

จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล ตอนที่ 1 : ผลกระทบของสัดส่วนผสมต่อกำลังอัด

Fly Ash and Bio-mass Ash Based Geopolymer Pastes Part I: Effect of Mix Proportion on Compressive Strength

เชียรศักดิ์ กลั้วประสิทธิ์¹ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล¹ ปริญา จินดาประเสริฐ² และ สมิตร ส่งพิริยะกิจ³

Thiensak Klabprasit¹ Chai Jaturapitakkul¹ Prinya Chindaprasirt² and Smith Songpiriyakij³

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

³ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

โทร.02-585-8541 ต่อ 6515 โทรสาร 02-587-6930

E-mail: ssy@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด (S/T) อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (FA: RHBA) ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2OSiO_2 : NaOH) โดยน้ำหนักต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ นอกจากนี้ยังศึกษาถึง ผลกระทบอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ได้หล่อขึ้นเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน

ผลการศึกษาพบว่า การใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าน้อยลง ซึ่งทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น ค่าอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ร้อยละ 40:60 ให้กำลังอัดของเพสต์สูงที่สุด โดยที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 510 กก/ชม² ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เริ่มมีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อมีอายุหลังจาก 28 วัน โดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุปลายดีขึ้น และการบ่มจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์/ เถ้าถ่านหิน/ เถ้าชีวมวล/ กำลังอัด

Abstract

The aims of this research is to study the influence of solid to total weight ratio (S/T), fly ash to rice husk-bark ash ratio (FA: RHBA), sodium hydroxide (NaOH) concentration and sodium silicate solution to sodium hydroxide ratio (Na_2OSiO_2 : NaOH) on compressive strength

of geopolymer pastes. Besides, the influence of curing temperature on those of pastes was investigated. Samples in 3 x 6 centimeters cylindrical shape were employed to measure compressive strength of pastes at 3, 7, 14, 28, and 90 days.

The results revealed that the increase of solid portion in paste enhanced compressive strength of geopolymer paste. This was due to the less water to binder ratio. Among varied FA: RHBA ratios, it was found that FA: RHBA of 40: 60 gave the highest compressive strength which was 510 ksc at 28 days. Degree of concentration of NaOH affected on compressive strength of geopolymer paste after 28 days. The higher alkalinity showed better compressive strength development at the later age. It was found that curing temperature at 60 °C for 24 hours boosted the rate of compressive strength development in short time.

Keywords: Geopolymer/ Fly Ash/ Biomass Ash/ Compressive strength

1. บทนำ

งานวิจัยหลายชิ้นพยายามที่จะผลิตคอนกรีตโดยใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยที่สุดหรือไม่ใช้เลย แต่ความพยายามนี้ยังไม่บรรลุผลจนกระทั่ง ในปี ค.ศ. 1984 Davidovits [1] ได้เสนอการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) มาทำปฏิกิริยากับดินขาว และพบว่าปฏิกิริยาดังกล่าวให้ผลผลิตเป็นวัสดุแข็งมีคุณสมบัติคล้ายผลผลิตที่ได้จากปูนซีเมนต์ และเกิดปฏิกิริยาแบบโพลิเมอร์ ภายหลังต่อมาเรียกวัสดุดังกล่าวว่าจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) มีงานวิจัยจำนวนมาก [1-13] ใช้ Metakaolin ทรายกรวดเตาถลุงเหล็ก หรือเถ้าถ่านหินเป็นสารตั้งต้น

จีโอโพลิเมอร์เป็นที่รู้จักกันในหลายๆ ชื่อ เช่น อัลคาไล-แอคทีเวทเต็ดซีเมนต์ (Alkali-activated Cement) หรือ วัสดุอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Materials) หรือ อินออร์กานิกโพลิเมอร์ (Inorganic Polymer) วัสดุดังกล่าวมีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกัน บางครั้งใช้เรียกปะปนกัน

มีรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกับจีโอโพลิเมอร์ในประเทศไทยพอสมควรแล้ว [2, 3, 13] งานวิจัยเหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้เถ้าถ่านหินจากแหล่งแม่เมาะเป็นสารตั้งต้น ซึ่งปัญหาที่พบคือเถ้าถ่านหินมีปริมาณของ CaO ที่สูงมากขึ้น ในปี พ.ศ. 2536 เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะมีปริมาณ CaO เฉลี่ยร้อยละ 6-8 เท่านั้น แต่ในปี พ.ศ. 2549 พบค่า CaO ที่สูงถึงร้อยละ 15-18

งานวิจัยบางฉบับ [10-13] แสดงให้เห็นว่า CaO ในเถ้าถ่านหินจะทำให้การก่อตัวเกิดขึ้นรวดเร็ว และรวมตัวเป็น CSH เจล ซึ่งเป็นโครงสร้างที่อ่อนแอกว่า จีโอโพลิเมอร์ งานวิจัยในครั้งนี้จึงใช้เถ้าชีวมวลเป็นส่วนหนึ่งของสารตั้งต้นเพื่อทดแทนเถ้าถ่านหิน โดยมีความมุ่งหมายที่จะปรับสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น และสังเกตถึงผลกระทบขององค์ประกอบทางเคมีที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ภายใต้อุณหภูมิบ่มที่ต่างกัน

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหิน และเถ้าชีวมวลที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์
2. เพื่อศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้นต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์
3. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกต ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์
4. เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิบ่มที่มีต่อการพัฒนา กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เถ้าถ่านหิน : หรือเถ้าลอย (Fly Ash : FA) จากโรงงานผลิตไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32.29 องค์ประกอบทางเคมี แสดงไว้ในตารางที่ 1

เถ้าชีวมวล : เป็นเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (Rice Husk – Bark Ash : RHBA) จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของบริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด จ. ฉะเชิงเทรา นำมาบดจนมีขนาดค้ำตะแกรง

เบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 2 องค์ประกอบทางเคมี แสดงไว้ในตารางที่ 1

NaOH : โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟ ชนิดเกล็ด ตาม มอก. 150-2518

Na₂OSiO₂ : สารละลายโซเดียมซิลิเกต ชนิดที่ 2 ตาม มอก. 433-2539 ซึ่งประกอบด้วย Na₂O ร้อยละ 15.36 และ SiO₂ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิ 20°C มีค่าเท่ากับ 1.60 และมีอัตราส่วนระหว่าง Na₂O : SiO₂ เท่ากับ 1 : 2.24 โดยโมล

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	LOI
RHBA	84.75	0.16	-	2.78	0.60	3.72
FA	36.02	20.58	15.91	18.75	2.24	0.07

3.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใช้ตัวอย่าง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ทำการทดสอบที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ตารางที่ 2 แสดงอัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สำหรับน้ำหนักเพสต์สด 1000 กรัม เมื่อหล่อเสร็จจะเขย่าจนแน่น และหุ้มตัวอย่างด้วยพลาสติกทั้งแบบหล่อ เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ การทดสอบและการบ่มทำในห้องที่มีอุณหภูมิ 27°C ยกเว้นตัวอย่างที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 °C

การศึกษารังนี้มีตัวแปรสำหรับการหาปฏิภาคของส่วนผสมทั้งสิ้น 4 ตัวแปร ซึ่งใช้สัญลักษณ์ คือ *XXFAXX* *XXM* (*XX*) (*H*) ตัวเลข “*XX*” หน้า FA หมายถึง ร้อยละของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด

ตัวเลข “*XX*” หลัง FA หมายถึง ร้อยละของอัตราส่วนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ด้วยเถ้าถ่านหินที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

ตัวเลข “*XX*” หน้า M หมายถึง ค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์) ที่ใช้ในการศึกษารังนี้

ตัวเลข “*XX*” ใน () หมายถึง อัตราส่วนสารโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก

ส่วนอักษร “*H*” ใน () หมายถึง การบ่มที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.1 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำหนักของสารตั้งต้นและน้ำหนักทั้งหมดต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การศึกษผลกระทบของอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้น (เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าถ่านหิน) และน้ำหนักทั้งหมด (Solid/Total Weight : S/T) ที่มีต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ทำโดยการควบคุมอัตราส่วนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน

ร้อยละ 40 ค่าความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วน $Na_2OSiO_2 : NaOH$ เท่ากับ 2.5 ให้คงที่เท่ากันตลอดทุกอัตราส่วน แล้วจึงแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด ในอัตราส่วนร้อยละ 55, 60, 65 และ 70

3.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณการใช้เถ้าถ่านหิน-เปลือกไม้ผสมกับเถ้าถ่านหิน ในอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าถ่านหิน-เปลือกไม้ ร้อยละ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 30:70 และ 20:80 โดยน้ำหนัก โดยควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 0.65 ค่าความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 18 โมลาร์ และใช้อัตราส่วน $Na_2OSiO_2 : NaOH$ เท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ต่อ 1000 กรัม

Symbol*	Mix Proportion (g.)			
	RHBA	FA	Na_2OSiO_2	NaOH
55FA40 18M (2.5)	330	220	321	129
60FA40 18M (2.5)	360	240	286	114
65FA40 18M (2.5)	390	260	250	100
70FA40 18M (2.5)	420	280	214	86
65FA100 18M (2.5)	-	650	250	100
65FA80 18M (2.5)	130	520	250	100
65FA60 18M (2.5)	260	390	250	100
65FA30 18M (2.5)	455	195	250	100
65FA20 18M (2.5)	520	130	250	100
65FA40 14M (0.5)	390	260	117	233
65FA40 14M (1.5)	390	260	210	140
65FA40 14M (3.5)	390	260	272	78
65FA40 10M (2.5)	390	260	250	100
65FA40 14M (2.5)	390	260	250	100
65FA60 10M (1.5)	260	390	210	140
70FA60 10M (1.5)	280	420	180	120
70FA60 10M (2.5)	280	420	214	86
70FA40 10M (2.5)	420	280	214	86

*หมายเหตุ เมื่อมี (H) ต่อท้ายหมายถึงการนำตัวอย่างเนื้อที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงปล่อยให้ในอากาศจนถึงวันทดสอบ

3.2.3 อิทธิพลของ $Na_2OSiO_2 : NaOH$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วน $Na_2OSiO_2 : NaOH$ ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ จะนำส่วนผสม 65FA40 14M มาแปรผันการใช้ $Na_2OSiO_2 : NaOH$ ในอัตราส่วน 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 โดยน้ำหนัก

3.2.4 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ จะนำส่วนผสม 65FA40 ~~XXM~~ (2.5) มาแปรผันความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ตามลำดับ

3.2.5 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึง ผลกระทบของอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้นต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ทำการศึกษาโดยแบ่งตัวอย่างอีกส่วนหนึ่ง หลังจากหล่อตัวอย่างเสร็จเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเข้าเตาอบที่มีอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำออกมาบ่มไว้ในอุณหภูมิห้องจนถึงกำหนดทดสอบ

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 อิทธิพลของอัตราส่วนน้ำหนักของสารตั้งต้นและน้ำหนักทั้งหมดต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ผลการศึกษาพบว่าการใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด (S/T) ร้อยละ 55, 60, 65 และ 70 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 3 วันเท่ากับ 61, 130, 243 และ 368 กก/ซม² และกำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยมีค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 345, 471, 624 และ 690 กก/ซม² ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 อาจกล่าวได้ว่าลักษณะการพัฒนากำลังอัดใกล้เคียงกับการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ปกติ จากข้อมูลนี้เมื่อนำมาแสดงดังรูปที่ 1 พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อลดอัตราส่วนน้ำหนักสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด โดยอัตราส่วนน้ำหนักสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดร้อยละ 55 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันต่ำที่สุดเท่ากับ 287 กก/ซม² และอัตราส่วนน้ำหนักสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดร้อยละ 70 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันมากที่สุดเท่ากับ 560 กก/ซม²

