

ผลของระยะเวลาต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากของเสียซีลิกา

เพชรพร เชาวกิจเจริญ* และ ชาลิสตา วิสมหมาย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะเวลามอดก่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากของเสียซีลิกา ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของของเสียซีลิกาที่ใช้ในงานวิจัยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ อัตราส่วนของของเสียซีลิกาต่ออะลูมินาบริสุทธิ์ และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 1, 3, 7 และ 14 วัน ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของ ของเสียซีลิกา พบว่ามีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 71.3 ผลการทดสอบการชะละลายด้วยวิธีการสกัดสารพบว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งแสดงว่า ของเสียซีลิกาไม่จัดเป็นของเสียอันตรายและผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของเสียซีลิกาต่ออะลูมินาบริสุทธิ์ คือ 2:1 สัดส่วนของวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสม คือ อัตราส่วน 70:10:20 (B2) โดยน้ำหนัก สามารถรับกำลังรับแรงอัด 199 กก./ซม.² ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบ คือ 180 กก./ซม.² ในวันแรกของการทดสอบและอัตราส่วน 60:20:20 (A1) โดยน้ำหนัก ผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ในวันที่ 3 ของการทดสอบ โดยสามารถรับกำลังรับแรงอัด 194 กก./ซม.²

คำสำคัญ : ของเสียซีลิกา, อะลูมินาบริสุทธิ์, จีโอพอลิเมอร์, กำลังรับแรงอัด, รีไซเคิล, วัสดุพอซโซลาน

Effect of Curing Time On Strength Of Geopolymer Mortar Incorporating Silica Waste

Petchporn Chawakitchareon* and Chalisa Veesommai

Abstract

The objective of this research is to study the effect of curing time on compressive strength of silica waste based geopolymer mortar. The basic physical and chemical properties of silica waste, silica waste to pure alumina ratio, binder to sodium hydroxide to sodium silicate solution ratio on compressive strength of geopolymer mortar were studied. The mortar was cast in 5*5*5 centimeters cubic shape with cured temperature at 60 °C for 24 hours. Compressive strength of geopolymer mortar was tested at 1, 3, 7 and 14 days. The results revealed that the chemical characteristics of silica waste contain an average of 71.3 percent of silicon dioxide. The leaching tests of heavy metals also indicated that the concentration of all heavy metals were within the standard set by the Ministry of Industry, Thailand. The silica waste was considering as non hazardous waste. The silica waste to pure alumina ratio of 2:1 and binder to sodium hydroxide to sodium silicate solution ratio of 70:10:20 (B2) by weight gave the compressive strength at 199 ksc which pass the compressive strength standard at 180 ksc on the first days. While the ratio of 60:20:20 (A1) by weight gave the compressive strength at 194 ksc which pass the compressive strength standard at 180 ksc on the third days.

Keywords : Silica waste, Pure alumina, Geopolymer, Compressive strength, Recycle, Pozzolan material

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

* Corresponding author, E-mail: petchporn.c@chula.ac.th Received 28 February 2012 : Accepted 12 June 2012

1. บทนำ

จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นโดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) [1] แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [2] และพบว่าผลที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นวัสดุที่แข็งมีลักษณะสมบัติคล้ายวัสดุที่ได้จากปูนซีเมนต์ [3] สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้เพื่อใช้ในการก่อสร้าง

งานวิจัยของ J. Tailby และ K.J.D. MacKenzie [4] ศึกษาการใช้องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และดิน halloysite ในการสังเคราะห์โครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของจีโอพอลิเมอร์ควบคู่ไปกับการเกิดโครงสร้างไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ในปฏิกิริยาไฮเดรชันที่พบในปูนซีเมนต์เปรียบเทียบกับปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตของจีโอพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นควบคู่ไปกับปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความแข็งแรงมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากโครงสร้างในปฏิกิริยาไฮเดรชันเพียงอย่างเดียว

