

การใช้ของเสียอะลูมินาโดยการนำไปเป็นวัตถุดิบของจีโอโพลีเมอร์และการกำจัด
โดยการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง



นายเพลงประพันธ์ กิ่งทอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF ALUMINA WASTE FOR GEOPOLYMER PRODUCTION AND
DISPOSAL BY STABILIZATION/SOLIDIFICATION

Mr. Plengraphun Kingthong



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

เพลงประพันธ์ กิ่งทอง : การใช้ของเสียอะลูมินาโดยการนำไปเป็นวัตถุดิบของจีโอโพลีเมอร์และการกำจัด โดยการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง (UTILIZATION OF ALUMINA WASTE FOR GEOPOLYMER PRODUCTION AND DISPOSAL BY STABILIZATION/SOLIDIFICATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: รศ. ดร. เพ็ชรพร เขาวงกัจเจริญ, 119 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำเอาของเสียอะลูมินาจากอุตสาหกรรมหลอมอะลูมิเนียมมาใช้ประโยชน์และนำมา
 กำจัดโดยการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง โดยนำเอาของเสียอะลูมินาที่ได้มาผสมกับของเสียซิลิกาที่ได้มาจาก
 กระบวนการรีไซเคิลซิลิโคนและรวมกันเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและ
 ทางเคมีของของเสียพบว่า ของเสียอะลูมินามีปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 48 และซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ
 4.18 ขนาดอนุภาคเท่ากับ 36 ไมโครเมตร ส่วนของเสียซิลิกาพบซิลิกอนไดออกไซด์อยู่ร้อยละ 71.3 ขนาดอนุภาค
 เท่ากับ 48.9 ไมโครเมตร โดยของเสียทั้งสองชนิดเมื่อนำมาทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการ
 กำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ปี พ.ศ. 2548 ผลสรุปว่ามีค่าเกินกว่ามาตรฐานจัดเป็นของเสียอันตราย งานวิจัย
 นี้ได้นำของเสียอะลูมินาและของเสียซิลิกามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร
 และอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน
 ผลสรุปว่าอัตราส่วนของ SiO₂ ต่อ Al₂O₃ ในวัสดุประสาน เท่ากับ 3:1 โดยผสมของเสียซิลิกา 46 กรัม ต่อของเสีย
 อะลูมินา 24 กรัม ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิลิตร ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต 20 มิลลิลิตร ได้ค่า
 กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เท่ากับ 262.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าค่ากำลัง
 รับแรงอัดตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (มอก.57-2530) ที่ระบุว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะต้องไม่ต่ำกว่า
 112.17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และประมาณการค่าใช้จ่ายในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 4.03 บาท
 ต่อก้อน ส่วนในการกำจัดของเสียอะลูมินาโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง ที่อัตราส่วนของเสียอะลูมินาร้อยละ 60 ต่อ
 วัสดุประสานร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ให้กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 27.06 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่ง
 ผ่านมาตรฐานการจัดการของเสียในหลุมฝังกลบ (ไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และมาตรฐาน
 คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก.58-2530) ที่ระบุว่าต้องไม่ต่ำกว่า 20.39 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ
 ประมาณการค่าใช้จ่ายในการผลิตเท่ากับ 2.27 บาทต่อก้อน โดยภายหลังจากการนำเอามอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของ
 ของเสียอะลูมินาและของเสียซิลิกาที่ผ่านกระบวนการทั้งสองไปตรวจวิเคราะห์ผลค่าความเข้มข้นของโลหะหนักใน
 น้ำสกัดอีกครั้งผลสรุปว่ามีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ทำให้วัสดุทั้งสองประเภทไม่
 จัดเป็นของของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมอีกต่อไป อันนำมาซึ่งการนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470315021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ALUMINA WASTE / SILICA WASTE / GEOPOLYMER / SOLIDIFICATION

PLENGPRAPHUN KINGTHONG: UTILIZATION OF ALUMINA WASTE FOR GEOPOLYMER PRODUCTION AND DISPOSAL BY STABILIZATION/SOLIDIFICATION. ADVISOR: ASSOC. PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHARON, 119 pp.

This research study on the utilization of alumina waste from aluminium thermal metallurgy to combine with silica waste from silicone recycle industry in geopolymer production and the disposal of alumina waste by stabilization/solidification. This present study aimed at investigating the basic physical and chemical properties of waste materials and also the optimal proportion in geopolymer production and stabilization/solidification method were studied. The results revealed that alumina waste contain 48 percent of aluminium oxide, 4.18 percent of Silicon dioxide and average particle size is 36 micrometers. Silica waste contain 71.3 percent of Silicon dioxide and average particle size is 49 micrometers. The leaching tests of heavy metals also indicated that the level of all heavy metals concentration were over the standard set by the Ministry of Industry, Thailand which means alumina waste and silica waste were considering as hazardous waste. In geopolymer production, The mortar was cast in 5x5x5 centimeters cubic shape for both methods with cured temperature at 60 degree Celsius. Compressive strength was tested at 1, 7, 14 and 28 days. The results revealed that the best $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio must be 3:1 mixed by alumina waste 46 g. and silica waste 24 g. with 10 ml of sodium hydroxide and 20 ml of sodium silicate. This proportion gain the highest compressive strength for 262.8 kg/cm^2 at 28 days of curing which over the standard for hollow load-bearing concrete masonry units (TIS57-2530) and costs 4.03 THB/mortar. In stabilization/solidification, the mortars were cured at room temperature. Compressive strength was tested only at 7, 14 and 28 days. The alumina waste to portland cement ratio was 60 : 40 mixed with 60 ml. of water and 275 g. of sand which gain the highest compressive strength at 27.06 kg/cm^2 which over the compressive strength standard on the solidification/stabilization of hazardous waste in landfill and the standard for hollow non-load-bearing concrete masonry units (TIS58-2530). The leaching test were estimated again after the production of geopolymer and stabilization/solidification. The results revealed that the concentration of all heavy metals were within the standard set by the Ministry of Industry, Thailand. Therefore the production of alumina waste and silica waste were not considering as hazardous waste.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์. ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณที่ช่วยกรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการตรวจทางแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒน์กะ (กรรมการสอบวิทยานิพนธ์) ที่ได้สละเวลาเพื่อสอบวิทยานิพนธ์อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางตลอดจนชี้แนะข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเพื่อความถูกต้องของงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จาก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดระยะเวลาในการศึกษาในระดับปริญญาโท

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวกในการทำการวิจัยตลอดจนการวิเคราะห์ผล ตลอดจนคำชี้แนะต่างๆ ที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ คนรอบข้างที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือตลอดจนให้กำลังใจจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

2.3.1 การปรับเสถียร (Stabilization).....	16
2.3.2 การทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification)	16
2.3.3 ชนิดของการจัดการของเสียโดยการทำเป็นก้อน	17
2.4 ของเสียอะลูมินา	20
2.5 ของเสียซิลิกา	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านจีโอโพลีเมอร์.....	23
2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการปรับเสถียรโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง	28
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย	35
3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	37
ตัวแปรอิสระ.....	37
ตัวแปรตาม.....	37
ค่ากำลังรับแรงอัด.....	37
ค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก	37
ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค.....	37
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2.1 วัสดุดิบ	38
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	38
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	41
3.3.1 การศึกษาการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยใช้ของเสียซิลิกาและของเสีย อะลูมินา... 41	
3.3.2 การศึกษาการจัดการจัดการของเสียอะลูมินาโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง	43

3.3.3	ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการจัดการของเสียอะลูมินาด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อน แข็งและการนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลี เมอร์มอร์ตาร์.....	45
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง	46
4.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของของเสียซิลิกาและของเสีย อะลูมินา	47
4.1.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาด้วยวิธี เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF)	47
4.1.2	ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา	51
4.1.3	ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของวัตถุดิบด้วยวิธี Sieve Analysis ตามวิธี มาตรฐาน ASTM C136-06.....	52
4.1.4	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM)	55
4.2	ผลการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยมีของเสีย ซิลิ กาและของเสียอะลูมินาเป็นวัตถุดิบ	56
4.2.1	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/C 109M-13, 2013	58
4.2.2	ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์.....	64
4.2.3	ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายในของมอร์ตาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM)	65
4.3	ผลการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการทำให้เป็น ก้อนแข็ง	67
4.3.1	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/ C109M- 13, 2013.....	67
4.3.2	ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของมอร์ตาร์	70

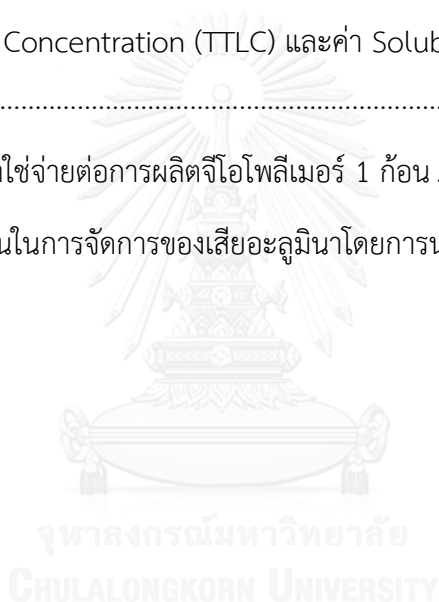
4.3.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายในของมอร์ตาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM)	71
4.4 ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาผลิตเป็น จีโอ โพลีเมอร์และการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการนำมาทำเป็นก้อนแข็ง	72
4.4.1 ผลการประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยการนำของเสียซิลิกาและ ของเสียอะลูมินามาเป็นวัตถุดิบ	72
4.4.2 การประเมินค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการวิจัย	76
5.1.1 การผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยมีของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาเป็นวัตถุดิบ	76
5.1.2 การทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการทำให้ เป็นก้อนแข็ง	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
5.3 การประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม	78
รายการอ้างอิง	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	119

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบภายในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากงานวิจัยของ วินิจ ช่อวิเชียร (2529)...	10
ตารางที่ 2.2 ชื่อและส่วนประกอบสูตรทางเคมีและชื่อย่อของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.	11
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบภายในของวัสดุแต่ละชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550).....	15
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละกระบวนการในการกำจัดของเสียด้วยวิธีทำให้เป็นก้อนแข็ง (ภูพิงค์ ทวีทรัพย์ (2540)).....	18
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาผลผลิตจีโอโพลีเมอร์โดยการใช้ของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา	37
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาการจัดการของเสียอะลูมินาโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง.....	37
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของการหล่อแข็งที่ใช้ในการทดลอง	44
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกาวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF).....	47
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของของเสียอะลูมินาวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)	48
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบองค์ประกอบภายในของวัสดุติดกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง	50
ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักในของเสียซิลิกาเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)	52
ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของโลหะหนักในของเสียอะลูมินาเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)	52
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของของเสียซิลิกา (หลังบด)	53
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของของเสียอะลูมินา (หลังบด)	55
ตารางที่ 4.8 สัดส่วนของส่วนผสมที่จะใช้ในการทำการทดลอง	57
ตารางที่ 4.9 รหัสตัวอย่างและอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อสารละลายต่างและทราย	57
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์	61

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์กับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	62
ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง.....	63
ตารางที่ 4.13 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจากจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และ Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)	65
ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์.....	68
ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง.....	70
ตารางที่ 4.16 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจากมอร์ตาร์เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)	71
ตารางที่ 4.17 ผลราคาค่าใช้จ่ายต่อการผลิตจีโอโพลีเมอร์ 1 ก้อน	74
ตารางที่ 4.18 ราคาต้นทุนในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการนำมาทำเป็นก้อนแข็ง	75



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบในการสังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์.....	5
ภาพที่ 2.2 อัตราส่วนของซิลิกาและอะลูมินาและการอ่านชื่อและพันธะเคมีของซีอาเลท	6
ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน	7
ภาพที่ 2.4 แผนผังชนิดวัสดุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต	9
ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน	14
ภาพที่ 2.6 ภาพขยายขนาดไมโครของซีเมนต์พอร์ตแลนด์	15
ภาพที่ 2.7 ภาพขยายระดับไมโครของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์.....	15
ภาพที่ 3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) ของเสียอะลูมินา, (ข) ของเสียซิลิกา, (ค) ทราเยมน้ำ.....	38
ภาพที่ 3.2 เครื่องบด (Tube mill).....	40
ภาพที่ 3.3 เครื่องร่อนเขย่าคัดขนาด.....	40
ภาพที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดคละ.....	40
ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์การผสมและแห้งทิ้ง.....	40
ภาพที่ 3.6 แบบพิมพ์มอร์ตาร์.....	40
ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	40
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของของเสียซิลิกา.....	53
ภาพที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของของเสียอะลูมินา	54
ภาพที่ 4.3 ภาพของของเสียซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน.....	55
ภาพที่ 4.4 ภาพของของเสียอะลูมินาที่กำลังขยาย 1,500 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบ สแกน	56
ภาพที่ 4.5 มอร์ตาร์ A3B3 และ มอร์ตาร์ A1B1	58
ภาพที่ 4.6 ค่ากำลังรับแรงอัดที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับส่วนผสมที่แตกต่างกัน.....	61
ภาพที่ 4.7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ ระยะเวลา 28 วัน กำลังขยาย 1,500 เท่า (ก.) ตัวอย่าง A3B3 (ข.) ตัวอย่าง A1B1.....	66

ภาพที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ (ก.) กำลังขยาย 2,500 เท่า (ข.) กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	67
ภาพที่ 4.9 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนของของเสียอะลูมินาต่างกันในระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	69
ภาพที่ 4.10 ภาพถ่ายด้วยกล้องขยายอิเล็กตรอนแบบสแกนของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลา 28 วัน (กำลังขยาย 1,500 เท่า).....	72



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความต้องการของมนุษย์ได้ส่งผลให้เกิดความก้าวหน้าและการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมเพื่อตอบสนองความต้องการที่มีมากขึ้น การพัฒนานี้นำมาซึ่งการใช้ทรัพยากรและเชื้อเพลิงต่างๆ มากมาย เพื่อให้ได้มาซึ่งผลผลิต แต่ในขณะเดียวกันกระบวนการผลิตได้ทำให้เกิดของเสียซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่นในอุตสาหกรรมหลายประเภทที่ก่อให้เกิดของเสียที่มีองค์ประกอบของสารจำพวกซิลิกาและอะลูมินาซึ่งหากปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพหรือเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องหาวิธีการจัดการที่ถูกต้องและเหมาะสม ตัวอย่างหนึ่งของอุตสาหกรรมที่กำลังพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว นั่นคืออุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งในปัจจุบันมีความจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เป็นจำนวนมากไม่ว่าจะเป็นแร่ธาตุหรือเชื้อเพลิงต่างๆ และยิ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อม เนื่องจากการกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จำเป็นต้องใช้พลังงานสูงมากในกระบวนการผลิต เริ่มตั้งแต่การระเบิดวัสดุตั้งต้น การย่อย การลำเลียง การเผา ตลอดจนการบดให้ละเอียด อันก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นผลพลอยได้จาก กระบวนการผลิตซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมทุกชนิด (Mahasenana และคณะ, 2003) และจากกระบวนการผลิตยังก่อให้เกิดฝุ่นละอองในบรรยากาศ ตลอดจนการกระจายของโลหะหนักในอากาศ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการวิจัยเพื่อหาวัสดุมาทดแทนการใช้ซีเมนต์ในปัจจุบัน โดยมีแนวคิดค้นสารชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้ทดแทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ คือ จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นวัสดุผสมอะลูมิโนซิลิเกตมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiO_2 และ Al_2O_3 และทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ได้แก่ Na_2SiO_3 หรือ NaOH แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและสามารถเกิดการก่อตัวแข็งและให้กำลังอัดได้ จากงานวิจัยของ Nazari และคณะ (2011) ได้ยืนยันถึงประสิทธิภาพของจีโอโพลิเมอร์ที่ส่งผลดีหลายอย่าง เช่น สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อันนำมาซึ่งการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตได้ ทำให้เกิดการจัดการของเสียในรูปของซิลิกาและอะลูมินาได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำผลิตภัณฑ์มาใช้ประโยชน์ได้นอกจากนี้ยังส่งผลให้ลดพลังงานจากการนำมาผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งต้องการพลังงานอันนำมาซึ่งแนวทางในการอนุรักษ์และพัฒนาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน (Gajanan และคณะ, 2009) นอกจากนี้การจัดการกับของเสียอันตรายโดยวิธีการปรับเสถียรโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง

(Stabilization/Solidification) กำลังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีผู้สนใจที่จะทำการศึกษาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากในงานวิจัยของ Qian และคณะ (2006) ได้อ้างถึงการผสมสารที่มีส่วนผสมของซิลิกาและอะลูมินาสามารถเพิ่มความแข็งแรงของผลผลิตได้ ในที่นี้จึงจะเป็นการศึกษาการจัดการกับของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาด้วยสองวิธีด้วยกันนั่นคือ การนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์และการนำมาทำให้เป็นก้อนแข็ง ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบอัตราส่วนของของเสียที่ใช้และส่วนผสมอื่นๆ ที่นำมาทำปฏิกิริยากัน จากนั้นนำมาทดสอบคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีและความสามารถในการรับแรงอัดเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดก่อนการนำมาใช้ประโยชน์และเป็นข้อมูลในการปรับปรุงคุณสมบัติอื่นๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาวิธีการจัดการของเสียอะลูมินาและของเสียซิลิกาโดยการทำจีโอโพลีเมอร์และโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง

1.2.2 ศึกษาลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของของเสียอะลูมินาและของเสียซิลิกาที่นำมาใช้ในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็ง

1.2.3 เปรียบเทียบคุณภาพระหว่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมระหว่างของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์และที่ผสมระหว่างของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา

1.2.4 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการจัดการกับของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาโดยการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็ง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาให้ประโยชน์โดยการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ และการจัดการกับของเสียอะลูมินาโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็ง โดยมีขอบเขตการดำเนินการวิจัยดังนี้

1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยวิธีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

1.3.2 ศึกษาอัตราส่วนและสภาวะที่เหมาะสมในการนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ โดยแปรเปลี่ยนอัตราส่วนของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาในการผสมเพื่อเตรียมจีโอโพลีเมอร์ (ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร) ในอัตราส่วนร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของส่วนผสม

1.3.3 ศึกษาอัตราส่วนและสภาวะที่เหมาะสมในการจัดการกับของเสียอะลูมินาโดยการนำมาเป็นวัตถุดิบในกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยการลดอัตราส่วนการใช้ปูนซีเมนต์ลง ซึ่งผลตามอัตราส่วนระหว่างของเสียอะลูมินาและปูนซีเมนต์ดังนี้ 20:80, 30:70, 40:60, 50:50 และ 60:40

1.3.4 ศึกษาคุณภาพของมอร์ตาร์ ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และมอร์ตาร์ที่เกิดจากกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็ง ทดสอบการชะละลายของโลหะหนักและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) ของอัตราส่วนและเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตมอร์ตาร์ทั้งสองชนิด

1.3.5 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาผลิตเป็นจีโอโพลีเมอร์และการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการนำมาทำให้เป็นก้อนแข็ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมอื่นๆ มาใช้ประโยชน์โดยนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์

1.4.2 เป็นทางเลือกหนึ่งในการจัดการกับของเสียอะลูมินาโดยการนำมาเตรียมเป็นจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับกำจัดโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง

1.4.3 เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาและพัฒนาการทำจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และการจัดการกับของเสียอะลูมินาโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งอันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอนาคต

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอโพลีเมอร์

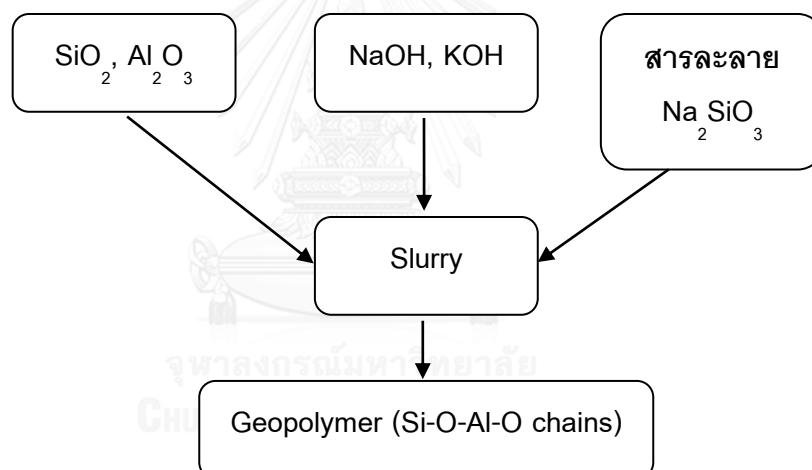
2.1.1 ที่มาและความหมาย

จีโอโพลีเมอร์ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย ดร. กลูคอฟสกี (Glukhovsky) นักวิทยาศาสตร์ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นานในปี ค.ศ. 1970 นิยามของคำว่า จีโอโพลีเมอร์ ได้ถูกบัญญัติขึ้นเป็นครั้งแรกโดย ศาสตราจารย์ โจเซฟ ดาวิดอวิตส์ (Prof. Joseph Davidovits) นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ซึ่งได้ให้นิยามของคำว่า จีโอโพลีเมอร์ดังนี้ จีโอโพลีเมอร์ คือ วัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่ประกอบไปด้วย สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มาจากการทำปฏิกิริยาของสารจำพวกซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวในอัลคาไลน์หรือสารละลายที่มีความเป็นเบสสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สามารถแข็งตัวและให้กำลังแรงอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอโพลีเมอร์นี้จะมี ความแตกต่างจากโครงสร้างของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง แต่จะมีความคล้ายคลึงกับซีโอไลท์ ซึ่งสาร จำพวกจีโอโพลีเมอร์จะทำปฏิกิริยาและอยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) แต่ในซีโอไลท์จะอยู่ในรูป ผลึก จีโอโพลีเมอร์ถูกคิดค้นขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิกและต่อมาได้มาใช้ในการงานที่เกี่ยวข้อง กับการนำมาใช้เป็นวัสดุติบในการก่อสร้างด้วย จีโอโพลีเมอร์ประกอบไปด้วยสายโพลีเมอร์ของ สารอินทรีย์จำนวนมากและเกาะกันเป็นเครือข่าย ซึ่งมีคุณสมบัติในการทนความร้อน ดังนั้นสามารถ นำมาใช้เป็นวัสดุที่ทนความร้อนได้ นอกจากนี้จีโอโพลีเมอร์ยังสามารถรับกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ได้มากในระยะเวลาสั้นเมื่อผ่านการบ่มภายใต้อุณหภูมิความร้อนที่ พอเหมาะ นอกจากนี้จากการวิจัยของ Davidovits (1993) พบว่าการสังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์นั้น สามารถสังเคราะห์จากวัสดุติบหลายชนิด แต่ไม่ว่าจะมาจากวัสดุติบชนิดไหนการสังเคราะห์ จีโอโพลีเมอร์ก็มาจากปฏิกิริยาที่มีกลไกเดียวกัน ใช้อุณหภูมิที่มีความแตกต่างกันออกไปตั้งแต่ 20 ถึง 90 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความแตกต่างจากการเกิดผลึกของซีโอไลท์อย่างสิ้นเชิงเพราะซีโอไลท์จะต้อง มาจากปฏิกิริยาที่เกิดภายใต้อุณหภูมิ 150 ถึง 200 องศาเซลเซียส แต่ในขณะเดียวกันโครงสร้างผลึก ของจีโอโพลีเมอร์ก็มีความคล้ายคลึงกับผลึกของซีโอไลท์มาก แต่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันหลายอย่าง กล่าวคือ จีโอโพลีเมอร์สามารถ ทนความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส และจีโอโพลีเมอร์มี องค์ประกอบของแคลเซียมน้อยกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้จีโอโพลีเมอร์จึงมีความทนต่อ กรดมากกว่า นอกจากนี้การผลิตจีโอโพลีเมอร์ยังต้องการพลังงานน้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ต

แลนด์ค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้จีโอโพลีเมอร์จึงเป็นที่นิยมและยอมรับกันอย่างกว้างขวางเป็นผล
เนื่องมาจากคุณสมบัติพิเศษต่างๆ และความทนทานที่มีประสิทธิภาพ และสามารถนำมาใช้ประโยชน์
ได้หลายอย่างไม่ว่าจะเป็นการนำมาใช้แทนการผลิตเซรามิกหรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือจะเป็นการ
นำมาทำเป็นวัสดุทนความร้อนรวมถึงการนำมาเป็นสารที่ใช้ในการลดค่าความเป็นพิษของสารพิษ
ต่างๆ อาทิเช่น แอสเบสทอส หรือ โลหะหนัก

2.1.2 หลักการสังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์

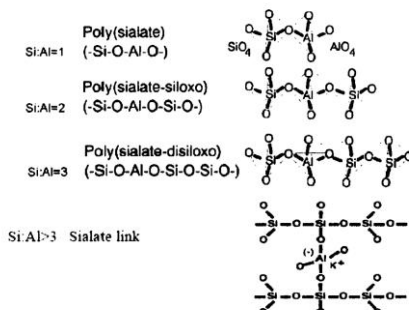
การสังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์นั้นเกิดจากการผสมวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตที่มีแร่ธาตุที่มีคุณสมบัติ
เป็นตัวเชื่อมประสานได้จำพวก SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลักโดยจะถูกทำให้แตกตัวในอัลคาไลน์หรือ
สารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น โดย
จะต้องมีการให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้จีโอโพลีเมอร์สามารถแข็งตัวเพียงพอสำหรับ
การรับกำลังแรงอัดได้



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบในการสังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์

(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550)

จีโอโพลีเมอร์ประกอบไปด้วยสารประกอบพื้นฐานคือ อะลูมินา และ ซิลิกาที่ประกอบกันเป็น
ซีอาเลท (Sialate) ที่เกิดจากพันธะระหว่าง ซิลิกอน อะลูมิเนียม และ ออกซิเจน ด้วยหลายอัตราส่วน
ด้วยกัน ซึ่งแต่ละอัตราส่วนระหว่าง ซิลิกา และ อะลูมินา จะทำให้ชื่อของซีอาเลทแตกต่างกันออกไป
ดังภาพที่ 2.2 มีโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังสมการต่อไปนี้

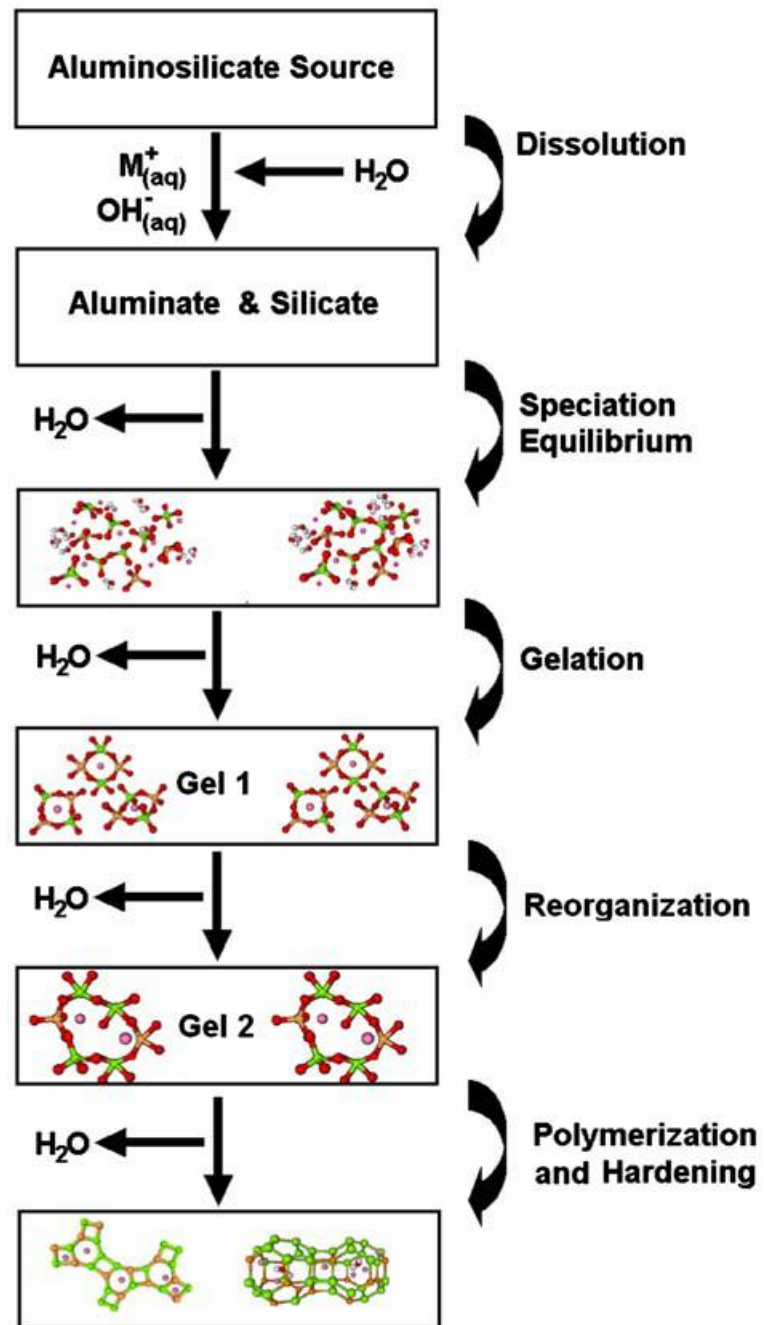


ภาพที่ 2.2 อัตราส่วนของซิลิกาและอะลูมินาและการอ่านชื่อและพันธะเคมีของซีอาเลท

(Duxson และคณะ, 2006)

2.1.3 ปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอไรเซชัน (Geopolymerization)

ปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอไรเซชันจะเกิดขึ้นเริ่มด้วยขั้นแรกคือขั้นตอนของการแตกตัวสารอะลูมิโนซิลิเกตที่อยู่ในรูปสารที่เป็นของแข็งเพื่อให้ได้สารซิลิเกตและสารอะลูมิเนตที่แยกออกจากกัน ขั้นตอนนี้เรียกว่า ขั้นตอนสัโซลูชัน (Dissolution) จากนั้นจะทำให้เกิดการรวมตัวของของสารซิลิเกตและอะลูมิเนตกลายเป็นสารเชิงซ้อน ซึ่งปฏิกิริยาดิสโซลูชันของอะลูมิโนซิลิเกตจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่ค่าพีเอชเป็นต่างๆ ซึ่งจะทำให้สารละลายนั้นอิมิตัวไปด้วยสารละลายอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งในสารละลายที่ถูกทำให้มีความเข้มข้นมากขึ้นนี้ในขณะที่เฟสของเหลวจะมีการสร้างเจล (Gelation) ที่เรียกว่า โอลิโกเมอร์ (Oligomers) ที่ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างแบบเครือข่าย หลังจากที่มีระยะของการสร้างเจลแล้ว ระบบจะมีการปรับเปลี่ยนและจัดระบบพันธะใหม่ในขณะที่เครือข่ายของเจลก็ถูกสร้างขึ้นไปพร้อมๆ กัน ผลที่ได้ท้ายที่สุดจะเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ระหว่างอนุภาคของสารที่จับตัวกันกลายเป็นอนุภาคเชิงซ้อนในรูปแบบของสัณฐาน ซึ่งเราเรียกกันว่า จีโอโพลีเมอร์ ซึ่งลำดับขั้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอไรเซชันนี้ได้เป็นไปตามแผนภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน

(Duxson และคณะ, 2006)

