

ความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไคอะตอมไมท์

ธนากร ภูเงินคำ^{*1)} และ ชีร์วัฒน์ สิ้นศิริ²⁾

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาถึงความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไคอะตอมไมท์ โดยใช้การแทนที่ไคอะตอมไมท์ในเถ้าลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก โดยการศึกษาใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา ทำการแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสาน เท่ากับ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.70 อัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ ร้อยละ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5, 10, 15 และ 20 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 24 ชั่วโมง ทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ และทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน

ผลการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.5-2.5 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดที่สูง ซึ่งมีค่ากำลังอัดระหว่าง 223-939 กก/ซม² นอกจากนั้นพบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมช่วยเพิ่มความสามารถทำงาน แต่ค่ากำลังอัดจะลดลง และค่ากำลังอัดมีแนวโน้มพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการบ่ม แต่ช่วงอายุปลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักหรือไม่เลย ผลการทดสอบยังพบอีกว่าการแทนที่ไคอะตอมไมท์ในเถ้าลอยร้อยละ 60 และ 80 มีความเหมาะสมทั้งการให้ค่ากำลังอัดและการไหลแผ่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์ ความสามารถทำงานได้ การไหลแผ่ กำลังอัด ไคอะตอมไมท์

^{*1)} นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จังหวัดนครราชสีมา 30000 อีเมลล์ : tp_civil@hotmail.com

²⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จังหวัดนครราชสีมา 30000 อีเมลล์ : sinsiri@g.sut.ac.th

* Corresponding Author

Workability and Compressive Strength of Geopolymer Mortar from Fly Ash Containing Diatomite

Tanakorn Phoo-ngernkham ^{*1)} and Theerawat Sinsiri ²⁾

Abstract

This article presented workability and compressive strength of fly ash based of geopolymer mortar containing diatomite as binder replacement at the rates of 0, 60, 80, and 100% by weight. Sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions were mixed together and then used as a liquid portion in the mixture in order to activate the geopolymerization. The ratios between Na_2SiO_3 and NaOH were varied, namesly, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 by weight whereas the ratios between liquid binder of 0.40, 0.50, 0.60, and 0.70 by weight were varied. The additional water was added to improve the workability of fresh geopolymer mortar. The ratios between additional water and binder were varied, that is to say, 0, 3, 6, 9, 12, and 15% by weight. In additional, the NaOH concentration of 5M, 10M, 15M, and 20M were also used as variables. Each mixture was separated and cured in the oven at the temperature of 60°C, 75°C, and 90°C for 24 h. Flowability of all fresh geopolymer mortars were investigated and the compressive strength test was applied at the ages of 7, 14, and 28 days.

The results revealed that the mixture having $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ of 1.5-2.5, 15M of NaOH concentration, and 75°C of curing temperature showed compressive strength between 223-939 ksc which high enough for using as normal strength concrete. Moreover, additional water could improve the workability of fresh geopolymer mortar, however, the compressive strength reduction could be observed. Additionally, the compressive strength of geopolymer mortar increased obviously at early age, however, at the later age it was slightly increased for some mixtures. Furthermore, the replacement of diatomite at the rate of 60 and 80% by weight were well suited for both compressive strength and workability.

KEYWORDS : Geopolymer, Workability, Flow test, Compressive strength, Diatomite

^{*1)}Graduate student, School of Civil engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima 30000. Email : tp_civil@hotmail.com

²⁾Assistant Professor, School of Civil engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima 30000. Email : sinsiri@g.sut.ac.th

* Corresponding Author

1. บทนำ

จีโอโพลิเมอร์ (Davidovits J., 1982) เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความนิยมในการพัฒนาขึ้นมาเพื่อเป็นทางเลือกใหม่สำหรับทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ (Davidovits J., 1994) อาจเนื่องจากในสภาวะปัจจุบันวัสดุเดิมที่ใช้อยู่มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบที่ใช้ผลิต อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิตตลอดจนโครงสร้างที่ต้องการให้มีลักษณะพิเศษ อาจมีความจำเป็นที่ต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น โดยการใช้วัสดุที่เหลือใช้หรือวัสดุตามธรรมชาติมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) เป็นการพัฒนาสารซีเมนต์ชนิดใหม่ที่ไมใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบซิลิกา (silica, SiO_2) และอลูมินา (alumina, Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ จีโอโพลิเมอร์ใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา และอลูมินาให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้สารซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการรับแรงได้ ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์จึงสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์สำหรับวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) (Hardjito D., 2004, Bakharev T., 2006 และปริญญา, 2004) แต่ขณะเดียวกันยังมีวัสดุปอซโซลานอีกหลายชนิดที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับเถ้าลอย (fly ash) เช่น ซีโอไลท์ (zeolite) ไดอะตอมไมท์ (diatomite) เพอร์ไลท์ (perlite) เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

ไดอะตอม (diatom) เป็นพืชเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก มีผนังเป็นฝาสิลิกาประกบกัน บางชนิดสามารถว่ายน้ำได้ บางชนิดอาศัยกระแสน้ำพัดพาไป มีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 2,000 micron พบในแหล่งน้ำทั่วโลกทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม เมื่อไดอะตอมตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกเป็นตะกอนสะสมกันจำนวนมากจนกลายเป็นทะเลหรือพื้นที่ทะเลสาบ แล้วในที่สุดกลายเป็นไดอะตอมไมท์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ดินเบา (diatomaceous earth) เพราะมี

ลักษณะเป็นดินที่เกิดจากซากไดอะตอมในแหล่งอะตอมเป็นดินหยุ เบา เนื้อพรุน มีลักษณะคล้ายขอล็ก มีปฏิกิริยาเชิงซ้ำ ไดอะตอมไมท์จะมีลักษณะต่างๆ กัน ตามแต่ชนิดของไดอะตอม แร่ดินเบาหรือไดอะตอมไมท์ (diatomite) เป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเชิงโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา มีความเปราะมากกว่าหินทั่วไป (Chaisena A., 2004 และบุรฉัตร, 2004) แหล่งดินเบาในประเทศไทยพบอยู่ในจังหวัดลำปาง โดยจะพบเป็นแหล่งเล็กใหญ่กระจัดกระจายอยู่เป็นบริเวณกว้างในแอ่งลำปาง และแอ่งเล็กๆ ใกล้เคียง (กรมทรัพยากรธรณี, 2003)

ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในงานจีโอโพลิเมอร์นั้นมียะเวลาก่อตัวที่รวดเร็วส่งผลให้ความสามารถทำงานได้น้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นที่การปรับปรุงคุณสมบัติของความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ อีกทั้งกำลังอัดพอเหมาะแก่การนำไปใช้งานได้ โดยจากลักษณะของไดอะตอมไมท์ที่มีน้ำหนักเบา ความพรุนสูง มีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้า จึงน่าที่จะปรับปรุงคุณสมบัติตรงประเด็นนี้ได้ อีกทั้งสามารถช่วยลดต้นทุนน้ำหนักลงได้

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงความสามารถทำงานได้และการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เมื่อใช้ไดอะตอมไมท์เป็นวัสดุตั้งต้น โดยวิเคราะห์ในเชิงกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ไดอะตอมไมท์ (DE) จากอำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดลพบุรี โดยนำมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้ธาตุหลักของไดอะตอมไมท์มีการแตกตัวที่ดีขึ้น (Lertkhositpong T. et al, 2009)

3.1.2 เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3.1.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งประกอบด้วย $\text{Na}_2\text{O} = 15.32\%$, $\text{SiO}_2 = 32.87\%$ และน้ำ = 51.81% โดยน้ำหนัก และมี pH = 9.05 ตรวจสอบโดยเครื่องพีเอชมิเตอร์

3.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

3.2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ ไดอะตอมไมท์แทนที่ในแก้วลยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ระยะเวลาทิ้งให้ตัวอย่างก่อตัวก่อนการเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างเท่ากับ 1 ชั่วโมง และเวลาการเร่งปฏิกิริยาของ ตัวอย่างเท่ากับ 24 ชั่วโมง ทุกอัตราส่วนผสม โดยทำการแปรผันตามผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดังนี้

3.2.1 Series A : แปรผันตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

3.2.2 Series B : แปรผันตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.70 โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

3.2.3 Series C : แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

3.2.4 Series D : แปรผันตามอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

3.2.5 Series E : แปรผันตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

3.2.6 Series F : แปรผันตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 7, 14 และ 28 วัน

3.2.7 Series G : แปรผันตามอัตราส่วนของ Si/Al (S/A) เท่ากับ 1.67, 3.21, 4.24 และ 5.93 ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

3.3 วิธีผสมและทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.3.1 การผสมทำในอุณหภูมิห้องมีค่าระหว่าง 25 ถึง 45 องศาเซลเซียส เพื่อให้สอดคล้องกับอากาศประเทศไทย

3.3.2 ขั้นตอนการผสมเริ่มต้นด้วยคลุกเคล้าระหว่างวัสดุประสานกับทรายให้เข้ากันดี ประมาณ 1 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เสร็จแล้วผสมอีกประมาณ 10 นาที

3.3.3 ทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C1437

3.3.4 ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109 ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้แบบอาคริลิก ขนาด 50x50x50 mm. หล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Mix ID.*	Mix Proportion (g.)			
	Binder	Sand	Na ₂ SiO ₃	NaOH
M-DE-0.5	400	600	66.67	133.33
M-DE-1.0	400	600	100.00	100.00
M-DE-1.5	400	600	120.00	80.00
M-DE-2.0	400	600	133.33	66.67
M-DE-2.5	400	600	142.86	57.14

*หมายเหตุ M คือค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 คืออัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemicals	DE (%)	FA (%)
SiO ₂	59.30	43.87
Al ₂ O ₃	10.00	26.33
Fe ₂ O ₃	18.50	10.81
CaO	1.20	12.69
SO ₃	0.02	2.74
LOI	8.10	1.23

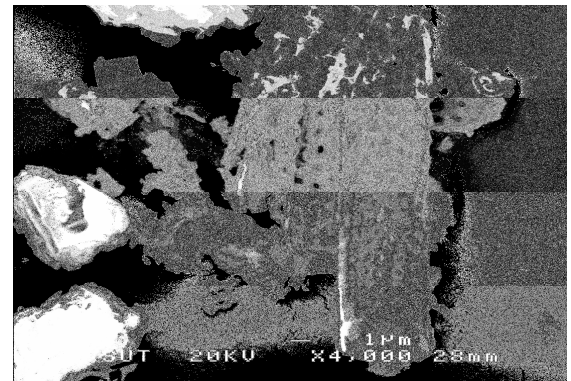
จากตารางที่ 2 พบว่าไดอะตอมไมท์มีองค์ประกอบทางเคมี SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃=87.80% จัดเป็นปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001) ซึ่งกำหนดให้สารประกอบหลักต้องมีค่ามากกว่า 70% และเช่นเดียวกันกับเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบทางเคมี SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃=81.01% เป็นปอซโซลาน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001)

สัดส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาของไดอะตอมไมท์เท่ากับ 5.93 และสัดส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาของเถ้าลอยเท่ากับ 1.67 จากงานวิจัยผลกระทบของสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน (เรียวกัดดี และคณะ, 2008) พบว่าสัดส่วนของซิลิกาต่ออลูมินามีผลต่อค่ากำลังอัดของวัสดุ ดังนั้นโดยสมมุติฐานเบื้องต้นของงานวิจัยนี้สัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาของไดอะตอมไมท์ที่สูงอาจจะส่งผลต่อค่ากำลังอัด

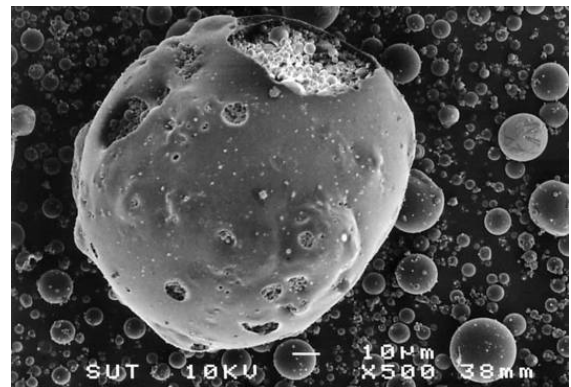
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Physical properties	DE	FA	Sand
Specific gravity	2.33	2.41	2.69
Bulk density (kg/m ³)	490	973	1,625
Median Particle Size (μm)	18.29	17.60	-