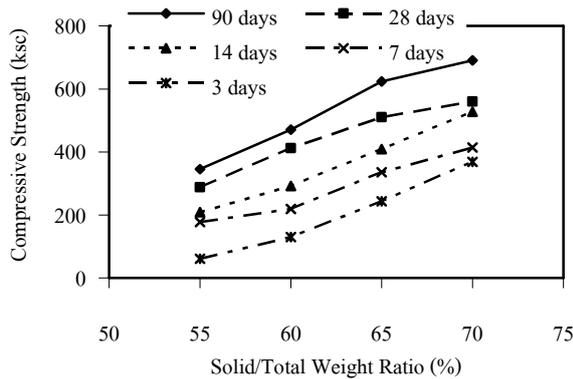
ตารางที่ 3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด

Symbol	Compressive Strength (ksc)				
	3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	90 Days
55FA40 18M (2.5)	61	177	209	287	345
60FA40 18M (2.5)	130	219	291	412	471
65FA40 18M (2.5)	243	335	409	510	624
70FA40 18M (2.5)	368	414	528	560	690

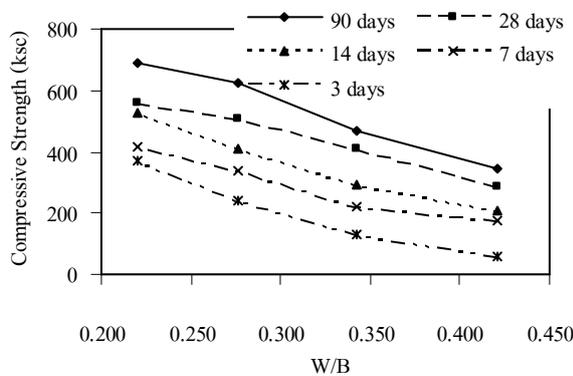
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองนี้กับงานวิจัยของ Hardjito และคณะ [11] พบว่าผลการทดลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน กล่าวคือเมื่อสัดส่วน S/T เท่ากับร้อยละ 65 และใช้ความเข้มข้น NaOH ตั้งแต่ 8-16

โมลาร์ มีกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าตั้งแต่ 300-700 กก/ซม² เช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้

อย่างไรก็ตามค่าอัตราส่วน S/T ก็ไม่ใช่ดัชนีที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดเพียงอย่างเดียว Swanepoel และ Strydom [12] ใช้อัตราส่วน S/T เท่ากับร้อยละ 70 แต่กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุ 28 วัน มีค่ามากที่สุดเพียง 70 กก/ซม² เท่านั้น แสดงให้เห็นว่านอกจากค่าอัตราส่วน S/T แล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด (S/T)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน W/B ปริมาณน้ำที่อยู่ในส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมด ร้อยละ 55, 60, 65 และ 70 แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.42, 0.34, 0.28 และ 0.22 ตามลำดับ รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน

น้ำต่อวัสดุประสานลดลง พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับกฎของ Abrams [14] ที่ว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่ามากขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลง

4.2 อิทธิพลของอัตราส่วนเถ้านหินและเถ้าชีวมวลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

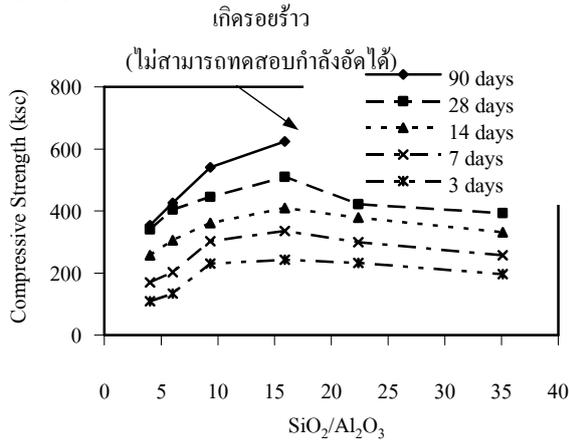
ตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีการพัฒนาขึ้นตามอายุการบ่ม โดยสัดส่วนที่ใช้เถ้านหินล้วนเป็นสารตั้งต้น 65FA100 18M (2.5) ให้ค่ากำลังอัดน้อยที่สุดเท่ากับ 109, 170, 257, 340 และ 353 กก/ซม² ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน และสัดส่วนที่ใช้อัตราส่วนเถ้านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ร้อยละ 40:60 เป็นสารตั้งต้น ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดเท่ากับ 243, 335, 409, 510 และ 624 กก/ซม² ที่อายุเดียวกัน หรือคิดเป็นร้อยละ 223, 328, 159, 150 และ 177 ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้านหินล้วนเป็นสารตั้งต้น (ตัวอย่าง 65FA100 18M (2.5))

