหล็กปล่อยให้เหล็กที่พยายามหดตัวจากการยืดกลับคืนสู่สภาพเดิมแล้วอัดคอนกรีต(วินิต ช่อวีเชียร, 2544)

2.3 วัสดุใหม่สำหรับงานคอนกรีต

ความเจริญก้าวหน้าด้านการศึกษาวัสดุศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีต ได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วในศตวรรษนี้ โดยมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตประเภทอื่นๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือ ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นที่สำคัญยิ่งกว่านั้นคือ ต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทาน รวมทั้งต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีราคาเหมาะสมด้วย โดยมีการนำวัสดุอื่นๆ มาผสมวัสดุที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ

2.3.1 กรรมวิธีการผลิต

2.3.1.1 Pulverized Fuel Ash (PFA) มีลักษณะเป็นของแข็งเม็ดกลมมีความละเอียด ซึ่งลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินที่บดละเอียดในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และจะถูกจับด้วยเครื่องดักจับ หลังจากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังถังเก็บถ่านหินที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงประกอบด้วยสารประกอบคาร์บอนและแร่ธาตุอื่นๆ เช่น ดินดาน ดินเหนียว ซัลไฟด์และคาร์บอนเนต เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูง ในเตาเผาคุณสมบัติของสารประกอบต่างๆ ในถ่านหินจะเปลี่ยนแปลงไปทั้งด้านกายภาพและด้านเคมีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเตาเผา รวมทั้งการทำให้เย็น PFA ที่ได้จากการเผานี้ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกา และอะลูมินา

2.3.1.2 Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)เกิดจากกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมสแลคซ์ (Slag) โดย GGBS ที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการหลอมเหลวตัวของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูนกับซิลิกอนและอะลูมินาจากแท่งเหล็กและถ่านหิน สำหรับคุณภาพของเหล็กที่ได้จะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเหล็กและองค์ประกอบทางเคมีของสแลคซ์ (Slag) ดังนั้นในการควบคุมคุณภาพของเหล็กที่หลอมด้วยเตาหลอมสแลคซ์ จะทำการตรวจสอบ

คุณสมบัติทางเคมีของสแลค (Slag) อยู่ตลอดเวลา เพื่อทำการปรับปรุงสัดส่วนของวัตถุดิบและสภาพการทำงานของเตาเผาผลึก (Slag) ที่หลอมลอยอยู่ด้านบนของเบ้าหลอม จะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการเทลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดทันที ผลคือสแลค (Slag) ส่วนใหญ่จะกลายเป็นเม็ดแก้วกลมที่มีองค์ประกอบทางเคมีค่อนข้างแน่นอน หลังจากนั้นจะผ่านกระบวนการระเหยน้ำออก และทำการบดเช่นเดียวกับการบดปูนซีเมนต์ โดยไม่มีการเติมวัสดุอื่นเข้าไป สุดท้ายจะทำการตรวจสอบคุณภาพเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี

2.3.1.3 ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) หรือ ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed Silica Fume) เป็นของเหลวจากกระบวนการผลิตซิลิกอนเมทัล (Silicon Metal) หรือเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ (Ferrosilicon Alloy) โดยการนำเอาวัตถุดิบ ได้แก่ หินควอร์ต ถ่านและเหล็ก หลอมรวมกันในอัตราที่กำหนด เมื่อวัตถุดิบนี้ได้รับความร้อนเกิดการหลอมตัวจะเกิดเป็นไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์ลอยตัวขึ้นไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์เหล่านี้จะถูกดักจับไว้และทำให้เย็นตัวลงได้เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากของซิลิกาที่มีลักษณะไม่เป็นผลึก โดยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเม็ดปูนซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า หลังจากนั้นซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) หรือ ไมโครซิลิกา จะถูกส่งไปบรรจุในไซโลและแยกใส่ถุงออกจำหน่าย คุณสมบัติของไมโครซิลิกา (Microsilica) ในแหล่งเดียวกันจะมีการผันแปรด้านองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก เพราะวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตซิลิกอน (Silicon) หรือเฟอร์โรซิลิกอน (Ferrosilicon) ค่อนข้างมีความบริสุทธิ์มาก

เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่มีขนาดเล็กมาก ๆ จึงมีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกทำให้ซิลิกาฟุ้งเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมากสำหรับปัญหาของซิลิกาฟุ้งที่พบบ่อย คือ เมื่อใช้ในคอนกรีตคือต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิมสาเหตุเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ๆ ของซิลิกาฟุ้งจึงมีการใช้น้ำที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้าโรงงานซิลิกอนเมทัล (Silicon Metal) และเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ (Ferrosilicon Alloy) จะมีผลพลอยได้ของซิลิกาฟุ้งร้อยละ 75 หรือมากกว่าจะประกอบด้วยซิลิกอนกว่าร้อยละ 85 ถึง 95 ที่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกซึ่งพร้อมจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานส่วนในโรงงานของเฟอร์โรซิลิกอน Ferrosilicon จะมีผลพลอยได้ของซิลิกอนประมาณร้อยละ 50 และพบว่าซิลิกาที่มีอยู่จะน้อยและเป็นผลึกค่อนข้างมากซึ่งส่งผลให้การใช้ซิลิกาฟุ้งเหล่านี้ในคอนกรีตไม่ดีนักเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำ (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555: ออนไลน์)

การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ นอกจากจะได้ประโยชน์โดยตรงคือ การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ได้ดีขึ้นแล้ว ยังได้ประโยชน์ทางอ้อม คือ เป็นการนำของเสีย (Waste) มาใช้ ซึ่งช่วยลดปัญหามลภาวะด้วย (ปูนซีเมนต์นครหลวง, 2516)

2.3.2 ประโยชน์และการใช้งานวัสดุใหม่สำหรับงานคอนกรีต

2.3.2.1 Pulverized Fuel Ash (PFA) ประโยชน์ที่ได้จากการใช้ Pulverized Fuel Ash (PFA) เป็นส่วนผสมคอนกรีตมีดังนี้

- 1) ใช้ปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตไหลซึมเข้าแบบได้ดีเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของ PFA ซึ่งมีลักษณะรูปร่างกลม
- 2) ลดแนวโน้มการแยกตัวของคอนกรีตสด และลดการเยิ้ม
- 3) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้า ทำให้ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ซึ่งจะลดโอกาสการแตกร้าวของคอนกรีต โดยเฉพาะโครงสร้างขนาดใหญ่
- 4) กำลังอัดคอนกรีต โดยจะเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน
- 5) ความทนทานของคอนกรีตโดยจะเพิ่มความทนทานของคอนกรีตด้วยเหตุผล 2

ประการคือ

- ปริมาณน้ำที่ใช้ลดลงเมื่อต้องการควบคุมความสามารถเทได้เท่ากัน
- ปฏิกิริยาระหว่าง Pulverized Fuel Ash (PFA) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลงการใช้งาน PFA ทำได้ 2 ลักษณะ ดังนี้

- 1) การผสม Pulverized Fuel Ash (PFA) กับซีเมนต์ในปริมาณที่ต้องการจากโรงงานผสม
- 2) ใช้ PFA เสมือนเป็นส่วนผสมอีกส่วนหนึ่งของคอนกรีต โดยผสม ณ โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จปริมาณที่ใช้จะอยู่ในช่วงร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

2.3.2.2 Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS) ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ GGBS เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมีดังนี้

- 1) ปฏิกิริยาของคอนกรีตที่ผสมด้วยสแลกซ์ (Slag) เข้ากับคอนกรีตส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดำกว่าคอนกรีตทั่วไปทำให้เหมาะที่จะใช้ในงานโครงสร้างที่มีปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากความร้อนจากฐานของคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น
- 2) คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟต น้ำทะเลและสารเคมีได้ดี
- 3) ลดปฏิกิริยา Alkali-Aggregate Reaction ในคอนกรีตที่ใช้หินทำปฏิกิริยากัน

ในปูน

4) ทำให้คอนกรีตเนื้อแน่น มีความต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดี ทำให้เหมาะที่จะใช้งาน สระว่ายน้ำ ถังเก็บน้ำ เป็นต้น

5) เพิ่มกำลังอัดและกำลังดัด คอนกรีตมีอายุมากกว่า 28 วัน

การใช้งาน GGBS ทำได้ 2 ลักษณะเช่นเดียวกับ PFA โดยปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วงร้อยละ 25-65 แต่สำหรับ Supersulphate ซีเมนต์จะผสม Slag สูงถึงร้อยละ 85

ข้อดีการใช้ GGBS

เวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมด้วย GGBS จะช้ากว่าคอนกรีตทั่วไป กำลังอัดในช่วงต้นจะพัฒนาช้าและการบ่มจะมีผลอย่างมากเช่นเดียวกับคอนกรีต

2.3.2.3 Microsilica (MS) หรือ Silica Fume ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้ Microsilica มีดังนี้

- 1) ลดการเยิ้ม และการแยกตัวของคอนกรีตสด
- 2) เพิ่มกำลังอัด ของคอนกรีตทั้งในระยะสั้นและระยะยาว
- 3) เพิ่มความหนาแน่นมากทำให้มีความทนทานสูงการซึมผ่านของน้ำและอากาศการใช้งาน Microsilica ในทางปฏิบัติเราสามารถใส่ Microsilica ผสมคอนกรีตได้ 2 ลักษณะคือ

- 1) ใช้ Microsilica ในลักษณะที่เป็นของแข็ง ผสมไปในคอนกรีตลักษณะเดียวกับปูนซีเมนต์

- 2) ใช้ Microsilica ในลักษณะที่เป็นของเหลว เหมือนน้ำยาผสมคอนกรีตทั่วไป ปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วงร้อยละ 7-10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

ข้อดีถึงในการใช้ Microsilica

- 1) คอนกรีตที่ผสม Microsilica ความสามารถเทได้จะลดลงอย่างมาก จึงจำเป็นต้องใช้น้ำยาประเภทลดน้ำจำนวนมาก ผสมเพื่อเพิ่มค่ายุบตัว

- 2) คอนกรีตสดที่ผสม Microsilica มีแนวโน้มจะเกิดการหดตัว (Plastic Shrinkage) มากกว่าคอนกรีตปกติ ดังนั้นจึงควรหาวิธีป้องกัน

2.4 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่า สารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นไม่นาน ในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ ปฏิกริยาเคมีเกิดขึ้นโดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลักโดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุก่อสร้างต่างๆ จะทำให้ได้วัสดุประสานที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ถึงร้อยละ 100 และในอนาคตข้างหน้าคาดว่าจะวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างต่างๆ (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550)

จีโอโพลิเมอร์ เป็นสารเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ โดยใช้หลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si:Al ของสารตั้งต้นโครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์แสดงได้ดังนี้



โดย M คือ ธาตุอัลคาไลน์

– คือ การยึดเกาะพันธะ

Z คือ จำนวนโมเลกุล

n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

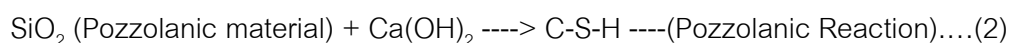
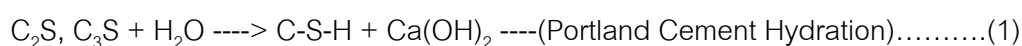
สารปอซโซลานที่เริ่มใช้กันอีกประเภทหนึ่ง ได้แก่ ดินขาวเผา ซึ่งประกอบด้วยซิลิกา และอะลูมินา คุณสมบัติในการเผาดินขาวขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเผา แต่ควรอยู่ในช่วง 500–600 องศาเซลเซียส

สารปอซโซลานโดยทั่วไปเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาไดออกไซด์ (Al_2O_3) มีคุณสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อ

บดจนละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้นแล้วจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน วัสดุปอซโซลานที่นำไปใช้ประโยชน์มีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ ปอซโซลานจากธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และปอซโซลานจากกระบวนการผลิต (Artificial Pozzolan)

สารปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Portland Cement Hydration vs Geopolymerization) ลักษณะโครงสร้างของ Hydration ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอโพลิเมอร์นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือ โครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีตและซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (1) และ ปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน (2)



โดยเมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2)) มาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น (CSH) จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น

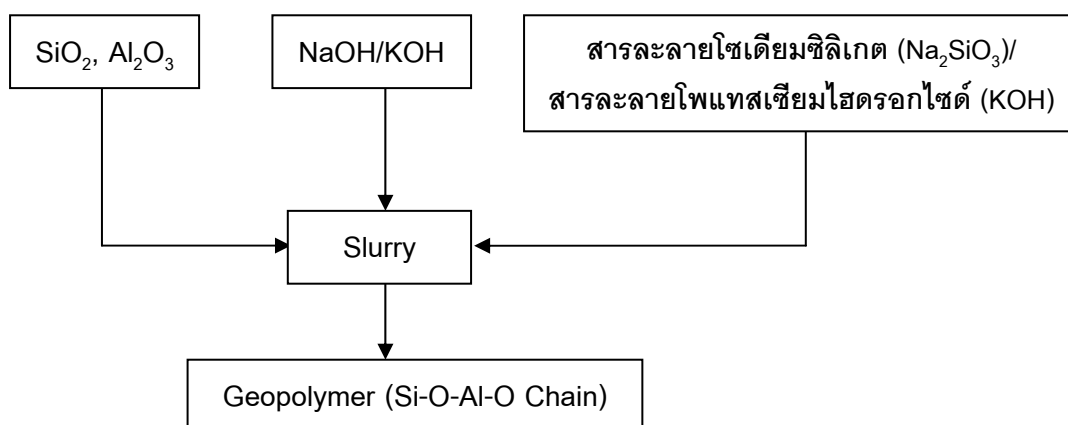
จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุตั้งต้นและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกันโดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของซิลิเกต (Si), อะลูมินา (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain ขึ้นซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วยแสดงดังภาพที่ 2.1

สังเกตได้ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะต้องใช้ความร้อนในการเร่งการเกิดปฏิกิริยา Geopolymerization ซึ่งในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์สามารถวิจัยค้นคว้าในการผสมวัสดุจีโอโพลิเมอร์ให้สามารถทำ

ปฏิกิริยาสมบรูณ์ได้ในอุณหภูมิปกติ (Ambient Temperature) โดยไม่ต้องใช้ความร้อนในการช่วยเร่งปฏิกิริยาอีกต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุต่างๆ ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปฏิกิริยาการเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymerization) แสดงตารางที่ 2.2 และแสดงดังภาพที่ 2.2

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement Mortar) เปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (Geopolymer Mortar) พบว่าลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (Geopolymer Mortar) จะมีลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement Mortar) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่จับตัวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นก้อน (Granular) และไม่มีวามแน่นในการอัดตัวกันแสดงดังภาพที่ 2.3 และ 2.4

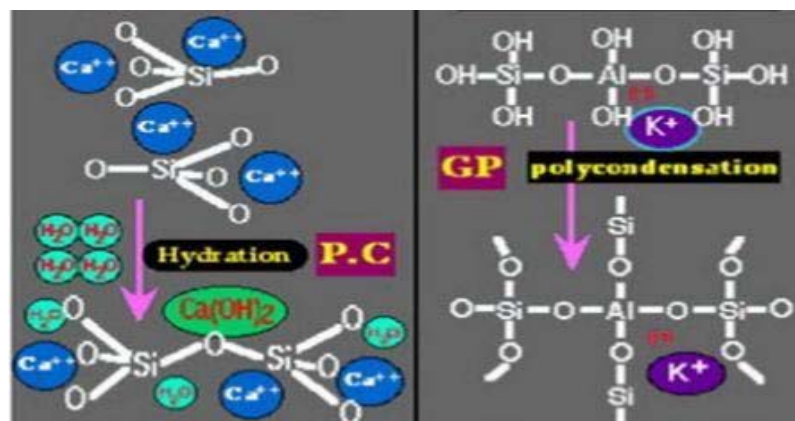


ภาพที่ 2.1 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์หรือGeopolymerization

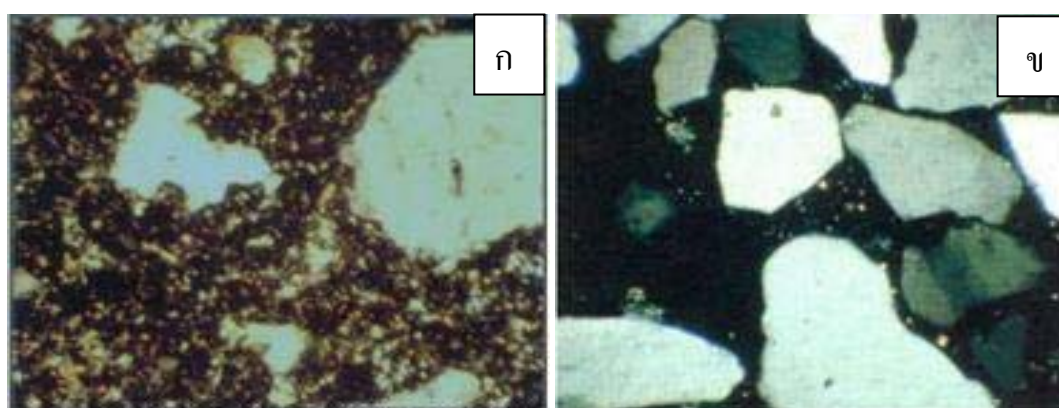
(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550: ออนไลน์)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุต่างๆ (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550: ออนไลน์)

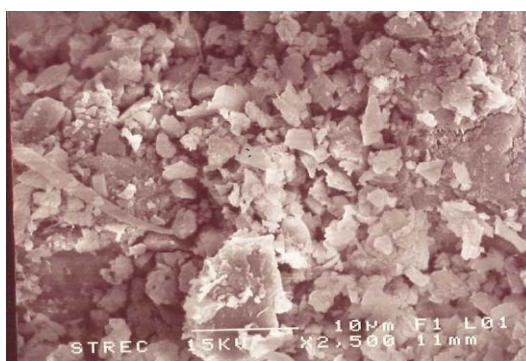
องค์ประกอบทางเคมี	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ร้อยละ)	เถ้าถ่านหิน (ร้อยละ)	แกลบ (ร้อยละ)	ปูนขาว (ร้อยละ)
SiO_2	21.70	42.58	76.19	52.86
Al_2O_3	5.04	24.79	0.89	42.79
Fe_2O_3	3.43	10.72	0.74	0.50
CaO	64.64	12.47	1.82	0.03



ภาพที่ 2.2 เปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปฏิกิริยาการเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550: ออนไลน์)



ภาพที่ 2.3 ภาพขยายขนาดไมโครของ (ก) มอร์ต้าร์ซีเมนต์ และ (ข) จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550: ออนไลน์)

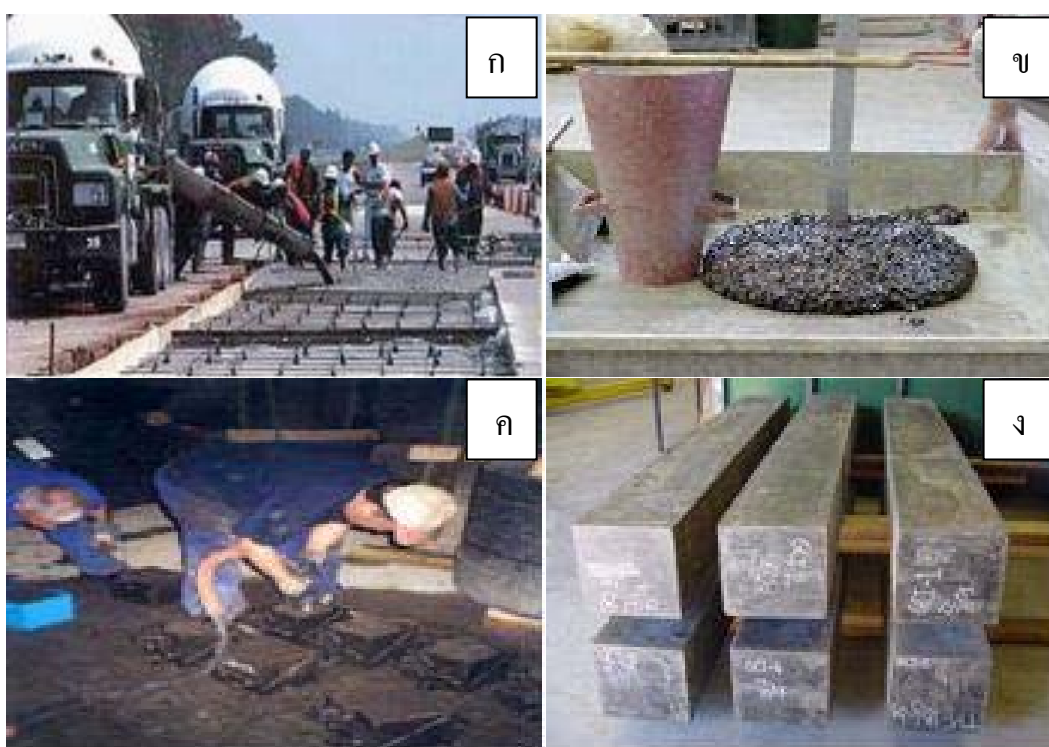


ภาพที่ 2.4 ซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีของเสียซิลิกา (ณัฐพล เศรษฐอิพาร, 2553)

2.4.1 ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Products)

Geopolymer Technology สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การนำไปใช้ในงานก่อสร้างหรืองานคอนกรีตและมอร์ตาร์ งานตกแต่งตลอดจนงานอุตสาหกรรมไฟฟ้าเครื่องปั้นซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านนี้เริ่มนำมาใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศแล้ว

- งานคอนกรีตและมอร์ตาร์ซ่อมผิวทางหรือซ่อมโครงสร้างต่างๆ เนื่องจากวัสดุ Geopolymer บางตัวสามารถให้กำลังอัดได้ในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งสามารถใช้งานได้ภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมง ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (ก) วัสดุทดแทนพื้นคอนกรีต (ข) วัสดุเพื่อการตกแต่ง (ค) วัสดุซ่อมผิวทาง และ (ง) วัสดุโครงสร้างต่างๆ (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550: ออนไลน์)

- การนำไปใช้ในงานอื่นๆ เช่น การทำอิฐทนไฟ การทำวัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงามการนำไปใช้กับอุตสาหกรรมเครื่องปั้น และอุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 2.6 อิฐทนไฟซึ่งทำมาจาก metakaolin-geopolymer ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์
(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550:ออนไลน์)



ภาพที่ 2.7 การประยุกต์ใช้ในการทำฟิวส์ไฟฟ้าผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์
(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550: ออนไลน์)



ภาพที่ 2.8 วัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงามผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์
(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550: ออนไลน์)

2.4.2 คุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

2.4.2.1 ด้านการศึกษาวัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี วัสดุชนิดนี้มีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลิไซอะเลต (Polysialate) ที่ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้สารประกอบอะลูมิเนียมในซิลิเกต $[\text{Si-OAl-O}]$ จากสูตร



โดย M คือ ธาตุอัลคาไลด์

Z คือ จำนวนโมเลกุล

N คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่

W คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

ถ้า Z มีค่าเป็น 1 จะเรียกว่า โพลิไซอะเลต

ถ้า Z มีค่าเป็น 2 จะเรียกว่า โพลิไซอะเลตไฮดรอกซิ (PSS)

ถ้า Z มีค่าเป็น 3 จะเรียกว่า โพลิไซอะเลตไดไฮดรอกซิ (PSDS)

โดยอัตราส่วนอะตอมของ Si : Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของ
การใช้งานวัสดุนั้น เช่น อัตราส่วน 1, 2 และ 3 ทำให้ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นสามมิติหรืออัตราส่วน

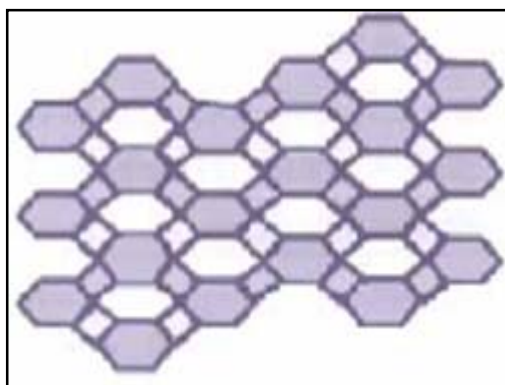
15 หรือมากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 2.9-2.11 จะทำให้ได้สารประกอบโพลิเมอร์มากขึ้นตัวอย่าง คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนต่างๆ เป็นดังนี้

อัตราส่วน 2:1 เหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต

อัตราส่วน 3:1 สารประกอบไฟเบอร์กลาสและวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททาเนียม ที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 200–1,000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วน 20:1–35:1 ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ในของ มิติ (Fiber Composites)

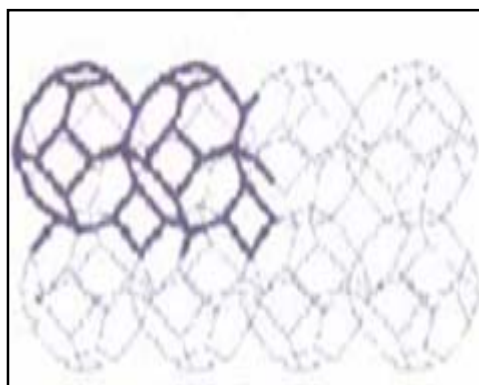
อุณหภูมิในการผสมและวิธีการบ่มจะมีผลต่อคุณสมบัติของไฟเบอร์ที่ได้ สำหรับ ประเภทคาร์บอนจะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิห้อง 80-180 องศาเซลเซียส สำหรับประเภทเหล็กจะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 750 องศาเซลเซียส และบ่มที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ส่วนประเภทซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) จะทำการผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิ 80 - 1800 องศาเซลเซียส



Potasium-Poly (isolate-siloxo)

Leucite Framework

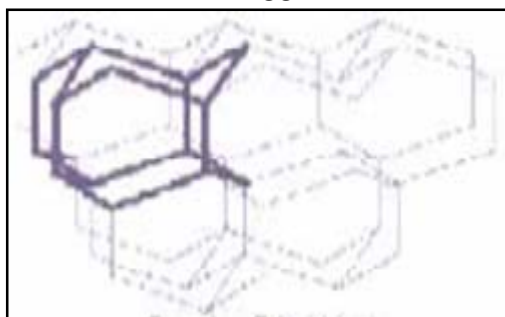
K-PSS



Sodium-Poly (isolate)

Sodolite Framework

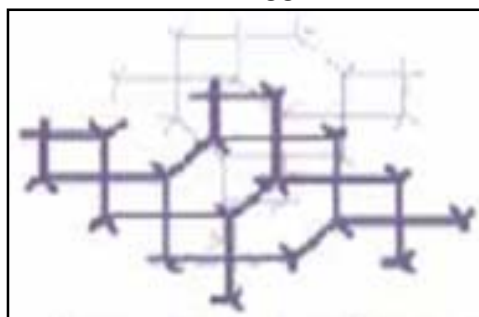
Na-PSS



Potasium-Poly (isolate)

Kalsilite Framework

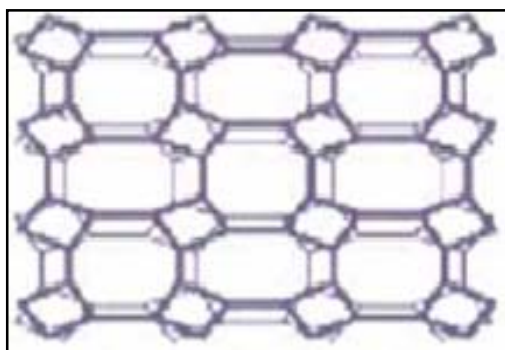
K-PS



Calcium, Potasium-Poly (isolate-siloxo)

Sodolite Framework

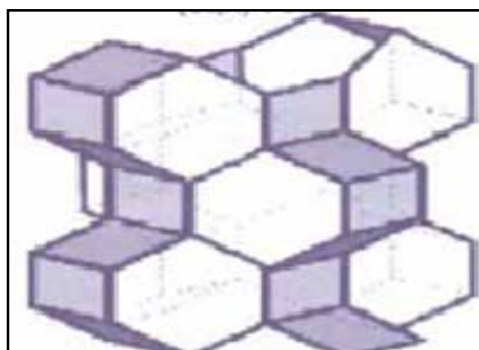
Na-PS



Potasium-Poly (isolate-disiloxo)