จากตารางที่ 3 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนาแน่นของไดอะตอมไมท์ มีค่าเท่ากับ 2.33 และ 490 กก/ม³ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยและทราย ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าประมาณ 3.32% และ 13.38% ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าประมาณ 49.64% และ 69.85% ตามลำดับ



รูปที่ 1 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์



รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย

ตารางที่ 4 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอายุการบ่ม

Symbol	Compressive strength (ksc)		
	7 days	14 days	28 days
15M-DE100-1.5	222.9	236.4	289.2
15M-DE80-1.5	299.3	321.7	404.4
15M-DE60-1.5	423.7	427.0	474.2
15M-DE0-1.5	809.7	834.4	810.8

ตารางที่ 5 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน

Addition water/binder

Symbol	Unit weight (kg/m ³)	Flow (%)	Compressive strength 7 days (ksc)
15M-DE100-1.5(0%)	2115	75	222.9
15M-DE80-1.5(0%)	2163	86	299.3
15M-DE60-1.5(0%)	2234	61	423.7
15M-DE0-1.5(0%)	2270	35	809.7
15M-DE100-1.5(3%)	2080	80	184.0
15M-DE80-1.5(3%)	2097	94	240.1
15M-DE60-1.5(3%)	2204	62	279.7
15M-DE0-1.5(3%)	2246	45	741.9
15M-DE100-1.5(6%)	2062	96	153.6
15M-DE80-1.5(6%)	2095	110	197.5
15M-DE60-1.5(6%)	2177	72	337.2
15M-DE0-1.5(6%)	2236	43	664.5
15M-DE100-1.5(9%)	2052	111	130.8
15M-DE80-1.5(9%)	2085	117	188.0
15M-DE60-1.5(9%)	2146	97	296.5
15M-DE0-1.5(9%)	2205	35	554.7
15M-DE100-1.5(12%)	2036	114	129.4
15M-DE80-1.5(12%)	2050	123	171.4
15M-DE60-1.5(12%)	2083	112	215.3
15M-DE0-1.5(12%)	2196	22	419.1
15M-DE100-1.5(15%)	2036	134	94.0
15M-DE80-1.5(15%)	2019	135	146.2
15M-DE60-1.5(15%)	2043	128	202.2
15M-DE0-1.5(15%)	2130	10	338.8

ตารางที่ 6 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

Symbol	Curing temp. (°C)	Unit weight (kg/m ³)	Compressive strength 7 days (ksc)
15M-DE100-1.5	60	2126	199.3
15M-DE80-1.5	60	2237	269.2
15M-DE60-1.5	60	2239	300.8
15M-DE0-1.5	60	2300	705.2
15M-DE100-1.5	75	2115	222.9
15M-DE80-1.5	75	2163	299.3
15M-DE60-1.5	75	2234	423.7
15M-DE0-1.5	75	2270	809.7
15M-DE100-1.5	90	2097	215.0
15M-DE80-1.5	90	2099	283.2
15M-DE60-1.5	90	2232	356.9
15M-DE0-1.5	90	2266	841.3

ตารางที่ 7 ผลทดสอบเมื่อแปรผันความเข้มข้น NaOH

Symbol	Unit weight (kg/m ³)	Flow (%)	Compressive strength 7 days (ksc)
5M-DE100-1.5	1934	115	145.5
5M-DE80-1.5	2020	126	232.4
5M-DE60-1.5	2098	89	267.3
5M-DE0-1.5	2120	84	574.6
10M-DE100-1.5	2099	89	198.2
10M-DE80-1.5	2107	105	243.6
10M-DE60-1.5	2127	51	341.7
10M-DE0-1.5	2218	48	677.0
15M-DE100-1.5	2115	75	222.9
15M-DE80-1.5	2163	86	299.3
15M-DE60-1.5	2234	61	423.7
15M-DE0-1.5	2270	35	809.7
20M-DE100-1.5	2166	36	221.7
20M-DE80-1.5	2239	25	262.7
20M-DE60-1.5	2265	13	340.1
20M-DE0-1.5	2349	0	706.7

ตารางที่ 8 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน

 $Na_2SiO_3/NaOH$

Symbol	Unit weight (kg/m ³)	Flow (%)	Compressive strength 7 days (ksc)
15M-DE100-0.5	2108	83	14.6
15M-DE80-0.5	2088	94	101.6
15M-DE60-0.5	2173	28	252.3
15M-DE0-0.5	2226	0	522.2
15M-DE100-1.0	2105	72	91.8
15M-DE80-1.0	2198	98	179.7
15M-DE60-1.0	2227	51	264.9
15M-DE0-1.0	2287	5	767.7
15M-DE100-1.5	2115	75	222.9
15M-DE80-1.5	2163	86	299.3
15M-DE60-1.5	2234	61	423.7
15M-DE0-1.5	2270	35	809.7
15M-DE100-2.0	2120	59	240.0
15M-DE80-2.0	2178	65	352.6
15M-DE60-2.0	2238	35	468.2
15M-DE0-2.0	2264	60	939.1
15M-DE100-2.5	2127	62	280.6
15M-DE80-2.5	2172	65	358.1
15M-DE60-2.5	2263	29	474.4
15M-DE0-2.5	2324	67	755.3

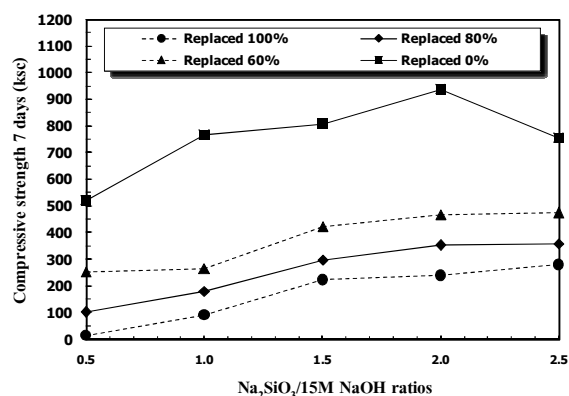
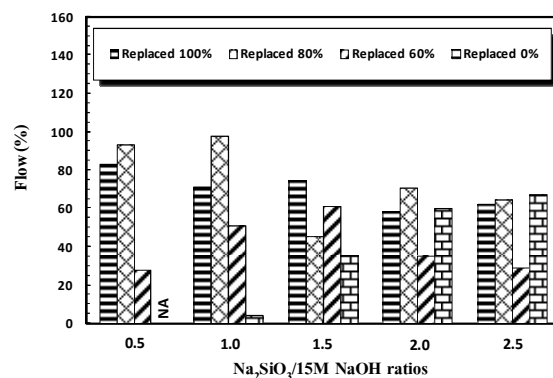
ตารางที่ 9 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน

Liquid alkaline/binder

Symbol	Unit weight (kg/m ³)	Flow (%)	Compressive strength 7 days (ksc)
15M-DE100-1.5(0.4)	2107	16	235.0
15M-DE80-1.5(0.4*)	2183	9	243.1
15M-DE60-1.5(0.4)	2269	4	419.4
15M-DE0-1.5(0.4)	2283	2	800.8
15M-DE100-1.5(0.5)	2115	75	222.9
15M-DE80-1.5(0.5)	2163	86	299.3
15M-DE60-1.5(0.5)	2234	61	423.7
15M-DE0-1.5(0.5)	2270	35	809.7
15M-DE100-1.5(0.6)	2015	96	84.1
15M-DE80-1.5(0.6)	2104	108	166.0
15M-DE60-1.5(0.6)	2150	82	284.3
15M-DE0-1.5(0.6)	2267	53	655.0
15M-DE100-1.5(0.7)	1994	126	22.5
15M-DE80-1.5(0.7)	2038	117	109.5
15M-DE60-1.5(0.7)	2144	109	219.5
15M-DE0-1.5(0.7)	2175	85	435.0

4.2 ผลกระทบของอัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$

การทดสอบที่แปรผันตามอัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$ ให้ความความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 พบว่าค่ากำลังอัดและความสามารถทำงานได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของโซเดียมซิลิเกตและปริมาณการแทนที่ไดอะตอมไมท์ สอดคล้องกับงานวิจัย (Sathonsaowaphak A. et al,2009 และ ธนกร และคณะ,2010)

รูปที่ 3 ผลกระทบของอัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$ ต่อกำลังอัดรูปที่ 4 ผลกระทบของอัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$ ต่อการไหลแผ่

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสม พบว่าที่อัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$ เท่ากับ 1.5-2.5 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 299-474 กก/ซม² และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 29-65% แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$ เท่ากับ 2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 468 กก/ซม² และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 35%

ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่ที่ดี แต่ค่ากำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดพบว่าการผสมค่อนข้างยากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ที่น้อย อีกทั้งการหลอมอร์ต้ารับลงแบบยากส่งผลให้ได้กำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ

ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่พอทำงานได้เนื่องจากปริมาณของ Na_2SiO_3 ที่มากขึ้นทำให้ส่วนผสมมีความหนืดมากขึ้น แต่ค่ากำลังอัดดีขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของ Na_2SiO_3 ที่มากขึ้นด้วย ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่ที่ดี แต่กำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 อย่างไรก็ตามการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีการแข็งตัวที่เร็ว เมื่อพิจารณาจากกระบวนการผสม

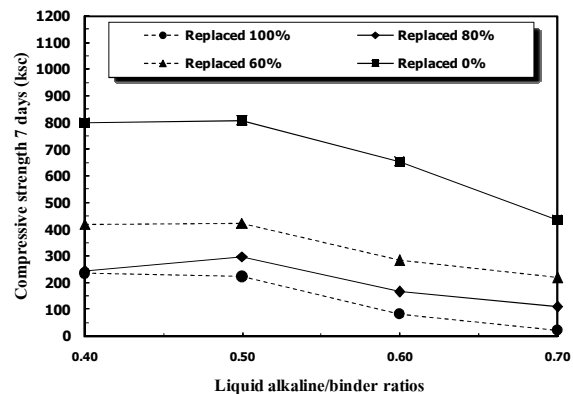
4.3 ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder

การทดสอบที่แปรผันตามอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 พบว่าอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมท์ส่งผลต่อค่ากำลังอัดและความสามารถทำงานได้ กล่าวคือความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น แต่ค่ากำลังอัดที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัย (Hardjito D. et al., 2008, Sathonsaowaphak A. et al., 2009 และธนากร และคณะ, 2010)

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมพบว่าที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 เป็นภาวะที่ดีที่สุด มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 299-423 กก/ซม² และค่าการไหลแผ่ 61-86%

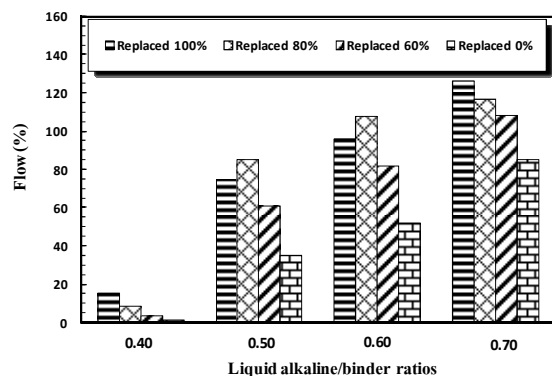
ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ส่วนผสมค่อนข้างแห้งมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่มีค่าน้อยมาก อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง

ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 ส่วนผสมมีความเหลวมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ที่สูง แต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและงบประมาณ อัตราส่วนนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน



รูปที่ 5 ผลกระทบของอัตราส่วน

Liquid alkaline/binder ต่อกำลังอัด

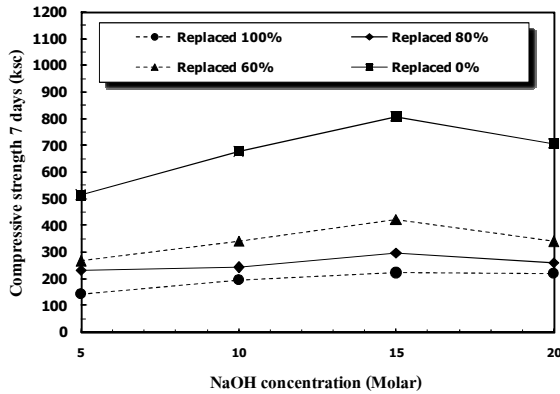


รูปที่ 6 ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ต่อการไหลแผ่

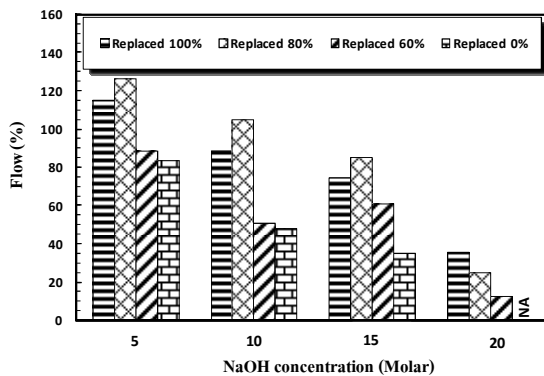
4.4 ผลกระทบของความเข้มข้น NaOH

การทดสอบที่แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมท์ส่งผลต่อค่ากำลังอัดและความสามารถทำงานได้ สอดคล้องกับงานวิจัย (Chindaprasit P. et al., 2007, Hardjito D. et al., 2008, Sathonsaowaphak A. et al., 2009, และธนากร และคณะ, 2010) กล่าวคือกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นแต่ความสามารถในการทำงานลดลง เป็นผลเนื่องจากความ

เข้มข้นที่สูงมีความสามารถในการชะลอของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากวัสดุตั้งต้นได้มาก อีกทั้งมีอัตราการเกิด ปฏิกิริยาที่รวดเร็ว (Rattanasak U. et al., 2009)



รูปที่ 7 ผลกระทบของความเข้มข้น NaOH ต่อกำลังอัด



รูปที่ 8 ผลกระทบของความเข้มข้น NaOH ต่อการไหลแผ่

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมพบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10-15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 243-423 กก/ซม² และค่าการไหลแผ่ 51-105% แต่ภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 423 กก/ซม² และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 61%

ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ มีค่าการไหลแผ่สูงแต่ค่ากำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่นๆ อาจเนื่องจาก

ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่น้อยทำให้ความสามารถในการชะลอของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากวัสดุตั้งต้นได้น้อย (Rattanasak U. et al., 2009) อีกทั้งความเข้มข้นที่น้อยจะมีปริมาณของน้ำในส่วนผสมมาก ส่งผลให้ความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นแต่กำลังอัดลดลง ในทำนองเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่สูงในงานคอนกรีตทั่วไป

ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 โมลาร์ การแทนที่ด้วยโดอะตอมไมท์ทั้งหมดจะมีค่าการไหลแผ่พอทำงานได้ แต่ค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดการผสมค่อนข้างยากเนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงส่งผลให้มีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วส่งผลให้ค่าการไหลแผ่น้อยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่นๆ อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง

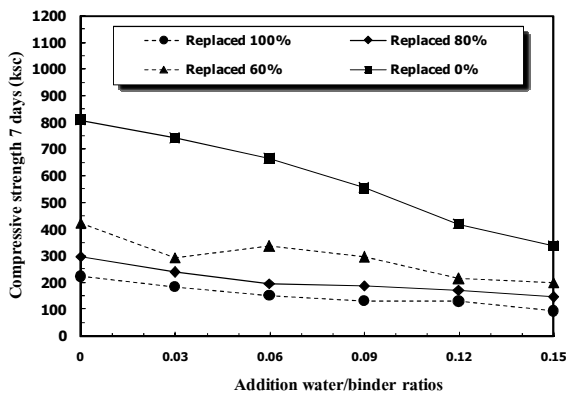
4.5 ผลกระทบของอัตราส่วน addition water/binder

ผลการทดสอบที่แปรผันตามอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมและปริมาณการแทนที่ของโดอะตอมไมท์ส่งผลต่อกำลังอัดและความสามารถทำงานได้ กล่าวคือความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัย (Chindaprasirt P. et al., 2007 และ Sathonsaowaphak A. et al, 2009)

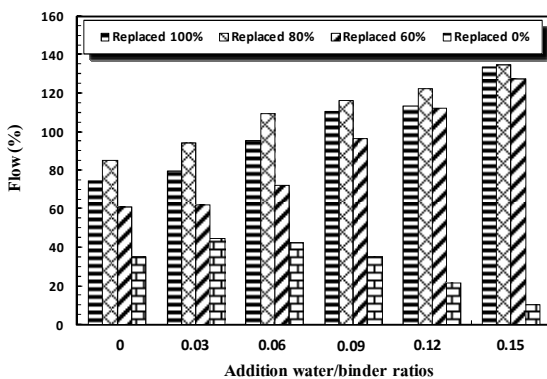
เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมพบว่าที่อัตราส่วนของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3-6% ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 197-337 กก/ซม² และค่าการไหลแผ่ 62-110%

ที่อัตราส่วนของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 9-15% การแทนที่ด้วยโดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีค่าการไหลที่สูง แต่ค่ากำลังอัดลดลง แต่ยังลดลงในสัดส่วนที่น้อย เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มน้ำในส่วนผสมของการ

แทนที่ไดอะตอมไมท์ทั้งหมดดูเหมือนไม่ค่อยจำเป็นนัก เนื่องจากการแทนที่ไดอะตอมไมท์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานอยู่แล้ว นอกจากนี้จะเป็นอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่น้อยๆ อาจจะส่งผลดีต่อทั้งค่าการไหลแผ่และกำลังอัด



รูปที่ 9 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อกำลังอัด

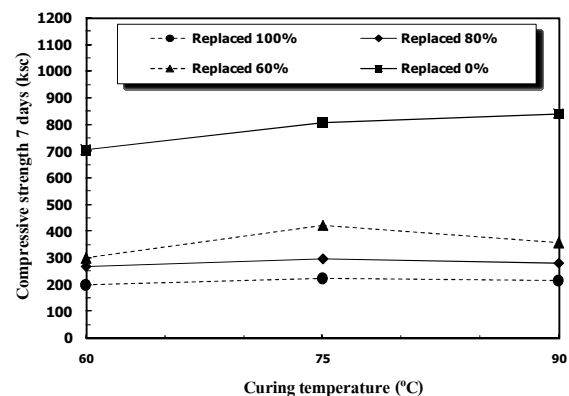


รูปที่ 10 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อการไหลแผ่

ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่เพิ่มขึ้นที่การเพิ่มปริมาณน้ำเท่ากับ 3% แต่หลังจากนั้นค่าการไหลลดลงเรื่อยๆ อีกทั้งค่ากำลังอัดลดลงด้วย อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่งระหว่างน้ำกับไฮดรอกไซด์ ทำให้ส่วนผสมมีการแข็งตัวที่เร็วขึ้น แต่ค่ากำลังอัดลดลงเนื่องจากการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเหมือนกับการปรับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ให้ลดลง ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำที่มากขึ้นในส่วนผสม

4.6 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

การทดสอบที่แปรผันอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย (Chindaprasirt P. et al., 2007, Hardjito D. et al., 2004, Hardjito D. et al., 2008, Bakharev T., 2006, Nguyen Van Chan et al., 2008, ธนากร, 2010 และประมวณ, 2007)



รูปที่ 11 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

ต่อกำลังอัด

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดที่แปรผันตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา และค่าการไหลแผ่ที่เหมาะสมของอัตราส่วนที่ใช้ พบว่าที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 มีความเหมาะสมซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 269-423 กก/ซม² และภาวะที่ดีที่สุดของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา คือ 75 องศาเซลเซียส ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 423 กก/ซม²

ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ

ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส การแทนที่ไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีลักษณะการบวมตัวของตัวอย่างเกิดขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการแทนที่ไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีระยะเวลาการแข็งตัวที่ช้า ประกอบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่สูงทำให้สูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วจึงเกิดการบวมตัว ส่วนการแทนที่เถ้าลอยทั้งหมดไม่เกิดการบวมตัวของ

ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 12 เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยทั้งหมดมีระยะการแข็งตัวที่เร็ว ด้วยสาเหตุนี้ตัวอย่างจึงแข็งตัวก่อนที่จะนำไปเร่งปฏิกิริยาในตู้อบ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความชื้นน้อยกว่าการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมด



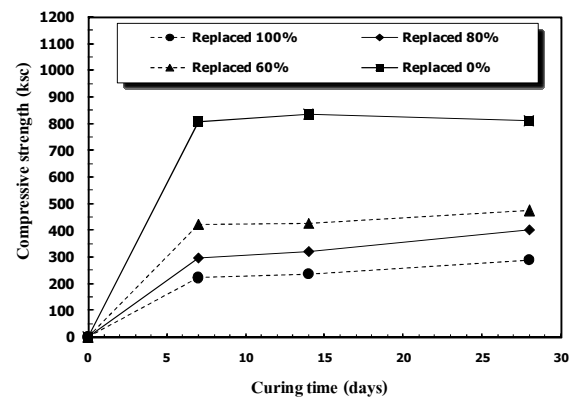
รูปที่ 12 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาต่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

อย่างไรก็ดีอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาควรคำนึงถึงการสลายตัวของปริมาณสารประกอบของวัสดุปอซโซลาน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาสารประกอบของวัสดุปอซโซลานมีการสลายที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส ดังนั้นควรใช้อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่ประมาณ 60-80% ของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบหลัก (Chaipanich A. and Nochaiya T., 2010 และ Wongkeo W. and Chaipanich A., 2010)

อีกทั้งการเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ให้น้ำในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ระเหยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กำลังอัดลดลงได้ (Chindaprasirt P. et al., 2007) และการเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกร้าวส่งผลเสียต่อโครงสร้างและคุณสมบัติกายภาพของจีโอโพลิเมอร์ (Jaarsveld J.G.S.Van. et al., 2002)

4.7 ผลกระทบของเวลาการบ่มตัวอย่าง

การทดสอบที่แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 13 ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาการบ่มที่อายุ 7 วัน หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากหรือไม่เลย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Hardjito D. et al., 2004, Wongpa J. et al., 2010 และ จักรพันธ์ และคณะ, 2010)

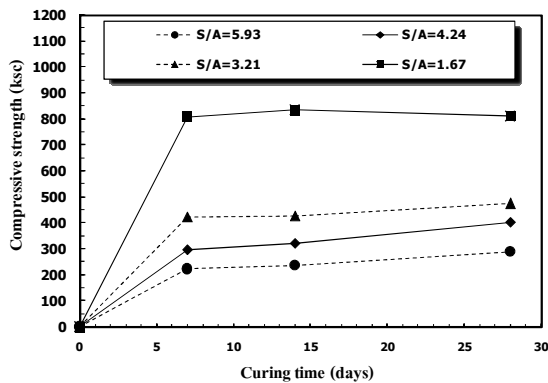


รูปที่ 13 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่มต่อกำลังอัด

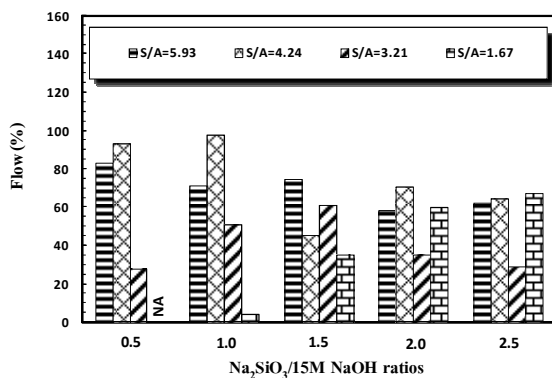
โดยสมมติฐานเบื้องต้นอาจเนื่องจากการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงทำให้มีการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็ว แต่อาจมีสารละลายบางส่วนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ทำให้ลักษณะโครงสร้างมีความพรุน อีกทั้งความหนาแน่นของโครงสร้างไม่ได้แตกต่างจากที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มีลักษณะของขนาดโพรงขนาดเล็กกลวง ส่งผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้มีค่ากำลังที่เพิ่มขึ้น (Chindaprasirt P. et al., 2005)

4.8 ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

การพัฒนา กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 14 พบว่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีการเลยในช่วงอายุปลาย (จักรพันธ์ และคณะ, 2010) และทุกส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันมีกำลังอัดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงถึงอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อกำลังอัดอย่างมาก



รูปที่ 14 ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อกำลังอัด



รูปที่ 15 ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อการไหลแผ่

อย่างไรก็ตามสาเหตุที่ทำให้ผลออกมาแตกต่างกันเป็นเพราะว่าค่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของงานวิจัยส่วนมากมีค่าไม่เกิน 5.0 ในขณะที่งานวิจัยนี้มีค่าสูงถึง 5.93 ซึ่งผลลัพธ์ที่ต่างกันนี้อาจเกิดขึ้นได้ อาจเนื่องจากอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงทำให้มีความต้องการปริมาณสารละลายสูงเพื่อให้เกิดค่าการไหลแผ่ที่สามารถทำงานได้ง่าย ซึ่งสารละลายส่วนเกินที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานขึ้นมีการทำปฏิกิริยาอีกครั้งกับอากาศซึ่งส่งผลให้เกิดการร้าว และหดตัว ส่งผลให้กำลังอัดลดลงแทนที่จะสูงขึ้นเหมือนกับการแทนที่ในปูนซีเมนต์ (Zuhua Z. et al, 2009)

นอกจากนั้นมิงงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงเทียบเท่ากับงานวิจัยนี้ และได้ให้ข้อสรุปไว้ว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟส และงานวิจัยของ Bakharev

T.(2006) และ Songpiriyakij S.(2010) ได้กล่าวไว้ว่าอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ลดลงในอลูมิโนซิลิเกตเจล ส่วนการบ่มที่อุณหภูมิห้องทำให้อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ในอลูมิโนซิลิเกตเจลมีการกระจายตัวที่ดีแต่ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่พบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ส่งผลต่อค่ากำลังอัด

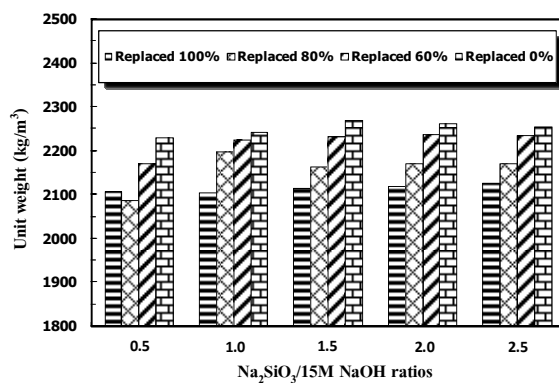
อีกทั้งยังพบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ต่ำกว่าจะมีค่ากำลังอัดสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Bakharev T., 2006 and Sathonsaowaphak A., 2009) ซึ่งได้มีการให้ข้อสรุปไว้ว่าการเพิ่มขึ้นของสารละลายในส่วนผสมทำให้เกิดโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีจำนวนโพรงที่มากขึ้นจึงส่งผลให้กำลังอัดน้อยลง ในทำนองเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ของคอนกรีตทั่วไป

นอกจากนี้จากงานวิจัยของจักรพันธ์ และคณะ (2010) ได้ให้ข้อสรุปไว้ว่าอัตราส่วน Liquid alkaline /binder ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไม่มากนัก แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงด้านกำลังอัด ขณะที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ไม่ได้ส่งผลให้เห็นอย่างชัดเจนด้านกำลัง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นอัตราส่วน Liquid alkaline /binder มากกว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

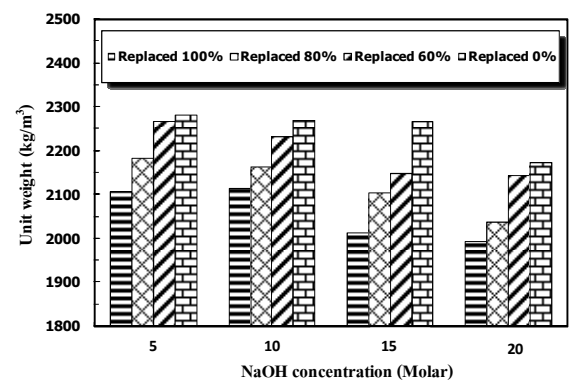
รูปที่ 15 แสดงถึงค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่ช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ที่ดีขึ้น แต่กำลังอัดลดลง ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

4.9 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

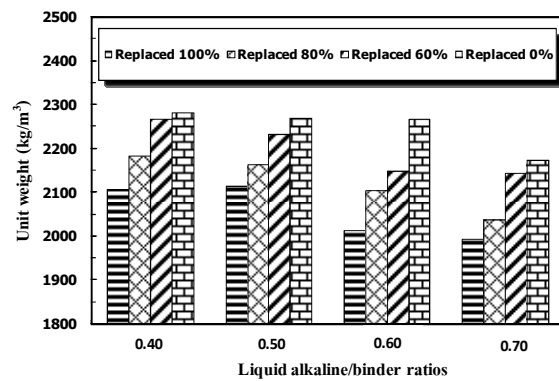
ค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แปรผันตามผลกระทบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 16-20 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อแทนที่ไดอะอะตอมไมท์ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เทียบกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมด นอกจากนั้นยังพบอีกว่าปริมาณของเหลวที่มากขึ้นในส่วนผสมทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักลดลงได้ อีกทั้งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา



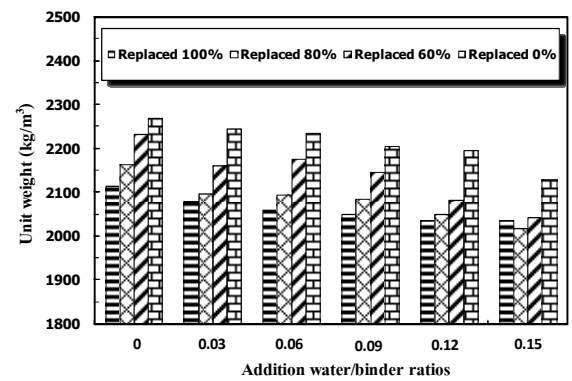
รูปที่ 16 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$



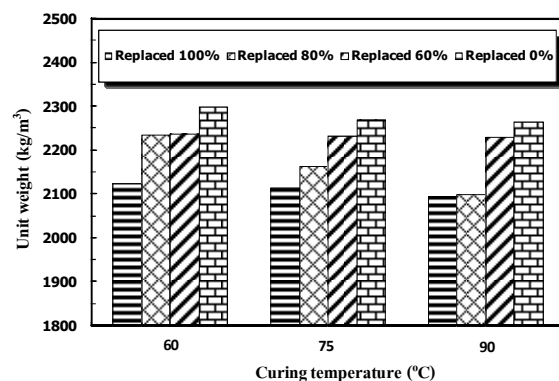
รูปที่ 19 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของความเข้มข้น NaOH



รูปที่ 17 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder



รูปที่ 20 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของอัตราส่วน Addition water/binder



รูปที่ 18 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

5 สรุปผลการทดสอบ

5.1 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีแนวโน้มต้องการปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตมากกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

5.2 การแทนที่ไดอะตอมไมท์ในเถ้าลอยร้อยละ 60 และ 80 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5-2.5 Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 10-15 โมลาร์ ให้ค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน ซึ่งมีค่ากำลังอัดและการไหลแผ่เท่ากับ 243-474 กก/ซม² และ 29-105% ตามลำดับ

5.3 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดคือ 75 องศาเซลเซียส

5.4 อัตราส่วน Liquid alkaline/binder ที่มากขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้แต่กำลังลดลง และ อัตราส่วน Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50-0.60 มีความเหมาะสมที่สุดทั้งค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ของ จีโโพลิเมอร์พาสต์ โดยมีความกำลังอัดและการไหลแผ่ระหว่าง 284-423 กก/ซม² และ 61-108% ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50

5.5 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ที่มีแนวโน้มที่ ต้องการระยะเวลาการบ่มมากขึ้น เพื่อให้มีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นเนื่องจากมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้ากว่าเล็กน้อย และกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะเวลาการบ่มมากขึ้น

5.6 อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถการทำงานให้ดีขึ้น แต่ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง

6 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนงานวิจัยครั้งนี้ และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย และผู้เกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้ทุกท่าน

7 เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี (2005). ไดอะตอมไมท์ [ออนไลน์].

<http://www.dmr.go.th/Interest/Data/TI2dataD.htm>

จักรพันธ์ วงษ์ศา ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2010). ผลกระทบระหว่างสัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ S/A ต่อรูปแบบ Spectrum และ กำลังอัดของจีโพลิเมอร์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6. อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. MAT 111-118

ธนากร ภูเงินข้า ธิรวัฒน์ สิ้นศิริ และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2010). การศึกษากำลังของจีโพลิเมอร์พาสต์จากซีโพลิโธรมชาติ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6. อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. MAT 119-124

เกียรติศักดิ์ กลับประสิทธิ์ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ปริญญาดินาประเสริฐ และสมิตร ส่งพิริยะกิจ (2008). ผลกระทบของสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาต่อกำลังอัดของจีโพลิเมอร์พาสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3. โรงแรมลองบีชการ์เดนโฮเทล แอนด์ สปา อำเภอพัทยา จังหวัดชลบุรี. MAT 24-29

บุรฉัตร ชัตรวีระ และณรงศักดิ์ มากุล (2004). สมรรถนะของแร่ดินเบาในปูนฉาบฉนวนกันความร้อนมวลเบา. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2. จังหวัดอุดรธานี. MAT 23-32.

ปริญญาดินาประเสริฐ (2004). สารจีโพลิเมอร์ วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ประเทศไทย

ประมวณ โฮมละคร และปริญญาดินาประเสริฐ. (2007). การศึกษาคุณสมบัติของจีโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมแร่ดินเบา. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3. จังหวัดอุบลราชธานี. MAT 37-40.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 109/C 109M-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.02.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 618-08a, Standard Test Method for Coal fly ash and raw or Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.08a.

American Society for Testing and Materials, ASTM C 1437-07, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.08a.

- Bakharev T., (2006). Thermal behavior of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research* ., 36(6) : 1134-1147
- Chaipanich A., Nochaiya T., (2010). Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes. *J Therm Anal Calorim.*, 99 : 487-493.
- Chaisena A. et al., (2004). Effect of thermal and acid treatments on some physic-chemical properties of Lampang diatomite. *Journal Science Technology.*, 11 : 289-299.
- Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C., Sinsiri T., (2005). Effect of fly ash finness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement&Concrete Coposites.*, 27: 425-428
- Chindaprasirt P., Chareerat T., Sirivivatnanon V., (2007). Workability and strength of coarse fly ash geopolymer. *Cement&Concrete Coposites.*, 29 : 224-229
- Davidovits, J., (1982). Mineral polymers and methods of making them. United states Patent no.4349386.
- Davidovits, J., (1994). Properties of geopolymer cements. *Proceedings of the first international conference on alkaline cements and concrete.*, Kiev state Technical University., 1 : 131-149
- Davidovits J., (1999). Chemistry of geopolymetric systems, Terminology. *Proceedingd* : 2nd International Conference on Geopolymer. France:Paris : 9-40.
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV., (2004). On the development of fly ash based geopolymer concrete. *ACI Master J.*, 101(6) : 467-472
- Hardjito D., Chua Chung Cheak., Carrie Ho Lee Ing., (2008). Strength and setting times of low calcium fly ash based geopolymer mortar. *Modern Applied Science.*, 2(4) : 3-11
- Jaarsveld J.G.S.van., Deventer J.S.J.van., Lukey G.C., (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymer. *Chemical Engineering Journal.*, 89 : 63-73.
- Lertkositpong T., Pimraksa K., Chindaprasirt P., (2009). Synthesis of lightweight geopolymer materials from diatomaceous earth. *Annual Concrete Conference 5, Nakhonratsima* ., MAT 96-101 (In Thai)
- Nguyen Van Chanh et al., (2008). Geopolymer concrete. *The 3rd ACF International Conference ACF/VCA 2008* : 235-241
- Rattanasak U., Chindaprasirt P., (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering.*, 22 : 1073-1078.
- Sathonsaowaphak A., Chindaprasirt P., Primraksa K., (2009). Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. *Journal of Hazardous Materials.*, 168(1) : 44-50
- Songpiriyakij S., Kubprasit T., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P., (2010). Compressive strength and degree of reaction of bio-mass and fly ash based geopolymer. *Construction and Building Materials.*, 24 : 236-240
- Wongkeo W., Chaipanich A., (2010). Compressive strength, microstructure and analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume. *Materials Science and Engineering A.*, 527 : 3676-3684.

- Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Chindapasirt P. (2010). Compressive strength and , modulus of elastic and water permeability of inorganic polymer concrete. *Materials and Design.*, 24 :236-240
- 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