2.2 คอนกรีต

2.2.1 ที่มาและความหมายของคอนกรีต

จากอดีตจนถึงปัจจุบันนี้เราพบว่าคอนกรีตยังคงเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความนิยมใช้งาน ทั้งนี้เพราะคอนกรีตมีความเหมาะสมกว่าวัสดุก่อสร้างอื่นๆ ทั้งด้านราคาและด้านคุณสมบัติต่างๆ และอาจแยกพิจารณาคอนกรีตออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นตัวประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต
2. ส่วนที่เป็นมวลรวม ได้แก่ ทราย หิน หรือ กรวด

เมื่อนำวัสดุต่างๆ ของคอนกรีตมาผสมกัน คอนกรีตจะเป็นของเหลวที่มีความหนืดเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไปเทลงแบบหล่อตามต้องการได้ เมื่ออายุมากขึ้นคอนกรีตก็จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นกึ่งเหลวกึ่งแข็ง และในเวลาต่อมาก็จะเป็นของแข็งในที่สุดซึ่งสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงเวลาหนึ่งความสามารถรับกำลังอัดจะเริ่มคงที่

คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม (เช่น หิน ทราย หรือ กรวด) และ น้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้าๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่า การไฮเดรชัน โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่า คอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากที่ผสมและยังแข็งแรงขึ้นภายหลังจากการแข็งตัว โดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่

คอนกรีตใช้กันในงานก่อสร้างหลายชนิดซึ่งรวมถึงอาคาร ถนน เขื่อน สะพาน อนุสาวรีย์ และงานก่อสร้างต่างๆ ซึ่งมีเห็นได้ทั่วไป

คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัดสูง ในขณะที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ (ประมาณร้อยละ 10 ของแรงอัด) โดยเมื่อต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึง จะมีการเสริมวัสดุอื่นเพิ่มเข้าไปในคอนกรีตโดยจะเรียกว่า คอนกรีตเสริมแรง หรือคอนกรีตเสริมเหล็ก (โดยเสริมแรงด้วยเหล็ก) วัสดุเหล่านี้จะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีต ซึ่งงานโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่ นิยมใช้คอนกรีตเสริมแรงแทนที่คอนกรีตเปลือย

นอกจากนี้ในงานก่อสร้างยังมีการใช้วิธีการที่เรียกว่า คอนกรีตอัดแรง โดยทำการใส่แรงเข้าไปในคอนกรีตหล่อสำเร็จที่หล่อมาจากโรงงาน โดยเมื่อนำไปใช้งาน แรงที่ใส่เข้าไปในคอนกรีตจะหักล้างกับน้ำหนักของตัวคอนกรีตเองและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้น โดยงานสะพานและทางยกระดับ นิยมใช้คอนกรีตอัดแรง

2.2.2 ประเภทของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างอาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. คอนกรีตล้วน (Plain Concrete) คือ คอนกรีตอย่างเดียวล้วนๆ ไม่มีวัสดุอื่นๆ มาเสริมหรือประกอบซึ่งใช้กับการก่อสร้างโครงสร้างที่ต้องการกำลังรับแรงอัดมากๆ อาทิเช่น ฐานเครื่องจักรที่หนาหลายๆ
2. คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) ใช้เหล็กเส้นเสริมอยู่ในเนื้อคอนกรีตโดยหล่ออยู่ในเนื้อคอนกรีต เป็นโครงสร้างที่มีทั้งแรงอัดและแรงดึง เนื่องจากคอนกรีตมีลักษณะที่ต้านและรับแรงอัดได้ดีมาก แต่รับแรงดึงได้น้อย แต่เหล็กมีทั้งคุณสมบัติในการต้านทานแรงอัดและรับแรงดึงได้ดีมาก ประกอบกับเหล็กและคอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวใกล้เคียงกัน
3. คอนกรีตอัดแรง (Prestressed Concrete) เป็นคอนกรีตที่ถูกอัดแรงไว้ก่อนใช้งานทำโดยดึงเหล็กที่ทนแรงดึงสูงให้ยืดออก แล้วตัดเหล็กปล่อยให้เหล็กที่พยายามหดตัวจากการยืดกลับคืนสู่สภาพเดิมแล้วอัดคอนกรีต (วินิต ช่อวิเชียร, 2529)

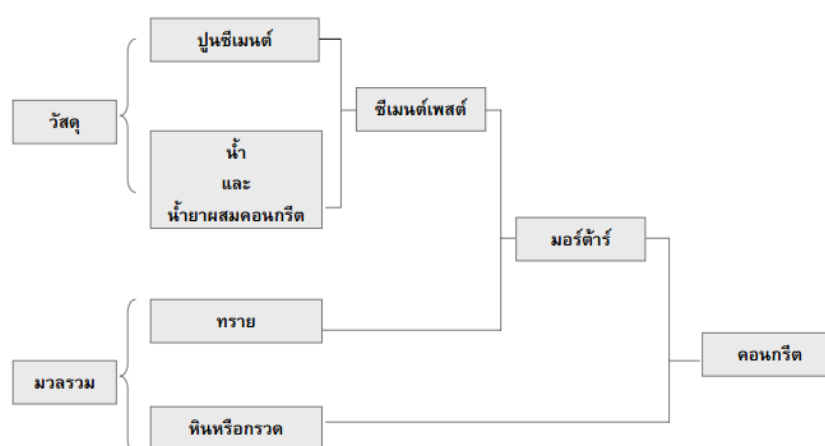
2.2.3 องค์ประกอบของคอนกรีต

โดยทั่วไป วัสดุสำหรับใช้ผสมทำคอนกรีตประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำและน้ำยาผสมคอนกรีตเมื่อผสมวัสดุต่างๆ เข้าด้วยกันเราจะเรียกชื่อของวัสดุต่างๆ ที่ผสมกันดังนี้

ปูนซีเมนต์ผสมน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)

ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทราย เรียกว่า มอร์ตาร์ (Mortar)

มอร์ตาร์ผสมกับหินหรือกรวด เรียกว่า คอนกรีต (Concrete)



ภาพที่ 2.4 แผนผังชนิดวัสดุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต

(ประหยัด เลี้ยวไพรัตน์, 2551)

2.2.4 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดเกาะมีความสามารถในการสร้างพันธะซึ่งสามารถทำให้วัสดุที่มีลักษณะแพร่กระจายรวมตัวกันเป็นก้อนแข็งอัดแน่นได้ คำจำกัดความนี้ครอบคลุมถึงสารชนิดต่างๆ มากมาย แต่ในทางวิศวกรรมและการก่อสร้าง วัสดุนี้หมายถึง ซีเมนต์ที่ประกอบไปด้วยหินปูน (Calcareous cements) มีสารองค์ประกอบหลักคือแคลเซียม โดยทั่วไปแล้วซีเมนต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ซีเมนต์ที่ไม่สามารถก่อหรือแข็งตัวในน้ำได้และซีเมนต์ที่สามารถก่อตัวเป็นก้อนแข็งในน้ำได้หรือไฮดรอลิกซีเมนต์ ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือ ไฮดรอลิกซีเมนต์ชนิดหนึ่งนั่นเอง จากงานวิจัยของ ประพิศลา เทพลีธา (2542) กล่าวว่า ในปัจจุบันนี้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการการก่อสร้าง ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงเป็นวัสดุส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตคอนกรีตและมอร์ตาร์ ได้มาจากกระบวนการเผาสารซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก โดยเผาที่อุณหภูมิ 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดให้ละเอียดตามความต้องการปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงต้องการพลังงานสูงมากในกระบวนการผลิต เริ่มตั้งแต่การระเบิดวัสดุต้นแหล่ง การย่อย การลำเลียง การเผา ตลอดจนการบดให้ละเอียดได้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามที่ต้องการ เมื่อนำเอาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นี้มาผสมกับทราย หิน และน้ำและรอให้แห้งจะได้เป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติแข็งทนทานและสามารถนำมาใช้ในการก่อสร้างได้ ซึ่งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบภายในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากงานวิจัยของ วินิจ ช่อวิเชียร (2529)

ส่วนประกอบ	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
ปริมาณ (ร้อยละ)	63.8	20.2	5.4	2.9	2.6	1.5	0.5	0.3

จากส่วนประกอบดังกล่าวเมื่อนำมาเผาจะทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก ซึ่งจะได้สารที่สำคัญ 4 ชนิด ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และ เตตระแคลเซียม-อะลูมิโนเฟอร์ไรท์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชื่อและส่วนประกอบสูตรทางเคมีและชื่อย่อของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบ	สูตรทางเคมี	สูตรทางเคมี(แบบย่อ)
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
เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

ที่มา: วินิจ ช่อวิเชียร (2529)

สารแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปแสดงดังต่อไปนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, C_3S) จะทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังแรงอัดได้เร็วในระยะแรกหรือที่ประมาณ 14 วัน มีอัตราการทำปฏิกิริยากับน้ำปานกลางก่อตัวภายในไม่กี่ชั่วโมง เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะให้ความร้อนปานกลางคือประมาณ 120 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม มีคุณสมบัติคือให้กำลังสูงและทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate, C_2S) จะทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้าลงคือที่ประมาณวันที่ 14 - 28 วันหลังจากการผสมและเรื่อยไปหากได้รับการบ่มชื้น โดยทำปฏิกิริยากับน้ำค่อนข้างช้า เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะให้ความร้อนค่อนข้างน้อยประมาณ 60 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม มีคุณสมบัติให้กำลังสูงและทนการกัดกร่อนของซัลเฟตได้ดี

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate, C_3A) ทำให้ปูนก่อตัวทันทีที่ผสมน้ำให้ความร้อนสูงประมาณ 210 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม โดยจะให้กำลังรับแรงอัดเล็กน้อยในวันแรกและไม่ให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลาแต่จะมีประโยชน์ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาไตรแคลเซียมซิลิเกต

4. เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite, C_4AF) จะก่อตัวอย่างรวดเร็วแต่ช้ากว่าและให้ความร้อนน้อยกว่าไตรแคลเซียมอะลูมิเนตเล็กน้อยส่วนการให้กำลังรับแรงอัดยังไม่เป็นที่ทราบแน่นอน

จากการศึกษาอัตราส่วนของสารประกอบแต่ละชนิดภายในคอนกรีตพบว่ามีส่วนประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตรวมกันประมาณร้อยละ 70 - 80 ซึ่งสารประกอบทั้งสองตัวนี้มีหน้าที่ควบคุมความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบสารประกอบเหล่านี้ด้วยวิธี X-ray diffraction เพื่อที่จะศึกษาสารประกอบดังกล่าวตลอดจนสารเชื่อมประสานจำพวกแคลเซียม - ซิลิเกต - ไฮเดรต (Calcium - Silicate - Hydrate, C-S-H) ซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดการประสานและรับกำลังแรงอัดได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในการวิจัยนี้จะต้องมีการคำนึงถึงสัดส่วนของสารประกอบภายในของมอร์ตาร์ที่ได้ด้วย

2.2.5 ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการผสมคอนกรีต

ในการทำปฏิกริยากันของสารที่ก่อให้เกิดคอนกรีตนั้นสามารถเกิดจากปฏิกริยาหลายประเภทด้วยกัน ดังนี้

1. ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) คือ การก่อตัวแข็งโดยปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยเกิดจากสารประกอบภายในซีเมนต์ที่มีอิทธิพลต่อกัน ซึ่งจะได้ผลผลิตออกมาในรูปของซีเมนต์เจล (Cement gel) ซึ่งมีลักษณะเหนียวคล้ายกาวก่อตัวแข็งและยึดเกาะแน่นกับวัสดุภายในซีเมนต์เจลจะประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีขนาดคอลลอยด์และมีความพรุนประมาณร้อยละ 28 ซึ่งภายในโพรงจะประกอบไปด้วยโพรงรู้น (Gel pore) และโพรงซักน้ำ (Capillary pore) โดยภายในซีเมนต์เจลจะประกอบไปด้วยสารแคลเซียม - ซิลิเกต - ไฮเดรต (C-S-H) ประมาณร้อยละ 50 - 90 โดยปริมาตร นอกจากนั้นยังมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์รวมอยู่ด้วย ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่มีผลเพิ่มฤทธิ์ความเป็นด่าง ทำให้ปูนซีเมนต์มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการที่จะเกิดการตกตะกอนและดูดซับโลหะหนักได้อีกด้วย โดยในตัวของแคลเซียมซิลิเกตเองก็มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนักไว้ได้เช่นเดียวกัน

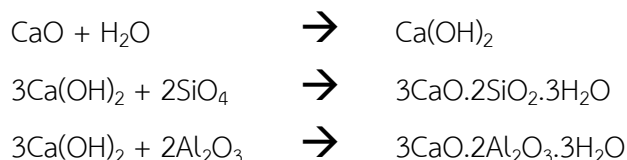
ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังสมการต่อไปนี้



ปฏิกริยาไฮเดรชันดังกล่าวจะดำเนินไปเรื่อยๆโดยที่แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะแยกตัวออกมาจากแคลเซียมซิลิเกต ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ไปเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จนสารละลายอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ถูกทำปฏิกริยาจนหมดไป หรือดูจากการเติมน้ำลงไป ปฏิกริยาไฮเดรชันนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อน้ำที่เติมลงไปลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำที่มีอยู่ ซึ่งหมายความว่าปฏิกริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีปริมาณมากกว่าหรืออย่างน้อยเป็นสองเท่าของปริมาณน้ำที่ต้องการในการทำปฏิกริยาเคมี ดังนั้นการต้องการน้ำจะมีอัตราส่วนต่อซีเมนต์ประมาณ 0.5 โดยน้ำหนัก

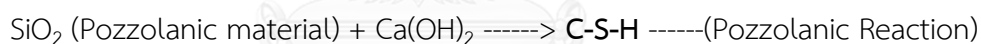
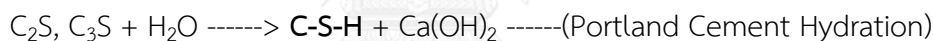
2. ปฏิกริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) คือปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และวัสดุปอซโซลานซึ่งประกอบไปด้วยซิลิกาหรือซิลิกาและอะลูมินา ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งในความเป็นจริงสารปอซโซลานนั้นหมายถึง สารที่ตัวเองไม่มีสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสาน แต่ทำปฏิกริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และก่อตัวเป็นวัสดุประสานได้ ซึ่งมีสารประกอบหลัก คือ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO ซึ่งสาร CaO นี้จะทำปฏิกริยากับน้ำได้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ซึ่งเมื่อรวมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เดิมที่เหลือจากการเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน ก็จะสามารถทำปฏิกริยากับสารประกอบอื่นๆทำให้เกิดปฏิกริยาปอซโซลาน

และก่อให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อีกด้วย โดยผลผลิตที่ได้จะเหมือนกับไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ที่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะเพิ่มขึ้นตามเวลา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปดังสมการต่อไปนี้



2.2.6 ความแตกต่างระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Portland cement Hydration VS Geopolymerization)

ลักษณะโครงสร้างของ Hydration ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ Geopolymer นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีตซีเมนต์เพสหรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน



โดยเมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่สองเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction) ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น (CSH) จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสมีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกันโดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของ ซิลิเกต (Si), อะลูมินา (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สาร เหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้เวลาในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย โดยวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างของโมเลกุลลูกโซ่แตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Si : Al ของสารตั้งต้น โครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์แสดงได้ดังสมการ



M คือ ธาตุอัลคาไลน์

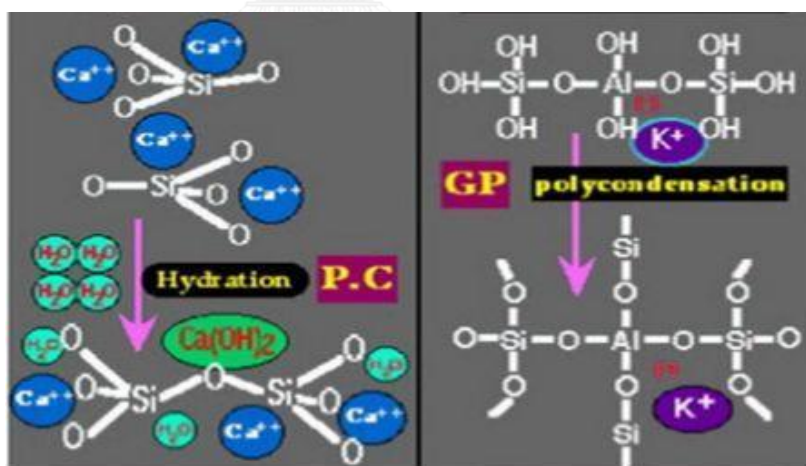
- คือ การยึดเกาะพันธะ

Z คือ จำนวนโมเลกุล,

n คือ หน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่

w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

สังเกตได้ว่าวัสดุ Geopolymer จะต้องใช้ความร้อนในการเร่งการเกิดปฏิกิริยา Geopolymerization ซึ่งในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์สามารถวิจัยค้นคว้าในการผสมวัสดุ Geopolymer ให้สามารถทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ได้ในอุณหภูมิปกติ (Ambient Temperature) โดยไม่ต้องใช้ความร้อนในการช่วยเร่งปฏิกิริยาอีกต่อไป ซึ่งจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของ Portland Cement Mortar เปรียบเทียบกับ Geopolymer Mortar พบว่าลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของ Geopolymer Mortar จะมีลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า Portland Cement Mortar ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างจะร่วน (Granular) และไม่มีความแน่นในการอัดตัวกัน

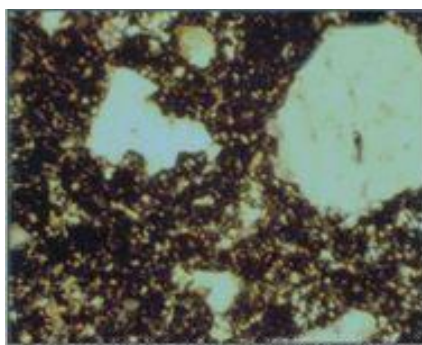


ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์เซชัน

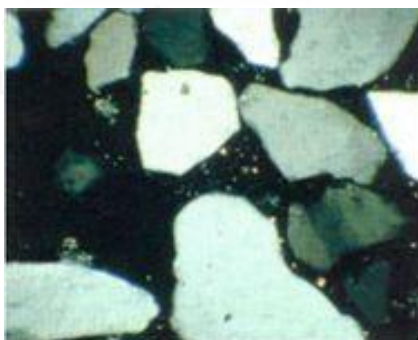
(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550)

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบภายในของวัสดุแต่ละชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550)

ชนิดของวัสดุประสาน	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
Portland Cement	21.70	5.04	3.43	64.64
Pulverized Fuel Ash	42.58	24.79	10.72	12.47
Rice Hush Ash	76.19	0.89	0.74	1.82
Metakaolin	52.86	42.79	0.50	0.03



ภาพที่ 2.6 ภาพขยายขนาดไมโครของซีเมนต์พอร์ตแลนด์
(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550)



ภาพที่ 2.7 ภาพขยายระดับไมโครของอีพอกซีเรซินฮาร์ดเนอร์
(ศักรินทร์ เหลืองกำจร, 2550)

2.3 การปรับเสถียรโดยการทำให้เป็นก้อน (Stabilization/Solidification)

2.3.1 การปรับเสถียร (Stabilization)

การปรับเสถียร หมายถึง กระบวนการที่เปลี่ยนแปลงลักษณะของกากของเสียให้มีความคงตัวมากขึ้น อาจจะทำหรือไม่ทำเป็นก้อนแข็งก็ได้ ซึ่งจะถือว่าการทำให้เป็นก้อนเป็นส่วนหนึ่งของการทำให้คงตัว แต่การทำให้คงตัวจะรวมไปถึงการใช้ปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลงลักษณะของเสียที่ก่อให้เกิดอันตรายเป็นลักษณะใหม่ที่เป็นสารหรือสารประกอบซึ่งมีลักษณะไม่เป็นอันตราย ทั้งนี้การทำให้คงตัวจะไม่พิจารณาถึงกระบวนการทางชีวภาพเลย ซึ่งการทำลายฤทธิ์ของสารดังกล่าวนี้ถูกออกแบบมาเพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของของเสีย ให้สะดวกต่อการขนส่งและเคลื่อนย้าย ลดพื้นที่ผิวของของเสีย และกำจัดสารปนเปื้อนของสารพิษที่ปล่อยออกมาจากของเสีย

2.3.2 การทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification)

การทำให้เป็นก้อนแข็ง คือ กระบวนการลดการแพร่กระจายของของเสียต่างๆ โดยไม่ทำให้แพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง จะทำโดยการเติมวัสดุประสานหรือ binder ลงไปเพื่อให้จับตัวกันเป็นก้อนแข็งโดยจะทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดพันธะเคมีกับของเสียที่ผสมลงไปหรือไม่ก็ได้ซึ่ง โดย Solidification เป็นกิจกรรมที่ซึ่งสารที่กระจัดกระจายหรือสารจำพวกตะกอนต่างๆ จะถูกนำมารวมกันเพื่อให้เกิดมวลที่แข็งตัวขึ้นไม่ว่าจะโดยวิธีการใด

นอกจากนี้ทั้งสองกระบวนการนี้รวมกันว่า พิเชชั่น (Fixation) ซึ่งโดยรวมแล้วการทำให้เสถียรโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของของเสียนั้นๆ ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษและสามารถจัดการได้ง่ายมากยิ่งขึ้นและลดพื้นที่ผิวของมลสารนั้นสามารถชะหรือถ่ายเทออกมาได้ และสุดท้ายเพื่อที่จะกำจัดความสามารถในการละลาย (Solubility) หรือการทำของเสียอันตรายให้หมดฤทธิ์เพื่อให้มีสภาพเหมาะสมที่จะนำไปบรรจุและเก็บไว้เป็นเวลานาน หรือเรียกว่า Long-term containment (ประพิศลา เทพสิทธา, 2542) ซึ่งกระบวนการทำให้เป็นก้อนที่ใช้ในการกำจัดหรือทำลายฤทธิ์ของของเสียมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีด้วยกัน ดังนี้ Cement Based Techniques, Lime Based Techniques, Thermoplastic Techniques (Bitumen, Paraffin and Polyethylene), Organic Polymers, Encapsulation, Self-cementing (Pozzolan) Techniques and Glassification (Shively และคณะ, 1986) โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีแรกคือ Cement Based Techniques

2.3.3 ชนิดของการจัดการของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

1. Cement Based
2. Lime Based
3. Thermoplastic Based
4. Organic Polymer Process
5. Encapsulation
6. Self Cementing
7. Glassification(Vitrification)

แต่ละประเภทของการจัดการของเสียโดยการทำเป็นก้อนแข็งนั้นก็มีข้อดีและข้อเสียรวมไปถึงข้อจำกัดต่างๆ ที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้และความยากง่ายของการทำ เพราะอาจต้องใช้ผู้ที่มีความรู้สูงในการที่จะควบคุมการจัดการของเสียในแต่ละระบบดังกล่าว อีกทั้งแต่ละวิธียังมีข้อจำกัดในเรื่องของชนิดของเสียที่จะต้องจัดการที่แตกต่างกันออกไป เพราะฉะนั้นตามตารางที่ 2.4 ได้มีการรวบรวมประเภทและวิธีการของการจัดการของเสียโดยการทำเป็นก้อน ประเภทหรือชนิดของของเสียที่ใช้กับแต่ละประเภท รวมไปถึงข้อดีข้อเสียของการจัดการของเสีย

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละกระบวนการในการกำจัดของเสียด้วยวิธีทำให้เป็นก้อนแข็ง (กฎฟิงค์ ทวีทรัพย์ (2540))

ประเภทของเสีย และกระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement Based Chemical Fixation Solidification (แห้งหรือเปียก โดยทั่วไปเหมาะกับของ เสียที่เป็นสาร อนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้มีราคาถูก - มีความทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี - กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดี - เป็นเทคนิคที่ได้มีการพัฒนาอย่างดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายความแข็งแรงของซีเมนต์ - ซีเมนต์และของเสียที่แข็งตัวแล้วถูกชะล้างได้ในสถานะที่มีค่าพีเอชต่ำ - เพิ่มน้ำหนักและขนาดของเสีย รวมถึงเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่ง
2. Lime Based Chemical Fixation Solidification (แห้งหรือเปียก โดยทั่วไปเหมาะกับของ เสียที่เป็นสารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุผสมที่ใช้มีราคาถูก - เป็นเทคนิคที่ได้มีการพัฒนาแล้ว - การใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิด โดยกระบวนการเดียวกัน 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายความแข็งแรงของซีเมนต์ - ซีเมนต์และของเสียที่แข็งตัวแล้วถูกชะล้างได้ในสถานะที่มีค่าพีเอชต่ำ - เพิ่มน้ำหนักและขนาดของเสีย รวมถึงเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่ง
3. Thermoplastic Based Physical Fixation (แบบแห้ง เหมาะกับ สารอนินทรีย์)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีได้เป็นอย่างดี - สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพงและใช้งานที่มีความชำนาญ - ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ - ไม่สามารถใช้กำจัด Strong oxidants, Dehydrated Salts

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละกระบวนการในการกำจัดของเสียด้วยวิธีทำให้เป็นก้อนแข็ง (ภูพิงค์ ทวีทรัพย์ (2540)) (ต่อ)

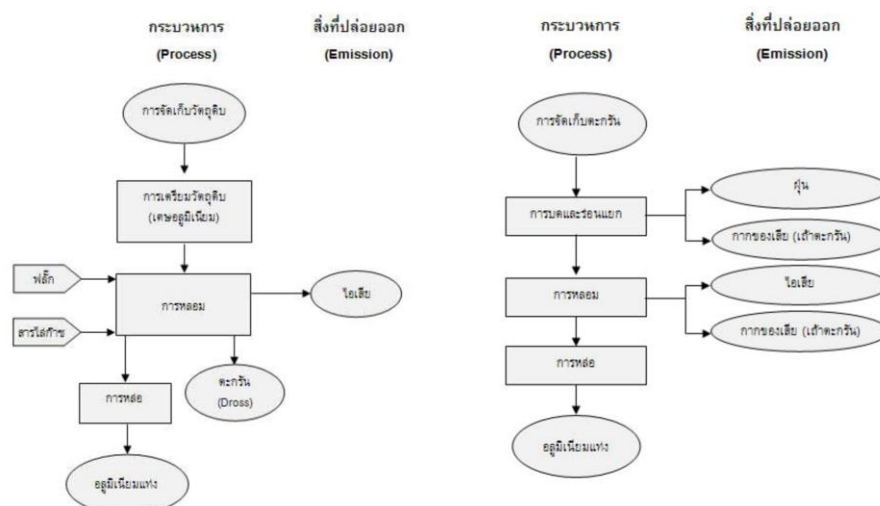
ประเภทของเสีย และกระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
4. Organic Polymer Process Physical Fixation แบบแห้งหรือแบบเปียก (ใช้กับสารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด Polymer's Matrix - ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียจะถูกยึดไว้ในโพลีเมอร์อย่างหลวมๆ - สารที่มีพีเอชต่ำ จะทำให้โลหะละลายออกมาได้มากขึ้น - การย่อยสลายทางชีวภาพของสารโพลีเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในหลุมฝังกลบ
5. Encapsulation Chemical Containment แบบแห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี - ไม่มีการชะล้างของของเสียออกมา เมื่อสารที่หุ้มห่ออยู่ไม่ถูกทำลาย - ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่นๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - การชะล้างของเสียจะเกิดขึ้นหากสารที่หุ้มถูกทำลาย - ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียเป็นจำนวนมากๆ
6. Self Cementing Chemical Fixation แบบแห้งหรือเปียก	<ul style="list-style-type: none"> - กระบวนการนี้ต้องการสารเติมในส่วนผสมซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะล้างได้ภายใต้สภาวะที่มีพีเอชต่ำ

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละกระบวนการในการกำจัดของเสียด้วยวิธีทำให้เป็นก้อนแข็ง (กฎฟิงค์ ทวีทรัพย์ (2540)) (ต่อ)

ประเภทของเสียและกระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
7. Classification Physical fixation แบบแห้ง	- ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วจะ ถูกชะล้างได้น้อยมาก	- อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียอื่น ระเหยออกมา - ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับ การให้ความร้อน อุปกรณ์ และ ต้องการผู้ที่มีความชำนาญ - ค่าใช้จ่ายสูง

2.4 ของเสียอะลูมินา

ของเสียอะลูมินาที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มาจากกระบวนการผลิตของโรงงานหลอมอะลูมิเนียมและทองเหลืองแห่งหนึ่งในจังหวัดฉะเชิงเทรา โดยออกมาในรูปแบบของผงกากตะกอนอะลูมิเนียมที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการหลอมอะลูมิเนียมแห้ง สองขั้นตอนดังภาพที่ 2.8 ในส่วนของขั้นตอนแรกคือ ตะกอนที่เกิดขึ้นเกิดจากการหลอมเศษอะลูมิเนียม จากนั้นตะกอนในส่วนนี้จะถูกนำมาทำการบดและคัดแยกอะลูมิเนียมที่ยังคงเหลืออยู่กลับไปเข้ากระบวนการหลอมอีกครั้ง ซึ่งในกระบวนการหลอมทั้งสองครั้งจะก่อให้เกิดตะกอนของเสีย หรือที่เรียกว่า กากตะกอนอะลูมินา



ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนการผลิตอะลูมิเนียมแท่งที่ก่อให้เกิดตะกอนของเสียอะลูมินา
(กรมโรงงานอุตสาหกรรม)

โดยปกติแล้วกากของเสียอะลูมินาจะถูกจัดการโดยการนำไปฝังในหลุมฝังกลบแบบปลอดภัย ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการจัดการอยู่ที่ 1,000 – 20,000 บาทต่อตันของเสีย ทั้งนี้ราคาจะขึ้นอยู่กับปริมาณในการกำจัดและระยะทางการขนส่งเคลื่อนย้ายของเสีย ซึ่งของเสียอะลูมินาที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวมีปริมาณมากถึง 2,400 ตันต่อปี โดยอ้างอิงตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 ได้จำแนกประเภทของเสียจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมหลอมอะลูมิเนียมไว้ดังนี้

10 03 ของเสียจากการหลอมอลูมิเนียม (wastes from aluminium thermal metallurgy)

10 03 04 HA ตะกรันจากกระบวนการผลิตปฐมภูมิ (primary production slags)

10 03 19 HM ฝุ่นจากเตาหลอมที่มีสารอันตราย (flue-gas dust containing dangerous substances)

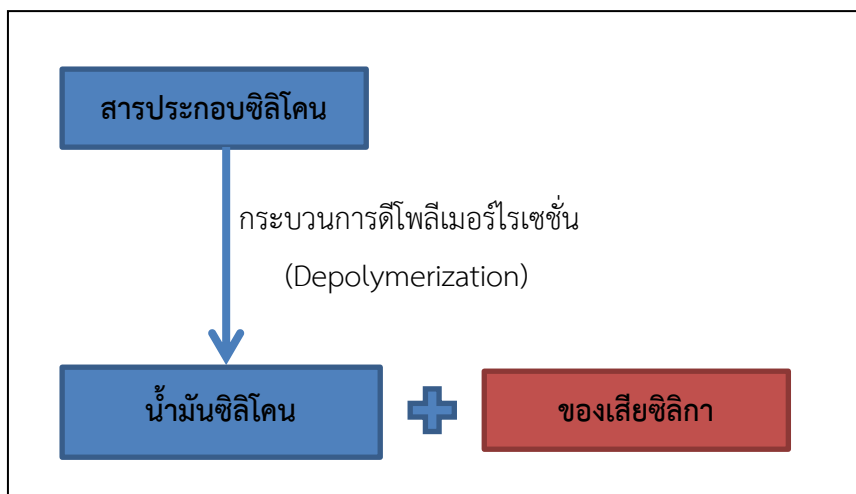
10 03 20 ฝุ่นจากเตาหลอม ที่ไม่ใช่ 10 03 09 (flue-gas dust other than those mentioned in 10 03 19)