Sonidine Framework

K-PSDS



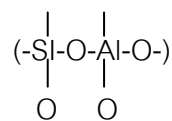
Sodium, Potasium-Poly (isolate-siloxo)

Philipsite Framework

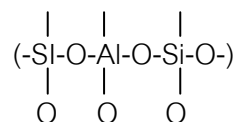
(Na,K)-PSS

ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2549)

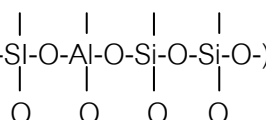
Si : Al = 1 โพลีไฮดรอกไซด์



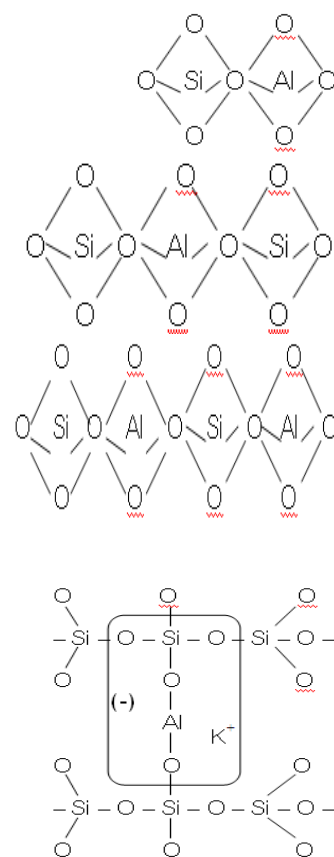
Si : Al = 2 โพลีไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์



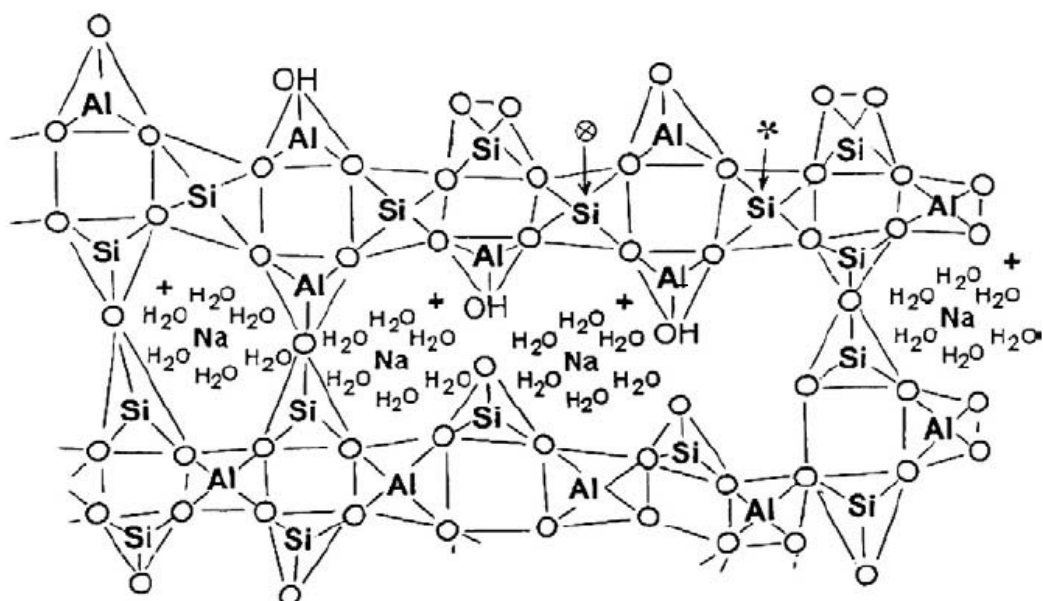
Si : Al = 3 โพลีไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ $(-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-)$



Si : Al > 3 ไฮดรอกไซด์เชื่อมขวางกัน



ภาพที่ 2.10 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไฮดรอกไซด์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2549)



ภาพที่ 2.11 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของไฮเดียมโพลีไฮดรอกไซด์ (Jumrat และคณะ, 2010)

งานวิจัยด้านจีโอโพลิเมอร์ปัจจุบันได้มีการนำเอาวัสดุต่างมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ โดยมีส่วนธาตุซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุต่างๆ ในงานจีโอโพลิเมอร์

Type	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
PCC-fly ash*	39.50	21.20	15.60	19.70	1.30	2.70	0.80
FBC-fly ash*	21.00	8.00	6.90	42.20	0.80	15.00	1.00
RHBA**	84.75	0.16	-	2.78	-	0.60	3.72
FA***	51.50	23.63	15.30	1.74	1.20	0.28	1.78
BFS ****	41.10	10.70	0.41	43.50	7.60	-	0.31
Kaolin****	65.20	32.00	0.51	<0.03	0.17	-	12.71
MSWI waste ****	26.80	12.00	2.15	44.70	3.49	-	24.18

ที่มา: * PCC-fly ash (Fluidized bed combustion) และ FBC-fly ash (Pulverized coal combustion) จากงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ, 2011

** RHBA (Rice husk and bark ash) จากงานวิจัยของ Songpiriyakil และคณะ, 2010

*** FA (Flt ash) จากงานวิจัยของ Temuujin และคณะ, 2010

**** BFS (Blast furnace slag) Kaolin และ MSWI waste (Municipal solid waste incineration) จากงานวิจัยของ Luna Galiano และคณะ, 2011

2.4.2.2 ด้านอุตสาหกรรม

วัสดุจีโอโพลิเมอร์สามารถผลิตได้ง่ายที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิบ่มที่ต่ำ โดยสามารถผลิตวัสดุประเภทนี้ได้จากสารประกอบที่มีซิลิกาหรือทั้งซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถละลายได้ในสารละลายอัลคาไลน์ จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิต่ำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จะให้กำลังรับแรงอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้นเช่นเดียวกับการผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์วัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์จะมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ คือ สามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง และให้ค่ากำลังอัดที่เป็นที่ยอมรับได้ในระยะเวลาอันสั้น ในบางกรณีพบว่า วัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้าง งานขนส่ง และงานโครงสร้างขนาดใหญ่ได้โดยให้คุณสมบัติที่ดี เช่นประสิทธิภาพด้านเชิงกลที่สูง ผิวหน้าที่แข็งมีความทนทานเป็นดีเยี่ยมและมี

ความทนทานต่อกรดสูง ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์สามารถทดแทนวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐ พื้น เซรามิกส์ และซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ยังสามารถทนความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และทนต่อ เปลวไฟได้ถึง 50 กิโลวัตต์/ตารางเมตร โดยไม่มีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ไม่เกิดควัน เมื่อได้รับฟลักซ์ทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเหมือน โพลิเมอร์อินทรีย์ ดังนั้นวัสดุจีโอโพลิเมอร์จึงมีศักยภาพในการทำงานทางอุตสาหกรรมยานยนต์ได้

2.4.2.3 ด้านเศรษฐศาสตร์และสังคม

1) การปรับปรุงสภาพของเสียที่เป็นพิษ การตรึง (Immobilisation) ของเสียที่มีพิษ ด้วยการผสมของเสียดังกล่าวในวัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ (Zeolite) หรือเฟลด์สปา ทรอยด์ (Feldspathoids) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับของเสียทางเคมีได้ดี หรือทำของเสียเป็นก้อน (Solidify) ของเสียทางเคมีประเภทนี้ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักและกากของเสียนิวเคลียร์ วัสดุ จีโอโพลิเมอร์จะมีโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถตรึงของเสียที่มีพิษไว้ไม่ให้ชะละลายออกมาสู่ สิ่งแวดล้อมได้โดยของเสียที่มีพิษจะถูกกักเก็บไว้อย่างแน่นหนาภายในโครงสร้างสามมิติของวัสดุ จีโอโพลิเมอร์ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบการสังเคราะห์สังเคราะห์ซีโอไลต์และปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีโอไลต์และปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2549)

	การสังเคราะห์ซีโอไลต์	ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์
สารตั้งต้น	สารละลายเชิงซ้อน Al + สารละลายเชิงซ้อน Si	วัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ+ สารละลายอัลคาไลน์ + ซิลิกาเกต (ในรูปของแข็งหรือของเหลว)
ปฏิกิริยาช่วงเริ่มต้น	การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ในสารละลาย	การชะของแข็งที่ Al-Si เป็น ส่วนประกอบออกมาสู่เฟส
ปฏิกิริยาช่วงปลาย	การโตขึ้นของผลึกใน สารละลาย	การแพร่และควบแน่นของสาร เชิงซ้อน Al และ Si ที่ชะออกมาใน เฟส
อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา	90 – 300 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส)
ช่วงความเป็นกรด – เบส	6 – 11	14
ผลิตภัณฑ์	ซีโอไลต์ที่เป็นผลึก	ของผสมของเจลและวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
องค์ประกอบทางเคมี	มีสูตรโครงสร้างที่แน่นอน	มีสูตรโครงสร้างที่ไม่แน่นอน
โครงสร้าง	ผลึกที่มีเอกลักษณ์ เฉพาะตัว (Unique Crystal)	ของผสมของเฟตเจลแบบอสัณฐาน และกึ่งอสัณฐาน และวัสดุที่มี Al-Si เป็นส่วนประกอบ
ความแข็งแรงเชิงกล	ต่ำ	สูง

2) ปรากฏการณ์โลกร้อนและการประหยัดพลังงาน ในปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์ทุกๆ ชนิดจะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สู่บรรยากาศหนึ่งต้นเช่นกัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อนแต่สำหรับวัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถลดปัญหาโลกร้อนได้ เนื่องจากการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องใช้ความร้อนที่สูง ในการปรับสภาพหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์และสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุดิบสามารถหาได้ทั่วไป ซึ่งเป็นการนำไปสู่การลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศได้เป็นอย่างดี(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550)

3) เศรษฐศาสตร์ การผลิตวัสดุอีโพลิเมอร์จะใช้ต้นทุนที่ต่ำ เนื่องจากจะใช้ของเสียที่ได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ให้คุณสมบัติทางด้านกำลังที่สูงในระยะเวลาอันสั้น แม้ว่าวัสดุอีโพลิเมอร์จะต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดอย่างสมบูรณ์ แต่อุณหภูมิที่ใช้จะไม่สูงนัก คือ ที่ประมาณ 45–90 องศาเซลเซียส สำหรับการผลิตวัสดุอีโพลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ หรือวัสดุขึ้นส่วนก่อสร้าง สามารถใช้ผลิตเหมือนคอนกรีตสำเร็จได้ ซึ่งเหมาะสมกับงานที่ต้องการค่ากำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าคอนกรีตหล่อสำเร็จเป็นที่ต้องการของตลาดมาก เนื่องมาจากความสะดวกและรวดเร็วในการทำงาน ดังนั้นวัสดุอีโพลิเมอร์จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับงานคอนกรีต ซึ่งสามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2549)

2.5 กำลังอัดของคอนกรีต

คุณสมบัติของคอนกรีตในขณะที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญเพียงขณะก่อสร้างเท่านั้น ในขณะที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งาน โครงสร้างของคอนกรีตนั้นอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติคุณสมบัติของคอนกรีตใน 2 ลักษณะ จะมีผลต่อกันและกัน การที่จะให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดี จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลวมีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน

2.5.1 กำลังของมอร์ตาร์

กำลังของมอร์ตาร์มีบทบาทอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยกำลังของมอร์ตาร์นี้ขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ตาร์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของมอร์ตาร์และความพรุนจะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า กำลังของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละปริมาณ กำลัง ลักษณะผิว ขนาดพื้นที่ผิว การดูดซึม และแร่ธาตุต่างๆ จะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแต่ไม่มาก

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัด โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

2.5.2 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

สำหรับกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่กำหนดให้ความสามารถด้านแรงของคอนกรีตขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของหินและแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ตาร์ แต่โดยทั่วไปกำลังรับแรงอัดของมวลรวมจะสูงเป็นหลายเท่าของกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้หินขนาดใหญ่ขึ้น เพราะหินขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำได้หินมากขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ตาร์ลดลง

ขนาดของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีสัดส่วนน้ำของคอนกรีตต่อซีเมนต์ต่ำ หรือปานกลางมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง

การเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลังรับแรงอัด รวมทั้งถ้าใช้หินที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น

2.5.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ตาร์

แรงยึดเหนี่ยวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่างลักษณะผิวของมวลรวมและลักษณะทางเคมี คือ ปฏิกริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่างๆ ในเนื้อมวลรวม

นอกจากนี้ทิศทางการหล่อและทิศทางการให้น้ำหนักจะมีผลต่อกำลังเช่นกัน โดยจะมีผลต่อกำลังดึงมากกว่ากำลังรับแรงรับแรงอัดด้วยสาเหตุที่ว่าจะเกิดช่องว่างทำแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ตาร์ต่ำลง

2.6 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ หมายถึง สารประกอบอย่างหนึ่งที่มีลักษณะเป็นผงที่บดละเอียดซึ่งเมื่อได้ผสมกับน้ำตามอัตราส่วนที่พอดีแล้วทิ้งไว้ระยะหนึ่งจะแข็งตัว โดยมนุษย์ในสมัยโบราณได้ค้นพบว่าเมื่อเอาหินบางชนิดมาทำการเผาจนกลายเป็นผงแล้วบดให้ละเอียดแล้วนำมาผสมน้ำทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่ง ก็จะได้ผลผลิตที่แข็งเป็นก้อน เป็นรูปร่างตามต้องการ ในปัจจุบันปูนซีเมนต์ทำจากวัตถุดิบที่มีธาตุอะลูมินัม หรือซิลิกา ซึ่งได้แก่ ดินดำ ดินขาว หรือ ศิลาแลง ซึ่งมีธาตุหลักมาผสมเข้าด้วยกัน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ หินปูนหรือดินปูนขาวกับดินเหนียวหรือดินดานจนรวมตัวกันจนสุกพอดีมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ แคลเซียมและอะลูมิเนียมซิลิเกต ปูนขาวซีเมนต์ที่กล่าวนี้หมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(Portland

Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่ผสมกับน้ำตามส่วนและสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างร่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงทนทาน เมื่อแข็งตัวแล้วขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นในขณะเริ่มแข็งตัว

ปูนซีเมนต์เรียกในทางวิชาการว่า “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์”(Portland Cement) ได้มาจากการตั้งชื่อของนายโจเซฟ แอสปติน โดยในปี ค.ศ.1824 นายโจเซฟได้ทำการจดทะเบียนลิขสิทธิ์ของวิธีการผลิตปูนซีเมนต์อย่างหนึ่งซึ่งได้จากการเผาส่วนผสมระหว่างหินปูนและดินเหนียวเมื่อนำมาบดจะได้ผงปูนซีเมนต์ หลังจากการรวมกับน้ำและตัวจะมีสีเหลืองเทาคล้ายหินในเกาะของเมืองปอร์ตแลนด์ในประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ขณะนั้นยังมีคุณภาพต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาส่วนผสมดังกล่าวใช้ความร้อนต่ำซึ่งทำให้หินปูนกับดินเหนียวยังรวมตัวกันไม่ดี (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.6.1 ชนิดของปูนซีเมนต์

2.6.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

วัตถุดิบนี้พบครั้งแรกที่เมืองปอร์ตแลนด์ ในประเทศอังกฤษ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (clay) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ก็มีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโดโลไมต์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) เป็นจำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในบ้านเราที่ใช้กันทั่วไป (ตราเสือ ตราช้าง ตรางูเห่า) ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (greenish gray) และมีน้ำหนักประมาณ 92 ปอนด์/ฟุต³ เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียมซิลิกอน อลูมิเนียม และ เหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ด ในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก

ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM150) (type-I-V) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็นประเภทใหญ่ๆ 5 ประเภท คือ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Normal Portland Cement) ใช้สำหรับลักษณะงานธรรมดาที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียว และตราเพชรเม็ดเดียว

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตที่ต้องการลดอุณหภูมิเนื่องจากสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิสูง งานคอนกรีตเหลา

หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อน คอนกรีต กำแพงดินหนาๆ หรือท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ๆ ต่อม่อ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพานาคเจ็ดเศียร

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความแข็งแรงสูงโดยเร็ว (High-Early-Strength-Portland Cement) หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ให้กำลังสูงในระยะแรกมีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา มีประโยชน์สำหรับคอนกรีตที่จะต้องใช้งานเร็ว หรือรีบแบบได้เร็ว เช่น เสริมคอนกรีต ถนน พื้น และคานที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น ปูนประเภทนี้ ได้แก่ ปูนตราเอราวัณ ตราพานาคสีแดง และตราสามเพชร

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดเกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement) สามารถลดปริมาณความร้อนเนื่องจากการรวมตัวของปูนซีเมนต์กับน้ำซึ่งจะสามารถลดการขยายตัวและหดตัวของคอนกรีตภายหลังการแข็งตัว ใช้มากในการสร้างเขื่อน เนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่างานชนิดอื่นไม่เหมาะสำหรับโครงสร้างทั่วไปเพราะแข็งตัวช้า

5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) ใช้ในบริเวณที่น้ำหรือดิน มีค่าต่ำสูง มีระยะการแข็งตัวช้า และมีการกระทำของซัลเฟตอย่างรุนแรง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม

นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ๆ อีก เช่น Portland Pozzolana Cement ซึ่งเหมาะสำหรับงานอาคารคอนกรีตในทะเล ปูนซีเมนต์ผสมซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ซิลิกา (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดากับทรายร้อยละ 25 – 30) ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเสือ ตรางูเห่าและตรานกอินทรี มีราคาถูกแข็งตัวช้า ไม่ยี้ดหรือหดตัวเหมาะกับงานก่ออิฐ ทำถนน เทพื้น ต่อม่อ หล่อท่อ เทภาชนะ คอนกรีต กระเบื้องมุงหลังคา และตึกแถว เป็นต้น

2.6.1.2 ปูนซีเมนต์ธรรมชาติ (Natural Cement)

ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ทำจากหินที่ขุดได้ในดินซึ่งมีส่วนผสมคล้ายๆ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่แล้ว โดยเอาหินที่ได้จากธรรมชาติมาเผา แต่การเผาไม่ใช้ความร้อนสูงแบบเผาทำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อเผาแล้วเอาบดเป็นผง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีคุณภาพแข็งในน้ำได้เหมือนกัน แต่มีกำลังต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากและมีส่วนผสมไม่แน่นอน เพราะแล้วแต่คุณสมบัติของหินที่ได้จากธรรมชาติ

2.6.1.3 ปูนซีเมนต์พอสโซลานา (Pozzolana Cement)

ปูนซีเมนต์พอสโซลานาบางครั้งเรียกว่า ปูนซีเมนต์แอสลิก (Slag Cement) ทำโดยเอาปูนขาว และกาก (slag) จากเตาเผาเหล็กหรือพอสโซลานาซึ่งเกิดตามธรรมชาติและพวกหิน

ภูเขาไฟมาผสมกันแล้วบดให้ละเอียด ปูนซีเมนต์ที่ชาวโรมันในสมัยโบราณใช้ก็เป็นปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ไม่แข็งเท่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่เมื่อผสมเป็นปูนก่อหรือคอนกรีตแล้วจะเหนียวดี และแตกยากกว่าปูนก่อหรือคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ได้ดีในงานที่อยู่ในน้ำเค็มและเหมาะสำหรับใช้น้ำทะเลหรือในที่ชื้นแฉะ เช่น ฐานราก ท่อน้ำ และงานใต้ดินทั่วไป

2.6.1.4 ปูนซีเมนต์อะลูมินัส (Aluminous Cement)

ปูนซีเมนต์อะลูมินัสทำขึ้นครั้งแรกในฝรั่งเศสโดยเอาบอกไซต์ (bauxite) ซึ่งเป็นแร่ที่มีอะลูมินามากและราคาแพงมาผสมกับปูนขาวแล้วเผา หลังจากนั้นนำมาบดให้ละเอียด เช่นเดียวกับการทำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังรับแรงอัดเร็ว คอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ชนิดนี้ เมื่อหล่อแล้วสามารถให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับคอนกรีตซึ่งหล่อด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3 เดือน เสริม คอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งหล่อด้วยปูนซีเมนต์ชนิดนี้อาจนำมาใช้ต่อได้ เมื่อหล่อได้เพียง 24 ชั่วโมงเท่านั้น

ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เมื่อนำไปใช้ในประเทศที่มีภูมิอากาศหนาวมากก็ใช้ได้โดยไม่ต้องป้องกันความหนาวเย็นแบบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อเอาปูนซีเมนต์ชนิดนี้ผสมน้ำจะทำให้เกิดความร้อนมาก ซึ่งเป็นการป้องกันไม่ให้คอนกรีตแข็งตัวด้วยความเย็นจัดเสียก่อน คอนกรีตซึ่งผสมด้วยปูนซีเมนต์นี้ เมื่อแข็งตัวแล้ว (ระหว่าง 4 – 6 ชั่วโมง) ต้องรดน้ำหรือคลุมให้ชื้นอยู่เสมอจนครบ 24 ชั่วโมง เพื่อชดเชยน้ำที่ระเหยไปโดยความร้อนอันเกิดขึ้นในขณะที่คอนกรีตกำลังแข็งตัว

2.6.1.5 ปูนซีเมนต์ซิลิกา (Silica Cement)

ปูนซีเมนต์ซิลิกาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งนำมาผสมกับทรายเพื่อให้ราคาถูกลง โดยบดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดเม็ดร้อยละ 70 ผสมทรายร้อยละ 30 และผสมยิปซัมลงไปด้วยเล็กน้อย อังกฤษและประเทศต่างๆ ในยุโรปส่วนมากก็ผลิตปูนซีเมนต์ชนิดนี้ขึ้นใช้กันอย่างแพร่หลาย ในประเทศที่ไม่ค่อยมีเชื้อเพลิงธรรมชาติใช้มักนิยมปูนซีเมนต์ชนิดนี้มากเพราะใช้เชื้อเพลิงในการผลิตน้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาตรฐานของปูนซีเมนต์ซิลิกาส่วนมากกำหนดส่วนต่ำสุดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งใช้ผสมไว้ร้อยละ 50 ปูนซีเมนต์ซิลิกาในประเทศไทย คือ ปูนซีเมนต์ตราเสือของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ปูนซีเมนต์ตรางูเห่า ของบริษัทชลประทานซีเมนต์ จำกัด และปูนซีเมนต์ตรานกอินทรี ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (พงศ์พันธุ์ วรสุนทรโรต, 2544)

2.6.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์

2.6.2.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

มีชื่อย่อว่า C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S เหมือนคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมงและจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในสัปดาห์แรกการเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 35-55

2.6.2.2 ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายแบบมีเพียง C_2S เท่านั้นที่อยู่ตัวที่อุณหภูมิทั่วไป C_2S มีคุณสมบัติยืดยาวเมื่อผสมน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 15-35

2.6.2.3 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set ทำได้โดยเติมยิปซัมลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A ประมาณร้อยละ 7-15

2.6.2.4 เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรท์ (C_4AF)

C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมากและก่อตัวภายในไม่กี่นาทีที่ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF ประมาณร้อยละ 5-10

โดยคุณสมบัติต่างๆ เช่น อัตราการเกิดปฏิกิริยา การพัฒนากำลังอัด กำลังปล่อยความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และคุณสมบัติอื่นๆ ของสารประกอบในปูนซีเมนต์นั้นแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์(ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (หน่วย)	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (ชั่วโมง)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด (หน่วย)	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (หน่วย)	ปานกลาง (500 จูล/กรัม)	น้อย (250 จูล/กรัม)	สูงมาก (850 จูล/กรัม)	ปานกลาง (420 จูล/กรัม)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คล้ายปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	-	ไม่คงตัวในน้ำและต้านทานซัลเฟตได้น้อย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

C_3S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็วภายใน 14 วัน

C_2S ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้ช้า ความร้อนเกิดขึ้นน้อย

C_3A ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาเริ่มแข็งตัวเกิดความร้อนสูง มีกำลังรับแรงเร็ว

C_4AF มีผลน้อย ให้ความแข็งแรงเล็กน้อยเดิมเข้าไปเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น

จำนวนสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวอาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากการปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ เป็นต้น(ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

2.6.3 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์

2.6.3.1 วัตถุดิบ

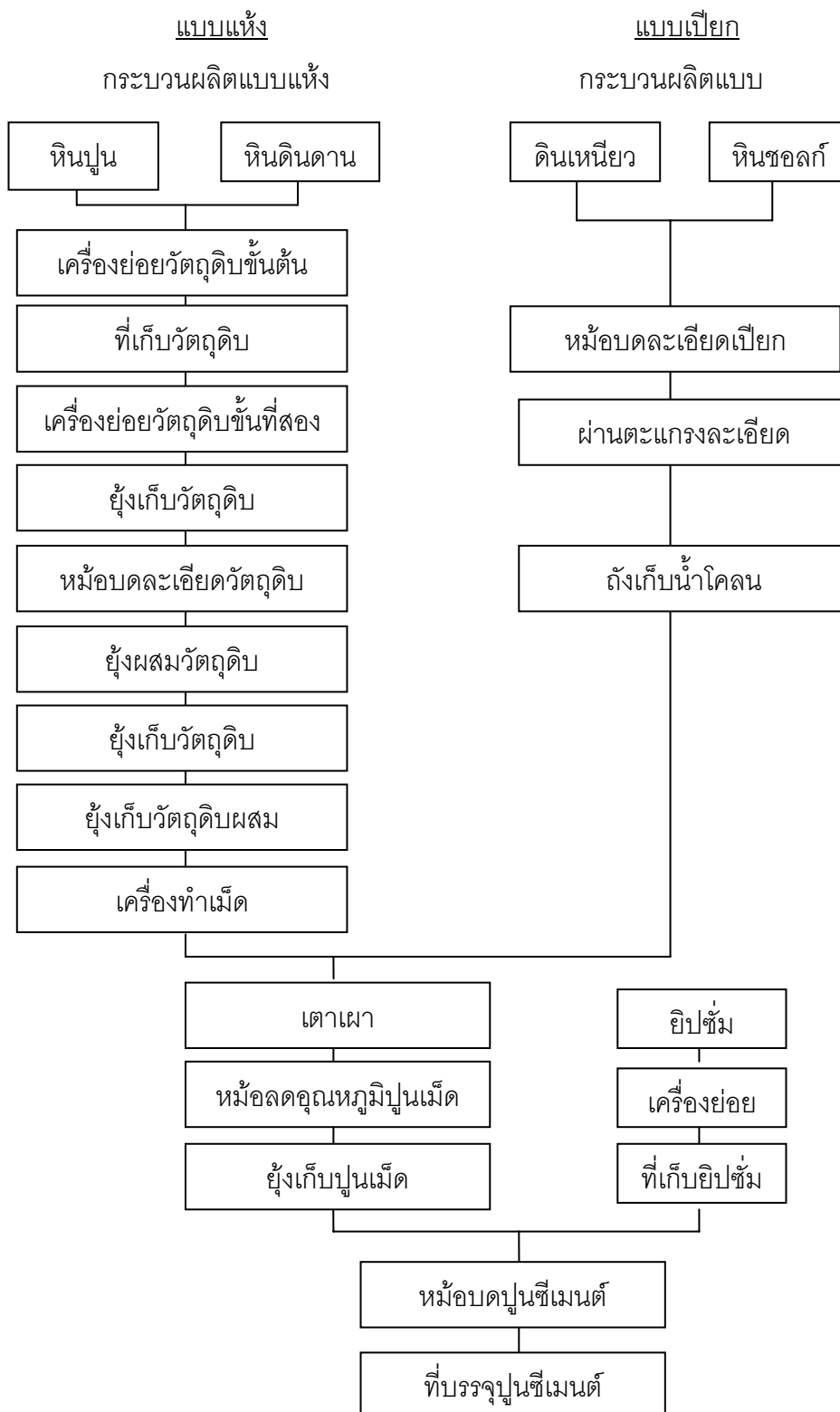
วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์นั้น ประกอบด้วยธาตุที่เป็นหลักสำคัญอยู่ 4 อย่างคือ ซิลิกอน (Silicon) อะลูมิเนียม (Aluminium) เหล็ก (Iron) และแคลเซียม (Calcium) ซึ่งโดยปกติอยู่ในรูปของออกไซด์ (Oxide) วัตถุดิบที่ใช้จึงจำเป็นต้องมีธาตุเหล่านี้ให้ครบ และมีปริมาณอยู่ในอัตราที่ต้องการ ดังนั้นการผลิตปูนซีเมนต์จึงมักต้องใช้วัตถุดิบตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ผสมกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติดังกล่าว แต่ในบางกรณีอาจใช้ชนิดเดียวโดยไม่ต้องมีการผสมเลยก็ได้ เช่น หินซีเมนต์ (Cement Rock)

วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียม ได้แก่ หินปูน (Limestone) หินชอล์ค (Chalk) หินปะการัง (Coral Limestone) ดินสอพองหรือดินขาว (Marl)
- 2) ประเภทที่ให้ธาตุซิลิกอน และอะลูมิเนียม ได้แก่ หินเชล (Shale) ดินเหนียว (Clay) นอกจากนี้ในการผลิตปูนซีเมนต์ยังจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบอย่างอื่นอีก เช่น
- 3) แร่เหล็ก (Iron Ore) เพื่อใช้ผสมกับวัตถุดิบ 2 ชนิดข้างต้น เพิ่มปริมาณเหล็กให้ได้ตามต้องการ ในกรณีที่หินเชลหรือดินเหนียวที่ใช้มีปริมาณเหล็กต่ำ
- 4) ยิปซัม (Gypsum) เพื่อใช้เป็นสารหน่วง (Retarder) โดยผสมกับปูนเม็ดจากเตาเผา ถ้าหากไม่เติมยิปซัมแล้ว ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ จะแข็งตัวเร็วมากจนไม่สามารถนำไปใช้งานได้

2.6.3.2 กรรมวิธีการผลิต

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ที่ใช้กันอยู่แบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลัก คือ การผลิตปูนซีเมนต์แบบเผาแห้ง (Semi – Dryprocess) และแบบเผาเปียก (Wet Process) ซึ่งกรรมวิธีการผลิตโดยรวมจะเหมือนกัน แต่จะต่างกันในด้านที่ 2 ดังที่แสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.12 แสดงกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์สรุปได้ดังนี้สรุปได้ดังนี้

การเตรียมวัตถุดิบนำวัตถุดิบที่จะใช้การผลิตปูนซีเมนต์ ได้แก่ ดินขาวดินดำและศิลาแลง มาวิเคราะห์หาส่วนประกอบเพื่อคำนวณหามาตราส่วนที่จะใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ ผสมวัตถุดิบดังกล่าวแล้วนำไปตีรวมกันกับน้ำในบ่อเตรียมดิน (Wash Mill) ให้ละเอียดจนเป็นน้ำดิน (Slurry) เพื่อที่จะย่อยดินขาวส่วนที่แข็งมากให้แหลกลงแล้วกรองเพื่อกันเอาส่วนละเอียดไปใช้และควบคุมปริมาณของน้ำไม่ให้มีมากเกินไป เพราะจะทำให้หมดเปลืองเชื้อเพลิงโดยเปล่าประโยชน์ ส่วนกากของดิน นำไปบดให้ละเอียดใหม่ในหม้อบดดิน (Tube Mill) แล้วนำมากรองใหม่อีกครั้งหนึ่งอย่างไรก็ตาม ในการเตรียมวัตถุดิบส่วนผสมของวัตถุดิบอาจจะคลาดเคลื่อนไปได้บ้าง เพราะความชื้นในดินตลอดจนความเปลี่ยนแปลงในส่วนผสมของดินอีกเล็กน้อยจึงต้องกวนน้ำดินที่ได้บรรจุไว้ในถัง (Slurry Silo) โดยวิธีอัดลมลงไปเพื่อให้เดือดพล่านเป็นเวลา 1 คืน แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ทางเคมีเป็นครั้งที่สอง ถ้าจำเป็นก็จะได้จัดการผสมน้ำดินนี้ให้ถูกส่วนตามที่ต้องการต่อไป แล้วสูบน้ำดินนี้ไปลงถังพัก (Slurry Agit Tank) ซึ่งมีพายและลมสำหรับกวนและเป่าน้ำดิน เพื่อป้องกันไม่ให้ตกตะกอนและเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในส่วนผสมให้มากที่สุดที่จะทำได้

การเตรียมดินผงโดยเอาหินปูนแห้งมาบดกับดินดำแห้งให้ละเอียดและมีส่วนผสมทางเคมีกวนเข้ากับน้ำดิน เอาน้ำดินและดินผงผสมกันแล้วมาปั่นเป็นเม็ด เม็ดดินนี้จะมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 25 ถ้าผลิตโดยกรรมวิธีเปียก (Wet Process) น้ำในดินจะต้องมีความชื้นถึงร้อยละ 40 ก่อนที่จะป้อนเข้าหม้อเผาโดยการเพิ่มตะกั่ว เเผาเม็ดดินเข้าอีกชุดหนึ่ง การใช้ความร้อนจากเชื้อเพลิงจะเป็นไปในอัตราต่ำ และมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบเผาเปียก ทำให้เชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไปในหม้อเผาปริมาณเดียวกันสามารถเผาปูนเม็ดได้เพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 50 หรือถ้าจะกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าวิธีเผาเปียกใช้ความร้อนประมาณ 1,500 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม เมื่อใช้วิธีเผาแห้งใช้ความร้อนลดลงเหลือประมาณ 1,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม สูบน้ำดังกล่าวไปเผาในหม้อเผา (Cement Rotary Kiln)

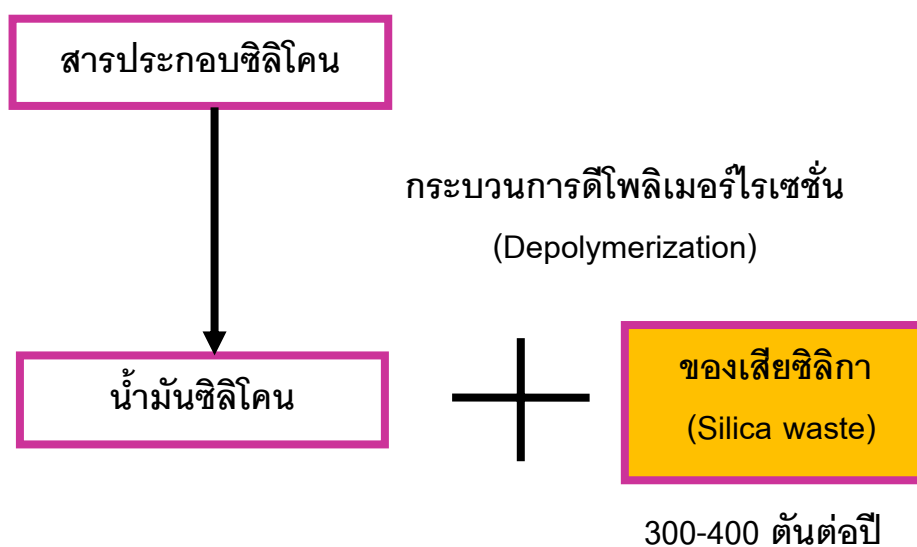
การเผาในหม้อเผา ภายในหม้อเผามีอิฐทนไฟ (refractory lining bricks) เพื่อเก็บความร้อนไว้ภายในและมีช่องเป็นชุด ๆ แขนงไว้ทำหน้าที่ต่าง ๆ กันเช่น สูบน้ำดินที่ไหลผ่านมาแล้วให้ปะทะกับลมร้อนที่จะผ่านออกทางปล่อง ทำให้น้ำระเหยออกจากน้ำดิน บันดินที่น้ำระเหยออกไปบ้างแล้วให้เป็นเม็ดกลม ๆ มีขนาดเท่าปลายนิ้วมือหรือใกล้เคียงกัน เม็ดดินที่ผ่านช่องเป็นชุด ๆ มานั้นจะถูกเผาให้ร้อนขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อร้อนถึง 800-1000 องศาเซลเซียส เม็ดดินก็จะเริ่มคายคาร์บอนไดออกไซด์ออกเมื่อเม็ดดินนี้ร้อนถึงประมาณ 1,450 องศาเซลเซียส ก็จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีคือเม็ดดินเปลี่ยนเป็นปูนเม็ดโดยขับพลัน ปูนเม็ดซึ่งร้อนถึง 1,450 องศาเซลเซียสจะถูกปล่อย

ลงไปในห้องลดอุณหภูมิ (Cooler) เพื่อให้ลมผ่านปูนเม็ดแล้วเย็นตัวลง เพื่อให้เกิดไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) มากที่สุดในขณะที่ปูนเม็ดเริ่มแข็งตัวแล้วจึงเก็บปูนเม็ดนี้ไว้ในยุ้ง (Storage)

ขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ นำปูนเม็ดนี้ไปบดให้เป็นปูนซีเมนต์ผงในห้องบดปูนซีเมนต์ (Cement Mill) โดยใส่ยิปซัมผสมลงไปด้วยหม้อบดนี้มีเครื่องสามารถตั้งให้จำนวนปูนเม็ดที่บดเป็นปูนซีเมนต์แล้วมีความละเอียดและความแข็งตัวตามที่ต้องการด้วยในทุกๆ ชั่วโมง ซึ่งจะนำตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่บดนี้ไปทดลองหาเวลาแข็งตัวและความละเอียดตลอดจนเก็บไว้ส่วนหนึ่งเพื่อรวมกันประกอบเป็นตัวอย่างสำหรับทดลองกำลังการยัดตัวและส่วนผสมทางเคมีของปูนซีเมนต์ที่บดแต่ละตัวด้วยปูนซีเมนต์ที่บดแล้วนี้ แล้วนำไปเก็บไว้ในยุ้งเก็บปูนซีเมนต์ (Cement Silo) โดยอาศัยกำลังลมอัดไป แล้วจะนำมาบรรจุถุงจำหน่ายได้ต่อไปความร้อนที่ออกจากไซโคลนนี้ยังจะถูกส่งโดยท่อขนาดใหญ่ ไปอุ่นวัตถุดิบที่มีความชื้นให้แห้งเสียก่อนนำไปเก็บไว้ (พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรสถ, 2544)

2.7 ของเสียซิลิกา

ของเสียซิลิกาเกิดจากกระบวนการดีโพลิเมอร์ไรเซชันในการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ซึ่งในปัจจุบันสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วมีปริมาณกว่า 1,000 ตันต่อปี และในกระบวนการรีไซเคิลดังกล่าวจะก่อเกิดของเสียซิลิกาประมาณร้อยละ 30-40 หรือประมาณ 300-400 ตันต่อปี

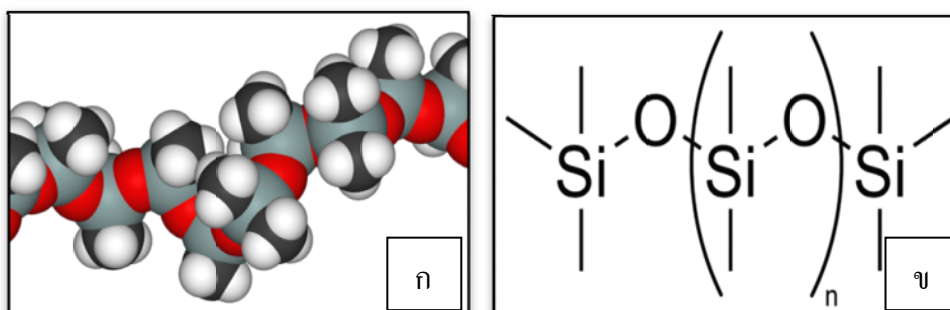


ภาพที่ 2.13 กระบวนการดีโพลิเมอร์ไรเซชัน

สารประกอบซิลิโคน (Polymerized siloxanes) เป็นซิลิกอนอะนาล็อกของคาร์บอนและสามารถฟอร์มเป็นโมเลกุลขนาดยาวและซับซ้อนขึ้นอยู่กับซิลิกอนมากกว่าคาร์บอนใช้จะเกิดการสลับซิลิกอน -ออกซิเจนอะตอม (-Si - O - Si - O - Si-) หรือ Siloxane มากกว่าอะตอมคาร์บอน -(CCCC)- ชนิดอื่นๆ ที่แนบไปกับ tetravalent อะตอมซิลิกอนจะไม่ Divalent อะตอมออกซิเจนที่มีความพยายามที่ในการขึ้นรูป Siloxane ใช้ตัวอย่างทั่วไปคือ Polydimethylsiloxane ที่กลุ่ม Methyl ติดกับอะตอมซิลิกอนแต่ละรูปแบบ $(\text{H}_3\text{C})[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n(\text{CH}_3)_3$ อะนาล็อกคาร์บอนจะเป็นอัลเคนเช่น Dimethylpropane C_5H_{12} หรือ $(\text{H}_3\text{C})[\text{C}(\text{CH}_3)_2]_n(\text{CH}_3)$ (ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2527)

ประเภทของโพลิเมอร์ซิลิโคนแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1. ไฮล๊อกเซล (Siloxane หรือ Polydimethylsiloxane, (PDMS)) เป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งของซิลิโคน เกิดจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันของกลุ่มกรดอะมิโนของเรซินด้วยน้ำ
2. ซิลิโคน (Silicone หรือ Dimethylsiloxane, (DMS)) ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม เกิดจากกระบวนการโพลิเมอร์ไรเซชันของซิลิโคนที่ใช้เบสเป็นตัวทำละลาย มีโครงสร้างเป็นรากละ (cross-linking) ลักษณะพื้นผิวจะเป็นแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ที่แทรกซึมอยู่ในโครงสร้างของซิลิโคนชนิด Ph_2SiO พบมากในน้ำมันซิลิโคนแสดงดังภาพ 2.14
3. ซิลิโคน (Silicone ชนิด Ph_2SiO) มีโพลิเมอร์ที่ประกอบด้วยซิลิกอนร่วมกับคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนและอื่น ๆ บางครั้งองค์ประกอบทางเคมีทำให้มีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ น้ำมันซิลิโคน ยางซิลิโคน ซิลิโคนจารบีซิลิโคน และเรซิน
4. ซิลิกอน (Silicon, SiO_2) เป็นโพลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีแบบกึ่งโลหะ ในด้านอุตสาหกรรมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า Silicon Valley, CA ซิลิโคนชนิดนี้ถึงแม้จะมีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบแต่กลับมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างจากธาตุซิลิกอน (AUTOPIA, 2010: Online)



ภาพที่ 2.14 โครงสร้างสารประกอบซิลิโคน (Silicone หรือ Dimethylsiloxane)(ก) สายพันธะ และ (ข) โครงสร้างสารประกอบซิลิโคน (AUTOPIA, 2010: Online)

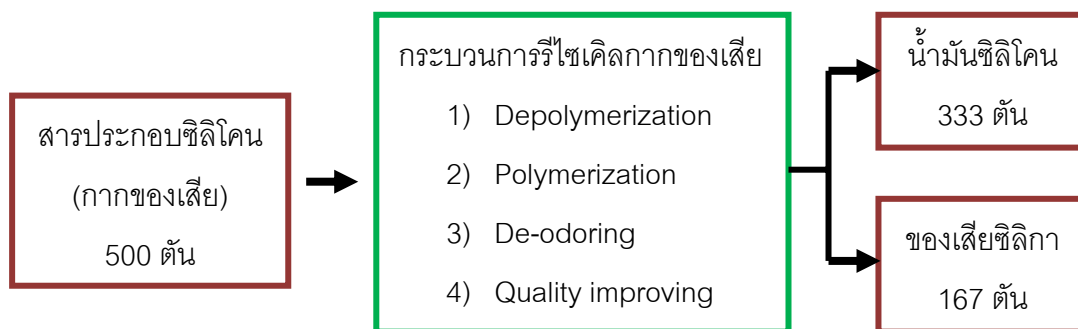
2.7.1 แหล่งต้นกำเนิดและวัตถุดิบของโรงงานรีไซเคิลกากของเสียเคมีวัตถุ Liquid Silicone Rubber (LSR) ประกอบด้วย ซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) มีแหล่งกำเนิดจากกระบวนการต่างๆ ดังนี้

1. จากกระบวนการผลิต LSR จะเกิดความผิดปกติของโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งเมื่อผลิตเสร็จ LSR จะมีน้ำมันไหลซึมออกมา หรือเรียกว่า LSR Oil Bleeding โดยสาเหตุมาจากการผสมที่ผิดพลาดหรือเกิด Side Reaction
2. จากการผลิต LSR ที่ไม่ได้คุณภาพ เช่น ไม่ได้ตามเกณฑ์ที่ต้องการ หรือความหนืดไม่ได้มาตรฐาน
3. จากการนำไปใช้งานขึ้นรูปซึ่งจะเกิด LSR ที่ผสมแล้วไม่ได้คุณภาพ
4. จากเศษที่ติดค้างอยู่บนบรรจุภัณฑ์หลังการถ่ายเท หรือจากเครื่องจักรขึ้นรูป
5. ประเทศที่เป็นแหล่งต้นกำเนิด LSR เช่น จีน ฮังกง เยอรมัน สเปน เป็นต้น ปริมาณการนำเข้าประมาณปีละ 500 ตัน

2.7.2 กระบวนการผลิตสินค้าของโรงงานรีไซเคิลของกากเสีย และปริมาณที่ใช้ในกระบวนการผลิต (โรงงานรีไซเคิลกากของเสีย. สัมภาษณ์, 30 มีนาคม 2554) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. Depolymerization ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100-210 องศาเซลเซียส (สภาวะสูญญากาศ)
2. Polymerization ใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 195-210 องศาเซลเซียส (สภาวะบรรยากาศ)
3. ดูดซับกลิ่น ใช้การดูดซับกลิ่นที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส (สภาวะบรรยากาศ)
4. ปรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซิลิโคน โดยใช้ด่างเพื่อปรับสภาพที่อุณหภูมิ 195-210 องศาเซลเซียส (สภาวะบรรยากาศ)

จากกระบวนการผลิตสินค้าโดยใช้กระบวนการดีโพลีเมอร์ไรเซชันในการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ของโรงงานรีไซเคิลกากของเสีย จากวัตถุที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ 500 ตัน สามารถนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาได้ประมาณ 333 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 67.67 และก่อให้เกิดของเสียซิลิกาประมาณ 167 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 32.33 แสดงดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 แสดงปริมาณวัตถุดิบ และผลผลิตที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรีไซเคิลกากของเสีย
(โรงงานรีไซเคิลกากของเสีย. สัมภาษณ์, 30 มีนาคม 2555)

2.7.3 ระบบป้องกันสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย

ในกระบวนการจะมีระบบป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เป็นไอระเหยระหว่างกระบวนการ ซึ่งจะอาศัยการดักจับด้วยน้ำจากระบบสุญญากาศแบบ Jet Pump โดยต้องมีน้ำในการลดความดัน และการควบแน่นด้วยความเย็นจากหน่วยทำความเย็น (Chiller) ในจุดที่ระบายออกบรรยากาศอีกชั้นหนึ่ง นอกเหนือจากไอระเหยจะมีการถ่ายกากตะกอนซึ่งจะมีฝุ่นที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ โดยจะใช้น้ำช่วยดักจับฝุ่นไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจายระหว่างการถ่ายออกจากเครื่องจักร ซึ่งสามารถมั่นใจได้ว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ถูกควบคุมอย่างดีและอยู่ในระดับต่ำ

2.7.4 ระบบการจัดการของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต

ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะเป็นลักษณะของแข็งที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยการจัดการจะเหมือนกระบวนการจัดการทั่วไปที่ดำเนินการอยู่แล้วภายในโรงงาน คือ การรวบรวมและการส่งเผาที่โรงปูนซีเมนต์ สำหรับการส่งกำจัดปัจจุบันบริษัทจะใช้บริการจากปูนซีเมนต์ไทยและปูนซีเมนต์นครหลวงซึ่งบริษัทจะมีฝ่ายสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย และเจ้าหน้าที่ดำเนินการในเรื่องนี้โดยเฉพาะที่ได้ผ่านการขึ้นทะเบียนเป็นผู้ควบคุมระบบการจัดการมลพิษทางอุตสาหกรรมแล้ว

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ด้านปูนซีเมนต์และคอนกรีต)

ธีรราช ลีเกียรติกุล และ ชัยจาตุรพิทักษ์กุล (2545) ศึกษาการผลิตคอนกรีตกำลังสูงจากเถ้าถ่านหินทดแทนซิลิกาฟูมควบแน่นด้วยการนำเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มีความละเอียดสูงเป็นวัตถุดิบตั้งต้น เถ้าถ่านหินจะถูกแยกด้วยเครื่อง Air Classifier ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.2 ไมครอน จากนั้นนำเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับการใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นจากสองแหล่ง ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมควบแน่นให้กำลังอัดสูงที่สุดในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แยกละเอียดร้อยละ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ให้กำลังอัดสูงที่สุดสำหรับเถ้าถ่านหินแยกละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ร้อยละ 15 ถึง 35 สามารถใช้แทนซิลิกาฟูมควบแน่นที่ร้อยละ 5 ถึง 15 ได้ เนื่องจากให้กำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกันเมื่ออายุบ่ม 180 วัน จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินแยกละเอียดมีความสามารถที่จะนำไปใช้แทนที่ซิลิกาฟูมควบแน่นหรือทำคอนกรีตที่รับกำลังรับแรงอัดสูงได้

สุจริตรา กันยาวีลาศ (2545) ศึกษาการทำตะกอนนิเกิลไฮดรอกไซด์ให้เป็นก้อนด้วยการใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ร่วมกับปูนขาว และปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน มีวัสดุประสาน 2 ชนิด คือ ซิลิกา-อะลูมินา และซิลิกา-อะลูมินากับปูนซีเมนต์ โดยทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำให้เป็นก้อน โดยพิจารณาสมบัติทางกายภาพ คือ กำลังรับแรงอัด และประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย แล้วทำการแปรค่า อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนเป็น 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 และ 1.50 อัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาต่อปูนขาวเป็น 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 และทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ ซิลิกา-อะลูมินาผสมกับปูนขาวกับซิลิกา-อะลูมินา ผสมปูนซีเมนต์ โดยทำการแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 พร้อมทั้งแปรค่าระยะเวลาบ่มเป็น 7, 14 และ 28 วัน แปรขนาดซิลิกา - อะลูมินาที่บดแล้ว ($D_{50}=10$ ไมโครเมตร) และขนาดที่ยังไม่บด ($D_{50} = 280$ ไมโครเมตร) และการประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนที่เหมาะสมเป็น 0.25 อัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาต่อปูนขาวเป็น 0.4 อัตราส่วนซิลิกา อะลูมินาสังเคราะห์ต่อปูนซีเมนต์เป็น 0.2 และสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ซิลิกา-อะลูมินาผสมกับปูนขาวกับ ซิลิกา-อะลูมินาผสมกับปูนซีเมนต์ ในการแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.6 และระยะเวลาในการบ่มเป็น 14 วัน ด้วยการให้ซิลิกา-อะลูมินาที่บดแล้ว

เช่นเดียวกัน ทั้งสองชนิด ได้ผลของค่ากำลังรับแรงอัดเป็น 8.85 และ 21.53 กก/ตร.ซม. ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการลดการชะละลายเป็นร้อยละ 99.84 และร้อยละ 67.06 ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดเท่ากับ 715 และ 459 บาทต่อตันตะกอนแห้ง ตามลำดับ

Wan และคณะ (2007) ศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่เติมซิลิกาที่มีขนาดเท่ากับ 40 นาโนเมตรและมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 60 ตร.ม./ก. ทดแทนซีเมนต์ ในอัตราส่วนของซิลิการ้อยละ 3, 6, 10 และ 11 โดยทำการขึ้นรูปเป็นรูปลูกบาศก์ขนาด 5×5×5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยโพลีคาร์บอเนตเป็นซูเปอร์พลาสติกไฮดรอกซี จากนั้นจึงบ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วันและนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนโดยเปรียบเทียบกับกรณีเติมซิลิกาฟุ่ม ผลการศึกษาพบว่าซีเมนต์พอสต์ที่มีการเติมนาโนซิลิกาที่อายุบ่ม 7 วันและ 28 วัน มีความแข็งแรงสูงกว่าที่เติมซิลิกาฟุ่ม เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากกว่าซิลิกาฟุ่ม อีกทั้งอนุภาคระดับนาโนสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็วและเกิดผลผลิตไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น เห็นได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค นอกจากนั้นยังพบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์น้อยลง

สหภาพ หอมวุฒิวังศ์ และธนกร อุตตะริยะะ (2551) ศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานชนิดต่างๆ ในปริมาณสูงซึ่งได้แก่ แก้วฉนวนหิน จาก 2 แหล่ง (แม่เมาะและกาญจนบุรี) แก้วปาล์มน้ำมัน และแก้วเกลบ-เปลือกไม้ โดยทำการเพิ่มความละเอียดของวัสดุปอซโซลานจนกระทั่งมีขนาดอนุภาคของวัสดุค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำวัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 55 และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตถูกทดสอบที่อายุ 7, 28, 90, 180 และ 365 วัน ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ผสมแก้วฉนวนหินจากแม่เมาะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมถึงแม้จะใช้สารลดน้ำพิเศษ สำหรับแก้วปาล์มน้ำมันและแก้วเกลบ-เปลือกไม้นั้นพบว่าเมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 55 แล้วทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อยเมื่อใช้สารลดน้ำชนิดเดียวกัน และจากผลการทดลองยังพบอีกว่าการใช้สารลดน้ำชนิดพิเศษสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตที่มีวัสดุปอซโซลานปริมาณสูงได้

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวินัย หอมศรีประเสริฐ (2552) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟุ่ม การสูญเสียกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต ด้วยสารละลายไฮเดียมซิลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 จากนั้นเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุของคอนกรีตเท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.45 และแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของเถ้าแกลบดำบดละเอียดและซิลิกาฟุ่มในการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าแกลบดำบดละเอียดแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมเท่ากับ 0.25 ทำให้คอนกรีตมีความทนทานต่อสารละลายซิลเฟต ทั้งในด้านการสูญเสียกำลังอัด การสูญเสียน้ำหนัก และการขยายตัว เนื่องจากเถ้าแกลบดำบดละเอียดมีราคาต่ำกว่าซิลิกาฟุ่มมาก จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตทนทานซิลเฟต

Kadri และคณะ (2009) ศึกษาการกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการทดแทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนของซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10-30 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ปอร์ตแลนด์รวมกับซิลิกาฟุ่ม เท่ากับ 0.25 และ 0.4 โดยบ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน จากการศึกษาพบว่า การทดแทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซิลิกาฟุ่มสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้รวดเร็วยิ่งกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ไม่มีการผสมซิลิกาฟุ่มโดยพบว่าสามารถให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ไม่มีการผสมซิลิกาฟุ่ม

ณัฐพล เศรษฐโอฬาร (2553) นำกากของเสียซิลิกามาใช้แทนซิลิกาฟุ่มในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยนำกากของเสียซิลิกาผ่านการแยกขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดให้มีความละเอียดสูงได้เป็นกากซิลิกาแยกละเอียด มีรูปร่างทรงกลมมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 288 ไมโครเมตร หลังจากทำการบดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.2 ไมโครเมตร จากนั้นนำกากของเสียซิลิกาแยกละเอียดเติมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับการใช้ซิลิกาฟุ่มควบแน่นจากตัวแทนจำหน่าย เติมน้ำในปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตผสมเสร็จในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ที่ 0.40 ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 28 และ 56 วัน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มให้กำลังอัดสูงที่สุดส่วนคอนกรีตที่ผสมกากของเสียซิลิกาพบว่าการใช้กากของเสียซิลิกาแยกละเอียดร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ให้กำลังอัดสูงสุดการใช้กากของเสียซิลิกาแยก

