

จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล ตอนที่ 2 : ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังอัด

Fly Ash and Bio-mass Ash Based Geopolymer Pastes II : Relationship between Rate of Reaction and Compressive Strength

เชียรศักดิ์ กลัปประสิทธิ์¹ ชัย จาตุรพิทักษกุล¹ ปริญญ์ จินดาประเสริฐ² และ สมิศร ส่งพิริยะกิจ³

Thiensak Klabprasit¹ Chai Jaturapitakul¹ Prinya Chindaprasit² and Smith Songpiriyakij³

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

³ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 10800

โทร.02-585-8541 ต่อ 6511 โทรสาร 02-587-6930 E-mail: ssy@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้น (Monomer) หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรซินของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล โดยอาศัยหลักการทางเคมี ที่มีสมมุติฐานว่า สารตั้งต้นที่ต่างเข้มข้นสูงทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้นจะละลายในกรดได้ง่าย ส่วนเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่เป็นสารตั้งต้นที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาจะไม่ละลายในกรดอ่อน ในการทดลองนี้ใช้กรด Picric เป็นตัวทำละลาย เพื่อคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยากับต่าง ณ เวลาที่พิจารณา

ผลการศึกษาพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เรซิน ไม่ขึ้นกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) กล่าวคือเพสต์ที่มี w/b เท่ากับ 0.28 และ 0.42 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกัน แต่โครงสร้างอ่อนแอลง รับกำลังอัดน้อยลงเมื่อมีปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคของเถ้าถ่านหิน ทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าอนุภาคเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 14 และ 18 โมลาร์ ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มากนักและแทบไม่มีผลกระทบต่อกำลังอัด สุดท้ายการศึกษานี้พบว่ากรอบตัวอย่างด้วยอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถกระตุ้นให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น และทำให้เพสต์มีความแข็งแรงเร็วขึ้น

Abstract

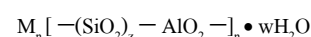
This research paid attention on the reactivity rate of monomers (fly ash and rice husk bark ash, FA and RHBA, respectively) in geopolymer paste. It is called geopolymerization, sometimes. The experiment was based on the chemistry hypothesis that alkali-reacted monomer was easily dissolved in a mild acid whereas the unreacted monomer was rarely dissolved. Picric acid was employed as the media

in this experiment to recognize the amount of reacted monomer which in turn, the rate of geopolymerization could be calculated.

The results revealed that the rate of geopolymerization did not depend on water to binder ratio (w/b). Pastes with w/b of 0.28 and 0.42 showed the same rate of reactivity. However, w/b affected to microstructure and compressive strength of paste. The paste with higher w/b weakened microstructure and resulted on the lower compressive strength. Moreover, it was found that the FA particle was more reactive than that of RHBA. There was no different in compressive strength when NaOH between 14 and 18 molars were used. Finally, elevated curing temperature at 60 °C for 24 hours could accelerate the rate of reactivity which enhanced high compressive strength of the paste in short time.

1. บทนำ

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นชื่อวัสดุที่ Davidovits [1] ตั้งขึ้นในปี ค.ศ. 1984 เพื่อใช้เรียกวัสดุโพลิเมอร์ที่ทำจากแร่ธาตุจำพวก ซิลิกา (Si) และ อลูมินา (Al) ภายใต้กระบวนการเกิดโพลิเมอร์ที่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นด่างที่เข้มข้นสูงมาก ผลที่ได้จากปฏิกิริยานี้จะเป็นวัสดุที่มีพันธะของ Si – O – Al – O ยึดต่อกันเป็นโพลิเมอร์ สมการที่เขาเสนอไว้สำหรับนิยามพันธะของวัสดุนี้ ได้แก่



ในปัจจุบันมีงานวิจัยอื่น [2] ที่มีความคิดเห็นที่แตกต่างออกไป องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะที่คล้ายกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จะเป็นอัญฐาน ในขณะที่โครงสร้างทางจุลภาคของซีโอไลต์จะเป็นผลึก อย่างไรก็ตามกลไกของกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ และความสัมพันธ์

ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับการก่อตัว หรือความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์ยังไม่เป็นที่ทราบชัดเจนนัก Palomo และคณะ [3] พยายามที่จะแบ่งวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า Alkali-activated Materials และ Alumino Silicate Polymer หรือ Geopolymer ออกจากกัน โดยอาศัยหลักการว่า ถึงแม้ว่าวัสดุทั้งสองอาศัยการเกิดปฏิกิริยาจากการกระตุ้นโดยค่าที่ตามแต่สถานะสภาพขณะเริ่มปฏิกิริยาแตกต่างกัน ในกรณีของ Alkali-activated Materials วัสดุตั้งต้นยังคงประกอบด้วย แคลเซียม (C) และซิลิกา (Si) ที่ถูกกระตุ้นโดยค่าที่ไม่เข้มข้นนัก และผลผลิตส่วนใหญ่ก็ยังเป็น CSH เจล ส่วน Geopolymer มีวัสดุที่มีองค์ประกอบของ ซิลิกา และ อลูมินา เป็นสารตั้งต้น และถูกกระตุ้นโดยค่าที่เข้มข้นกว่า เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน และผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการนี้คือ วัสดุโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน

อย่างไรก็ตามความเข้าใจถึงกระบวนการเกิดโพลิเมอร์ในวัสดุชนิดนี้ยังไม่เป็นที่เข้าใจมากนัก มีนักวิจัยหลายท่าน [4-6] พยายามที่จะเสนอแบบจำลองที่แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ พยายามใช้เทคนิคการใช้กรดอ่อนกักและชะละลายวัสดุโพลิเมอร์ ออกจากสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์หาอัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่สัมพันธ์กับอายุของเพสต์ โดยวิธีนี้ได้ใช้ในการหา อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลาน และจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันมาแล้วในหลายๆ งานวิจัย [7-10]

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในสภาวะพลาสติก และสภาวะของแข็ง ภายใต้เงื่อนไขของสัดส่วนเถ้านหินและเถ้าเกลบ-เปลือกไม้, อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์, ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิบ่ม ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลกระทบดังกล่าวที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์อีกด้วย

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย เช่น เถ้านหิน เถ้าชีวมวล สารเคมีเช่น NaOH และ Na_2OSiO_2 และสัญลักษณ์ที่ใช้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับงานวิจัยที่นำเสนอก่อนหน้านี้ [11]

3.2 วิธีการทดสอบ

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สำหรับ น้ำหนักเพสต์สด 1000 กรัม ที่ใช้ในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันและกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ต่อ 1000 กรัม

MIX ID.	Mix Proportion (g.)			
	RHBA	FA	Na_2OSiO_2	NaOH
65FA00 18M (2.5)	650	-	250	100
65FA100 18M (2.5)	-	650	250	100
55FA40 18M (2.5)	330	220	321	129
65FA40 18M (2.5)	390	260	250	100
65FA40 18M (2.5) (H)	390	260	250	100
65FA40 14M (0.5)	390	260	117	233
65FA40 14M (2.5)	390	260	250	100

3.2.1 การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน

การทดสอบเริ่มจากการนำ กรด Picric ปริมาณ 5 กรัม ละลายใน Methanol ปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ตามอายุที่ต้องการทดสอบ มาบดให้ละเอียดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ปริมาตร 0.5 กรัม ใส่ลงในสารละลายข้างต้นและกวนด้วยเครื่องกวนสารเคมีเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วกวนสารละลายต่อไปอีก 30 นาที เสร็จแล้วนำสารละลายมากรองผ่านกระดาษกรองชนิดไร้เถ้า (Filter Paper No.42 Ashless Circles ϕ 70 mm.) ที่มีปั๊มสุญญากาศดูดจนแห้ง และทำการล้างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ล้างอยู่บนกระดาษกรองด้วย Methanol จนกระทั่งสีของกรด Picric เจือจางลง จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง จึงนำไปใส่ภาชนะและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำการชั่งน้ำหนัก แล้วทำการอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดน้ำหนักของกระดาษกรองออกจากตัวอย่าง

ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่คำนวณได้ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้น หรืออัตราการเกิดจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันนั่นเอง Ohsawa และคณะ [7] และ Lam และคณะ [10] และ Rattanasak [12] ได้ใช้การทดสอบด้วยวิธีนี้ วิเคราะห์อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลาน

3.2.2 การทดสอบกำลังอัดของเพสต์

การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใช้ตัวอย่างทรงกระบอก ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน เมื่อทำการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์และนำเข้าแบบหล่อเสร็จแล้ว จะหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติก เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ การทดสอบและการบ่มทำที่อุณหภูมิห้อง ยกเว้นตัวอย่างที่บ่มด้วยความร้อน ซึ่งหลังจากที่หล่อตัวอย่างเสร็จเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะนำเข้าเตาอบที่มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำออกมาบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาที่ต้องการทดสอบ

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน แม้ว่าตัวอย่าง 65FA00 18M (2.5) ซึ่งใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนเป็นสารตั้งต้น ไม่สามารถทดสอบกำลังอัดได้เนื่องจากตัวอย่างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีโครงสร้างที่ไม่เสถียรและเกิดการขยายตัวและแตกร้าว ตามที่ได้รายงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [11] แต่การทดลองนี้ได้แสดงผลอัตราการเกิดปฏิกิริยา เพื่อติดตามถึงผลกระทบขององค์ประกอบทางเคมีที่มีต่อคุณสมบัติของเพสต์

ตารางที่ 2 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

Symbol	Compressive Strength (ksc)			
	3	7	14	28
	Days	Days	Days	Days
65FA00 18M (2.5)	-	-	-	-
65FA100 18M (2.5)	109	170	257	340
55FA40 18M (2.5)	61	177	209	287
65FA40 18M (2.5)	243	335	409	510
65FA40 18M (2.5) (H)	492	492	549	560
65FA40 14M (0.5)	8	69	160	218
65FA40 14M (2.5)	254	346	394	464

ผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้น หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ที่ได้หาได้จากน้ำหนักที่สูญเสียไปจากการชะละลายด้วยกรด Picric แสดงไว้ในตารางที่ 3 วิธีการคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) คือ

$$LOI_{Average} (\%) = (FA \times LOI_{FA}) + (RHBA \times LOI_{RHBA}) \quad (1)$$

ค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักของสารตั้งต้นเนื่องจากสารที่สามารถเผาไหม้ได้ ($LOI_{Average}$)

โดยที่ ; FA คือ ร้อยละของปริมาณการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้

RHBA คือ ร้อยละของปริมาณการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้

LOI_{FA} คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารที่สามารถเผาไหม้ได้ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (%)

LOI_{RHBA} คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารที่สามารถเผาไหม้ได้ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (%)

ปริมาณของสารตั้งต้นในส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา (U_n) สามารถคำนวณได้โดย

$$U_n (\%) = 100 \times S_{Re} / S_{In} \quad (2)$$

โดยที่ ; S_{Re} คือ น้ำหนักของเพสต์ที่ไม่ละลายในกรด และอบแห้งที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส (กรัม)

S_{In} คือ น้ำหนักของเพสต์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบ (กรัม)

ปริมาณของสารตั้งต้นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาไปแล้ว (S_{Ac}) สามารถคำนวณได้โดย

$$S_{Ac} (\text{กรัม}) = S_{In} - (S_{Re} \times (1 + LOI_{Average} / 100)) \quad (3)$$

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (α) สามารถคำนวณได้โดย

$$\text{Degree of Reaction, } \alpha (\%) = 100 \times S_{Ac} / S_{In} \quad (4)$$

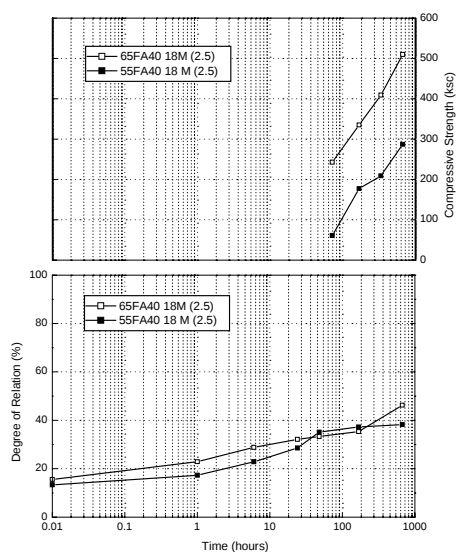
สมการที่ (2) ใช้สำหรับการคำนวณหาปริมาณของสารตั้งต้น ในส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน และในสมการที่ (4) ใช้สำหรับคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอัตราการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชัน

MIX ID.	Degree of Polymerization (%)						
	0	1h	6h	1d	2d	7d	28d
65FA00 18M (2.5)	13.29	30.70	31.52	31.58	37.96	39.10	40.20
65FA100 18M (2.5)	23.47	36.44	41.51	55.44	61.46	63.83	65.21
55FA40 18M (2.5)	13.34	17.31	22.86	28.59	35.15	37.24	38.23
65FA40 18M (2.5)	15.57	22.93	28.86	32.14	33.31	35.36	46.25
65FA40 18M (2.5) (H)	15.57	22.93	28.86	32.14	41.25	48.73	55.25
65FA40 14 M (0.5)	8.11	12.22	20.74	25.82	31.32	35.50	36.24
65FA40 14M (2.5)	15.56	18.41	21.50	28.53	32.77	33.32	36.44

4.1 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำหนักของสารตั้งต้นและน้ำหนักทั้งหมดต่อกำลังอัดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เฟส

เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสที่มีอัตราส่วนสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดที่แตกต่างกันระหว่างร้อยละ 55 และ 65 การใช้อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดร้อยละ 55 ส่วนผสมจะต้องใช้ปริมาณของของเหลวคือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า การใช้อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดร้อยละ 65 จึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ของตัวอย่าง 55FA40 18M (2.5) มีค่าเท่ากับ 0.420 ในขณะที่ตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มีค่าเท่ากับ 0.277 [11] ผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสมทั้งสอง ได้แสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าที่อายุของจีโอโพลิเมอร์เฟสตั้งแต่เริ่มผสม, 1, 6 ชั่วโมง, 1, 2, 7, และ 28 วัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาร้อยละ 13.34, 17.31, 22.86, 28.59, 35.15, 37.24 และ 38.23 สำหรับตัวอย่าง 55FA40 18M (2.5) และสำหรับตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาร้อยละ 15.57, 22.93, 28.86, 32.14, 33.31, 35.36 และ 46.25 ตามลำดับ



รูปที่ 1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสตัวอย่าง 55FA40 18M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5)

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณส่วนที่เป็นของเหลวให้มากขึ้น ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการพัฒนาอัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างชัดเจน แต่จากการศึกษา กำลังอัดของเฟสทั้งสอง พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มีค่าเท่ากับ 243, 335, 409 และ 510 กก/ซม² ตามลำดับ โดยมีค่ามากกว่าค่ากำลังอัดของตัวอย่าง 55FA40 18M (2.5) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 61, 177, 209, และ 287 กก/ซม² ตามลำดับ แสดงให้

เห็นว่าความแข็งแรงของโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว

ความแข็งแรงของโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ มีแนวโน้มที่จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ด้วย โดยการใช้ในส่วนผสมมากทำให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์อ่อนแอลง

4.2 อิทธิพลของอัตราส่วนเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวลต่อกำลังอัดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เฟส

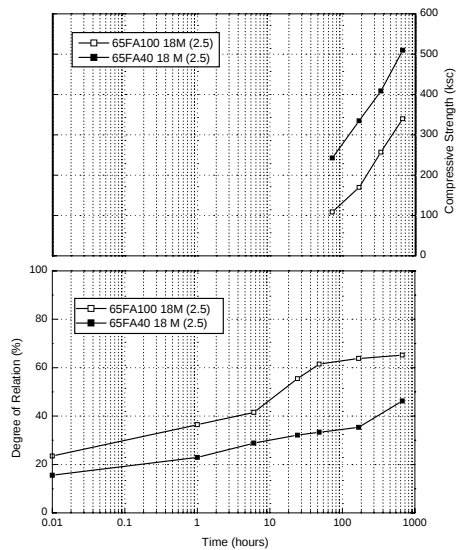
ตัวอย่าง 65FA00 18M (2.5) (ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนสารตั้งต้น) มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาร้อยละ 13.92, 30.70, 31.52, 31.58, 37.96, 39.10 และ 40.2 ตั้งแต่เริ่มผสม, 1, 6 ชั่วโมง, 1, 2, 7, และ 28 วัน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในที่นี้คือ ตัวอย่างนี้ไม่มีองค์ประกอบของ Al อยู่ในโครงสร้างเลย เพราะเถ้าแกลบเปลือกไม้ไม่มี Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบ อีกประการหนึ่งคือกำลังอัดของตัวอย่างนี้ไม่สามารถวัดได้

