จีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผา

Metakaolin Based Geopolymer

อาบีเด็ง ฮาวา ปร.ด. (Abideng Hawa, Ph.D.)[1]
วรพจน์ ประชาเสรี ปร.ด. (Woraphot Prachasaree, Ph.D.)[2]

บทคัดย่อ

ความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในประเทศอินเดีย จีน และประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย เป็นสาเหตุของการเกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การพัฒนาวัสดุประสานชนิดใหม่เพื่อเป็นทางเลือกเพิ่มเติมนอกเหนือจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้รับการยอมรับจากนักวิจัยจำนวนมาก จีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาเป็นวัสดุที่น่าสนใจนำมาใช้ในงานวิศวกรรมโยธาและประยุกต์เข้ากับงานด้านโครงสร้างพื้นฐาน บทความนี้ได้นำเสนอผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาจากผลการทดสอบพบว่าการเผาดินขาวที่อุณหภูมิ 700–900 องศาเซลเซียสกับอัตราส่วนโดยโมลาร์ SiO_2/Al_2O_3 ที่อยู่ในช่วง 3–5 และอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งที่ 0.8 สามารถทำให้จีโอพอลิเมอร์ก่อตัวได้อย่างความเหมาะสม

คำสำคัญ : โซเดียมซิลิเกต โซเดียมไฮดรอกไซด์ จีโอพอลิเมอร์ ดินขาวเผา

Abstract

The consumer demand of Ordinary Portland Cement (OPC) in India, China, and developing countries has caused environment pollution due to the emission of CO_2. The new binder formed by sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) has been gaining acceptance as an alternative material for cement by numerous researchers. Metakaolin based geopolymer has been widely interested in civil engineering and infrastructural applications. This study presents the effect of various parameters to physical and mechanical properties of metakaolin based geopolymer. From experimental results, it was found that calcined purified metakaolin between 700–900 °C with the SiO_2/Al_2O_3 molar ratios of 3–5 and the solid-to-liquid ratios at 0.8 can properly form metakaolin based on geopolymer.

Keywords : Sodium silicate, Sodium hydroxide, Geopolymer, Metakaolin

[1] อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

[2] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทนำ

คอนกรีตเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่มีความสำคัญมากที่สุด ในแต่ละปีอุตสาหกรรมคอนกรีตมีการผลิตเป็นจำนวนมากและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตามความต้องการของประชากร โดยเฉพาะประเทศกำลังพัฒนาที่มีความต้องการใช้คอนกรีตจำนวนมาก ในขณะที่ปัจจุบันประเทศจีนและอินเดียมีความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณมาก เพื่อตอบรับกับการพัฒนาประเทศ โดยเฉพาะการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วในการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มากถึง 0.96 ตัน สู่ชั้นบรรยากาศ (Gartner, 2004) ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์นั้นจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศประมาณร้อยละ 5-8 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งอื่นๆ ไม่เพียงเท่านั้นอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ยังได้ปล่อยกำมะถันออกไซด์ (SO_3) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_X) อีกด้วย ซึ่งก๊าซเหล่านี้เป็นสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกและยังทำให้เกิดฝนกรด (Rashad & Zeedan, 2011) ดังนั้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของภาคอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งทำให้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับดินขาวเผาและวัสดุซีเมนต์อื่นๆ มาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือใช้เป็นวัตถุดิบของการผลิตซีเมนต์ชนิดใหม่ ดินขาวเผาสามารถทำปฏิกิริยาเคมีส่งผลต่อการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค ยิ่งไปกว่านั้นยังส่งผลไปถึงสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีต นอกเหนือจากการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแล้ว การใช้ดินขาวเผาหรือวัสดุซีเมนต์อื่นๆ สามารถนำมาซึ่งการลดการใช้ปูนซีเมนต์ได้อีกทาง