จากรหัสของเสียดังกล่าว มีบางรหัสถูกจำกัดไว้ในรูปของ HM และ HA ซึ่งถือว่าเป็นของเสียอันตราย ซึ่งโดยปกติแล้วของเสียอันตรายเหล่านี้จะต้องนำไปทำการปรับเสถียรและทำให้เป็นก้อนแข็งเสียก่อนจึงจะนำลงสู่หลุมฝังกลบได้

2.5 ของเสียซิลิกา

ของเสียซิลิกาเป็นของเสียที่ได้จากโรงงานรีไซเคิลสารประกอบจำพวกซิลิโคนแห่งหนึ่งในจังหวัด ชลบุรี โดยการนำเอาสารประกอบเหล่านี้ที่ถูกนำไปใช้แล้วกลับมาผลิตเป็นน้ำมันซิลิโคน โดยของเสียซิลิกานี้เป็นผลผลิตจากกระบวนการดีโพลีเมอร์ไรซ์เซชัน โดยมีข้อมูลว่าปัจจุบันปริมาณของสารซิลิโคนที่ใช้แล้วมีจำนวนกว่า 1,000 ตันต่อปี และก่อให้เกิดของเสียจากอุตสาหกรรมนี้มีปริมาณมากกว่า 300 – 400 ตันต่อปี

สารประกอบซิลิโคน (Polymerized siloxanes) เป็นซิลิกอนอะนาล็อกของคาร์บอนและสามารถฟอร์มตัวเป็นโมเลกุลขนาดยาวและซับซ้อนมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของซิลิกอนและคาร์บอน โดยจะเกิดการสลับซิลิกอนและออกซิเจนอะตอม (- Si - O - Si - O - Si -) หรือ Siloxane มากกว่าอะตอมคาร์บอน (-CCCC-) ชนิดอื่นๆที่แนบไปกับ Tetravalent อะตอมซิลิกอนจะไม่ Divalent อะตอมออกซิเจนที่มีความพยายามในการขึ้นรูป Siloxanes ไซค์ตัวอย่างทั่วไปคือ Polydimethylsiloxane ที่กลุ่ม Methyl ติดกับอะตอมซิลิกอนแต่ละรูปแบบ $(\text{H}_3\text{C})[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n$ อะนาล็อกคาร์บอนจะเป็นอัลเคน เช่น Dimethylpropane C_5H_{12}



ภาพที่ 2.9 กระบวนการดีโพลีเมอร์ไรเซชันจากการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคน

(ชาลิสา วิสมหมาย, 2555)

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของของเสียตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ปี 2548 ได้จัดให้ของเสียซิลิกาตั้งกล่าวอยู่ในรหัส 06 08 02 HM หมายถึง ของเสียจากกระบวนการผลิต การผสมตามสูตรการจัดส่งและการใช้งานธาตุซิลิคอน และอนุพันธ์ของธาตุซิลิคอน ส่วนของเสียอะลูมินาจัดอยู่ในของเสียรหัส 10 03 04 HA และ 10 03 19 HM อยู่ในหมวดที่ 10 03 ซึ่งหมายถึง ของเสียจากการหลอมถลุงอลูมิเนียม จากสองขั้นตอนด้วยกันคือ 10 03 04 HA หมายถึง ตะกรันจากกระบวนการผลิตปฐมภูมิ (primary production slags) และ 10 03 19 HM หมายถึง ผุ่นจากเตาหลอมที่มีสารอันตราย (flue-gas dust containing dangerous substances) ซึ่งในภาคผนวกที่ 1 ข้อ 3 ได้ระบุไว้ว่า สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีรหัสเลข 6 หลักกำกับด้วยตัวอักษร HA (Hazardous waste – Absolute entry) หรือ HM (Hazardous waste – Mirror entry) ถือว่าเป็นสิ่งปฏิกูลหรือ วัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตรายตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ในภาคผนวกที่ 2 สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีรหัสกำกับด้วย HM ผู้ประกอบการต้องทำการวิเคราะห์ตาม หลักเกณฑ์ที่กำหนดในภาคผนวกที่ 2 ในกรณีที่ต้องการโต้แย้งว่าสิ่งปฏิกูลหรือ วัสดุที่ไม่ใช่แล้วดังกล่าวไม่เข้าข่ายเป็นของเสียอันตรายตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ในประกาศนี้ จึงได้ทำการตรวจสอบโดยนำของเสีย ทั้งสองชนิดไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 3050b. และ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วย เครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP) เปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTL) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ตามลำดับ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านจีโอโพลีเมอร์

Skvara และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ เนื่องจากในตัวของจีโอโพลีเมอร์เองมีคุณสมบัติที่ให้ความแข็งแรงดีและมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานที่เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยสารที่เป็นต่าง จึงทำให้ในปัจจุบันการผลิตจีโอโพลีเมอร์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถมาทดแทนการผลิตปูนซีเมนต์ในปัจจุบันได้ ซึ่งได้ทำให้ลดการใช้สารเชื่อมประสานแบบเก่าลง โดยอาจให้คำนิยามกับสารใหม่นี้ว่า Chemically bonded ceramics ซึ่งผลิตภัณฑ์นี้จะถูกสังเคราะห์ขึ้นจากการผสมเถ้าลอยกับสารละลายต่างทำให้ได้สารที่มีความเป็นอสัณฐานที่เกิดเป็นโครงสร้างผลึกผสมอยู่ด้วย ซึ่งจีโอโพลีเมอร์นี้ถูกเตรียมและสังเคราะห์ขึ้นจากเถ้าลอยที่ทำให้แตกตัวภายในสารละลายต่าง ซึ่งคุณสมบัติพิเศษนอกจากจะให้ความแข็งแรงสูงแล้วยังมีฤทธิ์ทนทานต่อการกัดกร่อนด้วยสารละลายเกลือและยังทนความร้อนได้ถึง 600 องศาเซลเซียสอีกด้วย และยังมี ความแตกต่างในประสิทธิภาพในการทนการกัดกร่อนจากสารละลายซัลเฟตอีกด้วยซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไม่มี

Andini และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหินมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ โดยทำการศึกษาที่สภาวะที่มีสัดส่วนของ Si/Al ที่ต่างกันคือ Polysialatesiloxo (PSS, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4$) และ polysialatedisiloxo (PSDS, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 6$) โดยมีการใส่สารละลายต่างจำพวก NaOH และ KOH ที่มีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์ โดยใส่ในปริมาณที่พอเหมาะกับการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ ซึ่งได้ทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 4 อุณหภูมิด้วยกันคือ 25, 40, 60 และ 85 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาในการบ่มที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละระดับของอุณหภูมิ ดังนี้ ที่ 25 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 16-672 ชั่วโมง ที่ 40 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 72-336 ชั่วโมง, ที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 16-120 ชั่วโมง และที่ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1-6 ชั่วโมง จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากที่ปัจจัยต่างกันมาตรวจวัดคุณภาพเชิงปริมาณโดยการวัดการเกิดโพลีคอนเดนเซชันผ่านทางวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของมวลและปริมาณที่เสียไปจากการติดไฟ และทดสอบคุณสมบัติเชิงคุณภาพด้วยวิธี FT-IR และทดสอบคุณภาพเชิงกายภาพโดยการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องโทรทรรศน์อิเล็กตรอนและการทดสอบกำลังการรับแรงอัด ความยืดหยุ่น ความหนาแน่น ทดสอบรูพรุน และขนาดพื้นที่ผิว ผลสรุปว่าจีโอโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดในการใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างคือจีโอโพลีเมอร์ที่ได้ทำการบ่มที่อุณหภูมิปกติหรือที่อุณหภูมิห้อง

Albakri และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำเอาเถ้าลอยมาผลิตเป็น จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตโดยไม่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากในปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์ได้ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านมลพิษเนื่องจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่บรรยากาศเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีผู้คิดค้นวิธีที่จะลดการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงโดยการหาวัสดุอื่นๆ มาทดแทน และในขณะเดียวกันเถ้าลอยก็เป็นปัญหาที่ก่อให้เกิดมลพิษที่มาจากอุตสาหกรรมที่มีการเผาไหม้ถ่านหินซึ่งจากคุณสมบัติของเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นจำนวนมาก ซึ่งสารเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างๆ เพื่อที่จะทำการสังเคราะห์ อะลูมิโนซิลิเกตเจลที่เป็นสารเชื่อมประสานในคอนกรีต จากการทดลองพบว่าค่าการรับแรงอัดของ สารจะเพิ่มขึ้นเมื่อคุณสมบัติของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและอนุภาคจะมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นด้วย นอกจากนี้จีโอโพลีเมอร์ยังมีคุณสมบัติที่ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมรอบข้างได้เป็นอย่างดีและ ทนต่อ ความร้อนสูงได้ ซึ่งมีผลทำให้จีโอโพลีเมอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติดีกว่าคอนกรีตทั่วไป

Tailby และ Mackenzie (2010) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติของ อะลูมิโนซิลิเกตจีโอโพลีเมอร์ที่ผสมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และการศึกษาแร่ธาตุองค์ประกอบภายใน โดยการศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากการสังเคราะห์อะลูมิโนซิลิเกตจีโอโพลีเมอร์ ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีสูตรโครงสร้างแตกต่างกันดังนี้ C_3S , $\beta-C_2S$, C_3A และ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้กันปกติทั่วไป โดยส่วนประกอบของทั้งจีโอโพลีเมอร์และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะ มีความเข้มข้นลดลง ทำการวิเคราะห์ X-ray diffraction และ SEM/EDS ได้ผลสรุปออกมาว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังคงเกิดขึ้นภายใต้การสังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์ ถึงแม้ว่าปฏิกิริยา ดังกล่าวจะต้องอาศัยน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยาหลักก็ตาม และจากการวิเคราะห์ SEM ได้ผลออกมาว่ามีการเกิดปฏิกิริยาที่รอบๆ อนุภาคของปูนและมีความหนาแน่นมากขึ้น มีการเกิดช่องว่างระหว่าง อนุภาคน้อยลง เพราะมีการเกิด C-S-H สามารถเกิดได้ช้าลงเนื่องจากถูกแย่งชิง Si ไปใช้ในปฏิกิริยาที่ สังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์ที่สามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่า ซึ่งได้ทำการพิสูจน์โดยการแทนที่โพแทสเซียมกับ โซเดียมด้วยการเติมโบเรทแล้วสังเกตได้ว่าการสังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์เกิดขึ้นได้ช้าลงจริง การทดลอง นี้ได้ผลสรุปว่าคุณภาพของมอร์ตาร์ที่เกิดจากการรวมกันของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ จีโอโพลีเมอร์มี คุณสมบัติที่ดีขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากการเติมโบเรทเข้าไปในการสังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์ จึงทำให้ มอร์ตาร์นี้มีความแข็งแรงมากกว่าการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว

Temuujin และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยเป็น วัสดุดิบ โดยทำการทดลองให้แต่ละมอร์ตาร์ตัวอย่างมีปริมาณทรายที่แตกต่างกัน และแต่ละมอร์ตาร์ก็ จะใช้ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละความเข้มข้นโดยให้มีสัดส่วนตั้งแต่ 9 ถึง

1 ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 60 เมกะพาสคาล (MPa) และค่าโมดูลัสเท่ากับ 2.27 กิกะพาสคาล (GPa) โดยที่ทั้งสองค่านี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณทรายขึ้นจนถึงร้อยละ 50 ซึ่งมีผลสรุปว่าวัสดุเชื่อมประสานจะจับตัวกับอนุภาคของทรายได้เป็นอย่างดี และการเพิ่มอัตราส่วนของทรายแต่ไม่มีการเพิ่มสารละลายเบสจะทำให้มีปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์เซชันได้น้อย

Huang และ Han (2011) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของจีโอโพลีเมอร์ในการที่จะดูดซับสารฟอร์มาลดีไฮด์เมื่อมีการเติมสาร α - Al_2O_3 ลงในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า α - Al_2O_3 ที่ใส่ลงไปอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชันได้ โดยวัดจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและค่ากำลังรับแรงอัดที่มากขึ้น โดยประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาหลังจากมีการเติมสาร α - Al_2O_3 ลงไปสามารถวิเคราะห์ได้จากผลการวิเคราะห์ FTIR สรุปว่าจีโอโพลีเมอร์ที่มีการเติมสาร α - Al_2O_3 ลงในจีโอโพลีเมอร์ตามอัตราส่วนที่เหมาะสมจะมีการดูดซับสารฟอร์มาลดีไฮด์ไว้ได้ดีกว่าในจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่ได้เติม

ชาลีสา วิสมหมาย (2555) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำของเสียซิลิกาไปใช้ประโยชน์โดยการนำไปผลิตเป็นจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ โดยได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีตลอดจนลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่มีผลต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ที่ได้ และศึกษาไปถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำเอาของเสียซิลิกามาใช้ในการเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานนั้นคือของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์เท่ากับ 1 : 1, 2 : 1 และ 3 : 1 และอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 60:20:20, 60:10:20, 70:20:10 และ 70:10:20 โดยทำให้เป็นมอร์ตาร์ขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม. และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาศึกษากำลังรับแรงอัดที่ 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 90 วัน ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของของเสียซิลิกาพบว่ามอดูลัสของแข็งของซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 71.3 ผลการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นพบว่าของเสียซิลิกามีลักษณะเป็นของแข็งอสัณฐาน นอกจากนี้ยังพบอีกว่ามีค่าโลหะหนักต่ำกว่ามาตรฐาน และอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์คือ 2 : 1 และอัตราส่วนระหว่างสารเชื่อมประสานกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตคือ 70:10:20 โดยสามารถรับกำลังแรงอัดเท่ากับ 190 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ยังมีการประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดย คือเท่ากับ 3.93 บาทต่อก้อน

Cheng และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษากลไกในการดูดซับโลหะหนักของจีโอโพลีเมอร์ที่ทำมาจาก metakaolin โดยทำการผลิตผสม metakaolin และสารละลายต่างในสัดส่วนที่คงที่ในอุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำจีโอโพลีเมอร์ที่ได้นำมาทำการตัดแต่งให้ได้รูปทรงที่เท่ากัน โดยในงานวิจัย

นี้จะทำการศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่แตกต่างกันของ จีโอโพลิเมอร์อันได้แก่ Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Cr^{6+} ที่ผสมอยู่ในสารละลายในสภาวะที่กระจายตัว ผลการวิจัยสรุปว่าจีโอโพลิเมอร์ประเภทนี้สามารถดูดซับโลหะหนักได้จริง และชนิดของโลหะหนักที่ จีโอโพลิเมอร์ที่สามารถดูดซับได้ดีที่สุดก็คือ Pb^{2+} จึงสามารถนำจีโอโพลิเมอร์ดังกล่าวมาใช้ในการ จัดการกับโลหะหนักในงานด้านการจัดสิ่งแวดล้อมได้

Perna และ Hanzlicek (2014) ทำการศึกษาการแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์ที่มีผลิตภัณฑ์ของ อะลูมิเนียมเป็นวัตถุดิบ เนื่องจากของเสียอะลูมินาที่มีลักษณะเป็นสารกึ่งของเหลวสีแดงและกากแร่สีเทา นั้นมีความเป็นพิษสูง จึงได้จัดการศึกษาวิธีการในการกำจัดและแปรสภาพของเสียอันตรายเหล่านี้โดย มีการค้นพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของของเสียอันตรายนี้สามารถจับตัวกันกลายเป็นสารที่มี ลักษณะแข็งได้ผ่านกระบวนการทำจีโอโพลิเมอร์ โดยจะอธิบายกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งนี้ผ่าน สองหัวข้อคือ การยับยั้งค่าความเป็นด่างของของเสีย และการลดระดับผลกระทบจากของเสีย อันตราย ซึ่งของแข็งที่ได้มีคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมและไม่ก่อให้เกิดก๊าซอันตรายเมื่อถูกทำให้มี อุณหภูมิสูงขึ้น โดยนักวิจัยได้ทำการศึกษาคูสมบัติต่างๆ อาทิ คุณสมบัติทางเคมี โดยสรุปว่า องค์ประกอบทางเคมีของของเสียกึ่งของเหลวสีแดงเป็นไปตามที่คาดเดาคือ Fe_2O_3 และ CaO มี ปริมาณมากที่สุดคือร้อยละ 29.95 และ 24.76 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และกากแร่สีเทามี ส่วนประกอบของ Al_2O_3 ในปริมาณสูงคือร้อยละ 54.55 โดยน้ำหนัก ซึ่งในกากตะกอนเหล่านี้มี องค์ประกอบของโลหะหนักเป็นปริมาณน้อย เช่น พรอทเทกกับร้อยละ 0.013 โดยน้ำหนัก ตะกั่ว เท่ากับร้อยละ 0.0369 โดยน้ำหนัก และสารหนูที่อยู่ในรูปของ As_2O_3 เท่ากับร้อยละ 0.00013 โดยน้ำหนัก และได้ทำการหาค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ โดยการผสมของเสียสีแดงในสัดส่วน ร้อยละ 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 38.51, 34.96, 30.79, 30.03 และ 28.51 เมกะพาสคาล (MPa) ตามลำดับ

Chen และคณะ (2015) ทำการศึกษาการชะละลายของตะกั่วจากจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากของ เสียตกค้างที่มีฤทธิ์เป็นกรด โดยของเสียดังกล่าว คือ หินปูนที่ได้จากกระบวนการเตรียมกรดใน อุตสาหกรรม ซึ่งประกอบไปด้วยโลหะหนักที่จัดเป็นสารอันตรายจำนวนมาก จึงได้ทำการผสมตัวอย่าง และแบ่งออกเป็น 2 ตัวอย่างด้วยกัน คือ ตัวอย่าง A เกิดจากการผสม กากแร่หินปูน 4,129 กรัม และ สารละลาย 2100 มิลลิลิตร ที่ประกอบไปด้วย $Pb(NO_3)_2$ 320 กรัม รวมถึง $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ และ น้ำกลั่น ส่วนตัวอย่าง B เกิดจากการผสมกากแร่หินปูน 3000 กรัม และสารละลาย 1,900 มิลลิลิตร โดยในสารละลายถูกแบ่งออกเป็นสองชนิดด้วยกัน คือ ที่ 700 มิลลิลิตร จะประกอบได้ด้วย $Pb(NO_3)_2$ 160 กรัม รวมถึง $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ และ $CuSO_4$ ส่วนอีก 1,200 มิลลิลิตร ประกอบไปด้วย

ZnSO₄·7H₂O และ K₂CrO₄ ที่ปรับปริมาตรให้เป็น 1,200 มิลลิลิตร จากการศึกษาพบว่า ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่าง A โดยรวมเท่ากับร้อยละ 1.84 ซึ่งเป็นส่วนประกอบของตะกั่วร้อยละ 0.76 ส่วนในตัวอย่าง B มีปริมาณโลหะหนักโดยรวมร้อยละ 1.99 ซึ่งเป็นตะกั่วอยู่ที่ร้อยละ 0.48 จากได้นำน้ำชะละลายมาหาค่าการชะละลายของตะกั่วด้วยเครื่องอินดักทีฟลิคัมเบิลด์พลาสมา (Inductively coupled plasma, ICP) โดยวัดค่าที่จำนวนเวลา 34, 72 และ 145 ชั่วโมง ได้ผลสรุปดังนี้ ปริมาณตะกั่วในน้ำชะละลายของตัวอย่าง A ที่ 34 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.075 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 72 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.166 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ 145 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในตัวอย่าง B พบว่าเมื่อทำการตรวจวัดค่าการชะละลายของตะกั่วทั้งที่ 34, 72 และ 145 ชั่วโมงแล้วพบว่า ไม่พบปริมาณของตะกั่วเลย คือมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร

El-Eswed และคณะ (2015) ทำการศึกษาการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็งของโลหะหนักในจีโอโพลีเมอร์ที่มีที่ผลิตจากคาโอลินและซีโอไลท์ ทำการศึกษาประสิทธิภาพและกลไกในการจับตัวของไอออนโลหะจำพวก Pb(II), Cu(II), Cd(II) และ Cr(III) ในจีโอโพลีเมอร์ที่ผลิตจากคาโอลินและซีโอไลท์ ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักในน้ำชะละลาย ค่าพีเอช และค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำชะละลาย และจำนวนระยะเวลาที่มอร์ตาร์ของจีโอโพลีเมอร์จะสามารถทนกับสภาพแวดล้อมที่กำหนด ศึกษาค่าความแข็งแรง ตลอดจน XRD, XRF และวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) โดยผลสรุปว่า การทำการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็งของจีโอโพลีเมอร์ที่มีคาโอลินและซีโอไลท์เป็นส่วนประกอบนั้นสามารถลดการชะละลายของโลหะหนักออกจากตัวมอร์ตาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะปล่อยไอออนที่ไม่เป็นอันตรายออกมาแทน อาทิ ไอออนจำพวก Na⁺ และ K⁺ โดยเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากันของประจุบวกของไอออนโลหะหนักที่มีต่อประจุลบของอะลูมิเนียมส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาภายในจีโอโพลีเมอร์ที่มีคาโอลินและซีโอไลท์เป็นส่วนประกอบ และนอกจากนี้ยังพบอีกว่าวิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายในการทำจีโอโพลีเมอร์ถูกกว่าเมื่อเทียบกับจีโอโพลีเมอร์ที่ทำมาจากเมตะคาโอลินโดยทั่วไป เพราะเสียพลังงานน้อยกว่าทำให้ต้นทุนในการผลิตถูกลงด้วย

Torres-Carrasco และ Puertas (2015) ทำการศึกษาการทำจีโอโพลีเมอร์จากแก้วลอยโดยมีของเสียจากการทำแก้วชนิดที่เป็นของเหลวเป็นสารละลายต่างกระตุ้น (Alkaline activator) โดยตัวอย่างแรกทำการผสมแก้วลอยกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 8 โมลาร์ ตัวอย่างที่สอง ทำการผสมแก้วลอยกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 โมลาร์ และของเสียแก้ว (Waste glass) ชนิดเหลว 15 กรัม จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติของคุณภาพทางจุลภาคโดยการทำฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared

Spectroscopy) เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffraction) และโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) จากการศึกษาถึงปริมาณส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและสารละลายต่างกระตุ้น ได้ผลสรุปดังนี้ ภายในเถ้าลอยประกอบไปด้วยส่วนประกอบของ SiO_2 มากที่สุด คือมีมากถึงร้อยละ 54.44 และรองลงมาคือ Al_2O_3 ร้อยละ 27.51 และ CaO ร้อยละ 2.72 ส่วนสารละลายต่างกระตุ้น (Alkaline Activated solution) ในที่นี้คือของเสียแก้ว (Glass Waste) มีส่วนประกอบของ SiO_2 มากที่สุดเป็นหลักเช่นกันคือ ร้อยละ 70.71 รองลงมาคือ CaO ร้อยละ 11.75 และ Al_2O_3 ร้อยละ 2.05 จากนั้นทำการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ผลสรุปว่า จีโอโพลีเมอร์ที่เกิดจากส่วนประกอบของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 8 โมลาร์ เพียงอย่างเดียว นั้น มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน น้อยที่สุดคือที่ 27 เมกะพาสคาล (MPa) ส่วนที่มีการผสมของเสียแก้ว ที่ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้นคือ 37 เมกะพาสคาล (MPa) และมอร์ตาร์ที่ประสิทธิภาพมากที่สุดคือที่มีการผสมแก้วเหลวเป็นสารละลายต่างกระตุ้นกล่าวคือที่เวลา 28 วัน สามารถมีกำลังรับแรงอัดได้มากถึง 39 เมกะพาสคาล (MPa)

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการปรับเสถียรโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง

สุจิตรา กันยาวิลาส (2545) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำตะกอนนิเกิลไฮดรอกไซด์ให้เป็นก้อนด้วยการใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร่วมกับปูนขาวและปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานโดยทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำเป็นก้อน ซึ่งใช้วัสดุประสานสองชนิดคือ ซิลิกา-อะลูมินากับปูนขาว และซิลิกา-อะลูมินากับปูนซีเมนต์ โดยพิจารณาสมบัติทางกายภาพ คือ ค่ากำลังรับแรงอัดและประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย แล้วทำการแปรค่าอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนเป็น 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 อัตราส่วนซิลิกาและอะลูมินาต่อซีเมนต์เป็น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 และเปรียบเทียบระหว่างการใช้ซิลิกา-อะลูมินากับปูนขาวกับซิลิกา-อะลูมินาต่อซีเมนต์ โดยทำการแปรค่าอัตราส่วนต่ออัตราส่วนวัสดุประสานเป็น 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 พร้อมกับแปรค่าระยะเวลาบ่มเป็น 7, 14 และ 28 วัน แปรขนาดซิลิกา-อะลูมินาบัดแล้ว ($D_{50} = 10$ ไมโครเมตร) และขนาดที่ยังไม่ได้บัดและการประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นเพื่อเปรียบเทียบกัน ซึ่งจากการทำการวิจัยพบว่าอัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนที่เหมาะสมเป็น 0.25 อัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาต่อปูนขาวเท่ากับ 0.4 อัตราส่วน ซิลิกา-อะลูมินาต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.2 และสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ซิลิกา-อะลูมินาผสมปูนขาวกับซิลิกา-อะลูมินาผสมกับปูนซีเมนต์ในการแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.6 และระยะเวลาบ่มเป็น 14 วัน ด้วยการนำซิลิกา-อะลูมินาที่บัดแล้วเช่นเดียวกันทั้งสองชนิดได้ผลค่ากำลัง

รับแรงอัดเป็น 8.85 และ 21.53 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการลดการชะละลายเป็นร้อยละ 99.84 และ 67.06 ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดเท่ากับ 715 และ 459 บาทต่อตันตะกอนแห้งตามลำดับ

ณัฐพล เศรษฐโอฬาร (2554) งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาของเสียซิลิกาเพื่อใช้แทนซิลิกาฟูมในการผลิตมอร์ตาร์ผสมเสร็จ โดยนำกากของเสียซิลิกาผ่านการแยกขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดให้มีความละเอียดสูงได้เป็นกากซิลิกาแยกละเอียด มีรูปร่างทรงกลม ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.2 ไมครอน จากนั้นนำกากของเสียซิลิกาแยกละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับการใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นจากตัวแทนจำหน่ายแทนปูนซีเมนต์เพื่อทำมอร์ตาร์ผสมเสร็จในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.40 ทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ผลการวิจัยพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมซิลิกาฟูมให้กำลังอัดสูงสุด ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมกากของเสียซิลิกาพบว่าการใช้กากของเสียซิลิกาแยกละเอียดร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ให้กำลังอัดสูงสุด การใช้กากของเสียซิลิกาแยกละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 สามารถใช้แทนซิลิกาฟูมร้อยละ 10 ได้ เนื่องจากมีกำลังอัดใกล้เคียงกัน เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28 วัน และผ่านเกณฑ์มาตรฐานนอกจากนี้มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของกากของเสียซิลิกาแยกละเอียดร้อยละ 10 มีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้น อีกเมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากกว่า 28 วัน แสดงให้เห็นว่ากากของเสียซิลิกาแยกละเอียดมีศักยภาพสูงที่จะนำไปใช้แทนที่ซิลิกาฟูมเพื่อทำมอร์ตาร์ผสมเสร็จ

Shi และ Jimenez (2006) ศึกษาเกี่ยวกับการปรับสภาพกากของเสียอันตรายและของเสียที่เจือปนกับมันตภาพรังสีโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งร่วมกับการใช้อัลคาไลน์แอคทีเวทซีเมนต์ (Alkaline-activated cement) โดยในอัลคาไลน์แอคทีเวทซีเมนต์จะประกอบไปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นเบสหรือที่เรียกว่า Alkaline activator และส่วนประกอบอื่นๆ ของซีเมนต์โดยทั่วไปจำพวก ซี้้ถ้าจากกระบวนการเผาต่างๆ แถ้ลอย แถ้ฟอสฟอรัส แถ้เหล็ก และเมทาคลิลิน เป็นต้น ซึ่งในบางที่อาจมีมากกว่าหนึ่งชนิดผสมอยู่ภายใน ซึ่งในอัลคาไลน์แอคทีเวทซีเมนต์ที่มีสัดส่วนพอเหมาะจะมีคุณสมบัติที่แข็งแรงมากกว่าซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้กันโดยทั่วไป จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดภายในอัลคาไลน์แอคทีเวทซีเมนต์จะก่อให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), ทอปเมอไรท์, โซ-นอทไลท์ และอาจเกิดซีโอไลท์ในบางกรณี ซึ่งจะไม่มีการเกิดสารจำพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือแคลเซียมซิลโพอะลูมิเนท นอกจากนี้อัลคาไลน์แอคทีเวทซีเมนต์ยังมีคุณสมบัติพิเศษคือมีฤทธิ์ทนทานต่อการกัดกร่อนได้และการแพร่กระจายออกมาบนเปื้อนของสารที่ทำการฉนิกไว้ก็มีน้อยกว่าการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วๆ ไป ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าอัลคาไลน์แอคทีเวท

ซีเมนต์มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับการทำให้เสถียรโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็งมากกว่าการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วๆ ไป

Malviya และ Chuadhary (2006) ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการจัดการของเสียอันตรายด้วยการทำให้เสถียรโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง เนื่องจากงานวิจัยในเรื่องนี้มีความหลายในเรื่องการนำวัตถุบดหรือของเสียที่แตกต่างกันหลายชนิด ซึ่งสารแต่ละชนิดนั้นก็มีความสมบัติของความเป็นสารเชื่อมประสานที่แตกต่างกันออกไป ทำให้ส่งผลต่อการทำให้เป็นก้อนแข็ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาทั้งลักษณะทางกายภาพลักษณะทางเคมีรวมถึงการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งได้ทำการรวบรวมไว้หลายวัตถุบดด้วยกัน คือ กากตะกอนจากน้ำเสียที่มีการเจือปนกับโลหะหนัก ชิ้นเค้กจากการกรอง ถ้ำลอย และซีเมนต์อื่นๆ ที่สามารถมีคุณสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานได้ ซึ่งการศึกษาผลกระทบจากคุณสมบัติของสารแต่ละตัวนั้นได้จากการทดลองในหลายๆรูปแบบแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของสารนั้นๆ โดยผลสรุปโดยย่อว่าขนาดของช่องว่างภายในจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของส่วนผสมภายในและปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นภายในและปฏิกิริยาคาร์โบเนชันนั้นมีความแข็งแรงของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นอีกด้วย

Qian และคณะ (2006) ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการจัดการถ้ำลอยจากกระบวนการเผากากตะกอนของชุมชนด้วยวิธีการนำมาทำให้เป็นก้อนแข็ง ทำการศึกษาลักษณะของถ้ำลอยที่เกิดขึ้นว่ามีคุณสมบัติต่อการเป็นวัสดุประสานอย่างไรบ้าง โดยจะทำการผสมถ้ำลอยที่ได้นี้กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำการให้ถ้ำลอยเหล่านี้ไม่แพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยจะศึกษาตะกอนสามประเภทที่ต่างกัน ผลการวิจัยสรุปว่าการจัดการของเสียด้วยวิธีนี้สามารถผนึกอนุภาคของโลหะหนักจำพวก Zn, Pb, Cu, Ni และ Mn ที่ผสมอยู่ในถ้ำลอยไว้ในก้อนแข็งได้ โดยในตัวอย่างที่มีการผสมซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 - 15 จะได้ค่ารับแรงอัดที่เพียงพอต่อการนำไปฝังกลบได้คือเท่ากับ 0.3 เมกะพาสคาล (MPa) ซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสมคือ ถ้ำลอยร้อยละ 45 ซีเมนต์ร้อยละ 5 และตะกอนของเสียอุตสาหกรรมอีกร้อยละ 50 ซึ่งการใส่การตะกอนของเสียจากอุตสาหกรรมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันภายในได้ซึ่งจะทำให้เพิ่มความแข็งแรงของตัวอย่างมากยิ่งขึ้น โดยผลิตภัณฑ์หลักของการเกิดปฏิกิริยานี้คือ เอททริงไกท์ เกลือฟรีเดิล และสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งสารเหล่านี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการทำให้เป็นก้อนให้เหมาะสมกับการนำไปฝังกลบยิ่งขึ้น

