

สารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ*

ปริญญ์ จินดาประเสริฐ¹⁾, ถนัดกิจ ชาริรัตน์²⁾ และ วรากรณ์ คุณาวนาภิจ²⁾

¹⁾ รองศาสตราจารย์ อาจารย์ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

²⁾ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

E-mail : prinya@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการทำสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ สารจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานใหม่ที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ สังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอลูมินา ในรูปอสัณฐานโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง จากการทดสอบพบว่าสามารถสังเคราะห์สารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะได้ โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และใช้อุณหภูมิ 60 °C ในการบ่ม นอกจากนี้ยังพบว่า ความละเอียดของเถ้าลอย ชนิดและความเข้มข้นของต่าง ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ และเวลาในการบ่มมีผลต่อกำลังของสารจีโอโพลิเมอร์

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์, เถ้าลอย, โซเดียมซิลิเกต, โซเดียมไฮดรอกไซด์

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 27 มิถุนายน 2548 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 4 ตุลาคม 2548

Geopolymer from Mae Moh Fly Ash *

Prinya. Chindapasirt¹⁾ Thanudkit Chareerat²⁾ and Waraporn. Kunawanakit²⁾

¹⁾ Associate Professor, Sustainable Infrastructure Research and Development Center (SIRDC), Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40002.

²⁾ PhD Students, Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, 40002

E-mail : prinya@kku.ac.th

Abstract

This research is a preliminary study on synthesizing geopolymer using Mae Moh fly ash. Geopolymer is a new cementitious material synthesized from raw materials consisting of amorphous silica and alumina activated with alkali solution. From the experiment, it was found that geopolymer could be synthesized from Mae Moh fly ash using sodium silicate solution and sodium or potassium hydroxide solution and 60°C curing temperature. Furthermore, it was found that fly ash fineness, concentration and type of alkali solution and the amount of superplasticizer affected the strength of the geopolymer.

Keywords : geopolymer, fly ash, sodium silicate, sodium hydroxide

* Original manuscript submitted: June 27, 2005 and Final manuscript received: October 4, 2005

บทนำ

การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใช้พลังงานสูงมากและเป็นกระบวนการที่ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาสู่บรรยากาศจำนวนมาก ปัจจุบันการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการแพร่กระจายของก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตประมาณ 1.35 พันล้านตันหรือประมาณ 7% ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดในบรรยากาศโลกและการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วโลกเพิ่มขึ้นปีละประมาณ 3% (Malhotra, 2002a) ดังนั้นจึงมีความพยายามในการพัฒนาวัสดุซีเมนต์ใหม่ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำลง เพื่อเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์และลดพลังงานจากการผลิต จึงได้มีแนวคิดในการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นสิ่งที่เหลือจากการเผาถ่านหินมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ จากข้อมูลทางสถิติพบว่าในปี ค.ศ. 1998 มีปริมาณเถ้าลอยมากกว่า 390 ล้านตัน แต่มีเพียง 14% ของเถ้าลอยเท่านั้นที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ (Malhotra., 1999) และมีการคาดการณ์ว่าในปี 2010 ปริมาณเถ้าลอยที่ผลิตขึ้นทั่วโลกจะมีประมาณ 780 ล้านตัน (Malhotra, 2002b)

จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) เป็นวัสดุใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (Silica, SiO_2) และอลูมินา (Alumina, Al_2O_3) ในรูปอสัณฐาน (amorphous) โดยการกระตุ้น (activate) ด้วยสารละลายต่างให้เกิดเป็นตัวประสาน ดังนั้นในจีโอโพลิเมอร์จึงไม่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ เถ้าลอยมีสารประกอบของซิลิกาและอลูมินาในปริมาณสูง สามารถนำมาทำจีโอโพลิเมอร์ได้ Palomo (1999) ได้อธิบายว่า การกระตุ้นเถ้าลอยให้ทำปฏิกิริยาเชื่อมประสานทำได้ 2 แบบ แบบแรกใช้สารละลายต่างความเข้มข้นต่ำ เมื่อใช้วัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกาและแคลเซียม (calcium) ปฏิกิริยานี้ทำให้ได้สารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, C-S-H) แบบที่สองใช้สารละลายต่างเข้มข้นสูงเป็นตัวกระตุ้น เมื่อวัสดุที่ใช้ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมประสาน (polymerization)