ในการศึกษาวิจัยด้านสารอัลคาไลน์ที่เพิ่มมากขึ้นในระยะหลัง โดยเฉพาะผลการศึกษาจำนวนมากของ Davidovit (2011) ที่ได้ทำการศึกษาพัฒนาวัสดุประสานจากสารอัลคาไลน์ผสมกับดินขาวเผา ในการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผานั้นยังสามารถใช้วัสดุอื่นเขาไปผสมโดยการแทนที่บางส่วนไม่ว่าจะเป็น แทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอย (Zhang, Sun, She, & Sun, 2009; Aguilar, Diaz, & Garcia, 2010; Zhang, Wang, Zhu, Reid, Provis, & Bullen, 2014) ตะกรันเหล็ก (Cheng & Chiu, 2003; Zhang, Sun, Chen, & Chen, 2007; Burciaga-Díaz, Escalante-Garcia, Arellano-Aguilar, & Gorokhovsky, 2010; & Bignozzia, Manzi, Lancellotti, Kamseu, Barbieri, & Leonelli, 2013) เถ้าปาล์มน้ำมัน (Hawa, Tonnayopas, & Prachasaree, 2013) โดยเถ้าลอยและเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีซิลิกา (SiO_2) และ/หรืออะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักในขณะที่ตะกรันเหล็กมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมอยู่ด้วยในปริมาณที่สูง และบางท่านศึกษาและพัฒนาจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้งานเฉพาะ (อาบีเด็ง ฮาวา, ดนุพล ตันนโยภาส, วรพจน์ ประชาเสรี และพิชัยธานีรณานนท์, 2556; Hawa, Tonnayopas, Prachasaree, & Taneerananon, 2013) จีโอพอลิเมอร์มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นวัสดุประสานเพื่องานก่อสร้างในยุคที่ 3 ต่อจากปูนขาวและปูนซีเมนต์ สารอัลคาไลน์ผสมดินขาวเผาเป็นหนึ่งในหนทางในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ สารอัลคาไลน์ผสมดินขาวเผามีความแข็งแรงและเป็นวัสดุซีเมนต์ที่มีความทนทาน มีความแข็งแรงเมื่อบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสองค์ประกอบของโครงสร้างและสมบัติของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาของอัลคาไลน์กับดินขาวเผา ซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงเนื่องจากพื้นที่ผิวและองค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของดินขาวเผาและชนิดของสารละลายและยังรวมไปถึงความเข้มข้นของสารละลาย อย่างไรก็ตามบทความวิชาการนี้ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาในประเด็น ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 และอัตราส่วนของของเหลวต่อของแข็ง และยังจะกล่าวถึงผลที่มีต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่อจีโอพอลิเมอร์ ไม่ว่าจะเป็นผลกระทบจากระยะเวลาและอุณหภูมิของการเผาดินขาว ระยะเวลาและอุณหภูมิของการบ่มร้อนจีโอพอลิเมอร์และการแทนที่ดินขาวเผาด้วยเถ้าลอย (Fly ash) หรือตะกรันเหล็ก (Slag)

1. จีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น

จีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่นเป็นการเกิดขึ้นจากการเร่งการแตกตัวในระหว่างการชะละลายของดินขาวเผา โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเดียวกันกับซีโอไลต์ (Zeolite) Granizo, Blanco-Varela, & Martinez-Ramirez (2007) รายงานว่าผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่นจากดินขาวเผาผสมด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้อสัณฐาน (Amorphous) ของโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตนอกจากนั้นการวิจัยของ Granizo, Alonso, Blanco-Varela, & Palomo (2002) พบว่า ผลิตภัณฑ์จากดินขาวเผาผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถให้ N-A-S-H ซึ่งจะมีผลดีต่อสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์ Granizo, Blanco-Varela, & Palomo (2000) และ Wang, Li, & Yan (2005) ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ว่ามีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาอย่างไร และยังศึกษาอีกกว่าอัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุตั้งต้น (ดินขาวเผา) ซึ่งจากการทดสอบพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นจะทำให้กำลังของจีโอพอลิเมอร์ดีขึ้น เนื่องจากดีกรีของการเกิดปฏิกิริยาดีขึ้น Madani, Aznar, Sanz, & Serratosa (1990) รายงานว่าจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาเกี่ยวข้องกับการแตกตัวตามขั้นตอนถัดจากขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ควบแน่น (Polycondensation) ซึ่งสามารถระบุหรืออธิบายโดยรูปแบบของซีโอไลด์ (Zeolite) เมื่อดินขาวเผาถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ Rahier, Simons, van Mele, & Biesemans (1997) รายงานเพิ่มเติมอีกว่า เมื่อใช้โซเดียมซิลิเกตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมเข้าด้วยกันก็จะกลายเป็นวัสดุอสัณฐานและสามารถเป็นวัสดุซีเมนต์ แต่ลักษณะทางโครงสร้างและส่วนประกอบมีความแตกต่างกับการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวในการทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์มีตัวแปรจำนวนมากที่ส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติของดินขาว อัตราส่วนผสม อุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม เป็นต้น ตัวแปรต่างๆ เหล่านี้สามารถแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวเผาและอัตราส่วนผสม

สมบัติทางกายภาพ			องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)				อัตราส่วนผสม			บ่มร้อน		บ่ม (วัน)	กำลังอัด (เมกะพาสคัล)	อ้างอิง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาเผา (ชม.)	อนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	SS/SH	SH (M)	S/L	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชม.)			
750	2	6.3	50.3	41.0	1.0	4.1	2.5	-	0.78	80	4	28	~71	อาบีเด็ง และคณะ (2556) Hawa et al. (2013)
700	10	80.0	41.5	37.5	7.6	0.5	1	10	1.48	25±1	24	28	~37	Elimbi et al. (2011)
750	24	-	47.0	36.0	0.5	-	-	12	-	85±2	2	-	~14 (ดัด)	Granizo et al. (2007)
800	2	2.0	54.1	33.0	4.4	5.7	0.2	8	0.8	80	3	7	~5	Liew et al. (2012)
650	3	-	51.4	38.0	1.2	0.2	-	10	0.8	30	24	60	~60	Lin et al. (2012)
650	-	-	50.8	43.5	2.4	-	2.5	16	1	20	24	7	~47	Pacheco-Torgal et al. (2011)
750	-	4.8	55.0	40.9	0.6	0.6	-	-	0.95	40	2	28	~65	Rovnanik (2010)
900	6	4.9	44.1	37.2	0.6	0.6	-	12	1.25	20	-	7	~59	Zuhua et al. (2009)