ละเอียดเต็มในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 สามารถใช้แทน ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 ได้เนื่องจากมีกำลังอัดใกล้เคียงกันเมื่อคอนกรีตมีอายุ 56 วันและผ่านเกณฑ์มาตรฐานนอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของกากของเสียซิลิกาแยกละเอียดร้อยละ 10 มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอีกเมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 56 วันแสดงให้เห็นว่ากากของเสียซิลิกาแยกละเอียดมีศักยภาพสูงที่จะนำไปใช้แทนที่ซิลิกาฟุ่มเพื่อทำคอนกรีตผสมเสร็จนอกจากนี้พบว่าของเสียประเภทซิลิกาสามารถใช้แทนซิลิกาฟุ่มได้ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ประมาณร้อยละ 40

Hamid และคณะ (2010) ศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตที่มีการเติมซิลิกาฟุ่มในงานวิจัยนี้ทำการเติมซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 แทนที่ในคอนกรีต และทำการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีตร่วมกับซิลิกาฟุ่ม เท่ากับ 0.22 - 0.40 จากนั้นจึงนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต 2 วิธี คือ วิธี Ultrasonicrel Ativeamplitude Ratio (RAR) และ Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)จากการศึกษาพบว่าวิธีการประเมินผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) สามารถใช้ได้ดีกว่าอีกวิธีจากผลการศึกษาด้วยวิธีดังกล่าวพบว่า ผลการทดสอบความแข็งแรงของคอนกรีตแสดงถึงความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดคุณสมบัติของคอนกรีตและปริมาณซิลิกาฟุ่ม

ข้อสรุปจากงานวิจัยด้านปูนซีเมนต์และคอนกรีต การผสมซิลิกาฟุ่มในมอร์ตาร์คอนกรีตจะสามารถในการทนการกัดกร่อนของซัลเฟตได้มากขึ้น (บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวินัย หอมศรีประเสริฐ, 2552) ในการศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะและกาญจนบุรีที่มีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานจากการศึกษาพบว่า สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าถ่านหินได้ค่อนข้างดี (สหลาภ หอมวุฒิวังศ์ และธนกร อัดตะริยะ, 2551) และจากการนำกากของเสียประเภทซิลิกาที่ผ่านการแยกละเอียดมาใช้แทนซิลิกาฟุ่มในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ (ณัฐพล เศรษฐโอฬาร, 2553) พบว่ากากของเสียประเภทซิลิกามีศักยภาพสูงที่จะนำไปใช้แทนที่ซิลิกาฟุ่มเพื่อทำคอนกรีตผสมเสร็จซึ่งนอกจากจะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียและปริมาณของเสียแล้วยังสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ประมาณร้อยละ 40 ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ อีกทั้งเป็นการลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดจากการจัดการของเสียและกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และคอนกรีต

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ด้านจีโอโพลิเมอร์)

เกียรติศักดิ์ กลัปประสิทธิ์ (2549) ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด อัตราส่วนเก้าถ่านหินต่อเก้าแคลบ-เปลือกไม้ (FA:RHBA) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{OSiO}_2:\text{NaOH}$) โดยน้ำหนักต่อกำลังรับแรงอัดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ และผลกระทบของอุณหภูมิของวัสดุ ณ เวลาขณะผสม อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มต่อกำลังอัดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ จีโอโพลิเมอร์เพสต์รูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ถูกหล่อขึ้นเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ส่วนการทดสอบหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยา จะใช้กรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นกรดอ่อนกัดชะละลายจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุที่กำหนด โดยน้ำหนักอนุภาคที่ยังเหลืออยู่ถูกสันนิษฐานว่าเป็นอนุภาคส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาผลการศึกษพบว่า การใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดที่มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นค่าอัตราส่วนเก้าถ่านหินต่อเก้าแคลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 40: 60 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด โดยค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันมีค่าเท่ากับ 510 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเพิ่มปริมาณเก้าแคลบ-เปลือกไม้ให้สูงขึ้นเป็น ร้อยละ 30:70, 20:80 หรือ 0:100 จะเกิดการขยายตัวและแตกร้าวอย่างชัดเจน ทำให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ไม่เสถียร ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มมีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อมีอายุหลังจาก 28 วัน และที่ความเข้มข้นสูงขึ้นจะส่งผลต่อการพัฒนากำลังในช่วงอายุปลายดีขึ้น และพบว่าอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิของวัสดุ ณ เวลาขณะผสมมีผลต่อกำลังอัดอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วนการบ่มจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น คือ ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดร้อยละ 65, สัดส่วน FA:RHBA=40:60, และมีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์, มีสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5:1 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 510 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้การบ่มที่อุณหภูมิห้องจะมีกำลังอัดสูงถึง 492 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ภายในระยะเวลา 3 วัน ถ้าบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แสดงให้เห็นว่า

อนุภาคของเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยาได้ไวกว่าอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ประเภทที่สำคัญที่สุดที่พบในการวิจัยในส่วนนี้คือ ร้อยละของการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นและคุณภาพของโครงสร้างจุลภาคของสารประกอบจีโอโพลิเมอร์มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟส

ประวิทย์ ศรีโยธีและคณะ (2549) ศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคุณสมบัติที่เหมาะสมของคอนกรีตที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตและน้ำเป็นส่วนผสม โดยหล่อเป็นตัวอย่างขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งกำหนดอัตราส่วนทางเคมี ต่างกัน 7 ส่วนผสม แบ่งคุณสมบัติออกเป็น 2 ชุดบ่มอุณหภูมิห้อง และบ่มอุณหภูมิ 60°C โดยทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 7 วัน จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการรับกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.463 และอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหิน 0.60 ให้กำลังอัดสูงสุด โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิห้องให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 161.33 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 329.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ลดปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ผสมอยู่ให้น้อยลงจะได้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและเมื่อลดปริมาณน้ำต่อเถ้าถ่านหินลงก็จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นเช่นกัน

รอสลี ทรงชาติและคณะ (2549) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการก่อตัวต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสของเถ้าถ่านหินที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นส่วนผสมเฟสทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยเข็มไวเคต และทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยหล่อเป็นตัวอย่างมอร์ตาร์ รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร $\times$ สูง 10 เซนติเมตร ซึ่งกำหนดอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 60:20:20 และ 70:20:10 โดยน้ำหนัก แบ่งคุณสมบัติผสมและอุณหภูมิบ่มออกเป็น 2 ชุด คือ ผสมที่อุณหภูมิ 30°C และ 60°C และบ่มที่อุณหภูมิ 30°C และ 60°C เช่นเดียวกัน โดยทดสอบค่ากำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7 วัน จากการศึกษาพฤติกรรมระยะเวลาการก่อตัวและการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่มีเถ้าถ่านหินเป็นส่วนผสมพบว่า การผสมที่อุณหภูมิ 30°C และบ่มที่อุณหภูมิ 30°C มีระยะเวลาการก่อตัวเท่ากับ 160 นาที ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 234.64 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผสมที่อุณหภูมิ 30°C บ่มที่อุณหภูมิ 60°C มีระยะเวลาการก่อตัวเท่ากับ 113 นาที ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 235 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผสมที่อุณหภูมิ 60°C บ่มที่

อุณหภูมิ 30°ซ มีระยะเวลาการก่อตัวเท่ากับ 207 นาที่ ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 183.14 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร และการผสมที่อุณหภูมิ 60°ซ บ่มที่อุณหภูมิ 60°ซ มีระยะเวลาการก่อตัวเท่ากับ 143 นาที่ ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 203.87 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจากการทดสอบครั้งนี้ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เฟสคือ ผสมที่อุณหภูมิ 30 °ซ บ่มที่อุณหภูมิ 60 °ซ จะมีระยะเวลาการก่อตัวน้อยสุดและให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสมจะมี ระยะเวลาการก่อตัวมากขึ้นและการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มจะให้กำลังรับแรงอัดที่น้อยลง ดังนั้น อุณหภูมิก็มีผลกระทบอย่างมากต่อระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟส ที่ทำการทดสอบ

จิตติ มณีศรี และคณะ (2550) ศึกษาความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดของรอยต่อ ระหว่างซีเมนต์เฟสกับวัสดุซ่อมแซมที่เป็นจีโอโพลิเมอร์เฟส ที่มีเถ้านหินสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นส่วนผสมซึ่งกำหนดอัตราส่วนน้ำหนักรัง ตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 0.60, 0.65 และ 0.70 สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 และความเข้มข้นของสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8 โมลาร์ บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน โดยในการทดสอบใช้ ตัวอย่างขนาด $2.5 \times 2.5 \times 30$ ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นทดสอบกำลังรับแรงอัดขึ้นส่วนของวัสดุ ซ่อมแซมที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดที่อายุเดียวกันพบว่า อัตราส่วนน้ำหนักรังตั้งต้นต่อน้ำหนัก ทั้งหมด เท่ากับ 0.70 สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้สูงกว่าอัตราส่วน 0.60 และ 0.65 โดยมีค่ากำลัง รับแรงอัดเท่ากับ 3.23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุบ่ม 3 วัน และมีการพัฒนากำลังรับแรงอัด ขึ้นถึง 6.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่ออายุบ่ม 28 วัน สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของ วัสดุซ่อมแซมพบว่า อัตราส่วนน้ำหนักรังตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด เท่ากับ 0.60 สามารถรับกำลัง รับแรงอัดของเฟสที่ได้สูงกว่าอัตราส่วน 0.65 และ 0.70 โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 147.63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุบ่ม 28 วัน

นิรุติ มະลิชาติ และคณะ (2550) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ เฟสของเถ้านหินโดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็น ส่วนผสมโดยหล่อแบบทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และสูง 6 เซนติเมตร กำหนดอัตราส่วนเถ้านหินต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียม ซิลิเกตเท่ากับ 60 : 40 และ 65 : 35 โดยจีโอโพลิเมอร์เฟสตัวอย่างที่ 1 มีอัตราส่วนผสมของเถ้า

ถ่านหินร้อยละ 60, NaOH/Na₂SiO₂ เท่ากับ 1 : 2 ใช้ร้อยละ 40 (NaOH ร้อยละ 13.33, Na₂SiO₂ ร้อยละ 26.67) โดยน้ำหนัก ตัวอย่างที่ 2 มีอัตราส่วนผสมของถ่านหินร้อยละ 65, NaOH/NaSi เท่ากับ 1 : 2 ใช้ร้อยละ 35 โดยใช้ NaOH ร้อยละ 11.67, NaSi ร้อยละ 23.33 โดยน้ำหนักทดสอบที่ อุณหภูมิผสม 10 °ซ, 30 °ซ และ 60 °ซ และอุณหภูมิบ่ม 30 °ซ และ 60 °ซ โดยทดสอบค่ากำลังรับ แรงอัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ เฟสท์เมื่อผสมที่อุณหภูมิ 10 °ซ และ 30 °ซ จะได้กำลังอัดใกล้เคียงกัน ส่วนอุณหภูมิบ่มที่เหมาะสม ที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 30 °ซ ซึ่งได้กำลังรับแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 376.04 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 302.67 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ ส่วนการผสมที่อุณหภูมิ 10 °ซ และ 30 °ซ โดยบ่มที่อุณหภูมิ 60 °ซ ที่อายุ 28 วัน เหมือนกันจะได้ค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด คือ 72.20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 73.32 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จากการ ทดสอบครั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิในการผสมและการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มก็มีผลต่อกำลังรับแรงรับ แรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสท์โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงอย่าง ชัดเจน

ปฐมพงษ์ สัตย์จริง และคณะ (2550) ศึกษาปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อกำหนดอัตราส่วนถ่านหินต่อวัสดุประสานทั้งหมดต่างๆ กัน เช่น เท่ากับ 0.675, 0.700 และ 0.725 และใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 18 โมลาร์ ในอัตราส่วน Na₂SiO₂:NaOH เท่ากับ 2.5 อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.4 ก็ถูกหล่อเพื่อเปรียบเทียบเช่นกัน ตัวอย่างมอร์ตาร์ ขนาด 10×10×10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถูกหล่อขึ้นเพื่อแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น ร้อยละ 2.5 ที่อายุ 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ แล้วจะผงดตัวอย่างที่ผิว 1.25, 2.50 และ 5.00 ซม. เพื่อทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์จากผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วน 18G-0.675 มีแนวโน้มในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีที่สุดเมื่ออัตราส่วนผสมระหว่าง ถ่านหินต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์จะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ประเภทที่ 1 การซึมผ่านของคลอไรด์บริเวณผิวและที่ความลึก 1.25 ซม. มีค่าสูง มากและลดลงที่ความลึก 2.50 และ 5.00 ซม. จะเห็นได้ว่าตัวอย่าง 18G-0.675 มีความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ที่ดีกว่าส่วนกำลังรับแรงอัดพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วน 18G-0.675 มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์

พร้อมพงษ์ ผุงเพิ่มตระกูล และคณะ (2551) ศึกษาการรับกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตเมื่อใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานโดยการเจาะรูตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร จนทะลุผ่านจากนั้นใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ผึงลงไปในคอนกรีตเป็นระยะ 150 มิลลิเมตรโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นตัวเชื่อมประสานบริเวณที่เจาะรูจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้จะมีสัดส่วนผสมแตกต่างกัน เช่นอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และซิลิกาฟูมและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น แรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน จากการศึกษาพบว่า จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดโดยแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 79 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน จีโอโพลิเมอร์เพสต์จึงมีแนวโน้มที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมได้และวัสดุเสริมคอนกรีตได้

วิฑูรย์ ทะนุ และคณะ (2551) ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มวลเบาโดยวิธีเติมอากาศที่มีเถ้าถ่านหินสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และฟองอากาศโดยอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหินต่อทรายเท่ากับ 1:1.5 และอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหินกับเถ้าหนักเท่ากับ 1:1.5 โดยน้ำหนัก ส่วนอัตราผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 0.538 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 1505-2541 กำหนดร้อยละของฟองอากาศเท่ากับ 0, 20, 40 และ 60 โดยปริมาตรและตัวอย่างมอร์ตาร์รูปมวงลูกบาศก์ ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ศึกษาการรับกำลังรับแรงอัดเมื่อบ่มโดยห่อหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อรักษาความชื้นไว้จนถึงวันทดสอบ แล้วทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนผสมฟองอากาศร้อยละ 40 อัตราส่วนผสม ของเถ้าถ่านหินต่อเถ้าหนักเท่ากับ 1:1.5 และอัตราส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 0.538 เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด

วันชัย ยอดสุดใจ และบรรเจิด ทวีทรัพย์ไพบูลย์ (2551) ศึกษาพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพื่อใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม โดยทำการทดสอบกำลังการรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนผสมแตกต่างกัน และทำการทดสอบกำลังการยึดเกาะภายในโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีศักยภาพที่จะพัฒนาให้เป็นวัสดุซ่อมแซม

และยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีกำลังต้านทานการรับแรงอัดถึงกว่า 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยไม่ต้องบ่มด้วยความร้อนที่อายุ 28 วัน และพบว่ากำลังต้านทานการรับแรงดึงและกำลังการยืดเกาะของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุซ่อมแซมตามท้องตลาดที่อายุ 28 วัน

วิเชียร ชาลี และอุบลรักษ์ณ รัตนศักดิ์ (2552) ศึกษาคุณสมบัติความคงทนของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา โดยเตรียมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1, 1.5, 2, และ 3 ทำการบ่มจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศ และทดสอบกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 14, 30 และ 90 วัน ในการศึกษาคุณสมบัติด้านความคงตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้ทำการทดสอบกำลังหลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 90 วัน นอกจากนี้ที่อายุตัวอย่าง 48 ชั่วโมง ได้ทำการศึกษามุมฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกา Si-O (Stretching) โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (IR) ที่ช่วงความถี่ 1200-950 ซม.⁻¹ และโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์โดยเทคนิคอิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 ให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 35 เมกะปาสคาล และนอกจากนั้นยังพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุทดสอบเดียวกัน ตลอดจนตัวอย่างที่แช่ในแมกนีเซียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์โดยลดลงค่อนข้างชัดเจนจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

กนกวรรณ ปันเขตร และคณะ (2553) ศึกษาระยะเวลาการก่อตัวและดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยโดยผสมเพิ่มที่เลือกศึกษาได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต และซูโครสในปริมาณร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ทำการศึกษาระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาและศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าแคลเซียมคลอไรด์เร่งระยะเวลาการก่อตัวต้นและปลายเมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์โพสต์ควมคุม แคลเซียมซัลเฟตมีผลเล็กน้อยทั้งระยะการก่อตัวต้นและปลาย โซเดียมซัลเฟตเพิ่มระยะการก่อตัวต้นแต่ไม่มีผลต่อระยะก่อตัวปลาย ในการศึกษาส่วนของดัชนี การเกิดปฏิกิริยาพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมสารผสมเพิ่ม

จะมีดัชนีการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์เฟสควบคุมและทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ยกเว้น ชูโครสซึ่งกำลังอัดเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากผลของการหน่วงจากการศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังอัดของวัสดุซ่อมแซมจีโอโพลิเมอร์เฟสพบว่าที่อัตราส่วนน้ำหนักสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 0.70 ให้กำลังอัดของเฟสที่สูงกว่าอัตราส่วน 0.60 และ 0.65 โดยมีค่าของกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 3 วันเท่ากับ 3.23 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นเมื่อมีอายุการบ่ม 28 วันมีค่าเท่ากับ 6.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการทดสอบกำลังอัดชิ้นส่วนของวัสดุซ่อมแซมพบว่าที่อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 0.60 มีค่ากำลังรับแรงอัดของเฟสที่สูงกว่าอัตราส่วน 0.65 และ 0.70 โดยให้ค่ากำลังอัดสูงที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 147.63 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

สกลวรรณ น่านจิตสุวรรณ (2553) ศึกษาการผลิตเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาด้วยผงอะลูมิเนียมโดยนำเถ้าลอยและผงอะลูมิเนียมมาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ตั้งต้นเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เป็นการเชื่อมต่อกันของสายโซ่ระหว่างโครงสร้างเตตราไฮดรอลของซิลิกอนกับออกซิเจนและอะลูมิเนียมกับออกซิเจนเป็นโครงร่างสามมิติ จากลักษณะดังกล่าวส่งผลให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีมีสมบัติทางด้านทนความร้อนทนไฟป้องกันเสียงมีกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในงานโครงสร้างและอุตสาหกรรม

Tailby และคณะ (2010) ทำการตรวจสอบกำลังอัดและโครงสร้างองค์ประกอบของวัสดุจีโอโพลิเมอร์อะลูมิเนียมซิลิเกตด้วยการสังเคราะห์แร่ธาตุปูน C_3S , $\beta-C_2S$, C_3A และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากการศึกษพบว่า องค์ประกอบดังกล่าวให้กำลังอัดที่น้อยกว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากผลการตรวจสอบการเลี้ยวเบน (X-ray diffraction) ของซิลิกา (Si) และนิวเคลียร์แมกนีติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer with MAS, NMR-MAS) และจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope with EDS, SEM/EDS) ของอะลูมินา (Al) ระบุว่าผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ของแร่ธาตุปูนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นตัวหนึ่งของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ในกรณีที่มีกำลังอัดต่ำจะเหนียวทำให้เกิด C-S-H เนื่องจากการลดลงของซิลิกา (Si) เพราะการสร้างจีโอโพลิเมอร์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าการไล่น้ำออกของแร่ธาตุปูน ความเป็นไปได้นี้ได้รับการสนับสนุนจากการทดลองในส่วนของการเกิดชั้นของ

จีโอโพลิเมอร์ อย่างอ่อนด้วยการแทนโปแตสเซียมด้วยโซเดียม ซึ่งเป็นการลดปริมาณต่างของเพสต์ จีโอโพลิเมอร์หรือโดยการเติมบอแรต กำลังอัดในทุกกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-จีโอโพลิเมอร์ เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งโดยการรวมกันของสารเติมแต่งที่มีโปแตสเซียม และผลผลิตของ โครงสร้างที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-จีโอโพลิเมอร์เป็นองค์ประกอบจะแข็งแรงกว่าโครงสร้าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไฮดรทเพียงอย่างเดียว

Nazari และคณะ(2011) ศึกษา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ โดยใช้เกล็ดลอย จากเกลบและเกล็ดเปลือกไม้ที่มีการคละขนาดร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ในมอร์ตาร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร และสูง 6 เซนติเมตร ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน ในงานวิจัยนี้แบ่งอุณหภูมิในการบ่มเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกบ่มที่อุณหภูมิห้อง ชุดที่สองบ่มที่อุณหภูมิ 40°C – 90°C เป็นเวลา 36 ชั่วโมง จากนั้นจึง นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 7 และ 28 วันจากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดที่ อุณหภูมิ 40°C – 90°C ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน โดยการบ่มอุณหภูมิ 80°C ให้กำลังอัด สูงสุด วัสดุตั้งต้นที่มีส่วนผสมของอนุภาคนาโนเล็กกว่ามีผลต่อความหนาแน่นของโครงสร้าง จีโอโพลิเมอร์ คือ ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของวัสดุตั้งต้นที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว และมีการเชื่อมประสานระหว่างพันธะในโครงสร้างที่ความหนาแน่นมากกว่าตัวอย่างที่มีวัสดุตั้งต้น ขนาดใหญ่ เห็นได้จากผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

ข้อสรุปจากงานวิจัยด้านจีโอโพลิเมอร์ พบว่าได้มีการนำวัสดุใหม่ในงานคอนกรีตชนิด ต่างๆ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบดำ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าก้นเตา แร่ดินหรือไดอะตอมไมต์และ ซิลิกาฟุ้ง ซึ่งวัสดุใหม่ดังกล่าวจะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก จึงจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งมี คุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานและให้กำลังรับแรงอัดกับมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว ในการศึกษา เกี่ยวกับการคัดขนาดเถ้าถ่านหินในระดับไมครอน (3.2 ไมครอน) โดยนำแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15-35 จะมีศักยภาพสูงในการนำไปแทนที่ซิลิกาฟุ้งในปูนซีเมนต์ที่รับกำลังอัดสูง (ธีรราช ลีกรัตติกุล และชัยจาตุรพิทักษ์กุล, 2545) สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.463 และอัตราส่วนผสม ของเถ้าถ่านหินที่ 0.60 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 329.40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อบ่มที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ประวิทย์ ศรีโยธี และคณะ, 2549) ส่วนอุณหภูมิ ที่เหมาะสมที่สุดในการผสมและบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์คือ 30 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาการก่อตัวเท่ากับ 113 นาที ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 235 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร (รอสลี ทรวงชาติและคณะ, 2549) ของเสียซิลิกามีองค์ประกอบของซิลิกาสูงกว่าร้อยละ 70

อีกทั้งมีองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพเทียบเท่ากับวัสดุปอซโซลาน จึงมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

จากการศึกษางานวิจัยด้านปูนซีเมนต์และคอนกรีต พบว่าเริ่มมีการนำวัสดุใหม่เข้ามาใช้เป็นวัสดุร่วมกับปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆ เพิ่มกำลังรับแรงอัดในมอร์ตาร์คอนกรีต ในการสังเคราะห์โครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของจีโอโพลิเมอร์ควบคู่ไปกับการเกิดโครงสร้างไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไตรคัลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในปฏิกิริยาไฮเดรชันที่พบในปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตของจีโอโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้นควบคู่ไปกับปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความแข็งแรงมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากโครงสร้างในปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียว อีกทั้งโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตของจีโอโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้นควบคู่ไปกับปฏิกิริยาไฮเดรชันยังสามารถทนต่อการลดการกัดกร่อนที่เกิดจากสารละลายคลอไรด์และซัลไฟต์ได้ดีกว่าโครงสร้างในปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียว

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์ พบว่า มีการใช้เถ้าถ่านหิน เถ้าชีวมวลเถ้าลอย เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบดำ เถ้าแกลบเถ้าแกลบ เปลือกไม้และซิลิกาฟูมมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งวัตถุดิบดังกล่าวมีซิลิกาไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานและให้กำลังรับแรงอัดเมื่อมอร์ตาร์แข็งตัวแต่เถ้าถ่านหินและเถ้าลอยมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณสูง จึงเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างที่อ่อนแอกว่าจีโอโพลิเมอร์ ทำให้ความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดน้อยลง แต่ของเสียซิลิกาเป็นสารตั้งต้นมีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 0.1 จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เพื่อที่จะเป็นการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ให้สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้มากขึ้น ของเสียซิลิกาจากกระบวนการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่มีองค์ประกอบของซิลิกาสูงกว่าร้อยละ 70 อีกทั้งมีองค์ประกอบทางเคมีและกายภาพเทียบเท่ากับวัสดุปอซโซลาน สามารถนำของเสียซิลิกามาใช้ทดแทนซิลิกาฟูมในคอนกรีตผสมเสร็จ (ณัฐพล เศรษฐโอฬาร, 2553) จากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียอุตสาหกรรม อีกทั้งต้องเสียค่าใช้จ่ายและพื้นที่จำนวนมากในการกำจัดและจัดการของเสียดังกล่าว ดังนั้นของเสียซิลิกาจึงมีความเหมาะสมในการเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการนำของเสียซิลิกามาใช้ประโยชน์โดยใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และศึกษาผลของระยะเวลาต่อการกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนการทดลอง ได้แก่ การศึกษาลักษณะทางกายภาพ และเคมีของเสียซิลิกาจากการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์และการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ได้จากกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัย และบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและห้องปฏิบัติการ บริษัท ทีพีโอ จำกัด (มหาชน) โดยใช้ของเสียซิลิกาจากกระบวนการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสีย

การดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เก็บตัวอย่างของเสียซิลิกาจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสีย

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของของเสียซิลิกาซึ่งเป็นวัตถุดิบในการวิจัย

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์โดยใช้ของเสียซิลิกา โดยแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของของเสียซิลิกาต่ออะลูมินาบริสุทธิ์ อัตราส่วนของของเสียซิลิกาต่อสารละลายและระยะเวลาในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบคุณภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้แก่ ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและทดสอบการชะละลาย

ขั้นตอนที่ 5 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียซิลิกามาใช้ในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุดิบ

1. ทราายแม่น้ำ (ภาพที่ 3.1) ซึ่งเป็นทรายซิลิกาจากธรรมชาติ โดยจะต้องมีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 (อาจค้างบนตะแกรงได้ไม่เกินร้อยละ 15) และตะแกรงเบอร์ 30 (อาจค้างบนตะแกรงได้ไม่เกินร้อยละ 5) หลังจากกรองต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที ตามมาตรฐาน ASTM C778-06
2. ของเสียซิลิกาที่ใช้ในการวิจัย (ภาพที่ 3.2) เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการดีโพลีเมอร์ไรเซชันในการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสียเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่
3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ตราช้าง

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) Caustic Soda 99% min จากบริษัท AGC Chemical Thailand Co.,Ltd ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ (เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400.08 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร)
 - 2) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 99% min จากบริษัท CARLO ERBA
 - 3) อะลูมินาบริสุทธิ์ (Al_2O_3) (Aluminum Oxide 98.0%) จากบริษัท CARLO ERBA
- โครงสร้างของอะลูมินาบริสุทธิ์ดังแสดงในภาพที่ 3.3

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. การบดและการคัดขนาด
 - 1) เครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) (ภาพที่ 3.4)
 - 2) เครื่องร่อนเขย่าคัดขนาด เบอร์ 20, 30 50, 100, 150, 200 และ 325 (ภาพที่ 3.5)
2. การหล่อแบบและทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง
 - 1) เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 1 ตำแหน่ง
 - 2) กระบอกตวง: ขนาด 500 มิลลิลิตร ละเอียด 10 มิลลิลิตร
 - 3) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด: น้ำหนักกดสูงสุด 150 ตัน (ภาพที่ 3.6)
 - 4) เครื่องชั่งน้ำหนักมอร์ตาร์ (ภาพที่ 3.7)
 - 5) เครื่องผสม (Mixer) มอร์ตาร์จีโอโพลีเมอร์
 - 6) นาฬิกาจับเวลา
 - 7) ตู้อบไฟฟ้า