ส่วนผลการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสม 65FA100 18M (2.5) (ใช้เถ้าถ่านหินเป็นส่วนสารตั้งต้น) พบว่าที่อายุของจีโอโพลิเมอร์เฟสตั้งแต่เริ่มผสม, 1, 6 ชั่วโมง, 1, 2, 7, และ 28 วัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาร้อยละ 23.47, 36.44, 41.51, 55.44, 61.46, 63.83 และ 65.21 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบของ Fernandez-Jimenez และคณะ [9]

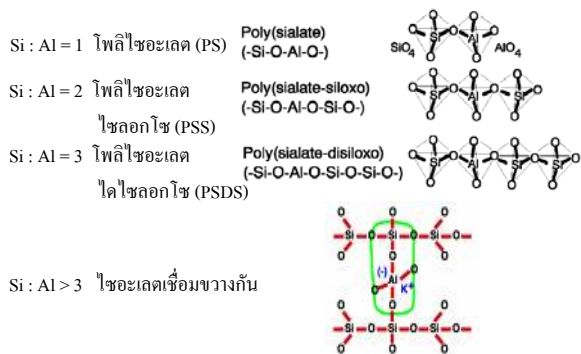
เมื่อนำผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยา ของส่วนผสม 65FA100 18M (2.5) มาเปรียบเทียบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสม 65FA00 18M (2.5) พบว่าในขณะที่เริ่มทำการผสมอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ทำจากเถ้าถ่านหินส่วน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 23.47 มีค่ามากกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ส่วน และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ทำจากเถ้าถ่านหินส่วนที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงถึงร้อยละ 65.21 ในขณะที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ส่วน มีค่าร้อยละ 40.20 แสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินสามารถทำปฏิกิริยาได้มากกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มากในช่วงอายุ 28 วันแรก

เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 40 เช่นตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) และควบคุมตัวแปรอื่นให้เหมือนตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) และ 65FA00 18M (2.5) พบว่าที่อายุของจีโอโพลิเมอร์เฟสตั้งแต่เริ่มผสม, 1, 6 ชั่วโมง, 1, 2, 7, และ 28 วัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาร้อยละ 15.57, 22.93, 28.86, 32.14, 33.31, 35.36 และ 46.25 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) และมีค่าใกล้เคียงกับ 65FA00 18M (2.5) กรณีนี้

อาจอธิบายได้ว่าผลกระทบร่วม (Co-effect) ของเถ้าทั้งสองชนิดทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างใน ในช่วงอายุต้น



รูปที่ 2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาและกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสของตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5)



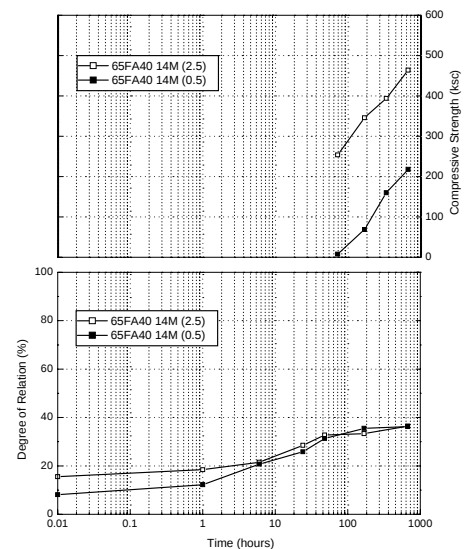
รูปที่ 3 สูตรโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซลอะเลด [13]