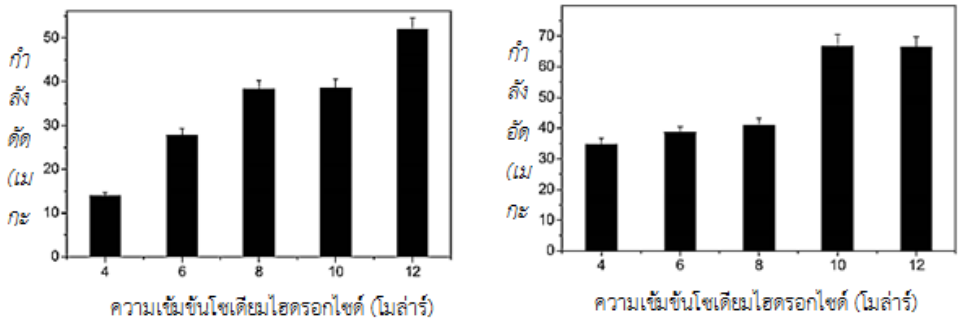
SS = Sodium silicate, SH = Sodium hydroxide, S = Solid, L = liquid

2. อิทธิพลส่วนผสมพื้นฐาน

2.1 ความเข้มข้นของสารกระตุ้น

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) ถูกใช้ในการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ด้วยดินขาวเผาเป็นส่วนใหญ่ การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับโซเดียมซิลิเกตนั้นสามารถให้กำลังของจีโอพอลิเมอร์ได้ดีกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดียว ในขณะเดียวกันการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูงและใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงจะส่งผลให้ได้กำลังอัดสูง Wang, Li, & Yan (2005) ได้ทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาโดยการผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 4.15: 1 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าสมบัติทางกลดังภาพที่ 1 เช่นค่ากำลังอัด กำลังดัดและความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ดีขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งการศึกษานี้เป็นการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4-14 โมลาร์ในการศึกษาของ Pacheco-Torgal, Moura, Ding, & Jalali (2011) สามารถสรุปได้ว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 12 โมลาร์ทำให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผามีกำลังอัดมากที่สุด ทั้งนี้การใช้ความเข้มข้นสูงเกินไปทำให้จีโอพอลิเมอร์ทำงานยากทำให้ส่งผลต่อกำลังอัด

Granizo, Blanco-Varela, & Martinez-Ramirez (2007) ได้กล่าวว่าการใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมเข้าด้วยกันสามารถให้สมบัติทางกลได้ดีกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว และยิ่งไปกว่านั้นค่ากำลังดัดสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียม (Na) สูงขึ้น Duxson, Provis, Lukey, Mallicoat, Kriven, & van Deventer (2005) รายงานว่าความเข้มข้นของสารละลายจะมีผลต่อการกระจายของรูโพรงในจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา และผลของความเข้มข้นดังกล่าวยังส่งผลทำให้ความหนาแน่นของโครงสร้างเจลล์ (gel) ลดลง และยังรายงานเพิ่มเติมอีกว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงประมาณร้อยละ 400 เมื่ออัตราส่วน Si/Al = 1.15 เพิ่มเป็น 1.9 ซึ่งเป็นค่าที่ให้กำลังอัดสูงสุด ก่อนที่กำลังอัดจะเริ่มลดลงที่อัตราส่วนของ Si/Al = 2.15 และเมื่อรายงานในรูปของอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 พบว่าที่อัตราส่วน 3.0-3.8 สามารถให้กำลังอัดสูงสุด



(ก) (ข)

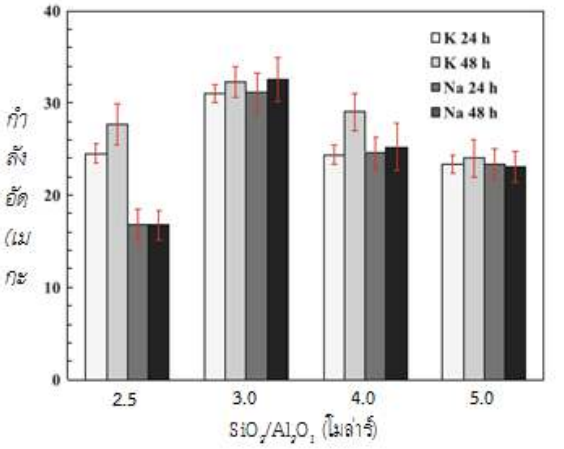
ภาพที่ 1 สมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา (ก) กำลังดัด (ข) กำลังอัด (Wang, Li, & Yan, 2005)

2.2 อัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3

SiO_2/Al_2O_3 เป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากเป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นที่จะนำมาผลิต Zhang, Sun, & Li (2005) ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโมลาร์ของ SiO_2/Al_2O_3 ของดินขาวเผา พวกเขาพบว่า การพัฒนาผลิตภัณฑ์ของจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น มีอัตราส่วนโมลาร์น้อยลงกว่าดินขาวเผาเริ่มต้น De Silva, Sagoe-Crenstil, & Sirivivatnanon (2007) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาช่วงแรกๆ ของจีโอพอลิเมอร์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของดินขาวเผาต่อโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว ลักษณะการพัฒนากำลังช่วงต้น โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมลาร์ของ SiO_2/Al_2O_3 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชม. จากข้อมูลดังกล่าวได้ข้อสรุปว่า (1) การเพิ่มอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 มีผลทำให้ระยะเวลาก่อตัวนานขึ้น (2) การเพิ่มอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ไปจนถึง 3.4–3.8 ส่งผลทำให้ได้กำลังดีที่สุด