จากงานวิจัยด้านจีโอโพลิเมอร์ที่ได้รายงานมาตลอดตั้งแต่ ค.ศ. 1984 [1-13] พบว่างานวิจัยทุกงานวิจัยใช้ สารตั้งต้นประเภทเถ้านหิน Metakaolin หรือตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งวัสดุที่กล่าวมา มีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน จึงทำให้ได้ค่าสัดส่วน SiO₂/Al₂O₃ ในช่วงแคบๆ ระหว่าง 1.50-4.50 เท่านั้น ในการทดลองนี้สามารถสร้างสัดส่วน SiO₂/Al₂O₃ ได้กว้างมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5 จากการศึกษา งานวิจัยที่ผ่านมา [6] พบว่าอัตราส่วนของ Si:Al จะบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุและประเภทของการใช้งานวัสดุนั้นๆ โดยที่อัตราส่วน 2:1 เหมาะสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต อัตราส่วน 3:1 สามารถใช้เป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาส และวัสดุสำหรับกระบวนการผลิตไททานเนียม และอัตราส่วน 20-35:1 ได้สารที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชื่อมขวาง (Crosslink) ในสองมิติมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฟเบอร์กลาสที่มีประสิทธิภาพสูง (High Performance Fiber Composites)

การศึกษาในงานวิจัยนี้ ใช้ค่า Si:Al มีค่าที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2.09:1 ถึง 18.27:1 ดังแสดงในตารางที่ 5 การปรับค่าของ Si:Al นี้ทำให้ได้สารประกอบโพลิเมอร์ ที่มีโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลิไซอะเลตที่แตกต่างกัน

รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ (SiO₂/Al₂O₃) ในช่วงระหว่าง 4.02-15.90 หรือเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนของ Si:Al มีค่าเท่ากับ 2.09-8.28 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วน Si/Al มีค่ามากขึ้น และมีกำลังอัดสูงที่สุดที่อัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 8.28 (SiO₂/Al₂O₃ มีค่าเท่ากับ 15.90) หลังจากนั้นเมื่อยิ่งเพิ่มอัตราส่วน Si/Al ให้สูงขึ้นอีก ในช่วง 8.27-18.27 (SiO₂/Al₂O₃ เท่ากับ 15.90-35.11) พบว่ากำลังอัดมีค่าต่ำลงในช่วงก่อนอายุ 28 วัน แต่พอจีโอโพลิเมอร์มีอายุ มากกว่า 28 วัน ขึ้นไปแล้ว ตัวอย่างที่ทำการทดสอบเริ่มแสดงให้เห็นถึงรอยร้าวได้อย่าง

ชัดเจน จนไม่สามารถทดสอบกำลังอัดได้ อาจกล่าวได้ว่าการใช้ปริมาณ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มากขึ้น จะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นแต่จะมีค่าลดลง เมื่อมีการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มากกว่าร้อยละ 70 ดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพียงอย่างเดียวหรือการใช้ วัสดุที่มีซิลิกา (Si) เป็นองค์ประกอบแต่ไม่มีอลูมินา (Al) เลย มาเป็นสาร ตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ทำให้พันธะการยึดเกาะกันของ โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ที่ได้ไม่ดีพอ ส่งผลให้โครงสร้างไม่เสถียร เกิด การขยายตัวและแตกร้าว รูปที่ 5 แสดงการแตกร้าวของจีโอโพลิเมอร์ เฟสค์เมื่อแช่น้ำ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์กับ