Silva และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการจัดการของเสียในรูปของตะกอนที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การจัดการกากตะกอนของเสียอันตรายที่มาจากรองงานผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการปรับเสถียรโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งนี้จะนำไปใช้

ในการทำบล็อกคอนกรีตหรือใช้รองรับพื้นถนนตลอดจนรองรับพื้นผิวลานจอดรถได้อีกด้วย โดยส่วนประกอบภายในจะประกอบไปด้วย ซีเมนต์ ปูนขาว ดินเหนียว และ ของเสียที่ถูกทดสอบค่าการชะละลายและค่าการปนเปื้อนเทียบตามมาตรฐานการจัดการของเสียของประเทศบราซิลเรียบร้อยแล้ว ซึ่งผลปรากฏว่าในการทำจีโอโพลีเมอร์ชนิดนี้มีค่าการชะละลายของโลหะหนักและค่าการละลายของส่วนประกอบภายในก็ต่ำด้วยอันเป็นผลทำให้ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งถ้าหากเราจะพิจารณาเกี่ยวกับผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้ว โดยปกติแล้วการกำจัดกากตะกอนที่มีการเจือปนโลหะหนักโดยการฝังกลบนั้นจะต้องเสียค่าใช้จ่าย 150 ถึง 200 เหรียญดอลลาร์สหรัฐด้วยกัน แต่ในขณะที่ 1 ตันของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของกากของเสียเหล่านี้มีมูลค่าอยู่ที่ประมาณ 100 เหรียญดอลลาร์สหรัฐด้วยกัน จากผลการทดลองนี้พบว่าการผลิตจีโอโพลีเมอร์จากการรวมตัวกันของส่วนประกอบเหล่านี้ส่งผลดีในด้านเศรษฐศาสตร์เป็นอย่างมาก

Coz และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการเติมสารที่เป็นตัวดูดซับสารและซิลิกาเติร่วมกับการทำให้เป็นก้อนแข็งจากการจัดการของเสียอินทรีย์และของเสียอินทรีย์จากกากของเสียอุตสาหกรรมเนื่องจากในปัจจุบันปัญหาเกี่ยวกับการจัดการของเสียที่มาจากอุตสาหกรรมโรงหลอมและขึ้นรูปโลหะกำลังเป็นปัญหาที่สำคัญ เนื่องจากโรงหลอมและขึ้นรูปเหล็กนั้นได้ก่อให้เกิดของเสียจากหลายขั้นตอนซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการจัดการของเสียที่เป็นกากตะกอนจากกระบวนการทำความสะอาดก๊าซด้วยน้ำหรือที่เรียกว่า Gas Wet Cleaning Treatment ซึ่งของเสียจากขั้นตอนนี้จะประกอบไปด้วยสารที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยจากคุณสมบัติแล้วสารเหล่านี้สามารถจัดการได้โดยการทำให้เสถียรด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็งได้ด้วยวิธีต่างๆ กันก่อนที่จะนำไปฝังกลบ จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาวิธีการในการที่จะเคลื่อนย้ายสารจากแหล่งกำเนิดสู่หลุมฝังกลบและป้องกันการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยจะมีการผสมซีเมนต์และปูนขาวรวมกับสารอื่นๆ เช่น ผงเศษโลหะอุตสาหกรรมหล่อโลหะ ซิลิกาฟุ้ง โซเดียมซิลิเกต กรดซิลิซิก แอคทิเวทเตคคาร์บอนและคาร์บอนดำ ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติที่สามารถช่วยดูดซับและเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการกับกากของเสียภายในให้สามารถทำการเคลื่อนย้ายได้มากขึ้นและสามารถลดความเสี่ยงของการรั่วไหลของของเสียภายในได้อีกด้วย จากผลการวิจัยได้สรุปว่าสารดูดซับที่ใส่เข้าไปมีส่วนช่วยในการดูดซับสารตัวกลางที่เป็นของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสารจำพวกผงโลหะและซีเถ้าจากอุตสาหกรรมประเภทนี้สามารถแทนที่สัดส่วนของซีเมนต์ในการทำให้เป็นก้อนแข็งได้ แต่อย่างไรก็ตามซิลิกาฟุ้งในตัวอย่างที่ผสมกับปูนขาวและเรซินทำให้ได้ผลออกมาได้คุณภาพไม่ดีเท่ากับชุดควบคุมที่เปรียบเทียบกับไว้

Aye และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาการทนทานต่อซัลเฟตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีเมนต์ที่มีปริมาณของอะลูมินาสูงโดยผ่านระบบทดสอบความกระด้าง โดยการสังเคราะห์มอร์ตาร์โดย

บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย Na_2SO_4 และ MgSO_4 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส อีกเช่นเดียวกัน จากนั้นนำมาหาค่าความต้านทานด้วยสายตาโดยสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่ผิวของมอร์ตาร์และน้ำหนักของมอร์ตาร์ ผลปรากฏว่ามอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลาย Na_2SO_4 ถูกทำลายแต่ไม่มีผลกับมอร์ตาร์ที่แช่อยู่ในสารละลาย MgSO_4

Ann และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนโลหะภายในคอนกรีตที่มีปริมาณอะลูมินาสูง ซึ่งจากการทดสอบการกัดกร่อนโดยคลอไรด์ (Chloride-induced corrosion) โดยจะพิจารณาที่ไอออนคลอไรด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานและทำหน้าที่ในการเป็นตัวส่งต่อ ทำการทดลองโดยการจุ่มมอร์ตาร์ตัวอย่างลงในสารละลายเกลือ จากนั้นนำมาทดสอบหาความสามารถในการเชื่อมประสานของไอออนคลอไรด์โดยวิธีการสกัดวิเคราะห์สารจากน้ำ (Water extraction) ที่เวลา 28, 58 และ 91 วัน ซึ่งอัตราการแพร่กระจายของไอออนคลอไรด์จะสามารถบอกได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของไอออนและความเข้มข้นของไอออนคลอไรด์ที่ผิวหน้า จากนั้นนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดจนถึงระยะเวลา 365 วัน ผลการวิจัยสรุปว่าคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของอะลูมินาสูงจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่มาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป แม้ว่าที่ 28 วันหลังจากที่มีการกัดกร่อนโดยสารละลายเกลือแล้วก็ตาม อัตราการกัดกร่อนของคอนกรีตที่มีอะลูมินาสูงจะมีความสามารถในการทนกับการกัดกร่อนได้มากกว่าซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา อันเป็นผลเนื่องมาจากไอออนคลอไรด์ในคอนกรีตปกติมีความสามารถในการประสานน้อยกว่า สำหรับเรื่องการแพร่กระจายของคลอไรด์พบว่ามอร์ตาร์ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันไม่มาก

Antemir และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการจัดการของเสียโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งในระยะยาว เนื่องจากการศึกษาเกี่ยวกับการทำให้เป็นก้อนแข็งนี้ยังมีการศึกษาในระยะเวลาดสั้นๆ ยังไม่มีผู้ใดทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการนี้ระยะยาว ดังนั้นการศึกษาผลกระทบในระยะยาวจึงมีความสำคัญมากต่อการจัดการของเสียด้วยกรรมวิธีนี้ โดยจะทำการสกัดตัวอย่างจากแหล่งที่มาและใช้วิธีการวิเคราะห์หลายวิธีด้วยกันเพื่อที่จะทำการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ โดยวิธีการเอ็กซ์เรย์เพื่อวิเคราะห์สารที่เป็นองค์ประกอบ ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนตรวจสอบสภาพและคุณสมบัติทั่วไปและการทดสอบการชะละลายของสารพิษ ผลที่ได้ออกมาคือโครงสร้างทางจุลภาคของสารมีความคล้ายคลึงกับสารวัสดุที่ทำจากซีเมนต์อื่นๆ แต่แตกต่างกันอันเป็นผลเนื่องมาจากชนิดของทรายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและไม่มีสารปนเปื้อนเกิดขึ้นและมีผลสรุปว่าใน

ระยะเวลา 16 ปีการจัดการของเสียด้วยวิธีนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจเป็นอย่างยิ่ง กล่าวคือไม่มีการชะละลายและการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบ

Hunce และคณะ (2012) ทำการศึกษาการปรับเสถียรน้ำชะละลายจากหลุมฝังกลบโดยการนำมาทำให้เป็นก้อนแข็งซึ่งใช้วัสดุดิบต่างกัน เนื่องจากน้ำชะละลายที่มีความเข้มข้นสูงสามารถนำมาทำการปรับเสถียรโดยการขึ้นรูปเป็นก้อนแข็งได้โดยใช้วัสดุผสมที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากมีงานวิจัยที่ทราบว่าจะสามารถจัดการกับของเสียจำพวกโลหะหนักและของเสียอื่นๆได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้สามารถจัดการกับ TOC, DOC, TDS และแอมโมเนียซึ่งจากการนำมาทำให้เป็นก้อนแข็งจะเหลือเพียงประมาณ 1% ในน้ำชะละลายเท่านั้น ดังนั้นวิธีนี้สามารถนำไปใช้ในการจัดการของเสียที่หลุมฝังกลบได้

Anastasiadou และคณะ (2012) ทำการศึกษาการจัดการกับเถ้าลอยซีเมนต์จากกระบวนการเผาของเสียจากโรงพยาบาลโดยการนำมาปรับเสถียรโดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดอัตราการชะละลายของโลหะหนักออกจากสิ่งแวดล้อมโดยจะต้องสามารถทำให้ค่าการชะละลายอยู่ในระดับมาตรฐานที่กำหนดไว้ตามกำหนดของการกำจัดของเสียในหลุมฝังกลบบนบกปลอดภัย และเพื่อทดลองปรับเปลี่ยนเทคนิคการปรับเสถียรโดยการให้เป็นก้อนแข็งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดการของเสียโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของเถ้าลอยและซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราที่แตกต่างกัน การทดลองสรุปว่า การจัดการของเสียประเภทนี้สามารถป้องกันไม่ให้โลหะหนักที่มีอยู่ในเถ้าลอยและซีเมนต์นั้นกระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยทำการทดสอบ TCLP ได้ความเข้มข้นของ Zn (13.2 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ Pb (5.21 มิลลิกรัมต่อลิตร) และมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 0.55 ถึง 16.12 เมกะพาสคาล (MPa) โดยการเพิ่มปริมาณส่วนผสมของซีเมนต์มีผลทำให้มีค่ารับแรงอัดมากขึ้น โดยที่ผสมซีเมนต์ร้อยละ 60 และเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.57 ถึง 12.7 เมกะพาสคาล (MPa) ผสมซีเมนต์ร้อยละ 60 และซีเมนต์ร้อยละ 40 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 6.62 – 16.12 เมกะพาสคาล (MPa) โดยค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงเป็น 0.55 ถึง 1.30 เมกะพาสคาล (MPa) เมื่อผสมซีเมนต์ร้อยละ 70 และเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 0.90 ถึง 7.95 เมกะพาสคาล (MPa) เมื่อผสมซีเมนต์ร้อยละ 70 และซีเมนต์ร้อยละ 30

Song และคณะ (2013) ทำการศึกษารูปแบบการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนน้ำเสียที่ถูกบำบัดโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยมีซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน โดยรูปแบบการชะละลายและส่วนประกอบของโลหะหนักจากการทำ semi-dynamic leaching test, TCLP และการสกัดอย่างต่อเนื่อง (sequential extraction procedures) และศึกษาประสิทธิภาพในการจัดการของเสียด้วยวิธีการปรับเสถียรและทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่คำนวณจากข้อมูลที่ได้จากการทำ semi-dynamic leaching test ภายใต้ปัจจัยควบคุมที่ให้ค่า

สัมประสิทธิ์การแพร่สูง ค่าพีเอชต่ำอยู่ที่ 4 เปรียบเทียบกับ 7 และ 10 และที่อุณหภูมิสูง คือ 35 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับที่ 25 และ 10 องศาเซลเซียส โดยผลสรุปว่าการปรับเสถียรโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งในมีกรดเป็นตัวช่วยนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานปรับเสถียรและการปรับให้เป็นก้อนแข็งด้วยวิธีปกติแล้วจะเห็นได้ว่าทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ลดต่ำลงและแนวโน้มของการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักโดยจำพวก Ni, Cu, Zn และ Pb ด้วยวิธี TCLP ก็มีค่าลดลง เพราะโลหะหนักได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นผลึกที่คงตัวมากยิ่งขึ้น

Sobiecka และคณะ (2014) ศึกษาการปรับปรุงสัดส่วนผสมและค่าพีเอชที่เหมาะสมในการจัดการของเสียจากสถานพยาบาลในรูปซีเมนต์ที่ได้จากการเผาโดยใช้วิธีการปรับเสถียรและทำให้เป็นก้อนแข็งโดยมีซีเมนต์พอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ทำการศึกษาที่พีเอชแตกต่างกัน ตั้งแต่ 3 ถึง 12 และดูว่ามีผลต่อการจับตัวของโลหะหนักภายในหรือไม่ ซึ่งศึกษาจาก 2 กระบวนการหลักของการทำการปรับเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็งนั้นคือ กระบวนการซีเมนต์ไฮเดรชัน (cement hydration) และ กระบวนการทำแกรนูล (granulation) ซึ่งโดยปกติแล้วกระบวนการซีเมนต์ไฮเดรชันจะให้ความคงตัวและประสิทธิภาพต่อผลิตภัณฑ์มากกว่ากระบวนการทำแกรนูล ผลสรุปว่าผลิตภัณฑ์ที่ประกอบไปด้วยซีเมนต์ของเสียมากที่สุดและผสมกับซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่อัตราส่วน 60% โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพสูงสุดในการจับตัวไอออนโลหะหนักจำพวก Pb^{2+} และ Cu^{2+} ส่วนในผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของซีเมนต์น้อยที่สุดหรือเท่ากับ 10% โดยน้ำหนัก นั้น พบว่ามีการชะละลายของไอออน Zn^{2+} น้อยที่สุด และเมื่อผสมซีเมนต์และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เท่ากันจะทำให้เกิดกระบวนการห่อหุ้ม (encapsulation) ของไอออน Ni^{2+} , Cd^{2+} และ Cr^{3+} มากที่สุด และสถานะที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้มีการชะละลายของโลหะหนักน้อยที่สุดคืออยู่ที่ค่าพีเอชเป็นกลางหรือต่างอ่อนๆ (พีเอชเท่ากับ 7-8)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการทำจีโอโพลีเมอร์มีประสิทธิภาพในการขึ้นรูปวัสดุและได้รับกำลังรับแรงอัดได้ที่อุณหภูมิการบ่มระหว่าง 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ถึง 48 ชั่วโมง โดยใช้ของเสียที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นหลัก เนื่องจากเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชัน โดยจากงานวิจัยของชาลิสสา วิสมหมาย (2555) ได้ทำการศึกษการผลิตจีโอโพลีเมอร์โดยมีวัสดุประสานเป็นของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ ในงานวิจัยนี้จึงได้แทนที่อะลูมินาบริสุทธิ์ด้วยของเสียอะลูมินา อันจะนำมาซึ่งการลดต้นทุนของอะลูมินาบริสุทธิ์ลงได้ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษากำหนดการจัดการของเสียอะลูมินาโดยนำมาทำเป็นก้อนแข็ง เพื่อหาวิธีการทางเลือกในการจัดการของเสียอะลูมินา จากงานวิจัยที่ทำการศึกษา การจัดการของเสียด้วยวิธีนี้ สามารถลดการชะละลายของไอออนโลหะหนักและมีความคงสภาพสูงรวมถึงมีต้นทุนในการบำบัดต่ำทำให้เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ควรศึกษาและพัฒนาต่อไป

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยการนำเอาของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการจัดการกับของเสียอะลูมินาโดยวิธีการทำให้เสถียรโดยการทำให้เป็นก้อน โดยงานวิจัยนี้ทำการวิจัยที่ห้องปฏิบัติการวิจัยบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยการนำเอาของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาเป็นวัตถุดิบในการผลิต

สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 เก็บตัวอย่างของเสียซิลิกาจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสียแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรีและของเสียอะลูมินาจากโรงงานหลอมอะลูมิเนียมในจังหวัดฉะเชิงเทรา
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการทำการวิจัย
- ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยการผสมระหว่างของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาและสารละลายเบสที่ใช้ในการวิจัย
- ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบคุณภาพของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ได้แก่ ทดสอบกำลังรับแรงอัดและทดสอบการชะละลาย
- ขั้นตอนที่ 5 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาใช้ประโยชน์ในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

การศึกษาการจัดการของเสียอะลูมินาโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง

สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 เก็บตัวอย่างของเสียอะลูมินาจากโรงงานหลอมอะลูมิเนียมในจังหวัดฉะเชิงเทรา
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของของเสียอะลูมินา (ในขั้นตอนที่ 1 และ 2 นี้จะทำพร้อมๆ กันกับการวิเคราะห์วัตถุติดของการผลิตจีโอโพลีเมอร์)
- ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการจัดการของเสียอะลูมินาด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างของเสียอะลูมินาและวัสดุประสานที่ใช้ ตลอดจนอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างของเสียอะลูมินาและวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เพิ่มเข้าไป
- ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบคุณภาพของมอร์ตาร์ที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็ง ได้แก่ ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและทดสอบการชะละลาย
- ขั้นตอนที่ 5 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการจัดการของเสียอะลูมินาด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง

3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการศึกษาผลผลิตจีโอโพลีเมอร์โดยการใช้ของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา

ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม
ชนิดของวัสดุผสม (ของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา)	อัตราส่วนของเสียซิลิกาต่อของเสียอะลูมินา ปรับตามสัดส่วน $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1	ค่ากำลังรับแรงอัด
อัตราส่วนวัสดุผสมต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75	อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1:2, 1:1 และ 2:1	ค่าความเข้มข้น ของโลหะหนัก
อุณหภูมิที่ใช้อบ เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส	ระยะเวลาที่ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด ทดสอบที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน	ลักษณะโครงสร้าง ทางจุลภาค

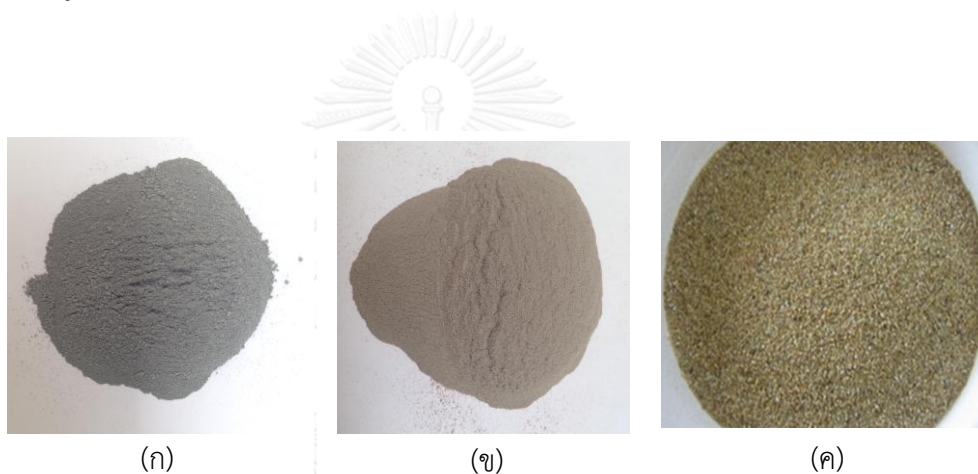
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาการจัดการของเสียอะลูมินาโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง

ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม
ชนิดของวัสดุผสม (ของเสียอะลูมินาและ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์)	อัตราส่วนของเสียอะลูมินาต่อปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 20:80, 30:70, 40:60, 50:50 และ 60:40	ค่ากำลังรับแรงอัด
อัตราส่วนระหว่างวัสดุผสม ต่อทราย เท่ากับ 1 ต่อ 2.75	ระยะเวลาทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด ของมอร์ตาร์ ทดสอบที่ 7, 14 และ 28 วัน	ค่าความเข้มข้น ของโลหะหนัก
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสม 0.6 ต่อ 1		ลักษณะโครงสร้าง ทางจุลภาค

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 วัสดุดิบ

1. ของเสี่ยอะลูมินาจากโรงงานหลอมอะลูมิเนียม (ภาพที่ 3.1 (ก))
2. ของเสี่ยซิลิกาจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสี่ย (ภาพที่ 3.1 (ข))
3. ททรายแม่น้ำ (ภาพที่ 3.1 (ค)) ซึ่งเป็นทรายซิลิกาจากธรรมชาติโดยจะต้องมีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 (อาจค้ำบนตะแกรงได้ไม่เกินร้อยละ 15) และตะแกรงเบอร์ 30 (อาจค้ำบนตะแกรงได้ไม่เกินร้อยละ 5) หลังจากร่อนต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที ตามมาตรฐาน ASTM C778-06
4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตราเสือ



ภาพที่ 3.1 วัสดุดิบที่ใช้ในการทดลอง (ก) ของเสี่ยอะลูมินา, (ข) ของเสี่ยซิลิกา, (ค) ททรายแม่น้ำ

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) Caustic Soda 99% จากบริษัท AGC Chemical Thailand Co.,Ltd ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์
2. สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 99% จากบริษัท CARLO ERBA

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

การบดและการคัดขนาด

1. เครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) (ภาพที่ 3.2)
2. เครื่องร่อนเขย่าคัดขนาดทราย ใช้ตะแกรงเบอร์ 20 และ 30 (ภาพที่ 3.3)

3. เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดคละ (Particle size distribution) รุ่น Mastersizer 3000 ยี่ห้อ Malvern Instruments (ภาพที่ 3.4)

การหล่อแบบและการทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์ตัวอย่าง

1. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 1 ตำแหน่ง
2. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
3. กระบอกลงขนาด 500 มิลลิลิตร ละเอียด 10 มิลลิลิตร
4. อุปกรณ์การผสมและแท่งกระทุ้ง ขนาดหน้าตัด 5 x 5 เซนติเมตร (ภาพที่ 3.5)
5. แบบพิมพ์มอร์ตาร์ตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร (ภาพที่ 3.6)
6. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (น้ำหนักกดสูงสุด 150 ตัน) (ภาพที่ 3.7)
7. ตู้ไฟฟ้า ยี่ห้อ Binder รุ่น ED 53
8. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence, XRF) รุ่น Phillip model PW2400 ด้วยวิธี Wavelength dispersion X-ray fluorescence spectrometry
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-6400

การทดสอบการชะละลายของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา

1. ตะแกรงขนาด 0.5 – 5.0 มิลลิเมตร
2. ขวดโพลีเอทิลีน 1 ลิตร
3. เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
4. กระบอกลงขนาด 500 มิลลิลิตร
5. เครื่องเขย่าแบบหมุน 360 องศา ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที
6. เครื่องวัดพีเอช
7. เตาร้อน (Hot plate)
8. ปีกเกอร์ขนาด 125 มิลลิลิตร
9. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมา ออปติคอลลิมิชั่นสเปกโตรเมทรี (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Plasma 1000



ภาพที่ 3.2 เครื่องบด (Tube mill)



ภาพที่ 3.3 เครื่องร่อนเขย่าคัดขนาด



ภาพที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดคละ



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์การผสมและแบ่งกัรหั่ง



ภาพที่ 3.6 แบบพิมพ์มอร์ตาร์



ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 การศึกษาการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยใช้ของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา

3.3.1.1 เตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย

- ของเสียซิลิกา นำของเสียซิลิกาที่ได้มาจากโรงงานรีไซเคิลสารจำพวกซิลิโคนที่ใช้แล้วผ่านมาบดด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) บดครั้งละ 800 กรัม ใช้เวลา 2 ชั่วโมง
- ของเสียอะลูมินา นำของเสียอะลูมินาที่ได้มาจากโรงงานหลอมอะลูมิเนียมมาบดด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) บดครั้งละ 800 กรัม ใช้เวลา 2 ชั่วโมง
- ทรายแม่น้ำ เตรียมโดยการนำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปาจากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส และนำมาคัดขนาดโดยจะต้องมีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 (อาจค้ำบนตะแกรงได้ไม่เกินร้อยละ 15) และตะแกรงเบอร์ 30 (อาจค้ำบนตะแกรงได้ไม่เกินร้อยละ 5) หลังจากร่อนต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที ตามมาตรฐาน ASTM C778-06
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400.08 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร
- สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

3.3.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF)
2. วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาด้วย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยนำของเสียทั้งสองชนิดไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S.EPA 3050b และ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)
3. วิเคราะห์การกระจายขนาดของวัสดุบดด้วยด้วยเครื่อง Mastersizer 3000
4. วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3.3.1.3 ขั้นตอนการผสมและอบ

1. ออกแบบส่วนผสม

- ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างของเสียซิลิกาต่อของเสียอะลูมินาภายใน 70 กรัม ให้มีอัตราส่วนระหว่าง ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็น A1 (1 : 1), A2 (2 : 1) และ A3 (3 : 1) ซึ่งคำนวณจากองค์ประกอบภายในของของเสีย

- ปรับอัตราส่วนระหว่างของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็น B1 คือ (70 : 20 : 10), B2 คือ (70 : 15 : 15) และ B3 คือ (70 : 10 : 20)

- โดยคุมอัตราส่วนระหว่างส่วนผสมดังกล่าวกับทรายแม่น้ำคือ 1 ต่อ 2.75

2. ผสมของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาที่ทำการบดแล้วตามอัตราส่วนที่ทำการคำนวณอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบภายใน

3. ผสมทรายตามอัตราส่วน 1 ต่อ 2.75

4. ผสมสารละลายต่างกระตุ้น (Alkaline Activated Solution) คือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

5. คลุกเคล้าทุกส่วนผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาให้น้อยที่สุดเพราะปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ไม่เกิน 5 นาที

6. เทส่วนผสมที่ได้ทั้งหมดลงในแบบพิมพ์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ได้ทำการทาน้ำมันเครื่องไว้เป็นสารหล่อลื่นป้องกันการที่สารติดกับแบบพิมพ์ ในขั้นตอนนี้จะต้องใช้แท่งกระทุ้งขนาดพื้นที่หน้าตัด 5×5 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้ส่วนผสมอัดตัวกันแน่นภายในแบบพิมพ์

7. นำส่วนผสมที่เทลงในแบบพิมพ์เรียบร้อยแล้ว ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

8. แกะมอร์ตาร์ที่ได้ออกจากแบบพิมพ์เพื่อนำเอาไปทำการทดสอบในขั้นตอนต่อไป

3.3.1.4 วิเคราะห์คุณสมบัติและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลีเมอร์

มอร์ตาร์

1. ทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-13, 2013 ด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดน้ำหนักกดสูงสุด 150 ตัน โดยปรับเปลี่ยนเวลาการกดที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน หลังจากทำการอบแล้วนำมาเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดที่วัดได้

2. วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในจีโอโพลีเมอร์ตัวอย่างที่มีความเหมาะสมที่สุด ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยนำ

ของเสียทั้งสองชนิดไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S.EPA 3050b และวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

3.3.2 การศึกษาการจัดการจัดการของเสียอะลูมินาโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง

3.3.2.1 เตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย

เตรียมตัวอย่างวัตถุดิบ ได้แก่

- ของเสียอะลูมินา นำของเสียอะลูมินาผ่านการบดด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) บดครั้งละ 800 กรัม ใช้เวลา 2 ชั่วโมง
- ทราายแม่น้ำ เตรียมโดยการนำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปาจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส และนำมาคัดขนาดโดยจะต้องมีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 (อาจค้ำบนตะแกรงได้ไม่เกินร้อยละ 15) และตะแกรงเบอร์ 30 (อาจค้ำบนตะแกรงได้ไม่เกินร้อยละ 5) หลังจากร่อนต่อเนื่องเป็นเวลา 5 นาที ตามมาตรฐาน ASTM C778-06

3.3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียอะลูมินาด้วยวิธีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF)
2. วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในของเสียอะลูมินา ตามประกาศของกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยนำของเสียทั้งสองชนิดไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S.EPA 3050b และ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)
3. วิเคราะห์ค่าการกระจายของขนาด (Particle size distribution) ของของเสียอะลูมินาด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดคละ (Mastersizer 3000)
4. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของของเสียอะลูมินาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3.3.2.3 ขั้นตอนการผสม

1. ออกแบบส่วนผสมโดยปรับเปลี่ยนปริมาณของเสี้ยวอะลูมินาต่อปริมาณปูนซีเมนต์เป็น ร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก
2. นำเอาปูนซีเมนต์และของเสี้ยวอะลูมินาที่ผสมกันแล้วนั้นมาผสมกับผสมทรายตามอัตราส่วน 1 ต่อ 2.75
3. ผสมส่วนประกอบกับน้ำในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.6
4. เทส่วนผสมที่ได้ทั้งหมดลงในแบบพิมพ์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร แห่งกระตุงขนาดพื้นที่หน้าตัด 5×5 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้ส่วนผสมอัดตัวกันแน่นภายในแบบพิมพ์ จะต้องทำตามตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-13, 2013 แบ่งเท 2 ชั้น ชั้นละ 25 มิลลิเมตร กระตุงด้วยแท่งกระตุง (Tamper) ชั้นละ 32 ครั้ง จากนั้นทิ้งให้สารเกาะตัวกันเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำส่วนผสมที่เทลงในแบบพิมพ์เรียบร้อยแล้วนั้นไปบ่มในน้ำเป็นระยะเวลาดังต่อไปนี้คือ 7, 14 และ 28 วัน

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมของการหล่อแข็งที่ใช้ในการทดลอง

ปริมาณกากของเสี้ยวอะลูมินา (กรัม)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (กรัม)	น้ำ (มิลลิลิตร)	ทราย (กรัม)
20	80	60	275
30	70	60	275
40	60	60	275
50	50	60	275
60	40	60	275

3.3.2.4 วิเคราะห์คุณสมบัติและสถานะที่เหมาะสมในการจัดการของเสียอะลูมินา โดยวิธีการทำเป็นก้อนแข็ง

1. ทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 / C109M-13 ด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดน้ำหนักกดสูงสุด 150 ตัน โดยปรับเปลี่ยนเวลาการกดที่ 7, 14 และ 28 วัน หลังจากทำการอบแล้วนำมาเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดที่วัดได้

2. วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในมอร์ตาร์ตัวอย่างที่มีความเหมาะสมที่สุด ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยนำของเสียทั้งสองชนิดไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S.EPA 3050b และ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัมเบิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