Zhang, Sun, & Li (2008) ศึกษาผลจากอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3, K_2O/Al_2O_3 และ H_2O/K_2O ที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา โดยมีการผสมซิลิกาฟูม (Silica fume) และใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) บ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 ผลการทดสอบพบว่า ความแตกต่างของอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 มีผลกระทบต่อกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจีโอพอลิเมอร์ที่ให้กำลังสูงสุดอัตราส่วนของ SiO_2/Al_2O_3 = 4.5, K_2O/Al_2O_3 = 0.8 และ H_2O/K_2O = 5.0 Zhang, Sun, & Li (2010) ศึกษาอิทธิผล 3 ตัวแปรคือ อัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3, M_2O/Al_2O_3 และ H_2O/Na_2O ของจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกัน ซึ่งมีอัตราส่วนโมลาร์ของ SiO_2/Al_2O_3 = 3.2 มีของแข็งอยู่ร้อยละ 37 และทำการเพิ่มค่าซิลิกอน (Silicon) จากการผสมซิลิกาฟูม โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมโมลาร์ให้อยู่ในช่วง $5.5 \leq SiO_2/Al_2O_3 \leq 6.5$, $0.8 \leq Na_2O/Al_2O_3 \leq 1.2$ และ $7.0 \leq H_2O/K_2O \leq 10$ ในการศึกษานี้สรุปได้ว่าอัตราส่วน Na_2O/Al_2O_3 และ H2O/Na2O มีผลต่อกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ กำลังอัดสูงสุดของจีโอพอลิเมอร์เป็นของอัตราส่วนผสมที่ SiO_2/Al_2O_3 = 5.5, Na_2O/Al_2O_3 = 1.0 และ H_2O/Na_2O = 7.0 อย่างไรก็ตามเมื่อได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ที่อยู่ในช่วง 2.5–5.0 ของ Lizcano, Kim, Basu, & Radovic (2012) โดยการใช้ดินขาวเผาผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง ทดสอบยังโมดูลัส ความแข็ง ความทนทานต่อการแตกร้าว กำลังอัด และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เมื่อพิจารณากำลังอัดหลังจากทดสอบพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 เท่ากับ 3.0 สามารถให้ค่ากำลังอัดได้ดีที่สุดดังภาพที่ 2 ทั้งที่ระยะเวลาบ่มร้อน 24 และ 48 ชั่วโมง ทั้งโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

Hawa, Tonnayopas, & Prachasaree (2013) ทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5-15 บ่มความร้อนเป็นเวลา 1, 2 และ 4 ชม. ทำการทดสอบกำลังอัดที่ 2, 6, 24 ชม. 7 และ 28 วัน ในการทดสอบนี้ใช้ดินขาวเผาบดละเอียดขนาดเฉลี่ย 6.31 ไมครอน ซึ่งเมื่อคำนวณอัตราส่วนโมลาร์ระหว่าง SiO_2/Al_2O_3 จะอยู่ที่ 2.77, 2.88, 3.01 และ 3.15 ของการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าที่อายุ 2 ชม. อัตราส่วนโมลาร์สูงสุดไปหาน้อยจะเรียงลำดับ 2.77, 2.88, 3.01 และ 3.15 แต่เมื่อทดสอบที่อายุ 28 วัน พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่เถ้าปาล์มร้อยละ 5 (อัตราส่วนโมลาร์เท่ากับ 2.88) สามารถให้กำลังอัดได้สูงสุด

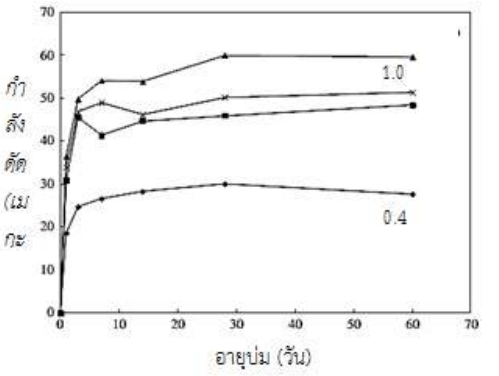


ภาพที่ 2 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์แปรผันอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 (Lizcano, Kim, Basu, & Radovic, 2012)

2.3 อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว

โดยปกติทั่วไปสำหรับปูนซีเมนต์แล้วอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลอย่างมากต่อกำลังอัด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง (น้ำมาก) ส่งผลให้กำลังอัดลดลง ซึ่งในส่วนของจีโอพอลิเมอร์จะไม่เป็นอย่างที่กล่าวมาสักทีเดียว โดยมีตัวแปรอื่นเขามาเกี่ยวข้อง เช่นอัตราส่วนโมลาร์ของ SiO_2/Al_2O_3 เป็นต้น Xiao, Zuhua, Huajun, & Yue (2009) ได้รายงานว่าอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวสูง ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีความเหนี่ยวลดลงและเมื่ออัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวต่ำสามารถเพิ่มคาบการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชั่น ในอีกแง่หนึ่ง Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., Sudong, H., & Yue (2009) พบว่า อัตราส่วนที่ต่ำทำให้เกิดการเร่งการชะละลายของวัสดุตั้งต้น