ในรูปที่ 2 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนผสม 65FA40 18M (2.5) มีค่าน้อยกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) ในทุกอายุการทดสอบ แต่มีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า อาจอธิบายได้ว่า ตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) ซึ่งมีอัตราส่วนอะตอม Si:Al เท่ากับ 2.09 ทำให้จีโอโพลิเมอร์เฟสมีโครงสร้างเป็นแบบ โพลีไซลอะเลดไซลออกโซ (Polysialate-Siloxo; PSS) ดังรูปที่ 3 ในขณะที่อัตราส่วนอะตอม Si:Al ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มีค่าเท่ากับ 8.28 และมีโครงสร้างเป็นแบบโพลีไซลอะเลดที่เป็นแบบสองมิติและมีไซลอะเลดเชื่อมขวางกัน [13] อาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างแบบโพลีไซลอะเลดไซลออกโซเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่โครงสร้างดังกล่าวมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงน้อยกว่าโครงสร้างของสารโพลีไซลอะเลดที่เป็นแบบสองมิติและมีไซลอะเลดเชื่อมขวางกัน ซึ่งเกิดได้ช้ากว่า แต่มี

ความแข็งแรงสูงกว่า สังเกตได้จากค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มีค่าเท่ากับ 243, 335, 409, และ 510 กก/ซม² ซึ่งมากกว่ากำลังอัดของตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5) ที่มีค่าเท่ากับ 109, 170, 257 และ 340 กก/ซม² ตามลำดับ

4.3 อิทธิพลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ ต่อกำลังอัดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เฟส

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เฟส เมื่อนำสัดส่วนผสม 65FA40 18M มาแปรผันปริมาณการใช้ไซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างไซเดียมซิลิเกตต่อไซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5)



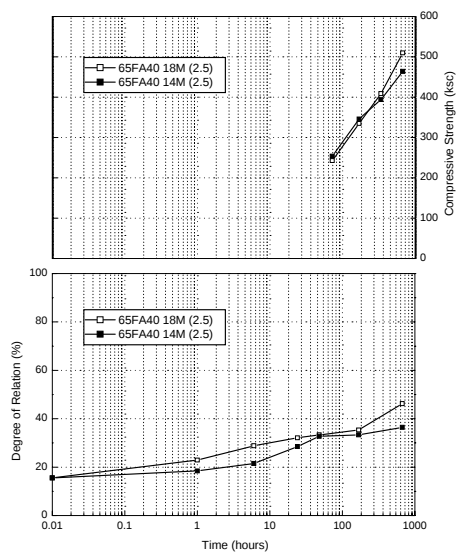
รูปที่ 4 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เฟสของตัวอย่าง 65FA40 18M (0.5) และ 65FA40 18M (2.5)

ผลการทดสอบพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA40 14M (0.5) ที่อายุตั้งแต่ขณะเริ่มผสม, 1, 6 ชั่วโมง, 1, 2, 7, และ 28 วัน มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาร้อยละ 8.11, 12.22, 20.74, 25.82, 31.32, 35.50 และ 36.24 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) มีค่าที่สูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA40 14M (0.5) ในอายุช่วง 6 ชั่วโมงแรก หลังจากเริ่มทำการผสม แต่ผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์เฟสเมื่อมีอายุนานกว่า 6 ชั่วโมงไปแล้วสัดส่วนทั้งสองมีค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสของตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 254, 346, 394 และ 464 กก/ซม² ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของตัวอย่าง 65FA40 14M (0.5) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8, 69, 160 และ 218

กก/ชม² ตามลำดับ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่มาก ไม่ได้ทำให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่กลับทำให้โครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เปลี่ยนแปลงไปซึ่งสังเกตได้จากค่ากำลังอัดที่ลดลง

4.4 อิทธิพลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

เมื่อนำผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) ดังแสดงในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 14 โมลาร์เป็น 18 โมลาร์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ทดสอบได้ในช่วงอายุตั้งแต่ขณะเริ่มผสมจนถึงอายุ 28 วัน มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จากการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ มีแนวโน้มที่มากกว่าการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ คือมีค่าเท่ากับร้อยละ 46.25 และร้อยละ 36.44 ที่อายุ 28 วันตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มากนัก