วัสดุจีโอโพลิเมอร์นี้ค้นพบเป็นครั้งแรกในยูเครนแต่เรียกว่า ดิน-ซีเมนต์ (soil-cement) ในปี ค.ศ. 1976 Davidovits (1999) ได้ทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของสารนี้ และได้ตั้งชื่อสารนี้ว่าจีโอโพลิเมอร์ เพื่อสะท้อนการนำวัสดุจากทางธรณีวิทยา (geology) มาใช้ เขาและผู้ร่วมงานได้เผยแพร่เอกสารและจดสิทธิบัตรหลายชิ้น และได้สาธิตให้เห็นประโยชน์ในการนำมาใช้งาน อย่างไรก็ตามการศึกษาปฏิกิริยาการเชื่อมประสานของซิลิกาและอลูมินายังค่อนข้างจำกัดและเป็นเรื่องใหม่ เฉพาะในปลายปี 1990 ได้มีการนำข้อมูลทางวิทยาศาสตร์มาเผยแพร่มากขึ้น

เถ้าลอย	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (μm)	ความละเอียดของเบส (cm^2/g)	ความถ่วงจำเพาะ
เถ้าลอยเดิม (OFA)	25	2,700	2.21
เถ้าลอยละเอียด (FFA)	9	4,500	2.41

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยที่ใช้

แก้วลอย	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
OFA	45.03	23.98	10.68	13.34	3.39	0.08	2.41	1.55	0.54
FFA	44.39	23.36	10.36	13.08	3.37	0.09	2.66	1.29	0.98

ตารางที่ 2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของแก้วลอย (%)

ใช้สารละลายต่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่บริสุทธิ์ 98% และสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มี Na₂O 15.32, SiO₂ 32.87 และน้ำ 51.81% โดยมวลเป็นตัวกระตุ้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ที่ความเข้มข้น 3 ระดับ คือ 10, 15 และ 20 โมลาร์(M) การละลายสารผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้น้ำกลั่นเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการปนเปื้อน และเตรียมสารละลายไว้อย่างน้อย 1 วันก่อนนำมาใช้ในการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์สดใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดโพลิเมอร์ (polymer based superplasticizer) ใช้ทรายแม่น้ำในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.80 และมีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33

การผสมและสัดส่วนผสม

ตารางที่ 3 แสดงส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ อัตราส่วนที่สำคัญได้สรุปไว้ในตารางที่ 4 ใช้แก้วลอย : ทราย:สารละลายโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 2:1:0.5 อัตราส่วนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนใช้เพื่อการทดลองเบื้องต้น เพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดที่สูงและสามารถเปรียบเทียบผลได้ดีเท่านั้น โดยยังไม่ได้นำถึงคุณสมบัติด้านอื่นและทางด้านราคา สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ที่ความเข้มข้น 3 ระดับ คือ 10, 15 และ 20 โมลาร์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10 % โดยน้ำหนักของแก้วลอย และสารลดน้ำพิเศษ 1.5, 2 และ 2.5 %โดยน้ำหนักของแก้วลอย โดยส่วนผสมที่ใช้แก้วลอยละเอียดและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 โมลาร์ มีความหนืดมากจึงเพิ่มสารลดน้ำพิเศษเป็น 5%โดยน้ำหนักของแก้วลอย