Kong Daniel, Sanjayan Jay, & Kwesi (2007) รายงานว่าอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเท่ากับ 0.8 สามารถให้ค่ากำลังอัดสูงและมีความสามารถในการทำงานที่ดี เมื่ออัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวสูงกว่า 0.8 ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลงและยังทำให้สมบัติอื่นๆ ของจีโอพอลิเมอร์แย่ลง Liew, Mustafa Al Bakri, & Bnhussain et al., (2012) ศึกษาจีโอพอลิเมอร์เพสต์โดยการแปรผันอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวโดยน้ำหนัก 0.4–1.2 และใช้โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนต่างๆ ผลปรากฏว่าความหนาแน่นรวมและกำลังอัดที่อัตราส่วน 0.8 และโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.2 มีค่าดีที่สุด Lin, Shiu, Shie, Cheng, & Hwang (2012) ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมซิลิเกต อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 0.4–1.0 และให้ SiO_2/Na_2O อยู่ในช่วง 0.8–2.0 ทำการทดสอบกำลังอัดที่ 1, 7, 28 และ 60 วัน จากการทดสอบพบว่าหลังจาก 1 วัน จีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเท่ากับ 0.4 ให้ค่ากำลังอัดน้อยที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเท่ากับ 0.8 มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดในทุกช่วงอายุการทดสอบดังภาพที่ 3 เนื่องจากว่าปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินาในดินขาวเผาเป็นสาเหตุที่ทำให้มีกำลังเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวที่ 1.0 จะมีกำลังลดลงเนื่องจากความสามารถในการทำงานลดลง (จีโอพอลิเมอร์แห้ง) ทำให้เนื้อจีโอพอลิเมอร์เป็นโพรงเมื่อแข็งตัวทำให้รับน้ำหนักได้ลดลง



ภาพที่ 3 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว
(Lin, Shiu, Shie, Cheng, & Hwang, 2012)

3. อิทธิพลการเผาดินขาว

Zuhua, Xiao, Huajun, & Yue (2009) ได้ใช้ดินขาวเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ โดยเน้นไปที่การเผาดินขาวที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 600–1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชม.การทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา จะสามารถทำให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 800–900 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1,000 องศาเซลเซียส กำลังอัดจะลดลงอย่างฉับพลันเช่นเดียวกันกับการทดสอบของ (Zuhua, Xiao, Huajun, Sudong, & Yue, 2009) Wang, Jia, He, & Zhou (2010) ศึกษาการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผา ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชม. โดยดินเผาที่ทำการศึกษาครั้งนี้มีความละเอียดถึง 4.08 ไมครอน ใช้โปแตสเซียมซิลิเกตและโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น จากผลการทดสอบพบว่าจีโอพอลิเมอร์เผาดินขาวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีความแน่น กำลังดัด และกำลังอัดสูงกว่าดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะกำลังดัดที่เพิ่มจาก 8.7 ไปเป็น 32.1 เมกะพาสคัล

ในขณะที่ Elimbi, Tchakoute, & Njopwouo (2011) ได้ศึกษาในลักษณะเดียวกัน โดยการเผาดินขาวที่อุณหภูมิ 450–800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 10 ชม. และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:1 ทดสอบระยะเวลาก่อตัว การหดตัว และกำลังอัด ซึ่งในส่วนระยะเวลาก่อตัวนั้นที่ทุกอุณหภูมิไม่มีนัยสำคัญ แต่การหดตัวจะหดตัวน้อยลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง ด้านกำลังอัดให้ค่าที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสซึ่งที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นที่ยอมรับและได้รับความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมาก

4. ผลกระทบจากการบ่มร้อน

Rovnanik (2010) ได้ศึกษาผลกระทบจากการบ่มร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ดินขาวเผาเป็นวัสดุตั้งต้น โดยการทดสอบกำลังอัด กำลังดัด ความหนาแน่น การกระจายรูโพรง (Pore) และโครงสร้างทางจุลภาค บ่มร้อนเป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส สามารถให้กำลังอัด และกำลังดัดในระยะเวลาที่รวดเร็ว ในขณะที่การบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 20 และ 40 องศาเซลเซียส กำลังอัด และกำลังดัดจะค่อยๆ เพิ่ม ในส่วนของค่าความหนาแน่นพบว่าการบ่มร้อนที่อุณหภูมิสูงค่าความหนาแน่นจะลดลงเรื่อยๆ Muniz-Villarreal, Manzano-Ramirez, & Sampieri – Bulbarela (2011) ได้ขยายการทดสอบเป็นการบ่มร้อนเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรก 2 ชั่วโมง บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ต่อด้วยการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 30-90 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถให้กำลังอัดได้ดีที่สุด