8) แท่งกระทุ้ง (Tampers): ขนาดหน้าตัด 5 x 5 ตารางเซนติเมตร ยาว 5-6 นิ้วปลายตัดเรียบและหน้าตัดตั้งฉากกับแกนมือจับทำจากวัสดุไม่ดูดซึมน้ำ

9) เกรียง: ทำด้วยเหล็กแบนขอบสันเกรียงเป็นเส้นตรงยาว 100-150 มิลลิเมตร

10) แบบหล่อมอร์ต้าร์ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

(ภาพที่ 3.8)

11) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) รุ่น Philips model PW2400 ด้วยวิธี Wavelength dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry ยี่ห้อ Philips

12) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) รุ่น Diffraktometer D8 ยี่ห้อ Bruker AXS

13) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น JSM-6400 ยี่ห้อ Jeol

14) เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดคละ (Particle size distribution) รุ่น Mastersizer 2000 Ver. 5.22 ยี่ห้อ Malvern Instruments

3. การทดสอบการชะละลายของของเสียซีลิกา

1) ตะแกรงขนาด 0.5 – 5.0 มิลลิเมตร

2) ขวดพลาสติกขนาด 1 ลิตร

3) เครื่องชั่ง

4) กระบวยตวงขนาด 500 มิลลิลิตร

5) เครื่องเขย่าแบบหมุน 360 องศา

6) เครื่องวัดพีเอช

7) เครื่องอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

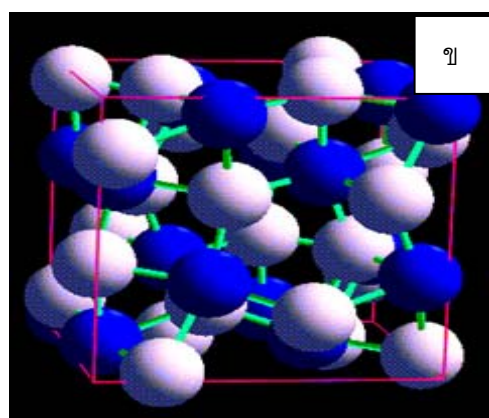
รุ่น ULTIMA 2 ยี่ห้อ JY JOBIN IVON



ภาพที่ 3.1 ทราชแม่ไม้



ภาพที่ 3.2 ของเสียดสีที่ใช้ในการวิจัย



ภาพที่ 3.3 (ก) อะลูมินาบริสุทธิ์ และ (ข) โครงสร้างของอะลูมินาบริสุทธิ์ (Al_2O_3)
(Burshtein และ Adler, 2555: online)



ภาพที่ 3.4 เครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill)



ภาพที่ 3.5 เครื่องร้อนเขย่าอัตโนมัติ



ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



ภาพที่ 3.7 เครื่องชั่งน้ำหนักมอร์ตาร์



ภาพที่ 3.8 แบบหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2 ตัวแปรที่ใช้ทดลอง

3.2.1 ตัวแปรอิสระ

1. อัตราส่วนของของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ต่อปริมาตรรวม
2. อัตราส่วนผสมระหว่างของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ต่อสารละลาย
3. ระยะเวลาในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.2.2 ตัวแปรตาม

1. ค่ากำลังรับแรงอัด

3.2.3 ตัวแปรควบคุม

1. ชนิดของวัสดุผสม (ของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์)
2. อัตราส่วนระหว่างวัสดุผสมต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75

3. อุณหภูมิในการบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 การทดลองตอนที่ 1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย

3.3.1.1 การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบได้แก่ ของเสียซิลิกา

ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าพีเอช ความละเอียด ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

3.3.1.2 การออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์โดยเปรียบเทียบการใช้วัสดุประสาน เปรียบเทียบกับชุดควบคุม ทำการออกแบบส่วนผสมโดย

1. ปรับเปลี่ยนปริมาณของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ เท่ากับ 45:15, 40:20, 30:30, 47:23, 53:17 และ 35:35 และวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

2. ปรับเปลี่ยนปริมาณของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ A1(60:20:20) A2(60:10:20) B1(70:10:20) และ B2(70:20:10) โดยมีอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อทรายคงที่ที่ 1:2.75 ที่ระยะเวลาการทดสอบกำลังรับแรงอัด 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

3.3.1.3 การเตรียมวัสดุผสม

ล้างทรายด้วยน้ำสะอาด แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103–105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อใช้ผสมกับวัสดุประสาน ด้วยอัตราส่วนมวลโดยมวล เท่ากับ 1 ต่อ 2.75

3.3.2 การทดลองตอนที่ 2 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.3.2.1 ทดสอบการชะละลายโลหะหนัก

ทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (ภาคผนวก ก.1) นำน้ำชะละลายมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่องอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

3.3.2.2 วิเคราะห์การกระจายขนาดผลของวัตถุดิบ

วิเคราะห์การกระจายขนาดผลของของเสียซิลิกาด้วยวิธี Sieve Analysis ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136-06, 2008 ทำการทดลองที่ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังนี้

1. บดเสียซิลิกา ประมาณ 800 กรัม ด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) เป็นเวลา 2 ชั่วโมงต่อ 1 ครั้ง
2. คัดแยกขนาด ด้วยใช้เครื่องร่อนเย้าคัดขนาด (Sieve analysis) ที่มีขนาดต่างๆ โดยเรียงจากตะแกรงช่องใหญ่อยู่บนไปช่องเล็กสุดอยู่ล่างตามขนาดดังนี้ ขนาดเบอร์ 50 เมช, 100 เมช, 150 เมช และ 200 เมช ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 3.6 และหาค่าการกระจายขนาดของของเสียซิลิกา (Particle size distribution) ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000

3.3.2.3 วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ

วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบของของเสียซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) และวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นของวัตถุดิบ

3.3.3 การทดลองตอนที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้ของเสียซิลิการ่วมกับอะลูมินาบริสุทธิ์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต

3.3.3.1 การทดลองที่ 3.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยแปรเปลี่ยนสัดส่วนวัสดุประสาน(ของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และ ระยะเวลาทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ทำการทดลองส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง) แทนค่าของวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ A1(60:20:20) A2(60:10:20) B1(70:10:20) และ B2(70:20:10) แปรระยะเวลาในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน วัดค่าน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C29, 1996 โดยการชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง หาค่าปริมาตรของก้อนตัวอย่าง ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/C 109M-07, 2008 และพิจารณากำลังรับแรงอัดเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา เปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมที่ออกแบบไว้ที่ 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีอัตราส่วนปริมาณของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ ดังตารางที่ 3.1 การทดลอง

ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และมีการออกแบบส่วนผสมจากปริมาณของของเสียซีลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 การหาอัตราส่วนปริมาณของเสียซีลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์

ปริมาณของเสียซีลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์	อัตราส่วนระหว่างปริมาณของเสียซีลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์		องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยมวล)			
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
60	45:15	3:1	44.80	15.01	0.05	0.01
	40:20	2:1	39.82	20.01	0.04	0.01
	30:30	1:1	29.87	30.02	0.03	0.01
70	53:17	3:1	52.76	17.01	0.06	0.01
	47:23	2:1	46.79	23.01	0.05	0.01
	35:35	1:1	34.84	35.00	0.04	0.01

ตารางที่ 3.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในสภาวะต่างๆ

อัตราส่วนวัสดุประสาน (ของเสียซีลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์)	อัตราส่วนสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์	อัตราส่วนสารละลาย โซเดียมซิลิเกต
60	20	20
60	20	10
70	20	10
70	10	20

หมายเหตุ : ทำการทดลองส่วนผสมละ 5 ตัวอย่างโดยมีอัตราส่วนของทรายคงที่ที่ 1:2.75

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนปริมาณอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

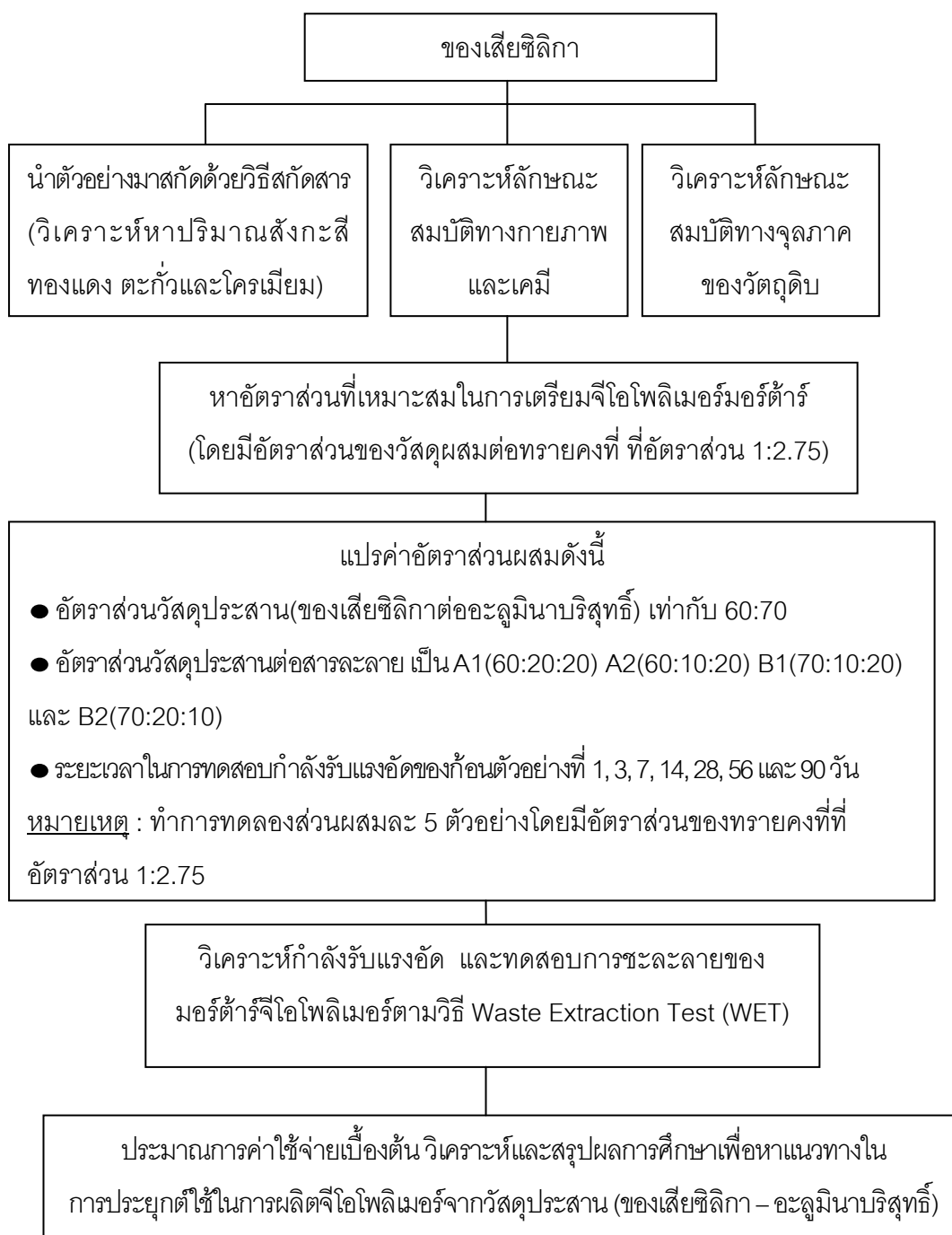
อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต	กำลังรับแรงอัด (กก/ซม ²)						
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	90 วัน
60:20:20							
60:20:10							
70:20:10							
70:10:20							

หมายเหตุ : ทำการทดลองส่วนผสมละ 5 ตัวอย่างโดยมีอัตราส่วนของทรายคงที่ที่ 1:2.75

3.3.4 การทดลองที่ 4 นำมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมด้วยสัดส่วนที่เหมาะสมมาทำการทดสอบการชะละลายตามวิธี WET ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (ภาคผนวก ก.1) แล้วนำน้ำชะละลายไปวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

3.3.5 การทดลองที่ 5 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของวัสดุผสมของของเสียซีลิกาในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างประเภทเดียวกัน ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ตลอดจนคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดของเสียซีลิกาในหน่วยราคาบาทต่อตันของเสีย และนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างโดยใช้ราคาวัสดุอ้างอิงจากราคา ณ ปัจจุบัน จากสำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า เช่น ทราเวลเอเยนซีราคาลูกบาศก์เมตรละ 433.33 บาท ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ราคาถุงละ 110.00 บาท www.price.moc.go.th [มกราคม, 2555]

3.4 ผังสรุปงานวิจัย ภาพรวมของการวิจัยสามารถสรุปดังแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 สรุปกระบวนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

การรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ของโรงงานรีไซเคิลกากของเสียด้วยกระบวนการดีโพลีเมอร์ไรเซชันก่อเกิดของเสียซิลิกาประมาณร้อยละ 30-40 งานวิจัยนี้จึงนำของเสียซิลิกามาใช้ประโยชน์ในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) วิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction, XRD) วิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดคละของของเสียซิลิกา (Particle size distribution) ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP) จากนั้นจึงแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของของเสียซิลิกาต่ออะลูมินาบริสุทธิ์ อัตราส่วนของของเสียซิลิกา ร่วมกับอะลูมินาบริสุทธิ์ต่อสารละลายและระยะเวลาในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากการทดลองได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ คือ ของเสียซิลิกาซึ่งได้รับจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสีย ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการดีโพลีเมอร์ไรเซชันในการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วเพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยองค์ประกอบหลักของโครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์มีความแข็งแรง คือ ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) และ อะลูมินาไดออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งลักษณะสมบัติของวัสดุจีโอโพลีเมอร์ตามประเภทของการใช้งานจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนอะตอมของ Si:Al (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2555: ออนไลน์) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกาด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ของเสียซิลิกามีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) เป็นหลัก ถึงร้อยละ 71.3 และเนื่องจากมี ซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 70 ของเสียดังกล่าวจึงมีลักษณะสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (ธีรวัฒน์ สินศิริ, 2553) แต่มีอะลูมินา (Al_2O_3) น้อยกว่าร้อยละ 0.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซีลิกาวิเคราะห์ด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
	ของเสียซีลิกา	มาตรฐานวัสดุปอซโซลาน
Na ₂ O	<0.01	-
MgO	<0.01	-
Al ₂ O	<0.01	-
SiO ₂	71.3	>70
P ₂ O ₃	<0.01	-
SO ₃	<0.01	-
Cl	<0.01	-
K ₂ O	<0.01	-
CaO	0.02	-
Cr ₂ O ₃	0.03	-
MnO ₂	<0.01	-
Fe ₂ O ₃	0.08	-
CuO	<0.01	-
ZrO ₂	<0.01	4.0
%LOI*	28.6	10

ที่มา: * มาตรฐานวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618-08

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซีลิกาเปรียบเทียบกับวัสดุตั้งต้นต่างๆ ในงานวิจัยด้านคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์ ในตารางที่ 4.1 พบว่าของเสียซีลิกามีปริมาณซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) มากกว่า แก้วถ่านหินจากกระบวนการต่างๆ และปูนขาว ในงานวิจัยของ Chindaprasirt (2011) Temuujin (2010) และ Luna Galiano (2011) แต่มีซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) น้อยกว่าแก้วเคลือบเปลือกไม้ ในงานวิจัยของ Songpiriyakil (2010) นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ของเสียซีลิกายังมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าร้อยละ 0.1 โดยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะเหนียวทำให้เกิดพันธะระหว่างคาร์บอน ซิลิกอนและไฮโดรเจน (C-S-H) ดังที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา

ไฮดรอกซิล จะทำให้ปริมาณ ซิลิกอน (Si) ลดลงจึงมีผลต่อการเกิดพันธะโพลีเมอร์ในกระบวนการจีโอโพลีเมอร์ไรเซชัน ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์ ทำให้ความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดน้อยลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tailby และคณะ (2010)

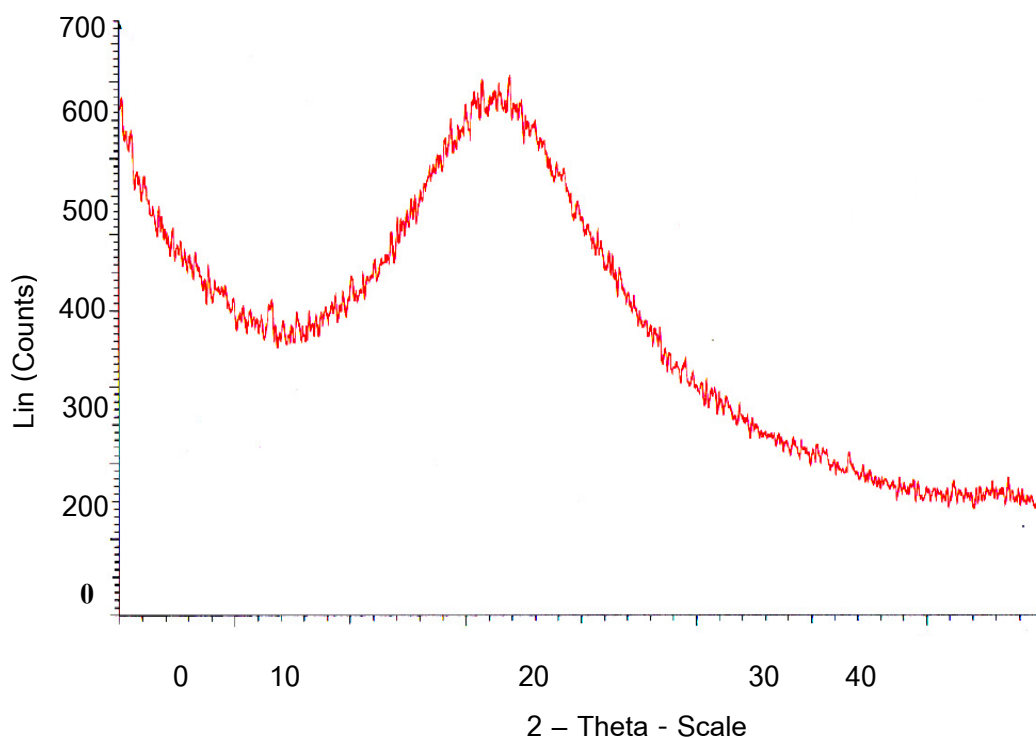
ในงานวิจัยนี้จึงมีการเพิ่มปริมาณ อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) โดยใช้อะลูมินาบริสุทธิ์ เพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาของเสียซิลิกาเป็นวัสดุตั้งต้นและเป็นวัตถุดิบหลักในการเชื่อมประสานเป็นสารประกอบจีโอโพลีเมอร์อินทรีย์ ในปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550) ซึ่งสามารถนำไปใช้ทดแทนวัสดุตั้งต้นอื่นและพัฒนาคุณภาพของวัสดุในงานด้านคอนกรีตและด้านจีโอโพลีเมอร์ต่อไป

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นฐานของวัสดุพบว่า ของเสียซิลิกาซึ่งมีสีเทาดำ มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.85 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.16 เปรียบเทียบกับวัสดุอื่นในงานด้านคอนกรีตและงานด้านจีโอโพลีเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

และผลการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นของของเสียซิลิกาด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction, XRD) พบว่า เส้นที่ปรากฏในกราฟมีลักษณะค่อนข้างราบและไม่ปรากฏพีคของโครงสร้างที่เป็นผลึกเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลในรูปแบบที่ไม่เป็นผลึก ดังนั้นของเสียซิลิกาจึงมีลักษณะเป็นของแข็งอสัณฐาน (Amorphous) คือไม่เป็นผลึก ดังแสดงในภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นฐานของวัสดุ (ของเสียซิลิกา)

ลักษณะสมบัติทางกายภาพ	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X} \pm \text{SD}$)
ความละเอียด ($\text{ซม}^2/\text{ก.}$)	139,870	139,957	139,968	$139,932 \pm 53.69$
ความหนาแน่น ($\text{กก.}/\text{ม}^3$)	229.8	231.2	230.0	230.3 ± 0.76
ความถ่วงจำเพาะ	2.14	2.16	2.19	2.16 ± 0.03
ค่าพีเอช	6.88	6.82	6.86	6.85 ± 0.03
สี	เทาดำ			



ภาพที่ 4.1 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของของเสียซิลิกา

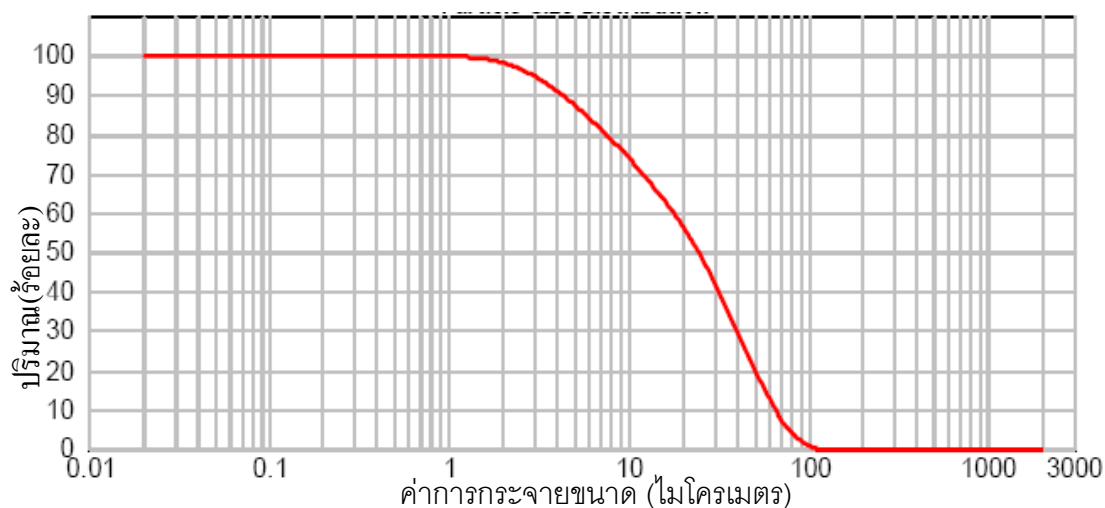
จากงานวิจัยที่ผ่านมาของณัฐพล เศรษฐโอฬาร, 2553 ได้มีการวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของของเสียซิลิกาเบื้องต้นพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 288.133 ไมโครเมตร โดยขนาดของของเสียซิลิกามีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่และไม่เหมาะสมในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้จึงมีการพัฒนาขนาดของของเสียซิลิกาโดยการบดเสียซิลิกา ประมาณ 800 กรัม ด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) เป็นเวลา 2 ชั่วโมงต่อครั้ง และทำการคัดแยกขนาด ด้วยใช้เครื่องร่อนเย้าคัดขนาด (Sieve analysis) ที่มีขนาดต่างๆ โดยเรียงจากตะแกรงช่องใหญ่อยู่บนไปช่องเล็กสุดอยู่ล่างตามขนาดดังนี้ ขนาดเบอร์ 50 เมช, 100 เมช, 150 เมชและ 200 เมช ตามลำดับและหาค่าการกระจายขนาดคละของของเสียซิลิกา (Particle size distribution) ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 จากผลการวิจัยสามารถพัฒนาขนาดคละของของเสียซิลิกาได้โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24.461 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ ภาพที่ 4.2 ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Wan และคณะ (2007) มีการใช้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน ซึ่งมีผลต่อให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว และผลผลิตที่เกิดขึ้นจะไปเติมเต็มส่วนที่ว่างระหว่างมอร์ต้าร์ให้หนาแน่นเพิ่มขึ้น เพื่อให้ของเสียซิลิกามีลักษณะสมบัติทางกายภาพคล้ายวัสดุปอซโซลานจึงได้ทำการคัดขนาดผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 325 เมช (45 ไมโครเมตร) โดยนำส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช ไปใช้ในงานวิจัย (เพื่อให้ได้ขนาดเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร) เนื่องจากขนาดดังกล่าวจะส่งเสริมให้ของเสียซิลิกาเป็นวัสดุ

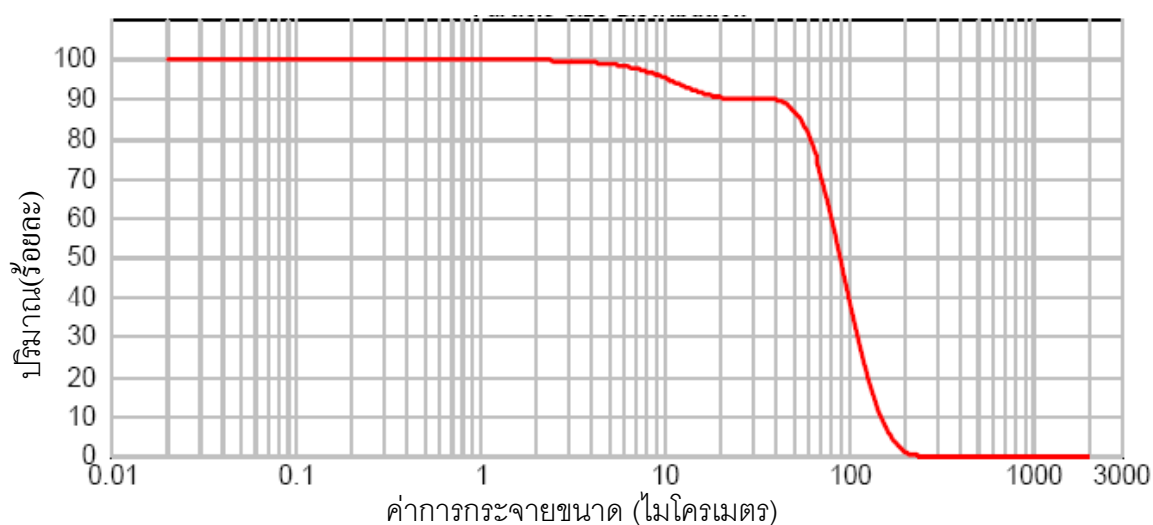
ปอซโซลานมากขึ้นตามมาตรฐาน ASTM C618-08, 2008 และในงานวิจัยนี้ได้หาค่าการกระจายขนาดผลของอะลูมินาบริสุทธิ์ที่ใช้ในการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 90.712 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.2-4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดผลของของเสียซีลิกา (หลังบด) และอะลูมินาบริสุทธิ์

ขนาดผล	D(0.1) (ไมโครเมตร)	D(0.5) (ไมโครเมตร)	D(0.9) (ไมโครเมตร)
ของเสียซีลิกา	4.274	24.461	64.875
อะลูมินาบริสุทธิ์	34.751	90.712	149.368



ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดผลของของเสียซีลิกา (หลังบด)



ภาพที่ 4.3 การกระจายขนาดผลของอะลูมินาบริสุทธิ์

4.1.2 ผลการศึกษาการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction

Test(WET) ของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ผลการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test(WET) ของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย(ของเสียซีลิกา) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วพ.ศ. 2548 (ภาคผนวก ก.1) โดยนำน้ำชะละลายมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่องอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมา(Inductively Coupled Plasma, ICP) และวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของของเสียซีลิกาด้วยวิธี Sieve Analysisตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136 – 06 ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

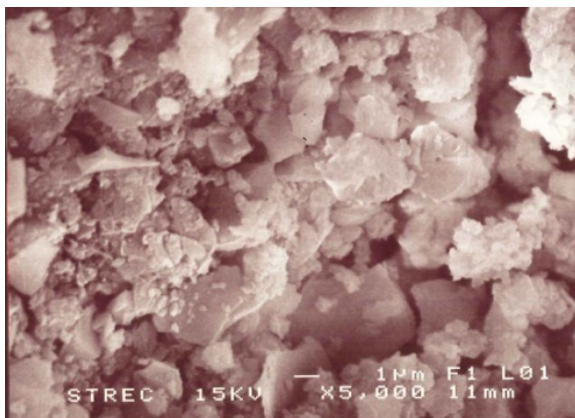
ผลการวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักพบว่าของเสียซีลิกามีโลหะหนัก คือ ทองแดง (Cu)เท่ากับ 1.702 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสี (Zn)ตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) น้อยกว่า < 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4.4ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่พบมีปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐาน Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ ของเสียซีลิกาที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงไม่จัดเป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักของเสียซีลิกาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

ประเภท	ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก(มล./ล)			
	ทองแดง (Cu)	สังกะสี (Zn)	ตะกั่ว (Pb)	โครเมียม (Cr)
ของเสียซีลิกา	1.702	< 0.1	< 0.1	< 0.1
กำหนดค่า Threshold Limit Concentration (STLC) (มล./ล)	25	250	5.0	5.0

4.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของของเสียซีลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่ามีลักษณะผิวที่เรียบเนียนและขรุขระหลากหลายรูปทรงดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ภาพของของเสี้ยวซิลิกาขยาย 5000 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในการผลิตโดยใช้ของเสี้ยวซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ ทราบ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต

4.2.1 ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของสัดส่วนวัสดุประสาน (ของเสี้ยวซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของเสี้ยวซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ เป็น 45:15, 40:20, 30:30, 47:23, 53:17 และ 35:35 และหล่อก้อนตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร (ทำการทดลองส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง) แทนค่าของวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต ที่ A1(60:20:20) และ B2(70:10:20) แปรระยะเวลาในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วันวัดค่าหน่วยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C29, 1996 และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M-07, 2008 ผลการศึกษาอัตราส่วนปริมาณของเสี้ยวซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์พบว่า อัตราส่วนอะตอมของ Si:Al เท่ากับ 45:15, 30:30, 53:17 และ 35:35 ดังแสดงในภาพที่ 4.5-4.6 มีลักษณะเหลวและเป็นเนื้อเดียวกันแต่ไม่สามารถขึ้นรูปได้หลังถอดออกจากแบบ เนื่องจากอัตราส่วนอะตอมนี้ทำให้ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตอย่างไม่สมบูรณ์ (อุปลักษณะ รัตนศักดิ์, 2549) สำหรับอัตราส่วนอะตอมของ Si:Al เท่ากับ 2:1 มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและสามารถขึ้นรูปได้หลังถอดออกจากแบบดังแสดงในภาพที่ 4.7 เนื่องจากอัตราส่วนอะตอมนี้ทำให้ซิลิกอน (Si) เกิดพันธะกับอะลูมิเนียม (Al) ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si-OAl-O] ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลิไซเลต (Polysialate) เป็นโครงสร้างสามมิติ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์



ภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะผิอรูปร่างลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของอัตราส่วนเสียซิลิกาและอะลูมินา
บริสุทธิ์ ที่ 30:30 และ 35:35 (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:10:20)



ภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะผิอรูปร่างลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของอัตราส่วนเสียซิลิกาและอะลูมินา
บริสุทธิ์ ที่ 45:15 และ 53:17 (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:20:10)

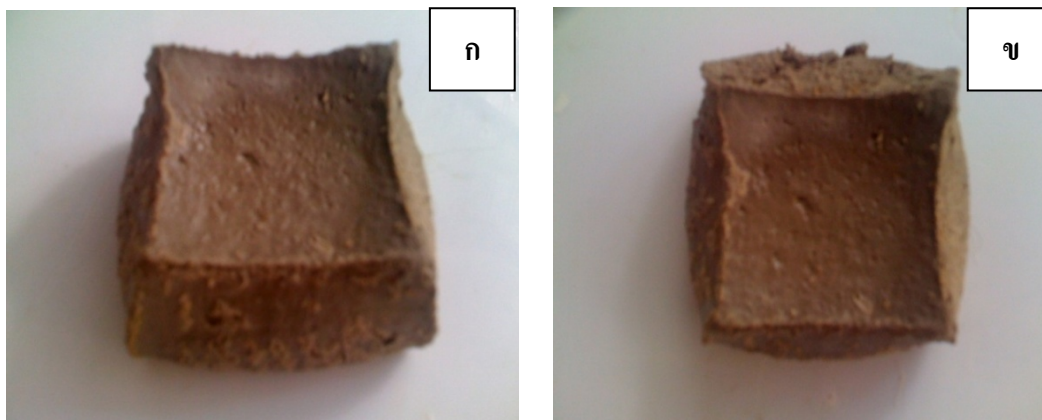


ภาพที่ 4.7 แสดงลักษณะรูปร่างลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของอัตราส่วนเสียซิลิกาและอะลูมินา
บริสุทธิ์ ที่ 40:20 และ 47:23 (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20) และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:10:20)

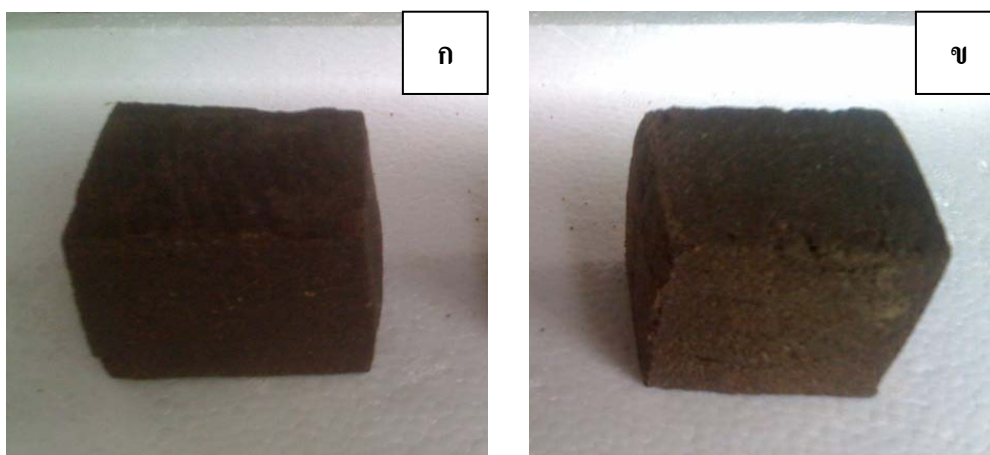
4.2.2 ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยแปรเปลี่ยนสัดส่วนวัสดุประสาน (ของเสียซิลิกา และอะลูมินาบริสุทธิ์ (ในอัตราส่วนอะตอมของ Si:Al เท่ากับ 2:1) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และ ระยะเวลาในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยการหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ทำการทดลองส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง) แทนค่าของวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต ที่ A1(60:20:20), A2(60:10:20), B1(70:20:10) และ B2(70:10:20) แปรระยะเวลาในการทดสอบ กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วันวัดค่าน้ำหนักตาม มาตรฐาน ASTM C29, 1996 และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ตาม มาตรฐาน ASTM C109/C 109M-07, 2008 ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วน A2(60:10:20)และ B1(70:20:10) มีลักษณะไม่จับตัวกันหลังการผสมและหลังจากถอดแบบมีลักษณะผิดปกติทรง ลูกบาศก์ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 จึงไม่มีความเหมาะสมในการนำมาผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์และ ไม่สามารถนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดได้ตามมาตรฐาน ASTM C109-07, 2008 ได้ แต่ อัตราส่วน A1(60:20:20) และ B2(70:10:20) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันหลังการผสมและหลังจาก ถอดแบบมีลักษณะเป็นลูกบาศก์ ดังแสดงในภาพที่ 4.9 จึงมีความเหมาะสมในการนำอัตราส่วน A1(60:20:20) และ B2(70:10:20) มาผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.5 - 4.10 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใน อัตราส่วนของเสียซิลิกาต่ออะลูมินาบริสุทธิ์ เท่ากับ 2:1 ในสัดส่วนของวัสดุประสานต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสม คือ A1(60:20:20) และ B2(70:10:20) โดยน้ำหนัก

จากผลของกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ระยะเวลาการทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วันโดยการหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ทำการทดลอง ส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง) ของอัตราส่วนอัตราส่วน A1(60:20:20)และอัตราส่วน B2(70:10:20) ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.11เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ควบคุม



ภาพที่ 4.8 แสดงลักษณะผิวดรูปทรงลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของ (ก) อัตราส่วน A2 (60:10:20)
และ (ข) อัตราส่วน B1 (70:20:10)



ภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะลูกบาศก์หลังจากถอดแบบของ (ก) อัตราส่วน A1 (60:20:20)
และ (ข) อัตราส่วน B2 (70:10:20)

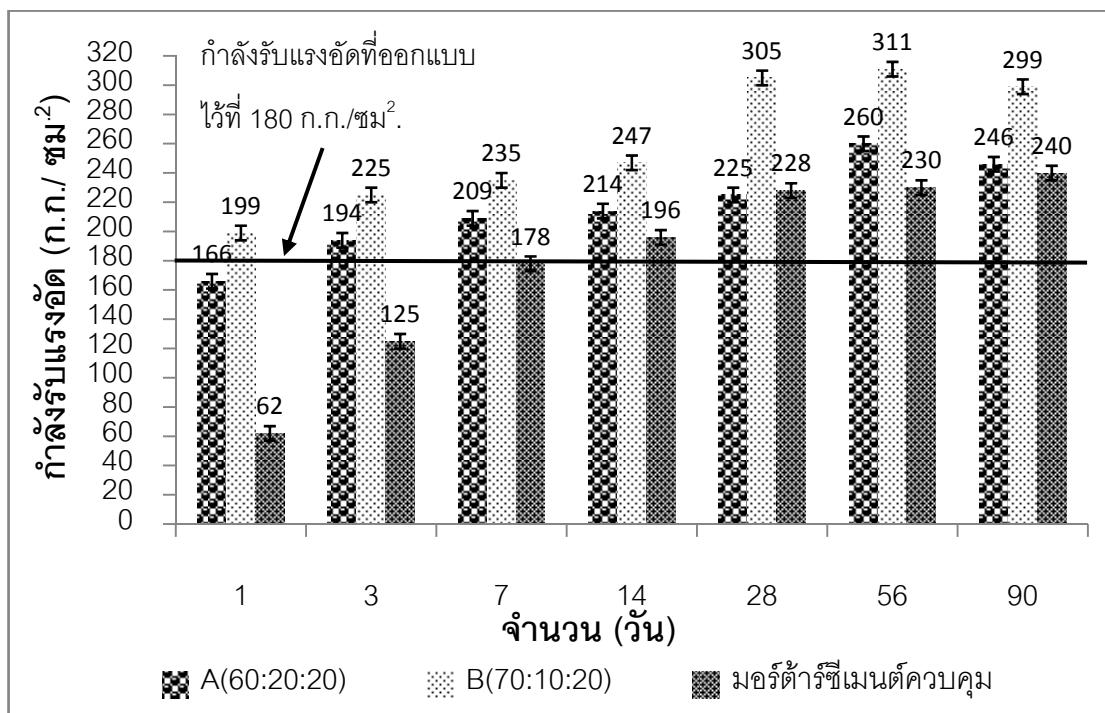


ภาพที่ 4.10 ก้อนตัวอย่าง ก) ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ข) อัตราส่วน A1 (60:20:20)
และ ค) อัตราส่วน B2 (70:10:20)

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ในอัตราส่วน A1 (60:20:20), B2 (70:10:20) และมอร์ต้าร์ซีเมนต์ควบคุม ที่ระยะเวลาการทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ระยะเวลา การทดสอบ (วัน)	มอร์ต้าร์ A1 (60:20:20) ($\bar{X} + SD$)	มอร์ต้าร์ B2 (70:10:20) ($\bar{X} + SD$)	มอร์ต้าร์ ซีเมนต์ควบคุม ($\bar{X} + SD$)
1	165.9 ± 6.80 n=3	199.2 ± 5.71 n=4	62.2 ± 3.97 n=3
3	194.2 ± 3.60 n=3	224.8 ± 4.54 n=4	124.8 ± 2.13 n=4
7	209.1 ± 4.25 n=3	235.3 ± 4.52 n=4	178.3 ± 3.04 n=4
14	213.9 ± 5.88 n=3	246.6 ± 5.43 n=3	196.4 ± 2.80 n=4
28	255.4 ± 11.43 n=3	304.8 ± 11.40 n=3	228.1 ± 12.39 n=3
56	260.2 ± 5.01 n=3	310.7 ± 7.20 n=3	230.4 ± 12.39 n=3
90	245.8 ± 10.81 n=4	298.6 ± 11.16 n=4	239.8 ± 20.48 n=3

หมายเหตุ n = จำนวนตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ



ภาพที่ 4.11 กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่ระยะเวลาการทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วันของ อัตราส่วน A1 (60:20:20) และอัตราส่วน B2 (70:10:20) เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ควบคุม

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.11 และตารางที่ 4.5 พบว่าในวันแรกของการทดสอบกำลังรับแรงอัดมีเพียงอัตราส่วน B2(70:10:20) ที่ผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้แล้วค่อยพัฒนากำลังรับแรงอัดขึ้นถึงวันที่ 56 และสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดวันที่ 56 เท่ากับ 310.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราส่วน A1(60:20:20) ผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ในวันที่ 3 ของระยะเวลาทดสอบ โดยมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดขึ้นถึงวันที่ 56 และสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดวันที่ 56 เท่ากับ 260.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ในวันที่ 14 ของระยะเวลาทดสอบซึ่งมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 90 สามารถรับแรงอัดได้สูงสุดวันที่ 90 เท่ากับ 239.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และยังพบอีกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมยังมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดขึ้นอีก เนื่องจากว่ายังมีปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง (ปริญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2547) ซึ่งแตกต่างจากการพัฒนากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วน A1(60:20:20) และอัตราส่วน B2(70:10:20) ซึ่งมีพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงสุดวันที่ 56 ของระยะเวลาทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับงานวิจัยอื่น (ksc)

ระยะเวลา ทดสอบ	งานวิจัยนี้		Songpiriyakij และคณะ 2011	งานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ 2011			
สัดส่วน	A	B	C	D	E	F	G
1	165.9	199.2	-	-	-	-	-
3	194.2	224.8	555	-	-	-	-
7	209.1	235.3	555	340	269	265	247
14	213.9	246.6	571	-	-	-	-
28	255.4	304.8	581	-	-	-	-
56	260.2	310.7	-	-	-	-	-
90	245.8	298.6	-	-	-	-	-

หมายเหตุ	A	= Silica waste + Alumina : NaOH (10 M): Na ₂ SiO ₃ = 60:20:20
	B	= Silica waste + Alumina : NaOH (10 M): Na ₂ SiO ₃ = 70:10:20
	C	= อัตราส่วนเถ้าถ่านหิน FA อัตราส่วนเปลือกไม้ ความเข้มข้น NaOH (M) อัตราส่วน NaOH ต่อ NaSi ₂ O ₃ = 65FA40 18 M (2.5)
	D	= อัตราส่วน PCC/FBC ใน NaOH (10 M), Na ₂ SiO ₃ = 60/40
	E	= อัตราส่วน PCC/FBC ใน NaOH (10 M), Na ₂ SiO ₃ = 40/60
	F	= อัตราส่วน PCC/FBC ใน NaOH (10 M), Na ₂ SiO ₃ = 20/80
	G	= อัตราส่วน PCC/FBC ใน NaOH (10 M), Na ₂ SiO ₃ = 0/100

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ, 2011 ในสารละลายชนิดเดียวกันความเข้มข้นเท่ากัน พบว่า กำลังรับแรงอัดในงานวิจัยของ Chindaprasirt และคณะ, 2011 มีค่าสูงกว่า เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นทั้งสองชนิด มีค่าการกระจายขนาดคละเฉลี่ยที่ 28 และ 24 ไมครอน ในขณะที่วัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้มีค่าการกระจายขนาดคละเฉลี่ยที่ 24 และ 90 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ S. Songpiriyakij และคณะ 2011 ในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิในการบ่มและเวลาบ่ม พบว่า กำลังรับแรงอัดในงานวิจัยของ Songpiriyakij และคณะ 2011 มีค่าสูงกว่า เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นมีขนาดน้อยกว่า 45 ไมครอน ในสารละลายชนิดเดียวกันและความเข้มข้นของสารละลายไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์ ในศึกษาของงานวิจัยของ Songpiriyakij และคณะ 2011 มีการใช้ Rice Husk and Bark Ash (RHBA)

เป็นวัสดุตั้งต้นหลักซึ่งมี SiO_2 สูงถึงร้อยละ 84.75 ซึ่งการเพิ่ม RHBA ในวัสดุ จะเป็นการเพิ่มปริมาณ Si เพื่อให้เกิดพันธะ O-Si-O ในโครงสร้างให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ส่งผลให้สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมที่สุดคือ 15.9 ในขณะที่อัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ 2:1

4.3 ผลการศึกษามอร์ตาร์ซีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม ด้วยการทดสอบการชะละลายตามวิธี WET ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วพ.ศ. 2548 (ภาคผนวก ก.1) แล้วนำน้ำชะละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัลเบิลพลาสมา(ICP)

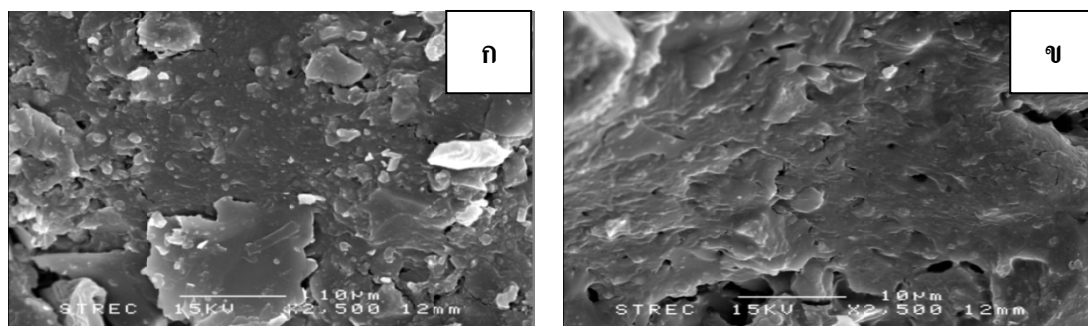
จากการทดสอบการชะละลายตามวิธี WET ของมอร์ตาร์ซีโอโพลิเมอร์ที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า เมื่อนำของเสียซีลิกามาหล่อเป็นมอร์ตาร์มีปริมาณโลหะหนักทองแดง (Cu) จาก 1.702 มิลลิกรัมต่อลิตรลดลงจนกระทั่งน้อยกว่า 0.1 ในอัตราส่วน A1 (60:20:20) และอัตราส่วน B2 (70:10:20) เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุซีโอโพลิเมอร์ที่มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ (Zeolite) หรือเฟลตสปาธอยด์ (Feldspathoids) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับของเสียทางเคมีได้ดี หรือทำของเสียเป็นก้อน (Solidify) ของเสียทางเคมีประเภท ไอออนของโลหะหนักและกากของเสียนิวเคลียร์ โดยของเสียที่มีพิษจะถูกกักอย่างแน่นหนาภายในโครงสร้างสามมิติของวัสดุซีโอโพลิเมอร์เพื่อไม่ให้ชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2549)

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การชะละลายโลหะหนักของของเสียซีลิกา เมื่อหล่อเป็นก้อนมอร์ตาร์ในอัตราส่วน A1(60:20:20) และอัตราส่วน B2(70:10:20) เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

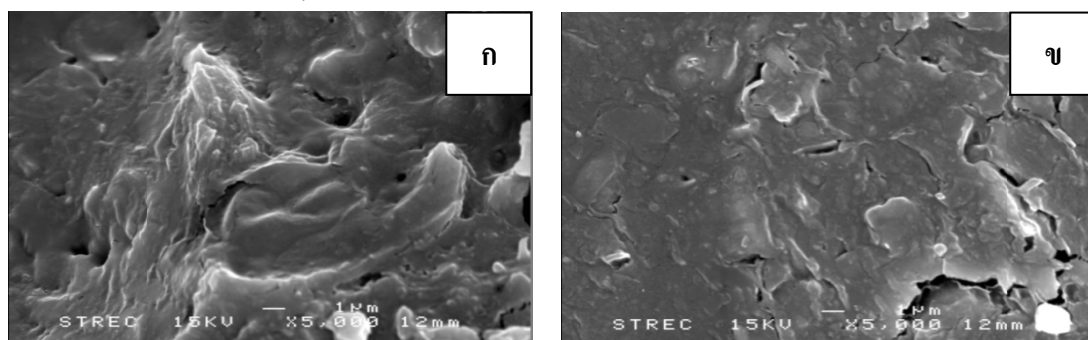
ประเภท	ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก(มล./ล)			
	ทองแดง (Cu)	สังกะสี (Zn)	ตะกั่ว (Pb)	โครเมียม (Cr)
A(60:20:20)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
B(70:10:20)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
กำหนดค่า Threshold Limit Concentration (STLC) (มล./ล)	25	250	5.0	5.0

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของมอร์ต้าร์อัตราส่วน A1(60:20:20) และอัตราส่วน B2(70:10:20) ดังแสดงในภาพที่ 4.12 – 4.13 ตามลำดับ พบว่าลักษณะโครงสร้างของอัตราส่วน B2(70:10:20) มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าและมีรูพรุนน้อยกว่า แต่ลักษณะโครงสร้างของอัตราส่วน A1 (60:20:20) ค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกันและมีรูพรุนมากกว่าอัตราส่วน B2(70:10:20) โดยความเป็นเนื้อเดียวกันและความหนาแน่นมีผลต่อการรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ คือ การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมประสานระหว่างพันธะที่เหมาะสม จะเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิวและเพิ่มความหนาแน่นภายในโครงสร้างซีโอโพลิเมอร์เป็นผลให้มีความสามารถรับกำลังรับแรงอัดได้สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเถียรศักดิ์ กลัปประสิทธิ์ (2549) และ Nazari และคณะ, 2011

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ต้าร์(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2554) และซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของของเสียซีลิกา (ณัฐพล เศรษฐโอฬาร, 2553) พบว่าลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของซีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) และหนาแน่นมากกว่าโครงสร้างทางกายภาพของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของของเสียซีลิกา เนื่องจากเกิดซีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของซีโอโพลิเมอร์ในขณะเดียวกันที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จึงมีการใช้ซิลิกอนในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและซีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ส่งผลให้เกิดโครงสร้างผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์และช่องว่างระหว่างช่องภายในโครงสร้างสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tailby และคณะ, 2010.



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคขยาย 2500 เท่าของมอร์ต้าร์ (ก) A1(60:20:20) และ (ข) B2(70:10:20)



ภาพที่ 4.13 โครงสร้างทางจุลภาคขยาย 5000 เท่าของมอร์ต้าร์ (ก) A1(60:20:20) และ (ข) B2(70:10:20)

4.4 ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของของเสียซิลิกาในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

จากการศึกษา การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากของเสียซิลิกาในหน่วยบาทต่อก้อนพบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมมีราคา 2.04 บาทต่อก้อนมอร์ตาร์อัตราส่วน A1(60:20:20) มีราคา 2.49 บาทต่อก้อน และมอร์ตาร์อัตราส่วน B2(70:10:20) มีราคา 3.93 บาทต่อก้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบราคาของมอร์ตาร์ทั้ง 3 ชนิดในการผลิตต่อก้อน พบว่า มอร์ตาร์อัตราส่วน A1(60:20:20) มีราคาที่สูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม 0.37 บาท และในมอร์ตาร์อัตราส่วน B2(70:10:20) มีราคาที่สูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม 1.98 บาท

ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มีสารเคมี (อะลูมินาบริสุทธิ์ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์) เป็นองค์ประกอบ อีกทั้งราคาค่าพลังงานในการอบ อบแห้งและการคัดขนาดของเสียซิลิกาทำให้ของเสียซิลิกามีราคา 14.52 บาท/ก.ก. (14,520 บาท/ลบ.ม.) แต่การใช้ของเสียซิลิกาเป็นวัสดุในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียซิลิกา 8,000 บาท/ตัน เป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในปัจจุบันลงได้ โดยนำมาใช้ประโยชน์เชิงประยุต์เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งสามารถใช้ได้ในการก่อสร้าง อีกทั้งยังเป็นการลดมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อันเป็นสาเหตุหลักของภาวะเรือนกระจก

ค่าใช้จ่ายในการผลิตมอร์ตาร์จากของเสียซิลิกาในงานด้านคอนกรีตและซีเมนต์ ในการประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกาฟุ่มมาใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป ในงานวิจัยของณัฐพล เศรษฐโอฬารโดยราคาค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม เท่ากับ 7,300 บาท/ลบ.ม. ราคาค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตผสมของเสียซิลิกาเท่ากับ 4,380 บาท/ลบ.ม. ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ลูกบาศก์เมตรละ 2,920 บาท (ลดค่าใช้จ่ายลงประมาณร้อยละ 40)

งานวิจัยที่ผ่านมาด้านจีโอโพลิเมอร์ไม่นิยมการประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เนื่องจากงานวิจัยด้านจีโอโพลิเมอร์ มุ่งเน้นเรื่องการนำไปใช้งานและกำลังรับแรงอัดเป็นหลัก งานวิจัยนี้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ในด้านจีโอโพลิเมอร์ และไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของณัฐพล เศรษฐโอฬาร เนื่องจากการใช้ของเสียซิลิกาในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

ตารางที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากของเสียซีลิกา (บาท/ก้อน)

ค่าใช้จ่าย	ราคาต่อหน่วย	ซีเมนต์มอร์ตาร์ ควบคุม บาท/ก้อน		มอร์ตาร์A1 (60:20:20) บาท/ก้อน		มอร์ตาร์ B2(70:10:20) บาท/ก้อน	
		จำนวน (กรัม)	ราคา (บาท)	จำนวน (กรัม)	ราคา (บาท)	จำนวน (กรัม)	ราคา (บาท)
ปูนซีเมนต์	4.23 บาท/กก.	91.35	0.39	-	-	-	-
ทรายอบแห้ง	7.78 บาท/กก.	199.37	1.65	165	1.28	192.5	1.50
ของเสียซีลิกา	14.52 บาท/กก.	-	-	40	0.58	47	0.68
อะลูมินาบริสุทธิ์	85.00 บาท/กก.	-	-	20	1.70	23	1.95
โซเดียมซิลิเกต	50.00 บาท/ลิตร	-	-	2.44	0.12	2.44	0.12
โซเดียมไฮดรอกไซด์	16.03 บาท/ลิตร	-	-	8.16	0.13	4.08	0.06
ค่าจัดการของเสีย	8.00 บาท/กก.	-	-	40	0.32	47	0.38
ราคาค่าวัตถุดิบ/ก้อน	-	-	1.95 [a]	-	2.49 [b]	-	3.93 [c]

ตารางที่ 4.9 ค่าใช้จ่ายพลังงานของเสียซีลิกาและทราย(บาท/กก.)

ประเภทค่าพลังงาน	ของเสียซีลิกา	ทราย
*ค่าพลังงานในการบด 2.7บาท/ชม. [d]	2 ชม. = 5.4 บาท	-
*ค่าพลังงานเตาอบ 5.4บาท/ชม. [e]	1 ชม. = 5.4 บาท	1 ชม. = 5.4 บาท
*ค่าพลังงานที่ใช้ในการคัด ขนาด*** 0.54บาท/ชม. [f]	10 นาที= 0.09 บาท	10 นาที= 0.09 บาท
ค่าวัสดุดิบบาท/กก.	-	2.31
รวมค่าใช้จ่ายของพลังงาน	10.89 บาท	5.49
รวมค่าใช้จ่ายของพลังงาน บาท/กก.	14.52	7.78

หมายเหตุ

*กำลังไฟฟ้าของเครื่องบด = 1.50 กิโลวัตต์

*กำลังไฟฟ้าของเตาอบ = 3.00 กิโลวัตต์

*กำลังไฟฟ้าของเครื่องเครื่องเขย่าคัดขนาด= 0.3กิโลวัตต์

การคำนวณ

ราคาค่าวัตถุดิบ/ก้อน [a] = ราคานูชีเมนต์(บาท/ก้อน)+ราคาทรายอบแห้ง(บาท/ก้อน)
- ค่าจัดการของเสีย

[b] , [c] = ราคายาอบแห้ง(บาท/ก้อน)+ราคาของเสียซีลิกา (บาท/ก้อน)
+ราคาอะลูมินาบริสุทธิ์(บาท/ก้อน)+ราคาโซเดียมซิลิเกต
(บาท/ก้อน) +ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์(บาท/ก้อน)-
ค่าจัดการของเสีย

ราคาของพลังงาน = [d]*จำนวนชั่วโมงทำงาน + [e]*จำนวนชั่วโมงทำงาน
+ [f]*จำนวนชั่วโมงทำงาน

ราคาของพลังงาน/ก.ก. = ค่าใช้จ่ายของพลังงาน * (0.75 ก.ก./ 1 ก.ก.)

***ของเสียซีลิกาที่บดแล้ว 0.8 ก.ก. ผ่านการคัดขนาดได้ 0.75 ก.ก.

-ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม 1 ลบ.ม. ใช้ปูนซีเมนต์ 232.5 ก.ก.

-หน่วยค่าไฟฟ้า(Unit) = กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kW-hr), ค่าไฟฟ้าคิดราคาเท่ากับ 1.8 บาทต่อหน่วย
(การไฟฟ้านครหลวง, 2555: ออนไลน์)

-ราคาวัสดุไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม ไม่รวมค่าขนส่ง (สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า, 2554 : ออนไลน์)

-ค่าจัดการของเสียซีลิกา ราคา 8000 บาท/ตัน (สิทธิชัย สุนทรเป้า, สัมภาษณ์, 5 มีนาคม 2555)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัย เรื่อง การนำของเสียซิลิกามาใช้ประโยชน์ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้ของเสียซิลิกาเป็นวัตถุดิบ ซึ่งของเสียซิลิกาได้จากการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้ว เพื่อนำน้ำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่โดยกระบวนการดีโพลิเมอร์ไรเซชันของโรงงานรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคน พบว่าสามารถนำมาใช้ประยุกต์ในการก่อสร้างได้ อีกทั้งยังเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียอุตสาหกรรมที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดและจัดการ และผลกระทบจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยพบว่า ของเสียซิลิกามีองค์ประกอบของซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นหลัก ถึงร้อยละ 71.3 และมีลักษณะสมบัติเป็นวัสดุพอลิไซลัน เนื่องจากมี ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 70 แต่มีอะลูมินาไดออกไซด์ (Al_2O_3) น้อยกว่าร้อยละ 0.1 งานวิจัยนี้จึงมีการเพิ่มปริมาณอะลูมินาไดออกไซด์ (Al_2O_3) โดยใช้อะลูมินาบริสุทธิ์ร้อยละ 98.0 เพื่อพัฒนาของเสียซิลิกาเป็นวัสดุตั้งต้นและเป็นวัตถุดิบหลักในการเชื่อมประสานเป็นสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ในปฏิกิริยาจีโอโพลิเมไรเซชันของเสียซิลิกาซึ่งมีสีเทาดำ มีค่าความละเอียด เท่ากับ 139,932 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม มีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 230.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าพีเอช เท่ากับ 6.85 และความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.16 จากผลการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นของของเสียซิลิกาด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction, XRD) พบว่าของเสียซิลิกามีลักษณะเป็นของแข็งอสัณฐาน (Amorphous) คือไม่เป็นผลึก และผลการวิเคราะห์ขนาดของเสียซิลิกา เมื่อทำการบดเสียซิลิกา ด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) และทำการคัดแยกขนาด ด้วยใช้เครื่องแยกคัดขนาด (Sieve analysis) ผลการวิจัยขนาดผลของของเสียซิลิกามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24.461 ไมโครเมตร และค่าเฉลี่ยการกระจายขนาดผลของอะลูมินาบริสุทธิ์ที่ใช้ในการทดลองพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 90.712 ไมโครเมตร (โดยไม่ผ่านการบด)

- ผลการศึกษากการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย พบว่า ของเสียซิลิกาที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงไม่จัดเป็นของเสียอันตรายตาม

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 เนื่องจากของเสียซีลิกามีโลหะหนัก คือ ทองแดง (Cu) เท่ากับ 1.702 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และโครเมียม (Cr) น้อยกว่า < 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่พบมีปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐาน Threshold Limit Concentration (STLC) ที่กำหนดไว้ด้วยการทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

- ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย พบว่า โครงสร้างทางจุลภาคของของเสียซีลิกามีหลากหลายรูปทรง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ พบว่ามีลักษณะที่แตกต่างกับวัสดุอื่นในงานด้านคอนกรีต ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างกลม

5.1.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในการผลิตโดยใช้ของเสียซีลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ หวาย และโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่าสัดส่วนของวัสดุประสาน (ของเสียซีลิกาต่ออะลูมินาบริสุทธิ์) ที่เหมาะสมคือ 2:1 และสัดส่วนของวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสม คือ A1(60:20:20) และ B2(70:10:20) โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่า มอร์ตาร์ A1(60:20:20) และ B2(70:10:20) โดยน้ำหนัก ผ่านเกณฑ์กำลังรับแรงอัดที่ออกแบบไว้ที่ 180 กก./ซม.² ที่อายุ 3 และ 1 วัน ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์ซีเมนต์ควบคุมผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ที่อายุ 14 วัน โดยมอร์ตาร์ A1(60:20:20) และ B2(70:10:20) สามารถรับแรงอัดได้สูงสุดวันที่ 56 เท่ากับ 260.2 และ 310.7 กก./ซม.² ในขณะที่มอร์ตาร์ซีเมนต์ควบคุมสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดวันที่ 90 เท่ากับ 230.4 กก./ซม.²

5.1.3 ผลการศึกษามอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม ด้วยการทดสอบการชะละลายตามวิธี WET ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 (ภาคผนวก ก.1) แล้วนำน้ำชะละลายไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมา (ICP) พบว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติในการดูดซับของเสียทางเคมีได้ดี โดยของเสียที่มีพิษจะถูกกักภายในโครงสร้างสามมิติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ เพื่อไม่ให้ชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้เป็นไปตามงานวิจัยของอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ จากผลการวิเคราะห์ เมื่อนำของเสียซีลิกามาหล่อเป็นมอร์ตาร์มีปริมาณโลหะหนักทองแดง (Cu) จาก 1.702 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงจนกระทั่งน้อยกว่า 0.1 ในอัตราส่วน A1(60:20:20) และอัตราส่วน B2(70:10:20)

5.1.4 ผลการประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียซีลิกาในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่า มอร์ตาร์อัตราส่วน A1(60:20:20) มีราคาที่สูงกว่าซีเมนต์

มอร์ตาร์ควบคุม 0.54 บาทต่อก้อน และในมอร์ตาร์อัตราส่วน B2 (70:10:20) มีราคาที่สูงกว่าซีเมนต์ มอร์ตาร์ควบคุม 1.98 บาท แต่การนำของเสียซิลิกามาใช้ประโยชน์ในการผลิตซีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ นี้จะเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในปัจจุบันลงได้ ซึ่งสามารถ ประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างได้ อีกทั้งยังเป็นการลดมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อัน เป็นสาเหตุหลักของภาวะเรือนกระจก

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองนำของเสียซีลิกามาใช้ประโยชน์ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์พบว่า ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างได้ ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติมดังนี้

5.2.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีพื้นฐานของของเสียซีลิกาที่ใช้ในการวิจัยพบว่า มีองค์ประกอบของซีลิกาไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 แต่มีปริมาณอะลูมินาไดออกไซด์น้อย ดังนั้นจึงมีการเพิ่มอะลูมินา ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อะลูมินาบริสุทธิ์ ดังนั้นควรมีการศึกษาการใช้ของเสียอะลูมินามาใช้แทนอะลูมินาบริสุทธิ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาใช้ร่วมกับของเสียซีลิกา ซึ่งหากผลที่ได้ผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้จะเป็นการช่วยลดต้นทุนเรื่องสารเคมีในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และเป็นการเพิ่มมูลค่าของเสียอะลูมินาอีกทั้งเป็นการลดมลพิษที่เกิดจากของเสียอะลูมินาอีกด้วย

5.2.2 ผลการศึกษา พบว่าการบดของเสียซีลิกาโดยการบดด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) และทำการคัดแยกขนาดด้วยใช้เครื่องแยกขนาดจะมีราคาค่าพลังงาน เท่ากับ 14.52 บาทต่อกิโลกรัม หรือ 14,520 บาทต่อตัน โดยราคาค่าพลังงานในการผลิตของมอร์ตาร์ A1(60:20:20) และ B2(70:10:20) เท่ากับ 0.44 และ 0.52 บาทต่อก้อน ตามลำดับ หากมีการศึกษาการพัฒนาขนาดของเสียซีลิกาด้วยวิธีอื่น อาทิเช่น ใช้เครื่องบดที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม ที่สามารถบดได้ในปริมาณมาก และสามารถให้ขนาดน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้จะเป็นการช่วยลดต้นทุนเรื่องค่าพลังงานในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

5.2.3 ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในงานวิจัยนี้มีการบ่มที่ 60°C โดยการใช้ตู้อบ เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งานจริง จึงควรมีการศึกษาการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการบ่มด้วยวิธีอื่นๆ โดยไม่ต้องใช้ตู้อบ อาทิเช่น การบ่มที่อุณหภูมิห้อง การบ่มโดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือหลอดไฟ และมีการควบคุมอุณหภูมิให้ใกล้เคียงที่ 60°C

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กนกวรรณ ปันเขตร อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ. 2553. การศึกษาผลของสารเพิ่มที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัวและดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- การไฟฟ้านครหลวง [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.mea.or.th> [2555, 2 มีนาคม]
- จิตติ มณีศรี นิคม วงศ์ทองแก้ว และนิติศาสตร์ บุญเมือง. 2550. ความสามารถในการรับกำลังอัดของรอยต่อระหว่างซีเมนต์เพสต์กับวัสดุซ่อมแซม. ปริญญามหาบัณฑิต เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม สาขา เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2540. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร สมหวัง แม้นพิมพ์ชัย สมชาย จิตต์โรดม และธีระยุทธ พันธุ์มีชาวี. 2538. ซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2550. ซีเมนต์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.thaitca.or.th> [2555, 4 กุมภาพันธ์]
- ชัยวัฒน์ เจนวณิชย์. 2527. เคมีโพลิเมอร์พื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.
- ณัฐพล เศรษฐโอฬาร. 2553. การนำของเสียซีเมนต์ไปใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรราช ลีเกียรติกุล และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ศึกษาการให้เถ้าแกลบเป็นวัสดุปอซโซแลนด์เพื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต [ออนไลน์]. 2545. แหล่งที่มา: www.kmutt.ac.th. [2554, 20 กุมภาพันธ์]
- เกียรติศักดิ์ กลับประสิทธิ์. 2549. ผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิต่อการกำลังของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบเปลือกไม้และเถ้าถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขา วิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- นิรุตติ์ มะลิชาติ, ปรีชา วิสัยวงศ์ และมณฑนา วงศ์ชมภู. 2550. ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการกำจัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์. ปรินญาบัณฑิต, เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- บุรฉัตร ฉัตรวิระ และวินัย หอมศรีประเสริฐ. 2552. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร 32, 4.
- ปฐมพงษ์ ศัตย์จริง, ศุภชัย ถึงสุข และอัศวิน เขียมคล้าย. 2550. การวัดความชื้นผ่านคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์. ปรินญาบัณฑิต, เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ประวิทย์ ศรีโยธี, วรเชษฐ ป้อมเที่ยงพิน และอเดช ใจรักษ์. 2549. กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์. ปรินญาบัณฑิต, เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม สาขา เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ปรินญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547. ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตไทย.
- ปูนซีเมนต์นครหลวง. 2516. เอกสาร เทคโนโลยีคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์น้ำก้าง.
- พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรสถ และวรงค์ วรสุนทรโรสถ. 2544. วัสดุก่อสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ส. เอเชียเพรส (1989).
- พร้อมพงศ์ ผุงเพิ่มตระกูล, สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ, ทวีช พูลเงิน, เอนก ศิริพานิชกร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2551. กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นตัวยึดประสาน. ปรินญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ภาพกราฟการเทียบกำลังรับแรงอัดจากรูปทรงกระบอกเป็นรูปทรงลูกบาศก์ ในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร. 2544. แหล่งที่มา: <http://www.kmitl.ac.th> [2555, 4 เมษายน]
- ภาพการเกิดสารจีโอโพลิเมอร์หรือ Geopolymerization. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.thaitca.or.th>. [2554, 6 มีนาคม]
- ภาพการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำฟิวส์ไฟฟ้าผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.thaitca.or.th>. [2554, 6 มีนาคม]
- ภาพโครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.cpacacademy.com>. [2554, 6 มีนาคม]
- ภาพโครงสร้างของอะลูมินาบริสุทธิ์ (Al_2O_3). [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://phycomp.technion.ac.il/~ira/types.html#Al2O3>. [2555, 4 กุมภาพันธ์]

- ภาพโครงสร้างสารประกอบซิลิโคน (Silicone หรือ Dimethyl siloxane). [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://www.autopia.org>. [2555, 3 เมษายน]
- ภาพเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปฏิกิริยาการเกิดสาร จีโอโพลิเมอร์. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.thaitca.or.th>. [2554, 6 มีนาคม]
- ภาพซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีของเสียซิลิกา. ญัฐพล เศรษฐโอฬาร. 2553. การนำของเสียซิลิกาไปใช้ ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาพผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.thaitca.or.th>. [2554, 6 มีนาคม]
- ภาพวัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงาม ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.thaitca.or.th>. [2554, 6 มีนาคม]
- ภาพแสดงภาพขยายขนาดไมโครของลักษณะโครงสร้างของมอร์ตาร์เปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ มอร์ตาร์. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.thaitca.or.th>. [2554, 6 มีนาคม]
- ภาพสูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลิไซอะเลต. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.cpacacademy.com>. [2554, 6 มีนาคม]
- ภาพอิฐทนไฟซึ่งทำมาจาก metakaolin-geopolymer ผลผลิตจากวัสดุจีโอโพลิเมอร์. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.thaitca.or.th>. [2554, 6 มีนาคม]
- รอสลี ทรงชาติ ชาญศักดิ์ ไชยสถิตวานิช และसानนท์ เปี่ยมสาละ. 2549. ผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์. วิทยานิพนธ์บริหารบัณฑิต, เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและ สิ่งแวดล้อม สาขา เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- โรงงานรีไซเคิลกากของเสีย. สัมภาษณ์, 30 มีนาคม 2554.
- โรงงานรีไซเคิลกากของเสีย. สัมภาษณ์, 30 มีนาคม 2555.
- วิฑูรย์ ทะนุ วุฒิชัย ยิสะหมั่น และเอกวัตร ม่วงทอง. 2551. คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มวลเบา โดยวิธีเติมอากาศ. วิทยานิพนธ์บริหารบัณฑิต, เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม สาขา เทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- วันชัย ยอดสุดใจ และบรรเจิด ทวีทรัพย์ไพบูลย์. 2551. การทดสอบคุณสมบัติจีโอโพลิเมอร์มอร์
ต้าร์เพื่อใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม. การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 2: การเสนอผลงานทางวิชาการ
หมวดคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วินิต ช่อวิเชียร. 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สัมพันธ์พาณิชย์.
วิเชียร ชาลี และอุบลรักษณ์ รัตนศักดิ์. 2552. การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอโพลิเมอร์
จากเถ้าแก้วเตา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ศักรินทร์ เหลืองกำจร. 2550. วัสดุจีโอโพลิเมอร์. วารสารคอนกรีต ปีที่ 3 (เมษายน 2551) : 1-3
ศักรินทร์ เหลืองกำจร. วัสดุจีโอโพลิเมอร์. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา <http://www.thaitca.or.th>
[2555, 4 กุมภาพันธ์]
- สกลวรรณ น่านจิตสุวรรณ. 2553. เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาด้วยผงอะลูมิเนียม. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สหภาพ หอมวุฒิม่วงศ์ และ ธนกร อัดตะริยะ. 2551. การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสม
ของวัสดุปอซโซลานในปริมาณสูง. การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 2: การเสนอผลงานทาง
วิชาการหมวดคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า ราคาวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: www.price.moc.go.th [2555, 30 มกราคม]
- สิทธิชัย สุนทรเป้า. ฝ่ายเทคนิคการจัดการการของเสียอุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์นครหลวง.
สัมภาษณ์, 5 มีนาคม 2555.
- สุจิตรา กันยาวิลาศ. 2545. การทำให้ตะกอนนิเกิลไฮดรอกไซด์ให้เป็นก้อนด้วยการใช้ซิลิกา-อะลู
มินาที่ใช้แล้วปูนขาวและปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ,
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์. กันยายน-ตุลาคม 2549. วัสดุจีโอโพลิเมอร์. โยธาสาร. ปีที่ 18 (กันยายน-
ตุลาคม 2549): 55-60
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 1. การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือ
วัสดุที่ไม่ใช้แล้ว.

ภาษาอังกฤษ

- American Society for Testing and Materials.1996. Standard test method for bulk unit weight and voids in Aggregate. C29. Annual book of ASTM standard. 4:21-26.
- American Society for Testing and materials, Standard Test method of sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. C 136-06. Annual book of ASTM standard, 2008.
- American Society for Testing and materials, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm.] Cube Specimens)¹. C 109/C 109M-07. Annual book of ASTM standard, 2008.
- American Society for Testing and materials, Standard specification for coal fly ash or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. C 618-08. Annual book of ASTM standard, 2008.
- American Society for Testing and materials, Standard specification for Standard Sand. C 778-06. Annual book of ASTM standard, 2008.
- AUTOPIA. Silicone and Polymerized Siloxanes [Online]. 2010. Available from: <http://www.autopia.org>. [2012, 3 April].
- Chindaprasirt , P., Rattanasak, U. and Jaturapitakkul, C. 2011. Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustions geopolymeric materials. Cement & Concrete Composites. 33: 55–60.
- Hamid, R., Yusof, K. M. and Zain, M. F. M. 2010. A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume. Construction and Building Materials. 24: 94-98.
- Jumrat, S., Chatveera, B. and Rattanadecho, P. 2011. Dielectric Properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer Mortar. International Communications in Heat and Mass Transfer. 38 : 242–248
- Kadri, El-H. and Duval, R. 2009. Hydration heat kinetics of concrete with silica fume. Construction and Building Materials. 23: 3388-3392.

- Luna Galiano, Y., Fernandez Pereira, C. and Vale, J. 2011. Stabilization/solidification of a municipal solid waste incineration residue using fly ash-based geopolymers. Journal of Hazardous Materials. 185: 373–381.
- Nazari, A., Bagheri, A. and Riahi, S. 2011. Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. Materials Science and Engineering. A 528: 7395–7401.
- Songpiriyakul, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P. 2010. Compressive strength and degree of reaction of biomass- and fly ash-based Geopolymer. Construction and Building Materials. 24: 236–240.
- Tailby, J. and Mackenzia, K.J.D. 2010. Structure and mechanical properties of aluminosilicate geopolymer composites with Portland cement and its constituent minerals. Cement and Concrete Research. 40: 787-794.
- Temuujin, J., van Riessen, A. and MacKenzie, K.J.D. 2010. Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. Construction and Building Materials. 24: 1906–1910.
- Wan, B., Kim, H.C., Tae, H.G. and Park, B.J. 2007. Characteristics of cement mortar with nano-sio₂ particles. Construction and Building Materials. 21: 1351-1355.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการทดสอบ

ภาคผนวก ก.1

การทดสอบสิ่งปนื้อหรือวัสดุไม้ใช้แล้วโดยนำมาสกัดด้วยวิธี

Waste Extraction Test(WET)

เป็นการจำลองสถานการณ์ฝนกรด สำหรับสิ่งปนื้อหรือวัสดุไม้ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งสามารถบดได้ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปนื้อหรือวัสดุไม้ใช้แล้ว พ.ศ.2548 ทดสอบสิ่งปนื้อหรือวัสดุไม้ใช้แล้ว โดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) โดยการนำสารละลายที่ได้ไปทดสอบหาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่ชะละลายออกมา ตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. บดตัวอย่างเพื่อให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ขนาด 2 มิลลิเมตร

2. ให้ใช้สารละลายโซเดียมซิเตรท (Sodium citrate) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่พีเอชเท่ากับ 5.0 ± 0.1 3. นำตัวอย่างหนัก 50 กรัมของตัวอย่างใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน ภาชนะที่ใช้ในการสกัดควรผ่านการล้างอย่าง ต่อเนื่องด้วยกรดไน-ตริก ซึ่งเตรียมได้จากการนำเอาสารละลายกรดไนตริกมาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร

3. เติม 500 มิลลิลิตรของน้ำสกัดลงในตัวอย่าง จากนั้นนำของผสมไปใส่ภาชนะด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้ไล่ออกซิเจนในน้ำสกัดออกไป และป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่า (table shaker หรือ overhead stirrer หรือ rotary extractor) ซึ่งสามารถทำให้ของ ผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมตลอดเวลา เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

4. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง หรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบสามารถใช้ Pressure filtration แทน vacuum filtration ได้ สำหรับของแข็งขนาดเล็กอาจเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบถึง $10,000 \times G$ ก่อนนำไปกรองผ่านเมมเบรน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน นำของผสมไปใส่ภาชนะด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาทีควรปรับอุณหภูมิในระหว่างสกัดอยู่ระหว่าง $20-40^{\circ}\text{C}$

5. ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะเท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จาก ข้อ 5. ลงในขวดโพลีเอทิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริก เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร

6. นำของเหลวไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคดับเบิลพลาสมา (ICP)

ภาคผนวก ก.2

การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (มาตรฐาน ASTM C109-07, 2008)

ขั้นตอนการทดลอง

การเตรียมแบบหล่อตัวอย่าง

- หาน้ำมันบางๆ ที่ผิวด้านในของแบบหล่อกับฐาน
- หาน้ำมันชนิดเข้มข้นหรือจารบีระหว่างตัวแบบหล่อกับฐาน
- เช็ดน้ำมันส่วนเกินออกจากแบบหล่อ
- ใช้จารบีทารอยต่อระหว่างแบบหล่อกับฐานที่ด้านนอก

การหล่อก้อนตัวอย่าง

1. หล่อก้อนตัวอย่างโดยใช้ขนาดแบบหล่อ $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยชั่งวัสดุที่ใช้ตามอัตราส่วนที่ต้องการทดสอบโดยให้ ได้ปริมาณ 3 ตัวอย่าง ในแต่ละการผสม
2. การผสมใช้วิธีการผสมโดยเครื่องผสม โดยผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน
3. เอาส่วนผสมลงในแบบหล่อ ภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที หลังการผสมแล้วการหล่อจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกหนา ประมาณ 1 นิ้ว แล้วใช้แท่งกระทุ้ง ชั้นละ 16 ครั้งโดย 8 ครั้งแรกจะมีทิศทางตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลังให้แรงกระทุ้งพอประมาณและเท่ากันตลอด ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เติมส่วนผสมชั้นที่ 2 ให้ เกลยขอบแบบหล่อเล็กน้อย และใช้มือป้อนตะกั่ว กระทุ้งใช้ แท่งกระทุ้ง กระทุ้ง 16 ครั้งเช่นเดียวกับครั้งแรกเมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
4. หลังจากหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อเก็บไว้ในที่ชื้นทันที และถอดแบบในเวลา 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างต่อจนครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยค่าความคลาดเคลื่อนแสดงในตาราง ก.2.1

ตาราง ผ1 การหาค่ากำลังรับแรงอัดให้กระทำในช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

เวลาที่ทดสอบ	ช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้
1 วัน	$\pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง
3 วัน	± 1 ชั่วโมง
7 วัน	± 3 ชั่วโมง
28 วัน	± 12 ชั่วโมง

นำก้อนตัวอย่างที่จะทดสอบ วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะให้แรงกด โดยใช้ด้านที่สัมผัสกับแบบหล่อ เช็ดผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน ให้สะอาดปราศจากเม็ดทราย ผิวหน้าของเครื่องมือทั้ง 2 ด้านที่สัมผัสกับก้อนตัวอย่างจะต้องเรียบ ในการให้กดกับแท่งตัวอย่าง จะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบควรอยู่ที่ 20-80 วินาที

การคำนวณ

บันทึกค่าแรงกดสูงสุดจากเครื่องกดและคำนวณในหน่วยของกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยให้คำนวณความละเอียดถึง 0.1 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตรหรือกิโลปาสคาล โดยคำนวณความละเอียดถึง 10 กิโลปาสคาล

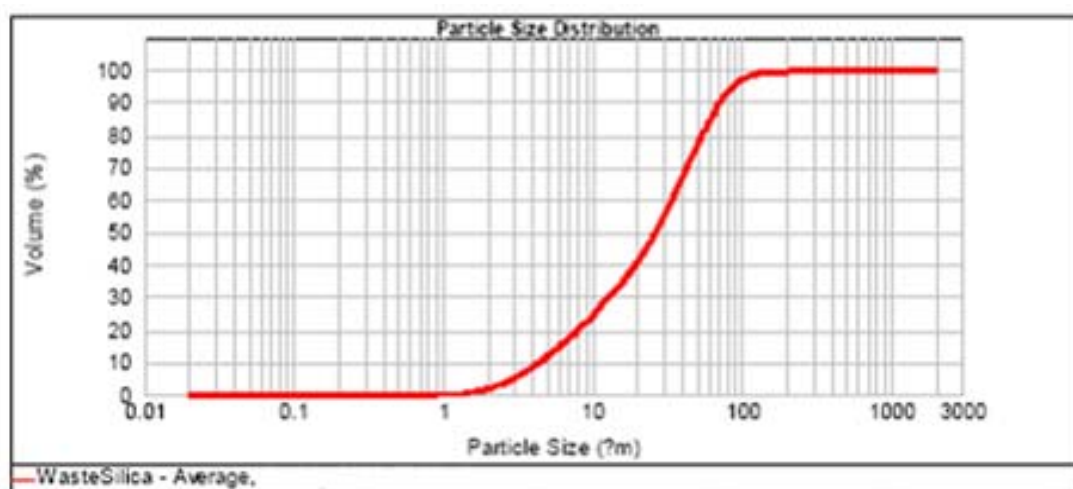
ก้อนตัวอย่างที่ไม่สมบูรณ์ในการทดสอบแต่ละครั้ง หากมีผลการทดสอบของก้อนตัวอย่างใดที่มีค่าเบี่ยงเบนเกินกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย ควรตัดผลการทดสอบออกและนำก้อนใหม่มาวัดแทน

ภาคผนวก ข

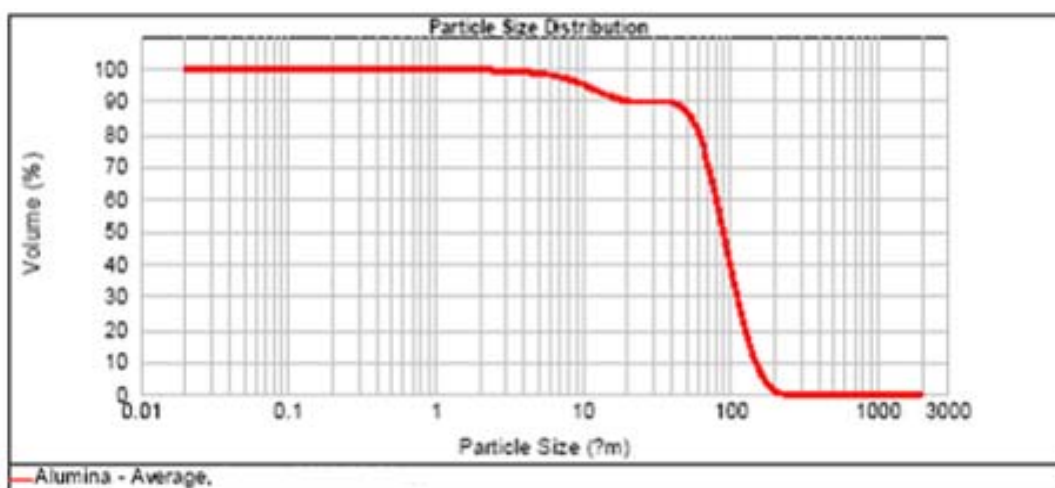
การทดสอบการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

ตาราง ผ2 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของของเสียซิลิกา (หลังบด)และอะลูมินาบริสุทธิ์

ขนาดคละ	D(0.1) (ไมโครเมตร)	D(0.5) (ไมโครเมตร)	D(0.9) (ไมโครเมตร)
ของเสียซิลิกา	4.274	24.461	64.875
อะลูมินาบริสุทธิ์	34.751	90.712	149.368



ภาพที่ ผ1 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของของเสียซิลิกา (หลังบด)



ภาพที่ ผ2 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของอะลูมินาบริสุทธิ์

ภาคผนวก ค

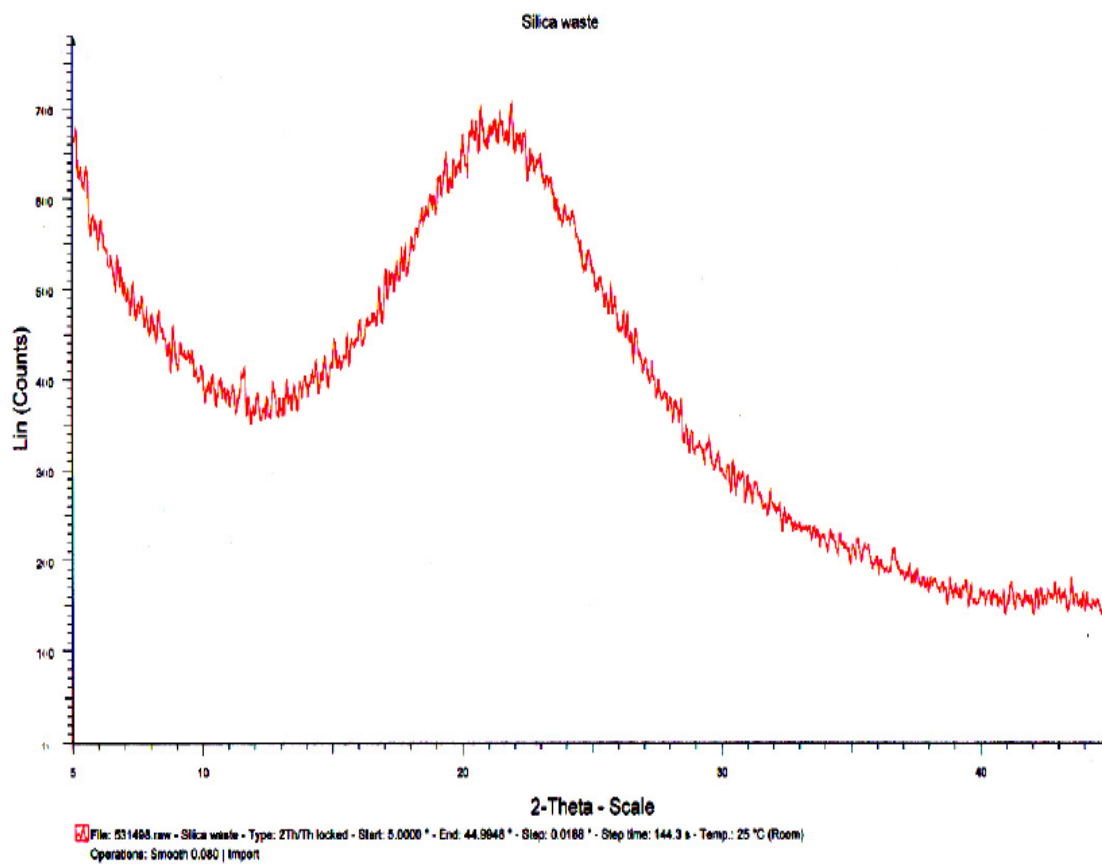
การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์และ
เฟสที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

ตัวอย่าง : ผง
 วิธีวิเคราะห์ : Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry
 เครื่องมือวิเคราะห์ : X-ray fluorescence spectrometry, Philips model PW2400
 ผู้วิเคราะห์ : นายสมบุญ หะริยัญญุมิกการกิจ
 วันที่วิเคราะห์ : 16 มีนาคม 2554

ตาราง ผลวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของของเสียซีลิกา

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Na ₂ O	<0.01
MgO	<0.01
Al ₂ O ₃	<0.01
SiO ₂	71.3
P ₂ O ₃	<0.01
SO ₃	<0.01
Cl	<0.01
K ₂ O	<0.01
CaO	0.02
Cr ₂ O ₃	0.03
MnO ₂	<0.01
Fe ₂ O ₃	0.08
CuO	<0.01
ZrO ₂	<0.01
%LOI*	28.6

*LOI = Loss on ignition



Date : 4/6/2010

Sample : Silica waste

Instrument : X-ray Diffraction ;Bruker AXS Model D8 Discover

Angle	d value	Intensity	Intensity %
2-Theta °	Angstrom	Count	%
11.5883	7.6302	414	59.2
21.4592	4.1375	700	100.0

ภาพที่ ผ3 กราฟเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชันของของเสียซิลิกา

ภาคผนวก ง

การคำนวณความถ่วงจำเพาะและ
การคำนวณสัดส่วนของมอร์ตาร์ในอัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ๘4 การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของของเสียซีลิกา

รายการ	การทดลองครั้งที่		
	1	2	3
1. ระดับน้ำมันก๊าดครั้งแรก (มล.)	0.5	0.0	0.6
2. อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งแรก (มล.)	32.8	32.8	32.2
3. น้ำหนักสารและถาดครั้งแรก (กรัม)	56.68	58.05	58.03
4. น้ำหนักสารและถาดที่เหลือ (กรัม)	19.47	18.60	18.46
5. น้ำหนักสารที่ใช้ (กรัม) (3)-(4)	37.21	39.45	39.57
6. ระดับน้ำมันก๊าดครั้งหลัง (มล.)	17.9	18.20	18.6
7. อุณหภูมิของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง (มล.)	29.5	29.4	30.1
8. ปริมาตรที่ถูกแทนที่ (มล.) (6)-(1)	17.4	18.20	18.0
9. ความถ่วงจำเพาะ	2.14	2.16	2.19
ความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย ($\bar{X} \pm SD$)	2.16 $\pm$ 0.03		

หมายเหตุ การหาความถ่วงจำเพาะด้วยขวดแก้วทดลองมาตรฐานเลขอาเตอร์ลิเออร์

การคำนวณ

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่ใช้}}{\text{ปริมาตรที่ถูกแทนที่} \times \text{ความหนาแน่นของน้ำ}}$$

ตาราง ผ5 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ต่อก้อน

ปริมาณ (กรัม)	อัตราส่วน		
	ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม	A (60:20:20)	B (70:10:20)
ของเสียดิลิกา	-	40.00	47.00
อะลูมินาบริสุทธิ์	-	20.00	23.00
โซเดียมไฮดรอกไซด์	-	8.16	4.08
โซเดียมซิลิเกต	-	2.44	2.44
ทราย	91.35	165.00	192.50
ปูน	199.37	-	-
รวม	290.72	235.6	269.02

หมายเหตุ

- การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์

เตรียมจาก น้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร ใช้เกล็ดโซเดียมไฮดรอก 400.08 กรัม

การทดลองใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอก น้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ใช้เกล็ดโซเดียมไฮดรอก 8.16 กรัม

การทดลองใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอก น้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ใช้เกล็ดโซเดียมไฮดรอก 4.08 กรัม

- การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์

เตรียมจาก น้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร ใช้ผงโซเดียมซิลิเกต 122.09 กรัม

การทดลองใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอก น้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ใช้ผงโซเดียมซิลิเกต 2.44 กรัม

- การออกแบบซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมให้สามารถรับน้ำหนักได้ 180 กก/ตร.ซม²

คำนวณจาก $180 + 1.6(SD) = 232.2 \text{ ซม}^3$ ในปริมาตร 1000 ซม³ ; SD = 32

1 ก้อนมีปริมาตร 125 ซม³ ดังนั้นในปริมาตร 1000 ซม³ จะสามารถหล่อได้ 8 ก้อน

จะได้ว่า 1 ก้อน ใช้ปูน $232.2/8 = 29 \text{ ซม}^3 = 91.40 \text{ กรัม}$; ถพ.ปูน คือ 3.15

ใช้ทราย 2.75 เท่าของปูน $= 79.75 \text{ ซม}^3 = 199.37 \text{ กรัม}$; ถพ.ทราย คือ 2.65

ภาคผนวก จ

การทดสอบกำลังรับอัดของมอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนต่างๆ
และการแปรหน่วยกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ ผ6.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน A1 (60:20:20) ด้วยระยะเวลาทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง	น้ำหนัก มอร์ตาร์ (กรัม)	น้ำหนักที่กด (กิโลนิวตัน)	Calibration Factor	ค่ากำลังรับ แรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.)	เฉลี่ย
1	1	226	42	3.297347	138.5	163.6 $\pm$ 16.41 (165.9 $\pm$ 6.80)** n=3
	2	223	50	3.297347	164.9*	
	3	220	52.5	3.297347	173.1*	
	4	224	48.4	3.297347	159.6*	
	5	227	55.2	3.297347	182.0	
3	1	231	61.3	3.297347	202.1	193.6 $\pm$ 7.16 (1934.2 $\pm$ 3.60)** n=3
	2	228	58.9	3.297347	194.2*	
	3	266	57.8	3.297347	190.6*	
	4	262	60	3.297347	197.8*	
	5	232	55.6	3.297347	183.3	
7	1	238	64.7	3.297347	213.3*	208.1 $\pm$ 7.42 (209.1 $\pm$ 4.25)** n=3
	2	231	59.8	3.297347	197.2	
	3	235	63.4	3.297347	209.1*	
	4	225	62.1	3.297347	204.8*	
	5	239	65.5	3.297347	216.0*	
14	1	230	68.5	3.297347	225.9*	212.1 $\pm$ 12.63 (213.9 $\pm$ 5.88)** n=3
	2	223	62.9	3.297347	207.4*	
	3	220	58.5	3.297347	192.9	
	4	228	66.4	3.297347	218.9*	
	5	225	65.3	3.297347	215.3*	

หมายเหตุ : * ตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

**ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

n = จำนวนตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

ตารางที่ ผ6.2 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน A1 (60:20:20) ด้วยระยะเวลาทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน (ต่อ)

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง	น้ำหนัก มอร์ตาร์ (กรัม)	น้ำหนักที่ กด (กิโลนิวตัน)	Calibration Factor	ค่ากำลังรับ แรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.)	เฉลี่ย
28	1	240	81.9	3.297347	270.1*	250.7±14.47 (255.4±11.43)** n=3
	2	231	73.5	3.297347	242.4*	
	3	225	70.3	3.297347	231.8	
	4	232	76.7	3.297347	252.9*	
	5	236	77.7	3.297347	256.2*	
56	1	224	77.4	3.297347	255.2*	259.0±9.90 (260.2±5.01)** n=3
	2	220	74.3	3.297347	245.0	
	3	230	80.4	3.297347	265.1*	
	4	236	82.2	3.297347	271.0	
	5	228	78.5	3.297347	258.8*	
90	1	222	73.2	3.297347	241.4*	250.6±14.36 (245.8±10.81)** n=4
	2	234	78.6	3.297347	259.2*	
	3	238	81.9	3.297347	270.1	
	4	226	75.4	3.297347	248.6*	
	5	220	70.9	3.297347	233.8	

หมายเหตุ :

* ตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

**ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

n = จำนวนตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

ตารางที่ ๗.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน B2 (70:10:20) ด้วยระยะเวลาทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง	น้ำหนัก มอร์ตาร์ (กรัม)	น้ำหนักที่ กด (กิโลนิวตัน)	Calibration Factor	ค่ากำลังรับ แรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.)	เฉลี่ย
1	1	221	45.6	3.297347	150.4	189.4 $\pm$ 22.37 (199.2 $\pm$ 5.71)** n=4
	2	225	58.7	3.297347	193.6*	
	3	231	62.5	3.297347	206.1*	
	4	229	61.1	3.297347	201.5*	
	5	223	59.3	3.297347	195.5	
3	1	232	73.4	3.297347	242.0	228.2 $\pm$ 8.64 (224.8 $\pm$ 4.54)** n=4
	2	225	66.8	3.297347	220.3*	
	3	231	70.1	3.297347	231.1*	
	4	229	68	3.297347	224.2*	
	5	227	67.8	3.297347	223.6*	
7	1	234	71.9	3.297347	237.1*	234.0 $\pm$ 4.99 (235.3 $\pm$ 4.52)** n=4
	2	231	68.9	3.297347	227.2	
	3	238	72.4	3.297347	238.7	
	4	226	69.8	3.297347	230.2*	
	5	221	71.8	3.297347	236.7*	
14	1	231	73.9	3.297347	243.7*	248.2 $\pm$ 9.88 (246.6 $\pm$ 5.43)** n=3
	2	227	79.8	3.297347	263.1*	
	3	234	72.2	3.297347	238.1*	
	4	220	73.8	3.297347	243.3*	
	5	222	76.7	3.297347	252.9*	

หมายเหตุ :

* ตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

**ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

n = จำนวนตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

ตารางที่ ๗7.2 แสดงกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วนB2 (70:10:20) ด้วยระยะเวลาทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน (ต่อ)

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง	น้ำหนัก มอร์ตาร์ (กรัม)	น้ำหนักที่ กด (กิโลนิวตัน)	Calibration Factor	ค่ากำลังรับ แรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.)	เฉลี่ย
28	1	238	99	3.297347	326.4	305.9 $\pm$ 15.62 (304.8 $\pm$ 11.40)** n=3
	2	220	87.6	3.297347	288.8*	
	3	228	90.8	3.297347	299.4*	
	4	225	90.1	3.297347	297.1*	
	5	230	96.4	3.297347	317.9*	
56	1	238	96.7	3.297347	318.9*	311.9 $\pm$ 12.10 (310.7 $\pm$ 7.20)** n=3
	2	240	99.8	3.297347	329.1	
	3	231	93.4	3.297347	308.0*	
	4	225	90.5	3.297347	298.4*	
	5	229	92.6	3.297347	305.3*	
90	1	232	89.5	3.297347	295.1*	304.7 $\pm$ 16.73 (298.6 $\pm$ 11.16)** n=4
	2	238	94.8	3.297347	312.6*	
	3	224	86.7	3.297347	285.9	
	4	240	99.8	3.297347	329.1*	
	5	233	91.2	3.297347	300.7*	

หมายเหตุ :

* ตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

**ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

n = จำนวนตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

ตารางที่ ผ8.1 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์คอนกรีตควบคุม โดยออกแบบให้สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ 180 ก.ก./ซม.² ด้วยระยะเวลาทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง	น้ำหนัก มอร์ต้าร์ (กรัม)	น้ำหนักที่ กด (กิโลนิวตัน)	Calibration Factor	ค่ากำลังรับ แรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.)	เฉลี่ย
1	1	264	19.0	3.297347	62.6*	61.9±6.91 (62.2±3.97)** n=3
	2	256	15.9	3.297347	52.4	
	3	248	17.6	3.297347	58.0*	
	4	251	21.3	3.297347	70.2	
	5	260	20	3.297347	65.9*	
3	1	258	38.4	3.297347	126.6*	122.7±5.00 (124.8±2.13)** n=4
	2	262	37	3.297347	122.0*	
	3	260	34.7	3.297347	114.4	
	4	260	38.3	3.297347	126.3*	
	5	256	37.7	3.297347	124.3*	
7	1	258	54.9	3.297347	181.0*	175.3±7.21 (178.3±3.04)** n=4
	2	262	52.9	3.297347	174.4*	
	3	260	49.6	3.297347	163.5	
	4	260	54.7	3.297347	180.4*	
	5	256	53.8	3.297347	177.4*	
14	1	258	59.9	3.297347	197.5*	193.8±6.34 (196.4±2.80)** n=4
	2	262	55.6	3.297347	183.3	
	3	260	60.6	3.297347	199.8*	
	4	260	58.7	3.297347	193.6*	
	5	261	59.05	3.297347	194.7*	

หมายเหตุ :

* ตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

**ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

n = จำนวนตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

ตารางที่ ผ8.2 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์คอนกรีตควบคุม โดยออกแบบให้สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้ 180 ก.ก./ซม.² ด้วยระยะเวลาทดสอบ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน (ต่อ)

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่าง	น้ำหนัก มอร์ต้าร์ (กรัม)	น้ำหนักที่ กด (กิโลนิวตัน)	Calibration Factor	ค่ากำลังรับ แรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.)	เฉลี่ย
28	1	258	73.1	3.297347	241.0*	225.4 $\pm$ 22.08 (228.1 $\pm$ 12.39)** n=3
	2	262	65.6	3.297347	216.3*	
	3	260	58.6	3.297347	193.2	
	4	260	75.7	3.297347	249.6	
	5	256	68.8	3.297347	226.9*	
56	1	258	73.8	3.297347	243.3*	227.7 $\pm$ 22.39 (230.4 $\pm$ 12.39)** n=3
	2	266	66.3	3.297347	218.6*	
	3	266	59.1	3.297347	194.9	
	4	264	76.5	3.297347	252.2	
	5	260	69.5	3.297347	229.2*	
90	1	260	75.31	3.297347	248.3*	238.2 $\pm$ 25.95 (239.8 $\pm$ 20.48)** n=3
	2	262	65.62	3.297347	216.4*	
	3	264	62.31	3.297347	205.5	
	4	264	75.4	3.297347	254.6*	
	5	258	70.9	3.297347	266.1	

หมายเหตุ :

* ตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

**ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

n = จำนวนตัวอย่างที่มีค่านัยสำคัญ

การแปลงหน่วยในงานวิจัยนี้

ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือ มีหน่วยเป็น KN แต่ในการรายงานจะรายงานในหน่วยของ ksc เป็นแรงในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่าที่ทราบคือ 9.80665 Newton = 1 kilogram-force (kgf)

จะได้ 1 Newton = 1 kilogram-force (kgf) / 9.80665 = ประมาณ 0.10197 กิโลกรัม

นั่นก็คือ 1 Pa = 0.10197 กิโลกรัม ต่อ 1 ตารางเมตร..... (1)

และจากพื้นที่ของก้อนตัวอย่าง = 5 ซม. x 5 ซม. = 25 ตารางเซนติเมตร

เมื่อคิดเป็นแรง ในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ก็ต้องหาร 0.10197 กิโลกรัม ด้วย 25 ตารางเซนติเมตร

$0.10197 / 25 = 4.0744 \times 10^{-3}$ กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร (ksc)..... (2)

จะได้

1 N = 4.0744×10^{-3} กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร (ksc)

1KN = 4.0744 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร (ksc)..... (3)

จากเครื่องมือที่ใช้

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องมือ = 80.08 %

จะได้ว่า ค่าที่ได้จากเครื่องมือ KN x (4.0744x0.8008) = ksc

เพราะฉะนั้น 1KN = 3.3 ksc..... (4)

และ 1ksc = 0.3035 KN..... (5)

การแปลงหน่วย(เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น)

Pascal (Pa) = แรง 1 Newton ที่กระทำต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร

ส่วน ksc เป็นแรงในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่าที่ทราบคือ 9.80665 Newton

= 1 kilogram-force (kgf)

จะได้ 1 Newton = 1 kilogram-force (kgf) / 9.80665

= ประมาณ 0.10197 กิโลกรัม

นั่นก็คือ 1 Pa = 0.10197 กิโลกรัม ต่อ 1 ตารางเมตร..... (1)

และจากพื้นที่ 1 ตารางเมตร = 100 ซม. x 100 ซม. = 10,000 ตารางเซนติเมตร

เมื่อคิดเป็นแรง ในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ก็ต้องหาร 0.10197กิโลกรัม ด้วย 10,000

ตารางเซนติเมตร

$0.10197/10,000 = 0.000010197$ กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร (ksc)

จะได้ 1 Pa = 0.000010197 ksc

หรือกลับกัน 1 ksc = 101,970 Pa..... (2)

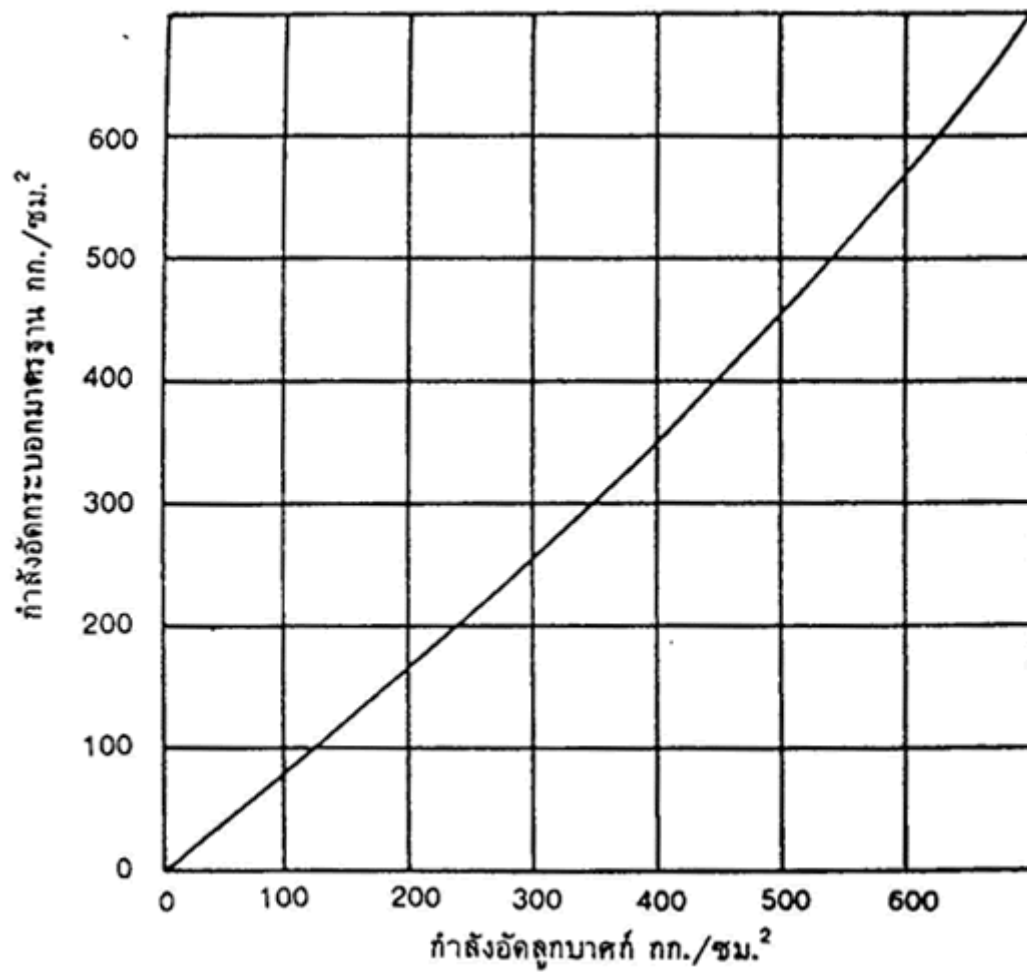
เมื่อต้องการคิดเป็น MPa ก็ต้องหารด้วย 1,000,000

เพราะ 1 MPa = 1,000,000 Pa

จะได้

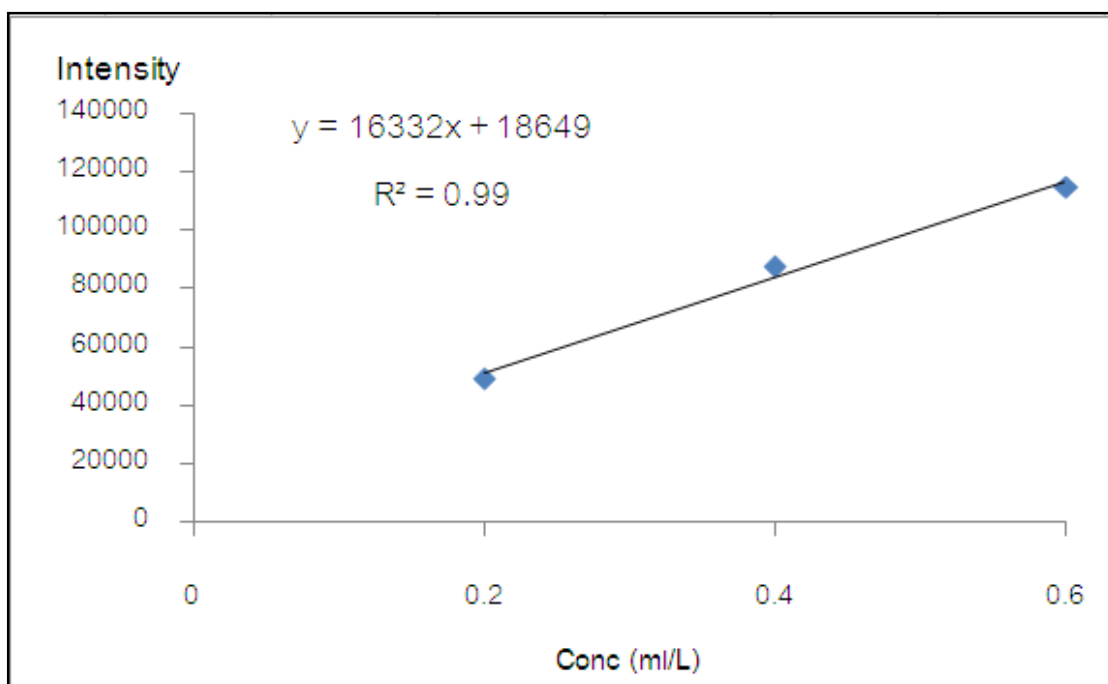
$1 \text{ ksc} = (101,970 / 1,000,000) = 0.10197 \text{ Mpa}$ (3)

เพราะฉะนั้น 1 Mpa เท่ากับ 10.197 ksc



ภาพ ผ4 กราฟการเทียบกำลังรับแรงอัดจากรูปทรงกระบอกเป็นรูปทรงลูกบาศก์
ในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) (คู่มือวิศวกรโยธา, 2555: ออนไลน์)

ภาคผนวก จ
ข้อมูลผลการวิเคราะห์โลหะหนัก



ภาพที่ ผ5 กราฟแสดงค่ามาตรฐานความเข้มข้นของธาตุโครเมียม (Calibration Curve)

ตาราง ผ9 แสดงค่าความเข้มข้นต่ำสุดของธาตุสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ของเครื่องอินดักทีฟลิคัปเปิลพลาสมา

Limit of Detection (mg/L)	ชนิดธาตุ
0.04	สังกะสี (Zn)
0.04	ตะกั่ว (Pb)
0.04	โครเมียม (Cr)
0.05	ทองแดง (Cu)

ตารางที่ ผ10 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักของของเสียซีลิกา ด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

ประเภท	ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก(มล./ล)			
	ทองแดง (Cu)	สังกะสี (Zn)	ตะกั่ว (Pb)	โครเมียม (Cr)
ของเสียซีลิกา	1.702	< 0.1	< 0.1	< 0.1

ตารางที่ ผ11 ข้อมูลการวัดปริมาณโลหะหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน A1(60:20:20) และ B2 (70:10:20) ที่ระยะเวลาทดสอบที่ 28 วัน ด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา(Inductively Coupled Plasma, ICP)

ประเภท	ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก(มล./ล)			
	ทองแดง (Cu)	สังกะสี (Zn)	ตะกั่ว (Pb)	โครเมียม (Cr)
A(60:20:20)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
B(70:10:20)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชาลิสา วิสมหมาย อายุ 25 ปี เกิดวันที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ.2529 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย จังหวัดศรีสะเกษ ปีการศึกษา 2548 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2553

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

- [1] Chalisa Veesommai and Petchporn Chawakitchareon. "Utilization of Silica Waste for Geopolymer Mortar Production". The E-book Proceedings of 4th AUN/SEED-Net Regional Conference on Global Environment and Seminar of NRCT- JSPS Asian Core Program, The Emerald Hotel, Bangkok, Thailand. 18-19 January, 2012: "003-SWM".Page 137-140.
- [2] Petchporn Chawakitchareon and Chalisa Veesommai. "Geopolymer Mortar Production by using Silica Waste As Raw Material". The Proceedings of 1st International Conference on Environmental Science, Engineering and Management, Organized by Environmental Engineering Association of Thailand (EEAT), Phowadol Resort & Spa, Chiangrai, Thailand. 21-23 March, 2012. "21R5-09".Page 23-24.