แก้วลอย	ความเข้มข้น NaOH	Na ₂ SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	W/B
OFA	10M	0.13	3.77	11.73	0.47	0.28
	15M	0.15	3.77	8.91	0.57	0.25
	20M	0.18	3.77	7.25	0.67	0.24
FFA	10M	0.13	3.82	11.71	0.48	0.28
	15M	0.15	3.82	8.90	0.59	0.26
	20M	0.18	3.82	7.24	0.69	0.24

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยแม่น้ำมะ

(อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกต/ โซเดียมไฮดรอกไซด์= 2.5)

ส่วนผสม	เถ้าลอย (กก./ ม³)	ทราย (กก./ ม³)	Na ₂ SiO ₂ (กก./ ม³)	NaOH (กก./ ม³)	KOH (กก./ ม³)	สารลดน้ำ พิเศษ (กก./ ม³)	บ่มที่ 60° ซ (วัน)
OFA10M2	1,333	667	333	133 (10M)	-	20	2
OFA15M2	1,333	667	333	133 (15M)	-	20	2
OFA20M2	1,333	667	333	133 (20M)	-	20	2
FFA10M2	1,333	667	333	133 (10M)	-	20	2
FFA15M2	1,333	667	333	133 (15M)	-	20	2
FFA20M2	1,333	667	333	133 (20M)	-	66.7	2
OFA10M4	1,333	667	333	133 (10M)	-	20	4
OFA15M4	1,333	667	333	133 (15M)	-	20	4
OFA20M4	1,333	667	333	133 (20M)	-	20	4
FFA10M4	1,333	667	333	133 (10M)	-	20	4
FFA15M4	1,333	667	333	133 (15M)	-	20	4
FFA20M4	1,333	667	333	133 (20M)	-	66.7	4
OFA10M2-1.5%	1,333	667	333	-	133 (10M)	20	2
OFA10M2-2%	1,333	667	333	-	133 (10M)	26.6	2
OFA10M2-2.5%	1,333	667	333	-	133 (10M)	33.3	2
OFA10M4-1.5%	1,333	667	333	-	133 (10M)	20	4
OFA10M4-2%	1,333	667	333	-	133 (10M)	26.6	4
OFA10M4-2.5%	1,333	667	333	-	133 (10M)	33.3	4

ตารางที่ 4 แสดงส่วนผสมของมอร์ตาร์ (Mortar mix proportion)

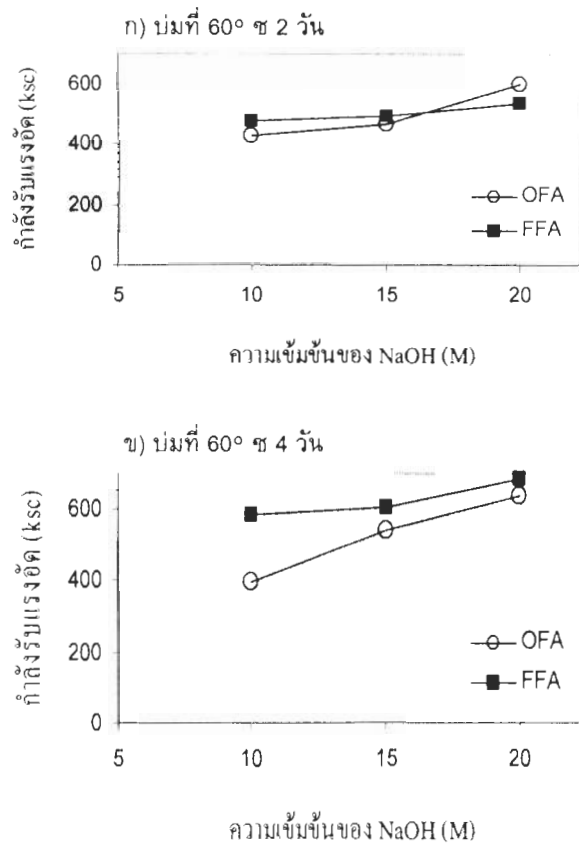
มวลรวมละเอียดและเถ้าลอยจะถูกผสมในเครื่องผสมเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำการผสมสารละลายต่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลิเกต และสารลดน้ำพิเศษเข้าด้วยกัน แล้วผสมกับมวลรวมให้เข้ากันเป็นเวลา 3-5 นาที ตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้ลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. โดยใช้การหล่อแบบ 2 ชั้น ในแต่ละชั้นทำการกระทุ้ง 32 ครั้ง การทดสอบแต่ละครั้งใช้ลูกบาศก์ 3 ตัวอย่าง หลังจากเทเข้าแบบจะปิดด้วยฟิล์มเพื่อป้องกันน้ำระเหยระหว่างการก่อตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชม. และนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 48 และ 96 ชั่วโมง ตัวอย่างจะถูกนำออกจากตู้อบแล้วปล่อยให้เย็นเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเปลี่ยนสถานะแวดล้อมที่เร็วเกินไป หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกนำออกจากแบบหล่อแล้วทิ้งไว้ที่ห้องทดลอง และทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์แสดงไว้ในรูปที่ 1-4 จะเห็นได้ว่าการทดลองนี้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยแม่เมาะขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นและชนิดของต่าง ความละเอียดของเถ้าลอย ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ และเวลาในการบ่ม