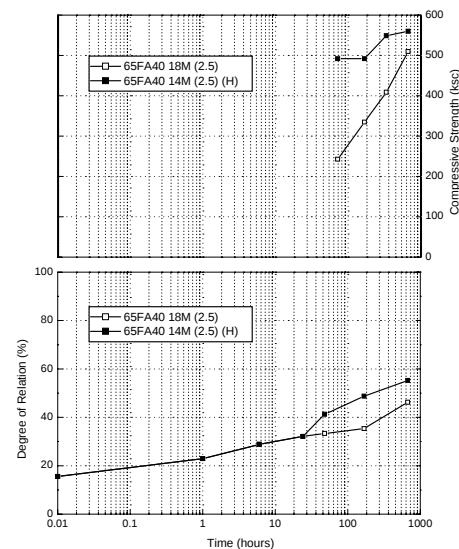
รูปที่ 5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5)

การศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษากำลังอัดของส่วนผสมทั้งสอง ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 5 โดยการศึกษาพบว่าตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 254, 346, 394, 464 และ 534 กก/ชม² ตามลำดับ สำหรับตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90

วัน เท่ากับ 243, 335, 409, 510 และ 624 กก/ชม² ตามลำดับ ซึ่งผลของกำลังอัดแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อกำลังอัดในช่วงอายุต้น (ไม่เกิน 14 วัน) แต่ทำให้เพสต์มีกำลังอัดมากขึ้นในอายุปลาย

4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

เมื่อนำตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) หลังจากผสมเสร็จแล้ว 1 วัน บ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาบ่มที่อุณหภูมิห้อง เพื่อทำการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อายุ 2, 7, และ 28 วัน การศึกษาพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์หลังจากบ่มในเตาอบมีค่าเท่ากับร้อยละ 41.25, 48.73 และ 55.25 ที่อายุ 2, 7, และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเพสต์ที่ไม่ได้บ่มในเตาอบ ผลการทดสอบในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการอบด้วยอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กระตุ้นให้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้รวดเร็วขึ้น อาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เกิดได้รวดเร็วขึ้นเมื่อกระตุ้นด้วยความร้อน มีงานวิจัยหลายงานที่ได้ผลในทิศทางเดียวกัน [14,15] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของกำลังอัดเช่นกัน โดยพบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) เมื่อไม่ได้บ่มที่อุณหภูมิ 60 °C มีกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 243, 335, 409 และ 510 กก/ชม² แต่เมื่ออบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว ทำให้กำลังอัดในแต่ละอายุการบ่มเพิ่มสูงขึ้นเป็น 492, 492, 549 และ 560 กก/ชม² ดังแสดงในตารางที่ 2 อาจสังเกตได้ว่าการบ่มที่อุณหภูมิสูงมีผลกระทบที่อายุต้นเท่านั้น



รูปที่ 6 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของตัวอย่าง 65FA40 18M (2.5) และ 65FA40 18M (2.5) (H)

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาลอดงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. การลดค่าอัตราส่วนสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด จากร้อยละ 65 เป็น 55 ทำให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นจาก 0.28 เป็น 0.42 ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน แต่จะทำให้โครงสร้างอ่อนแอลง เนื่องจากมีปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น

2. การปรับค่าอัตราส่วนเถ้านหินต่อเถ้าชีวมวล ทำให้อัตราส่วนของ Si:Al เปลี่ยนไป ทำให้โครงสร้างทางเคมีตามโครงสร้างของสารโพลิไซอะเลต เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยที่โครงสร้างแบบโพลิไซอะเลตไซลอคไซเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่ออัตราส่วน Si:Al มีค่าเท่ากับ 2 แต่โครงสร้างดังกล่าวมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงน้อยกว่าผลที่ได้ที่มีอัตราส่วนอะตอม Si:Al เท่ากับ 8.28 และมีโครงสร้างเป็นแบบโครงสร้างแบบโพลิไซอะเลตที่เป็นแบบสองมิติและมีไซอะเลตเชื่อมขวางกัน แต่โครงสร้างแบบนี้เกิดขึ้นได้ช้ากว่า