5. อิทธิพลแทนที่ดินขาวเผาบางส่วนด้วยเถ้าลอย

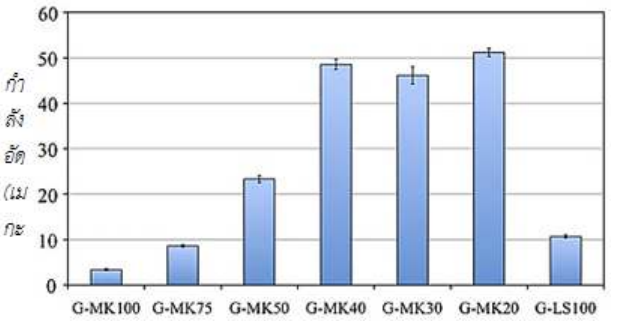
Zhang, Yao, Zhu, Hua, & Chen (2009) ทำการพัฒนาจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาโดยการแทนที่บางส่วนด้วยเถ้าลอย ใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 33.3, 50 และ 66.7 โดยน้ำหนัก ใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น บ่มผ่านหม้ออบไอน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอีกกลุ่มหนึ่งบ่มในอากาศที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 3 และ 6 วัน จากผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ร้อยละ 33.3 สามารถเพิ่มการไหลของจีโอพอลิเมอร์และสามารถยืดระยะเวลาก่อตัวยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถเพิ่มกำลังอัด โดยกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่ 6 วัน ของการแทนที่ร้อยละ 33.3 ของการบ่มด้วยไอน้ำสามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึงร้อยละ 35.5 Zhang, Wang, Zhu, Reid, Provis, & Bullen (2014) ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการย่อยการแทนที่ด้วยเถ้าลอยให้ละเอียดมากขึ้น ทำการแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ในผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการแทนที่ร้อยละ 10 ให้กำลังอัดสูงสุดทั้งที่ 7 และ 28 วันในขณะที่เมื่อมีการแทนที่เพิ่มขึ้นค่ากำลังอัดจะลดลง (แปรผันตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าระยะเวลาก่อทั้งการก่อตัวเริ่มต้นและการก่อตัวสุดท้าย พบว่าเมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยเพิ่มขึ้นระยะเวลาก่อตัวทั้ง 2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

Zhang, Sun, She, & Sun (2009) ใช้ดินขาวเผาเป็นวัสดุตั้งต้นในการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ และใช้เถ้าลอยเข้าไปแทนที่บางส่วนในอัตราดินขาวเผาต่อเถ้าลอยเท่ากับ 100:0, 90:10, 70:30, 50:50 และ 30:70 โดยน้ำหนัก ใช้โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น โซเดียมซิลิเกตมีอัตราส่วนโมลาร์ของ SiO_2/Na_2O เท่ากับ 3.2 บ่มที่อุณหภูมิต่างๆ กัน จากผลการทดสอบพอสามารถสรุปได้ว่าการใช้ดินขาวเผาร้อยละ 70 และเถ้าลอยร้อยละ 30 พร้อมทั้งบ่มไอน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงนั้น จีโอพอลิเมอร์สามารถให้กำลังอัดได้ดีที่สุด ซึ่งกำลังอัดและกำลังดัดอยู่ที่ 32.2 และ 7.15 เมกะพาสคัล ตามลำดับ และยิ่งไปกว่านั้นในการศึกษาของ Aguilar, Diaz, & Garcia (2010) ที่เป็นการศึกษาจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมวลเบา ที่มีดินขาวเผาเป็นวัสดุตั้งต้นและแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาอย่างเดียว กำหนดใช้โซเดียมซิลิเกตที่มี SiO_2/Na_2O เท่ากับ 1.2 ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้มีความหนาแน่น 1,200, 900 และ 600 กก./ลบ.ม. เนื่องจากใช้ผงอะลูมิเนียมผสมเข้าไปเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศ และใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวม ใช้การบ่มที่ 20 และ 75 องศาเซลเซียส ในการทดสอบกำลังอัดที่ 180 วันการแทนที่ดินขาวด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 สามารถใช้การได้ โดยเมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส กำลังอัดวันแรกมีค่าน้อย อย่างไรก็ตามเมื่ออายุนานขึ้นกำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่บ่ม 75 องศาเซลเซียส

6. อิทธิพลแทนที่ดินขาวเผาบางส่วนด้วยเถ้าตะกรันเหล็ก

Cheng & Chiu (2003) ศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่มีวัสดุตั้งต้นเป็นดินขาวและตะกรันเหล็ก ซึ่งการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณดินขาวเผาที่มากขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาก่อตัวช้าลงและมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้ดินขาวเผาที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลให้อัตราส่วนของอะลูมินา (Al) เพิ่มขึ้นในระบบ ทำให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่นดียิ่งขึ้น ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มดินขาวเผาทำให้ความหนาแน่นลดลง Burciaga-Diaz, Escalante-Garcia, Arellano-Aguilar, & Gorokhovsky (2010) ทำการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาผสมตะกรันเหล็กในอัตราส่วน 100:0, 80:20, 50:50, 20:80 และ 0:100 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนโมดูลัสของโซเดียมซิลิเกต (SiO_2/Na_2O) 0, 1, 1.5 และ 2 ร้อยละของ Na_2O เท่ากับ 5, 10 และ 15 ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 360 วัน จากการศึกษาพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ร้อยละ 80 ของดินขาวเผาผสมร้อยละ 20 ของตะกรันเหล็กและร้อยละ 10 ของ Na_2O สามารถให้กำลังอัดได้ดีที่สุด