ซิลิกอน ไดออกไซด์ต่ออลูมินาออกไซด์ (SiO₂/Al₂O₃) เมื่อแปรผันปริมาณ การแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยเถ้าชีวมวล

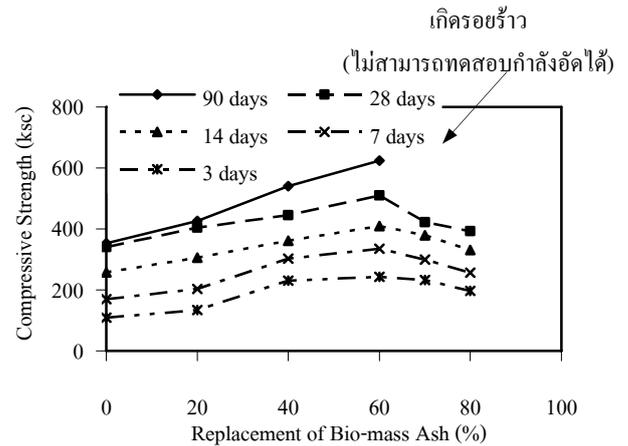
ตารางที่ 4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่ เถ้าถ่านหินด้วยเถ้าชีวมวล

Symbol	Compressive Strength (ksc)				
	3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	90 Days
65FA100 18M (2.5)	109	170	257	340	353
65FA80 18M (2.5)	134	203	306	404	426
65FA60 18M (2.5)	231	303	361	445	540
65FA40 18M (2.5)	243	335	409	510	624
65FA30 18M (2.5)	232	299	379	422	-
65FA20 18M (2.5)	196	257	331	393	-

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า SiO₂/Al₂O₃ กับ Si/Al ของ ส่วนผสมเมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยเถ้าชีวมวล

Symbol	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Si/Al
65FA100 18M (2.5)	4.03	2.09
65FA80 18M (2.5)	6.02	3.14
65FA60 18M (2.5)	9.34	4.86
65FA40 18M (2.5)	15.90	8.28
65FA30 18M (2.5)	22.39	11.65
65FA20 18M (2.5)	35.11	18.27

Davidovits [1] ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ที่ทำจาก ดินขาว โดยพบว่าจะมีการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น เมื่อ มีสัดส่วนของ SiO₂/Al₂O₃ อยู่ในช่วง 3.50-4.50 (Si:Al มีค่าประมาณ 1.8-2.3) แต่จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า การประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์ จะยิ่งมีมากขึ้น เมื่อสัดส่วนของ SiO₂/Al₂O₃ มีค่ามากขึ้นกว่ารายงานของ Davidovits กล่าวคือตั้งแต่ 4.03 ถึง 15.91 (Si:Al มีค่าเท่ากับ 2.09-8.28) และมีค่าลดลงเมื่อ SiO₂/Al₂O₃ มีค่ามากกว่านี้



รูปที่ 4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์เมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่ เถ้าถ่านหินด้วยเถ้าชีวมวล



รูปที่ 5 แสดงการแตกร้าวของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือก ไม้เพียงอย่างเดียวเป็นสารตั้งต้นเมื่อแช่น้ำ

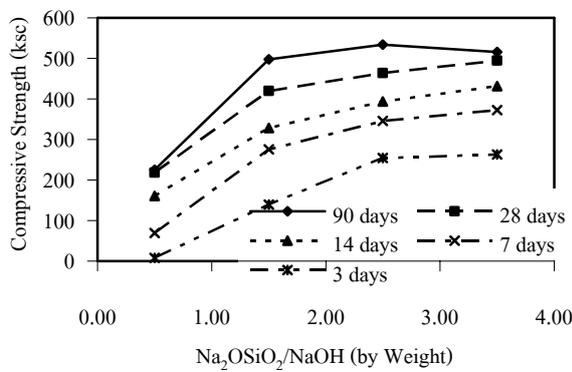
4.3 อิทธิพลของอัตราส่วน Na₂O/SiO₂: NaOH ต่อกำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์เฟสค์

ตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์มีการ พัฒนาสูงขึ้นตามอายุการบ่ม และอัตราส่วนเท่ากับ 0.5 ให้กำลังอัดน้อย ที่สุดคือ 8, 69, 160, 218 และ 225 กก/ซม² ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้กำลังอัดที่อายุ 90 วัน มีการเพิ่มขึ้นจาก 225 เป็น 497, 534 และ 516 กก/ซม² เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างสารโซเดียมซิลิเกต

ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5, 1.5, 2.5 และ 3.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ

ตารางที่ 6 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ โดยน้ำหนัก

Symbol	Compressive Strength (ksc)				
	3	7	14	28	90
	Days	Days	Days	Days	Days
65FA40 14M (0.5)	8	69	160	218	225
65FA40 14M (1.5)	139	276	328	420	497
65FA40 14M (2.5)	254	346	394	464	534
65FA40 14M (3.5)	263	373	432	494	516



รูปที่ 6 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ โดยน้ำหนัก

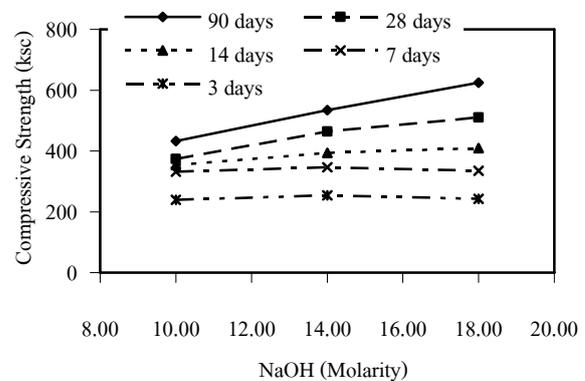
จากการศึกษาของ Hardjito และคณะ [11] พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.4 จะให้ค่ากำลังอัดน้อยกว่าอัตราส่วน 2.5 ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 170 และ 570 กก/ซม² เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8 โมลาร์ และยังพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 8 โมลาร์ เป็น 14 โมลาร์ ค่าอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.4 ยังคงให้ค่ากำลังอัดน้อยกว่าอัตราส่วน 2.5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 2.5 แต่ผลการศึกษานางานวิจัยนี้ไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Chindaprasirt และคณะ [13] ที่พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุ 7 วัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ มีค่าน้อยลง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ใช้แก้วแทนหินเท่านั้นในการศึกษา ดังนั้นในประเด็นนี้จึงจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกในอนาคต

4.4 อิทธิพลของความเข้มข้นของ NaOH ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

จากตารางที่ 7 และรูปที่ 7 เห็นได้ว่าอิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ส่งผลต่อกำลังในช่วงอายุ 3 และ 7 วัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chindaprasirt และคณะ [13] ที่พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน ทั้งยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hardjito และคณะ [11] ที่พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 7 วัน เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไม่ส่งผลต่อกำลังอัดมากนัก อย่างไรก็ตามงานวิจัยฉบับเดียวกันนี้ยังรายงานไว้ว่า ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตค่อนข้างมาก สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.4

ตารางที่ 7 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

Symbol	Compressive Strength (ksc)				
	3	7	14	28	90
	Days	Days	Days	Days	Days
65FA40 10M (2.5)	239	332	353	373	433
65FA40 14M (2.5)	254	346	394	464	534
65FA40 18M (2.5)	243	335	409	510	624



รูปที่ 7 อิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การศึกษานี้พบว่าเมื่อจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีอายุมากกว่า 7 วัน ผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีมากขึ้น เช่นที่อายุ 14 วัน กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ มีค่าเท่ากับ 353, 394 และ 409 กก/ซม² และที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 433, 534 และ 624 กก/ซม² ตามลำดับ