3. การใช้อัตราส่วนระหว่างสารไซเดียมซิลิเกตต่อไซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนักมากขึ้น ไม่ได้ทำให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่ทำให้จีโอโพลิเมอร์เฟสตั้งอึดได้มากขึ้น

4. การใช้ความเข้มข้นของไซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 18 โมลาร์ มีแนวโน้มทำให้เกิดปฏิกิริยามากกว่าความเข้มข้น 14 โมลาร์ แต่ไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสมากนักในช่วงอายุ 28 วันแรก

5. การอบด้วยอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กระตุ้นให้สารละลายไซเดียมซิลิเกตและไซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้รวดเร็วขึ้น และส่งผลให้กำลังอัดของเฟสตั้งอึดมากขึ้นด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการทุนพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปี พ.ศ. 2549 (MRG 4980104) ซึ่งผู้เขียนขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย นอกจากนี้ขอขอบคุณ บริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Daviddovits, J., "Mineral Polymers and Methods of Making Them", USA, 1984, US Patent No. 4349386.
- [2] Hua, X. and Van Deventer, J.S.J., "The Geopolymerisation of Natural Alumino-Silicates", Proceedings: 2nd International Conference on Geopolymer, France: Paris, 1999, pp. 43-59.

- [3] Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T., "Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future", Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 8, 1999, pp. 1323-1329.
- [4] Van, J., Lorenzen, L., "The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilise Toxic Metals: Part I. Theory and Applications." Minerals Engineering, Vol. 10, No.7, 1997, pp. 659-669.
- [5] Xu, H. and van Deventer, J. S. J., "The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals." International Journal of Mineral Processing, Vol. 59, No.3, 2000, pp. 247-266.
- [6] Van, J., Van, D., Lukey, G.C., "The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash and Kaolinite-Based Geopolymers", Chemical Engineering Journal, Vol. 89, No. 1-3, 2002, pp. 63-73.
- [7] Ohsawa, S., Asaga, K., Goto, S., Daimon, M., "Quantitative Determination of Fly Ash in the Hydrated Fly Ash - CaSO₄ · 2H₂O - Ca (OH)₂ System." Cement and Concrete Research, Vol. 15, No.2, 1985, pp. 357-366.
- [8] Fernandez-Jimenez, A., de la Torre, A.G., Palomo, A., Lopez-Olmo, G., Alonso, M.M., Aranda, M.A.G., "Quantitative Determination of Phases in the Alkaline Activation of Fly Ash. Part II: Degree of Reaction", FUEL, Vol. 85, 2006, pp. 1960-1969.
- [9] Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Criado, M., "Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: a Descriptive Model", Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2004, pp. 1204-1209.
- [10] Lam, L., Wong, Y.L., Poon, C.S., "Degree of Hydration and Gel/Space Ratio of High-Volume Fly Ash/Cement Systems", Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 5, 2000, pp. 747-756.
- [11] เขียวศักดิ์ กลับประสิทธิ์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปริญญ์ จินดา ประเสริฐ และ สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ, "จีโอโพลิเมอร์เฟสตั้งอึดจากเถ้านหินและเถ้าชีวมวล ตอนที่ 1 : ผลกระทบของสัดส่วนผสมต่อกำลังอัด", วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา วสท., ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2551 หน้า 9-16
- [12] Rattanasak, U., "Microstructural Study of Pozzolan-Cement Composites in Combination with Superplasticising Admixtures", A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy Department of Chemical Engineering, School of Engineering, The University of Birmingham, England, 2004, 196 pp.

- [13] Davidovits, J., "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology", Proceedings: 2nd International Conference on Geopolymer, France: Paris, 1999, pp. 9-40.
- [14] Chindaprasit, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V., "Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer", Cement and Concrete Composites, Vol. 29, No. 3, 2006, pp. 224-229.
- [15] Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V., "The Effect of Mixture Composition and Curing Temperature on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete.", The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Indonesia: Bali, 2003, CMT 14-CMT 18. Conference on Structural Engineering and Construction, Indonesia: Bali, 2003, CMT 14-CMT 18.