ความเข้มข้นและชนิดของด่าง

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าอัตราความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อใช้วัสดุพื้นฐานที่มีปริมาณของซิลิกาและอลูมินาคงที่ การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ เปลี่ยนไปและส่งผลโดยตรงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ส่วนผสมที่ใช้ความ

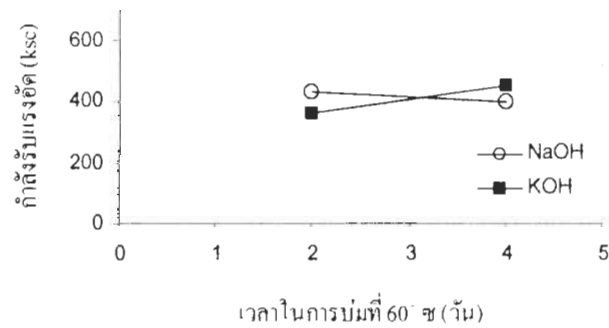


รูปที่ 1 กำลังรับแรงอัดและความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

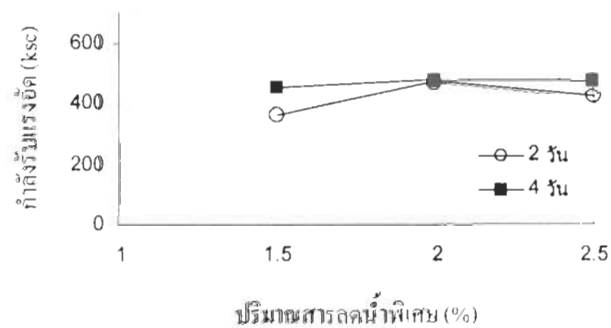
เข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10, 15 และ 20M เมื่อใช้แก้วลอย OFA และบ่มร้อน 2 วันให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 430, 465 และ 600 ksc ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมอื่นก็ให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงจะมีความสามารถในการชะละลายสารจำพวกซิลิกอนและอลูมิเนียมจากแก้วลอยสำหรับการ

เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization Reaction) ได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ (Hardjito et al. 2005)

รูปที่ 2 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดกับสารละลายไฮดรอกไซด์ต่างชนิดกัน ส่วนผสมใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10M เถ้าลอย OFA และบ่มร้อน 2 และ 4 วัน กำลังรับแรงอัดจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการบ่มร้อน ตัวอย่างที่ใช้สารละลาย NaOH และบ่มร้อน 2 วันจะให้กำลังที่สูง โดยที่ตัวอย่างบ่มร้อน 4 วันให้กำลังรับแรงไม่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับบ่มร้อน 2 วัน และจากผลการทดสอบที่จำกัดแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างที่ใช้สารละลาย KOH จะให้กำลังที่สูงขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดและชนิดของสารละลายไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดและปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