4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ แสดงในตารางที่ 8 ปรากฏว่าการบ่มจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ด้วยอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาบ่มต่อในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27 °C ทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์พัฒนาได้รวดเร็วยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การบ่มจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 27 °C ตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อายุต้นของเพสต์ เช่นตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 254 กก/ชม² ที่อายุ 3 วัน แต่เมื่อนำตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กำลังอัดเพิ่มเป็น 414 กก/ชม² ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของตัวอย่าง 65FA40 14M (2.5) ที่อายุ 14 วัน

ผลการศึกษาในงานวิจัยอื่น [2, 3, 8, 10, 11, 13] พบว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิสูง ทำให้การรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ สูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้นเช่นกัน

ตารางที่ 8 กำลังอัดของเพสต์เมื่อบ่มที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และพักในอุณหภูมิห้องจนถึงวันทดสอบ

Symbol	Compressive Strength (ksc)				
	3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	90 Days
65FA40 10M (2.5)	239	332	353	373	433
65FA40 10M (2.5) (H)	337	390	387	412	532
65FA40 14M (2.5)	254	346	394	464	534
65FA40 14M (2.5) (H)	414	400	427	427	614
65FA40 18M (2.5)	243	335	409	510	624
65FA40 18M (2.5) (H)	492	492	549	560	728

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาตลอดงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นต่อน้ำหนักทั้งหมดให้สูงขึ้น คือร้อยละ 55, 60, 65 และ 70 มีผลทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ
2. การปรับอัตราส่วนของ SiO₂/Al₂O₃ ให้มีค่าสูงขึ้นในช่วง 4.03-15.91 ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อปรับค่าสัดส่วนของ SiO₂/Al₂O₃ เพิ่มขึ้นเป็น 22.39 และ 35.11 ทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง
3. การใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ ไม่ส่งผลต่อกำลังอัดในช่วงอายุ 7 วัน แต่เมื่อจีโอโพลิเมอร์มีอายุ 28 วัน การใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10, 14 และ 18 โมลาร์ ทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 373, 464 และ 510 กก/ชม² ตามลำดับ
4. การบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้การพัฒนา กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการทุนพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปี พ.ศ. 2549 (MRG4980104) ผู้เขียนขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณ บริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Daviddovits, J., "Mineral Polymers and Methods of Making Them", USA, 1984, US Patent No. 4349386.
- [2] Songpiriyakij, S., "Effect of Temperature on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar", เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยะเวลา, 2548, หน้า CON30-CON34
- [3] เขียวศักดิ์ กลั่นประสิทธิ์, สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, "การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน", การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 2, อุดรธานี, 2549, หน้า MAT 53-58
- [4] Davidovits, J. , "Geopolymer: Inorganic Polymeric New Materials", Journal of Thermal Analysis, Vol. 37, 1991, pp. 1633-1656.
- [5] 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.
- [6] Davidovits, J., "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology", Proceedings: 2nd International Conference on Geopolymer, France : Paris, 1999, pp. 9-40.
- [7] Roy, D.M., "Alkali-Activated Cements Opportunities and Challenges", Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 2, 1999, pp. 249-254.
- [8] 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.
- [9] Wallah, S.E., Hardjito, D., Sumajouw, D.M.J., Rangan, B.V., "Creep Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete", Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, USA : Las Vegas, 2004, pp. 49-60.

- [10] Hardjito, D., Wallah, S.E., Rangan, B.V., “Study on Engineering Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete”, Journal of the Australasian Ceramic Society, Vol. 38, No. 1, 2002, pp. 44-47.
- [11] 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 Gropolymer Concrete.”, The Ninth East Asia-Pasific Conference on Structural Engineering and Construction , Indonesia : Bali, 2003, CMT 14-CMT 18.
- [12] Swanepoel, J.C., Strydom, C.A., “Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material”, Applied Geochemistry, Vol. 17, No. 8, 2002, pp. 1143-1148.
- [13] Chindapasirt, 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.
- [14] Abrams, D.A., “Design of Concrete Mixtures Bulletin 1”, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, Revised Edition, 1918, 20 pp.