Zhang, Sun, Chen, & Chen (2007) ได้ทำการเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาผสมตะกรันเหล็กในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเท่ากับ 100:0, 90:10, 70:30, 50:50 และ 70:30 บ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน ซึ่งเมื่อทดสอบกำลังอัดพบว่าที่การแทนที่ร้อยละ 50 สามารถให้ค่ากำลังอัดดีที่สุด และตามด้วยการแทนที่ร้อยละ 70 ในขณะที่การทดสอบกำลังดัดก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ในปี 2013 Bignozzia, Manzi, Lancellotti, Kamseu, Barbieri, & Leonelli (2013) ได้ศึกษาแนวทางการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากดินขาวเผาแทนที่ด้วยตะกรันเหล็ก ใช้ดินขาวที่เผา 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในการศึกษาครั้งนี้ ในขณะที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เท่ากับ 8 โมลาร์ และใช้โซเดียมซิลิเกตที่มีอัตราส่วนของ SiO_2/Na_2O อยู่ที่ 1.99 โดยแทนที่ตะกรันเหล็กร้อยละ 25, 50, 60, 70 และ 80 โดยน้ำหนัก จากศึกษาพบว่าการแทนที่ตะกรันเหล็กร้อยละ 60–80 จีโอพอลิเมอร์สามารถให้กำลังอัดได้ดีที่สุดดังภาพที่ 4 ในขณะที่การแทนที่ตะกรันเหล็กในปริมาณอื่นๆ ค่ากำลังอัดลดลงอย่างชัดเจนซึ่งตัวอย่างที่ให้กำลังอัดสูงมีผลโดยตรงต่อการดูดซึมน้ำที่ลดลง



ภาพที่ 4 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์แทนที่ตะกรันเหล็ก
(Bignozzia, Manzi, Lancellotti, Kamseu, Barbieri, & Leonelli, 2013)

สรุป

การใช้ดินขาวเผาเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ที่มีการศึกษาในเชิงลึกโดยนักวิจัยจากทั่วโลกนั้น สามารถสรุปในประเด็นต่างๆ ได้ดังนี้

1. อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาดินขาวอยู่ในช่วง 700–900 องศาเซลเซียสขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของดินขาว
2. ดินขาวต้องมีการเผาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ขึ้นไป เป็นที่น่าสังเกตว่าการเผาเป็นเวลานานไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์
3. ค่ากำลังอัดสูงขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคละเอียดมากขึ้นความละเอียดที่ส่งผลโดยตรงพื้นที่ผิวมีผลอย่างมากต่อกำลังอัด
4. ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12 โมลาร์มีความเหมาะสมที่สุด
5. อัตราส่วนโดยโมลาร์ของ SiO_2/Al_2O_3 ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงประมาณ 3–5
6. อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งที่ 0.8 โดยน้ำหนัก สามารถให้กำลังได้ดีที่สุด
7. การบ่มที่อุณหภูมิ 60–80 องศาเซลเซียส สามารถกำลังสูงช่วงต้นทันที ในขณะที่บ่มอุณหภูมิต่ำ กำลังกำลังจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. มีการเปรียบเทียบสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้วัสดุปอซโซลานอื่นๆ เป็นวัสดุตั้งต้น กับการใช้ดินขาวเผาโดยเฉพาะด้านกำลัง

2. การใช้สารกระตุ้นชนิดอื่นๆ จะส่งผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์อย่างไร

3. เพิ่มการศึกษาระยะเวลาการพัฒนากำลังของจีโอพอลิเมอร์โดยจีโอพอลิเมอร์มีอายุของการพัฒนากำลังนานเท่าไร

4. เงื่อนไขการบ่มที่แตกต่างเช่น การบ่มด้วยไมโครเวฟ การบ่มน้ำร้อน อาจจะส่งผลต่อกำลังของจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผา

5. มีการวิเคราะห์ เจาะลึกปริมาณและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชั่น ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรต่อกำลังของจีโอพอลิเมอร์

รายการอ้างอิง

อาบีเด็ง ฮาวา, ดนุพลตันนโยภาส, วรพจน์ ประชาเสรี และพิชัยธานีรณานนท์. (2556). สมบัติวัสดุประสานจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผาเพื่องานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต. **วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 5**(2), 37-47.

Aguilar, R.A., Diaz, O.B., & Garcia, J.I.E. (2010). Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates. **Construction and Building Materials, 24**(7), 1166–1175.

Burciaga-Diaz, O., Escalante-Garcia, J.I., Arellano-Aguilar, R., & Gorokhovsky, A. (2010). Statistical analysis of strength development as a function of various parameters on activated metakaolin/slag cements. **Journal of the American Ceramic Society, 93**(2), 541–547.

Bignozzia, M.C., Manzi, S., Lancellotti, I., Kamseu, E., Barbieri, L., & Leonelli, C. (2013). Mix-design and characterization of alkali activated materials based on metakaolin and ladle slag. **Applied Clay Science, 73**, 78-85.

Cheng, T.W. & Chiu, J.P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. **Minerals Engineering, 16**(3), 205–210.

Davidovits, J. (2011). **Geopolymer Chemistry and Applications.** 3rd Ed. Institut Géopolymère.

De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., & Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of geopolymerization: role of Al_2O_3 and SiO_3. **Cement and Concrete Research, 37**, 512–518.

Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M., & van Deventer, J.S.J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 269**(1-3), 47-58.

Elimbi, A., Tchakoute, H.K., & Njopwouo, D. (2011). Effects of calcination temperature of kaolinite clays on the properties of geopolymer cements. **Construction and Building Materials, 25**(6), 2805 - 2812.

Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to low-CO_2 cements. **Cementand Concrete Research, 34**(9), 1489–1498.