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุตั้งต้นของจีโอพอลิเมอร์พบว่างานวิจัยของ Nazari *et al.* [1] มีการใช้เถ้านหินจากการผลิตกระแสไฟฟ้า งานวิจัยของ Klabprasit *et al.* [3] มีการใช้เถ้านหินและเถ้าชีวมวล งานวิจัยของ Songpiriyakij *et al.* [5], Luna Galiano *et al.* [6], Sinsiri *et al.* [7], Temuujin *et al.* [8] และ Jumrat *et al.* [9] มีการใช้เถ้านหิน งานวิจัยของ Chindaprasit *et al.* [10] มีการใช้เถ้านหินจากการผลิตกระแสไฟฟ้า และเถ้านหินที่ผ่านการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed Combustion, FBC) และงานวิจัยของ Andini *et al.* [11] มีการใช้เถ้าลอยเป็นสารตั้งต้นจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้เถ้านหินและ เถ้าลอย

จากกระบวนการต่างๆ แต่เถ้านหินและเถ้าลอยมีส่วนประกอบของ CaO ในปริมาณสูง จึงเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันเป็น CSH ซึ่งเป็นโครงสร้างที่อ่อนแอกว่าจีโอพอลิเมอร์ ทำให้ความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดน้อยลง แต่ของเสียดังกล่าวเป็นสารตั้งต้นมีส่วนประกอบของ CaO ในปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 0.1 จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เพื่อที่จะเป็นการพัฒนาจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ให้สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้มากขึ้น

ปัจจุบันสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วมีปริมาณกว่า 1,000 ตันต่อปี ซึ่งในกระบวนการรีไซเคิลสารประกอบซิลิโคนที่ใช้แล้วเพื่อนำมันซิลิโคนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ จะเกิดของเสียดังกล่าวประมาณร้อยละ 30-40 จึงได้มีงานวิจัยนำของเสียดังกล่าวมาใช้ทดแทนซิลิกาฟุ้งในคอนกรีตผสมเสร็จ [12] จากปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกากของเสียอุตสาหกรรม ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายและพื้นที่จำนวนมากในการกำจัดและจัดการของเสียดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการนำของเสียดังกล่าวมาใช้ประโยชน์โดยใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์และศึกษาผลของระยะเวลาต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของของเสียดังกล่าว สภาวะที่เหมาะสมในการนำของเสียดังกล่าวและอะลูมินาบริสุทธิ์มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

2. วัสดุและอุปกรณ์

2.1 วัสดุ

2.1.1 ทรายแม่น้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C 778-06 [13]

2.1.2 ของเสียดังกล่าวจากโรงงานรีไซเคิลกากของเสียแห่งหนึ่ง

2.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH assay 99%) จากบริษัท AGC Chemical Thailand Co., Ltd. ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์

2.1.4 โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , assay 99%) min จากบริษัท CARLO ERBA

2.1.5 อะลูมินาบริสุทธิ์ (Al_2O_3) (Aluminum Oxide 98.0%) จากบริษัท CARLO ERBA

2.1.6 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายขาว

2.2 อุปกรณ์

- 2.2.1 เครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill)
- 2.2.2 เครื่องร่อนคัดขนาดและตะแกรงเบอร์ 20, 30 50, 100, 150, 200 และ 325
- 2.2.3 แบบหล่อมอร์ต้าร์ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2.2.4 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (น้ำหนักกดสูงสุด 150 ตัน)
- 2.2.5 เครื่องผสม (Mixer) มอร์ต้าร์จีโอพอลิเมอร์
- 2.2.6 แท่งกระทุ้ง (Tampor): ขนาดหน้าตัด 5 x 5 ตารางเซนติเมตร ยาว 5-6 นิ้วปลายตัดเรียบและหน้าตัดตั้งฉากกับแกนมือจับทำจากวัสดุไม่ดูดซึมน้ำ
- 2.2.7 เกรียง: ทำด้วยเหล็กแบนขอบสันเกรียงเป็นเส้นตรง ยาว 100-150 มิลลิเมตร
- 2.2.8 เครื่องอินดักทีฟลิคัมเบิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma, ICP) รุ่น ULTIMA 2
- 2.2.9 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) รุ่น Philips model PW2400 ด้วยวิธี Wavelength dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry
- 2.2.10 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) รุ่น Diffraktometer D8
- 2.2.11 เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดคละ (Particle size distribution) รุ่น Mastersizer 2000 Ver. 5.22