ความละเอียดของเถ้าลอย

จากรูปที่ 1 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จะขึ้นกับความละเอียดของเถ้าลอย โดยเถ้าลอยที่ละเอียดจะให้ กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเถ้าลอยหยาบ เนื่องจากเถ้าลอยละเอียดมีพื้นที่ผิวสูงและมีความ

ว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่าถั่วลันเตาที่หยาบ (Chindaprasirt et al, 2004) การเพิ่มเวลาในการบ่มทำให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ทำจากถั่วลันเตาจะเด้งสูงกว่าตัวอย่างที่ทำจากถั่วลันเตาอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำ เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10M กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ทำจากถั่วลันเตาจะเด้งบ่มร้อน 2 วันมีค่าเท่ากับ 395 ksc และเพิ่มขึ้นเป็น 580 ksc เมื่อบ่มร้อน 4 วัน

ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ

ผลการทดสอบกำลังอัดและปริมาณสารลดน้ำพิเศษได้แสดงไว้ในรูปที่ 3 ส่วนผสมใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10M ถั่วลันเตา OFA และบ่มร้อน 2 และ 4 วัน กำลังอัดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นจาก 1.5% เป็น 2% แต่กำลังอัดจะค่อนข้างคงที่เมื่อปริมาณสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้นอีกเป็น 2.5% การใช้สารลดน้ำพิเศษทำให้ส่วนผสมลื่นไหลได้ดี สามารถผสมและเทเข้าแบบหล่อได้ง่ายขึ้น ซึ่งส่งผลให้กำลังรับแรงอัดดีขึ้น ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าส่วนผสมที่ใช้ถั่วลันเตา FFA และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20M มีความหนืดมากและจำเป็นที่จะต้องเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษเป็น 5%โดยน้ำหนักของถั่วลันเตา จึงทำให้สามารถผสมและเทเข้าแบบหล่อได้ง่ายขึ้น สารลดน้ำพิเศษไม่ส่งผลแตกต่างในแง่ของกำลังรับแรงมากนักแต่ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์เป็นสำคัญ (Hardjito et al, 2005)

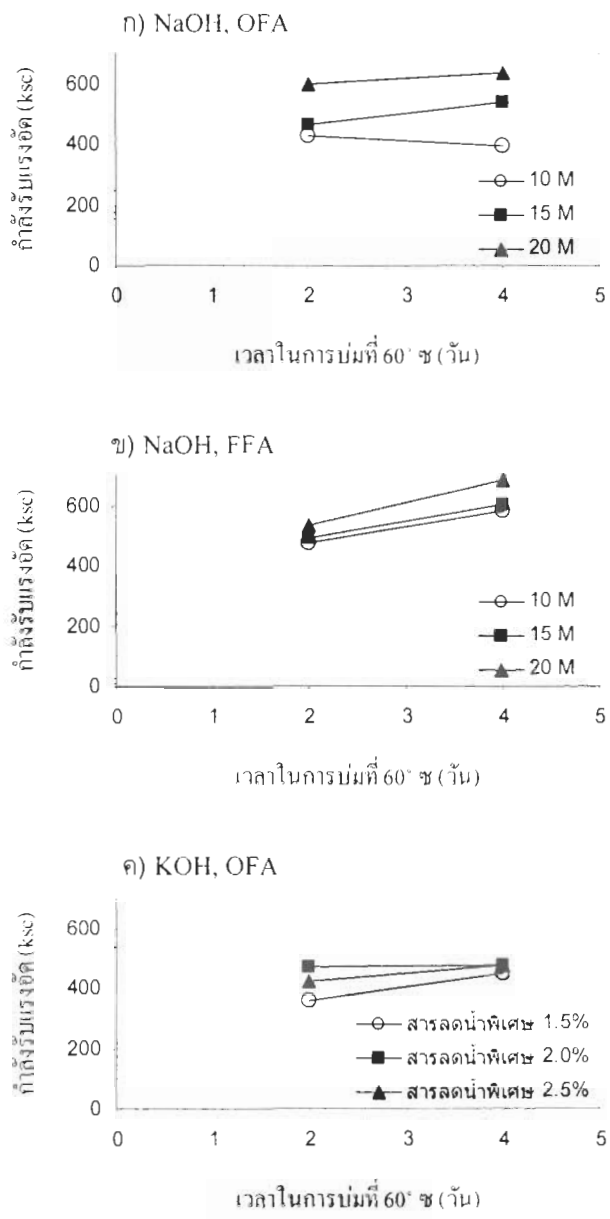
เวลาในการบ่ม

ผลการทดสอบกำลังอัดและเวลาในการบ่มได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 การเพิ่มเวลาในการบ่มทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น ทั้งส่วนผสมที่ใช้สารละลาย NaOH และ KOH ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 3 ระดับ คือ 10, 15 และ 20 M และที่ทำจากถั่วลันเตา OFA และ FFA โดยตัวอย่างที่ทำจาก FFAใช้สารละลาย NaOH สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20M และบ่มร้อนเป็นเวลา 4 วันให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 685 ksc การบ่มด้วยความร้อนเป็นการกระตุ้นปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ การเพิ่มเวลาในการบ่มทำให้ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เกิดได้สมบูรณ์ขึ้น เป็นผลให้กำลังรับแรงอัดดีขึ้น

สรุป

ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการพัฒนาการใช้ถั่วลันเตาแม่เมาะในการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์ที่ปราศจากปูนซีเมนต์ในส่วนผสม โดยสามารถให้ผลกำลังรับแรงอัดที่ดี มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นสูง และค่าอัตราส่วนความเข้มข้นในหน่วยโมลาร์ของ Na_2O ต่อ SiO_2 สูงขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น การใช้เวลามากขึ้นในการบ่มตัวอย่าง และถั่วลันเตาความละเอียดจะทำให้ได้กำลังสูงขึ้นอย่างมี

นัยสำคัญเช่นกัน ปริมาณของสารลดน้ำพิเศษไม่ส่งผลมากนักต่อกำลังอัดแต่มีผลต่อความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์



รูปที่ 4 กำลังอัดและเวลาในการบ่ม

อ้างอิง

- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., Sirivivatnanon, V., '**Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar**', *Cement and Concrete Research* 34, 2004, 1087-1092.
- Davidovits, J., 1999, '**Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology**', in *Geopolymer '99 International Conference*, eds. Joseph Davidovits, R. Davidovits & C. James, France, pp. 9-40.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., J. Sumajouw D. M., and Rangan B. V., 2005, '**On the Development of Fly Ash – Based Geopolymer Concrete**', *ACI Materials Journal*.
- Malhotra, V. M., 1999, '**Making Concrete "Greener" With Fly Ash**', *ACI Concrete International*, vol. 21, no. 5, pp. 61-66.
- Malhotra, V. M., 2002a, '**Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology**', *ACI Concrete International*, vol. 24, no. 7, p. 22.
- Malhotra, V. M., 2002b, '**High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete**', *ACI Concrete International*, vol. 24, no. 7, pp. 1-5.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W. & Blanco, M. T., 1999, '**Alkali-Activated Fly Ashes, A Cement for the Future**', *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 8, pp. 1323-1329.
- Swanepoel, J. C. & Strydom, C. A., 2002, '**Utilisation of fly ash in a geopolymeric material**', *Applied Geochemistry*, vol. 17, no. 8, pp. 1143-1148.
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน จดหมายข่าว ฉบับที่ 2, 3 มกราคม-มิถุนายน 2548, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 4 หน้า