Granizo, M.L., Blanco-Varela, M.T., & Palomo, A. (2000). Influence of the starting kaolin onalkali-activated materials based on metakaolin. Study of the reaction parameters by isothermal conduction calorimetry. **Journal of Materials Science, 35**(24), 6309–6315.

Granizo, M.L., Alonso, S., Blanco-Varela, M.T., & Palomo, A. (2002). Alkaline activation of metakaolin: effect of calcium hydroxide in the products of reaction. **Journal of American Ceramic Society, 85**(1), 225–231.

Granizo, M.L., Blanco-Varela. M.T., & Martínez-Ramírez, S. (2007). Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. **Journal of Materials Science, 42**(9), 2934–2943.

Hawa, A., Tonnayopas, D., & Prachasaree, W. (2013). Performance evaluation and microstructure characterization of metakaolin-based geopolymer containing oil palm ash. **The Scientific World Journal**, 2013. http://dx.doi.org/10.1155/2013/857586

Hawa, A., Tonnayopas, D., Prachasaree, W., & Taneerananon, P. (2013). Development and performance evaluation of very high early strength geopolymer for rapid road repair. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2013. http://dx.doi.org/10.1155/2013/764180

Kong Daniel, L.Y., Sanjayan Jay, G., & Kwesi Sagoe-Crentsil. (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research, 37**(12), 1583–1589.

Lizcano, M., Kim, H.S., Basu, S., & Radovic, H. (2012). Mechanical properties of sodium and potassium activated metakaolin-based geopolymers. **Journal of Materials Science, 47**(6), 2607–2616.

Liew, Y.M., Mustafa Al Bakri, A.M., Bnhussain, M., Luqman, M., KhairulNizar, I., Ruzaidi, C.M., & Heah, C.Y. (2012). Optimization of solids-to-liquid and alkali activator ratios of calcined kaolin geopolymeric powder. **Construction and Building Materials, 37**, 440–451.

Lin, K.L, Shiu, H.S., Shie, J.L., Cheng, T.W., & Hwang C.L. (2012). Effect of composition on characteristics of thin film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) waste glass-metakaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials, 36**, 501–507.

Madani, A., Aznar, A., Sanz, J., & Serratosa, J.M. (1990). 29Si and 27Al NMR study of zeolite formation from alkali-leached kaolinites-influence of thermal reactivation. **Journal of Physical Chemistry, 94**(2), 760–765.

Muniz-Villarreal, M.S., Manzano-Ramirez, A., Sampieri-Bulbarela, S., Ramon Gasca-Tirado, J., Reyes-Araiza, J.L., Rubio-avalos, J.C., Perez-Bueno, J.J., Apatiga, L.M., Zaldivar-Cadena, A., & Amigo-Borras, V. (2011). The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters, 65**(6), 995–998.

Pacheco-Torgal, F., Moura, D., Ding, Y., & Jalali, S. (2011). Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. **Construction and Building Materials, 25**(9), 3732–3745.

Rahier, H., Simons, W., van Mele, B., & Biesemans, M. (1997). Recent literature in geopolymer science and technology. **Journal of Materials Science, 32**(9), 2237–2247.

Rashad, A.M., & Zeedan, S.R. (2011). The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. **Construction and Building Materials, 25**(7), 3098–3107.

Rovnanikk, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials, 24**(7), 1176–1183.

Wang, H., Li, H., & Yan, F. (2005). Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 268**(1-3), 1-6.

Wang, M.R., Jia, D.C., He, P.G., & Zhou, Y. (2010). Influence of calcination temperature of kaolin on the structure and properties of final geopolymer. **Materials Letters, 64**, 2551–2554.

Xiao, Y., Zuhua, Z., Huajun, Z., & Yue, C. (2009). Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. **ThermochimActa, 493**(1-2), 49–54.

Zhang, Y., Sun, W., Chen, Q., & Chen, L. (2007). Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymers. **Journal of Hazardous Materials, 143**(1–2), 206–213.

Zhang, Y., Sun, W., She, W., & Sun, G. (2009). Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of fly ash based geopolymer. **Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition, 24**(5), 819-825.

Zhang, Y.S., Sun, W., & Li, J.Z. (2005). Hydration process of interfacial transition in potassium polysialate (K-PSDS) geopolymer concrete. **Magazine of Concrete Research, 57**, 33–38.

Zhang, Y., Sun, W., & Li, Z. (2008). Synthesis and microstructural characterization of fully reacted potassium-poly (sialate-siloxo) geopolymeric cement matrix. **ACI Materials Journal, 105**(2), 156–164.

Zhang, Y., Sun, W., & Li., Z. (2010). Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based Geopolymer cement. **Applied Clay Science, 47**(3-4), 271–275.

Zhang, Z.H., Yao, X., Zhu, H.J., Hua, S.D., & Chen Y. (2009). Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer. **Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition., 16**(1), 49-52.

Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., & Yue, C. (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. **Applied Clay Science, 43**(2), 218–223.

Zhang, Z., Wang, H., Zhu, Y., Reid, A., Provis, J.L., & Bullen, F. (2014). Using fly ash to partially substitute metakaolin in geopolymer synthesis. **Applied Clay Science, 88-89**, 194-201.

Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., Sudong, H., & Yue, C. (2009). Activating Process of Geopolymer Source Material: Kaolinite. **Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition. 24**(1), 132-136.