3.3.3 ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการจัดการของเสียอะลูมินาด้วยวิธีการทำเป็นก้อนแข็งและการนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการจัดการของเสียอะลูมินาด้วยวิธีการทำเป็นก้อนแข็งและการนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากนั้นคำนวณเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในบำบัดของเสียอะลูมินาในหน่วยราคาบาทต่อตันของเสีย ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนดังกล่าวเป็นราคาที่คิดจากการผลิตในห้องปฏิบัติการ โดยไม่รวมค่าแรงค่าขนส่ง และค่าผลตอบแทนทางธุรกิจ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการจัดการของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาโดยแบ่งออกเป็นสองวิธีด้วยกันคือ วิธีแรกจะเป็นการนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาเป็นวัตถุดิบในการทำจีโอโพลีเมอร์ และวิธีที่สองเป็น การกำจัดของเสียอะลูมินาโดยการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง โดยในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุดิบก่อน ได้แก่ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF) วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยนำของเสียทั้งสองชนิดไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S.EPA 3050b และ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP) วิเคราะห์การกระจายขนาดของวัตถุดิบด้วยวิธี Sieve Analysis ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136-06 และ วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) จากนั้นจึงวางแผนการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างของเสียอะลูมินาและของเสียซิลิกาต่อวัสดุประสานอื่นๆ และสารละลายที่เป็นส่วนผสม เพื่อนำมาหาอัตราส่วนที่ดีที่สุด โดยการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C 109M-13, 2013 วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และมอร์ตาร์ที่เกิดจากการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และศึกษาลักษณะพื้นผิวโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) และประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตจีโอโพลีเมอร์และการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง โดยผลการทดลองจะแบ่งออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของของเสียซีลิกาและของเสียอะลูมินา

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซีลิกาและของเสียอะลูมินาด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF)

4.1.1.1 ของเสียซีลิกา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซีลิกา ได้ผลดังตารางที่ 4.1 เห็นได้ว่าของเสียซีลิกามีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) มากที่สุด ร้อยละ 71.3 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ Fe₂O₃ ร้อยละ 0.08 Cr₂O₃ ร้อยละ 0.03 CaO ร้อยละ 0.02 และค่า Loss in ignition (%LOI) เท่ากับร้อยละ 28.6

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซีลิกาวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray Fluorescence, XRF)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Na ₂ O	<0.01
MgO	<0.01
Al ₂ O ₃	<0.01
SiO ₂	71.30
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*	28.60

* %LOI หมายถึง Loss on Ignition ค่าการสูญเสีย น้ำหนักเนื่องจากการเผา

4.1.1.2 ของเสี้ยวอะลูมินา

จากการศึกษาองค์ประกอบภายในของกากของเสี้ยวอะลูมินา พบว่ามีองค์ประกอบของ Al_2O_3 มากที่สุดถึงร้อยละ 48.094, SiO_2 ร้อยละ 4.18, Cl ร้อยละ 20.6, Na_2O ร้อยละ 14.43 % และ H_3BO_3 ร้อยละ 13.74 (ตารางที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของของเสี้ยวอะลูมินาวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
H_3BO_3	13.742	MnO_2	0.31
Na_2O	14.425	Fe_2O_3	3.066
MgO	4.31	NiO	0.049
Al_2O_3	48.094	CuO	0.841
SiO_2	4.18	ZnO	0.357
P_2O_5	0.056	Br	0.03
SO_3	0.608	SrO	0.13
Cl	20.604	MoO_2	0.01
K_2O	0.312	SnO_2	0.05
CaO	1.51	Sb_2O_3	0.02
TiO_2	0.591	BaO	0.27
Cr_2O_3	0.068	PbO	0.11

เปรียบเทียบองค์ประกอบภายในของของเสี้ยวซิลิกาและของเสี้ยวอะลูมินาที่ใช้เป็นวัตถุดิบในงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าของเสี้ยวซิลิกาประกอบไปด้วย SiO_2 เป็นหลัก ถึงร้อยละ 71.30 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับของเสี้ยวอะลูมินาที่มีปริมาณ SiO_2 เพียงร้อยละ 4.18 แต่มีปริมาณ Al_2O_3 ร้อยละ 48.09 ซึ่งมากกว่าภายในของเสี้ยวซิลิกา ทั้งนี้เนื่องมาจากแหล่งที่มาของของเสี้ยวที่แตกต่างกันทำให้ปริมาณองค์ประกอบภายในของวัตถุดิบแตกต่างกันไปด้วย

จากการเปรียบเทียบองค์ประกอบภายในของของเสี้ยวซิลิกาและของเสี้ยวอะลูมินากับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในด้านจีโอโพลีเมอร์และการทำให้เป็นก้อนแข็งในงานวิจัยอื่นๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.3 ซึ่ง

จะเห็นได้ว่าปริมาณของ SiO_2 ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับขยะแก้วในงานวิจัยของ Torres-Carrasco และ Puertas (2015) เนื่องจากแหล่งที่มาของวัตถุดิบมีสารประกอบที่เป็นที่มาของ SiO_2 กล่าวคือในงานวิจัยนี้ ทำการเก็บตัวอย่างของเสียซิลิกาจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสียจำพวก ซิลิโคนที่มีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นหลัก ส่วนในงานวิจัยของ Torres-Carrasco และ Puertas (2015) เป็นของเสียขยะแก้วที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกัน ส่วนของเสียอะลูมินาในงานวิจัยนี้พบว่า มีปริมาณ Al_2O_3 ใกล้เคียงกับองค์ประกอบภายในของกากของเสียในงานวิจัยของ Perna และ Hanzlicek (2014) เนื่องจากแหล่งที่มาเป็นอุตสาหกรรมประเภทเดียวกันคือ อุตสาหกรรมหลอมอะลูมินา และลักษณะสำคัญของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต จีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ คือมีส่วนประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลักเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีทั้งสองตัวเป็นองค์ประกอบหลักในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโพลิเมอร์ไรเซชัน ส่วนองค์ประกอบที่มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในการทำปฏิกิริยาร่วมกับปูนซีเมนต์คือ SiO_2 , Al_2O_3 , CaO และ Fe_2O_3 ดังจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทั้ง 4 ชนิด เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในวัสดุที่เป็นวัตถุดิบของงานวิจัยที่นำมาทำการเปรียบเทียบในตารางที่ 4.3 แต่จะมีความแตกต่างกันไปตามแหล่งที่มาของของเสียวัตถุดิบและกิจกรรมที่ก่อให้เกิดของเสียนั้นๆ

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบองค์ประกอบภายในของวัสดุติดกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	ของเสียวัสดุติด	แหล่งที่มา	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃
งานวิจัยนี้	ของเสียซิลิกา	โรงงานรีไซเคิล กากของเสีย	71.3	<0.01	0.03	0.08
	ของเสียอะลูมินา	โรงงานหลอม อะลูมิเนียม	4.18	48.09	1.51	3.066
Somna และ คณะ (2011)	เถ้าลอย	โรงไฟฟ้า ถ่านหินแม่เมาะ จ.ลำปาง	31.2	18.9	20.8	16.50
Zhen และ คณะ (2012)	กากตะกอน น้ำเสียชีวภาพที่ ผ่านการทำให้แห้ง	บ่อบำบัดน้ำเสีย โรงงาน	46.4	10.3	7.85	5.66
Bie และคณะ (2015)	เถ้าลอยที่ผ่านการ ล้างน้ำ เพื่อกำจัด คลอไรด์และ ซัลเฟต	เตาเผาขยะ ชุมชน	41.51	10.74	30.87	7.71
Perna และ Hanzlicek (2014)	กากของเสีย (Iron- aluminium- calcium slag)	โรงงานหลอม อะลูมิเนียม	50.28	41.99	0.14	1.03
Torres- Carrasco และ Puertas (2015)	ขยะแก้ว	ขยะชุมชนแยก ประเภท	70.71	2.05	11.75	0.51
	เถ้าลอย	โรงไฟฟ้า ถ่านหิน	54.44	27.51	2.72	6.38

4.1.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา

จากการเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักของของเสียตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ปี 2548 ได้จัดให้ของเสียซิลิกาตั้งกล่าวอยู่ในรหัส 06 08 02 HM ซึ่งหมายถึง ของเสียจากกระบวนการผลิต การผสมตามสูตรการจัดส่งและการใช้งานธาตุซิลิคอน และอนุพันธ์ของธาตุซิลิคอน ส่วนของเสียอะลูมินาจัดอยู่ในของเสียรหัส 10 03 04 HA และ 10 03 19 HM อยู่ในหมวดที่ 10 03 ซึ่งหมายถึง ของเสียจากการหลอมถลุงอะลูมิเนียม จากสองขั้นตอนนี้ด้วยกันคือ 10 03 04 HA หมายถึง ตะก้นจากกระบวนการผลิตปฐมภูมิ (primary production slags) และ 10 03 19 HM หมายถึง ฝุ่นจากเตาหลอมที่มีสารอันตราย (flue-gas dust containing dangerous substances) ซึ่งระบุว่า สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสเลข 6 หลักกำกับด้วยตัวอักษร HA (Hazardous waste – Absolute entry) หรือ HM (Hazardous waste – Mirror entry) ถือเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตรายตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสกำกับด้วย HM ผู้ประกอบการต้องทำการวิเคราะห์ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด ในกรณีที่ต้องการโต้แย้งว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วดังกล่าวไม่เข้าข่ายเป็นของเสียอันตรายตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ในประกาศนี้ จึงได้ทำการตรวจสอบโดยนำของเสีย ทั้งสองชนิดไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S.EPA 3050b และ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP) เปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ตามลำดับ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 จากค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในของเสียสรุปได้ว่าของเสียซิลิกาจัดอยู่ในประเภทของเสียอันตราย โดยมีค่า ตะกั่ว (Pb) เท่ากับ 1,852 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเกินกว่าค่ามาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC) ที่กำหนดไว้ว่าตะกั่วต้องมีค่าไม่เกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ สังกะสี (Zn) เท่ากับ 5,368 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ว่าจะต้องมีปริมาณสังกะสีไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งจัดว่าเป็นของเสียอันตรายทันที ส่วนของเสียอะลูมินาเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นโลหะหนักกับค่ามาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC) พบว่ามีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงได้นำของเสียไปสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) แล้ววิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP) พบว่าค่าความเข้มข้นของโครเมียม (Cr) มีค่าเท่ากับ 6.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในค่ามาตรฐาน Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) ระบุว่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดจะต้องไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาในการทดลองนี้จัดอยู่ในประเภทของเสียอันตรายทันที

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นของโลหะหนักในของเสียซิลิกาเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTL) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

โลหะหนัก	ความเข้มข้นใน ของเสีย (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ค่า TTL (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ความเข้มข้นใน น้ำสกัด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่า STLC (มิลลิกรัม/ ลิตร)
โครเมียม	324	2,500	1.07	5
ทองแดง	189	2,500	1.61	25
ตะกั่ว	1,852	1,000	26.3	5
สังกะสี	5,368	5,000	11.9	250

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของโลหะหนักในของเสียอะลูมินาเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTL) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

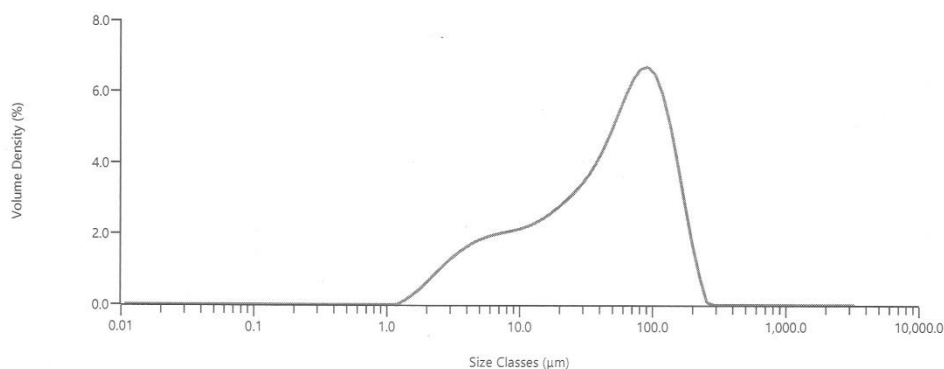
โลหะหนัก	ความเข้มข้นใน ของเสีย (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ค่า TTL (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ความเข้มข้นใน น้ำสกัด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่า STLC (มิลลิกรัม/ ลิตร)
โครเมียม	82.5	2,500	6.17	5
ทองแดง	2.98	2,500	0	25
ตะกั่ว	7.95	1,000	0.76	5
สังกะสี	0	5,000	0	250

4.1.3 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของวัตถุบดด้วยวิธี Sieve Analysis ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136-06

4.1.3.1 ของเสียซิลิกา

ในงานวิจัยมีการปรับขนาดขนาดของของเสียซิลิกาโดยการบดของเสียซิลิกาครั้งละ 800 กรัม ด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) เป็นเวลา 2 ชั่วโมงต่อครั้ง และทำการคัดแยกขนาด โดยใช้เครื่องร่อนเขย่าคัดขนาด (Sieve analysis) ที่มีขนาดต่างๆ โดยเรียงจากตะแกรงช่องใหญ่อยู่บนไป ช่องเล็กสุดอยู่ล่างตามขนาดดังนี้ ขนาดเบอร์ 50, 100, 150 และ 200 เมช ตามลำดับและหาค่าการกระจายขนาดคละของของเสียซิลิกา (Particle size distribution) ด้วยเครื่อง Mastersizer 3000

จากผลการวิจัยสามารถพัฒนาขนาดคละของของเสียซีลิกาได้โดยมีค่าเฉลี่ยตามตารางที่ 4.6 คือ เท่ากับ 48.9 ไมโครเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ ซาลิสา วิสมหมาย (2555) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์หาค่าการกระจายขนาดคละของของเสียซีลิกาเช่นเดียวกัน พบว่าในงานวิจัยนั้นได้ค่าเฉลี่ยขนาดของอนุภาคดังตารางที่ 4.6 กล่าวคือที่ $D_v(50)$ มีขนาดเท่ากับ 24.46 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าของเสียซีลิกาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สาเหตุเนื่องมาจากเมื่อเวลามากขึ้นตัวอย่างที่เก็บไว้เป็นเวลานานจะมีการรวมตัวกันของอนุภาคทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Jo และคณะ (2007) มีการใช้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน ซึ่งมีผลต่อให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและผลผลิตที่เกิดขึ้นจะไปเติมเต็มส่วนที่ว่างระหว่างมอร์ตาร์ให้หนาแน่นเพิ่มขึ้น บ่งบอกว่าอนุภาคขนาดเล็กกว่าจะทำให้อนุภาคในมอร์ตาร์มีความหนาแน่นมากกว่า



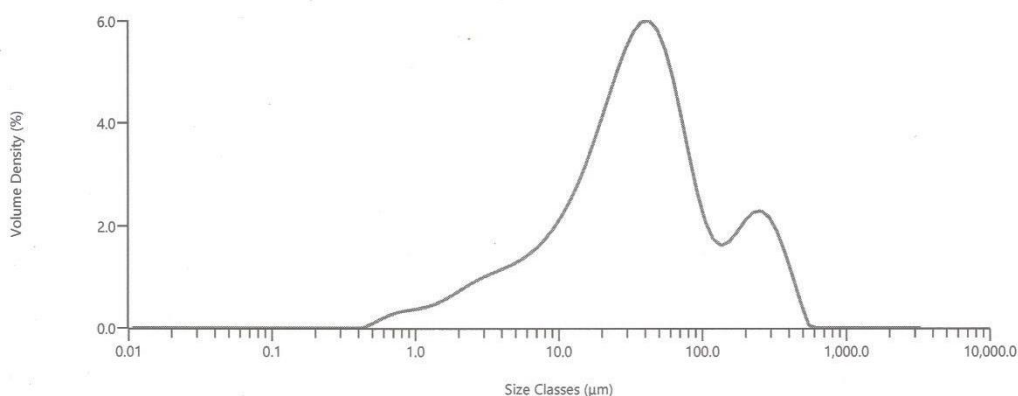
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงผลวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของของเสียซีลิกา

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของของเสียซีลิกา (หลังบด)

ของเสียซีลิกา	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)		
	$D_v(10)$	$D_v(50)$	$D_v(90)$
งานวิจัยนี้	5.50	48.9	134
ซาลิสา วิสมหมาย (2555)	4.27	24.46	64.88

4.1.3.2 ของเสียอะลูมินา

ได้ทำการศึกษาขนาดของอนุภาคด้วยวิธี Sieve Analysis ในงานวิจัยมีการปรับขนาดขนาดของของเสียอะลูมินาโดยการบดเสียอะลูมินา ประมาณ 800 กรัม ด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) เป็นเวลา 2 ชั่วโมงต่อครั้ง และทำการคัดแยกขนาด ด้วยใช้เครื่องร่อนเขย่าคัดขนาด (Sieve analysis) ที่มีขนาดต่างๆ โดยเรียงจากตะแกรงช่องใหญ่อยู่บนไปช่องเล็กที่สุดอยู่ล่างตามขนาด ดังนี้ ขนาดเบอร์ 50, 100, 150 และ 200 เมช ตามลำดับและหาค่าการกระจายขนาดคละของของเสียอะลูมินา (Particle size distribution) ด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดคละ (Mastersizer 3000) และทำการเปรียบเทียบขนาดของอะลูมินาบริสุทธิ์และของเสียอะลูมินาหลังการบดเพื่อทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลง เพื่อเติมช่องว่างของมอร์ตาร์ทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้น ดังที่ในงานวิจัยของ Fernandez-Jimenez และ Palomo (2003) ได้กล่าวไว้ว่าการกระจายขนาดของของเสียอะลูมินานั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญมากต่อการทำปฏิกิริยาของวัสดุ อันจะนำมาซึ่งการเพิ่มความแข็งแรงให้กับมอร์ตาร์อีกด้วย ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของของเสียอะลูมินาในงานวิจัยนี้แสดงในภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.7 เห็นได้ว่าของเสียอะลูมินาในงานวิจัยนี้มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคที่ $D_v(50)$ เท่ากับ 36 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าขนาดอนุภาคของของเสียซิลิกาตามตารางที่ 4.6 จะเห็นว่ามีความเล็กกว่าขนาดของของเสียซิลิกามาก ซึ่งเป็นผลดีต่อการอุดช่องว่างในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชันในจีโอโพลีเมอร์และปฏิกิริยาไฮเดรชันในการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ในเรื่องการจัดการของเสียด้วยการนำเอาของเสียอะลูมินามาทำให้เป็นก้อนแข็งโดยมีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน และทำการเปรียบเทียบกับค่าขนาดอนุภาคของอะลูมินาบริสุทธิ์ตามงานวิจัยของ ชาลิสสา วิสมหมาย (2555) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ของเสียอะลูมินาหลังบดนั้นมีขนาดที่เล็กกว่าขนาดของอะลูมินาบริสุทธิ์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยของ ชาลิสสา วิสมหมาย (2555)



ภาพที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ค่าการกระจายขนาดของของเสียอะลูมินา

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของของเสียอะลูมินา (หลังบด)

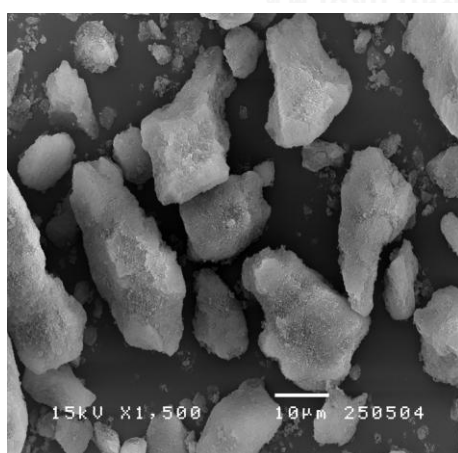
ของเสียอะลูมินา	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)		
	Dv(10) (ไมโครเมตร)	Dv(50) (ไมโครเมตร)	Dv(90) (ไมโครเมตร)
งานวิจัยนี้	5.26	36.0	206
ชาลิสา วิสมหมาย (2555)	34.75	90.72	149.37

4.1.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM)

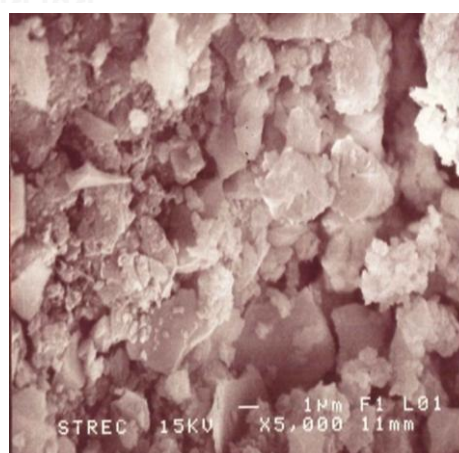
4.1.4.1 ของเสียซิลิกา

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของของเสียซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่ามีลักษณะผิวที่หยาบมีเหลี่ยม พื้นผิวขรุขระเล็กน้อย แต่ยังคงสภาพคล้ายหินคือมีเหลี่ยมคมที่ค่อนข้างชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 4.3 (ก)

เมื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคจากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ ชาลิสา วิสมหมาย (2555) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 (ข) ที่ได้ทำการถ่ายภาพของเสียซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าอนุภาคมีขนาดเล็กกว่ามาก โดยลักษณะของอนุภาคมีความเป็นเหลี่ยมคมแบบผลึกที่ชัดเจนคล้ายกับเม็ดทราย



(ก) งานวิจัยนี้

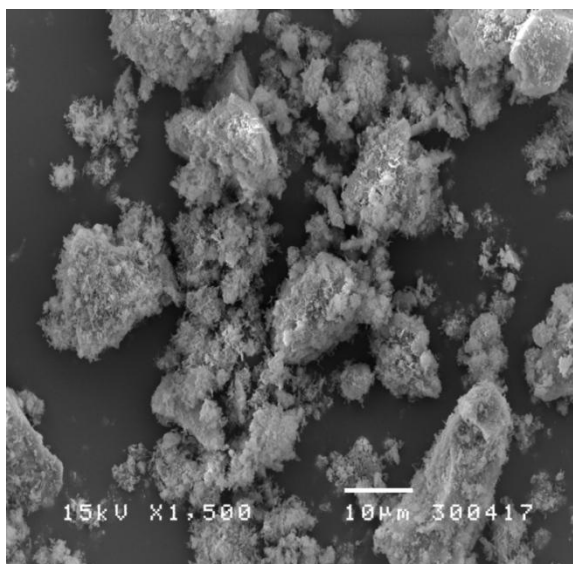


(ข) ชาลิสา วิสมหมาย (2555)

ภาพที่ 4.3 ภาพของของเสียซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

4.1.4.2 ของเสี้ยวอะลูมินา

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของของเสี้ยวอะลูมินาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่ามีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่าของเสี้ยวอะลูมินานั้นมีลักษณะหยาบผิวขรุขระ ไม่เรียบมีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่ไม่ชัดเจนหลายรูปทรง และเมื่อเปรียบเทียบกับภาพของของเสี้ยวซิลิกาที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าของเสี้ยวอะลูมินานั้นมีขนาดเล็กกว่าของเสี้ยวซิลิกาในการทดลอง และประกอบไปด้วยอนุภาคเล็กๆ หลายรูปทรง ซึ่งตามงานวิจัยของ Fernandez-Jimenez และ Palomo (2003) กล่าวไว้ว่า อนุภาคเหล่านี้จะเพิ่มความหนาแน่นให้กับมอร์ตาร์และทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้นได้



ภาพที่ 4.4 ภาพของของเสี้ยวอะลูมินาที่กำลังขยาย 1,500 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

4.2 ผลการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยมีของเสี้ยวซิลิกาและของเสี้ยวอะลูมินาเป็นวัตถุดิบ

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบภายในของเสี้ยวซิลิกาและของเสี้ยวอะลูมินา จึงได้นำมาคำนวณอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ หลังจากที่น่าขอเสี้ยวทั้งสองชนิดมาผสมกันแล้วให้ได้อัตราส่วนเท่ากับ 1:1, 2:1 และ 3:1 โดยคำนวณจากปริมาณองค์ประกอบภายในต่อของเสี้ยวทั้งสองชนิด แล้วหาค่าอัตราส่วนที่ต้องการจะต้องใช้ปริมาณของเสี้ยวซิลิกาและของเสี้ยวอะลูมินาอย่างละกี่กรัม โดยผลสรุปดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สัดส่วนของส่วนผสมที่จะใช้ในการทำการทดลอง

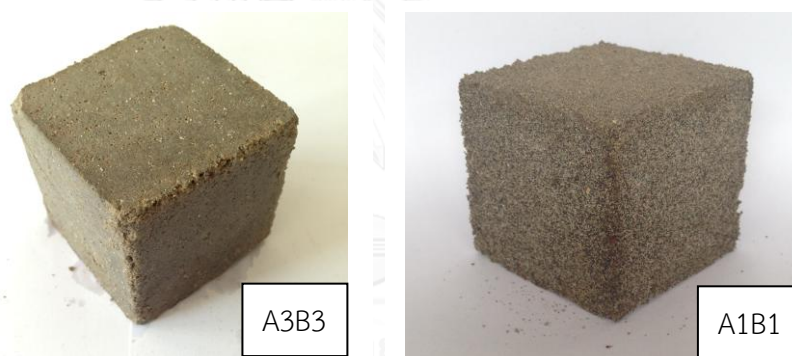
ปริมาณวัสดุประสาน (กรัม)	อัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$	ปริมาณ องค์ประกอบทาง เคมี (ร้อยละ)		ปริมาณวัตถุดิบที่ ใช้(กรัม)	
		SiO_2	Al_2O_3	ของเสีย ซิลิกา	ของเสีย อะลูมินา
70	A1 1 : 1	21.05	20.68	27	43
	A2 2 : 1	29.77	14.43	40	30
	A3 3 : 1	33.80	11.55	46	24

จากนั้นทำการหาแปรอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อสารละลายต่างได้เป็นตัวอย่างที่มีสัดส่วนของส่วนประกอบในการผลิตแตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 รหัสตัวอย่างและอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อสารละลายต่างและทราย

รหัสตัวอย่าง	วัสดุประสาน (กรัม)		สารละลายต่าง (มิลลิลิตร)		ทราย
	ของเสียซิลิกา	ของเสียอะลูมินา	NaOH	Na_2SiO_3	
A1B1	27	43	20	10	275
A1B2	27	43	15	15	275
A1B3	27	43	10	20	275
A2B1	40	30	20	10	275
A2B2	40	30	15	15	275
A2B3	40	30	10	20	275
A3B1	46	24	20	10	275
A3B2	46	24	15	15	275
A3B3	46	24	10	20	275

จากการทำการทดลองผสมของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินากับสารละลายต่างกระตุ้น (Alkaline Activate Solution) แต่ละส่วนผสมมีลักษณะของการเกาะตัว การเข้ากันของมวลสารที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในสัดส่วน ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 20 มิลลิลิตร และ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 10 มิลลิลิตร ลักษณะการเกาะตัวกันของมอร์ตาร์จะไม่เข้ากันเท่าที่ควรดังภาพที่ 4.5 ที่แสดงถึงลักษณะของมอร์ตาร์ A3B3 เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ A1B1 กล่าวคือมอร์ตาร์ A1B1 ยังเห็นเป็นลักษณะเม็ดทรายร่วนๆที่เกาะบริเวณพื้นผิวที่บ่งบอกถึงความไม่เข้ากันของส่วนประกอบในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชันที่ยังไม่สมบูรณ์และทั่ว1ถึงพอคือยังไม่สามารถจับทุกๆ อนุภาคของส่วนประกอบภายในได้ดังที่งานวิจัยของ Fernandez-Jimenez และ Palomo (2003) กล่าวไว้ว่า ปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์จะต้องเกิดจากสัดส่วนของสารที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาและสารละลายต่างกระตุ้น (Alkaline Activate Solution) ที่เหมาะสม



ภาพที่ 4.5 มอร์ตาร์ A3B3 และ มอร์ตาร์ A1B1

4.2.1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/C 109M-13, 2013

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ได้ผลดังตารางที่ 4.10 โดยจะเห็นได้ว่าสิ่งที่มีผลกับกำลังรับแรงอัดประกอบไปด้วยสองปัจจัยด้วยกัน ปัจจัยแรกคือเวลาในการบ่มตัวของ มอร์ตาร์โดยในการทดลองนี้มีการแบ่งระยะเวลาการทดสอบกำลังรับแรงอัดเป็น 1, 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในภาพที่ 4.6 กล่าวคือ ยิ่งเวลามากขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ก็มีค่ามากขึ้นไปด้วย และเป็นเหมือนกันในทุกอัตราส่วน นอกจากเวลาในการบ่มตัวของมอร์ตาร์แล้ว อีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อค่ากำลังรับแรงอัดก็คือ สัดส่วนของส่วนประกอบในการขึ้นรูปของมอร์ตาร์ที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับส่วนผสมและแบ่งออกเป็นสองส่วน

ด้วยกันคือ A หมายถึงส่วนประกอบของของเสียอะลูมินาและของเสียซิลิกา แบ่งออกเป็น 3 สัดส่วนด้วยกันคือ A1 ประกอบไปด้วย ของเสียซิลิกา 27 กรัม และ ของเสียอะลูมินา 43 กรัม โดยมีอัตราส่วนขององค์ประกอบภายในคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่อ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 1 ต่อ 1 จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของส่วนประกอบของของเสียในสัดส่วนนี้ให้ผลสรุปว่ามีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนอื่นๆ กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่มเท่าๆ กัน เช่นที่ 28 วัน พบว่า มอร์ตาร์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดในกลุ่ม A1 คือ A1B3 ซึ่งที่ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 117.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งถือว่ายังน้อยกว่าค่ากำลังรับแรงอัดในสัดส่วนอื่นอยู่มาก สำหรับสัดส่วน A2 ที่ประกอบไปด้วย ของเสียซิลิกา 40 กรัม และ ของเสียอะลูมินา 30 กรัม และมีอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่อ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 2 ต่อ 1 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ในทุกๆ อัตราส่วนที่แตกต่างกันของสารละลายมีค่ามากกว่าสัดส่วนของ A1 โดยที่ 28 วัน ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ได้ค่านี้อย่างนี้ A2B1 เท่ากับ 171 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร A2B2 มีค่าเท่ากับ 191.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ A2B3 มีค่ามากที่สุดคือ 232 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสัดส่วนของเสียสุดท้ายคือ A3 ที่ประกอบไปด้วยของเสียซิลิกา 46 กรัม และ ของเสียอะลูมินา 24 กรัม โดยมีอัตราส่วนขององค์ประกอบภายในคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่อ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 3 ต่อ 1 ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ได้ค่านี้อย่างนี้ A3B1 เท่ากับ 193.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร A3B2 มีค่าเท่ากับ 230.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ A3B3 มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกๆ สัดส่วน คือ 262.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สรุปได้ว่าที่สัดส่วนของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา A3 กล่าวคือ มีค่าสัดส่วนขององค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่อ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 3 ต่อ 1 นั้นมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Torres-Carrasco และ Puertas (2015) ที่กล่าวไว้ว่า ซิลิกา คือส่วนประกอบที่สำคัญมากที่สุดต่อการกระตุ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชัน โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญต่อการทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสกระตุ้น (Alkaline Activated Solution) ทำให้เกิดเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตซึ่งเป็นสารที่ดำรงคุณสมบัติความเป็นผลึกของจีโอโพลีเมอร์