3. วิธีการทดลอง

3.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของของเสี่ยซิลิกา

- 3.1.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสี่ย ด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ และเปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้นด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน
- 3.1.2 วิเคราะห์การกระจายขนาดคละของของเสี่ยซิลิกา ด้วยวิธี Sieve Analysis ตามมาตรฐาน ASTM C136-06 [14]

คัดแยกขนาด โดยใช้เครื่องแยกคัดขนาด (Sieve analysis) ที่มีขนาดต่างๆ และหาค่าการกระจายขนาดของของเสี่ยซิลิกา

3.1.3 การเตรียมวัสดุผสม ล้างทรายด้วยน้ำสะอาด แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103–105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อใช้ผสมระหว่างวัสดุประสานต่อทราย ด้วยอัตราส่วนมวลโดยมวล เท่ากับ 1 ต่อ 2.75

3.1.4 ทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วพ.ศ. 2548 [15] แล้วนำน้ำชะละลายมาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก โดยใช้เครื่องอินดักทีฟลิคัมเบิลพลาสมา (ICP)

3.1.5 ทำการออกแบบส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ โดยการให้วัสดุประสานเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของเสี่ยซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์เท่ากับ 45:15, 40:20, 30:30, 47:23, 53:17 และ 35:35 และปรับเปลี่ยนปริมาณของเสี่ยซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 60:20:20 (A1), 60:20:10 (A2), 70:10:20 (B1) และ 70:20:10 (B2) ที่ระยะเวลาการทดสอบกำลังรับแรงอัด 1, 3, 7 และ 14 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C [16]

3.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ในการผลิตโดยใช้ของเสี่ยซิลิกา อะลูมินาบริสุทธิ์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและทราย

โดยหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ทำการทดลองส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง) แทนค่าของเสี่ยซิลิกาและอะลูมินาบริสุทธิ์เป็นวัสดุประสาน (ในอัตราส่วนเสี่ยซิลิกาต่ออะลูมินาบริสุทธิ์ เท่ากับ 2:1) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต ที่ 60:20:20 (A1), 60:20:10 (A2), 70:10:20 (B1) และ 70:20:10 (B2) บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 1, 3, 7 และ 14 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C 109M-07 [15]

3.3 การทดลองที่ 4 นำมอร์ต้าร์จีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยสัดส่วนที่เหมาะสมมาทำการทดสอบการชะละลาย

ตามวิธี WET ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 [16] แล้ววิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก โดยใช้เครื่องอินดักทีฟลิคัมเบิลพลาสมา (ICP)

4. ผลการทดลอง

4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของของเสีซิลิกา พบว่ามีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็ก สีเทาดำ มีค่าความละเอียด เท่ากับ 139,932 ซม²/ก. ความหนาแน่น เท่ากับ 230.30 กก./ม³ ความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.16 และค่าพีเอช เท่ากับ 6.85 ดังแสดงในตารางที่ 1

ผลการศึกษาร้อยละประกอบทางเคมีของของเสีซิลิกาพบว่ามีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ถึงร้อยละ 71.3 แสดงดังตารางที่ 2 นอกจากนี้พบว่าของเสีซิลิกามีลักษณะสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสีซิลิกาเปรียบเทียบกับวัสดุตั้งต้นต่างๆ ในงานวิจัยด้านจีโอพอลิเมอร์ พบว่าของเสีซิลิกามีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) มากกว่า เถ้าถ่านหินและกากตะกอน แต่น้อยกว่าซิลิกาฟุ้ง นอกจากนี้ยังพบว่า ของเสีซิลิกามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) น้อยกว่าร้อยละ 0.1 โดยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะเหนี่ยวนำให้เกิดพันธะระหว่างคาร์บอน ซิลิกอนและไฮโดรเจน (C-S-H) ดังที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะทำให้ปริมาณ ซิลิกอน (Si) ลดลงจึงมีผลต่อการเกิดพันธะโพลิเมอร์ในกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ ทำให้ความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดน้อยลง[4] และพบว่าของเสีซิลิกามีลักษณะเป็นของแข็ง อัมมอร์ฟัส (Amorphous) คือ ไม่เป็นผลึก จากการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นของของเสีซิลิกาด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ดังแสดงในภาพที่ 1

นอกจากนี้ยังพบว่าของเสีซิลิกามีค่า Loss on ignition (LOI) สูง ซึ่งเป็นค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังจากการเผา เนื่องจากความชื้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการอบแห้งวัสดุตั้งต้นหลังจากการบดและการคัดขนาดผ่านตะแกรงร่อนแบบเปียก ดังนั้นค่า LOI จึงไม่มีผลต่อการทำการทดลอง

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของของเสีซิลิกาเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

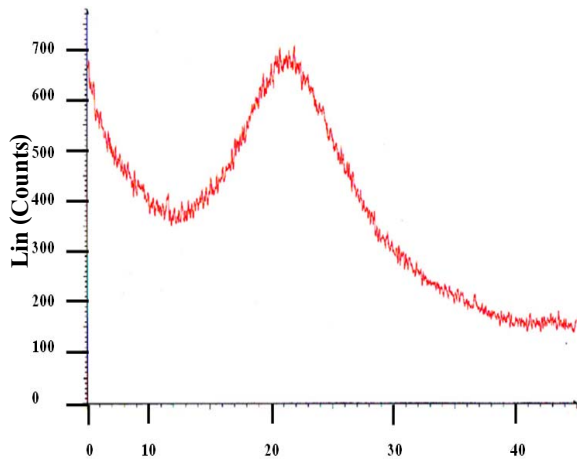
Characteristics of physical	Silica waste ($\bar{X} \pm SD$)	Cement Type I [12]
Resolution (square centimeters /gram).	139,932 \pm 54	3,400
Density (kilograms/cubicmeter).	230.30 \pm 0.76	1,400
Specific gravity	2.16 \pm 0.03	3.15
Color	Black and gray	gray
pH	6.85 \pm 0.03	-

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของของเสีซิลิกาเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) กากตะกอน (Slag) และเถ้าถ่านหิน (Fly Ash)

Percentage by weight (%)	Type			
	Silica waste	Silica Fume [12]	Slag [17]	Fly Ash [18]
SiO ₂	71.30	84.00	34.20	48.80
Al ₂ O ₃	<0.01	<0.1	14.20	27.00
Fe ₂ O ₃	0.08	<0.1	0.43	10.20
CaO	0.02	<0.1	41.70	6.20
MgO	<0.01	<0.1	6.70	1.40
SO ₃	<0.01	<0.1	1.47	0.22
Other oxide	<0.01	<0.1	0.28	4.48
LOI	28.60	-	1.02	1.70

ผลการทดสอบการชะละลาย โลหะหนักของของเสีซิลิกาด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) [16] พบว่ามีปริมาณโลหะ

หนักต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 5.3 แสดงว่าของเสีย



2 – Theta - Scale

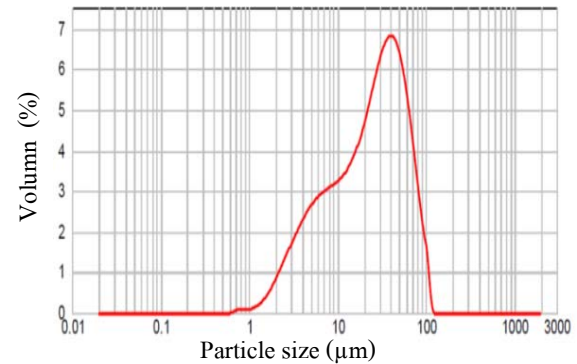
รูปที่ 1 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของของเสียซิลิกา

ตารางที่ 3 ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายของเสียซิลิกาเทียบกับค่ามาตรฐาน

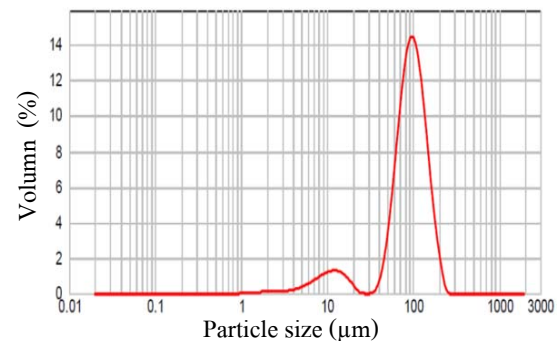
Type	Type of Metal (mg/l)			
	Zn	Cr	Pb	Cu
Silica waste	<0.1	1.702	<0.1	<0.1
Standard [16]	250	5	5	25

จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคหลังจากที่บดด้วยเครื่องบดขนาดเล็ก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 สามารถหาค่าการกระจายขนาดของของเสียซิลิกาเท่ากับ 24.46 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2 และค่าการกระจายขนาดของอนุภาคอะลูมินาบริสุทธิ์เท่ากับ 90.71 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3 และตารางที่ 4 การใช้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน จะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและผลผลิตที่เกิดขึ้นจะไปเติมเต็มส่วนที่ว่างระหว่างมอร์ตาร์ให้หนาแน่นเพิ่มขึ้น[19] เพื่อให้ของเสียซิลิกามีลักษณะสมบัติทางกายภาพคล้ายวัสดุปอซโซลานจึงได้ทำการคัดขนาดผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 325 เมช (45 ไมโครเมตร) เนื่องจากขนาดดังกล่าวจะส่งเสริมให้ของเสียซิลิกาเป็นวัสดุปอซโซลานมากขึ้นตามมาตรฐาน ASTM C618-08 [20]

ซิลิกาไม่จัดเป็นของเสียอันตราย จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้



รูปที่ 2 การกระจายขนาดของอนุภาคของเสียซิลิกา



รูปที่ 3 การกระจายขนาดของอนุภาคของอะลูมินาบริสุทธิ์

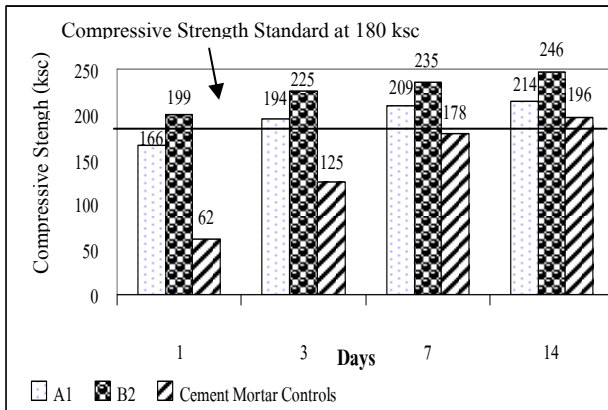
ตารางที่ 4 การกระจายขนาดผลของของเสียซิลิกาเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ ประเภท 1

ขนาดผล (ไมโครเมตร)	D(0.1)	D(0.5)	D(0.9)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1[12]	>10	10	<10
ของเสียซิลิกา	4.274	24.461	64.875
อะลูมินาบริสุทธิ์	34.751	90.712	149.368

4.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

พบว่าอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมคือ 60:20:20 (A1) และ 70:10:20 (B2) (ในอัตราส่วนเสียซิลิกาต่ออะลูมินาบริสุทธิ์เท่ากับ 2:1) โดยอัตราส่วน 60:20:10 (A2) และ 70:20:10 (B1) ไม่สามารถขึ้นรูปได้หลังการถอดแบบ เนื่องจากสัดส่วนของสารละลายไม่เหมาะสมจึงไม่สามารถขึ้นรูปได้ เป็นผลให้ไม่สามารถนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดได้ จากการทดสอบ

กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 1,3,7 และ 14 วันอัตราส่วน 60:20:20 (A1) และ 70:10:20 (B2) เปรียบเทียบกับชุดควบคุม ผลการศึกษาพบว่า วันที่ 1 ของอัตราส่วน 70:10:20 (B2) สามารถรับกำลังรับแรงอัด 199 กก./ชม.² ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบ คือ 180 กก./ชม.² สำหรับอัตราส่วน 60:20:20 (A1) ผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ในวันที่ 3 โดยสามารถรับกำลังรับแรงอัด 194 กก./ชม.² ในขณะที่ซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ในวันที่ 14 โดยสามารถรับกำลังรับแรงอัด 196 กก./ชม.² โดยซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุมมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างช้าๆ โดยปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างรวดเร็วในช่วงวันแรก ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ นอกจากนี้ของเสียดังกล่าวที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งมีผลให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและผลผลิตที่เกิดขึ้นจะไปเติมเต็มส่วนที่ว่างระหว่างมอร์ตาร์ให้หนาแน่นเพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้มากกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 4



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลา 1, 3, 7 และ 14 วันเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Klabprasit *et al.*[3] ที่ใช้อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 2.09 ซึ่งใกล้เคียงกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่า ช่วงวันที่ 3-7 ของการทดสอบมอร์ตาร์ของงานวิจัย Klabprasit *et al.* [3] มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้น้อยกว่ามอร์ตาร์จากของเสียดังกล่าว เนื่องจากเถ้าน

หินที่ใช้ในงานวิจัยของดังกล่าว มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มาก จึงมีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์และความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัด เมื่อถึงวันที่ 14 ของการทดสอบ พบว่ามอร์ตาร์จากงานวิจัยของ Klabprasit *et al.* [3] สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้มากกว่ามอร์ตาร์จากของเสียดังกล่าว เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าว มีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 14 และ 18 โมลาร์ ซึ่งความเข้มข้นดังกล่าวจะไม่ส่งผลต่อกำลังอัดในช่วง 7 วันแรก แต่กลับมีผลต่อกำลังอัดหลัง 7 วัน

5. บทสรุป

จากผลการศึกษา งานวิจัย สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้ จากผลการศึกษาของเสียดังกล่าวที่ใช้ในงานวิจัยมีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 71.3 และมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานมีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเล็ก สีเทา ค่าพีเอชเท่ากับ 6.85 มีขนาดเท่ากับ 24.46 ไมโครเมตร อีกทั้งไม่จัดอยู่เป็นของเสียอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2548 จากผลการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ คือ สัดส่วน 60:20:20 (A1) และ 70:10:20 (B2) ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ที่ 180 กก./ชม.² ในวันที่ 3 และวันที่ 1 ของการทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามลำดับ และให้กำลังรับแรงอัดสูงถึง 214 กก./ชม.² และ 246 กก./ชม.² ตามลำดับ ของเสียดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ โดยสัดส่วนของวัสดุประสานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เหมาะสมและให้กำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด คือ 70:10:20 ซึ่งสามารถใช้งานได้ตั้งแต่วันแรกของการถอดแบบ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และทุนสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณบริษัท ทีพีโอ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Nazari, A. Bagheri and S. Riahi, “Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash”, *Materials Science and Engineering*, A 528, 2011, pp. 7395–7401.
- [2] Thai Concrete Association, “Geopolymer Material”, <http://www.thaitca.or.th>, 23 December 2011. (in Thai)
- [3] T. Klabprasit, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasirt and S. Songpiriyakij, “Fly Ash and Bio-mass Ash based Geopolymer Pastes Part I: Effect of Mix Proportion on Compressive Strength”, *Research and Development Journal*, 19, 2008, pp. 9-15.
- [4] J. Tailby and K.J.D. MacKenzie, “Structure and mechanical properties of aluminosilicate geopolymer composites with Portland cement and its constituent minerals”, *Cement and Concrete Research*, 40, 2010, pp.787-794.
- [5] S. Songpiriyakij, T. Kubprasit, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt, “Compressive strength and degree of reaction of biomass- and fly ash-based Geopolymer”, *Construction and Building Materials*, 24, 2010, pp. 236–240.
- [6] Y.L. Galiano, C.F. Pereira and J. Vale, “Stabilization/solidification of a municipal solid waste incineration residue using fly ash-based geopolymers”, *Journal of Hazardous Materials*, 185, 2011, pp. 373–381.
- [7] T. Sinsiri, P. Teeromit, C. Jaturapitakkul and K. Kiattikomol, “Effect of Finenesses of Fly Ash on Expansion of Mortars in Magnesium Sulfate”, *ScienceAsia*, 32, 2006, pp. 63-69.
- [8] J. Temuujin, A. van Riessen and K.J.D. MacKenzie, “Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars”, *Construction and Building Materials*, 24, 2010, pp. 1906–1910..
- [9] S. Jumrat, B. Chatveera and P.Rattanadecho, “Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 2011, pp. 242–248.
- [10] P. Chindaprasirt, U. Rattanasak and C. Jaturapitakkul, “Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustions in geopolymeric materials”, *Cement & Concrete Composites*, 33, 2011, pp. 55–60.
- [11] S. Andini, R. Cioffi, F. Colangelo, T. Grieco, F. Montagnaro and L. Santoro, “Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products”, *Waste Management*, 28, 2008, pp. 416–423.
- [12] N. Sresthaolarn and P. Chawakitchareon, “Utilization of Silica Waste to Replace Silica Fume for Ready Mixed Concrete Production”, *Proceedings of 16th National Convention on Civil Engineering*, Pattaya, Thailand, 2010.
- [13] American Society for Testing and materials, “Standard Specification for Standard Sand C 778-06”, *Annual book of ASTM standard*, 04.01, 2008, pp.379-381.
- [14] American Society for Testing and materials, “Standard Test method of sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates C 136-06”, *Annual book of ASTM standard*, 04.01, 2008, pp. 94-98
- [15] Ministry of Industry, Thailand, “The guidance for disposal of waste or used materials”, *Waste Extraction Test*, 2005.
- [16] American Society for Testing and materials, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm.] Cube Specimens)¹C 109/C 109M-07”, *Annual book of ASTM standard*, 04.01, 2008, pp. 78-86.

- [17] Z. Yunsheng , S. Wei, C. Qianli and C. Lin, “Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer”, *Journal of Hazardous Materials*, 143, 2007, pp. 206–213.
- [18] D.L.Y. Kong and J.G. Sanjayan, “Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures”, *Cement & Concrete Composites*, 30, 2008, pp. 986–991.
- [19] B. Wan, H.C. Kim, H.G. Tae, and B.J. Park. Characteristics of cement mortar with nano-sio₂ particles. *Construction and Building Materials*. 21, 2007, pp. 1351-1355.
- [20] American Society for Testing and materials, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete C 618-08”, *Annual book of ASTM standard*, 04.01, 2008, pp. 330-332.