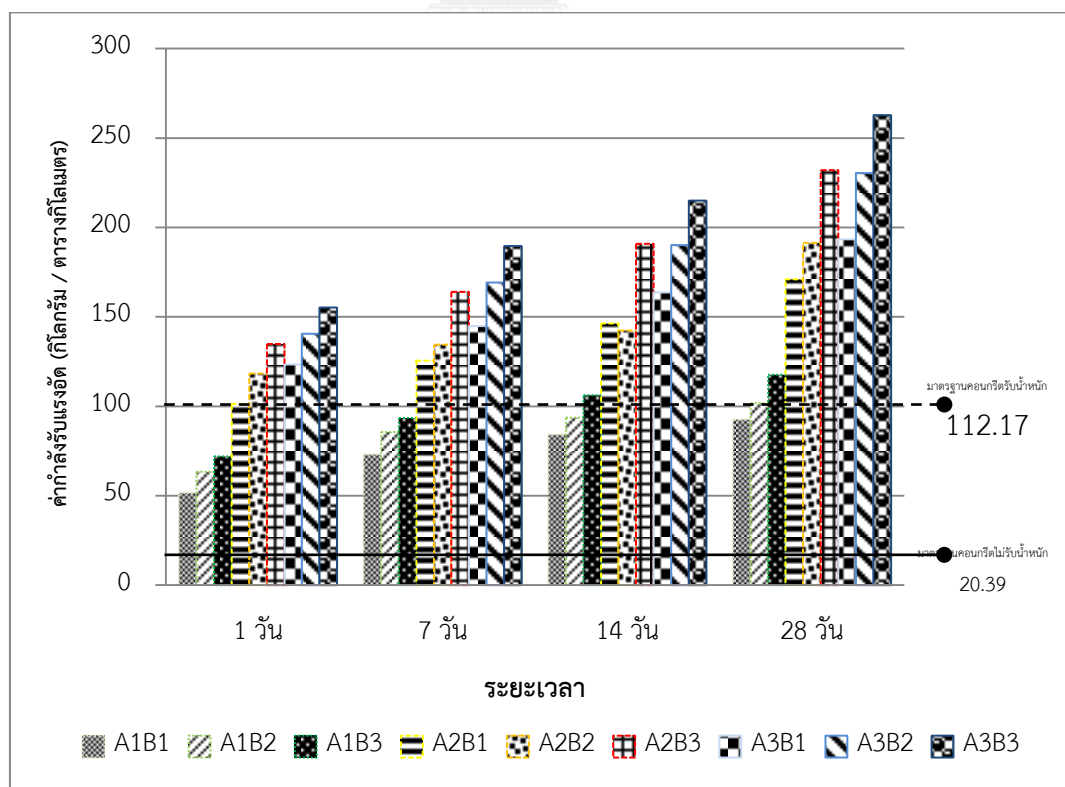
อีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญนอกจากสัดส่วนของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาที่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดคือ สัดส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการแปรสัดส่วนและแบ่งออกเป็น 3 สัดส่วนด้วยกันคือ B1 มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 20 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 10 มิลลิลิตร B2 มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 15 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 15 มิลลิลิตร และสุดท้าย B3 มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 20 มิลลิลิตร โดยจากผลวิเคราะห์ค่ากำลังรับ

แรงอัดสรุปว่า อัตราส่วนของสารละลายที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดคือ สัดส่วนสารละลายของ B3 กล่าวคือมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 20 มิลลิลิตร โดยจะสังเกตได้จากค่ากำลังรับแรงอัดของทุกสัดส่วน

สรุปคือค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีมากที่สุดคือ มอร์ตาร์ A3B3 ประกอบไปด้วยของเสียอะลูมินา 24 กรัม โดยมีอัตราส่วนขององค์ประกอบภายในคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออะลูมินาไดออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 3 ต่อ 1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 20 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 1 วันเท่ากับ 155.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ 7 วันเท่ากับ 189.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ 14 วันมีค่าเท่ากับ 215 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อครบ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดมากถึง 262.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ ชาลิสา วิสมหมาย (2555) ที่ทำการทดลองเกี่ยวกับการจัดการของเสียซิลิกาโดยการนำมาทำเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ โดยทำการผสมระหว่างของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์และใช้สารละลายต่างกระตุ้น (Alkaline Activate Solution) ชนิดเดียวกันคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โดยที่ส่วนผสมของของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์เท่ากับ 70 กรัม และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 มิลลิลิตร และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) 20 มิลลิลิตร มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 304.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีค่ามากกว่า สัดส่วน A3B3 เป็นผลเนื่องมาจากของเสียอะลูมินามือองค์ประกอบขององค์ประกอบอื่นๆ อยู่มากกว่า อะลูมินาบริสุทธิ์ที่มีองค์ประกอบของสารประกอบอะลูมินาเพียงอย่างเดียว เป็นผลทำให้การเกิดปฏิกิริยাজีโอโพลีเมอร์ไรเซชันได้สารอะลูมิโนซิลิเกตที่คงสภาพลดลงเป็นผลทำให้ค่าความแข็งแรงที่บ่งบอกโดยค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

รหัสตัวอย่าง	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)			
	1 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
A1B1	51.6	73	84.2	92.6
A1B2	63.4	85.6	93.6	101.8
A1B3	72	93.4	106.2	117.6
A2B1	101.4	125.6	146.2	171
A2B2	118.4	134.4	142.4	191.4
A2B3	134.8	164	190.8	232
A3B1	123.4	144.8	163.6	193.4
A3B2	140.6	169.2	190.2	230.4
A3B3	155.2	189.6	215	262.8



ภาพที่ 4.6 ค่ากำลังรับแรงอัดที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับส่วนผสมที่แตกต่างกัน

ทำการเปรียบเทียบวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ต่างกัันดังตารางที่ 4.11 โดยงานวิจัยของ ซาลิสสา วิสมหมาย (2555) มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้มากที่สุด กล่าวคือต่างกันที่เปลี่ยนจากอะลูมินาบริสุทธิ์เป็นของเสียอะลูมินาที่ได้จากกระบวนการถลุงแร่เหล็กและอะลูมิเนียมแทน โดยส่วนวิจัยของ Perna และ Hanzlicek (2014) ได้ทำการศึกษาการทำจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากของเสียอะลูมินาที่มีขนาด 15 ถึง 20 ไมโครเมตร และกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องคือประมาณ 25 องศาเซลเซียส ส่วนงานวิจัยของ Torres-Carrasco และ Puertas (2015) ทำการศึกษาการทำจีโอโพลีเมอร์จากแก้วลอย ผลการศึกษาได้ค่ากำลังรับแรงอัดดังสรุปในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์กับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วัสดุประสาน	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	สารละลายต่าง	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)
งานวิจัยนี้	- ของเสียซิลิกา - ของเสียอะลูมินา	48.90 36.0	- โซเดียมไฮดรอกไซด์ - โซเดียมซิลิเกต	60
ซาลิสสา วิ สมหมาย (2555)	- ของเสียซิลิกา - อะลูมินาบริสุทธิ์	24.46 90.71	- โซเดียมไฮดรอกไซด์ - โซเดียมซิลิเกต	60
Perna และ Hanzlicek (2014)	- กากของเสียจาก โรงงานผลิต อะลูมิเนียม	15 - 20	- โพลีแทสเซียมซิลิเกต	25
Torres- Carrasco และ Puertas (2015)	- แก้วลอย - ของเสียขยะแก้ว (Waste-glass)	45	- โซเดียมไฮดรอกไซด์ - โซเดียมซิลิเกต	80

ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดดังแสดงในตารางที่ 4.12 เห็นได้ว่าการกำลังรับแรงอัดที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ มีค่าน้อยกว่าอีกสามงานวิจัยที่ยกมาเปรียบเทียบ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Perna และ Hanzlicek (2014) จะเห็นได้ว่า มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 28 วันมากถึง 392.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนงานวิจัยของ Torres-Carrasco และ Puertas

(2015) ได้ทำการศึกษาผลิตจีโอโพลีเมอร์โดยการใช้เถ้าลอยผสมกับของเสียจากอุตสาหกรรมแก้วและสารละลายต่างกระดุนคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ผลที่ได้คือได้คือค่ากำลังรับแรงอัดที่ค่อนข้างสูงถึง 387.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มขยะแก้ว (Waste Glass) ลงในส่วนผสมทำให้มีจำนวนของซิลิกอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น และได้พิสูจน์แล้วว่าของเสียแก้วนั้นมีคุณสมบัติเป็นอัลคาไลน์แอคทีเวเตอร์ (Alkaline Activated) ที่มีประสิทธิภาพซึ่งสามารถอ้างอิงได้ว่า การมีอยู่ของสารซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ภายในของเสียซิลิกาที่ใช้ในการทดลองนี้นั้นเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไร้เซชันที่ดีที่สุด ซึ่งมีซิลิกอนไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 71.3 โดยน้ำหนัก และสำหรับงานที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ที่สุดคืองานวิจัยของ ซาลิสซา วีสมหมาย (2555) ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตจีโอโพลีเมอร์โดยมีของเสียซิลิกาเป็นวัตถุดิบโดยทำการผสมของเสียซิลิกากับอะลูมินาบริสุทธิ์ทำปฏิกิริยาร่วมกับสารละลายต่างกระดุนจะพวกโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต ผลสรุปว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่างานวิจัยนี้คือที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 304.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่งานวิจัยนี้มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 262.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่ถือว่ามีความใกล้เคียงกันมากกว่าเมื่อเทียบกับอีกสองงานวิจัยที่กล่าวไว้ข้างต้น สาเหตุเป็นเพราะสารที่ใช้เป็นวัตถุดิบตลอดจนสัดส่วนที่ใช้ผสมเหมือนกัน ยกเว้นที่แตกต่างกันคือในงานวิจัยนี้มีการใช้ ของเสียอะลูมินา แทนการใช้ อะลูมินาบริสุทธิ์ และเนื่องจากของเสียอะลูมินาประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์เพียงร้อยละ 48.094 โดยน้ำหนัก และซิลิกอนไดออกไซด์เพียงร้อยละ 4.18 นอกเหนือจากนั้นเป็นสารประกอบชนิดอื่นๆ อาทิ Cl ร้อยละ 20.604, Na_2O ร้อยละ 14.425 และ MgO ร้อยละ 4.31 โดยน้ำหนัก ตลอดจนขนาดของอนุภาคของเสียวัตถุดิบที่ต่างต่างกัน ซึ่งปัจจัยที่ต่างกันอย่างเหล่านี้เองที่ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

เวลา (วัน)	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	งานวิจัยนี้	ซาลิสซา วี สมหมาย (2555)	Perna และ Hanzlicek (2014)	Torres- Carrasco และ Puertas (2015)
1	155.2	199.2	-	305.9
7	189.6	235.3	-	346.7
14	215	246.6	-	367.1
28	262.8	304.8	392.7	387.5

(-) หมายถึง ไม่มีการวิเคราะห์ในระยะเวลาดังกล่าว

ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ทำการวิจัยกับค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ที่กำหนดไว้ว่า คอนกรีตบล็อกแต่ละก้อนต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 2 เมกะพาสคาล หรือ 20.39 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.58-2530) และค่ามาตรฐานอุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ที่ระบุไว้ว่าคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักคุณภาพ ก. จะต้องมียค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 11 เมกะพาสคาล หรือ 112.17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.57-2530) พบว่า จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ในงานวิจัยนี้ผ่านมาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก.58-2530 ทุกตัวอย่างตั้งแต่วันแรกที่ทำทดสอบกำลังรับแรงอัด ส่วนมาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก มีเพียงมอร์ตาร์รหัส A2B3, A3B1, A3B2 และ A3B3 ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตั้งแต่การทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 1 วัน

ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดคือ องค์ประกอบภายในของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา โดยจะต้องมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งอยู่ในรูปที่เป็นรีแอคทีฟ ที่สามารถแตกตัวในสารละลายต่างและทำปฏิกิริยาได้ โดยจากงานวิจัยพบว่าอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออะลูมิเนียมออกไซด์เท่ากับ 3 ต่อ 1 ซึ่งคำนวณจากสัดส่วนของเสียเท่ากับ ของเสียซิลิกา 43 กรัม ต่อ ของเสียอะลูมินา 27 กรัม ซึ่งโดยแท้จริงแล้วค่าร้อยละของสารประกอบภายในที่ได้จากวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์นั้น เป็นค่าที่บอกจำนวนของสารประกอบที่มีธาตุเหล่านั้นเป็นองค์ประกอบทั้งหมด แต่แสดงผลเป็นรูปของสารประกอบออกไซด์ของธาตุนั้นๆ ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าปริมาณสารประกอบออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมินาจริงๆ แล้วมีค่าเท่าไร และใสส่วนของสัดส่วนของสารละลายต่างที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดต่อคุณภาพของมอร์ตาร์คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิลิตร และโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 20 มิลลิลิตร และทรายในปริมาณ 275 กรัม หลังจากทำการบ่มที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 60 องศาเซลเซียส สัดส่วนนี้จะให้กำลังรับแรงอัดดีที่สุด ส่วนขนาดของอนุภาคเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ถือว่ายังมีขนาดใหญ่อยู่ ซึ่งถ้ามีการพัฒนาในลำดับต่อไปให้ของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามีขนาดอนุภาคเล็กลงได้คาดว่าจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่ามากขึ้นอันจะส่งผลต่อคุณภาพของมอร์ตาร์โดยตรง และจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ในการทดลองนี้ยังสามารถนำไปใช้แทนวัสดุก่อสร้างได้เนื่องจากเทียบกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถึงสองมาตรฐานคือ มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักและมาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก

4.2.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

โดยจากการวิเคราะห์ได้ผลดังตารางที่ 4.13 กล่าวคือ เมื่อสกัดด้วยวิธีตามมาตรฐาน U.S.EPA 3050b และได้ค่าความเข้มข้นของ โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว และ สังกะสี เท่ากับ 29.8,

15.9, 108 และ 297 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ได้ผลเท่ากับ 0.61, 0.50, 2.13 และ 7.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) แล้วมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด จึงถือว่าจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ไม่จัดเป็นของเสียอันตราย

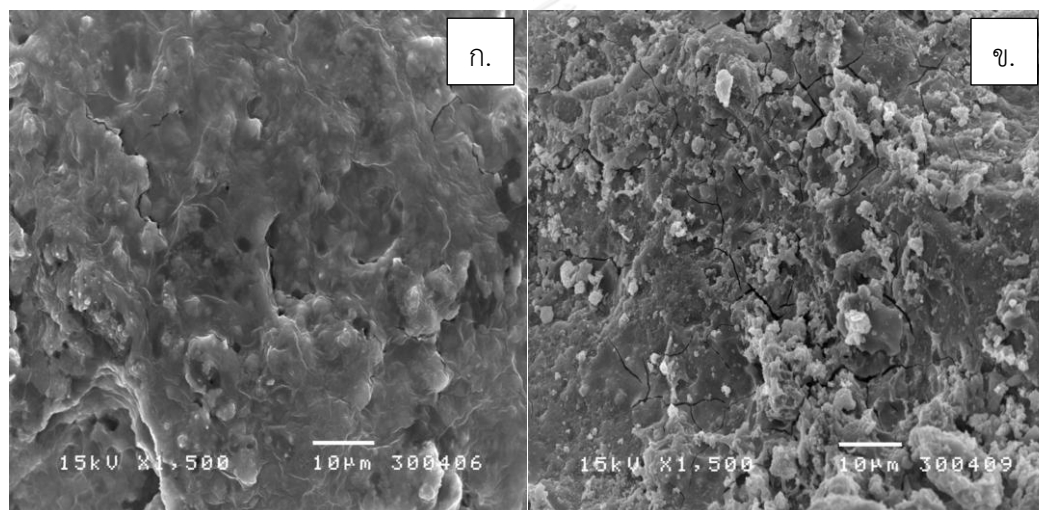
ตารางที่ 4.13 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจากจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และ Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

โลหะหนัก	ความเข้มข้นใน ของเสีย (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ค่า TTLC (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ความเข้มข้นใน น้ำสกัด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่า STLC (มิลลิกรัม/ลิตร)
โครเมียม	29.8	2,500	0.61	5
ทองแดง	15.9	2,500	0.50	25
ตะกั่ว	108	1,000	2.13	5
สังกะสี	297	5,000	7.70	250

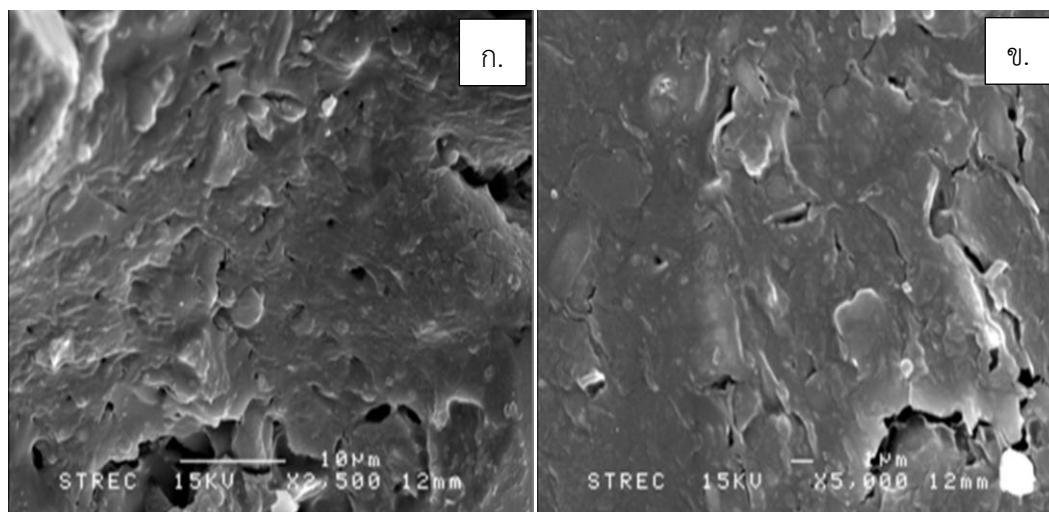
4.2.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายในของมอร์ตาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวภายในของมอร์ตาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเปรียบเทียบระหว่างมอร์ตาร์รหัส A1B1 และ A3B3 ที่ทดสอบที่ระยะเวลา 28 วันเท่ากัน ทำที่กำลังขยาย 1500 เท่า ด้วยเหตุที่มอร์ตาร์ทั้งสองอัตราส่วนนี้ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกันเป็นผลเนื่องมาจากอัตราส่วนของวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบนั้นแตกต่างกัน จึงเป็นผลทำให้มอร์ตาร์ A3B3 ที่ระยะเวลา 28 วัน นั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันเนื้อสาร (Homogenous) ที่เป็นส่วนประกอบภายในมากกว่ามอร์ตาร์รหัส A1B1 โดยจะสังเกตเห็นได้ว่ามอร์ตาร์รหัส A3B3 นั้น พบรอยแตกบริเวณชั้นผิวของมอร์ตาร์เพียงเล็กน้อยและไม่มีมวลสารลักษณะหยาบกระจัดกระจายอยู่บนพื้นผิวเหมือนกับมอร์ตาร์รหัส A1B1 จากงานวิจัยของ Tailby และ Mackenzie (2010) กล่าวว่า ลักษณะโครงสร้างที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือที่เรียกว่า Homogenous นั้น เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์ไรเซชันที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้สัดส่วนของอะลูมิโนซิลิเกตเจลที่เกิดขึ้นภายในนั้นไม่ทั่วถึง ทำ

ให้มีหลงเหลือสารบางตัวที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและถูกยึดด้วยพันธะเหมือนกันสารตัวอื่นๆ ทำให้อนุภาคภายในไม่ยึดเกาะกันเท่าที่ควร นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างภายในในงานวิจัยของ ซาลิสซา วิสมหมาย (2555) พบว่ามีความในมอร์ตาร์ A3B3 ในงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากส่วนประกอบมีความคล้ายคลึงกัน โดยงานวิจัยของ ซาลิสซา วิสมหมาย (2555) ได้ทำการผสมของเสียซีลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์และสารละลายต่างกระตุ้นชนิดเดียวกัน ทำให้ลักษณะโครงสร้างภายในมีความคล้ายคลึงกันแต่ต่างกันว่าในงานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์ของการยึดเกาะของสารไม่ดีนัก และจากการศึกษาองค์ประกอบภายในจะเห็นได้ว่าการจับตัวของอนุภาคภายในเป็นผลทำให้มอร์ตาร์ A3B3 มีความแข็งและคงทนมากกว่า โดยในตัวอย่างนี้ให้กำลังรับแรงอัดมากถึง 262.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนมอร์ตาร์รหัส A1B1 ที่ระยะเวลา 28 วันเท่ากันกลับได้ค่ากำลังรับแรงอัดเพียง 92.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



ภาพที่ 4.7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลา 28 วัน กำลังขยาย 1,500 เท่า (ก.) ตัวอย่าง A3B3 (ข.) ตัวอย่าง A1B1



ภาพที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากของเสียซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ (ก.) กำลังขยาย 2,500 เท่า (ข.) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ชาลิสรา วิสมหมาย, 2555)

4.3 ผลการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง

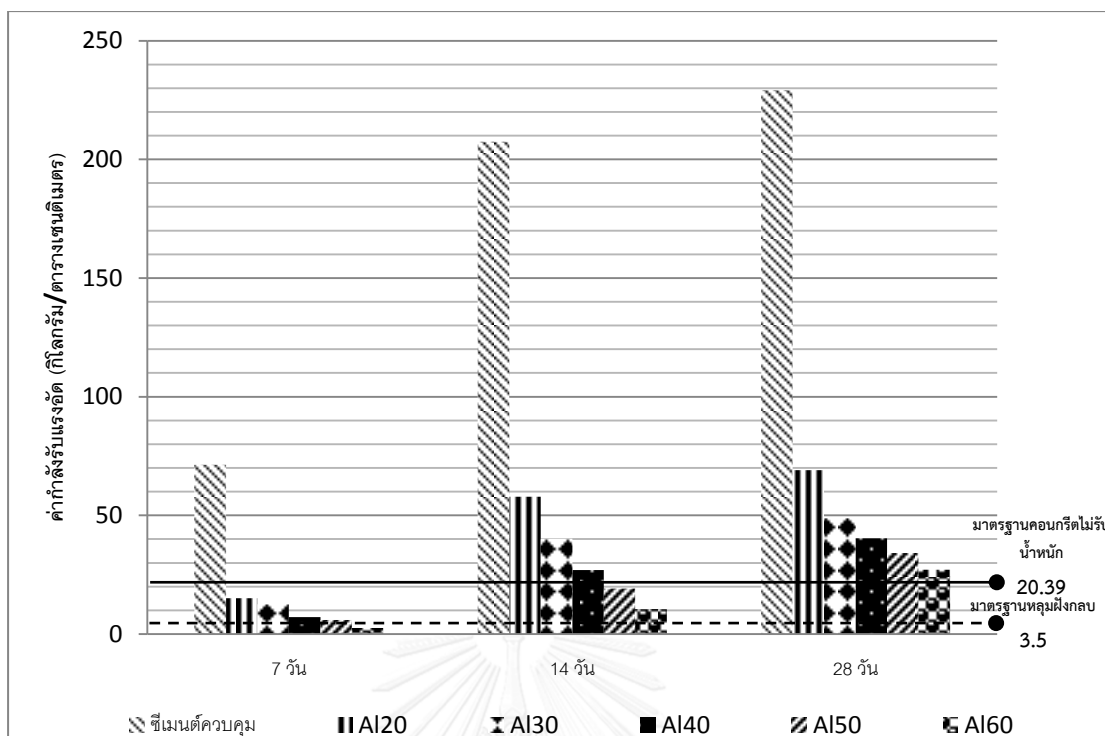
4.3.1 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-13, 2013

ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากการนำเอาของเสียอะลูมินาทำให้เป็นก้อนแข็งได้ผลดังตารางที่ 4.14 โดยได้ทำการทดลองแบ่งสัดส่วนของวัสดุประสานซึ่งในที่นี้คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อ ของเสียอะลูมินา โดยผสมของเสียอะลูมินา ตั้งแต่ร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 ตามลำดับ ผลปรากฏว่ามอร์ตาร์ที่มีของเสียอะลูมินาเป็นส่วนผสมน้อยที่สุดคือร้อยละ 20 นั้น ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเมื่อทดสอบที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 15.08 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่ 14 วัน เท่ากับ 57.904 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และที่ 28 วันมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 69.112 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของของเสียอะลูมินามากขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบในวันเวลาบ่มที่เท่ากันก็จะมีค่าลดลงไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ซีเมนต์ควบคุมพบว่าเมื่อมีการเพิ่มของเสียอะลูมินาทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เป็นผลเนื่องมาจากค่าสัดส่วนของการเกิดแคลเซียมซิลิเกต-ไฮดรอกไซด์ (C-S-H gel) ที่ลดลง ทำให้ความแข็งแรงของมอร์ตาร์ลดลงไปด้วยตามงานวิจัยของ Sobiecka และคณะ (2014) และสังเกตได้ว่าเวลาบ่มมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงอัดอย่าง

เห็นได้ชัดจากทุกตัวอย่างที่ทำการทดลอง สำหรับมอร์ตาร์ตัวอย่างที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุดใน การทดลองครั้งนี้คือ มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของของเสียวะลูมินาร้อยละ 60 คือเมื่อทดสอบที่ระยะเวลา บ่ม 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.584 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งถือว่าต่ำกว่ามาตรฐาน ของการจัดการของเสียวะลูมินาโดยวิธีการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็งก่อนการนำไปเก็บใน หลุมฝังกลบ ซึ่งมอร์ตาร์จะต้องมีค่ากำลังรับแรงอัด ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อเพิ่ม ระยะเวลาในการบ่มมากขึ้นเป็น 14 และ 28 วัน ผลที่ได้คือ มีค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้นเป็น 10.504 และ 27.064 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้สรุปได้ว่าการจัดการของเสียวะลูมินาโดย การทำให้เป็นก้อนแข็งโดยมีซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานนั้น มีอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับ การนำไปฝังกลบต่ออยู่ที่ ผสมของเสียวะลูมินา ต่อ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วน 1:1 จึงจะได้ค่า กำลังรับแรงอัดที่เกินกว่ามาตรฐานหลุมฝังกลบแบบปลอดภัยคือ 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก กำหนดไว้ว่า คอนกรีตบล็อกแต่ละก้อน ต้องไม่ต่ำกว่า 2 เมกะพาสคาล หรือ 20.39 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (มาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 58-2530) ดังนั้นจะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ตัวอย่าง Al20, Al30 และ Al40 จะผ่านค่าคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก เมื่อมีระยะเวลาบ่มตั้งแต่ 14 วันขึ้นไป ส่วนมอร์ตาร์ตัวอย่าง Al50 และ Al60 จะผ่านค่ามาตรฐานเมื่อครบระยะเวลาบ่ม 28 วันแล้ว

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

รหัส ตัวอย่าง	วัสดุประสาน (กรัม)		ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)		
	ของเสียวะลูมินา	ปูนซีเมนต์	7 วัน	14 วัน	28 วัน
ซีเมนต์ ควบคุม	0	100	71.40	207.40	229.20
Al20	20	80	15.08	57.90	69.11
Al30	30	70	12.50	40.18	48.87
Al40	40	60	7.18	26.97	40.32
Al50	50	50	5.96	19.21	34.12
Al60	60	40	2.58	10.50	27.06



ภาพที่ 4.9 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนของของเสียอะลูมินาต่างกันที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

จากตารางที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์กับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องโดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีอัตราส่วนของของเสียวัตถุดิบต่อวัสดุประสานที่เท่ากับ กล่าวคือ ของเสียร้อยละ 60 และวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์) ร้อยละ 40 และทดสอบที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันเท่ากัน ผลสรุปว่าค่ากำลังรับแรงอัดแปรผันตามชนิดของสารของเสียที่เป็นวัตถุดิบโดย คุณสมบัติของของเสียส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด จากวิจัยของ Bie และคณะ (2015) สังเกตได้ องค์ประกอบทางเคมีมีค่าของ SiO_2 , Al_2O_3 , CaO และ Fe_2O_3 สูงกว่ามาก ทำให้มีของเสียมีคุณสมบัติ ที่เป็นวัสดุประสานได้ดีกว่าในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า ส่วนในงานวิจัยของ Zhen และคณะ (2012) ทำการวิเคราะห์การทำการปรับเสถียร โดยการทำให้เป็นก้อนแข็งโดยใช้อัตราส่วนของวัสดุประสานซึ่งในที่นี้คือปูนซีเมนต์เพียงร้อยละ 10 ผลที่ได้คือค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยที่สุดคือเมื่อทำการทดสอบที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ได้ค่ากำลังรับแรงอัดเพียง 1.60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดกับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	ของเสียวัตถุดิบ	วัสดุประสาน ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)	ค่ากำลังรับแรงอัด ที่ 28 วัน (กิโลกรัม/ตาราง เซนติเมตร)
งานวิจัยนี้	- ของเสียอะลูมินา (ร้อยละ 60)	- ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 40)	27.06
Bie และคณะ (2015)	- ถ้ำลอย (ร้อยละ 60)	- ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 40)	66.28
Zhen และคณะ (2012)	- กากตะกอนน้ำ เสียที่ผ่านการทำให้ แห้ง (ร้อยละ 90)	- ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 10)	1.60

4.3.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของมอร์ตาร์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดดังตารางที่ 4.16 กล่าวคือ เมื่อสกัดด้วยวิธีตามมาตรฐาน U.S.EPA 3050b และได้ค่าความเข้มข้นของ โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว และ สังกะสี เท่ากับ 48.5, 23.8, 202 และ 505 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ได้ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักเท่ากับ 0.55, 0.23, 0.57 และ 7.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) แล้วมีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนด จึงถือว่าจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ไม่จัดเป็นของเสียอันตราย

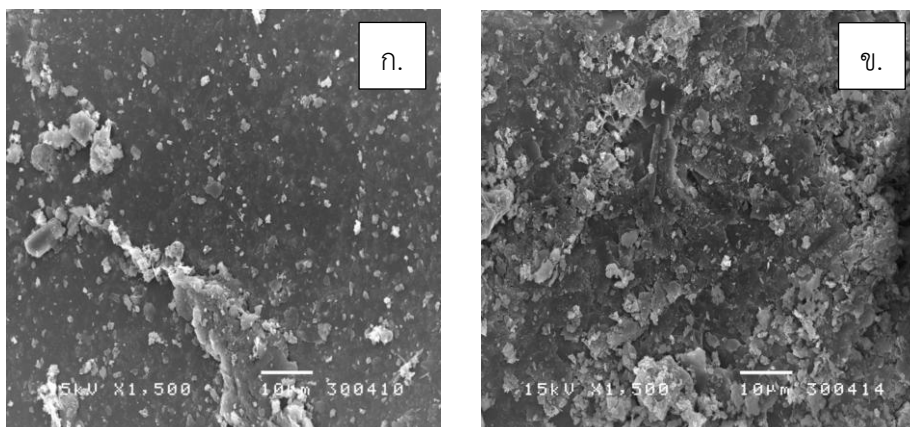
ตารางที่ 4.16 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจากมอร์ตาร์เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

โลหะหนัก	ความเข้มข้นใน ของเสี้ยว (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ค่า TTLC (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ความเข้มข้นใน น้ำสกัด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่า STLC (มิลลิกรัม/ลิตร)
โครเมียม	48.5	2,500	0.55	5
ทองแดง	23.8	2,500	0.23	25
ตะกั่ว	202	1,000	0.57	5
สังกะสี	505	5,000	7.05	250

4.3.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวภายในของมอร์ตาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของมอร์ตาร์ตัวอย่าง AL20 เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์รหัส AL60 ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ผลการศึกษาดังแสดงในภาพที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิวของมอร์ตาร์ตัวอย่าง AL20 นั้น มีลักษณะเป็นผิวเรียบและรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) จากงานวิจัยของ Sobiecka และคณะ (2014) กล่าวว่า การเกาะตัวขององค์ประกอบภายในลักษณะนี้ เป็นผลเนื่องด้วยมีส่วนประกอบของวัสดุประสานซึ่งในที่นี้คือซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เยอะมากกว่าองค์ประกอบอื่นๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาหลักในการเกิดคอนกรีตนั้นคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่เป็นหนึ่งในสองปฏิกิริยาหลักที่ทำให้สารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) โดยในที่นี้มีการเพิ่มของเสี้ยวอะลูมินาเข้าไปในมอร์ตาร์ด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ ประพิศลา เทพสิทธิ์า (2542) ที่กล่าวว่า สารที่มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมินาไดออกไซด์ (Al_2O_3) ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งในที่นี้ของเสี้ยวอะลูมินาก็มีคุณสมบัติสอดคล้องกับงานวิจัยดังกล่าวโดยองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลานคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งจะปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ส่วนแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็น Ca(OH)_2 ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป แต่เนื่องด้วยในของเสี้ยวอะลูมินามีองค์ประกอบของสารชนิดอื่นที่ไม่สามารถร่วมทำปฏิกิริยาทั้งสองดังที่กล่าวไปได้ ทำให้การเพิ่มสัดส่วนของเสี้ยวอะลูมินามีผลต่อลักษณะโครงสร้างภายในของมอร์ตาร์ดังที่สังเกตได้จากภาพที่ 4.10 กล่าวคือ มอร์ตาร์จากภาพ 4.10 (ก.) มีส่วนประกอบของของเสี้ยว

อะลูมินาน้อยกว่าทำให้มีลักษณะของเนื้อสารจับตัวกันเป็นเนื้อเดียวมากกว่าส่วนภาพที่ 4.10 (ข.) จะเห็นได้ชัดเจนว่าของเสี่ยอะลูมินาและวัสดุประสานอื่นๆ ยังมีความไม่เข้ากันอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 4.10 ภาพถ่ายด้วยกล้องขยายอิเล็กทรอนิกส์แบบสแกนของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลา 28 วัน
(กำลังขยาย 1,500 เท่า)

(ก.) มอร์ตาร์รหัส Al20 (ข.) มอร์ตาร์รหัส Al60

4.4 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสี่ยซิลิกาและของเสี่ยอะลูมินามาผลิตเป็น จีโอโพลีเมอร์และการจัดการของเสี่ยอะลูมินาโดยการนำมาทำเป็นก้อนแข็ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.1 ผลการประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยการนำของเสี่ยซิลิกา และของเสี่ยอะลูมินามาเป็นวัตถุดิบ

ทำการประเมินราคาต้นทุนในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ และคำนวณเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสี่ยซิลิกาและของเสี่ยอะลูมินาในหน่วยราคาบาทต่อตันของเสี่ยซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนดังกล่าวเป็นการประเมินในท้องปฏิบัติการ ไม่รวมค่าแรง ค่าวัสดุ ค่าขนส่ง และค่าผลตอบแทนทางธุรกิจ โดยปกติค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสี่ยอะลูมินาอยู่ที่ประมาณ 1,000 – 20,000 บาทต่อตัน ส่วนของเสี่ยซิลิกามีต้นทุนในการจัดการอยู่ที่ 8,000 บาทต่อตัน (โรงงานรีไซเคิลกากของเสี่ย, สัมภาษณ์, 30 มีนาคม 2554) ซึ่งผลการประมาณการค่าใช้จ่ายดังสรุปในตารางที่ 4.15 กล่าวคือในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ 1 ก้อน จะมีต้นทุนในการผลิตรวมทั้งสิ้น 4.03 บาท โดยเป็นผลรวมของราคาต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนพลังงานในการบดและการอบ โดยคำนวณค่าพลังงานเทียบจากอัตราการคิดที่ใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ได้ค่าตามตารางที่ 4.17 โดยค่าต้นทุนวัตถุดิบของเสี่ยซิลิกาเท่ากับ

0.23 บาท และของเสียอะลูมินาเท่ากับ 0.12 บาท โดยทั้งสองค่านี้คือต้นทุนในการบด ค่าใช้จ่ายในการผลิตมอร์ตาร์จากของเสียซีลีกาในงานด้านคอนกรีตและซีเมนต์ในการประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสียซีลีกาเปรียบเทียบกับซีลีกาพูนมาใช้ในกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปในงานวิจัยของ ญัฐพล เศรษฐโอฬาร (2554) โดยราคาค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตผสมซีลีกาพูนเท่ากับ 7,300 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ราคาค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตผสมของเสียซีลีกาเท่ากับ 4,380 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ลูกบาศก์เมตรละ 2,920 บาท (ลดค่าใช้จ่ายลงประมาณร้อยละ 40) งานวิจัยนี้ไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ ญัฐพล เศรษฐโอฬาร (2554) เนื่องจากเป็นการใช้ของเสียซีลีกาในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานของ ชาลิสสา วิสมหมาย (2555) พบว่ามีค่าใช้จ่ายในการผลิตจีโอโพลีเมอร์โดยมีของเสียซีลีกาและอะลูมินาบริสุทธิ์เป็นวัตถุดิบ คือแตกต่างกันที่ใช้อะลูมินาบริสุทธิ์กับของเสียอะลูมินาเป็นวัตถุดิบ โดยมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 4.31 บาท ต่อการผลิตจีโอโพลีเมอร์หนึ่งก้อน ซึ่งราคาในที่นี้ไม่รวมถึงค่าใช้จ่ายในการอบจีโอโพลีเมอร์ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าใช้ในงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อหักค่าใช้จ่ายในการอบออกไป ต้นทุนของการผลิตจะเท่ากับ 2.44 บาท ซึ่งมีราคาถูกกว่าถึง 1.49 บาท ต่อการผลิตจีโอโพลีเมอร์ 1 ก้อน เนื่องจากสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของต้นทุนอะลูมินาบริสุทธิ์ได้โดยปกติแล้วการกำจัดของเสียซีลีกาและของเสียอะลูมินานั้นมีค่าใช้จ่ายสูงและเป็นการนำเอาของเสียไปทิ้งและไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์แต่ประการใด ซึ่งในการผลิตจีโอโพลีเมอร์โดยการใช้ของเสียซีลีกาและของเสียอะลูมินาเป็นวัตถุดิบในครั้งนี้ สามารถลดค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียซีลีกาและของเสียอะลูมินาได้

ตารางที่ 4.17 ผลราคาค่าใช้จ่ายต่อการผลิตจีโอโพลีเมอร์ 1 ก้อน

วัตถุดิบ	ราคา (บาท)	
	งานวิจัยนี้	ชาลิสตา วิสมหมาย (2555)
ของเสียซิลิกา	0.23	0.68
ของเสียอะลูมินา	0.12	-
อะลูมินาบริสุทธิ์	-	1.95
โซเดียมไฮดรอกไซด์	0.080	0.06
โซเดียมซิลิเกต	0.50	0.12
ทราย	1.51	1.50
ค่าพลังงานในการอบ	1.59	1.59
รวม	4.03	5.90

4.4.2 การประเมินค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง

ทำการประเมินราคาต้นทุนการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งและคำนวณเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียอะลูมินาในหน่วยราคาบาทต่อตันของเสีย ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนดังกล่าวเป็นการประเมินในท้องปฏิบัติการ ไม่รวมค่าแรง ค่าวัสดุ ค่าขนส่ง และค่าผลตอบแทนทางธุรกิจ ได้ผลสรุปราคาต่อการผลิตมอร์ตาร์ต่อหนึ่งก้อนดังตารางที่ 4.18 ผลสรุปว่าในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งนั้นมีค่าใช้จ่ายในการจัดการขึ้นอยู่กับอัตราส่วนที่ใช้ เนื่องจากของเสียอะลูมินามีต้นทุนในการบดเป็นค่าพลังงานเท่ากับ 9.94 บาทต่อกิโลกรัม และมีราคาปูนซีเมนต์ต้นทุนเท่ากับ 4.23 บาทต่อกิโลกรัม และราคาต้นทุนทรายเท่ากับ 7.78 บาทต่อกิโลกรัม โดยเมื่อนำมาคิดตามสัดส่วนของแต่ละส่วนประกอบในมอร์ตาร์พบว่า สัดส่วนที่มีการผสมของเสียอะลูมินาเท่ากับ 20 กรัม ต่อ ปูนซีเมนต์ 80 กรัม นั้นมีราคาถูกที่สุดคือเท่ากับ 2.04 บาทต่อก้อน โดยเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนของของเสียอะลูมินามากขึ้น ราคาต้นทุนในการผลิตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าต้นทุนของของเสียอะลูมินามีค่าสูงกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเสีย อะลูมินาเข้าไปก็ทำให้ราคาต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นด้วย แต่ทั้งนี้ในงานวิจัยยังคงมุ่งเน้นไปที่การจัดการของเสีย จึงได้ทำการเปรียบเทียบราคาต่อการจัดการของเสียอะลูมินา 1 กิโลกรัมไว้ ดังแสดงในตารางที่ 4.18 และจะเห็นได้ว่าค่าในการจัดการของเสียอะลูมินาต่อกิโลกรัมนั้นเมื่อมีการผสมของเสียมากขึ้น ทำให้ต้นทุนในการจัดการของเสียต่อกิโลกรัมนั้นลดลงไปด้วย ทั้งนี้จึง

เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ดีในการที่จะนำมาพัฒนาเพื่อส่งผลดีทางด้านเศรษฐกิจต่อไป เพราะการผสมของเสียอะลูมินาลงในมอร์ตาร์นั้นทำให้ลดปริมาณในการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงได้ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุของการปล่อย ก๊าซเรือนกระจก ตามงานวิจัยของ Mahasanen และคณะ (2003) และยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียอะลูมินาได้ได้ ซึ่งเมื่อมองในแง่มุมมองของการจัดการของเสียแล้วการจัดการของเสียด้วยวิธีนี้ เมื่อผสมของเสียอะลูมินาถึง 60 กรัม มีค่าในการจัดการเพียง 2.27 บาทต่อก้อน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ ซาลิสา วิสมหมาย (2555) ที่ทำการศึกษาการจัดการของเสียซีลิกาโดยการนำมาผสมกับอะลูมินาบริสุทธิ์ พบว่า มีค่าจัดการของเสียต่อมอร์ตาร์ 1 ก้อนเท่ากับ 5.90 บาท ซึ่งมีราคาสูงกว่าการจัดการด้วยการนำมาทำเป็นก้อนแข็ง แต่ข้อดีคือไม่มีการนำเอาซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาผสมและแต่ใช้สารละลายต่างกระตุ้นและให้ความร้อนในอุณหภูมิที่ไม่สูงคือแค่ 60 องศาเซลเซียส แต่ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นต้องใช้ความร้อนสูงถึง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก และจากการประเมินต้นทุนในการผลิตในครั้งนี้เป็นการประเมินจากการผลิตในห้องปฏิบัติการโดยไม่รวมค่าแรง ค่าวัสดุ ค่าขนส่ง และค่าผลตอบแทนทางธุรกิจ ซึ่งการประเมินในระดับอุตสาหกรรมจะมีความแม่นยำมากกว่า โดยราคาต้นทุนจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณและชนิดจำกัดในการผลิต ค่าแรง ตลอดจนค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต

ตารางที่ 4.18 ราคาต้นทุนในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการนำมาทำเป็นก้อนแข็ง

วัตถุดิบ	ราคา (บาท)				
	Al20	Al30	Al40	Al50	Al60
ของเสียอะลูมินา	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
ปูนซีเมนต์	0.34	0.30	0.25	0.21	0.17
ทราย	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
ราคารวม (ต่อก้อน)	2.04	2.10	2.16	2.22	2.27
รวมราคาต่อของเสียอะลูมินา 1 กิโลกรัม	102.21	70.04	53.96	44.31	37.88

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ประกอบด้วย การศึกษาการผลิต จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยมีของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาเป็นวัตถุดิบ และการศึกษาการจัดการของเสียอะลูมินาด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็ง โดยจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยมีของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาเป็นวัตถุดิบ

จากการศึกษาการนำของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินามาเป็นวัตถุดิบในการผลิต จีโอโพลีเมอร์ที่ควบคุมสัดส่วนวัสดุประสาน (ของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา) เท่ากับ 70 กรัม ต่อ สารละลายต่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต) เท่ากับ 30 มิลลิลิตร และทราย 275 กรัม อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และรอรระยะเวลาทดสอบที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน ได้ผลสรุปว่า สัดส่วนที่ดีที่สุดในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ในงานวิจัยนี้คือ ของเสียซิลิกา 46 กรัม ของเสียอะลูมินา 24 กรัม (สัดส่วนขององค์ประกอบ $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 3:1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิลิตร โซเดียมซิลิเกต 20 มิลลิลิตร โดยทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 155.2, 189.6, 215 และ 262.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดประกอบไปด้วยปริมาณองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 ภายในวัตถุดิบ และสัดส่วนที่ใช้ในการผสม ระยะเวลาในการบ่ม กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาบ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้นตามไปด้วย ขนาดของอนุภาค กล่าวคือ ขนาดของอนุภาคยิ่งเล็กยิ่งส่งผลให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์เพิ่มมากขึ้นและมีค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้นไปด้วย โดยเห็นได้อย่างชัดเจนด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy, SEM) พบว่าการจับตัวของอนุภาคภายในของอัตราส่วนดังกล่าว มีลักษณะการจับตัวที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น

เนื่องจากวัตถุดิบข้างต้นถูกจัดว่าเป็นของเสียอันตราย จึงต้องนำเอามอร์ตาร์ที่ได้มาทำสอบตามหลักการของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ปี 2548 อีกที โดยได้ผลสรุปว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTL) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) แล้ว ผลสรุปว่าค่าที่ได้ไม่เกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ มอร์ตาร์ที่ได้

จึงไม่จัดเป็นของเสียอันตรายอีกต่อไปและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อไปได้ โดยค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ในงานวิจัยนี้ มีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักและคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก โดยมีค่าใช้จ่ายในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ต่อก้อนเท่ากับ 4.03 บาทต่อก้อน

5.1.2 การทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง

จากการทำการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการทำให้เป็นก้อนแข็ง ได้ผลสรุปดังนี้คือ เมื่อทำการผสมวัสดุประสานคือปูนและของเสียอะลูมินา ททราย และ น้ำ ในอัตราส่วนวัสดุประสาน 100 กรัม น้ำ 60 มิลลิลิตร และทราย 275 กรัม โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนภายในวัสดุประสานอันประกอบไปด้วย ของเสียอะลูมินาและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลที่ได้สรุปว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มจำนวนของเสียอะลูมินาในวัสดุประสานมากขึ้น โดยได้ทำการทดลองเพิ่มปริมาณอัตราส่วนของของเสียอะลูมินาต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตั้งแต่ 20:80, 30:70, 40:60, 50:50 และ 60:40 กรัม จะเห็นได้ชัดเจนว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ทดสอบในระยะเวลาย่อมเท่ากันค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงตามปริมาณของเสียอะลูมินาที่ใส่ลงไป แต่ทั้งนี้งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อค้นหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการจัดการกับของเสียอะลูมินา ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับหลักการด้านเศรษฐกิจ จึงพุ่งประเด็นไปที่อัตราส่วนที่มีการผสมของเสียอะลูมินามากที่สุดคือ ของเสียอะลูมินา 60 กรัม ต่อ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 40 กรัม ในช่วงระยะเวลาบ่ม 7 วันแรก ได้ค่ากำลังรับแรงอัดเพียง 2.58 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานกำลังรับแรงอัดสำหรับหลุมฝังกลบแบบปลอดภัยคือ 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราส่วนนี้ถือว่ายังมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานอยู่ แต่เมื่อทดสอบที่ระยะเวลาบ่มมากขึ้นคือที่ 14 และ 28 วัน ได้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นเป็น 10.50 และ 27.06 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเกินค่ามาตรฐาน ดังนั้นสรุปได้ว่า การจัดการของเสียอะลูมินาด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อนแข็งนั้นสามารถทำได้โดยผสมส่วนประกอบต่างๆ ในอัตราส่วนดังนี้ของเสียอะลูมินา 60 กรัม, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 40 กรัม, น้ำ 60 มิลลิลิตร และ ทราย 275 กรัม และต้องทำการบ่มเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 14 วัน ก่อนการนำไปจัดเก็บในหลุมฝังกลบต่อไป แต่เนื่องจากได้มาทำสอบตามหลักการของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ปี 2548 อีกที โดยได้ผลสรุปว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTL) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) แล้ว ผลสรุปว่าค่าที่ได้ไม่เกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

มอร์ตาร์ที่ได้จึงไม่จัดเป็นของเสียอันตรายอีกต่อไปและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อไปได้โดยไม่จำเป็นต้องนำไปฝังกลบตามวิธีการเดิมอีกต่อไป จึงได้ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ต่อกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตไม่รับน้ำหนัก กำหนดไว้ว่า คอนกรีตบล็อกแต่ละก้อนต้องไม่ต่ำกว่า 2 เมกะพาสคาล หรือ 20.39 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของของเสียอะลูมินาร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานตามลำดับ จะผ่านค่าคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก เมื่อมีระยะเวลาบ่มตั้งแต่ 14 วันขึ้นไป ส่วนมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของของเสียอะลูมินาร้อยละ 50 และ 60 จะผ่านเกณฑ์มาตรฐานเมื่อครบระยะเวลาบ่ม 28 วันแล้ว โดยมีค่าใช้จ่ายในการผลิตเท่ากับ 2.27 บาทต่อก้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากขั้นตอนการผลิตมอร์ตาร์จีโอโพลีเมอร์ต่างจากการผลิตมอร์ตาร์ซีเมนต์คือมีความจำเป็นต้องให้พลังงานความร้อนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา จึงควรที่จะมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการผลิตจีโอโพลีเมอร์ที่สามารถทำปฏิกิริยาภายในได้เองโดยไม่ต้องอาศัยความร้อนจากภายนอกเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต
2. ต้นทุนของการผลิตในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการขนาดเล็กทำให้มีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับค่าพลังงานในการอบและบดค่อนข้างมาก หากมีการพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมใหญ่ น่าจะสามารถลดต้นทุนในการผลิตส่วนนี้ได้
3. ถึงแม้ว่าจะมีการทดสอบค่าความเข้มข้นของโลหะหนักจากมอร์ตาร์เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน TTLC และ STLC ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม แล้วสรุปว่า มอร์ตาร์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไม่เป็นของเสียอันตราย แต่ในการนำมาใช้จริงอาจยังไม่สามารถเป็นที่ยอมรับได้ เนื่องจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปโลหะหนักที่ถูกยึดไว้ภายในโครงสร้างของมอร์ตาร์ มีโอกาสที่จะหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นควรมีการศึกษาผลกระทบของของเสียเหล่านี้ในระยะยาว เพื่อให้แน่ใจว่าวิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้จริง และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในภายหลัง

5.3 การประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม

ตามคุณสมบัติของเสียอะลูมินาและของเสียอะลูมินาที่นำมาใช้ในการทดลองตามที่ระบุไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ปี พ.ศ. 2548 ว่าเป็นของเสียอันตราย โดยจากการศึกษาการใช้ของเสียอะลูมินาและของเสียซิลิกามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลีเมอร์และการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง พบว่าเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถจัดการของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากจะเป็นการลดต้นทุนในการจัดการ

ของเสียแล้ว ยังเป็นการแปรรูปของเสียให้กลับมาใช้ใหม่ได้และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมการก่อสร้างได้ อันเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียที่โดยปกติแล้วต้องมีต้นทุนในการนำไปจัดเก็บ อีกทั้งยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง หากมีการประยุกต์ใช้งานวิจัยชิ้นนี้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างจริง จะเป็นการลดการผลิตปูนซีเมนต์หรือลดปริมาณและพื้นที่วัสดุประสานอื่นๆ ในการผสมปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่สิ้นเปลืองพลังงานและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการจัดการของเสียอะลูมินาและของเสียซิลิกาและสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเป็นผลกระทบที่ตามมาในวงกว้าง



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. [2 กรกฎาคม 2558]. Available from:

http://www2.diw.go.th/l_Standard/Web/pane_files/Industry27.asp.

ชาลิสสา วิสมหมาย. 2555. การนำของเสียซิลิกาไปใช้ประโยชน์ในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฐพล เศรษฐโอฬาร. 2554. การนำของเสียซิลิกาไปใช้ประโยชน์แทนซิลิกาฟุ่มในการผลิตมอร์ตาร์.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประพิศลา เทพสิทธิธา. 2542. การทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนของตะกอนจากการถลุงแร่เซอร์ส

ไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประหยัด เลี้ยวไพรัตน์. 2551. คอนกรีต. คอนกรีตเทคโนโลยี.4-9.

ภูพิงค์ ทวีทรัพย์. 2540. การทำเสถียรโลหะหนักในเศษสีด้วยวิธีทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วินิต ช่อวิเชียร. 2529. คอนกรีตเทคโนโลยี. ภาควิชาโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย.

ศักรินทร์ เหลืองกำจร. วัสดุจีโอโพลีเมอร์ (Geopolymermaterials) 2550 [2555, 5 กรกฎาคม].

Available from:

www.thaitca.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=80:--

[geopolymer-material--&catid=44:journal03&Itemid=55](http://www.thaitca.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=80:--geopolymer-material--&catid=44:journal03&Itemid=55)

สุจิตรา กัญญาวิลาส. 2545. การทำให้ตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์เป็นก้อนด้วยการใช้ซิลิกาและอะลูมิ

นาที่ใช้แล้วปูนขาวและซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Albakri, M., M., Mohammed, H., Kamarudin, H., Niza, K. and Zarina, Y. 2010. Fly ash-based geopolymer concrete without portland cement. Engineering and Technology Research. 3(1):1-4.
- Anastasiadou, K., Christopoulos, K. and Mousios, E. 2012. Solidification/stabilization of fly and bottom ash from medical waste incineration facility. Hazardous Materials. 207:165-70.
- Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F. and Santoro, L. 2007. Coal fly ash as raw materials for manufacture geopolymer-based products. Waste Management. 28:416-23.
- Ann, K. Y., Kim, T., S., Kim, J. H. and Kim, S. H. 2010. The resistance of high alumina cement against corrosion of steel in concrete. Construction and Building Materials. 24:1502-10.
- Antemir, A., Hill, C., Carey, P., Gardner, K., Bates, E. and Crumbie, A. 2010. Long-term performance of aged waste forms treated by stabilization/solidification. Hazardous Materials. 181:65-73.
- ASTM C109 / C109M-13, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/C0109_C0109M, www.astm.org.
- ASTM C136-06, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, DOI: 10.1520/C0136-06, www.astm.org.
- ASTM C778-06, Standard Specification for Standard Sand, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, DOI: 10.1520/C0778-06, www.astm.org.
- Aye, T., Oguchi, T., C. and Takaya, Y. 2010. Evaluation of sulfate resistance of Portland and high alumina cement mortars using hardness test. Construction and Building Materials. 24:1020-6.
- Bie, R., Chen, P., Song, X. and Ji, X. 2015. Characteristics of municipal solid waste incineration fly ash with cement solidification treatment. Journal of the Energy Institute. doi:10.1016/j.joei.2015.04.006.

- Chen, Y., Han, F. and Wu, L. 2015. Leaching of Lead from Geopolymer Prepared by Waste Acid Residue. Procedia Engineering. 102:395-8.
- Cheng, T. W., Lee, M. L., Ko, M. S., Ueng, T. H. and Yang, S. F. 2012. The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer. Applied Clay Science. 56:90-6.
- Coz, A., Andres, A., Soriano, S., Viguri, J. r., Ruiz, M. c. and Irabien, J. A. 2008. Influence of commercial and residual sorbents and silicates as additives on the stabilization/solidification of organic and inorganic industrial waste. Hazardous Materials. 164:755-61.
- Davidovits, J. 1993. Geopolymers cement to minimize carbon dioxide greenhouse-warming. Ceram Trans. 37:165-82.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, L., J., Lukey, G., C., Palomo, A. and Van Deventer, J., S, J. 2006. Geopolymer technology: the current state of the act. Master Sci. 42:2917-33.
- El-Eswed, B. I., Yousef, R. I., Alshaaer, M., Hamadneh, I., Al-Gharabli, S. I. and Khalili, F. 2015. Stabilization/solidification of heavy metals in kaolin/zeolite based geopolymers. International Journal of Mineral Processing. 137:34-42.
- Fernandez-Jimenez, A. and Palomo, A. 2003. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. Fuel. 82:2259-65.
- Gajanan, M., Sabnis, K., D, and Cooper, K. 2009. Concrete Construction and Sustainability. ICI Journal.231-42.
- Huang, Y. and Han, M. 2011. The influence of α -Al₂O₃ addition on microstructure, mechanical and formaldehyde adsorption properties of fly ash-based geopolymer products. Hazardous Materials. 193:90-4.
- Hunce, Y. S., Akgul, D., Dermitt, G. and Mertoglu, B. 2012. Solidification/stabilization of landfill leachate concentrate using different aggregate materials. Waste Management. 32:1394-400.
- Jo, B. w., Park, S. k. and Park, J. b. 2007. Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA). Cement & Concrete Composites. 29:128-35.

- Mahasenani, N., Smith, H. and Humphreys, K. 2003. The cement industry and global climate change: Current and potential future cement industry CO₂ emissions. Greenhouse gas control technology. 2:995-1000.
- Malviya, R. and Chuadhary, R. 2006. Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: A review. Hazardous Materials. 137:267-76.
- Nazari, A., Begheri, A. and Riahi, S. 2011. Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. Materials Science and Engineering. 528:7395-401.
- Perna, I. and Hanzlicek, T. 2014. The solidification of aluminum production waste in geopolymer matrix. Journal of Cleaner Production. 84:657-62.
- Qian, G., Cao, Y., Chui, P. and Tay, J. 2006. Utilization of MSWI fly ash for stabilization /solidification of industrial waste sludge. Hazardous Materials. B129:274-81.
- Shi, C. and Jimenez, F., A. 2006. Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements. Hazardous Materials. B137:1656-63.
- Shively, W., Bishop, P., Gresss, D. and Brown, T. 1986. Leaching test of heavy metals stabilized with portland cement. J Water Pollut Control Fed. 58(3):234-41.
- Silva, A. R. M., Mater, L., Souza-Sierra, M., M., Correa, X. R., A., Sperb, R. and Radetski, M., C. 2007. Small hazardous waste generators in developing countries: use of stabilization/solidification process as an economic tool for metal wastewater treatment and appropriate sludge disposal. Hazardous Materials. 147:986-90.
- Skvara, F., Jilek, T. and Kopecky, L. 2005. Geopolymer materials based on fly-ash. Ceramics Silikáty. 49(3):195-204.
- Sobiecka, E., Obraniak, A. and Antizar-Ladislao, B. 2014. Influence of mixture ratio and pH to solidification/stabilization process of hospital solid waste incineration ash in Portland cement. Chemosphere. 111:18-23.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. and Chindaprasirt, P. 2011. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. Fuel. 90:2118-24.
- Song, F., Gu, L., Zhu, N. and Yuan, H. 2013. Leaching behavior of heavy metals from sewage sludge solidified by cement-based binders. Chemosphere. 92:344-250.

- Tailby, J. and Mackenzie, K. J. D. 2010. Structure and mechanical properties of Aluminosilicate geopolymer composites with Portland cement and its constituent minerals. Cement and Concrete Research. 40:787-94.
- Temuujin, J., Riessen, V., A. and K.J.D., M. 2010. Preparation and characterization of fly ash based geopolymer mortars. Construction and Building Materials. 24:1906-10.
- Torres-Carrasco, M. and Puertas, F. 2015. Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. Journal of Cleaner Production. 90:397-408.
- U.S. EPA Method 3050b., Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, [online], Available:<http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3050b.pdf> [2015, 6 June].
- Zhen, G., Lu, X., Cheng, X., Chen, H., Yan, X. and Zhao, Y. 2012. Hydration process of the aluminate $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ -assisted Portland cement-based solidification/stabilization of sewage sludge. Construction and Building Materials. 30:675-81.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากของเสียด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด ตามมาตรฐาน**U.S.EPA.3050b**

1. นำตัวอย่างของเสียปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เตรียมกรดไนตริกผสมน้ำกลั่นที่อัตราส่วน 1 ต่อ 1 ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีตัวอย่างของเสียปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วนำบีกเกอร์ไปตั้งบนเตาเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส
3. ครบ 10 นาที ยกบีกเกอร์ลงทิ้งให้เย็น แล้วเติมกรดไนตริกเข้มข้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร
4. นำไปตั้งบนเตาอีกครั้งเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นยกบีกเกอร์ลง ทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร
5. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 30 ปริมาตร 3 มิลลิลิตร จนกระทั่งฟองอากาศหายไป แล้วจึงค่อยๆ เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 30 จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศแล้วนำไปตั้งบนเตาอีกครั้ง ต้มไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีปริมาตรกรดเหลือ 2 มิลลิลิตร
6. ยกบีกเกอร์ลงและเติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าแล้วรอจนเย็น
7. นำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร เก็บใส่ขวดพลาสติก
8. นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคอปเปิลพลาสมาออปติคอลลิมิสชันสเปกโตรเมทรี (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, ICP-OES)

การทดสอบสิ่งปนื้อหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วโดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

สำหรับสิ่งปนื้อหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งสามารถบดได้ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปนื้อหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 โดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และนำสารละลายที่ได้ไปทดสอบหาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่ชะละลายออกมาตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. บดตัวอย่างเพื่อให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 มิลลิเมตร
2. ให้ใช้สารละลายโซเดียมซิเตรท (Sodium citrate) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่พีเอชเท่ากับ 5.0 ± 0.1
3. นำตัวอย่างหนัก 50 กรัม ใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน ภาชนะที่ใช้ในการสกัดควรผ่านการล้างอย่างต่อเนืองด้วยกรดไนตริก ซึ่งเตรียมได้จากการนำเอาสารละลายกรดไนตริกมาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร
4. เติม 500 มิลลิลิตร ของน้ำสกัดลงในตัวอย่าง จากนั้นนำของผสมไปไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที เพื่อไล่ออกซิเจนในน้ำสกัดออกไปและป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในอากาศละลายลงไปในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. นำเอาของผสมไปกรองหรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้ Thick-walled suction flask ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบสามารถใช้ Pressure filtration แทน Vacuum filtration ได้ สำหรับของแข็งขนาดละเอียดอาจเหวี่ยงที่ความเร็วรอบถึง 10,000 xG ก่อนนำไปกรองผ่านเมมเบรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน นำของผสมไปไล่อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที ควรปรับอุณหภูมิในระหว่างสกัดอยู่ระหว่าง 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส
6. ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะเท่านั้นให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จากข้อ 5. ลงในขวดโพลีเอทิลีนและปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริกเป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร
7. นำของเหลวไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)


การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (มาตรฐาน ASTM C109/C109M-13, 2013)

1. วิธีการเตรียมแบบหล่อตัวอย่าง

- 1.1 ทาน้ำมันบางๆ ที่ผิวด้านในของแบบหล่อกับฐาน
- 1.2 ทาน้ำมันชนิดเข้มข้นหรือจารีระหว่างตัวแบบหล่อกับฐาน
- 1.3 เช็ดน้ำมันส่วนเกินออกจากแบบหล่อ
- 1.4 ใช้จารีปิดรอยต่อระหว่างแบบหล่อกับฐานที่ด้านนอก

2. วิธีการหล่อก้อนตัวอย่าง

- 2.1 หล่อก้อนตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยชั่งวัสดุที่ใช้ตามอัตราส่วนที่ต้องการทดสอบโดยให้ได้ปริมาณ 3 ตัวอย่าง ในแต่ละการผสม
- 2.2 การผสมใช้วิธีการผสมโดยเครื่องผสมโดยผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน
- 2.3 เอาส่วนผสมลงในแบบหล่อภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที หลังการผสมแล้วการหล่อจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกหนาประมาณ 1 นิ้ว แล้วใช้แท่งกระทุ้งชั้นละ 16 ครั้ง โดย 8 ครั้งแรกจะมีทิศทางตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลัง ให้แรงกระทุ้งพอประมาณและเท่ากันตลอด ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เติมส่วนผสมชั้นที่ 2 ให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อยและใช้มือป้อน ขณะกระทุ้งใช้แท่งกระทุ้งกระทุ้ง 16 ครั้ง เช่นเดียวกับครั้งแรก เมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
- 2.4 หลังจากหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อเก็บไว้ในที่ชื้นทันที และถอดแบบในเวลา 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างต่อจนครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินา
วิเคราะห์ด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตัวอย่าง : ของเสียซิลิกา
 วิธีวิเคราะห์ : Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry
 เครื่องมือวิเคราะห์ : X-ray fluorescence spectrometry, Philips model PW2400

ตารางที่ ข.1 ปริมาณปริธาตุของของเสียซิลิกา

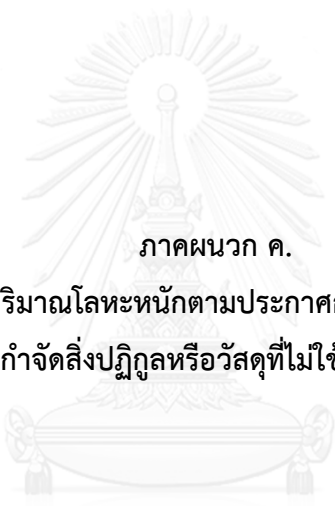
องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Na ₂ O	<0.01
MgO	<0.01
Al ₂ O	<0.01
SiO ₂	71.3
P ₂ O ₃	<0.01
SO ₃	<0.01
Cl	<0.01
K ₂ O	<0.01
CaO	0.02
Cr ₂ O ₃	0.03
MnO ₂	<0.01
Fe ₂ O ₃	0.08
CuO	<0.01
ZrO ₂	<0.01
%LOI*	28.6

*LOI = Loss on ignition

ตัวอย่าง : ของเสียอะลูมินา
 วิธีวิเคราะห์ : Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry
 เครื่องมือวิเคราะห์ : X-ray fluorescence spectrometry, Philips model PW2400

ตารางที่ ข.2 ปริมาณปริธาตุของของเสียซิลิกา

องค์ประกอบ ทางเคมี	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	องค์ประกอบ ทางเคมี	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
H ₃ BO ₃	13.742	MnO ₂	0.31
Na ₂ O	14.425	Fe ₂ O ₃	3.066
MgO	4.31	NiO	0.049
Al ₂ O ₃	48.094	CuO	0.841
SiO ₂	4.18	ZnO	0.357
P ₂ O ₅	0.056	Br	0.03
SO ₃	0.608	SrO	0.13
Cl	20.604	MoO ₂	0.01
K ₂ O	0.312	SnO ₂	0.05
CaO	1.51	Sb ₂ O ₃	0.02
TiO ₂	0.591	BaO	0.27
Cr ₂ O ₃	0.068	PbO	0.11



ภาคผนวก ค.

ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

เรื่องการจัดตั้งปฏิภูมหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของของเสียซีลิกา

โดยนำของเสียซีลิกาไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S.EAP 3050b และ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

ตารางที่ ค.1 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในของเสียซีลิกาเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น ในของเสีย (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ค่า TTLC (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ความเข้มข้น ในน้ำสกัด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่า STLC (มิลลิกรัม/ลิตร)
โครเมียม	324	2,500	1.07	5
ทองแดง	189	2,500	1.61	25
ตะกั่ว	1,852	1,000	26.3	5
สังกะสี	5,368	5,000	11.9	250

ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของของเสียอะลูมินา

โดยนำของเสียอะลูมินาไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S.EAP 3050b และ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

ตารางที่ ค.2 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในของเสียอะลูมินาเปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น ในของเสีย (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ค่า TTLC (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ความเข้มข้น ในน้ำสกัด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่า STLC (มิลลิกรัม/ลิตร)
โครเมียม	82.5	2,500	6.17	5
ทองแดง	2.98	2,500	0	25
ตะกั่ว	7.95	1,000	0.76	5
สังกะสี	0	5,000	0	250

ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

โดยนำมอร์ตาร์ไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S.EAP 3050b และ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคั้บเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

ตารางที่ ค.3 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจากจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLC) และ Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

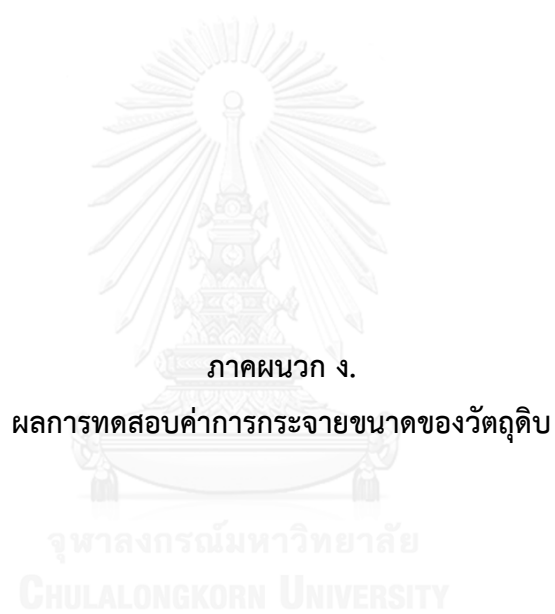
โลหะหนัก	ความเข้มข้น ในของเสี่ย (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ค่า TTLC (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ความเข้มข้น ในน้ำสกัด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่า STLC (มิลลิกรัม/ลิตร)
โครเมียม	29.8	2,500	0.61	5
ทองแดง	15.9	2,500	0.50	25
ตะกั่ว	108	1,000	2.13	5
สังกะสี	297	5,000	7.70	250

**ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากการจัดการของเสียอะลูมินา
โดยการทำเป็นก้อนแข็ง**

โดยนำมอร์ตาร์ไปทำการย่อยด้วยกรดตามมาตรฐาน U.S.EAP 3050b และ วิธี Waste Extraction Test (WET) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP)

ตารางที่ ค.4 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจากมอร์ตาร์เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน Total Threshold Limit Concentration (TTL) และค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น ในของเสีย (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ค่า TTL (มิลลิกรัม/ กิโลกรัม)	ความเข้มข้น ในน้ำสกัด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่า STLC (มิลลิกรัม/ลิตร)
โครเมียม	48.5	2,500	0.55	5
ทองแดง	23.8	2,500	0.23	25
ตะกั่ว	202	1,000	0.57	5
สังกะสี	505	5,000	7.05	250

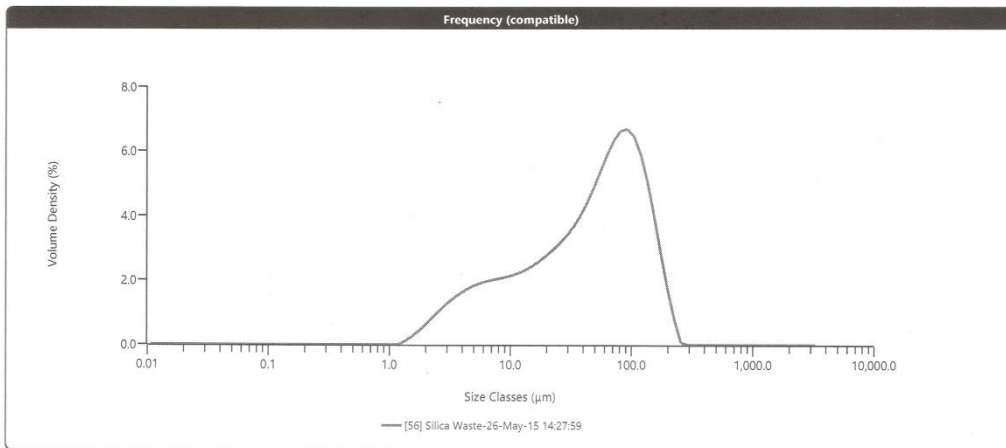


ค่าการกระจายขนาดของของเสียซิลิกา

Sample Details	
Sample Name	Silica Waste
File Name	S581796
Measurement Date Time	26-May-15 14:27:59
Instrument Type	Mastersizer3000
Instrument Serial No.	MAL1099267
Accessory Name	Hydro EV

Analysis details	
Particle Name	Silica (RI 1.544, AI 0.1)
Dispersant Name	Water
Dispersant Refractive Index	1.330
Analysis Model	General Purpose
Analysis Sensitivity	Normal
Scattering Model	Mie
Weighted Residual	0.45 %
Particle Refractive Index	1.544
Particle Absorption Index	0.100
Particle Density	1.00 g/cm ³
Laser Obscuration	18.60 %
Ultrasound Achieved	100 %
Stirrer Speed Achieved	2500 rpm
Particle Notes	

Result	
Concentration	0.0394 %
Uniformity	0.835
Specific Surface Area	376.0 m ² /kg
D [3,2]	16.0 µm
D [4,3]	60.3 µm
Span	2.635
Result Units	Volume
Dv (10)	5.50 µm
Dv (50)	48.9 µm
Dv (90)	134 µm



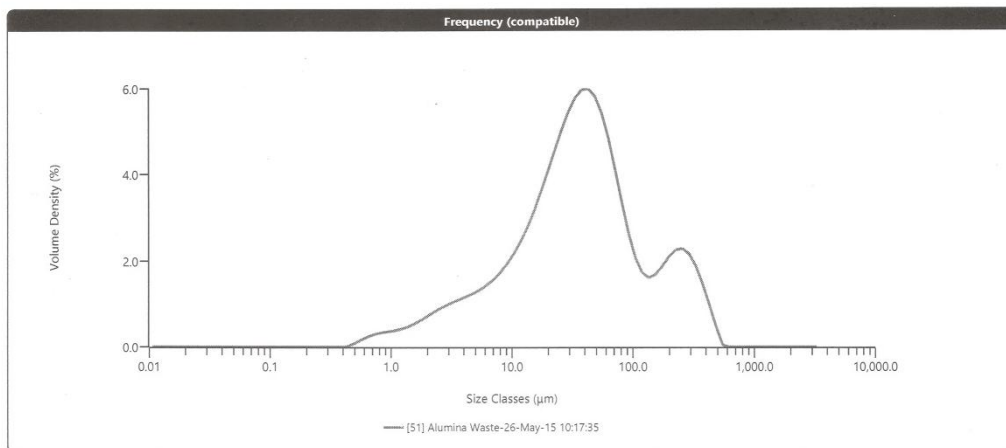
Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0679	0.00	0.460	0.00	3.12	1.19	21.2	2.46	144	3.32
0.0114	0.00	0.0771	0.00	0.523	0.00	3.55	1.32	24.1	2.63	163	2.34
0.0129	0.00	0.0876	0.00	0.594	0.00	4.03	1.43	27.4	2.82	186	1.41
0.0147	0.00	0.0995	0.00	0.675	0.00	4.58	1.52	31.1	3.05	211	0.66
0.0167	0.00	0.113	0.00	0.767	0.00	5.21	1.59	35.3	3.33	240	0.00
0.0189	0.00	0.128	0.00	0.872	0.00	5.92	1.64	40.1	3.67	272	0.00
0.0215	0.00	0.146	0.00	0.991	0.00	6.72	1.68	45.6	4.06	310	0.00
0.0244	0.00	0.166	0.00	1.13	0.00	7.64	1.71	51.8	4.49	352	0.00
0.0278	0.00	0.188	0.00	1.28	0.10	8.68	1.75	58.9	4.92	400	0.00
0.0315	0.00	0.214	0.00	1.45	0.22	9.86	1.80	66.9	5.30	454	0.00
0.0358	0.00	0.243	0.00	1.65	0.36	11.2	1.86	76.0	5.55	516	0.00
0.0407	0.00	0.276	0.00	1.88	0.53	12.7	1.95	86.4	5.60	586	0.00
0.0463	0.00	0.314	0.00	2.13	0.71	14.5	2.05	98.1	5.41	666	0.00
0.0526	0.00	0.357	0.00	2.42	0.89	16.4	2.17	111	4.94	756	0.00
0.0597	0.00	0.405	0.00	2.75	1.05	18.7	2.31	127	4.22	859	0.00

ค่าการกระจายขนาดของของเสี้ยวอะลูมินา

Sample Details	
Sample Name	Alumina Waste
File Name	SS81796
Measurement Date Time	26-May-15 10:17:35
Instrument Type	Mastersizer3000
Instrument Serial No.	MAL1099267
Accessory Name	Hydro EV

Analysis details	
Particle Name	Alumina
Dispersant Name	Water
Dispersant Refractive Index	1.330
Analysis Model	General Purpose
Analysis Sensitivity	Normal
Scattering Model	Mie
Weighted Residual	0.60 %
Particle Refractive Index	1.780
Particle Absorption Index	0.100
Particle Density	1.00 g/cm ³
Laser Obscuration	14.81 %
Ultrasound Achieved	100 %
Stirrer Speed Achieved	3000 rpm
Particle Notes	

Result	
Concentration	0.0211 %
Uniformity	1.473
Specific Surface Area	511.5 m ² /kg
D [3,2]	11.7 µm
D [4,3]	69.5 µm
Span	5.576
Result Units	Volume
Dv (10)	5.26 µm
Dv (50)	36.0 µm
Dv (90)	206 µm



Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0.0100	0.00	0.0679	0.00	0.460	0.06	3.12	0.88	21.2	3.79	144	1.40
0.0114	0.00	0.0771	0.00	0.523	0.13	3.55	0.93	24.1	4.18	163	1.56
0.0129	0.00	0.0876	0.00	0.594	0.19	4.03	0.99	27.4	4.54	186	1.75
0.0147	0.00	0.0995	0.00	0.675	0.24	4.58	1.05	31.1	4.82	211	1.89
0.0167	0.00	0.113	0.00	0.767	0.27	5.21	1.12	35.3	4.98	240	1.92
0.0189	0.00	0.128	0.00	0.872	0.29	5.92	1.22	40.1	5.00	272	1.82
0.0215	0.00	0.146	0.00	0.991	0.31	6.72	1.33	45.6	4.85	310	1.58
0.0244	0.00	0.166	0.00	1.13	0.34	7.64	1.47	51.8	4.52	352	1.23
0.0278	0.00	0.188	0.00	1.28	0.38	8.68	1.64	58.9	4.04	400	0.82
0.0315	0.00	0.214	0.00	1.45	0.44	9.86	1.84	66.9	3.44	454	0.40
0.0358	0.00	0.243	0.00	1.65	0.52	11.2	2.07	76.0	2.80	516	0.00
0.0407	0.00	0.276	0.00	1.88	0.60	12.7	2.34	86.4	2.20	586	0.00
0.0463	0.00	0.314	0.00	2.13	0.68	14.5	2.66	98.1	1.72	666	0.00
0.0526	0.00	0.357	0.00	2.42	0.76	16.4	3.01	111	1.43	756	0.00
0.0597	0.00	0.405	0.00	2.75	0.82	18.7	3.39	127	1.33	859	0.00





ภาคผนวก จ.
ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยมีของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาเป็นวัตถุดิบ

วันที่ผสม : 21 เมษายน 2558

วันที่ทำการทดสอบ : 22 เมษายน 2558

ตาราง จ.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ระยะเวลาบ่ม 1 วัน

ตัวอย่าง	อัตราส่วน**	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ก้อน ที่ 1	ก้อน ที่ 2	ก้อน ที่ 3	ก้อน ที่ 4	ก้อน ที่ 5	เฉลี่ย	
A1B1	27 : 43 : 20 : 10	50	47	56	55	50	51.6	±3.78
A1B2	27 : 43 : 15 : 15	60	65	66	59	67	63.4	±3.65
A1B3	27 : 43 : 10 : 20	72	74	70	69	75	72	±2.55
A2B1	40 : 30 : 20 : 10	108	96	105	98	100	101.4	±4.98
A2B2	40 : 30 : 15 : 15	115	123	125	114	115	118.4	±5.18
A2B3	40 : 30 : 10 : 20	128	136	138	138	134	134.8	±4.15
A3B1	46 : 24 : 20 : 10	125	128	118	120	126	123.4	±4.22
A3B2	46 : 24 : 15 : 15	138	142	148	136	139	140.6	±4.67
A3B3	46 : 24 : 10 : 20	156	160	161	149	150	155.2	±5.54

** อัตราส่วน : ของเสียซิลิกา (กรัม) : ของเสียอะลูมินา (กรัม) : NaOH (มล.) : Na₂SiO₃ (มล.)

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์โดยมีของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาเป็นวัตถุดิบ

วันที่ผสม : 21 เมษายน 2558

วันที่ทำการทดสอบ : 28 เมษายน 2558

ตาราง จ.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

ตัวอย่าง	อัตราส่วน**	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ก้อน ที่ 1	ก้อน ที่ 2	ก้อน ที่ 3	ก้อน ที่ 4	ก้อน ที่ 5	เฉลี่ย	
A1B1	27 : 43 : 20 : 10	76	74	71	69	75	73	±2.92
A1B2	27 : 43 : 15 : 15	88	86	86	83	85	85.6	±1.82
A1B3	27 : 43 : 10 : 20	93	96	90	94	94	93.4	±2.19
A2B1	40 : 30 : 20 : 10	124	128	122	128	126	125.6	±2.61
A2B2	40 : 30 : 15 : 15	132	136	133	135	136	134.4	±1.82
A2B3	40 : 30 : 10 : 20	165	163	162	164	166	164	±1.58
A3B1	46 : 24 : 20 : 10	148	143	147	146	140	144.8	±3.27
A3B2	46 : 24 : 15 : 15	169	172	168	166	171	169.2	±2.39
A3B3	46 : 24 : 10 : 20	189	187	190	192	190	189.6	±1.82

** อัตราส่วน : ของเสียซิลิกา (กรัม) : ของเสียอะลูมินา (กรัม) : NaOH (มล.) : Na₂SiO₃ (มล.)

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยมีของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาเป็นวัสดุดิบ

วันที่ผสม : 18 มีนาคม 2558

วันที่ทำการทดสอบ : 1 เมษายน 2558

ตาราง จ.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน

ตัวอย่าง	อัตราส่วน**	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ก้อน ที่ 1	ก้อน ที่ 2	ก้อน ที่ 3	ก้อน ที่ 4	ก้อน ที่ 5	เฉลี่ย	
A1B1	27 : 43 : 20 : 10	84	82	85	87	83	84.2	±1.92
A1B2	27 : 43 : 15 : 15	92	95	94	90	97	93.6	±2.70
A1B3	27 : 43 : 10 : 20	106	102	106	108	109	106.2	±2.68
A2B1	40 : 30 : 20 : 10	142	146	150	145	148	146.2	±3.03
A2B2	40 : 30 : 15 : 15	144	146	138	140	144	142.4	±3.29
A2B3	40 : 30 : 10 : 20	188	194	192	190	190	190.8	±2.28
A3B1	46 : 24 : 20 : 10	166	168	160	158	166	163.6	±4.33
A3B2	46 : 24 : 15 : 15	190	186	187	192	196	190.2	±4.02
A3B3	46 : 24 : 10 : 20	212	211	220	215	217	215	±3.67

** อัตราส่วน : ของเสียซิลิกา (กรัม) : ของเสียอะลูมินา (กรัม) : NaOH (มล.) : Na₂SiO₃ (มล.)

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์โดยมีของเสียซิลิกาและของเสียอะลูมินาเป็นวัตถุดิบ

วันที่ผสม : 10 มีนาคม 2558

วันที่ทำการทดสอบ : 7 เมษายน 2558

ตาราง จ.4 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	อัตราส่วน**	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ก้อน ที่ 1	ก้อน ที่ 2	ก้อน ที่ 3	ก้อน ที่ 4	ก้อน ที่ 5	เฉลี่ย	
A1B1	27 : 43 : 20 : 10	94	92	91	93	93	93.2	±1.14
A1B2	27 : 43 : 15 : 15	105	99	103	100	102	101.8	±2.38
A1B3	27 : 43 : 10 : 20	118	120	116	125	109	117.6	±5.86
A2B1	40 : 30 : 20 : 10	169	174	165	169	178	171	±5.05
A2B2	40 : 30 : 15 : 15	193	194	186	190	194	191.4	±3.44
A2B3	40 : 30 : 10 : 20	232	238	228	226	236	232	±5.10
A3B1	46 : 24 : 20 : 10	196	189	194	190	198	193.4	±3.85
A3B2	46 : 24 : 15 : 15	235	226	228	230	233	230.4	±3.64
A3B3	46 : 24 : 10 : 20	265	254	263	267	265	262.8	±5.12

** อัตราส่วน : ของเสียซิลิกา (กรัม): ของเสียอะลูมินา (กรัม) : NaOH (มล.) : Na₂SiO₃ (มล.)

ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ของเสียอะลูมินาที่นำมาทำให้เป็นก้อนแข็ง

วันที่ผสม : 20 มีนาคม 2558

วันที่ทำการทดสอบ : 27 มีนาคม 2558

ตาราง จ.5 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	เฉลี่ย	
Al20	15.08	15.24	14.88	14.88	15.32	15.08	±0.20
Al30	12.44	12.68	12.36	12.4	12.64	12.50	±0.15
Al40	7.28	7.20	7.04	7.32	7.08	7.18	±0.12
Al50	5.88	6.08	5.72	6.00	6.12	5.96	±0.16
Al60	2.68	2.60	2.36	2.72	2.56	2.58	±0.14



ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ของเสียอะลูมินาที่นำมาทำให้เป็นก้อนแข็ง

วันที่ผสม : 13 มีนาคม 2556

วันที่ทำการทดสอบ : 27 มีนาคม 2556

ตาราง จ.6 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	เฉลี่ย	
AI20	58.48	57.08	58	58.56	57.4	57.90	±0.65
AI30	39.92	40.44	39.72	40.56	40.24	40.18	±0.35
AI40	27.12	27.48	26.72	26.28	27.24	26.97	±0.47
AI50	19.56	19.16	19.52	19.12	18.68	19.21	±0.36
AI60	10.6	10.28	10.68	10.64	10.32	10.50	±0.19



ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ของเสียอะลูมินาที่นำมาทำให้เป็นก้อนแข็ง

วันที่ผสม : 6 มีนาคม 2556

วันที่ทำการทดสอบ : 3 เมษายน 2556

ตาราง จ.7 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)						ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ก้อนที่ 4	ก้อนที่ 5	เฉลี่ย	
Al20	68.80	68.60	68.52	71.20	68.44	69.11	±1.17
Al30	48.44	49.60	48.64	48.96	48.72	48.87	±0.45
Al40	40.28	40.60	40.12	40.48	40.12	40.32	±0.22
Al50	34.16	34.36	34.12	33.96	34.00	34.12	±0.16
Al60	27.56	26.36	27.04	27.00	27.36	27.06	±0.46





ภาคผนวก ฉ.

การประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ราคาต้นทุนของวัตถุดิบ

ตาราง ฉ.1 ราคาของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลีเมอร์

วัตถุดิบ	ปริมาณ	ราคา (บาท)
ของเสียซิลิกา	-	-
ของเสียอะลูมินา	-	-
โซเดียมไฮดรอกไซด์	1 ลิตร	16.03
โซเดียมซิลิเกต	1 ลิตร	50
ทราย	1 กิโลกรัม	7.78



การคำนวณค่าใช้ไฟฟ้า

ค่าใช้ไฟฟ้า เท่ากับ 2.6506 บาท/หน่วย (ตลอดทุกช่วงเวลา) (ค่าใช้ไฟฟ้าอ้างอิงจากการไฟฟ้านครหลวง, 2558) โดยในที่นี้จะไม่รวมค่าบริการคือเท่ากับ 312.24 บาท/เดือน ระบุเป็นประเภทที่ 4 คือ มีลักษณะการใช้สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ อุตสาหกรรม หน่วยราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ สถานที่ทำการเกี่ยวกับกิจการของต่างชาติ และสถานที่ทำการขององค์กรระหว่างประเทศ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุด ตั้งแต่ 1,000 กิโลวัตต์ขึ้นไป หรือมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือน เกินกว่า 250,000 หน่วยต่อเดือน โดยต่อผ่านเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าเครื่องเดียว

วิธีการคำนวณค่าใช้ไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \text{ค่าใช้ไฟฟ้า} &= \text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} \times \text{ค่าใช้ไฟฟ้าต่อหน่วย} \\ \text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} &= \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} \times \text{จำนวนเวลา} \end{aligned}$$

ตาราง ๑.2 ค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
เตาอบ	3000
เครื่องเขย่าคัตขนาด	300
เครื่องบด	1500

ราคาต้นทุนวัตถุดิบ (ของเสียซิลิกา)

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานไฟฟ้าเครื่องบด (หน่วย)} &= \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} \times \text{จำนวนชั่วโมง} \\
 &= 1.5 \text{ กิโลวัตต์} \times 2 \text{ ชั่วโมง} \\
 &= 3 \text{ หน่วย} \\
 \text{ราคาค่าพลังงานที่ใช้ในการบด} &= \text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} \times \text{ราคาค่าไฟฟ้า} \\
 &= 3 \text{ หน่วย} \times 2.6506 \text{ บาท/หน่วย} \\
 &= 7.9518 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ของเสียซิลิกา 800 กรัม มีค่าใช้จ่ายในการบด เท่ากับ 7.9518 บาท

จีโอโพลีเมอร์ 1 ก้อน (A3B3) ใช้ของเสียซิลิกา 23 กรัม

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ราคาต้นทุนของเสียซิลิกา} &= (7.9518/800) \times 23 \\
 &= 0.2286 \text{ บาท/ก้อน}
 \end{aligned}$$

ราคาต้นทุนวัตถุดิบ (ของเสียอะลูมินา)

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานไฟฟ้าเครื่องบด (หน่วย)} &= \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} \times \text{จำนวนชั่วโมง} \\
 &= 1.5 \text{ กิโลวัตต์} \times 2 \text{ ชั่วโมง} \\
 &= 3 \text{ หน่วย} \\
 \text{ราคาค่าพลังงานที่ใช้ในการบด} &= \text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} \times \text{ราคาค่าไฟฟ้า} \\
 &= 3 \text{ หน่วย} \times 2.6506 \text{ บาท/หน่วย} \\
 &= 7.9518 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ของเสียอะลูมินา 800 กรัม มีค่าใช้จ่ายในการบด เท่ากับ 7.9518 บาท

จีโอโพลีเมอร์ 1 ก้อน (A3B3) ใช้ของเสียอะลูมินา 12 กรัม

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ราคาต้นทุนของเสียอะลูมินา} &= (7.9518/800) \times 12 \\
 &= 0.1193 \text{ บาท/ก้อน}
 \end{aligned}$$

ราคาต้นทุนวัตถุดิบ (ทราย)

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาต้นทุนวัตถุดิบ (ทราย)} &= \text{ราคาต้นทุน} + \text{ราคาค่าพลังงาน} \\
 \text{พลังงานไฟฟ้าเดาอบ (หน่วย)} &= \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} \times \text{จำนวนชั่วโมง} \\
 &= 3 \text{ กิโลวัตต์} \times 12 \text{ ชั่วโมง} \\
 &= 36 \text{ หน่วย} \\
 \text{ราคาค่าพลังงานที่ใช้ในการอบ} &= \text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} \times \text{ราคาค่าไฟฟ้า} \\
 &= 36 \text{ หน่วย} \times 2.6506 \text{ บาท/หน่วย} \\
 &= 95.4216 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ทราย 30,000 กรัม มีค่าใช้จ่ายในการอบ เท่ากับ 95.4216 บาท

จีโอโพลีเมอร์ 1 ก้อน (A3B3) ใช้ของทราย 137.5 กรัม

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ราคาต้นทุนพลังงานของทราย} &= (95.4216/30,000) \times 137.5 \\
 &= 0.4373 \text{ บาท/ก้อน}
 \end{aligned}$$

ราคาทราย เท่ากับ 7.78 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม

จีโอโพลีเมอร์ 1 ก้อน (A3B3) ใช้ของทราย 137.5 กรัม

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ราคาต้นทุนทราย} &= (7.78/1000) \times 137.5 \\
 &= 1.0697 \text{ บาท/ก้อน}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น ราคาต้นทุนทรายในการผลิตทั้งหมด} &= 0.4373 + 1.0697 \\
 &= 1.5070 \text{ บาท/ก้อน}
 \end{aligned}$$

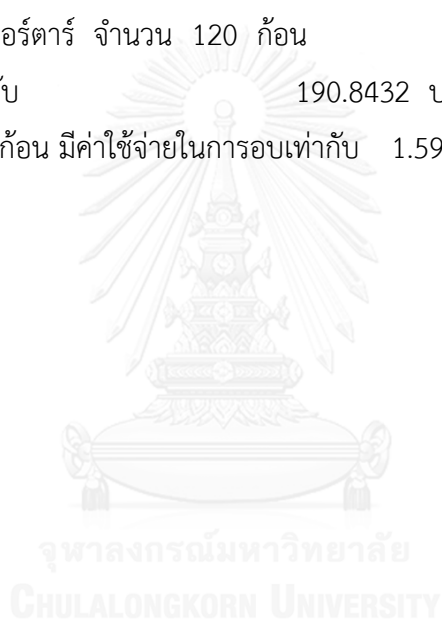
ราคาต้นทุนพลังงานในการอบ

พลังงานไฟฟ้าเตาอบ (หน่วย)	=	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) x จำนวนชั่วโมง
	=	3 กิโลวัตต์ x 24 ชั่วโมง
	=	72 หน่วย
ราคาค่าพลังงานที่ใช้ในการอบ	=	พลังงานไฟฟ้า (หน่วย) x ราคาค่าไฟฟ้า
	=	72 หน่วย x 2.6506 บาท/หน่วย
	=	190.8432 บาท

ในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ จำนวน 120 ก้อน

มีค่าใช้จ่ายในการอบเท่ากับ 190.8432 บาท

ดังนั้น จีโอโพลีเมอร์ 1 ก้อน มีค่าใช้จ่ายในการอบเท่ากับ 1.5903 บาท



ราคาต้นทุนในการผลิตจีโอโพลีเมอร์

ราคาต้นทุนในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ (ต่อ 1 ก้อน) คือผลรวมของราคาของสิ่งเหล่านี้

ของเสียซิลิกา	0.2286	บาท
ของเสียอะลูมินา	0.1193	บาท
โซเดียมไฮดรอกไซด์	0.0801	บาท
โซเดียมซิลิเกต	0.5000	บาท
ทราย	1.5070	บาท
ค่าพลังงานในการอบ	1.5903	บาท
รวม	4.0253	บาท



ภาคผนวก ข.

การประเมินค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียอะลูมินาโดยการนำมาทำเป็นก้อนแข็ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ราคาต้นทุนในการจัดการของเสียอะลูมิเนียมโดยนำมาทำเป็นก้อนแข็ง

ราคาต้นทุนในการจัดการของเสียอะลูมิเนียมโดยนำมาทำเป็นก้อนแข็ง (ต่อ 1 ก้อน) คือ ผลรวมของราคาของสิ่งเหล่านี้

ตาราง ข.1 ราคาต้นทุนในการจัดการของเสียอะลูมิเนียมโดยนำมาทำเป็นก้อนแข็ง

วัตถุดิบ	ราคา (บาท)				
	Al20	Al30	Al40	Al50	Al60
ของเสียอะลูมิเนียม	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
ปูนซีเมนต์	0.34	0.30	0.25	0.21	0.17
ทราย	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
รวม	2.04	2.10	2.16	2.22	2.27

ตาราง ข.2 ราคาในการจัดการของเสียอะลูมิเนียมต่อ 1 กิโลกรัมของเสีย

วัตถุดิบ	ราคา (บาท)				
	Al20	Al30	Al40	Al50	Al60
ราคาต่อของเสียอะลูมิเนียม 1 กิโลกรัม	102.21	70.04	53.96	44.31	37.88

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย เพลงประพันธ์ กิ่งทอง สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยได้ทำการเผยแพร่ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9 (The 9th KU-KPS Conference) ในหัวข้อบทความเรื่อง การจัดการของเสียอะลูมินาโดยวิธีการปรับเสถียรโดยการทำเป็นก้อนแข็ง (Alumina Waste Management by Stabilization/Solidification) ที่จัดขึ้นในระหว่างวันที่ 6 – 7 ธันวาคม พ.ศ.2555 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน