

รหัสโครงการ SUT7-712-54-12-07



รายงานการวิจัย

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ปอซโซลานธรรมชาติ ในงานจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

(A Comparative Study of Natural Pozzolans in Geopolymer Mortar)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-712-54-12-07



รายงานการวิจัย

การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ปอซโซลานธรรมชาติ ในงานจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

(A Comparative Study of Natural Pozzolans in Geopolymer Mortar)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร. ชีรวัฒน์ สินศิริ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2556

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบการใช้ปอลิโซลานธรรมชาติในงานจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ สามารถดำเนินการได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และการสนับสนุนจากหน่วยงานหรือบุคคล ซึ่งผู้วิจัยขออนุญาติเอ่ยนามดังต่อไปนี้

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ โดยทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งบประมาณ พ.ศ. 2552-2553 ซึ่งได้รับการจัดสรรมาจากงบประมาณแผ่นดิน โดยผ่านการประเมินข้อเสนอโครงการจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งผู้วิจัยทำงานอยู่ ที่สนับสนุนการดำเนินงานตลอดจนสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยตั้งแต่ต้นจนเสร็จสิ้นโครงการ

ขอขอบคุณ ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ที่กรุณาให้ความเห็นและคำแนะนำที่ดีและเป็นประโยชน์ต่อโครงการหลายครั้ง ทั้งเรื่องการตีพิมพ์และความร่วมมือในการทำวิจัยร่วมกัน

นอกจากนั้นแล้ว ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายธนากร ภูเงินขำ ที่ได้ช่วยเหลือในการจัดทำตัวอย่างทดสอบและทดสอบอย่างขยันขันแข็งและอดทน ซึ่งทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด ประโยชน์อันใดอันเนื่องมาจากงานวิจัยเล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอน

ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ

หัวหน้าโครงการวิจัย

บทคัดย่อ

ปัจจุบันในงานก่อสร้างอาคารทั่ว ๆ ไป นิยมเลือกใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน แต่เนื่องจากในกระบวนการผลิตนั้นได้ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการเกิดภาวะเรือนกระจกถึงปีละ 13,500 ล้านตัน อีกทั้งวัสดุที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบ ดังนั้นจึงมีความพยายามในการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยการใช้วัสดุที่เหลือใช้หรือวัสดุตามธรรมชาติมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสารซีเมนต์ชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

สารจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สังเคราะห์ได้จากซิลิกาและอลูมินา กระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน จะได้สารซีเมนต์ที่สามารถรับกำลังได้เช่นเดียวกับซีเมนต์ วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานอย่างแพร่หลาย ได้แก่ แกลบยิบ แต่ยังมีวัสดุปอชโซลานอีกหลายชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานได้ เช่น ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาเป็นหลักเช่นเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในแกลบยิบที่มีผลต่อความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วน โขเคียมซิลิเกตต่อ โขเคียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5-2.5 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75⁰C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดที่สูง มีค่าระหว่าง 234-939 ksc และค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่พัฒนาเร็วในช่วงแรกของอายุการบ่ม แต่ช่วงปลายจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนักหรือไม่มีเลย อีกทั้งผลการศึกษายังพบอีกว่าการแทนที่ไคอะตอมไมต์เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในแกลบยิบร้อยละ 60 มีความเหมาะสมทั้งการให้ค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาก่อตัวและกำลังอัดเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน

Abstract

Currently, Portland cement is the one generally used for construction and building. However, the process of producing Portland cement has also resulted in environmental problems and the release of a large amount of green house gases to the order of approximately 13,500 million tons annually. Moreover, the raw materials to produce it are also limited. Therefore, the effort now focuses on how to replace constituent parts of Portland cement with by-products or natural materials. Recently, a new cementitious material called geopolymers has been developed which may do away with the use of Portland cement as binder.

This geopolymer was synthesized from silicon and aluminum activated with a high alkaline solution and developed using heat. It has a similar strength to cement. One of the most widely used cementitious materials is fly ash. However, Instead of fly ash, other materials such as diatomite, perlite, and natural zeolite can also be used as source materials for geopolymer because they are similarly rich in silicon and aluminum. Thus, the objective of this research was to study the effect of diatomite, perlite, and natural zeolite on the workability and compressive strength of geopolymer mortar if when used to replace fly ash.

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 a high compressive strength which ranged between 234-939 ksc. Additionally, the compressive strength of geopolymer mortar obviously increased at the early age. However, at the later age, it slightly increased or did not increase at all for some mixtures. Furthermore, the replacement of diatomite, perlite, and natural zeolite at the rate of 60% by weight of binder was well-suited for both compressive strength and workability.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 จีโอโพลิเมอร์.....	5
2.2 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับจีโอโพลิเมอร์.....	6
2.3 ปอชโซลาน.....	8
2.4 ปอชโซลานธรรมชาติ.....	16
2.5 ไคอะตอมไมต์.....	17
2.6 เพอร์ไลต์.....	21
2.7 ซีโอโลส.....	29
2.8 ถ้ำลอย.....	34
2.9 สรุปปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
2.10 สรุปแนวคิดที่ได้จากปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.11	กรอบแนวคิดที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	45
3.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
3.2	ข้อกำหนดของงานวิจัย.....	47
3.3	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
3.3.1	การทดสอบคุณสมบัติของทราย.....	48
3.3.2	การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุประสาน.....	50
3.4	การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	51
3.4.1	การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก.....	51
3.4.2	การทดสอบหาค่าการไหลแผ่.....	52
3.4.3	การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว.....	52
3.4.4	การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	53
3.5	สัญลักษณ์ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	54
3.6	วิธีดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	54
3.7	อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	55
4	ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล.....	59
4.1	ลักษณะทางกายภาพวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	59
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของไดอะทอมไมด์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และถ้ำลอย.....	60
4.3	ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไดอะทอมไมด์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และถ้ำลอย.....	62
4.4	ความเป็นผลึกของไดอะทอมไมด์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และถ้ำลอย.....	63
4.5	คุณสมบัติด้านการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	65
4.5.1	ผลกระทบของอัตราส่วน โขะเต็มชนิดเกิดต่อ โขะเต็มไฮดรอกไซด์.....	65
4.5.2	ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.3	ผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	71
4.5.4	ผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....	74
4.6	คุณสมบัติด้านระยะการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	77
4.7	คุณสมบัติด้านกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	80
4.7.1	ผลกระทบของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	80
4.7.2	ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....	84
4.7.3	ผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	87
4.7.4	ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา.....	90
4.7.5	ผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....	94
4.7.6	ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม.....	97
4.7.7	ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา.....	99
4.8	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	102
4.8.1	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไดอะตอมไมต์.....	102
4.8.2	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์.....	104
4.8.3	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	107
4.9	โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	110
4.10	วิเคราะห์ราคาของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	117
5	บทสรุป.....	120
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	120
5.1.1	จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไดอะตอมไมต์.....	120
5.1.2	จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์.....	121
5.1.3	จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	122
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	123

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	124
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	129
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์.....	136
ภาคผนวก ค. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	154
ประวัติผู้วิจัย.....	179



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008).....10
2.2	ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)..... 11
2.3	ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008).....13
2.4	คุณสมบัติของเถ้าลอยและปอซโซลานธรรมชาติ (ASTM C 618, 2008)..... 16
2.5	แสดงคุณสมบัติทางเคมีของโคอะตอมไมต์ลำปาง (Pimraksa, K., 2008).....20
2.6	องค์ประกอบเคมีของหินเพอร์ไลต์ (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546).....24
2.7	แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์ (จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ, 2548)..... 25
2.8	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับ ปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546).....26
2.9	คุณสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ (วัฒนชัย อยู่ในวงศ์, 2546)..... 32
2.10	แสดงการเปรียบเทียบสารประกอบของซีโอไลต์ (ไกรภพ อินทร์แสวง, 2550)..... 32
3.1	อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....56
3.2	ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง.....56
3.3	ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์.....57
3.4	ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....57
3.5	ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์..... 57
3.6	ผลจากการเพิ่มปริมาณน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ ในส่วนผสม..... 58
3.7	ผลจากการที่ตัวอย่างมีอายุการบ่มเพิ่มขึ้น.....58
4.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....59
4.2	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF).....61
4.3	ตารางเปรียบเทียบราคาของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....118
4.4	การเปรียบเทียบราคาค่าต้นทุนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์..... 118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของไคอะตอมไมต์.....	130
ก.2 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์.....	130
ก.3 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	131
ก.4 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย.....	131
ก.5 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของทราย.....	132
ก.6 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของไคอะตอมไมต์.....	133
ก.7 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของเพอร์ไลต์.....	133
ก.8 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	134
ก.9 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอย.....	134
ก.10 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของทราย.....	135
ข.1 ผลการทดสอบระยะการก่อตัวของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์.....	137
ข.2 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วน โขเดียมซิลิเกตต่อ โขเดียมไฮดรอกไซด์.....	137
ข.3 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วนอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....	138
ข.4 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วนอัตราส่วนความเข้มข้นของ โขเดียมไฮดรอกไซด์.....	139
ข.5 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วนอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....	140
ข.6 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วน โขเดียมซิลิเกตต่อ โขเดียมไฮดรอกไซด์.....	141
ข.7 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....	142
ข.8 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา.....	143
ข.9 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามความเข้มข้นของ โขเดียมไฮดรอกไซด์.....	144

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.10 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วนอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....	145
ข.11 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามระยะเวลาการบ่ม.....	146
ข.12 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วน โขเดียมซิติเกตต่อ โขเดียมไฮดรอกไซด์.....	147
ข.13 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วนอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....	148
ข.14 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา.....	149
ข.15 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามความเข้มข้นของ โขเดียมไฮดรอกไซด์.....	150
ข.16 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วนอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....	151
ข.17 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามระยะเวลาการบ่ม.....	152
ข.18 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม ระยะเวลาการบ่ม ที่อัตราส่วน โขเดียมซิติเกตต่อ โขเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.5 ความเข้มข้น โขเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ และอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 75°C.....	153

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ (www.cordi.geopolymere.com).....5
2.2	โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์ (www.cordi.geopolymere.com).....6
2.3	Poly (Sialate-siloxo) ซิลิกาต่ออลูมินา 2:1 (www.cordi.geopolymere.com)..... 6
2.4	ขั้นตอนการเกิดวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (www.journal.thaitca.or.th)..... 7
2.5	แสดงภาพขยายขนาดไมโครของลักษณะโครงสร้างของปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์ เปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (www.journal.thaitca.or.th)..... 8
2.6	ภาพถ่าย SEM ของเถ้านหินจากโรงไฟฟ้าอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2548)..... 12
2.7	ภาพถ่าย SEM ของเถ้านหินที่มีลักษณะแบบ Plerospheres (ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2548).....15
2.8	ลักษณะของไคอะตอมไมต์ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ออนไลน์, 2543)..... 18
2.9	แสดงชั้นของไคอะตอมไมต์ (สสวท., ออนไลน์, 2550)..... 19
2.10	ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมต์ (สสวท., ออนไลน์, 2550).....19
2.11	ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมต์จากแหล่งลำปาง (Pimraksa, K., 2008)..... 20
2.12	แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์ (ณรงค์ศักดิ์ นันทกำภีรา และคณะ, ออนไลน์, 2547).....21
2.13	แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์สีเขียวแถบแดง..... 22
2.14	แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์สีเขียว..... 22
2.15	แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์สีขาว..... 23
2.16	แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ (อุษา อ้นทอง และคณะ, 2549)..... 30
2.17	ลักษณะของซีโอไลต์ (ไกรภพ อินทร์แสวง และคณะ, 2550)..... 33
2.18	ภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy (SEM) ของเถ้าลอย (www.environnet.in.th)..... 34
3.1	แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย..... 45
3.2	วัสดุปอชโซลานที่ใช้ในงานวิจัย..... 46
3.3	สารละลายชนิดต่างที่ใช้ในงานวิจัย.....47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	แบบหล่ออาคริลิก ขนาด 50x50x50 mm.....48
3.5	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย..... 49
3.6	การทดสอบหาขนาดคละและ โมดูลัสความละเอียดของทราย..... 49
3.7	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของวัสดุประสาน..... 50
3.8	ชุดทดสอบหาความละเอียดของวัสดุประสาน ด้วยวิธีของเบลน (Blaine fineness)..... 51
3.9	เครื่องชั่งสำหรับหาหน่วยน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียด 0.01 กรัม..... 51
3.10	ชุดทดสอบการไหลแผ่..... 52
3.11	ชุดทดสอบแบบไวแคต (Vicat apparatus)..... 53
3.12	เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive mechine 500 Tons)..... 53
4.1	การกระจายอนุภาคของวัสดุ.....60
4.2	ภาพถ่ายขยายของไดอะทอมไมต์..... 62
4.3	ภาพถ่ายขยายของเพอร์ไลต์..... 62
4.4	ภาพถ่ายขยายของซีโอไลต์ธรรมชาติ..... 63
4.5	ภาพถ่ายขยายของแก้วลอย..... 63
4.6	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไดอะทอมไมต์..... 64
4.7	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเพอร์ไลต์..... 64
4.8	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ธรรมชาติ.....65
4.9	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแก้วลอย.....65
4.10	ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วลอยผสม ไดอะทอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์.....66
4.11	ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์.....67
4.12	ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์.....67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	เปรียบเทียบค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ของการแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60.....68
4.14	ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไดอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....69
4.15	ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....70
4.16	ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....70
4.17	เปรียบเทียบค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน ของการแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60.....71
4.18	ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสม ไดอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....72
4.19	ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....73
4.20	ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....73
4.21	เปรียบเทียบค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ของการแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60.....74
4.22	ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไดอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....75
4.23	ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....75
4.24	ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25	เปรียบเทียบค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตาม ผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ของการแทนที่ โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60.....76
4.26	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากถ้ำลอยผสมโคอะตอมไมต์.....77
4.27	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์.....78
4.28	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ.....78
4.29	เปรียบเทียบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ของการแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60.....79
4.30	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมโคอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์.....80
4.31	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์.....81
4.32	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์.....81
4.33	เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตาม ผลกระทบของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ของการแทนที่ โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60.....83
4.34	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมโคอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....84
4.35	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....85
4.36	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37	เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตาม ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน ของการแทนที่ ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60.....86
4.38	ค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไคอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....87
4.39	ค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....88
4.40	ค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์.....88
4.41	เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตาม ผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ของการแทนที่ ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60.....89
4.42	ค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไคอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา.....91
4.43	ค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา.....91
4.44	ค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา.....92
4.45	ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาต่อจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ จากถ้ำลอยผสมไคอะตอมไมต์.....92
4.46	เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตาม ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา ของการแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60.....93
4.47	ค่ากำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไคอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....95
4.49	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน.....95
4.50	เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตาม ผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ของการแทนที่ ไดอะทอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60.....96
4.51	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะทอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม.....97
4.52	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม.....98
4.53	ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม.....98
4.54	เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตาม ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม ของการแทนที่ไดอะทอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60.....99
4.55	ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ต่อกำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะทอมไมต์.....100
4.56	ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ต่อกำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์.....100
4.57	ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ต่อกำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ.....101
4.58	โครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลิไซอะเลต (Davidovits, J., 1999).....101
4.59	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะทอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์.....102
4.60	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะทอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.61 หน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสม ไคอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	103
4.62 หน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสม ไคอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา.....	104
4.63 หน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	105
4.64 หน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....	105
4.65 หน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	106
4.66 หน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา.....	106
4.67 หน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	107
4.68 หน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน.....	108
4.69 หน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	108
4.70 หน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา.....	109
4.71 เปรียบเทียบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์ ของการแทนที่ ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60.....	109
4.72 เปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอย ผสมไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.5 และอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C.....	110

สารบัญรูป (ต่อ)

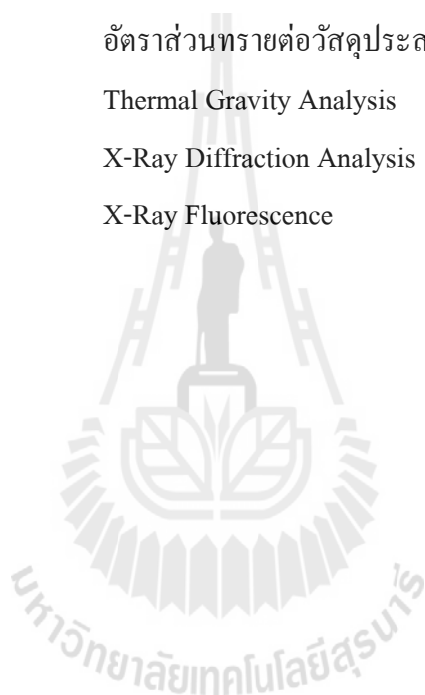
รูปที่	หน้า	
4.73	เปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลอถยผสมไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.5 และอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	111
4.74	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลอถยผสมไคอะตอมไมต์.....	112
4.75	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลอถยผสมเพอร์ไลต์.....	112
4.76	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลอถยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	113
4.77	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลอถยผสมไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	113
4.78	ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลอถยผสมไคอะตอมไมต์.....	115
4.79	ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลอถยผสมเพอร์ไลต์.....	115
4.80	ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลอถยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	116
4.81	ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลอถย.....	116

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	American Society for Testing Material
CAH	Calcium Aluminate Hydrate
CSH	Calcium Silicate Hydrate
Ca(OH) ₂	Calcium hydroxide
cm ² /g	ตารางเซนติเมตรต่อกรัม
DE	ไดอะตอมไมต์
DTA	Differential Thermal Analysis
EPA	Expanded Perlite Aggregate
FA	เถ้าลอย
FA100	ส่วนผสมควบคุมโดยการใช้เถ้าลอยทั้งหมดในส่วนผสม
FADE60	ส่วนผสมโดยการแทนที่ไดอะตอมไมต์ในเถ้าลอยร้อยละ 60
FADE80	ส่วนผสมโดยการแทนที่ไดอะตอมไมต์ในเถ้าลอยร้อยละ 80
FADE100	ส่วนผสมโดยการแทนที่ไดอะตอมไมต์ในเถ้าลอยร้อยละ 100
FAPL60	ส่วนผสมโดยการแทนที่เพอร์ไลต์ในเถ้าลอยร้อยละ 60
FAPL80	ส่วนผสมโดยการแทนที่เพอร์ไลต์ในเถ้าลอยร้อยละ 80
FAPL100	ส่วนผสมโดยการแทนที่เพอร์ไลต์ในเถ้าลอยร้อยละ 100
FANZ60	ส่วนผสมโดยการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60
FANZ80	ส่วนผสมโดยการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 80
FANZ100	ส่วนผสมโดยการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 100
ksc	กิโลกรัมต่อตารางเมตร
kg/m ³	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
LOI	Loss On Ignition
L/B	อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน โดยน้ำหนัก
M	ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์
MPa	เมกะปาสกาล
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Na ₂ SiO ₃	โซเดียมซิลิเกต
NP	วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ
NZ	ซีโอไลต์ธรรมชาติ
PL	เพอร์ไลต์
SEM	Scanning Electron Microscope
SZ	ซีโอไลต์สังเคราะห์
S/B	อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน โดยน้ำหนัก
TGA	Thermal Gravity Analysis
XRD	X-Ray Diffraction Analysis
XRF	X-Ray Fluorescence



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในงานก่อสร้างอาคารทั่ว ๆ ไป ส่วนใหญ่ที่เราพบเห็นมักนิยมก่อสร้างจากการใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะส่วนที่เป็นโครงสร้างหลักขององค์อาคารนั้น ๆ เช่น ฐานราก คาน เสา และพื้น เป็นต้น แสดงให้เห็นว่าความนิยมในการเลือกใช้วัสดุคอนกรีต (ปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์ หิน ทราย น้ำ และสารผสมเพิ่ม) และเหล็ก (เหล็กเส้นกลม เหล็กเส้นข้ออ้อย และเหล็กรูปพรรณ) เป็นวัสดุที่มีความนิยมมากที่สุด ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมสำคัญของคอนกรีตซึ่งแน่นอนว่าต้องมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นโดยอัตโนมัติเพื่อนำมาผลิตคอนกรีตเพื่อใช้ในงานโครงสร้างอาคาร แต่เนื่องจากในระหว่างขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นได้ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด (McCaffrey, R., 2002) อีกทั้งวัสดุที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบ ดังนั้นจึงมีความพยายามในการลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง เช่นการพัฒนาคอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลาน (Pozzolan) ปริมาณสูงและการพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เลย โดยการใช้วัสดุที่เหลือใช้หรือวัสดุตามธรรมชาติ เป็นการช่วยลดมลภาวะจากการทิ้งกากเหลือใช้ ซึ่งสารซีเมนต์ดังกล่าวได้แก่ จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นการพัฒนาสารซีเมนต์ชนิดใหม่ที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบซิลิกา (Silica, SiO_2) และอลูมินา (Alumina, Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ จีโอโพลิเมอร์ใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอลูมินาให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้สารซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการรับแรงได้ ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์จึงสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์พาสต์ ผลที่ได้้นอกจากเป็นการพัฒนาด้านวิศวกรรมแล้วยังได้ผลตอบแทนในการได้ช่วยลดมลภาวะให้กับสิ่งแวดล้อมเพื่อลดปัญหาโลกร้อน (Global warming) ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่มากในขณะนี้ ดังนั้นจึงเห็นว่าการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์โดยการศึกษากำลังอัดซึ่งเป็นคุณสมบัติอันสำคัญเป็นสิ่งที่จะต้องพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างเหมาะสมและเกิดความเชื่อมั่นในวงการอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือก แร่ซีโอไลต์ แร่เพอร์ไลต์ และแร่ไดอะตอมไมต์ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม ประเภทปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan) โดยจัดเป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate) หรือสารอลูมิโนฟอสเฟต (Alumino phosphate) จึงน่าจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี งานวิจัยในประเทศจีนได้มีการนำปอซโซลานจากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตมากมาย เช่น นำมาใช้ในงานคอนกรีตมวลเบา ทำเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลต์ในคอนกรีต ลดปัญหาการเกิดการร้าว ลดการแยกตัว ลดการซึมผ่าน เพิ่มความทนทาน และเพิ่มกำลัง เป็นต้น แต่การนำสารปอซโซลานธรรมชาติมาเป็นวัสดุในการทำจีโอโพลิเมอร์ยังมีน้อยอยู่ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในงานจีโอโพลิเมอร์นั้นมีระยะเวลาก่อตัวที่รวดเร็ว ส่งผลให้ความสามารถทำงานได้น้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นศึกษาถึงคุณสมบัติการรับกำลังอัดและความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ให้เหมาะแก่การนำไปใช้งานได้ นอกจากนี้สมบัติที่ดีคือมีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูง มีความแข็งแรง จึงน่าจะมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในงานจีโอโพลิเมอร์ และทำให้ได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีหน่วยน้ำหนักที่เบาลง นอกจากนี้ข้อมูลงานวิจัยทางด้านจีโอโพลิเมอร์ยังมีแนวโน้มที่ดีและเป็นที่ต้องการอีกมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อหาวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติในการรับกำลังอัด และความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ พร้อมหาอัตราส่วนที่เหมาะสมเหมาะแก่การนำไปใช้งาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาโครงการงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัย ประกอบด้วยดังนี้

1.3.1 ใช้ไดอะตอมไมต์แทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 โดยน้ำหนัก

1.3.2 ใช้เพอร์ไลต์แทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 โดยน้ำหนัก

1.3.3 ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 โดยน้ำหนัก

1.3.4 ใช้อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5

1.3.5 ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 5 10 15 และ 20 โมลาร์

1.3.6 ใช้ทรายแม่น้ำจากจังหวัดนครราชสีมา กัดขนาดตามมาตรฐาน ASTM C 33 (2008)

1.3.7 ขนาดของก้อนตัวอย่างมาตรฐานทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm และใช้อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.2 ถึง 3.7

1.3.8 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 75 และ 90°C

1.3.9 ทดสอบคุณสมบัติด้านการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1437 (2007)

1.3.10 ทดสอบคุณสมบัติด้านระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 191 (2008)

1.3.11 ทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 109 (2002)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 รวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงวิธีการในการทดสอบ

1.4.2 สรุบบอบเขตงานวิจัย

1.4.3 กำหนดปริมาณวัสดุที่ต้องการใช้ให้เพียงพอสำหรับการทำวิจัย

1.4.4 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ และวางแผนดำเนินการทดสอบ

1.4.5 ทำการทดลองสกัดส่วนผสม และดำเนินการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1.4.6 วิเคราะห์ผล และสรุปผลการทดสอบ

1.4.7 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ที่ทำจากจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ

1.5.2 สามารถนำวัสดุจากธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้มากที่สุด

1.5.3 สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ให้สามารถรับกำลังอัดได้สูงที่สุดและความสามารถทำงานได้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน

1.5.4 ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ และใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ

1.5.5 เป็นแนวทางในการศึกษาจีโอโพลิเมอร์มวลเบาในอนาคต



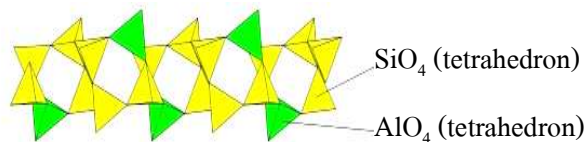
บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุผสมออมูโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอริกอนินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นาน ในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้

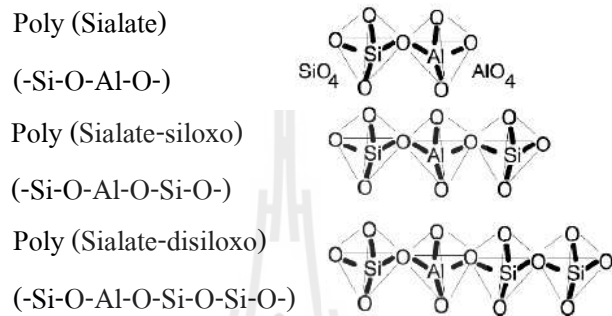
จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ การเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลหรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ จะทำให้เราได้วัสดุประสานที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ทั้งหมดเลยทีเดียว และในอนาคตข้างหน้าคาดการณ์ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ



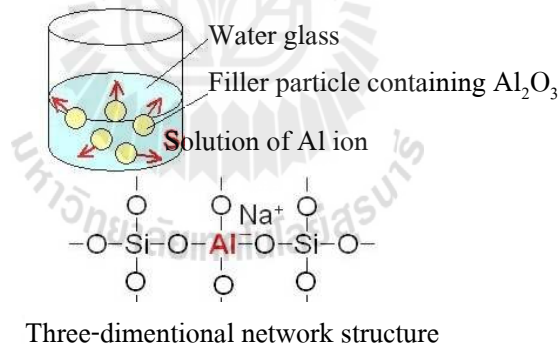
รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ (www.cordi.geopolymere.com)

กลไกการเกิดจีโอโพลิเมอร์ดังที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์ต้องมีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบ โดยวัสดุถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เพื่อที่ไปกระตุ้น

ซิลิกาและอลูมินาจากวัสดุเหล่านี้ หลังจากนั้นใช้โซเดียมซิลิเกตเข้าไปเพื่อให้เกิดการรวมตัวกันในลักษณะของโครงสร้างแบบสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยซิลิกาต่ออลูมินาเท่ากับ 1:1 เรียกโครงสร้างเป็น Poly (Sialate) และซิลิกาต่ออลูมินาเท่ากับ 2:1 เรียกโครงสร้างเป็น Poly (Sialate-siloxo) ซึ่งการที่ได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดที่ดีต้องให้อยู่ในอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาเท่ากับ 2:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ, 2549)



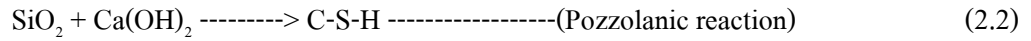
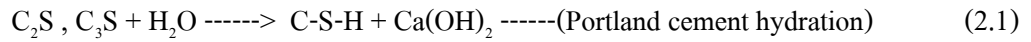
รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลิเมอร์ (www.cordi.geopolymere.com)



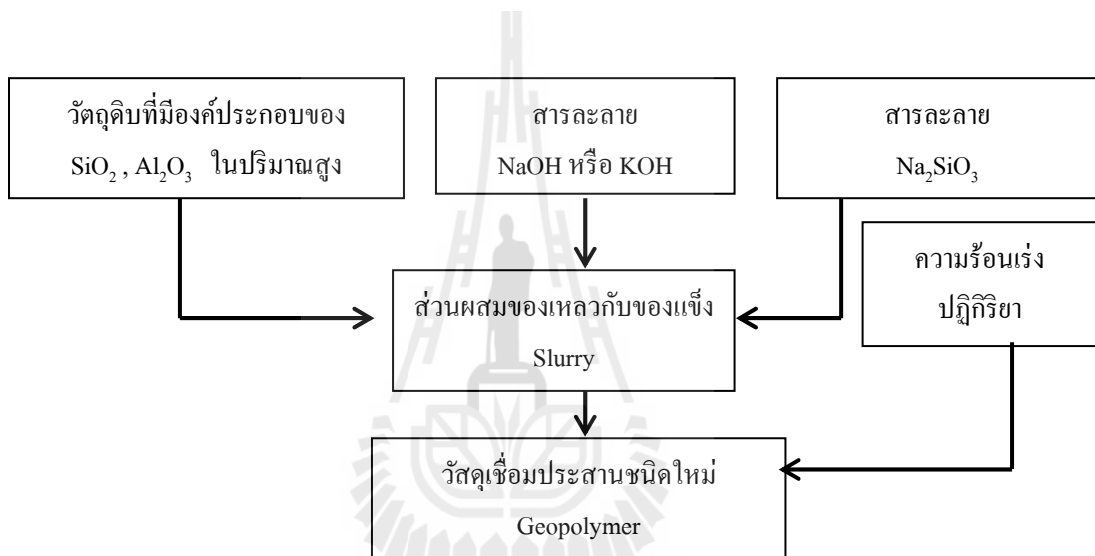
รูปที่ 2.3 Poly (Sialate-siloxo) ซิลิกาต่ออลูมินา 2:1 (www.cordi.geopolymere.com)

2.2 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับจีโอโพลิเมอร์

ลักษณะโครงสร้างของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และจีโอโพลิเมอร์นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดแก่คอนกรีต ซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว ดังแสดงในสมการที่ 2.1



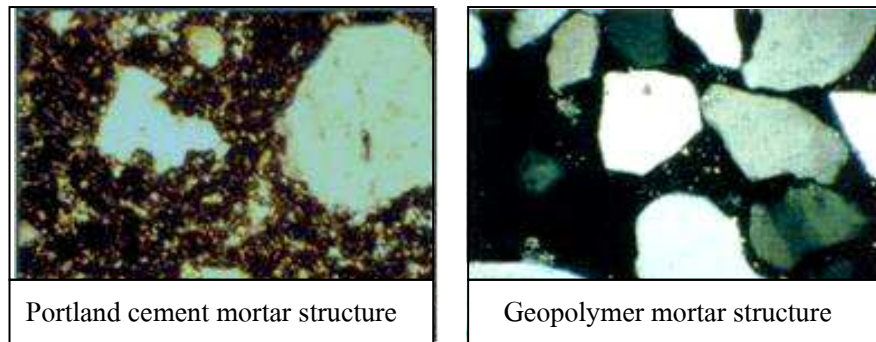
เมื่อนำวัสดุปอซโซลานใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองขึ้น เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่หนาแน่นและความทนทานมากขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 2.2



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเกิดวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (www.journal.thaitca.or.th)

จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน การเกิดปฏิกิริยามีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของซิลิเกต (Si) อะลูมินา (Al) และออกซิเจน (O) โดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย

เห็นได้ว่าการเกิดปฏิกิริยา Geopolymerization จะมีวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) ซึ่งพบได้มากในวัสดุปอซโซลานที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน อาทิเช่น ถ้ำถ่านหิน (Fly ash) ถ้ำแกลบ (Rice husk ash, RHA) หรือดินขาวเผา (Metakaolin) ดังนั้นวัสดุเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับจีโอโพลิเมอร์ได้



รูปที่ 2.5 แสดงภาพขยายขนาดไมโครของลักษณะโครงสร้างของปอร์ตแลนด์มอร์ตาร์
เปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (www.journal.thaitca.or.th)

จากลักษณะโครงสร้างของ Portland cement mortar เปรียบเทียบกับ Geopolymer mortar พบว่าลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของ Geopolymer mortar มีลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า Portland cement mortar ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างร่วน (Granular) และไม่มีความแน่นในการอัดตัวกัน

อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและมอร์ตาร์ในประเทศไทยนั้น ยังไม่นิยมแพร่หลาย เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ยังถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่ยังใหม่อยู่สำหรับคนไทยและยังอยู่ในช่วงพัฒนาเพื่อนำมาใช้งาน ซึ่งปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยเริ่มให้ความสำคัญกับเทคโนโลยีนี้มากขึ้น โดยคาดกันว่าจีโอโพลิเมอร์จะเข้ามาแทนที่วัสดุก่อสร้างอย่างซีเมนต์และคอนกรีตในอนาคต

2.3 ปอซโซลาน (Pozzolan)

อนนท์ ป้อมประสิทธิ์ (2545) ได้มีการบันทึกไว้ว่า ปอซโซลานเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างตั้งแต่สมัยโบราณกว่า 2,000 ปี และในปัจจุบันก็ยังเป็นที่นิยมใช้กันอยู่ ในสมัยโบราณได้นำเอาวัสดุพวกปอซโซลานมาใช้ เช่น นำเถ้าจากภูเขาไฟมาผสมกับปูนขาวเพื่อผลิตเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) โดยใช้ปอซโซลานต่อปูนขาวเท่ากับ 2:1 มาใช้ในการก่อสร้าง โดยมีไขมัน นม และเลือดจากสัตว์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้งาน และสิ่งก่อสร้างที่ทำจากปอซโซลานนั้นก็ยังคงมีความคงทนมาจนถึงทุกวันนี้

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2547) ให้คำจำกัดความไว้ว่า วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้น

ที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีต หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น วัสดุปอซโซลานที่ใช้ในงานคอนกรีตมีอยู่หลายชนิด เช่น เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังมีวัสดุปอซโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยาคายกับปูนซีเมนต์ได้ คือ ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซึ่งเป็นวัสดุประเภทกึ่งปอซโซลานและกึ่งซีเมนต์

ในการปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีตสามารถใช้วัสดุบางชนิดผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ วัสดุเฉื่อย (Inert materials) วัสดุซีเมนต์ (Cementing materials) และวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ขาดมวลรวมที่ค่อนข้างละเอียด เกิดปัญหาการแยกตัว และไม่เหมาะสมในการลำเลียง โดยการสูบลังหรือการเทโดยใช้ท่อ หรือต้องการเพิ่มการเกาะตัวของคอนกรีตสามารถทำได้โดยการใส่วัสดุเฉื่อยจำพวกหินปูนบดละเอียด ทรายละเอียด และหินฝุ่น เป็นต้น การใส่วัสดุเฉื่อยละเอียดผสมเพิ่มในคอนกรีตยังช่วยลดการเข้มน้ำและการตกแต่งผิวของคอนกรีตทำได้ง่ายขึ้น ปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้ในการก่ออิฐและฉาบได้มาจากการบดปูนเม็ดกับวัสดุเฉื่อย การใส่วัสดุเฉื่อยละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้กำลังของคอนกรีตจะลดลงเพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ในงาน โครงสร้างของอาคารซึ่งต้องการคุณสมบัติในการรับกำลังสูง

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2547) ยังกล่าวไว้อีกว่าวัสดุซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน นอกจากใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเช่นเดียวกับการใส่วัสดุเฉื่อยแล้วยังทำให้คอนกรีตมีกำลังและความทนทานดีขึ้นด้วย วัสดุซีเมนต์ได้แก่ ปูนซีเมนต์ธรรมดา ตะกรันเตาและถลุงเหล็ก เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นปูนซีเมนต์ในตัวเองแล้วยังสามารถใช้ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ได้ ดังนั้นเมื่อทำปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดสารประกอบของ C-S-H และ C-A-H เหมือนกับปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate, C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate, C_2S) แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช้ากว่าและกำลังในช่วงแรกจะต่ำกว่าปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การใส่วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนทำให้ปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate, C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate, C_2S) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate, C_3A) และ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium aluminoferrite, C_4AF) ในคอนกรีตลดลง ซึ่งส่งผลให้การทำปฏิกิริยาของสารซีเมนต์จะช้าลง การคายความร้อนจากปฏิกิริยาจะชะลอตัวออกไป ปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสม

วัสดุปอซโซลานและน้ำเกิดขึ้นระหว่างซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหนา ซึ่งวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยมีปริมาณที่ค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานบางชนิดที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟูมที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ไอร์ออนออกไซด์ (Fe_2O_3) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	>70.0	>70.0	70-50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, ไม่เกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ	10.0	6.0	6.0
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า Na_2O , ไม่เกินร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ: 1. สารปอซโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
2. สามารถใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1. ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ (อนนท์ ป้อมประสิทธิ์, 2545)
2. ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ถึง 2.3 ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F มีปริมาณ CaO ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่ง

ว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ซ เนื่องจากถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างและการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 (2007) (อนนท์ ป้อมประสิทธิ์, 2545)

3. ชั้นคุณภาพ C (class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำ ทำให้เถ้าลอย Class C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้ว ยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย (อนนท์ ป้อมประสิทธิ์, 2545)

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ความละเอียด :			
- ปริมาณที่ค้ำแรงเบอร์ 325 ^A ร่อนโดยใช้น้ำ, ไม่เกินร้อยละดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	34	34	34
- ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ^B	75 ^B	75 ^B
- ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม	75 ^B	75 ^B	75 ^B
- ความต้องการน้ำ, สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม	115	105	105
ความคงตัว (Soundness) ^C			
- การขยายตัวหรือหดตัวอโตเคลฟ, ไม่เกินร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ ^D			
- ความหนาแน่น, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
- ร้อยละที่ค้ำแรงเบอร์ 325, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

หมายเหตุ: A ระวังไม่ให้มีผงละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้างบนแร่ง

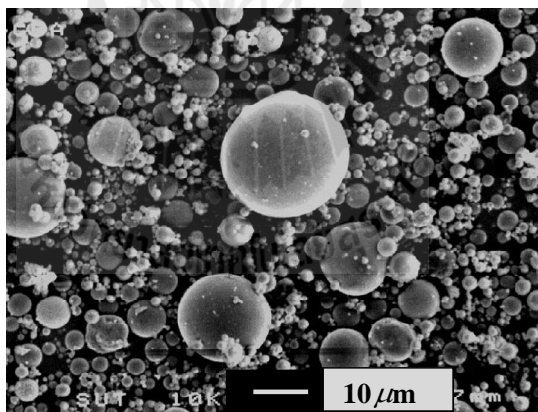
B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด

C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ชิ้นส่วนทดสอบของการขยายตัวอโตเคลฟควรมีสารปอซโซลานอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

D ความหนาแน่น และความละเอียดของตัวอย่างต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ย

เถ้าลอย Class C นอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง เนื่องจากมีปริมาณ CaO สูง เถ้าลอยแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอย CaO สูง โดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง (ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร, 2548) แต่ในปัจจุบันเถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลง โดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่ง ซึ่งได้แก่ ปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural pozzolan) และปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (Artificial pozzolan) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ไคอะตอมไมต์ เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ วัสดุเหล่านี้เมื่อนำไปใช้งานต้องนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ ก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ เช่น กระบวนการเผา การบด และการทำให้แห้ง เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเอาปอซโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟต และช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างด่างกับซิลิกา นอกจากนี้ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย



รูปที่ 2.6 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (ธีรวัฒน์ สินศิริ, 2548)

ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ ถ่านหินที่ถูกบดในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคทรงกลม ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประมาณร้อยละ 66 ถึง 68 เถ้าลอยบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับปูนขาวและด่าง เกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน แต่เถ้าลอยบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ

และแข็งตัวได้เช่นเดียวกัน ถ้าผ่านหินโดยทั่วไปแล้วมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่า ปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยโดยลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 μm จนถึง 0.15 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.6

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)

ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
แฟกเตอร์ผลคูณ (Multiple factor) ของ LOI กับปริมาณที่ค้าง แรงเบอร์ 325 เมื่อร่อนโดยใช้น้ำ ไม่เกินร้อยละ		255	
การหดตัวแห้งที่ 28 วัน ที่เพิ่มขึ้นของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุม ไม่เกินร้อยละ	0.3	0.3	0.3
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศที่ทำให้มีปริมาตรอากาศร้อยละ 18 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้าหรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง ไม่เกินร้อยละ	20	20	20
ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลท์ของมวลรวม การขยายตัวที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลท์ต่ำ ไม่เกินร้อยละ	100	100	100
ประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานสารซัลเฟต - วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ <ul style="list-style-type: none"> ● สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ ● สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ - วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ <ul style="list-style-type: none"> ● เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ ทนซัลเฟตในสภาวะซัลเฟต 6 เดือน ไม่เกินร้อยละ 	0.10 0.05 100	0.10 0.05 100	0.10 0.05 100

เถาถ่านหินที่กลวงมีน้ำหนักเบาและอาจจะลอยน้ำได้เรียกว่าเถาถ่านหินกลวง (Cenospheres) และในบางครั้งภายในเถาถ่านหินที่มีรูพรุนอาจมีเถาถ่านหินขนาดเล็ก ๆ อยู่ภายใน ได้เรียกว่า Plerospheres ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ความละเอียดของเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหิน จะขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ่าถ่านหินละเอียดมากขึ้น และการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะได้เถาถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและมีลักษณะเป็นทรงกลม แต่ในกรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์รูปร่างของเถาถ่านหินจะไม่แน่นอน สำหรับเถาถ่านหินในประเทศไทยพบว่าความละเอียดของเถาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าที่แม่เมาะ ซึ่งทดสอบโดยวิธีของเบลนมีความละเอียดอยู่ในช่วง 2,500 ถึง 3,500 cm^2/g (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

การวัดความละเอียดของเถาถ่านหินมี 2 วิธีที่นิยมใช้กันคือวิธีการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 μm) กับวิธีวัดพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักโดยวิธีของเบลน ในสหรัฐอเมริกาใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรงเป็นวิธีมาตรฐานวิธีเดียวในการกำหนดความละเอียดของเถาถ่านหิน กล่าวคือเถาถ่านหินต้องมีขนาดของอนุภาคที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก แสดงว่าเถาถ่านหินที่ละเอียดขึ้นจะมีความอ่อนไหวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นและทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถาถ่านหินที่หยาบกว่า ความอ่อนไหวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index) ดังแสดงในสมการที่ 2.3

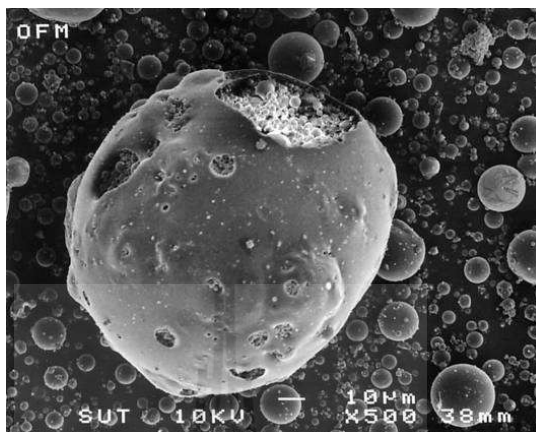
$$\text{ดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์} = (A/B) \times 100 \quad (2.3)$$

โดย A หมายถึง กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถาถ่านหิน ร้อยละ 20

B หมายถึง กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานซึ่งไม่มีเถาถ่านหินในส่วนผสม มาตรฐาน ASTM C 618 (2008) ได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของเถาถ่านหินทั้ง Class F และ Class C ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่อายุ 7 หรือ 28 วัน

ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นภายหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยมีซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในเถาถ่านหินทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-H-S) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-S) ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติในการยึดประสานดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง

14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเถ้าถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)



รูปที่ 2.7 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าถ่านหินที่มีลักษณะแบบ Plerospheres (ธีรวัฒน์ สินศิริ, 2548)

การใช้ปอซโซลานในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ คือเพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้ปอซโซลานมีข้อเสีย คือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาพการแข็งตัวและละลายน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพิ่มฟองอากาศมากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่ (Lane and Best, 1982 อ้างถึงใน ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าประโยชน์สูงสุดของเถ้าลอยคือ การสร้างเขื่อน ซึ่งที่เห็นเป็นรูปธรรม คือโครงการเขื่อนคลองท่าด่าน นอกจากนั้นเป็นการนำเถ้าลอยมาใช้ในการทำตอม่อของอาคารผู้โดยสารที่สนามบินสุวรรณภูมิ โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 50 ทั้งนี้ผู้ใช้ต้องมีความรู้และสามารถทดสอบคุณสมบัติของเถ้าลอยว่าสามารถนำมาใช้งานได้จริง ๆ นอกจากนี้หากมีการนำเถ้าลอยไปใช้เป็นส่วนผสมในการสร้างท่อน้ำทำให้ท่อน้ำอายุการใช้งานยืนยาวมากกว่าท่อปกติหลายเท่า เนื่องจากท่อที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมมีคุณสมบัติต้านทานน้ำเสียได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา อีกทั้งการก่อสร้างในโครงการขนาดใหญ่หรือตึกสูงคอนกรีตที่ใช้ควรมี

ส่วนผสมของเถ้าลอย เพื่อให้เนื้อคอนกรีตแข็งแรงสามารถส่งลำเลียงคอนกรีตด้วยท่อขึ้นไปตามชั้นต่าง ๆ ของการก่อสร้างได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป

2.4 ปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan)

วัสดุปอซโซลานธรรมชาติได้ถูกนำมาใช้หลายร้อยปีที่แล้ว คำว่า “ปอซโซลาน” มาจากถ้ำภูเขาไฟของหมู่บ้านปอซซูลิ (Pozzuoli) ใกล้กับเมืองเนเปิล ประเทศอิตาลี โดยใน ค.ศ. 79 เกิดการระเบิดของภูเขาไฟวิซุเวียส (Vesuvius) แต่อย่างไรก็ตามก่อนปี ค.ศ. 2000 ได้มีการนำถ้ำภูเขาไฟและดินเผลามาใช้ในงานก่อสร้างมากมายที่โรม กรีก อินเดีย และอียิปต์ โดยโครงสร้างคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานยังคงสามารถยืนหยัดให้เห็นได้จนถึงปัจจุบันนี้ จึงเป็นหลักฐานแสดงให้เห็นถึงความทนทานของการใช้วัสดุปอซโซลาน

ในตอนต้นศตวรรษที่ 20 ได้มีการนำวัสดุปอซโซลานธรรมชาติมาใช้ในอเมริกาเหนือในโครงการก่อสร้างสาธารณูปโภค เช่น การสร้างเขื่อน ซึ่งการใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาตินี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตขนาดใหญ่ และเป็นการเพิ่มปริมาณวัสดุซีเมนต์ นอกจากการใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติเพื่อควบคุมความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นแล้ว วัสดุปอซโซลานธรรมชาติยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อซัลเฟตอีกด้วย วัสดุปอซโซลานธรรมชาติเป็นวัสดุชนิดแรกที่พบว่าช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกาในคอนกรีต

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของเถ้าลอยและปอซโซลานธรรมชาติ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (2008)

ชั้นคุณภาพ (class)	คุณสมบัติของเถ้าลอย
F	มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานิก
N	มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานิก และวัสดุประสานในซีเมนต์
C	ปอซโซลานธรรมชาติที่ถูกละหรือมีลักษณะหยาบ ประกอบด้วย : <ul style="list-style-type: none"> - Diatomite - Opaline Cherts และ ดินดาน - Tuffs และ ถ้ำภูเขาไฟ หรือพิมิไซท์ - ดินเผล รวมทั้งดินขาว และดินดาน

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่จะผ่านการปรับปรุง เช่น กระบวนการให้ความร้อนในเตาเผาและบดเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจเป็นดินเผล (Calcined clay) ดินดานเผล (Calcined shale) และดินขาว (Metakaolin) ซึ่งดินขาวที่กล่าวถึงนี้เป็นดินเผลพิเศษ ผลิตโดยเอาดินเหนียว

ขาวล้วนมาเผาที่อุณหภูมิต่ำ หลังจากนั้นจึงบดจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ถึง 2 μm ดินขาวสามารถนำมาใช้ในงานที่ต้องการความชื้นผ่านที่ต่ำ หรือต้องการกำลังที่สูง ดินขาวได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีตมากกว่านำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปจะใส่เพิ่มในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

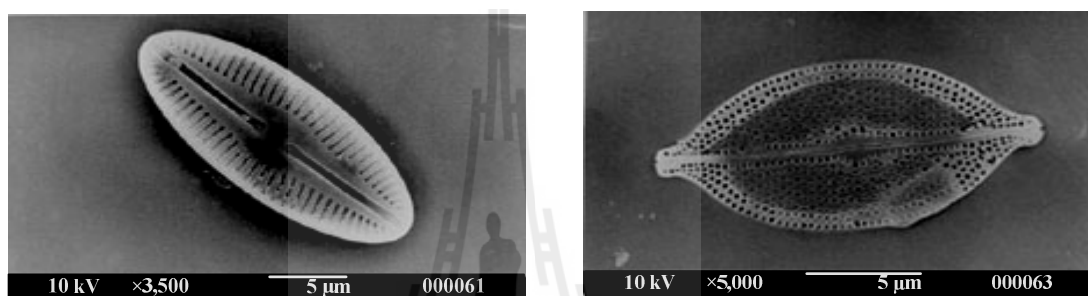
วัสดุปอซโซลานจากธรรมชาติถูกจำแนกโดยมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) โดยจำแนกเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งได้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

Pekmezci and Akyz (2004) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณปอซโซลานธรรมชาติที่มีต่อคอนกรีต ทำศึกษาโดยการทดสอบคอนกรีตทั้งหมด 15 ส่วนผสม โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่มีปริมาณซีเมนต์ 300 350 และ 400 kg/m^3 และได้คัดแปลงส่วนผสมเพื่อศึกษาเปรียบเทียบโดยลดปริมาณซีเมนต์ลงเป็น 250 300 และ 350 kg/m^3 ของคอนกรีตควบคุม และได้เพิ่มปริมาณปอซโซลานธรรมชาติเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ 40 50 75 และ 100 kg/m^3 ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณสารปอซโซลานธรรมชาติที่มากเกินไปส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดต่ำลง ดังนั้นควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตที่สูงที่สุด และ Pekmezci (2004) ยังพบอีกว่าในกรณีที่ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม แล้วแทนที่ด้วยปอซโซลานธรรมชาตินั้น ส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เนื่องจากปอซโซลานธรรมชาติไม่มีคุณสมบัติในการเป็นสารซีเมนต์ (Cementitious material) และเป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่าปอซโซลานธรรมชาติจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเกิดจากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่อัตราส่วนระหว่างปอซโซลานต่อซีเมนต์ (Pozzolan/Cement ratio, P/C) ที่ 0.28 เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

2.5 ไดอะตอมไมต์ (Diatomite)

ไดอะตอม (Diatom) เป็นพืชเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก มีผนังเป็นฟอสซิลิกาประกบกัน บางชนิดสามารถว่ายน้ำได้ บางชนิดอาศัยกระแสไฟฟ้าพัดพาไป มีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 2,000 μm ขนาดใหญ่มีน้อยพบในแหล่งน้ำทั่วโลกทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม เมื่อไดอะตอมตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกเป็นตะกอนสะสมกันจำนวนมากหาศาลบนพื้นทะเลหรือพื้นทะเลสาบ แล้วในที่สุดจะกลายเป็นไดอะตอมไมต์ (Diatomite) มีลักษณะที่มีน้ำหนักเบา เนื้อพรุน มีลักษณะคล้ายขอล็ก มีปฏิกิริยาเชิงซ้ำ ไดอะตอมไมต์จะมีลักษณะต่าง ๆ กัน ตามแต่ชนิดของไดอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (Chaisena, A., 2004)

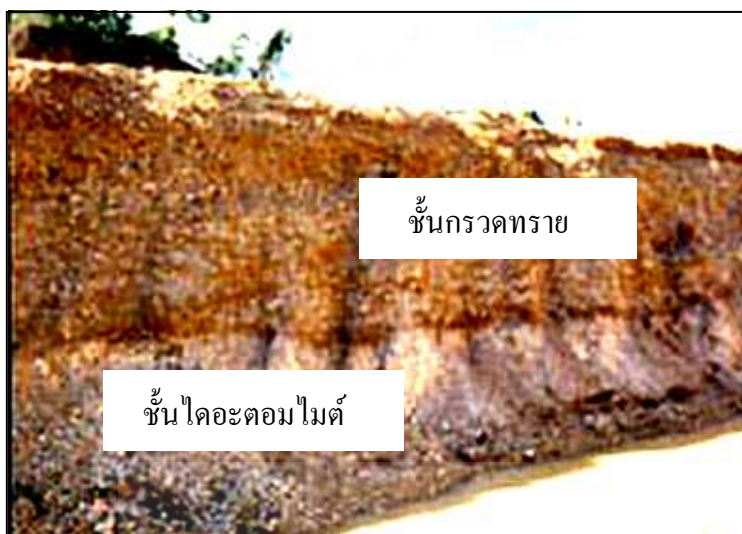
ไคอะตอมไมต์บางที่อาจใช้คำว่า เรดิโอลาเรียนเอิร์ธ (Radiolarian earth) เพราะมีโครงสร้างประกอบด้วยโอปอลของไคอะตอมและเรดิโอลาเรียน มีสีขาวหรือสีครีมเป็นส่วนใหญ่ แต่ก็อาจพบสีเหลืองอ่อน สีแดง หรือสีน้ำตาลบ้าง (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538) แต่บางครั้งก็พบว่าไคอะตอมไมต์เป็นซากสัตว์ขนาดเล็กที่เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว หรือเป็นสาหร่ายเซลล์เดียวที่มีเปลือกหุ้มที่เป็นซิลิกา เปลือกเหล่านี้เมื่อทับถมกันมาก ๆ จะสามารถคงสภาพของซากอยู่ในชั้นหินได้เป็นเวลานานจนแข็งตัวอัดกันแน่นจนกลายเป็นหิน (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ออนไลน์, 2550)



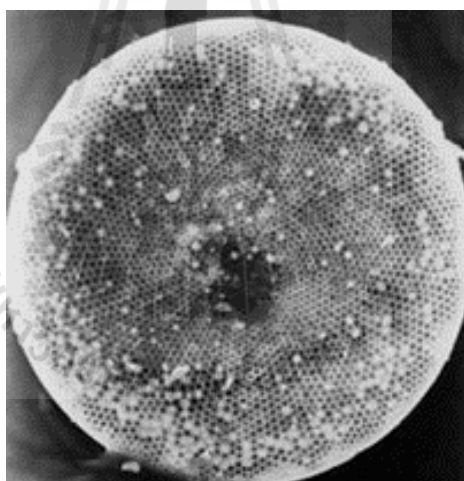
รูปที่ 2.8 ลักษณะของไคอะตอมไมต์ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ออนไลน์, 2543)

แหล่งไคอะตอมไมต์ในประเทศไทยพบอยู่ในจังหวัดลำปาง โดยจะพบเป็นแหล่งเล็กใหญ่ กระจุกกระจายอยู่เป็นบริเวณกว้างในแอ่งลำปาง และแอ่งเล็ก ๆ ใกล้เคียง ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตอำเภอเมืองลำปาง อำเภอแม่ทะ และอำเภอเกาะคา นอกจากนี้ยังสามารถพบได้บ้างในบริเวณบ้านแม่แก้ว อำเภอสบปราบ และบ้านทุ่งตุ่น ตำบลวอแก้ว อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง จากการสำรวจของ กองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี บริเวณแอ่งลำปางสามารถประเมินปริมาณสำรองของไคอะตอมไมต์ได้ทั้งหมดประมาณ 245 ล้านตัน (กรมทรัพยากรธรณี, ออนไลน์, 2548)

จากรายงานของสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้มีการเก็บตัวอย่างสำรวจในบริเวณเหมืองบ้านฟ่อน จังหวัดลำปาง พบว่าชั้นของไคอะตอมไมต์จะทับถมยึดกันแน่นอยู่ได้ชั้นกรวดทราย ซึ่งมีระดับความลึกไม่ต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และเมื่อนำไคอะตอมไมต์ไปถ่ายภาพขยาย 350 เท่า ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 แล้วทำการตรวจสอบพบว่าไคอะตอมไมต์มีอายุตั้งแต่ 25 ล้านปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน และยังมีรายงานอีกว่าสามารถพบได้ในชั้นตะกอนบริเวณที่ลุ่มอำเภอศรีมโหสถ จังหวัดปราจีนบุรีอีกด้วย (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ออนไลน์, 2550)



รูปที่ 2.9 แสดงชั้นของไคอะตอมไมต์ (สสวท., ออนไลน์, 2550)



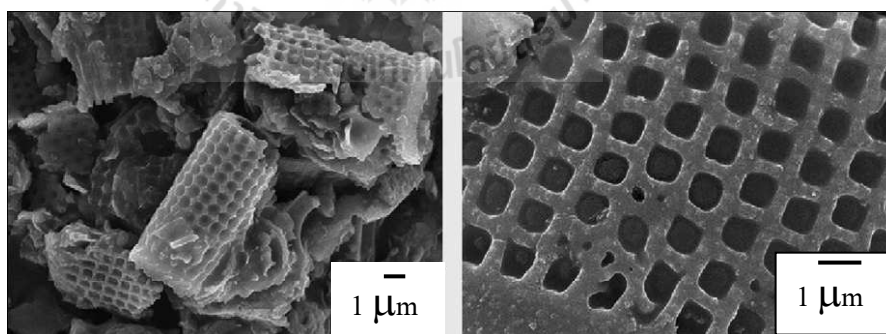
รูปที่ 2.10 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมต์ (สสวท., ออนไลน์, 2550)

โดยทั่วไปไคอะตอมไมต์มีประโยชน์ในทางด้านอุตสาหกรรม คือใช้เป็นส่วนผสมในการทำกระดาษ เพื่อให้เนื้อกระดาษแน่นเนียน ทำเป็นฉนวนและเป็นสารที่ใช้ในการกรองได้ดี เช่น กรองน้ำตาลและสารอื่น ๆ หรือใช้ขัดโลหะได้ดีเพราะมีซิลิกาที่มีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ภายใน (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538) ไคอะตอมไมต์ไม่ใช่เพียงแค่มีประโยชน์ในทางด้านอุตสาหกรรมเพียงเท่านั้น แต่ในการก่อสร้างก็ยังมีให้นำเอาไคอะตอมไมต์มาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น นำมาใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา หรืออิฐมวลเบา เป็นต้น

Pimraksa and Chindaprasirt (2008) ทำการศึกษาไคอะตอมไมต์ จากแหล่งจังหวัดลำปาง ประเทศไทย มีปริมาณค่อนข้างมากถึง 100 ล้านตัน จึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของอิฐมวลเบาที่ทำจากไคอะตอมไมต์ลำปาง ปูนขาว และยิปซัมเป็นส่วนผสม พบว่าไคอะตอมไมต์จากแหล่งลำปางมีคุณสมบัติในการเป็นสารปอซโซลานสามารถนำมาทำอิฐมวลเบาได้ อีกทั้งมีสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกต โดยมีปริมาณออกไซด์หลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ในปริมาณที่เหมาะสม และยังมีคุณภาพสูงเช่นเดียวกับสารปอซโซลานธรรมชาติทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และ รูปที่ 2.11 ในการศึกษาได้นำเอาไคอะตอมไมต์มาผสมกับปูนขาวร้อยละ 15 และยิปซัมร้อยละ 5 ตามลำดับจากการทดสอบพบว่าอิฐมวลเบามีค่ากำลังอัดประมาณ 145 ksc และมีค่าความหนาแน่น 880 kg/m^3 แต่เมื่อใช้ไคอะตอมไมต์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500°C ให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดประมาณ 175 ksc และมีค่าความหนาแน่น 730 kg/m^3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการใช้ไคอะตอมไมต์ที่ผ่านการเผาทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง แต่ก็สามารถใช้ไคอะตอมไมต์ที่ยังไม่ได้ผ่านการเผาในการผลิตอิฐมวลเบาได้เช่นกัน

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมต์ลำปาง (Pimraksa, K., 2008)

Oxide Compositions	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	SO_3
(%) by mass	77.5	14.16	5.24	2.08	0.20	0.00	0.46	0.53	0.25	0.01



รูปที่ 2.11 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมต์จากแหล่งลำปาง (Pimraksa, K., 2008)

Aydin and Gul (2006) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของไคอะตอมไมต์ ที่ใช้เป็นสารปอซโซลานในคอนกรีต ศึกษาโดยการใช้ไคอะตอมไมต์แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 1 2 และ 4 ของน้ำหนักวัสดุประสาน โดยควบคุมปริมาณซีเมนต์ที่ 300 kg/m^3 พบว่าเมื่อใช้ไคอะตอมไมต์แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้นและระยะเวลาการก่อตัวขึ้นปลายนานขึ้น และส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดให้ช้าลงเช่นกัน กล่าวคือเมื่อใช้ไคอะตอมไมต์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นลดลงอย่างมาก แต่ค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นในภายหลัง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าการใช้สารปอซโซลานชนิดนี้ในส่วนผสมคอนกรีตทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้ สำหรับงานก่อสร้างที่ไม่ต้องการกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นที่สูง

2.6 เพอร์ไลต์ (Perlite)

หินเพอร์ไลต์ หมายถึงหินภูเขาไฟเนื้อแก้วทุกชนิด เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาที่รวดเร็วจะขยายตัว มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง หินเพอร์ไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ได้แก่หินภูเขาไฟเนื้อแก้วที่มีลักษณะรอยแตกเป็นวงซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม และเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาที่รวดเร็วจะขยายตัวออกไปได้ ตั้งแต่ 4 ถึง 20 เท่าของปริมาตรเดิม ทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง และมีลักษณะคล้ายหินพัมมิส สารที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลต์นี้ เรียกว่า “เพอร์ไลต์” (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์ (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีรา และคณะ, ออนไลน์, 2547)

2.6.1 ประเภทของเพอร์ไลต์ที่พบในประเทศไทยมี 3 ชนิด คือ

1. สีเขียวแถบแดง (Banded perlite) เพอร์ไลต์สีเขียวเนื้อประสานอัดแน่น จุดสีขาวทั่วไปคือ Feldspar เนื้อเดิมเป็น Glass แล้วแปรสภาพมาเป็นแถบแดง ๆ ที่เรียกว่า Red devitrification product

2. เพอร์ไลต์สีเขียว (Classical perlite) เป็นเพอร์ไลต์เนื้ออัดแน่นมีผลึกสีเขียว ถ้าดูด้วยกล้องขยายจะพบรอยแตกร้าวโค้งไปโค้งมา คือ Perlite Crack และยังมีจุคขาว Feldspar รวมอยู่ด้วย แร่เพอร์ไลต์ชนิดนี้ถือว่ามีคุณภาพดี ขยายตัวได้สูง แต่อุณหภูมิการขยายตัวอาจแตกต่างกัน

3. เพอร์ไลต์สีขาว (Pumicious perlite) ประกอบไปด้วยเส้นใยของแก้ว (Glass fiber) สีค่อนข้างขาว มีรูพรุนสูง อาจมี Feldspar ปะปนอยู่ด้วยเล็กน้อย และมีการขยายตัวอยู่บ้างเล็กน้อย



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์สีเขียวแถบแดง



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์สีขาว



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์สีขาว

2.6.2 ลักษณะการเกิดของหินเพอร์ไลต์

เพอร์ไลต์จัดอยู่ในประเภทหินอัคนีพุมิเนื้อละเอียดเป็นแก้ว เนื่องจากเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของหินหนืด เป็นแร่องค์ประกอบร่วมกับหินไรโอไลต์ ที่เกิดในระดับต้น และมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว บริเวณที่พบในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดลพบุรี และกาญจนบุรี ประโยชน์ใช้เป็นส่วนผสมวัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบา และเป็นส่วนเติมเต็มในอุตสาหกรรมปุ๋ยและอุตสาหกรรมสี (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีรา และคณะ, ออนไลน์, 2547)

หินเพอร์ไลต์เกิดเป็น Effusive rock แทรกเข้ามาในชั้น Pumicious tuffs ซึ่งเข้าใจว่าจะมีน้ำอยู่ในรูพรุนค่อนข้างมาก ภายหลังจากที่ Magma แทรกเข้ามาและเย็นตัวเป็นแก้วภูเขาไฟแล้ว น้ำที่อยู่ในชั้น Tuff จะค่อย ๆ แทรกซึมลงไปรวมกับแก้วภูเขาไฟ ซึ่งแต่เดิมมีน้ำอยู่เพียงร้อยละ 1 ถึง 2 กลับเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 3 ถึง 5 พร้อม ๆ กับเกิดการขยายตัว และแตกเป็นรูปเปลือกของหัวหอม (Peritic crack) ขึ้น สำหรับ Pumicious perlite มีลักษณะการเกิดที่แสดงให้เห็นถึงการถูกความกดดันและการระเหยหนีไปของ Volatile ที่ละลายปนอยู่ใน Magma ขณะเคลื่อนตัวขึ้นมาใกล้ผิวโลก ด้วยขณะที่เกิดยังเป็นของเหลวอยู่ แรงดันและแรงระเหยหนีของ Volatile ผ่านช่องว่างที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงเกิดการรีดเป็นเส้นใยแก้วมีรูพรุนสูง แล้วจึงดูดซับน้ำเข้าไปในเนื้อ ซึ่งเชื่อว่าเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อย การขยายตัวของเพอร์ไลต์ชนิดนี้จึงค่อนข้างต่ำ แก้วภูเขาไฟมีลักษณะใสไม่สามารถคงตัวอยู่ได้นาน ๆ อาจเป็นเพราะแรงกดดันเนื่องจากมีน้ำหนักหินปิดทับและมีน้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนของแก้วจึงเปลี่ยนเป็น Feldspar กับ Quartz ขนาดเล็ก ๆ อยู่ด้วยกันและมักจะมีสีแดง เรียกว่า Devitrified glass หรือ Spherulite (กรมทรัพยากรธรณี, ออนไลน์, 2548)

2.6.3 คุณสมบัติทางเคมีของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีส่วนประกอบของออกไซด์ของธาตุซิลิกาค่อนข้างสูง ประมาณร้อยละ 70 หรือมากกว่า และยังมีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 2 ถึง 5 โดยปกติไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่น ๆ ได้ง่ายนัก จึงจัดอยู่ในจำพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี เนื้อแก้วของหินเพอร์ไลต์จะมีการเปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก (Diversification) เมื่อระยะเวลา (อายุ) ของหินเพอร์ไลต์มากขึ้น ดังนั้นหินเพอร์ไลต์ที่จะมีคุณภาพดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น เนื้อแก้วจะต้องไม่เปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก ซึ่งจะพบได้ในหินภูเขาไฟยุคใหม่ประมาณยุคเทอร์เชียรีขึ้นมา หรือน้อยกว่า 65 ล้านปี

เพอร์ไลต์จะมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และโคอะตอมไมต์ ส่วนประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์จะอยู่ในรูปของออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 2.6 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของหินเพอร์ไลต์ทั่วโลกกับของประเทศไทย จากการสำรวจของสำนักเหมืองแร่และสัมปทาน เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นทางสถิติ ในการศึกษาเพื่อพัฒนาการใช้เพอร์ไลต์ในงานอุตสาหกรรม (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, 2546)

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบเคมีของหินเพอร์ไลต์ (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

องค์ประกอบเคมี	ค่าเฉลี่ยหินเพอร์ไลต์	
	ทั่วโลก	ประเทศไทย
SiO ₂	71.0 - 75.0	71.02
Al ₂ O ₃	12.5 - 18.0	16.09
Fe ₂ O ₃	0.50 - 1.50	0.71
FeO	0.00 - 0.10	0.73
MgO	0.10 - 0.50	0.41
CaO	0.50 - 2.00	0.58
Na ₂ O	2.90 - 4.00	0.90
K ₂ O	4.00 - 5.00	5.59
H ₂ O (comb)	3.00 - 5.00	3.57

จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเพอร์ไลต์ในประเทศไทยโดยใช้วิธี X-Ray Fluorescence (XRF) ในการวิเคราะห์แล้วนำองค์ประกอบดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 2.7 เพื่อทำการศึกษาคูสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของเพอร์ไลต์และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้เป็นข้อมูลคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ที่สำคัญให้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ เช่น นำมาใช้ในการทำคอนกรีตมวลเบาที่ทำเป็นคอนกรีตฉนวน เป็นต้น

ตารางที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์

(จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ, 2548)

องค์ประกอบเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนักของซีเมนต์	ร้อยละโดยน้ำหนักของเพอร์ไลต์ในประเทศไทย
CaO	C	60 - 67	0.57
SiO ₂	S	17 - 25	71.01
Al ₂ O ₃	A	3 - 8	16.07
Fe ₂ O ₃	F	0.5 - 6.0	0.71
MgO	M	0.1 - 4.0	0.40
Na ₂ O	N	0.1 - 1.8	0.92
K ₂ O	K	0.1 - 1.8	5.57
SO ₃	S	0.5 - 3.0	-
FeO	Fe	-	0.71
H ₂ O (comb)	-	-	3.57
สารประกอบอื่น ๆ	-	0.5 - 3.0	-

2.6.4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์ส่วนใหญ่เนื้อหินมีลักษณะเป็นแก้ว มักจะมีรอยแตกเป็นวง ๆ ซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม รอยแตกนี้อาจจะมองเห็นด้วยตา หรืออาจจะต้องอาศัยคูด้วยแว่นขยาย หรือใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยทั่วไปจะมีสีเทาอ่อนแต่อาจจะพบสีดำ สีน้ำตาล หรือสีเขียวได้ และในเนื้อหินมักจะมีผลึกแร่ควอทซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่ไบโอไทต์ แร่ฮอร์นเบลนด์ และมีชิ้นส่วนของ

เศษหินชนิดอื่นฝังตัวอยู่ มีความแข็งตามมาตรฐานของโมห์ (Moh's scale) ระหว่าง 5.5 ถึง 7.0 ค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.3 ถึง 2.8 จุดหลอมตัวระหว่าง 760 ถึง 1,300°C และมีค่าดัชนีการหักเหแสงอยู่ระหว่าง 1.490 ถึง 1.610

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

Type	Air dry unit volume weight (kg/l)	Thermal conductivity (Kcal/mh °C)
คอนกรีตผสมเพอร์ไลต์	1.20 - 1.60	0.27 - 0.36
ปูนผสมทราย	2.01	1.24

2.6.5 การใช้ประโยชน์ของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี ส่วนใหญ่นำไปใช้ในงานก่อสร้าง เพื่อลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้าง ช่วยเป็นฉนวนกันความร้อนและความเย็น และยังสามารถเป็นผนังป้องกันเสียงได้ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ ตลอดจนงานทางด้านเกษตร และงานด้านอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกด้วย เช่น

1. ด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

มีการนำเพอร์ไลต์มาใช้ในด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างประมาณร้อยละ 70 ของปริมาณที่ผลิตได้ทั่วโลก เนื่องจากมีคุณสมบัติ คือ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูง ทนไฟ และมีความแข็งแรง ด้วยคุณสมบัติเด่นดังกล่าว เพอร์ไลต์จึงนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ฝ้าเพดาน เนื่องจากเพอร์ไลต์เป็นส่วนประกอบของฝ้าเพดาน และผลิตภัณฑ์ยิปซัมแผ่นเรียบบางชนิด เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมที่ทำให้กระเบื้องไม่เป็นตัวนำความร้อน คลื่นเสียงผ่านทะลุไม่ได้ มีความหนาแน่นต่ำ และเป็นวัสดุทนไฟ เมื่อนำไปผสมกับปูนซีเมนต์ จะทำให้ได้คุณภาพที่ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา เมื่อนำไปฉาบผนังตึกหรือเพดานจะทำให้ปูนสามารถยึดติดผนังได้ดี แข็งเร็ว และไม่เกิดรอยร้าว เนื่องจากมีความยืดหยุ่นได้ดี และยังเป็นฉนวนป้องกันความร้อนอีกด้วย

นอกจากนี้เมื่อนำเพอร์ไลต์ไปผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการทำคอนกรีตใช้ในงานก่อสร้างต่าง ๆ จะทำให้ลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนั้นลงได้ และยังทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อน และป้องกันการสะท้อนของเสียงได้เป็นอย่างดี คอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลต์ผสมจะมีความหนาแน่นต่ำถึง 320 kg/m³ และถ้ามีความหนาแน่นประมาณ 2 นิ้ว จะมีประสิทธิภาพในการเป็น

ฉนวนได้เท่ากับแผ่นฉนวนมาตรฐาน แต่มีความแข็งแรงและคงทนกว่าแผ่นฉนวนมาตรฐานมาก ซึ่งได้มีการทดลองและเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา โดยบริษัทผลิตเพอร์ไลต์ของประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในตารางที่ 2.8 (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

2. เป็นฉนวน

ห้องที่ต้องการรักษาอุณหภูมิทั้งความเย็นหรือความร้อนเป็นพิเศษ ได้มีการใช้เพอร์ไลต์อัดเข้าไปในช่องว่างระหว่างผนังของห้อง ซึ่งมักจะใช้เพอร์ไลต์ที่มีความหนาแน่นที่น้อยกว่า 64 kg/m^3 เช่น ห้องเก็บเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ต้องการอุณหภูมิภายในห้องต่ำ

3. เป็นเครื่องกรอง

เนื่องจากเพอร์ไลต์มีปริมาณออกไซด์ของธาตุซิลิกาสูง อาจมีมากกว่าร้อยละ 70 มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซึมที่ดี และยังเป็นสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงสามารถนำเพอร์ไลต์ไปใช้เป็นตัวกรองและตัวดูดซึมที่ดี

4. ด้านอื่น ๆ

นอกจากที่กล่าวมาแล้วเพอร์ไลต์ยังสามารถนำไปใช้ผสมกับสีทาได้ทั้งภายในและภายนอกของอาคารบ้านเรือน และมีการนำเพอร์ไลต์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ใช้เป็นผงขัด และผสมซีเมนต์ใช้ในการฉาบผนังบ่อน้ำมัน

2.6.6 แหล่งเพอร์ไลต์ในประเทศไทย

แหล่งเพอร์ไลต์พบอยู่ในบริเวณกลุ่มหินภูเขาไฟตอนกลางของประเทศ ซึ่งจัดอยู่ในหน่วยหินภูเขาไฟล้านรายณ์ กลุ่มพื้นที่ประมาณ $1,200 \text{ km}^2$ อยู่ในเขตจังหวัดลพบุรี และจังหวัดเพชรบูรณ์ หน่วยหินภูเขาไฟล้านรายณ์ประกอบด้วยหินภูเขาไฟชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่บะซอลต์แอนดีไซต์ ไปจนถึงไรโอไลต์

เพอร์ไลต์เกิดร่วมกับไรโอไลต์ และหินเถ้าถ่านภูเขาไฟ (Ash-flow tuffs) โดยเกิดลักษณะแบบลาวา และเกิดแบบพ่นัง โผล่ให้เห็นเป็นชั้นหนาตามบริเวณของภูเขาไฟล้านรายณ์ โดยเฉพาะขอบด้านตะวันตก เพอร์ไลต์ที่พบมีสีดำ น้ำตาล เขียวเข้ม หรือเขียวอ่อน มีลักษณะเนื้อเป็นแก้ว และมีผลึกของเฟลด์สปาร์ประมาณร้อยละ 2 ถึง 10 และผลึกของไบโอไทต์ประมาณร้อยละ 1 ถึง 2 ชั้นของเพอร์ไลต์ที่โผล่มีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 20 m วางตัวค่อนข้างราบ และส่วนมากจะวางตัวอยู่บนหินเถ้าถ่านภูเขาไฟ และถูกปิดทับด้วยไรโอไลต์

2.6.7 สถานการณ์เพอร์ไลต์ของประเทศไทย

ในปัจจุบันเพอร์ไลต์มีการผลิตจากประทานบัตรของ ห้างหุ้นส่วนจำกัดคลองยาง จำนวน 1 แปลง ตั้งอยู่ที่ตำบลมหาโพธิ์ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี มีอัตราการผลิตประมาณ 2,400 ตันต่อปี สำหรับแร่เกรดสูงเพื่อเผาสำหรับทำวัสดุกรองคุณภาพสูงและถูกจำหน่ายให้กับ

โรงงานน้ำผลไม้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน วัสดุผสมเพิ่มสำหรับปูนฉาบสำเร็จ และอิฐทนไฟ โดยจำหน่ายให้กับโรงเผาที่จังหวัดราชบุรี ราคาของเพอร์ไลต์คุณภาพสูงก่อนการเผาที่ 650 บาทต่อตัน เมื่อเผาแล้วราคาจะเพิ่มขึ้นเป็น 6,000–12,000 บาทต่อตัน อีกทั้งจะขึ้นกับคุณสมบัติความขาว และความหนาแน่น (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

คม บัวคลี และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์ (2540) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนการผสมมอร์ต้าร์มวลเบาโดยการใช้เพอร์ไลต์มาแทนที่ทรายบางส่วน เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการและสามารถนำมอร์ต้าร์มวลเบาไปใช้งานได้จริงในการผลิตผนังมวลเบา โดยในการทดลองได้ใช้ทั้งขนาดหยาบและขนาดละเอียดปนกัน เพอร์ไลต์ในการทดสอบมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 252 kg/m^3 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์นั้นแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบหน่วยน้ำหนัก การทดสอบความสามารถเทได้โดยใช้โต๊ะการไหล และการทดสอบกำลังอัด โดยกำหนดเป้าหมายดังนี้ ด้านหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 800 kg/m^3 ค่าการไหลแพร่ควรมากกว่าร้อยละ 70 และกำลังอัดควรมีมากกว่า 35 ksc ที่อายุ 7 วัน ผลการวิจัยพบว่าหน่วยน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเพอร์ไลต์ที่ใช้แทนที่ทรายและปริมาณช่องว่างอากาศที่แทรกในเนื้อมอร์ต้าร์ โดยปริมาณเพอร์ไลต์ที่เหมาะสมที่สุดคือแทนที่ทรายร้อยละ 90 โดยปริมาตร ด้านการไหลขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์เป็นหลัก กล่าวคือการไหลมีความเหมาะสมเมื่อปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์อยู่ระหว่างร้อยละ 90-100 ส่วนด้านกำลังอัดพบว่ามอร์ต้าร์ที่ใส่ทั้งสารกระจายกักฟองอากาศและสารลดน้ำอย่างมากมีคุณสมบัติตรงตามเป้าหมายคือ ค่ากำลังอัด 37 ksc ที่อายุ 7 วัน คุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนักและความสามารถเทได้นั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ แต่ที่ควรระมัดระวังเป็นพิเศษคือปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์และขนาดของเพอร์ไลต์ที่ใช้ในการผสม

Demirboga and Gul (2003) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติด้านการนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้ Perlite เป็นมวลรวม การศึกษาใช้ซิลิกาฟูมและเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 และควบคุมปริมาณของมวลรวมให้อยู่ที่ 200 kg/m^3 และใช้สารลดน้ำจำนวนมากร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติด้านการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงลง เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมและเถ้าลอย ที่ปริมาณร้อยละ 14 และ 18 ตามลำดับ และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงจาก 522 kg/m^3 เหลือ 483 kg/m^3 และกำลังอัดมีค่าลดลงร้อยละ 12 19 และ 29 ที่อายุการบ่ม 7 วัน แต่กำลังอัดจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 9 13 และ 4 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 20 และ 30 ตามลำดับ แต่สำหรับเถ้าลอยนั้นจะส่งผลทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 36 และ 27 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

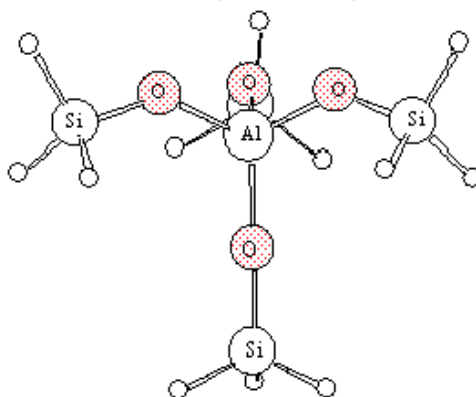
2.7 ซีโอไลต์ (zeolite)

ซีโอไลต์ (Zeolite) คือสารประกอบออลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอม เท่ากับ 1×10^{-10} m) นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้วในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาอยู่อย่างหลวม ๆ และมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึกสามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้

ซีโอไลต์อาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของแร่ธาตุ มีการทำเป็นเหมือนซีโอไลต์ในพื้นที่หลายแห่งของโลก หรืออาจสังเคราะห์ขึ้นได้โดยกระบวนการทางเคมี เพื่อประโยชน์ทางการค้า ซึ่งทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีสมบัติเฉพาะเจาะจง รวมทั้งอาจมีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ในห้องปฏิบัติการเพื่อประโยชน์ในการศึกษาลักษณะทางเคมีของซีโอไลต์ ซีโอไลต์มีมากกว่า 600 ชนิด แต่สามารถแบ่งกลุ่มตามชนิดของโครงสร้างได้ประมาณ 40 ชนิด ซึ่งความแตกต่างในโครงสร้างนี้มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของซีโอไลต์ เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น การจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้นอาศัยขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลต์เป็นหลัก ซึ่งทำให้น้ำซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันไป ลักษณะเด่นของซีโอไลต์คือโครงสร้างที่เป็นรูพรุนอย่างเป็นระเบียบของซีโอไลต์ ซึ่งอาจใช้เป็นตัวกรองสารที่ต้องการ โดยโมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดโพรงซีโอไลต์ก็สามารถผ่านไปได้ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านไปออกมา และโมเลกุลที่ต้องการซึ่งมีขนาดพอดีกับโพรงซีโอไลต์ก็ถูกกักไว้ภายในโพรง

2.7.1 โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นแร่ที่ประกอบด้วย ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีน้ำผลึกของโลหะอัลคาไลน์หรือโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะโซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม สตรอนเชียม และแบเรียม โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็น โครงสร้าง 3 มิติ ของอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ซึ่งประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกต โดยมีการเชื่อมต่อของอะตอมออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือเป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) โครงสร้างซีโอไลต์แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ



รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ (อุษา อันทอง และคณะ, 2549)

1. โครงสร้างปฐมภูมิ SiO_4 และ AlO_4 แต่ละหน่วยจะจัดเรียงตัวในลักษณะรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เชื่อมต่อกันโดยอะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางส่วนอะตอมของออกซิเจนอยู่ที่จุดยอดมุมสามเหลี่ยมทรงสี่หน้า

2. โครงสร้างทุติยภูมิ จะเกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิแต่ละหน่วยมาเชื่อมต่อกันโดยอาศัยจุดยอดมุมทั้งสี่เป็นจุดเชื่อมต่อ เพื่อให้ได้เป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น โครงสร้างที่เกิดจากโครงสร้างขั้นปฐมภูมิมาเชื่อมต่อกันเป็นวงขนาดเล็กในรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่น สี่เหลี่ยมห้าเหลี่ยม และแปดเหลี่ยมโดยเป็นวงเดี่ยว หรือวงซ้อนก็ได้ เรียกว่า โครงสร้างทุติยภูมิ

3. โครงสร้างรูปทรงหลายหน้า เมื่อนำโครงสร้างทุติยภูมิ มาเชื่อมต่อกันจะเกิดเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่ ซีโอไลต์ต่างชนิดกันจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ทำให้คุณสมบัติของซีโอไลต์นั้น ๆ มีคุณสมบัติแตกต่างกันไปด้วย

2.7.2 คุณสมบัติของซีโอไลต์

เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์ที่เป็นแบบเปิดประกอบด้วยช่องว่าง และการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก ซึ่งมีแคทไอออน และ โมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ภายใน โดยสามารถแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนอื่นได้ คือมีคุณสมบัติเป็น Ion exchange นำไปใช้ขบวนการ Water softening และ Water treatment นอกจากนี้โลหะอื่น ๆ เช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม ซิลเวอร์ ไอออนก็สามารถแลกเปลี่ยนได้เช่นกัน ยังมีคุณสมบัติเป็น Reversible dehydration ซึ่งเป็น Molecular sieve ที่ทำให้มีคุณสมบัติต่างจากการดูดซับ และมีคุณสมบัติเป็นสารดูดซับที่ดีสามารถแยกในการแยกแก๊สและไอของผสม เช่น แอมโมเนีย ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ด้วย เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน

2.7.3 ชนิดของซีโอไลต์

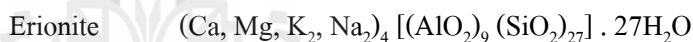
ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ ซีโอไลต์ตามธรรมชาติ (Natural or Mineral zeolite) และสังเคราะห์ขึ้น (Synthetic zeolite) ซีโอไลต์แต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ที่พบตามธรรมชาติมีมากกว่า 35 ชนิด ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์ขึ้นมีประมาณ 100 ชนิด สามารถแยกชนิดของซีโอไลต์ได้ 2 ชนิด ดังนี้

1. ซีโอไลต์ที่เกิดตามธรรมชาติ (Natural or Mineral zeolite) ประกอบด้วย Hydrated Alumino Silicates ของ Alkaline และ Alkaline-Earth Metals ซึ่งซีโอไลต์ธรรมชาติมีน้ำหนักเบา เป็นแร่ที่มีความนุ่ม มีสีน้ำตาล น้ำตาลเหลืองหรือสีเขียวจาง มีลักษณะคล้ายขอล์ก ซีโอไลต์ธรรมชาติที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด คือ Clinoptilolite Chabazite และ Mordenite บางอุตสาหกรรม อาจจะใช้ Phillipsite ชนิดของซีโอไลต์ที่สำคัญคือ (วัฒนชัย อยู่ในวงศ์, 2546)

Group 1 : Single 4 - ring



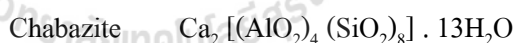
Group 2 : Single 6 – ring



Group 3 : Double 4 – ring



Group 4 : Double 6 – ring



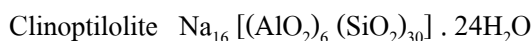
Group 5 : Complex 4 – 1



Group 6 : Complex 5 – 1



Group 7 : Complex 4 – 4 – 1



ในสภาพธรรมชาติพบแร่ซีโอไลต์ประมาณ 50 ชนิด แต่ที่พบบ่อยและมีปริมาณค่อนข้างสูงในดินมีเพียง 9 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ Clinoptilolite Analcime Chabazite Heulandite Mordenite Phillipsite Natrolite Stilpite และ Gesmondine แร่ทั้ง 9 ชนิด ในกลุ่มนี้ Clinoptilolite และ Mordenite เท่านั้นที่พบบ่อยมากในดินทั่วไป

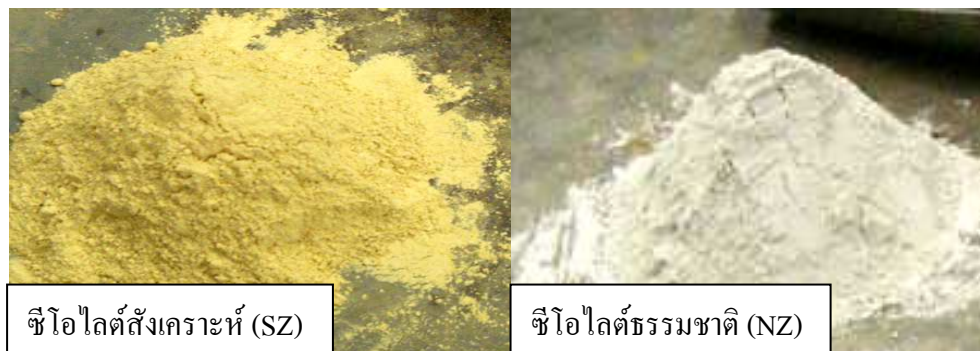
ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ (วัฒนชัย อยู่ในวงศ, 2546)

ซีโอไลต์	ส่วนประกอบทางเคมี	อัตราส่วน Si:Al	ช่องว่างโมเลกุล (นาโนเมตร)
Analcime	$\text{Na} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.7-2.9	0.26
Chabazite	$2\text{Ca} \cdot 4\text{AlO}_2 \cdot 8\text{SiO}_2 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	1.4-3.0	0.31x0.44
Clinoptilolite	$\text{Na/K} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	4.0-5.1	0.31x0.79
Erionite	$\text{Ca/Mg/2Na/2K} \cdot 2\text{AlO}_2 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2.2	0.76
Laumkotite	$\text{Ca} \cdot 2\text{AlO}_2 \cdot 4\text{SiO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.8-2.6	0.46x0.63
Mordentite	$\text{Na} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	4.4-5.3	0.67x0.70
Phiplippite	$\text{K/Na} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.3-3.0	0.28x0.48
Stellerite	$\text{Ca} \cdot 2\text{AlO}_2 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.8-4.4	0.48x0.59

2. ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetic zeolite) เกิดจากการทำปฏิกิริยาเบสิกออกไซด์ต่าง ๆ เช่น Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่เป็นเจล (Gelatin) จนถึงเป็นรูพรุน (Porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (Sandlike) ได้แก่ Zeolite A Zeolite Y Zeolite F Zeolite M เป็นต้น

ตารางที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบสารประกอบของซีโอไลต์ (ไกรภพ อินทร์แสง, 2550)

สารประกอบ	NZ (%)	SZ (%)
SiO_2	71.75	61 ถึง 67
Al_2O_3	13.19	11 ถึง 12.4
Fe_2O_3	2.20	4.3 ถึง 6.98
CaO	0.11	2.25 ถึง 3.24
MgO	0.40	1.54 ถึง 1.64



รูปที่ 2.17 ลักษณะของซีโอไลต์ (ไกรภพ อินทร์แสวง และคณะ, 2550)

2.7.4 ประโยชน์ของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สังเคราะห์มีประโยชน์และถูกนำมาใช้มากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ เนื่องจากมีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอ มีโครงสร้างที่แน่นอนและค่อนข้างบริสุทธิ์ มีสารปนเปื้อนน้อย ปัจจุบันซีโอไลต์มีประโยชน์และมีบทบาทในอุตสาหกรรมหลายด้านดังนี้

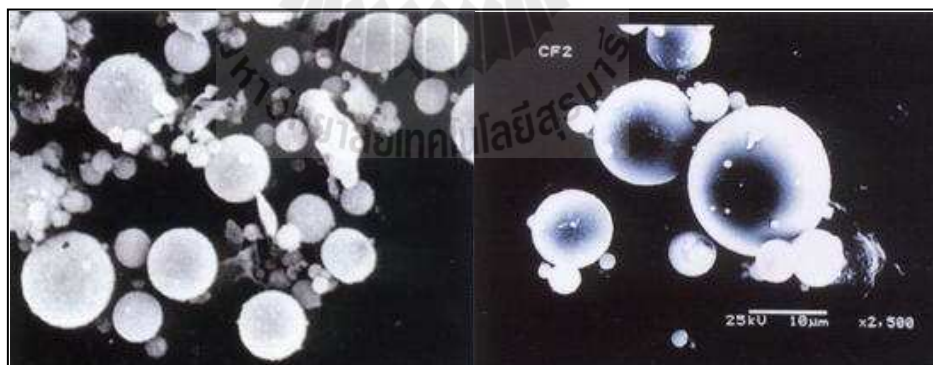
1. ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น Hydrogenation Isylation Aromatization และ Isomerization เป็นต้น
2. ใช้เป็น Sorption agent เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่าง ๆ ได้ตามขนาดและโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด เช่น ใช้ในขบวนการ Defying ของ Natural gas แยก CO_2 และสารประกอบซัลเฟอร์จากแก๊สธรรมชาติแยกสารที่ทำให้เกิดสารมลภาวะ เช่น SO_2 NO_2 และ O_2 จากอากาศ เป็นต้น
3. Water softeners ซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออนได้จึงช่วยลดความกระด้างของน้ำ
4. ใช้เป็น Ion exchange resins จากคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเรซิน เพื่อแลกเปลี่ยนกับไอออนบวก Univalent หรือ Divalent selectivity ของซีโอไลต์ของไอออนบวกที่เป็น Univalent จากมากไปหาน้อย
5. ใช้เป็น Detergent builder ซีโอไลต์เป็นที่นิยมในต่างประเทศที่เจริญแล้ว โดยใช้เป็นส่วนผสมของผงซักฟอกเนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับทำผงซักฟอก คือมีค่า Capacity และ Kinetics ซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนบวกเป็นไปได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วยซึ่งฟอสเฟตทำให้ฟิชน้ำหรือพวกสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้มีปัญหาในการกำจัดและเมื่อมีการตายแล้วทับถมกันเข้าจึงทำให้น้ำเน่าเสียและสัตว์น้ำที่จำเป็นลดจำนวนลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

2.7.5 ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับซีโอไลต์

ซีโอไลต์ ได้ชื่อว่าเป็น Molecular sieve เนื่องจากโมเลกุลมีช่องว่างที่สม่ำเสมอจำนวนมากซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติคล้าย sieve บนโมเลกุลที่มีช่องว่างที่สม่ำเสมอ เนื่องจากซีโอไลต์มีมากมายหลายชนิดและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซีโอไลต์แต่ละชนิดจึงมีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อจะนำไปใช้งานในด้านใดจึงควรศึกษาคุณสมบัติให้เหมาะสมก่อนเพื่อให้สามารถใช้งานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.8 เถ้าลอย (fly ash)

เถ้าลอย เป็นผลพลอยได้ (By product) จากการเผาถ่านหิน เพื่อใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน และถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตาจึงเรียกกันว่าเถ้าก้นเตา (Bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า $1\ \mu\text{m}$ จนถึงประมาณ $200\ \mu\text{m}$ จะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่าเถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ลอยออกไปกับอากาศ และเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบบริเวณโรงไฟฟ้า เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานใช้ผสมปูนซีเมนต์ทำคอนกรีตได้ ปัจจุบันเถ้าลอยมีมากจึงจำเป็นต้องกำจัด หรือนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อลดปัญหาทางด้านมลภาวะ (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)



รูปที่ 2.18 ภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy (SEM) ของเถ้าลอย (www.environnet.in.th)

เถ้าลอย (Fly ash) มีอนุภาคขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ของถ่านหินหรือเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งอื่น ๆ พบได้มากในอากาศเสียจากโรงผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนด้วยถ่านหิน เถ้าลอยมักมีส่วนประกอบของโลหะหนักอยู่ด้วย ซึ่งเมื่อหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดโรคทางระบบทางเดินหายใจ และความผิดปกติทางประสาทได้ ที่ผ่านมามีการ

นำเข้าถั่วลยจากต่างประเทศ เนื่องจากคุณสมบัติของถั่วลยในขณะนั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่ามีปัญหาหรือไม่ ยกตัวอย่างเช่น ค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อช่วงแรก ๆ พบว่ามีค่าสูงถึงร้อยละ 12 ถึง 15 ซึ่งตามปกติจะต้องไม่เกินร้อยละ 3 จึงไม่แน่ใจว่าจะสามารถนำเข้าถั่วลยมาใช้ได้ เพราะเกรงว่าจะเสี่ยงต่อการก่อสร้างอาคารสูง แต่ปัจจุบันสามารถมั่นใจคุณภาพของถั่วลยได้ เนื่องจากมีค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 2 (พิชัย นิมิตรยงสกุล, 2550)

ถั่วถ่านหินนิยมนำไปใช้ในงานคอนกรีตมากกว่าในงานชนิดอื่น ๆ ด้วยเหตุผล 2 ประการคือประการแรก ถั่วถ่านหินมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งออกไซด์ของธาตุเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้ถั่วถ่านหินที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สองถั่วถ่านหินมีอนุภาคค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตถั่วถ่านหินจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างปูนซีเมนต์ หิน หรือทราย ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องผสมได้ เนื่องจากรูปร่างที่กลมและผิวสัมผัสที่ลื่นของถั่วถ่านหิน ทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคต่ำลง นอกจากนี้ลักษณะทรงกลมของถั่วถ่านหิน จะช่วยทำให้คอนกรีตมีการลื่นไหลที่ดีขึ้น ทำให้การสูบส่งคอนกรีตหรือเทคอนกรีตในแบบทำได้สะดวกและง่ายขึ้น

การใช้ถั่วถ่านหินในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดการหดตัว ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้ถั่วถ่านหินจะมีข้อเสียคือทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและสลายของน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพื่อเพิ่มฟองอากาศมากขึ้น เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกันกับคอนกรีตที่ไม่มีถั่วถ่านหินผสมอยู่

2.8.1 ความละเอียดของถั่วถ่านหิน

ถั่วถ่านหินโดยทั่วไปจะมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อย โดยลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 μm (0.001 mm) จนถึง 0.15 mm ความละเอียดของถั่วถ่านหินที่ได้จากการเผาถั่วถ่านหินจะขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถั่วถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของถั่วเผา การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะได้ถั่วถ่านหินที่มีคุณภาพสูงและมีทรงกลม แต่ในกรณีเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของถั่วถ่านหินจะไม่แน่นอน สำหรับถั่วถ่านหินในประเทศไทยพบว่าความละเอียดของถั่วถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งทดสอบโดยวิธีของเบลนมีความละเอียดอยู่ในช่วง 2,500 ถึง 3,500 cm^2/g

การวัดความละเอียดของถั่วถ่านหินมี 2 วิธีที่นิยมคือ วิธีการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 μm) กับวิธีวัดพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักโดยวิธีของเบลนในสหรัฐอเมริกา

ใช้วิธีร่อนผ่านแรงเป็นวิธีมาตรฐานวิธีเดียวในการกำหนดความละเอียดของเม็ดถ่านหินกล่าวคือเม็ดถ่านหินต้องมีขนาดของอนุภาคที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 66 โดยน้ำหนักเม็ดถ่านหินที่ละเอียดขึ้นจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น และทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เม็ดถ่านหินที่หยาบกว่า

2.8.2 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดถ่านหินคือ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ด้วยเหตุนี้ ASTM C 618 (2008) จึงแยกเม็ดถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยเม็ดถ่านหิน Class F มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และเม็ดถ่านหิน Class C มีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามเม็ดถ่านหินทั้งสองประเภทต่างก็มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีต

2.9 สรุปปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Davidovits et al. (1999) ได้รายงานถึงส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งจะเหมือนกับซีโอไลต์ แต่จะมีโครงสร้างเล็ก ๆ ที่มีรูปร่างไม่แน่นอน และมีการนำเอาสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงมาใช้ในการกระตุ้นอะตอมของซิลิกอนและอลูมิเนียมในวัสดุเพื่อให้ละลายกลายเป็นจีโอโพลิเมอร์เพสต์ กระบวนการ Polymerization จะเกิดขึ้นจากการให้ความร้อนแล้วตามด้วยการทำให้แห้งช่วงเวลาการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเร็วและช่วงเวลาการก่อตัวจะอยู่ภายใน 24-48 ชั่วโมง และจากการศึกษาได้รายงานถึงคุณสมบัติในแง่ดีของวัสดุนี้คือจะไม่ละลายในสารละลายกรด และไม่เกิดปฏิกิริยา Alkali aggregate ในสถานะที่มีความเป็นด่างสูง

Swanpoel et al. (2002) ได้ทำการศึกษากการทำจีโอโพลิเมอร์จาก เถ้าลอย และยังนำเอาวัสดุที่มีส่วนประกอบของซิลิกา และอลูมินา ได้แก่ ดินขาวเผา โดยจะถูกผสมและทำการกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ โซเดียมซิลิเกต โซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำเป็นส่วนประกอบ แล้วนำตัวอย่างที่ได้ นำเข้าสู่อบทำการบ่มด้วยความร้อนเพื่อเร่งปฏิกิริยา Polymerization ที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70°C ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน คือ 6 24 48 และ 72 ชั่วโมง จากการศึกษพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะให้กำลังอัดสูงสุดถึง 8 MPa ที่อายุการบ่มได้ 28 วัน

Hardjito et al. (2004) ได้ทำการวิจัยเรื่องจีโอโพลิเมอร์ โดยใช้เถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ที่ได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าในการทำจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกันกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังกล่าวได้มาจากการผสมเถ้าลอยกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60 ถึง 90°C ในการ

เร่งปฏิกิริยา สารเร่งที่ใช้เป็นพวกอัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkaline silicate) และอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) จากการศึกษาพบว่ากำลังอัดที่ได้ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวซึ่งมีผลต่อกำลังอัด ซึ่งได้แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยังมีความเข้มข้นสูงกำลังอัดก็ยิ่งดีขึ้น อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio) ที่สูงขึ้นก็มีผลต่อกำลังอัดที่ได้รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้เร่งปฏิกิริยา และระยะเวลาในการบ่ม

สมิทร ส่งพิริยะกิจ (2004) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน ใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา อัตราส่วนระหว่างสารละลายต่อเถ้าถ่านหินคือ 0.376 0.386 0.396 และ 0.416 โดยน้ำหนัก หล่อขนาดของตัวอย่างมอร์ตาร์เท่ากับ $50 \times 50 \times 50$ mm โดยใช้อัตราส่วนของเถ้าถ่านหินต่อทราย 1:2.75 โดยน้ำหนัก ทำการแบ่งตัวอย่างทั้งหมดออกเป็น 2 ชุด ทำการผสมที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 25 และ 45°C หลังจากหล่อตัวอย่างเสร็จ ชุดแรกทำการเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 30°C ชุดที่สองทำการเร่งปฏิกิริยาที่ 60°C ใช้เวลาในการเร่งปฏิกิริยา 24 ชั่วโมงเท่ากันจากนั้นนำทั้งสองชุดมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 30°C ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 1 7 และ 28 วัน จากการศึกษาพบว่า การผสมมอร์ตาร์ที่อุณหภูมิสูงและการเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะให้กำลังอัดที่สูงได้ตั้งแต่วินาทีแรกและจะยังคงพัฒนา กำลังเพิ่มขึ้นได้อีกตามระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น เมื่อผสมตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25°C และเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 30°C กำลังอัดจะต่ำในช่วงแรก แต่จะมีการเพิ่มกำลังขึ้นที่น้อยโยยในจนถึงช่วงสุดท้าย กำลังอัดที่สูงขึ้นเหล่านั้นเป็นผลมาจากการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิสูง

อาภา สรณเสาวภาคย์ และปริญญา จินดาประเสริฐ (2550) ได้ทำการศึกษากการกระตุ้นเถ้าหนักด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพัฒนาการการใช้งานเถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 7.5 10 และ 15 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาค่าการไหลแผ่และกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 3 และ 14 วัน และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการศึกษาพบว่าการใช้เถ้าหนักที่มีขนาดค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 2 ถึง 3 โดยน้ำหนัก สามารถพัฒนาใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ และกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน จะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการไหลแผ่ กำลังรับแรงอัด และโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์

ภากร ไตรศิริวณิชย์ และปริญญา จินดาประเสริฐ (2550) ได้ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนัก เถ้าหนัก เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหิน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับเถ้าลอย มีสีเข้มและขนาดเม็ดที่หยาบเมื่อเทียบกับเถ้าลอย เกิดจากการจับตัวกันเป็นก้อนของ เถ้าถ่านหิน และตกลงมาที่ก้นเตาเนื่องจากมีน้ำหนักมาก เถ้าหนักมีคุณสมบัติทางเคมีที่คล้ายกับเถ้าลอยจึงถือว่าเป็นคุณสมบัติในการเป็นสารปอซโซลานเช่นกัน งานวิจัยจึงศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน และส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าหนัก เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ที่ทำจากเถ้าหนัก ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน เป็นตัวชี้วัด และมีตัวแปรในการศึกษาดังนี้ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิในการบ่ม อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา ความละเอียดของเถ้าหนัก จากการศึกษาพบว่าเถ้าหนักมีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เช่นเดียวกับเถ้าลอย และสามารถพัฒนาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าหนักเพื่อใช้ในการงานคอนกรีตทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอนาคต ซึ่งจะเป็นทางเลือกใหม่และเป็นการลดปัญหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ และศุภสิทธิ์ คนใหญ่ (2550) ได้ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งได้ทำการศึกษาวิธีการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผา โดยศึกษาอุณหภูมิและช่วงเวลาในการเผาดินขาว อัตราส่วนของเถ้าลอยผสมดินขาวเผา ความสามารถทำงานได้ อุณหภูมิและระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิและช่วงเวลาในการเผาดินขาวที่เหมาะสมคือ 600°C ใช้เวลาเผา 2 ชั่วโมง การผสมดินขาวเผาจะทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยลดลง จีโอโพลิเมอร์ที่มีดินขาวเผาไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะให้กำลังอัดที่ดีในช่วง 300-500 ksc การไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์อยู่ในช่วง 110 ถึง 125% ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนัก ที่เหมาะสมในการผลิตสารจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผาคือ 0.67-1.0 ควรให้ตัวอย่างก่อตัวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนการนำเข้าสู่อบ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาในตู้อบที่เหมาะสมคือ 75°C

เกียรติศักดิ์ ศรีคุ้มถึง และปริญญา จินดาประเสริฐ (2550) ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมเถ้าแกลบ เป็นการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยผสมเถ้าแกลบ โดยทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ โดยมีตัวแปรในการศึกษาดังนี้ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลาก่อนนำเข้าเตาอบ

ความละเอียดของเถ้าแกลบ และร้อยละการแทนที่ของเถ้าลอยด้วยเถ้าแกลบจากการศึกษาพบว่า เถ้าแกลบมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และงานคอนกรีตในอนาคต เป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งจะขจัดปัญหาและผลกระทบการเกิดสภาวะเรือนกระจก

ประมวล โสมละคร และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมแร่ดินเบา (Diatomite) โดยวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อทำการศึกษาคูณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมแร่ดินเบา โดยศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 7 วัน โดยศึกษาอุณหภูมิที่ใช้เผาแร่ดินเบา อุณหภูมิที่ใช้เร่งปฏิกิริยาตัวอย่าง ระยะเวลาก่อนเร่งปฏิกิริยาตัวอย่าง และเวลาที่ใช้เร่งปฏิกิริยาตัวอย่าง ใช้เถ้าลอยค้ำขนาดความละเอียดของเบลนเท่ากับ $4,500 \text{ cm}^2/\text{g}$. ทดแทนแร่ดินเบาในเถ้าลอยร้อยละ 0 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ ระยะเวลาก่อนเร่งปฏิกิริยาตัวอย่าง 1 ชั่วโมง เร่งปฏิกิริยาตัวอย่างที่เวลา 48 ชั่วโมงด้วยอุณหภูมิการบ่ม 60°C ให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้สูง และผลการทดสอบยังพบอีกว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแร่ดินเบาทดแทนในเถ้าลอยไม่เกินร้อยละ 60 โดยน้ำหนักสามารถพัฒนากำลังอัดใช้งานได้และนำไปใช้ทำสารซีเมนต์เพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้

Nguyen Van Chanh et al. (2008) ได้ทำการศึกษา Geopolymer concrete โดยในการศึกษาใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาระยะเวลาการก่อตัว ความสามารถในการทำงานของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาช่วง $60-90^\circ\text{C}$ ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยจะมีค่าเพิ่มขึ้น เวลาในการเร่งปฏิกิริยาตัวอย่างช่วง 24-72 ชั่วโมง จะมีค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่สูง แต่เวลาการเร่งปฏิกิริยาช่วง 48-72 ชั่วโมง จะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ไม่แตกต่างกันมาก การผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเมื่อใส่น้ำเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมจะทำให้เพิ่มความสามารถในการเทได้ แต่ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะมีค่าน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกับคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะให้ค่ากำลังรับแรงอัด ความทนทานได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

Hu Mingyu et al. (2007) ได้ทำการศึกษผลกระทบ Alkali-activated fly ash based geopolymer with zeolite or bentonite as additive จีโอโพลิเมอร์ใช้เถ้าลอย ซีโอไลต์ และเบนโทไนท์เป็นวัสดุตั้งต้น ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออกไซด์เป็นตัว

ทำปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาถึงผลกระทบต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ ผลการทดสอบพบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออกไซด์มีความสำคัญต่อการให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์

อาภา สธนเสาวภาคย์ และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษา Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar งานวิจัยนี้ใช้เถ้าหนักเป็นวัสดุตั้งต้น ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาถึงผลจากความละเอียดของเถ้าลอย อัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสาน อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลจากการเพิ่มน้ำในส่วนผสม ผลจากการเพิ่มสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือสารลดน้ำ แล้วศึกษาถึงความสามารถเทได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ผลการทดสอบพบว่าความละเอียดของเถ้าลอยส่งผลที่ดีต่อความสามารถในการเทและกำลังอัด อัตราส่วนของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสานที่มากส่งผลถึงความสามารถในการเทแต่ค่ากำลังน้อยตามไปด้วย ซึ่งช่วงที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 0.429-0.709 ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 42-52 MPa ผลจากอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีภาวะที่ดีที่สุดคือ 1.50 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อความสามารถเทได้และกำลังอัดอย่างมาก ซึ่งความเข้มข้นน้อยความสามารถจะดีแต่ค่ากำลังก็จะน้อย หากความเข้มข้นสูงค่ากำลังอัดจะมีค่าสูง แต่ความสามารถการเทจะน้อย ผลจากการเพิ่มน้ำในส่วนผสมพบว่าช่วงที่เหมาะสมคือร้อยละ 3 ถึง 9 ผลจากการเพิ่มโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือสารลดน้ำพบว่าสามารถช่วยเพิ่มความสามารถเทได้และค่ากำลังอยู่ในภาวะที่ดี ซึ่งช่วงที่เหมาะสมคือ 1-6%

Hardjito et al. (2008) ได้ทำการศึกษา Strength and setting times of low calcium fly ash based geopolymer mortar จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้น ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาถึงค่ากำลังอัดและระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงจะทำให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูงแต่ระยะเวลาการก่อตัวจะค่อนข้างเร็ว

เชิรศักดิ์ กลัปประสิทธิ์ และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาต่อกำลังอัดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 mm สูง 60 mm ทำการทดสอบกำลังอัด และอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่าสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินามีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อซิลิกาต่ออลูมินาสูงถึง 8.28 กำลังอัดของเพสต์เริ่มมีค่าน้อยลง และมี

การแตกร้าวเนื่องจากความเสถียรเชิงมิติของเพสต์ที่มีสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาสูงกว่า 8.28 กำลังอัดของเพสต์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 510 ksc ที่อายุ 28 วัน เมื่อบ่มในอุณหภูมิห้อง และการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยอุณหภูมิ 60°C เวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น

เจริญชัย ฤทธิรุท และปริญญา จินดาประเสริฐ (2550) ได้ทำการศึกษาสารละลายที่แตกต่างกันในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากดินขาวเผาระนอง ทำการทดสอบแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน และถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งสารละลายต่างที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.33 0.67 1.00 1.33 และ 1.67 จากการทดสอบพบว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง พบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมจากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความเป็นเนื้อเดียวกันและลักษณะพื้นผิวที่ละเอียดมากกว่าตัวอย่างที่ใช้จากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Lertkhsitpong et al. (2007) ได้ทำการศึกษา Synthesis of lightweight geopolymeric materials from diatomaceous earth การศึกษานี้ใช้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) และโซเดียมออกไซด์ต่ออลูมินา ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) เท่ากับ 13.0-33.5 และ 0.7-3.09 ตามลำดับ โดยทำการศึกษาถึงผลของความละเอียดของไดอะตอมไมต์ อุณหภูมิการเผาไดอะตอมไมต์ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ใช้สัดส่วนของการผสมประกอบด้วยไดอะตอมไมต์และเถ้าแกลบ แล้วเร่งปฏิกิริยาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 75 และ 90°C และบ่มเป็นเวลา 1 2 3 4 และ 5 วัน แล้วทำการวิเคราะห์ถึงโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาไดอะตอมไมต์ คือ 800°C มีขนาดของความละเอียดไดอะตอมไมต์ที่เล็กลงและความเข้มข้นของสารละลายที่มากขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพิ่มขึ้น สำหรับการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และ จะสูงกว่าโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการบ่มที่เหมาะสม คือ 75°C และ 7 วัน ตามลำดับ

Hardjito and Rangsang (2008) ได้ทำการศึกษา Fly ash based geopolymer concrete โดยที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้น ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาถึงค่ากำลังอัดและตัวแปรต่าง ๆ ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงจะทำให้ได้ค่ากำลังอัด

ที่สูง การเพิ่มสารลดน้ำที่ 4% ของเถ้าลอยช่วยเพิ่มความสามารถในการเทได้ดีแต่ค่ากำลังอัดจะลดลงประมาณ 2% การกระตุ้นปฏิกิริยาคด้วยความร้อนที่ 75 และ 90°C มีความเหมาะสมที่ให้ค่ากำลังอัดที่สูงและเมื่อให้เวลาในการกระตุ้นที่มากขึ้นจะช่วยให้ได้ค่ากำลังอัดที่ดีเช่นเดียวกัน

2.10 สรุปแนวคิดที่ได้จากปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาจากงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมระหว่าง 60-90°C ที่สามารถให้ค่ากำลังอัดที่ดี เนื่องจากอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า 60°C นั้นไม่ได้แตกต่างจากอุณหภูมิปกติของสภาพอากาศประเทศไทย ส่วนกรณีอุณหภูมิที่สูงกว่า 90°C นั้นไม่ส่งผลดีต่อองค์ประกอบของสารประกอบหลัก เพราะซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) จะมีการสลายที่อุณหภูมิประมาณ 110°C ซึ่งโดยปกติจะนิยมใช้ประมาณร้อยละ 60 ถึง 80 ของอุณหภูมิที่จะทำให้องค์ประกอบของสารประกอบหลักสลาย

2.10.2 ระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยา จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมระหว่าง 24-96 ชั่วโมง ที่สามารถให้ค่ากำลังอัดที่ดี เนื่องจากระยะเวลาที่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ตัวอย่างของจีโอโพลิเมอร์ยังเป็นการทำปฏิกิริยาในช่วงเริ่มต้น แต่ระยะเวลาที่มากกว่า 96 ชั่วโมง จะทำให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มีการสูญเสียความชื้นที่มากเกินไปทำให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เกิดรอยร้าว ซึ่งไม่น่าส่งผลดีต่อการพัฒนาต้านกำลังอัด

2.10.3 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH concentration)

ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมระหว่าง 10-15 โมลาร์ ที่สามารถให้ค่ากำลังอัดที่ดี และความสามารถการทำงานที่อยู่ในเกณฑ์ดี แต่สังเกตเห็นว่าควรศึกษาเพิ่มเติมที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 5 และ 20 โมลาร์ เนื่องจากได้ทราบถึงแนวโน้มของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์

2.10.4 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (Liquid alkaline/binder ratios)

อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (Liquid alkaline/binder ratios) จากงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมระหว่าง 0.40-0.70 ที่สามารถให้ค่ากำลังอัดและความสามารถในการทำงานที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี เนื่องจากอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.40 นั้นตามข้อมูลของงานวิจัยที่ใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ผ่านมามีความพรุนที่สูง ซึ่งอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่ต่ำกว่า 0.40 ส่วนผสมค่อนข้างแห้งมาก อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง จึงไม่น่าส่งผลดีต่อการศึกษา ส่วนกรณีอัตราส่วน

ของเหลวต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า 0.70 นั้นเป็นปริมาณของเหลวที่สูงในการผสมมีเกิดความเสี่ยงเปลือง อีกทั้งในการนำไปใช้งานมีความเป็นไปได้น้อย

2.10.5 อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมระหว่าง 1.0-2.0 ที่สามารถให้ค่ากำลังอัด และความสามารถทำงานที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ซึ่งสังเกตเห็นว่าควรศึกษาเพิ่มเติมที่อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 และ 2.5 เนื่องจากได้ทราบถึงแนวโน้มของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับจีโอโพลิเมอร์

2.10.6 ปริมาณการแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอย

ปริมาณการแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยนั้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาในลักษณะของการแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยเพียงบางส่วนเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการแทนที่ในปริมาณที่สูงมากกว่างานวิจัยที่ผ่านมา เนื่องจากการศึกษาถึงพฤติกรรมของวัสดุเมื่อถูกแทนที่ในปริมาณที่สูง ทั้งในเรื่องของกำลังอัดและความสามารถในการทำงาน และโครงสร้างทางจุลภาค ดังนั้นจึงได้กำหนดขอบเขตที่ใช้การแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 โดยน้ำหนัก

2.10.7 ระยะเวลาของการก่อตัวและการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ระยะเวลาของการก่อตัวและการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาของการก่อตัวที่ค่อนข้างเร็ว ทำให้การทำงานมีความลำบาก การใช้โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นส่วนผสมหลักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากข้อมูลคุณสมบัติทางเคมีที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่สูง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่สูงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่าที่ใช้เถ้าลอยเป็นหลัก เนื่องจากเถ้าลอยมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่ต่ำ ดังนั้นน่าจะส่งผลดีต่อการเพิ่มความสามารถทำงานได้และยืดระยะเวลาการก่อตัว

2.10.8 ระยะเวลาของการบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ระยะเวลาของการบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์หลังจากอายุการบ่ม 7 วัน นั้น ค่ากำลังอัดจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นจึงได้กำหนดขอบเขตการศึกษาที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

2.11 กรอบแนวคิดที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

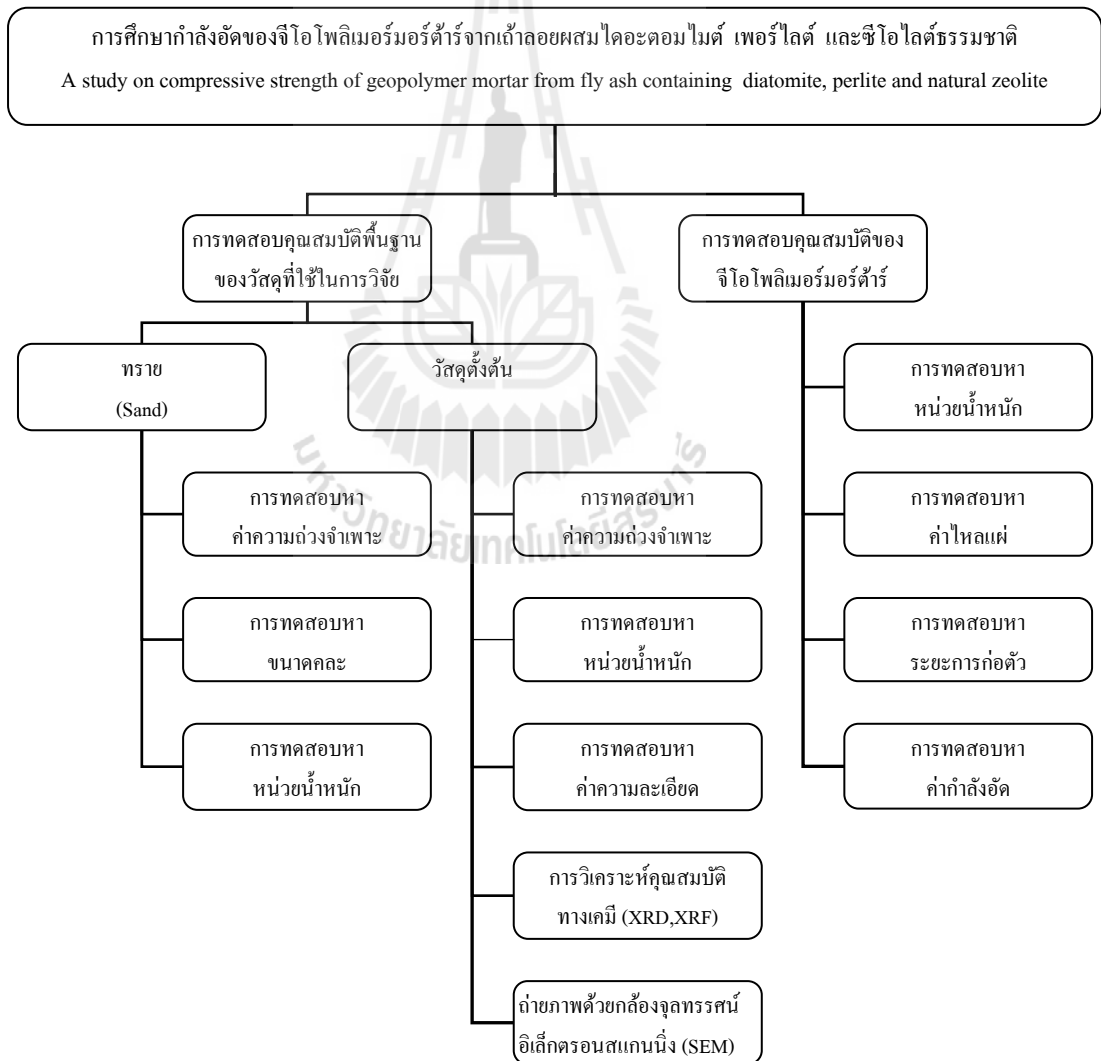
กรอบแนวคิดที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปได้ดังนี้ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 60 75 และ 90°C ระยะเวลาการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 10 15 และ 20 โมลาร์ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 0.50 0.60 และ 0.70 อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 ปริมาณการแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลด์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 ระยะเวลาของการบ่มตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 7 14 และ 28 วัน



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยการศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และวิธีดำเนินงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยใช้วัสดุในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1.1 ไดอะตอมไมต์ (Diatomite)

3.1.2 เพอร์ไลต์ (Perlite)

3.1.3 ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural zeolite) ประเภท Clinoptilolite

3.1.4 เถ้าลอย (Fly ash)

3.1.5 ทราชม้วนน้ำ ซึ่งมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 (2008) นำทรายมาล้างเอาส่วนที่เป็นดิน และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจนสะอาด นำทรายที่เปียกมาผึ่งแดดให้แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 16 30 50 100 200 และ Pan เพื่อคัดขนาด

3.1.6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 5 10 15 และ 20 โมลาร์ โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย

3.1.7 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งมีองค์ประกอบของ $\text{Na}_2=15.32\%$, $\text{SiO}_3=31.87\%$, $\text{H}_2\text{O}=51.81\%$ โดยน้ำหนัก และมีค่า pH = 9.05 ตรวจสอบโดยเครื่องพีเอชมิเตอร์



รูปที่ 3.2 วัสดุปอซโซลานที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.3 สารละลายชนิดต่างที่ใช้ในงานวิจัย

3.2 ข้อกำหนดของงานวิจัย

3.2.1 ขนาดคละของทราย

ทรายที่ใช้ในงานวิจัยจะควบคุมขนาดคละให้ได้ตามข้อกำหนดขนาดคละมาตรฐาน ASTM C 33 (Standard specification for concrete aggregates)

โดยทรายที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จะคัดขนาดให้ได้เป็นทรายละเอียด เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้วัสดุพอลิเอทานิลเป็นวัสดุตั้งต้นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้แก่ ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ซึ่งจากลักษณะของวัสดุเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ดังนั้นจึงได้คัดขนาดให้ได้ทรายละเอียดเพื่ออุดช่องว่างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ให้มีความหนาแน่นขึ้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.2.2 อุณหภูมิการผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

การผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จะดำเนินการกระบวนการผสมในอุณหภูมิห้องมีค่าระหว่าง 25-45°C เพื่อให้สอดคล้องกับอากาศประเทศไทย

3.2.3 แบบหล่อที่ใช้หล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

เนื่องจากสารละลายชนิดต่างจะทำปฏิกิริยากับแบบทองเหลือง ทำให้การถอดแบบนั้นมีความลำบาก ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงได้เลือกใช้แบบหล่อเป็นแบบอะคริลิก



รูปที่ 3.4 แบบหล่ออะคริลิก ขนาด 50x50x50 mm

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของทราย

1. การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพต่าง ๆ ของมวลรวมละเอียดโดยเฉพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวลรวมละเอียด และนำค่าไปออกแบบส่วนผสมของมอร์ต้าร์ ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะหาค่าได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างมวลรวมต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ามวลรวม โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.4 ถึง 3.0 และโดยทั่วไปจะใช้ค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่ดูดซึมน้ำและไม่คายน้ำ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำไว้ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 128 (2007)



รูปที่ 3.5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย

2. การทดสอบหาขนาดคละและ โมดูลัสความละเอียดของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาการกระจายตัวและส่วนคละของทราย ส่วนคละของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถเทได้ และแต่ละอนุภาคของมวลรวมละเอียดจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ไม่ว่ามวลรวมนั้นจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ตาม ในการทดสอบใช้วิธีร่อนด้วยตะแกรงให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C 136 (2006)



รูปที่ 3.6 การทดสอบหาขนาดคละและ โมดูลัสความละเอียดของทราย

3. การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อให้สามารถหาค่าหน่วยน้ำหนักของทรายได้ และนำค่าที่ได้มาออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2007)

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุประสาน

1. การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย

เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย สามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐาน ASTM C 188 (2003)



รูปที่ 3.7 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของวัสดุประสาน

2. การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2007)

3. การทดสอบหาค่าความละเอียดของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความละเอียดของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย ด้วยวิธีของเบลน (Blaine method) ใช้วัดพื้นที่ผิวของอนุภาค อาศัยหลักการของการอากาศไหลผ่านชั้นวัสดุทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C 204 (2007)



รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบหาความละเอียดของวัสดุประสาน ด้วยวิธีของเบลน (Blaine finness)

3.4 การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.4.1 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาหน่วยน้ำหนักของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ ที่อายุการบ่มตามที่ออกแบบไว้ ตามมาตรฐาน ASTM C 138/C 138M (2009)



รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งสำหรับหาหน่วยน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียด 0.01 กรัม

3.4.2 การทดสอบหาค่าการไหลแผ่

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ตามอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM C 1437 (2007)



รูปที่ 3.10 ชุดทดสอบการไหลแผ่

3.4.3 การทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัว

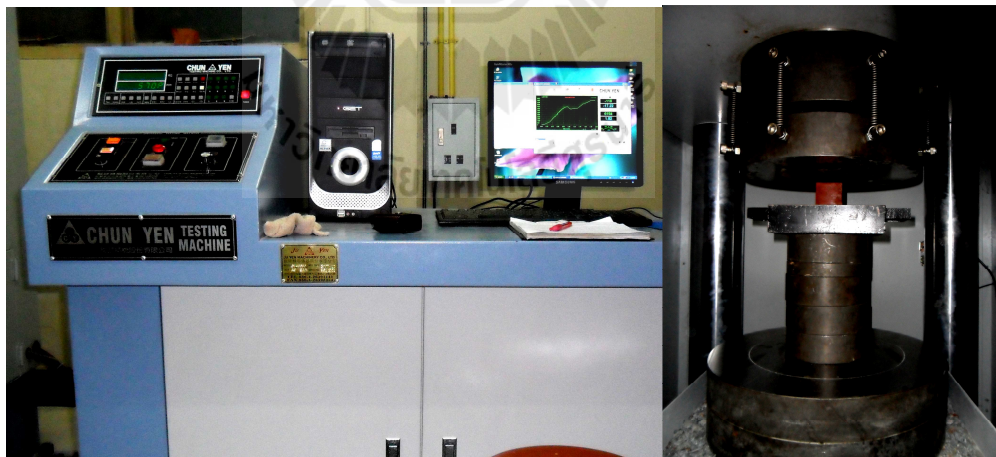
จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้เข็มมาตรฐานแบบไวแคต ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวคือเวลาที่เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 mm ปล่อยลงไปในซีเมนต์เพสต์ที่มีความชื้นเหลือปกติ และหลังจากนั้นเข็มจะจมลงในซีเมนต์เพสต์ 25 mm ในระยะเวลา 30 วินาที และการก่อตัวสุดท้ายเกิดขึ้นเมื่อเข็มไวแคตไม่สามารถจมลงในซีเมนต์เพสต์ได้ การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 191 (2008)



รูปที่ 3.11 ชุดทดสอบแบบไวแคต (Vicat apparatus)

3.4.4 การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุการบ่มตามที่ออกแบบไว้ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 (2002)



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive mechine 500 Tons)

3.5 สัญลักษณ์ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

งานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ของส่วนผสมต่าง ๆ ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$\underline{AA} \text{ M} - \underline{FABBXX} - \underline{YY} \quad (3.1)$$

เมื่อ	AA	หมายถึง	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
	M	หมายถึง	หน่วยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Molar)
	FA	หมายถึง	เถ้าลอย
	BB	หมายถึง	วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ
	XX	หมายถึง	การแทนที่เถ้าลอยด้วยวัสดุปอซโซลานธรรมชาติโดยน้ำหนัก
	YY	หมายถึง	อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตัวอย่างในการอ่านสัญลักษณ์ เช่น 15M-FADE80-1.5 หมายถึงจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่โคอะตอมไมต์ในเถ้าลอยร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5

3.6 วิธีดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.6.1 ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ 5 10 15 และ 20 โมลาร์ ซึ่งการเตรียมความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ ได้จากการชั่งน้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ด 40 g แล้วเติมน้ำกลั่นเพื่อเป็นตัวทำละลายให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 1000 ml ในระหว่างขั้นตอนการปรับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นจะมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นจะต้องเตรียมสารละลายก่อนการนำไปใช้ผสม 24 ชั่วโมง (NaOH : โมลน้ำหนักรวมของ Na=23 g O=16 g H=1 g ดังนั้นผลรวมน้ำหนักเท่ากับ 40 g ต่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์)

3.6.2 ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio) ตามที่ออกแบบอัตราส่วนผสมไว้

3.6.3 ทำการผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ มีขั้นตอนการผสมดังนี้ เริ่มต้นด้วยการนำวัสดุตั้งต้นใส่ในหม้อผสม จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) แล้วผสมให้ส่วนผสมเข้ากันประมาณ 5 นาที แล้วเติมทรายใช้เวลาผสมประมาณ 2-5 นาที สรุปใช้เวลาในการผสมประมาณ 10 นาที

3.6.4 นำจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จแล้ว เทใส่ในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm แล้วทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง และห่อแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติก

3.6.5 นำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เข้าสู่อบเพื่อเร่งปฏิกิริยาการก่อตัวด้วยความร้อน โดยใช้อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 75 และ 90°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำออกจากตู้อบ

3.6.6 ถอดแบบหล่อแล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องทดลองจนครบอายุการบ่ม จากนั้นวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพื่อเตรียมการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 109 (2002)

3.7 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm โดยทำการแปรผันตามผลกระทบต่าง ๆ ที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.7.1 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง โดยแปรผันอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 60 75 และ 90°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ดังแสดงในตารางที่ 3.3

3.7.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio) โดยแปรผันอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ดังแสดงในตารางที่ 3.4

3.7.3 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (Liquid /binder ratio) โดยแปรผันอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 0.50 0.60 และ 0.70 ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ดังแสดงในตารางที่ 3.5

3.7.4 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 10 15 และ 20 โมลาร์ ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ดังแสดงในตารางที่ 3.6

3.7.5 ผลจากการเพิ่มปริมาณน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ ในส่วนผสม โดยแปรผันอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 0 3 6 9 12 และ 15 ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน ดังแสดงในตารางที่ 3.7

3.7.6 ผลจากการที่ตัวอย่างมีอายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยแปรผันตามระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 14 และ 28 วัน ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (โดยน้ำหนัก)	วัสดุเชื่อมประสาน (g)	ทราย (g)	NaOH (g)	Na_2SiO_3 (g)
0.5	400	600	66.7	133.3
1.0	400	600	100.0	100.0
1.5	400	600	120.0	80.0
2.0	400	600	133.3	66.7
2.5	400	600	142.9	57.1

หมายเหตุ: รวมจำนวนก้อนตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 1,500 ก้อน

ตารางที่ 3.2 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง

รายการตัวอย่าง	ความเข้มข้น NaOH (โมลาร์)	L/B	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (โดยน้ำหนัก)	S/B	อุณหภูมิ การบ่ม ($^{\circ}\text{C}$)
15M-NP100-1.5	15	0.50	1.50	1.50	60 75 90
15M-NP80-1.5					
15M-NP60-1.5					
15M-NP0-1.5					

หมายเหตุ: จำนวนก้อนตัวอย่าง 180 ก้อน

ตารางที่ 3.3 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio)

รายการตัวอย่าง	ความเข้มข้น NaOH (โมลาร์)	L/B	S/B	อุณหภูมิ การบ่ม (°C)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (โดยน้ำหนัก)
15M-NP100-1.5	15	0.50	1.50	75	0.5 1.0 1.5 2.0 2.5
15M-NP80-1.5					
15M-NP60-1.5					
15M-NP0-1.5					

หมายเหตุ: จำนวนก้อนตัวอย่าง 300 ก้อน

ตารางที่ 3.4 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (Liquid alkaline/binder)

รายการ ตัวอย่าง	ความเข้มข้น NaOH (โมลาร์)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (โดยน้ำหนัก)	L/B	S/B	อุณหภูมิ การบ่ม (°C)
15M-NP100-1.5	15	1.50	0.4 0.5	1.50	75
15M-NP80-1.5					
15M-NP60-1.5			0.6 0.7		
15M-NP0-1.5					

หมายเหตุ: จำนวนก้อนตัวอย่าง 240 ก้อน

ตารางที่ 3.5 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

รายการ ตัวอย่าง	ความเข้มข้น NaOH (โมลาร์)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (โดยน้ำหนัก)	L/B	S/B	อุณหภูมิ การบ่ม (°C)
15M-NP100-1.5	5 10 15 20	1.50	0.5	1.50	75
15M-NP80-1.5					
15M-NP60-1.5					
15M-NP0-1.5					

หมายเหตุ: จำนวนก้อนตัวอย่าง 240 ก้อน

ตารางที่ 3.6 ผลจากการเพิ่มปริมาณน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ ในส่วนผสม

รายการ ตัวอย่าง	ความเข้มข้น NaOH (โมลาร์)	Na ₂ SiO ₃ /NaOH (โดยน้ำหนัก)	L/B	S/B	อุณหภูมิ การบ่ม (°C)	W/B (%)
15M-NP100-1.5	15	1.50	0.50	1.50	75	0 3 6
15M-NP80-1.5						9 12
15M-NP60-1.5						15
15M-NP0-1.5						

หมายเหตุ: จำนวนก้อนตัวอย่าง 360 ก้อน

ตารางที่ 3.7 ผลจากการที่ตัวอย่างมีอายุการบ่มเพิ่มขึ้น

รายการ ตัวอย่าง	ความเข้มข้น NaOH (โมลาร์)	Na ₂ SiO ₃ /NaOH (โดยน้ำหนัก)	L/B	S/B	อุณหภูมิ การบ่ม(°C)	อายุตัวอย่าง (วัน)
15M-NP100-1.5	15	1.50	0.50	1.50	75	7 14 28
15M-NP80-1.5						
15M-NP60-1.5						
15M-NP0-1.5						

หมายเหตุ: จำนวนก้อนตัวอย่าง 180 ก้อน

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย และผลการศึกษาสมบัติด้านการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสม โดยแปรผันตามผลกระทบต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

4.1 ลักษณะทางกายภาพวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

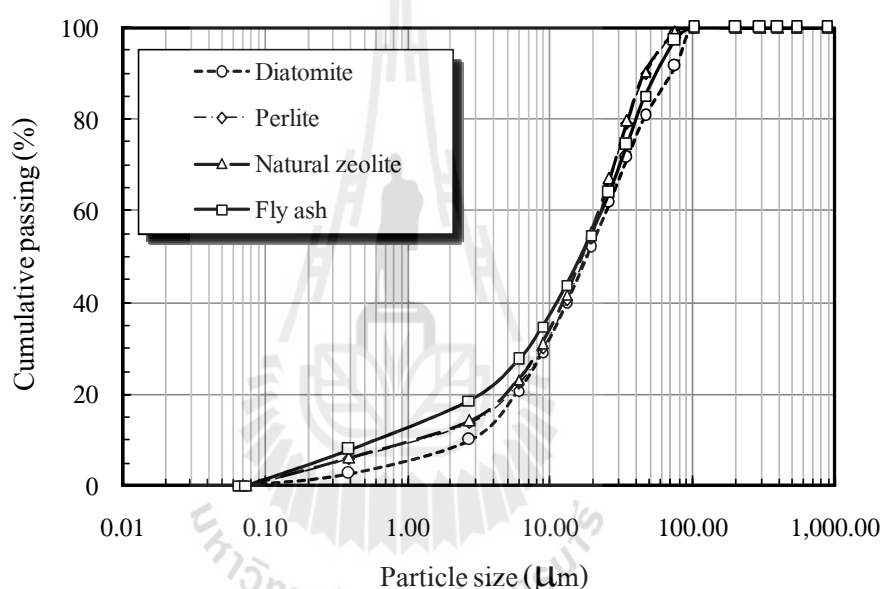
จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ เถ้าลอยและทราย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าเถ้าลอยและทราย โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.97 0.99 และ 0.95 เท่าของเถ้าลอย ตามลำดับ และหน่วยน้ำหนักประมาณ 0.50 0.84 และ 0.45 เท่าของเถ้าลอย ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด

จากผลการทดสอบ Laser particle size ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติและเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Median particle size, d_{50}) เท่ากับ 18.29 17.56 16.17 และ 17.60 μm ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเถ้าลอย ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

Physical properties	Diatomite	Perlite	Natural Zeolite	Fly ash	Sand
Specific gravity	2.33	2.39	2.28	2.41	2.69
Dry unit weight (kg/m^3)	490	820	440	973	1,625
Median particle size (μm)	18.29	17.56	16.17	17.60	-
Blaine fineness (cm^2/g)	12,662	5,800	11,303	4,310	-

จากผลการทดสอบหาค่าความละเอียดของวัสดุ ด้วยวิธีของเบลน (Blaine fineness) พบว่า ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติและเถ้าลอยมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 12,662 5,800 11,303 และ 4,310 cm^2/g ตามลำดับ และไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าเถ้าลอยประมาณ 2.94 1.35 และ 2.62 เท่าของเถ้าลอย ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ มีความละเอียดและความพรุนมากกว่าเถ้าลอย แสดงถึงมีความต้องการปริมาณของเหลวในส่วนผสมมากกว่าเถ้าลอยเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบความพรุนของไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์-ธรรมชาติ สามารถสรุปได้ว่าไดอะตอมไมต์เป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การกระจายอนุภาคของวัสดุ

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยใช้ข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM C 618 (2008) ในการวิเคราะห์ ในกรณีที่เป็นวัสดุปอซโซลาน Class N กำหนดให้ปริมาณสารประกอบหลักของวัสดุต้องมีค่า $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าหรือเท่ากับ 70% ค่า LOI ไม่มากกว่า 10% ค่า SO_3 ไม่มากกว่า 4% และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 μm) ไม่น้อยกว่า 66% ส่วนกรณีที่เป็นวัสดุปอซโซลาน Class C กำหนดให้ปริมาณสารประกอบ

หลักของวัสดุต้องมีค่า $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ ตั้งแต่ 50% แต่ไม่เกิน 70% ค่า LOI ไม่มากกว่า 6% ค่า SO_3 ไม่มากกว่า 5% และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 μm) ไม่น้อยกว่า 66% และกรณีที่เป็นวัสดุปอซโซลาน Class F กำหนดให้ปริมาณสารประกอบหลักของวัสดุต้องมีค่า $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าหรือเท่ากับ 70% ค่า LOI ไม่มากกว่า 6% ค่า SO_3 ไม่มากกว่า 5% และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 μm) ไม่น้อยกว่า 66% ผลการวิเคราะห์พบว่า

4.2.1 ไคอะตอมไมต์ มีปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3=87.80\%$ ปริมาณ $\text{SO}_3=0.02\%$ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับ 8.10% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าไคอะตอมไมต์ที่ผ่านกระบวนการเผาจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N

4.2.2 เพอร์ไลต์ มีปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3=84.63\%$ ปริมาณ $\text{SO}_3=0.03\%$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOI) เท่ากับ 1.25% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าเพอร์ไลต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเผาจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N

4.2.3 ซีโอไลต์ธรรมชาติ มีปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3=88.26\%$ ปริมาณ $\text{SO}_3=1.20\%$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOI) เท่ากับ 1.41% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าซีโอไลต์ธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการเผาจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N

4.2.4 เถ้าลอย มีปริมาณสารประกอบหลัก $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3=81.01\%$ ปริมาณ $\text{SO}_3=2.74\%$ ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOI) เท่ากับ 1.23% ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าลอยจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F

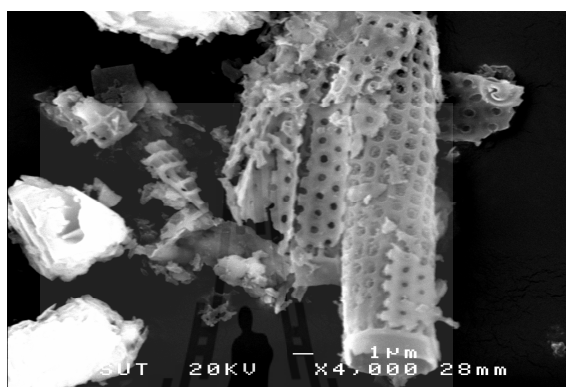
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์

ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

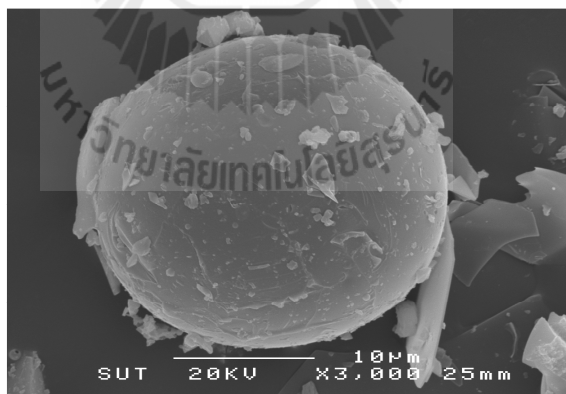
Chemical composition (%)	Diatomite	Perlite	Natural zeolite	Fly ash
Silicon dioxide (SiO_2)	59.30	71.32	75.32	43.87
Aluminum oxide (Al_2O_3)	10.00	10.73	10.28	26.33
Iron oxide (Fe_2O_3)	18.50	2.58	2.66	10.81
Calcium oxide (CaO)	1.20	1.86	3.95	12.69
Sulfur trioxide (SO_3)	0.02	0.03	1.20	2.74
Loss on Ignition (LOI)	8.10	1.25	1.41	1.23

4.3 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และถ้ำลอย

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุประสาน ได้แก่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และถ้ำลอย โดยทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ถึง 4.6



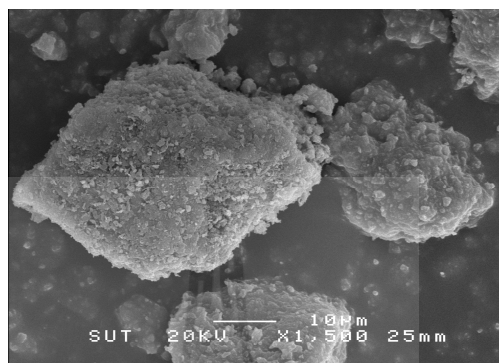
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายของไคอะตอมไมต์



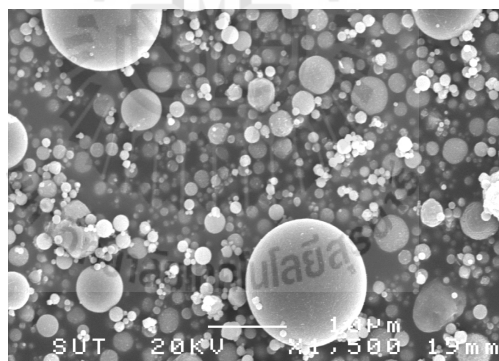
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยายของเพอร์ไลต์

จากรูปที่ 4.2 พบว่าไคอะตอมไมต์ที่ผ่านกระบวนการเผา มีลักษณะอนุภาคเป็นแท่งทรงกระบอกกลวง มีผนังลักษณะเป็นโครงข่ายที่ค่อนข้างสมบูรณ์และเป็นระเบียบคล้ายรวงผึ้ง มีความพรุนสูง จากรูปที่ 4.3 พบว่าเพอร์ไลต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา มีลักษณะอนุภาคแบบกลวงกลม มีลักษณะโครงข่าย บางอนุภาคมีลักษณะคล้ายเปลือกไข่ และมีความพรุนสูง ส่วนรูปที่

4.4 พบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติที่ไม่ผ่านกระบวนการเผามีลักษณะอนุภาคแบบทรงสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า ขนาดของอนุภาคไม่มีความสม่ำเสมอ และมีช่องว่างหรือโพรง ความพรุนที่สูง และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 พบว่าเถ้าลอยมีลักษณะอนุภาคแบบทรงกลม การกระจายตัวของอนุภาคมีอย่างสม่ำเสมอ และมีอนุภาคใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายขยายของซีโอไลต์ธรรมชาติ

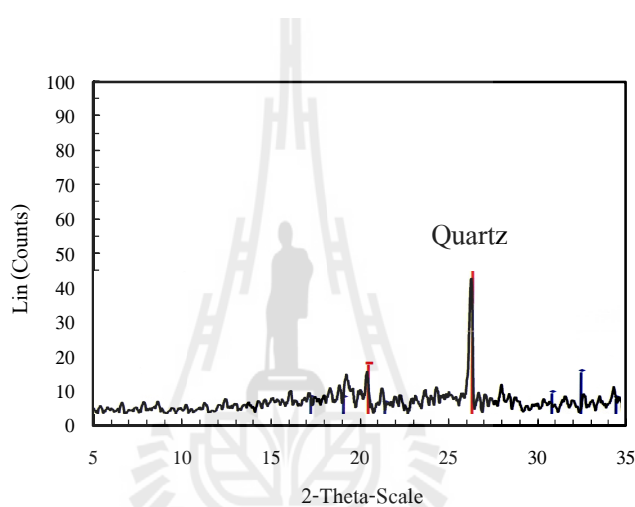


รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายขยายของเถ้าลอย

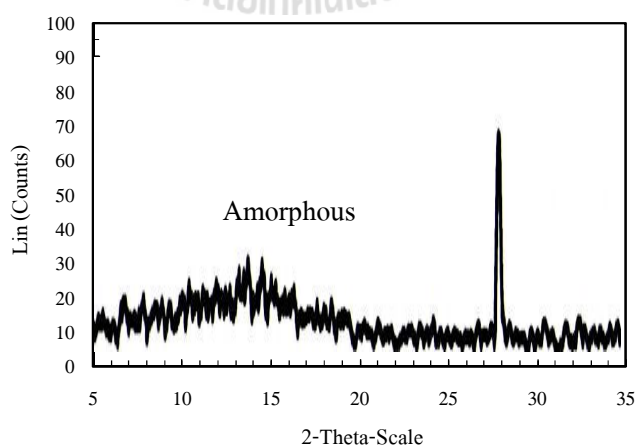
4.4 ความเป็นผลึกของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย โดยวิธี X-Ray Diffraction Analysis (XRD) พบว่าองค์ประกอบของแร่ซิลิกาของไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และเถ้าลอย มีอยู่ 2 สถานะคือซิลิกาแบบมีลักษณะไม่เป็นผลึกหรือมีรูปร่างอสัณฐาน (Glassy phase or Amorphous) ที่มีคุณสมบัติว่องไวในการทำปฏิกิริยา และซิลิกาที่มีลักษณะความเป็นผลึก (Crystallinity) ที่มีคุณสมบัติค่อนข้างเฉื่อยต่อการ

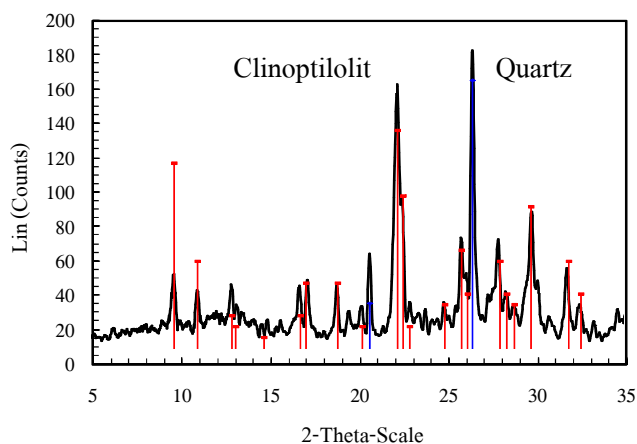
ทำปฏิกิริยา จากการวิเคราะห์รูปที่ 4.6 ถึง 4.9 พบว่าไคอะตอมไมต์และซีโอไลต์ธรรมชาติแนวโน้มนส่วนใหญ่มีลักษณะความเป็นผลึก (Crystallinity) ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาที่เชิงซ้่า ส่วนเพอร์ไลต์และถั่วลอยแนวโน้มนส่วนใหญ่มีลักษณะไม่เป็นผลึกหรือมีรูปร่างอสัณฐาน (Glassy phase or Amorphous) ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ถึงความว่องไวในการทำปฏิกิริยา แต่ถั่วลอยมีลักษณะไม่เป็นผลึกหรือมีรูปร่างอสัณฐาน (Glassy phase or Amorphous) ที่มากกว่าเพอร์ไลต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าถั่วลอยมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ นอกจากนี้พบว่าเพอร์ไลต์มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าไคอะตอมไมต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ



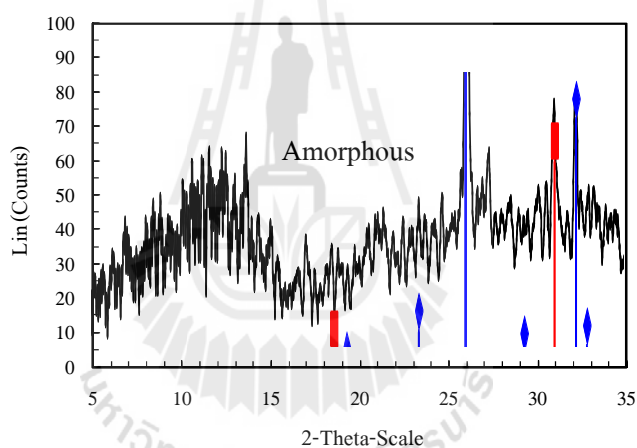
รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไคอะตอมไมต์



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเพอร์ไลต์



รูปที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ธรรมชาติ



รูปที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแก้วลอย

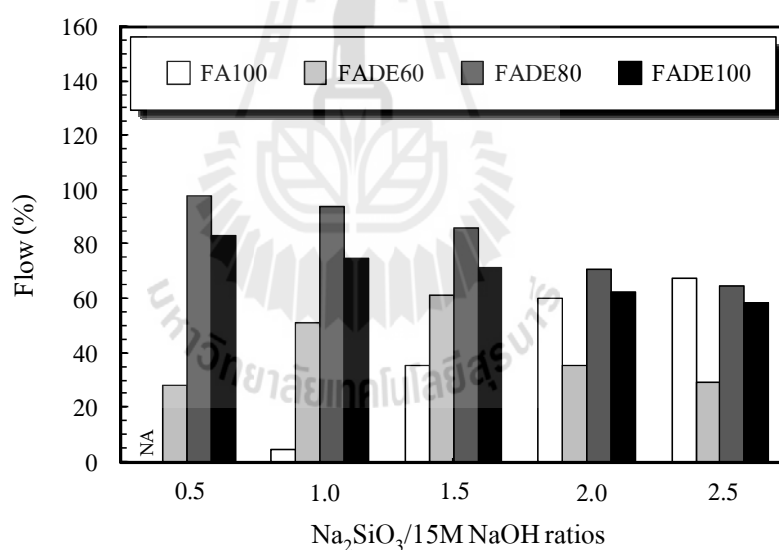
4.5 คุณสมบัติด้านการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

4.5.1 ผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดสอบแปรผันตามอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios) ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ผลการทดสอบพบว่าความสามารถทำงานได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของโซเดียมซิลิเกตและปริมาณการแทนที่ไดอะทอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในแก้วลอย

จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 พบว่าค่าไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ไดอะทอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในแก้วลอยมากขึ้น

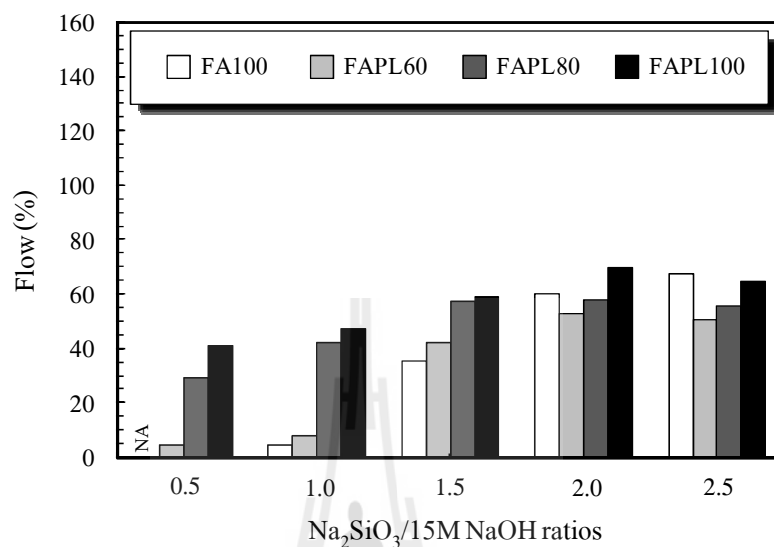
นอกจากนั้นยังพบว่าปริมาณของโซเดียมซิลิเกตที่สูงมีผลให้ค่าการไหลแผ่ลดลง เนื่องจากปริมาณของโซเดียมซิลิเกตที่มากทำให้ส่วนผสมมีความหนืดมากขึ้น ซึ่งมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 28-98% เมื่อพิจารณาการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่ที่ดี อาจเนื่องจากไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาที่เชิงซ้่า ส่งผลให้ช่วยยืดระยะเวลาการก่อตัวให้นานขึ้น จึงมีค่าการไหลแผ่ที่สูง และค่าการไหลแผ่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดค่าการไหลแผ่ไม่สามารถทดสอบได้ที่อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมที่สูง ส่งผลให้มีการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วหรือทันทีทันใด อีกทั้งยังพบว่าค่าการไหลแผ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น อาจเนื่องจากเถ้าลอยมีลักษณะของอนุภาคที่กลม ทำให้เมื่อปริมาณของเหลวในส่วนผสมเพิ่มขึ้นค่าการไหลแผ่มีแนวโน้มที่มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามส่วนผสมยังคงมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว



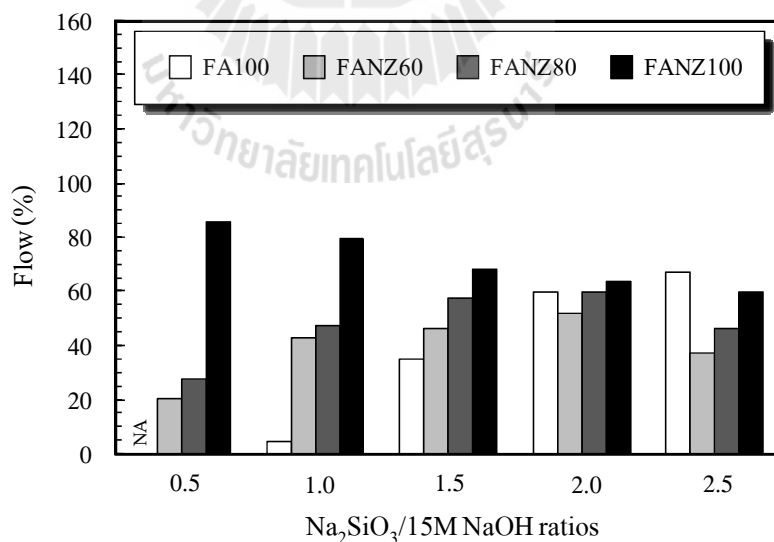
รูปที่ 4.10 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

นอกจากนั้นพบว่า การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60 ค่าการไหลแผ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 ถึง 1.5 เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่มีปริมาณของเถ้าลอยสูง ส่งผลให้มีความหนืดคล้ายกับการใช้เถ้าลอยล้วน ส่วนที่อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 ถึง 2.5

ค่าการไหลแผ่นมีแนวโน้มลดลง อาจเป็นผลเนื่องจากด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่มีความพรุนสูงและเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณของโซเดียมซิลิเกตมากทำให้ส่วนผสมมีความหนืดมากขึ้น

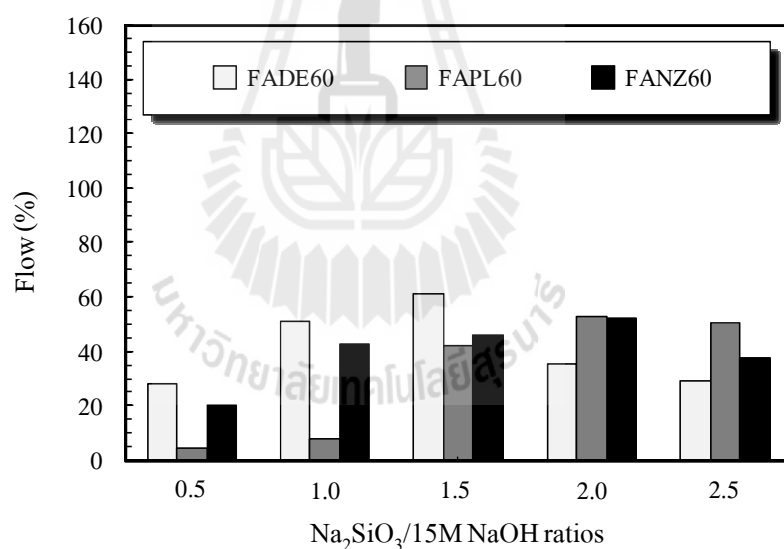


รูปที่ 4.11 ค่าการไหลแผ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.12 ค่าการไหลแผ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

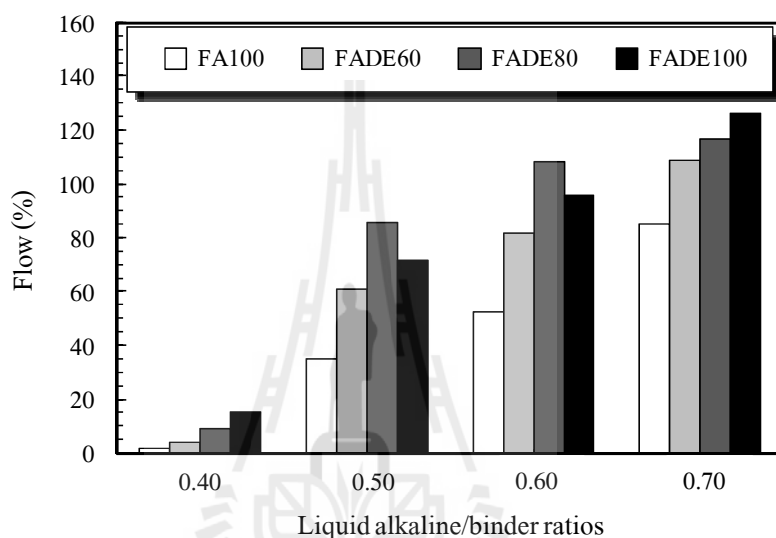
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่การแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 พบว่าอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios) เท่ากับ 0.5-1.5 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์มีแนวโน้มของค่าการไหลผ่านที่สูงที่สุด และการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีค่าการไหลผ่านสูงกว่าการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์ ซึ่งการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์มีค่าการไหลผ่านที่น้อย เนื่องจากมีการทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์เร็วกว่าไดอะตอมไมต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ส่งผลให้ส่วนผสมมีการแข็งตัวที่เร็วกว่า ส่วนที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios) เท่ากับ 2.0-2.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมน้อยลง จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้าลง พบว่าการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์มีแนวโน้มของค่าการไหลผ่านที่สูงที่สุด เนื่องจากเพอร์ไลต์มีลักษณะของอนุภาคที่กลมคล้ายกับถ้ำลอย อีกทั้งเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณของเหลวมากขึ้น ส่งผลให้การแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าการแทนที่ไดอะตอมไมต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ของการแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60

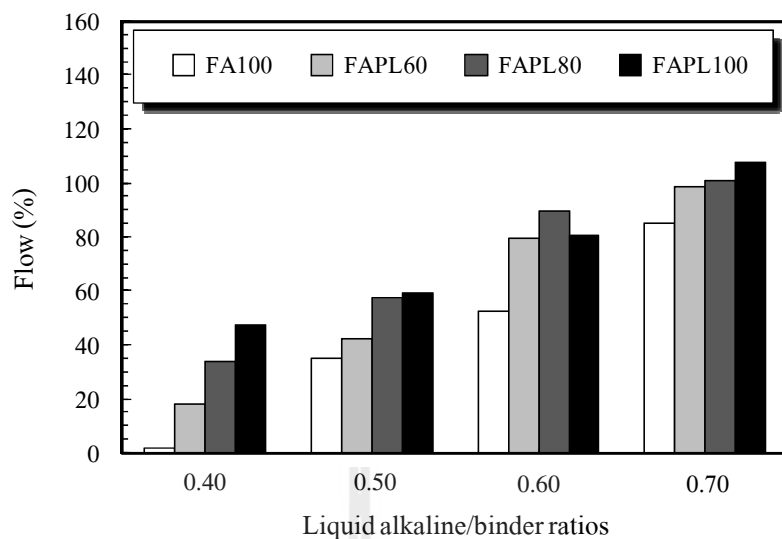
4.5.2 ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

ผลการทดสอบแปรผันตามอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (Liquid alkaline/binder ratios) ใช้ความความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 พบว่าอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติส่งผลต่อความสามารถทำงานได้ กล่าวคือความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น

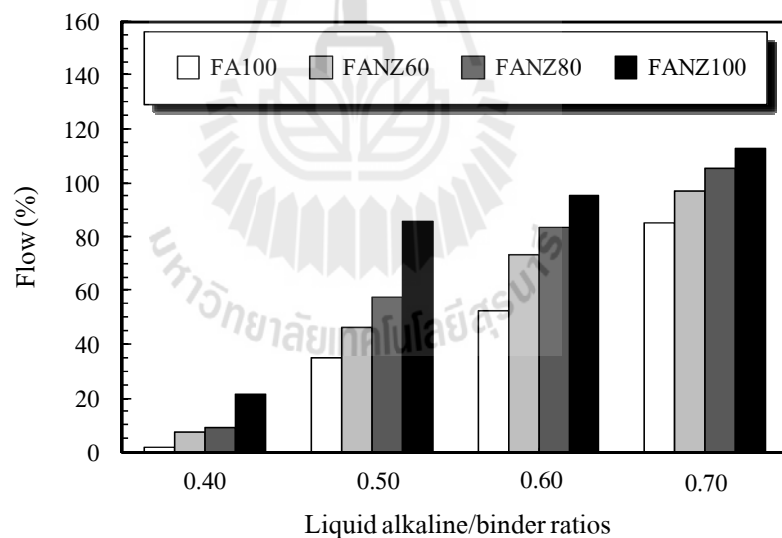


รูปที่ 4.14 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

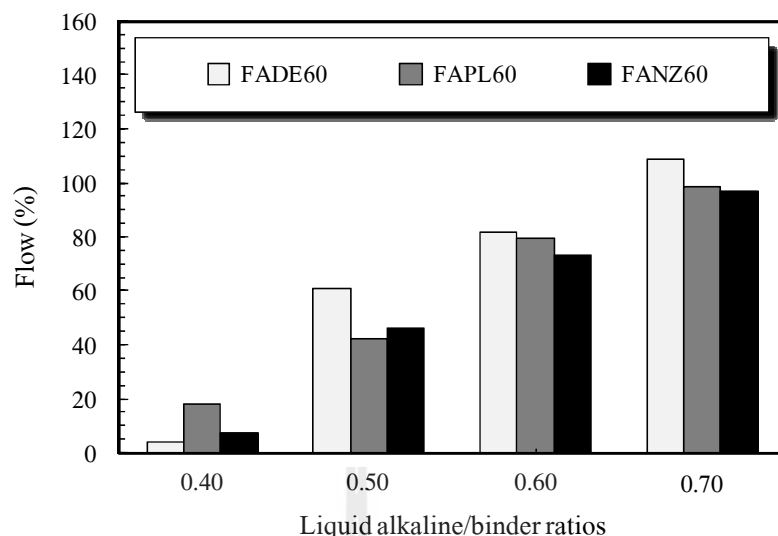
จากรูปที่ 4.14 ถึง 4.16 พบว่าค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยและอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานมากขึ้น ซึ่งมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 4-126% ในทำนองเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water/Cement ratio, W/C) ของคอนกรีตทั่วไป เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดปริมาณของเหลวไม่เพียงพอต่อความต้องการของส่วนผสม ทำให้ส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันส่งผลให้ค่าการไหลแผ่มีค่าน้อยมาก ส่วนที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 ส่วนผสมมีความเหลวมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ที่สูง แต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและงบประมาณ อัตราส่วนนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน



รูปที่ 4.15 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.16 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าการไหลแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน ของการแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการไหลแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่การแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 พบว่าอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 การแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์มีแนวโน้มค่าการไหลแห้งสูงที่สุด เนื่องจากไดอะตอมไมต์และซีโอไลต์ธรรมชาติมีความพรุนมากกว่าเพอร์ไลต์ ส่งผลให้มีความต้องการปริมาณของเหลวมากกว่า ดังนั้นส่วนผสมจึงค่อนข้างแห้งทำให้มีค่าการไหลแห้งที่น้อย ส่วนที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50-0.70 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์มีแนวโน้มมีค่าการไหลแห้งสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.17

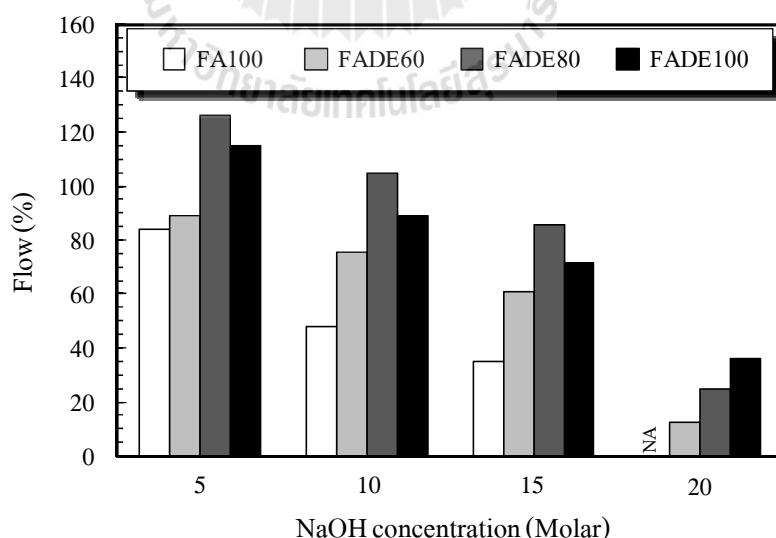
4.5.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดสอบแปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH concentration) ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิติลิกเตตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยส่งผลต่อความสามารถทำงานได้ กล่าวคือความสามารถทำงานได้มีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น

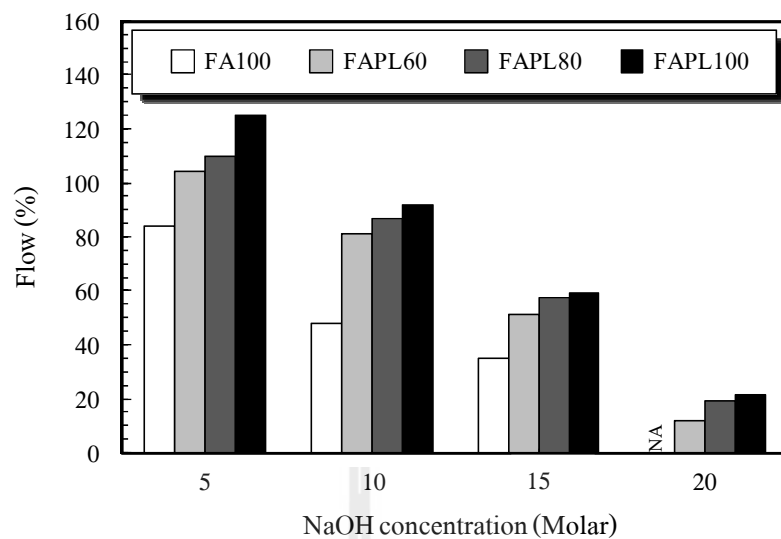
จากรูปที่ 4.18 ถึง 4.20 พบว่าค่าการไหลแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอย นอกจากนั้นยังพบว่าค่าการไหลแห้งลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ซึ่งมีค่า

การไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 12-126% เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ มีค่าการไหลแผ่สูงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่น ๆ อาจเนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่น้อยทำให้ความสามารถในการชะอ้อนของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากวัสดุตั้งต้นได้น้อย (Rattanasak, U., et al., 2009) อีกทั้งความเข้มข้นที่น้อยจะมีปริมาณของน้ำในส่วนผสมมาก ส่งผลให้ความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water/Cement ratio, W/C) ที่สูงในงานคอนกรีตทั่วไป ส่วนที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่พอทำงานได้ ส่วนการแทนที่ที่ถ่ลยทั้งหมดการผสมค่อนข้างผสมยาก เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูง มีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วส่งผลให้ไม่สามารถทดสอบค่าการไหลแผ่ได้

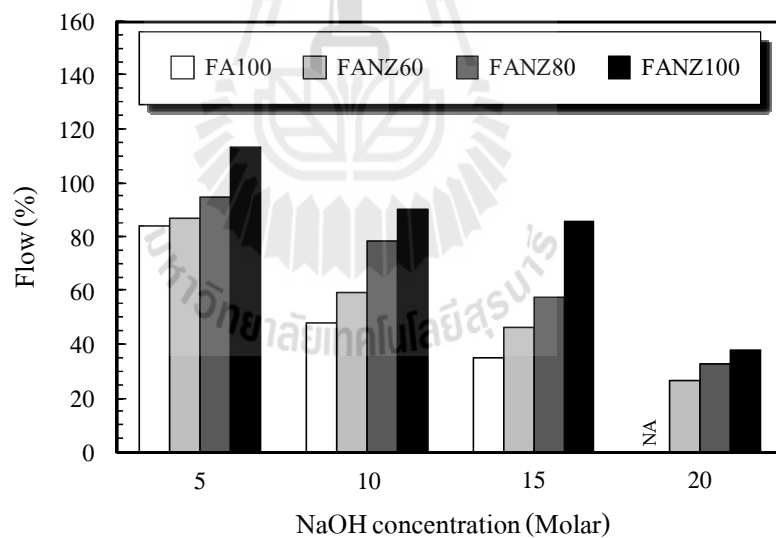
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่การแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ่ลยร้อยละ 60 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5-15 โมลาร์ การแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์มีแนวโน้มค่าการไหลแผ่สูงที่สุดเนื่องจากลักษณะอนุภาคของเพอร์ไลต์ที่กลม ส่งผลให้ส่วนผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ไดอะตอมไมต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ ส่วนที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 โมลาร์ การแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีแนวโน้มมีค่าการไหลแผ่สูงที่สุด เนื่องจากซีโอไลต์ธรรมชาติมีการทำปฏิกิริยาที่เชิงซ้ำ ส่งผลให้การแข็งตัวช้าที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.21



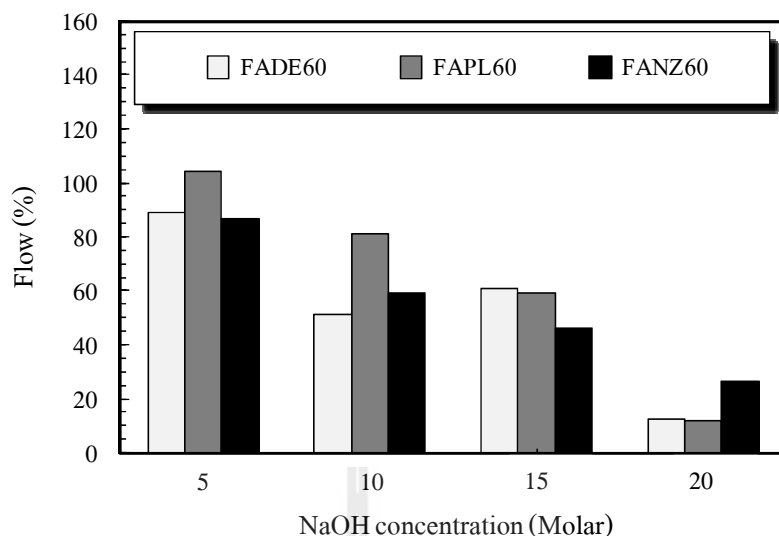
รูปที่ 4.18 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ่ลยผสมไดอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.19 ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.20 ค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ของการแทนที่ไดอะทอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60

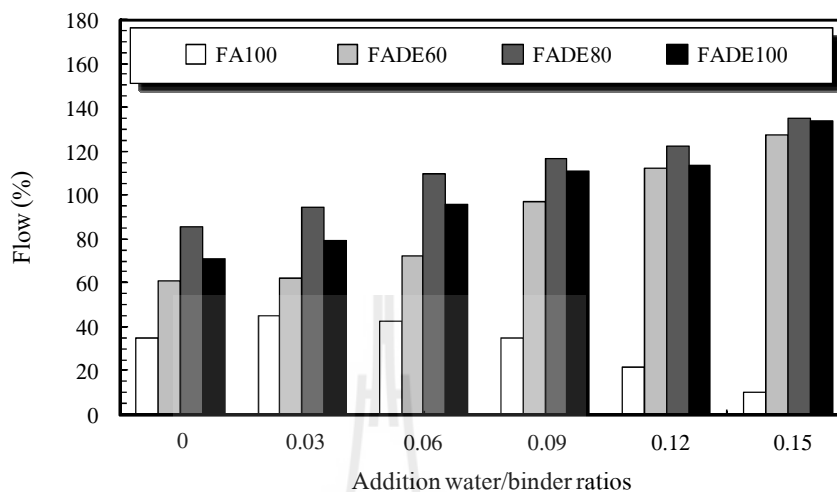
4.5.4 ผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน

ผลการทดสอบแปรผันตามอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.5 พบว่าปริมาณการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมและปริมาณการแทนที่ของไดอะทอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยส่งผลความสามารถทำงานได้

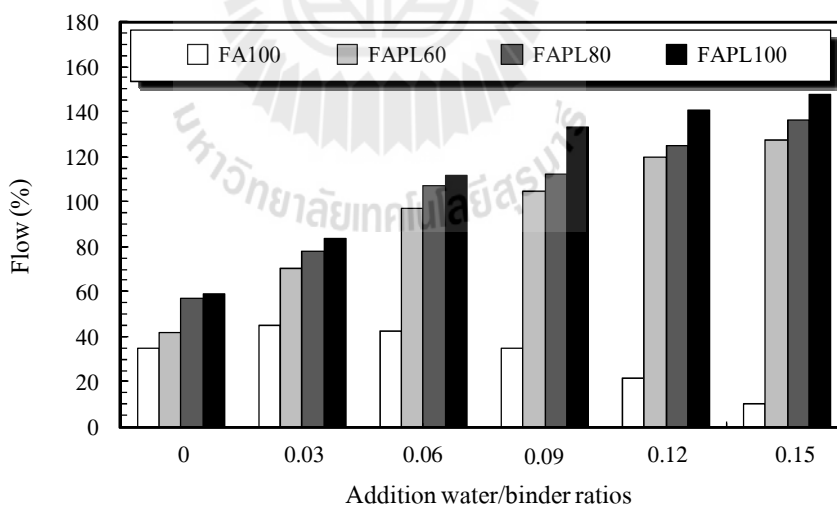
จากรูปที่ 4.22 ถึง 4.24 พบว่าค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ไดอะทอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอย และปริมาณการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้น ซึ่งมีค่าการไหลผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 46-148% เมื่อพิจารณาที่การแทนที่ด้วยถ้ำลอยทั้งหมดมีค่าการไหลผ่านเพิ่มขึ้นที่การเพิ่มปริมาณน้ำเท่ากับ 3% แต่หลังจากนั้นค่าการไหลผ่านมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมมีผลให้เกิดการทำปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่งระหว่างน้ำกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ส่วนผสมมีการแข็งตัวที่เร็วขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่การแทนที่ไดอะทอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำเท่ากับ 3-6% การแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์มีแนวโน้มค่าการไหลผ่านสูงที่สุด และการเพิ่มปริมาณน้ำ

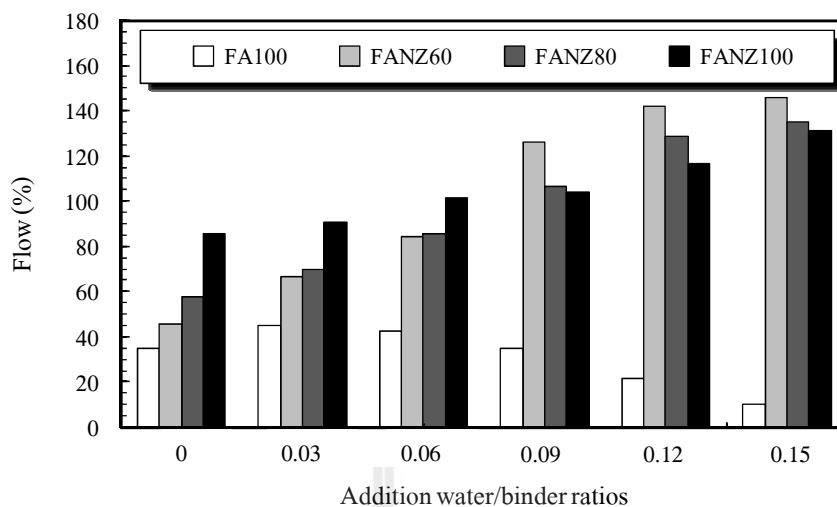
เท่ากับ 9-15% การแทนที่ด้วยซีไอ โพลีเอเธอร์ที่มีแนวโน้มค่าการไหลแฝงสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.25



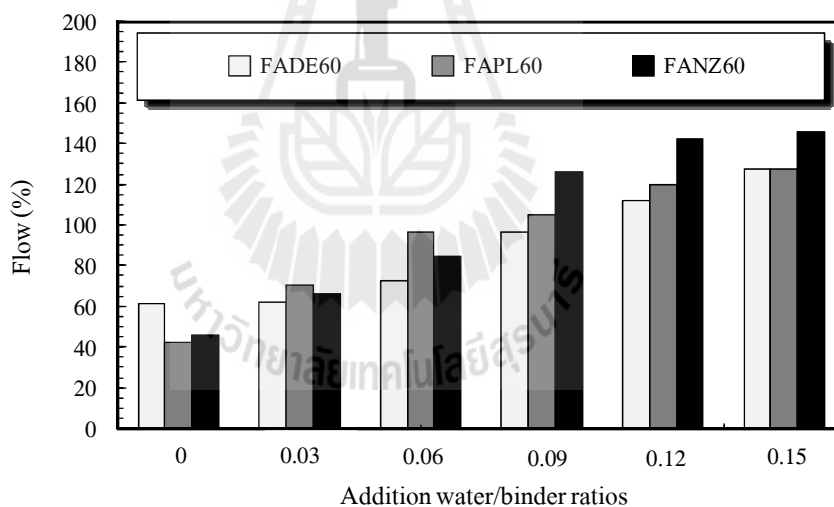
รูปที่ 4.22 ค่าการไหลแฝงของจีไอ โพลีเอเธอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.23 ค่าการไหลแฝงของจีไอ โพลีเอเธอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.24 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน



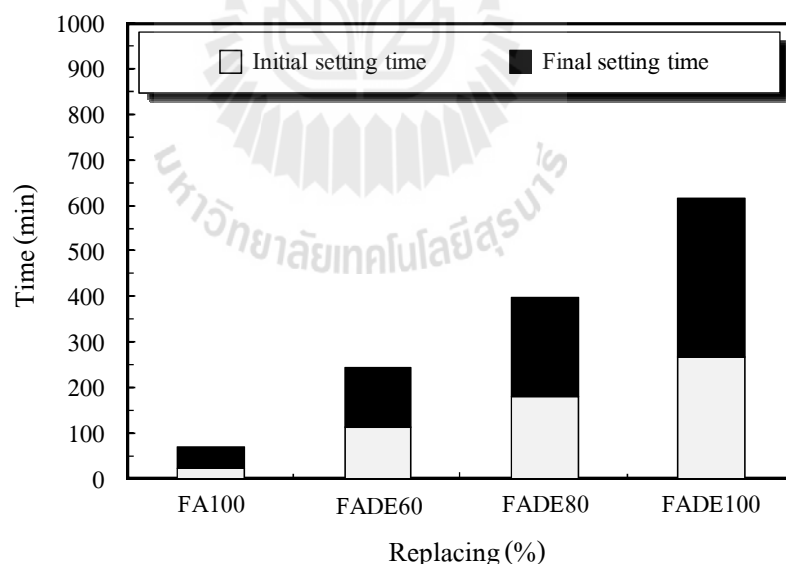
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ของการแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60

4.6 คุณสมบัติด้านระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

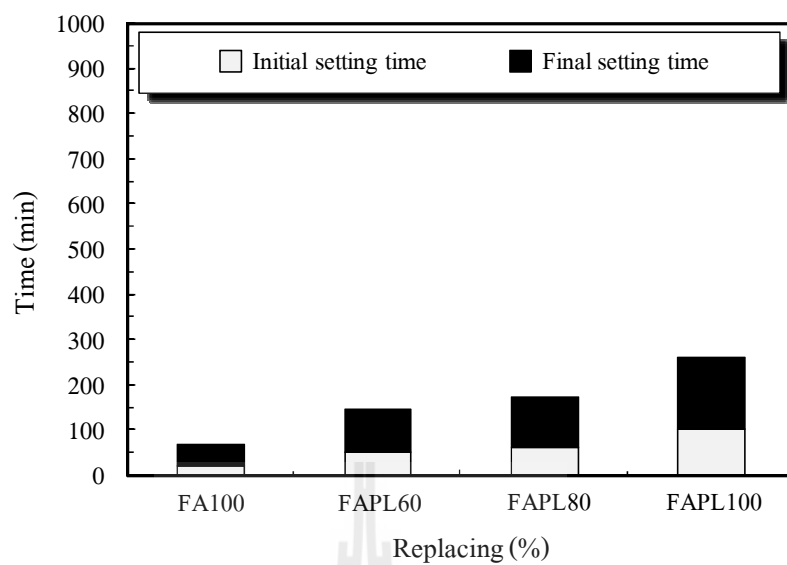
การทดสอบหาค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) มีความสำคัญอย่างมาก เพื่อบ่งบอกถึงความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ นอกจากการทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ การทดสอบจะใช้ความความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C ซึ่งขั้นตอนการทดสอบครั้งนี้ทำการดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C 191 (2008)

ผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ถึง 4.28 ซึ่งมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 25 และ 47 นาที ตามลำดับ

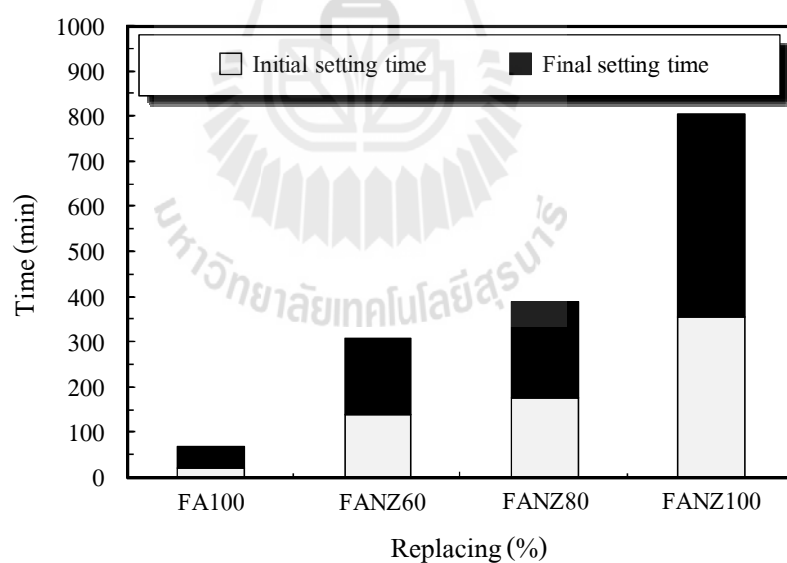
จากรูปที่ 4.26 ผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไคอะตอมไมต์มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของการแทนที่ไคอะตอมไมต์ในเถ้าลอยร้อยละ 60 80 และ 100 เท่ากับ 115 183 และ 270 นาที ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของการแทนที่ไคอะตอมไมต์ในเถ้าลอยร้อยละ 60 80 และ 100 เท่ากับ 132 217 และ 349 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.26 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากเถ้าลอยผสมไคอะตอมไมต์



รูปที่ 4.27 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ท
จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์

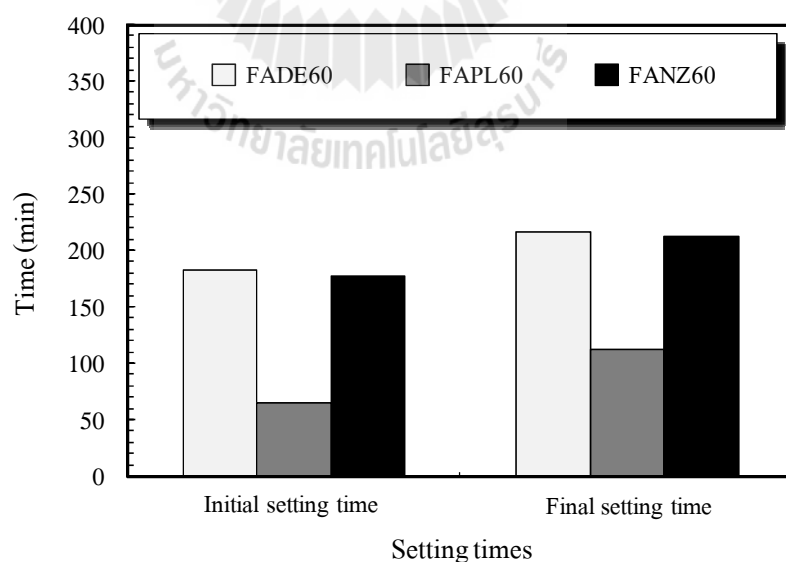


รูปที่ 4.28 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ท
จากถ้ำลอยผสมซีโอโลต์ธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.27 พบว่าระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของการแทนที่เพอร์ไลต์ในเถ้าลอยร้อยละ 60 80 และ 100 เท่ากับ 142 178 และ 357 นาที ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของการแทนที่เพอร์ไลต์ในเถ้าลอย ร้อยละ 60 80 และ 100 เท่ากับ 169 213 และ 449 นาที ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.28 พบว่าระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสม ซีโอไลต์ธรรมชาติมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60 80 และ 100 เท่ากับ 55 65 และ 105 นาที ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของการแทนที่ ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60 80 และ 100 เท่ากับ 93 112 และ 158 นาที ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์พบว่า การแทนที่ด้วย ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมพบว่าสามารถยืดระยะเวลาก่อตัว เริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมด จากงานวิจัย Hardjito et al. (2008) ได้ทำการศึกษาเรื่อง Strength and setting time of low calcium fly ash based geopolymer mortar โดยในการศึกษาใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุประสาน พบว่า มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 129 และ 270 นาที ซึ่งการศึกษานี้ ครั้งนี้มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเร็วกว่ามาก ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากการใช้ แหล่งที่มาของวัสดุที่แตกต่างกัน (Nguyen Van Chanh, et al., 2008)



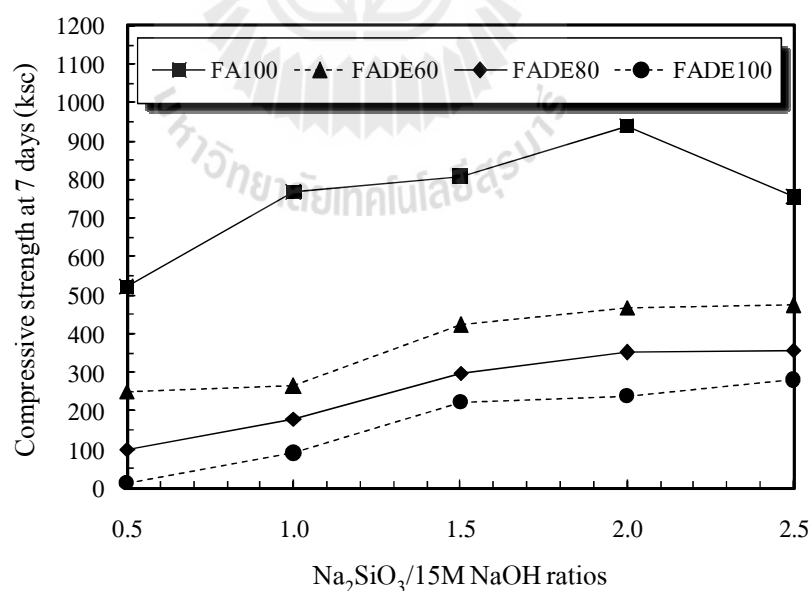
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ของการแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ การแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอย ร้อยละ 60 พบว่าการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์ในส่วนผสมมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัว สุดท้ายรวดเร็วที่สุด ส่วนการแทนที่ด้วยโคอะตอมไมต์และซีโอไลต์ธรรมชาติมีระยะเวลาก่อตัว เริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายใกล้เคียงกันมาก โดยมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นช้ากว่า 2.09 และ 2.58 เท่าของการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์ และระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายช้ากว่า 1.42 และ 1.82 เท่าของการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.29

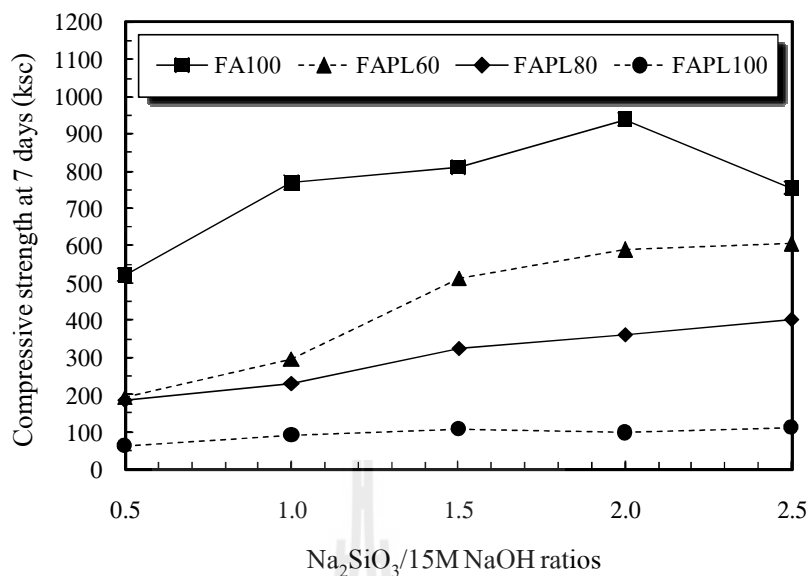
4.7 คุณสมบัติด้านกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

4.7.1 ผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

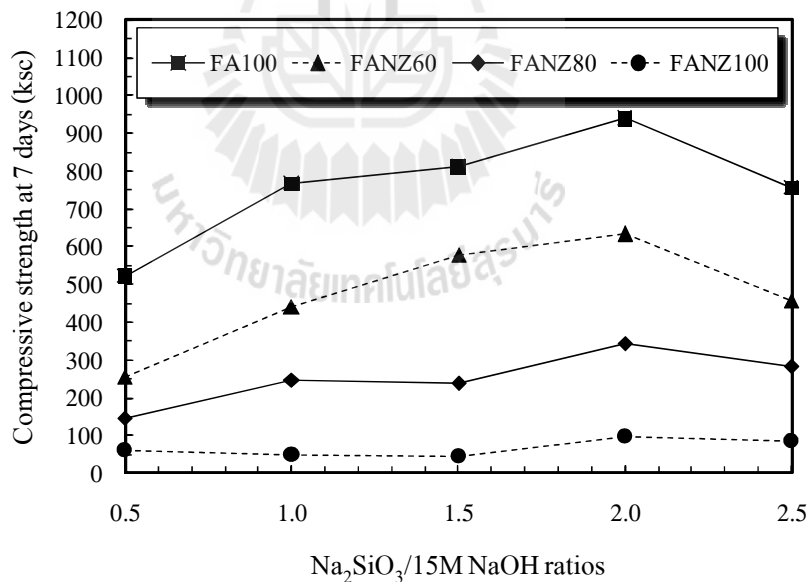
ผลการทดสอบแปรผันตามอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios) ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อุณหภูมิการเร่ง ปฏิกริยา 75°C ทดสอบกำลังอัดที่ระยะการบ่ม 7 วัน พบว่าปริมาณของโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสม และปริมาณการแทนที่ของโคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยส่งผลต่อ กำลังอัด



รูปที่ 4.30 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมโคอะตอมไมต์ ที่แปรผันตาม ผลกระทบของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.31 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.32 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 4.30 พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไคอะตอมไมต์มีความเหมาะสมที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5-2.5 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 299-474 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถทำงานได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 468 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 35%

จากรูปที่ 4.31 พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์มีความเหมาะสมที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5-2.5 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 326-605 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถทำงานได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 605 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 52%

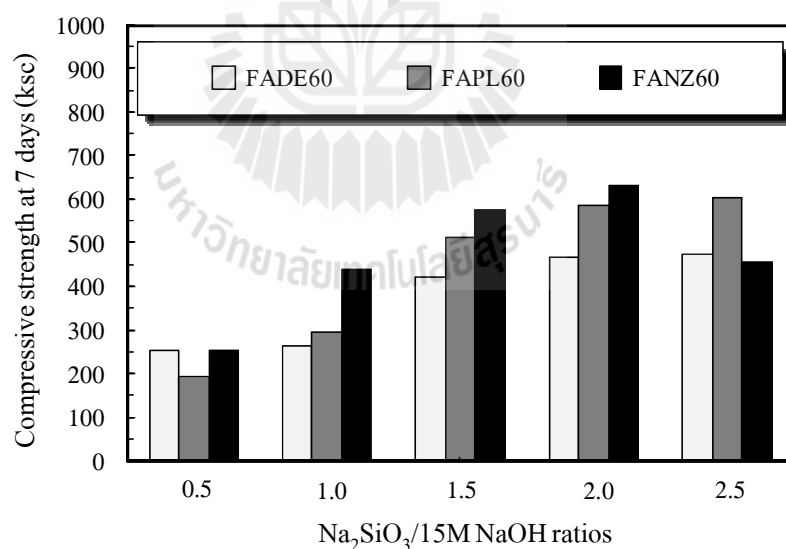
จากรูปที่ 4.32 พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติมีความเหมาะสมที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0-2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 239-632 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถทำงานได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 632 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 53%

เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 การแทนที่ด้วยไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดมีค่ากำลังอัดต่ำ ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดพบว่าการผสมค่อนข้างยากและการหลอมมอร์ตาร์ลงแบบยากส่งผลให้ได้กำลังอัดต่ำเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ ส่วนที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 การแทนที่ด้วยไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดมีค่ากำลังอัดที่ดี แต่เมื่อพิจารณาถึงความสามารถทำงานได้จะมีค่าไหลแผ่ที่พอทำงานได้ เนื่องจากปริมาณของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่มากขึ้นทำให้ส่วนผสมมีความหนืดมากขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 การแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60 และ 80 กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 ในทำนองเดียวกันกับการใช้เถ้าลอยทั้งหมดในส่วนผสม จากงานวิจัยของ Songpiriyakij et al. (2010) ได้ให้ข้อสรุปไว้ว่าการใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยน้ำหนักที่มากขึ้น ไม่ได้ทำให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่ทำให้สามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้น แต่กำลังอัดนั้นยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาของวัสดุตั้งต้นด้วย และการเพิ่มขึ้นปริมาณของเหลวในส่วนผสมทำให้มีจำนวนของโพรงมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุตั้งต้นที่มีการทำปฏิกิริยารวดเร็วจะมีการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุตั้งต้นและสารละลายไม่หมด จึงมีลักษณะเป็นโพรงซึ่งส่งผลกระทบต่อ

กำลังอัดที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์และเพอร์ไลต์กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ในส่วนผสมที่มากขึ้น (Hardjito, D., et al., 2008) จากเหตุผลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าอิทธิพลของปริมาณโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่ากำลังอัด เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวเพิ่มปริมาณซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) แก่ส่วนผสม ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำหน้าที่ชะเอาซิลิกาและอลูมินาออกมาจากสารตั้งต้น เพื่อให้ก่อตัวเป็นสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นแนวโน้มของปริมาณของโซเดียมซิลิเกตที่น้อยมีผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ลดลงในทำนองเดียวกันปริมาณโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสมที่สูงมีผลให้กำลังอัดสูงขึ้น

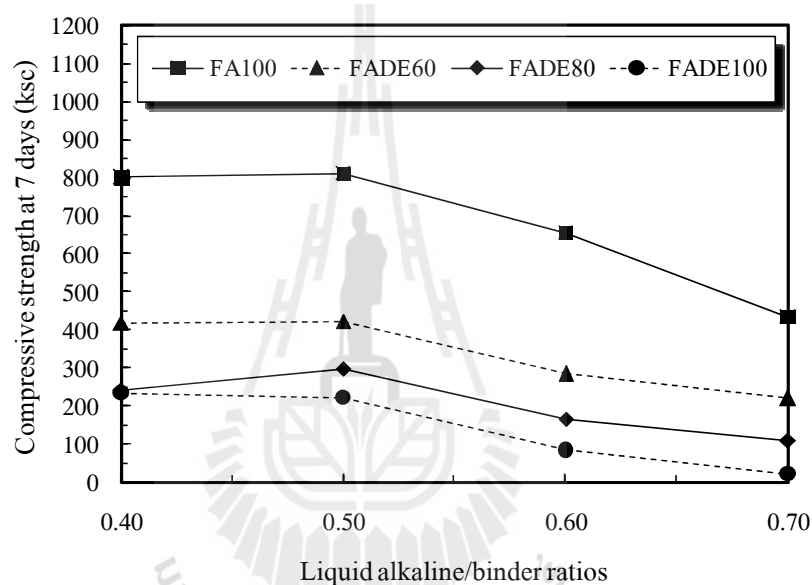
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน การแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในแก้วลอยร้อยละ 60 พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์ และเพอร์ไลต์เท่ากับร้อยละ 36.27 และ 12.65 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ของการแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในแก้วลอยร้อยละ 60

4.7.2 ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

ผลการทดสอบแปรผันตามอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (Liquid alkaline /binder ratios) ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา 75°C ทดสอบกำลังอัดที่ระยะการบ่ม 7 วัน พบว่าอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมต์เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยส่งผลกระทบต่อกำลังอัด กล่าวคืออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้นกำลังอัดมีค่าลดลง

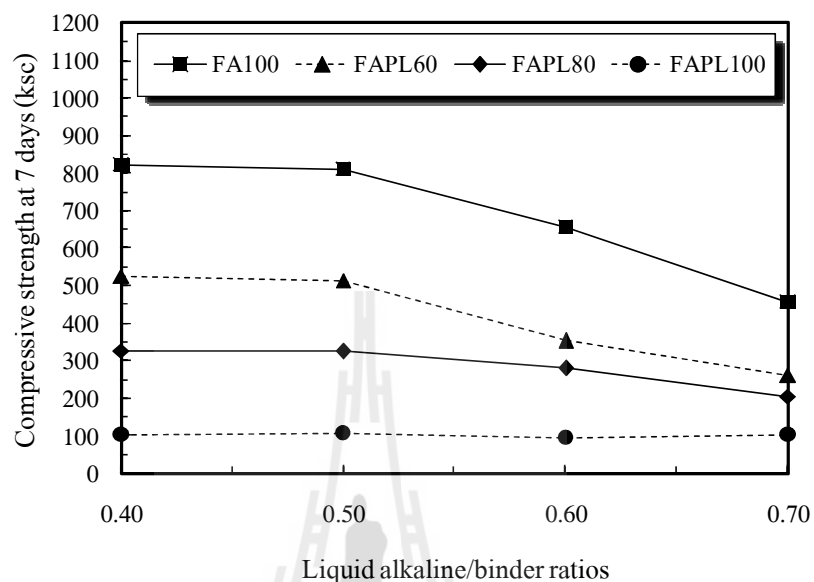


รูปที่ 4.34 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไดอะตอมไมต์ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

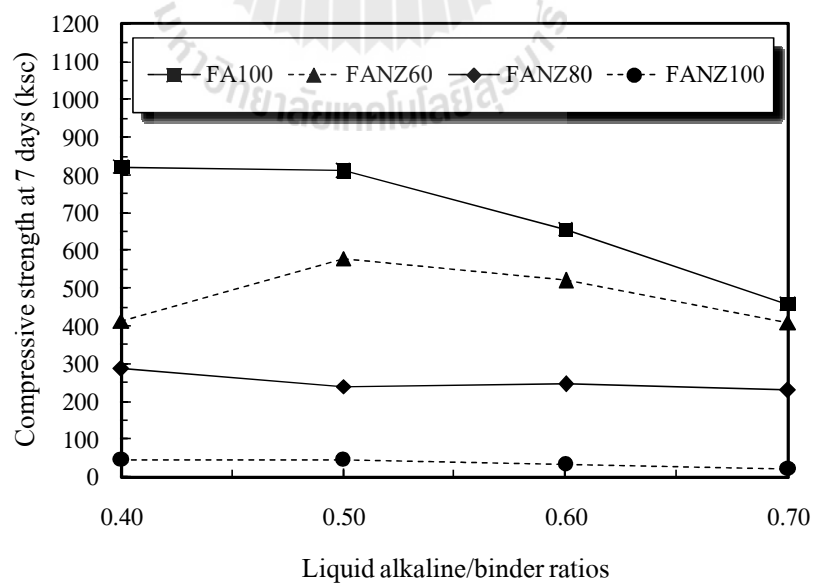
จากรูปที่ 4.34 พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไดอะตอมไมต์มีความเหมาะสมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 299-424 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถทำงานได้พบว่าการที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 424 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 61%

จากรูปที่ 4.35 พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์มีความเหมาะสมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50-0.60 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 281-513 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถ

ทำงานได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 513 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 42%



รูปที่ 4.35 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

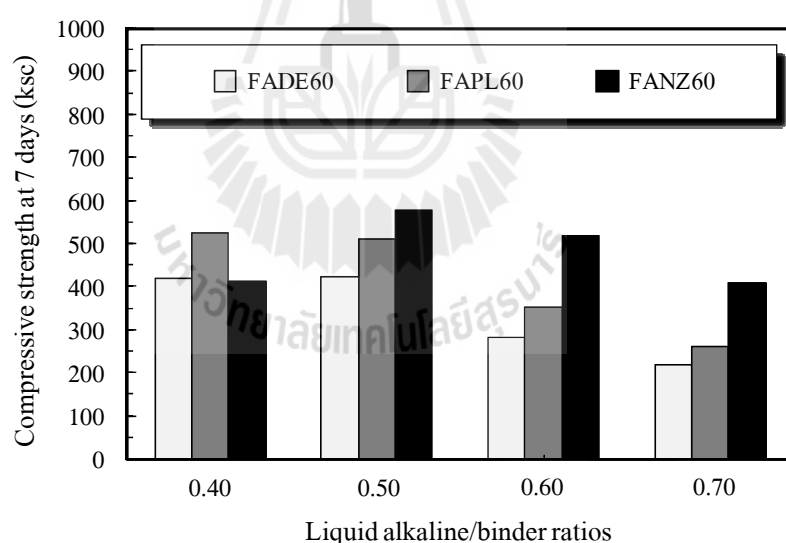


รูปที่ 4.36 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.36 พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอโลต์ธรรมชาติมีความเหมาะสมที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50-0.60 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 240-577 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถทำงานได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 577 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 46%

เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ส่วนผสมค่อนข้างแห้งมาก ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่างส่งผลให้มีกำลังอัดต่ำ ส่วนที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 ส่วนผสมมีความเหลวมากอีกทั้งกำลังมีค่าต่ำ เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและงบประมาณ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานนี้ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

นอกจากนี้จากงานวิจัย Bakharev (2006) and Sathonsaowaphak et al. (2009) ได้มีการให้ข้อสรุปไว้ว่าการเพิ่มขึ้นของสารละลายในส่วนผสมทำให้เกิดโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีจำนวนโพรงที่มากขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดน้อยลงในการทำงานองเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water/Cement ratio, W/C) ของคอนกรีตทั่วไป

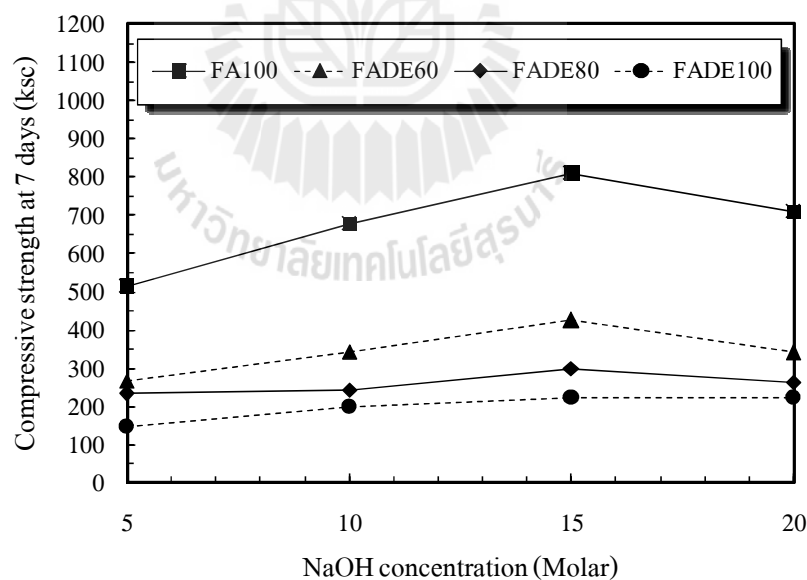


รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน ของการแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์โลด์ และซีโอโลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60

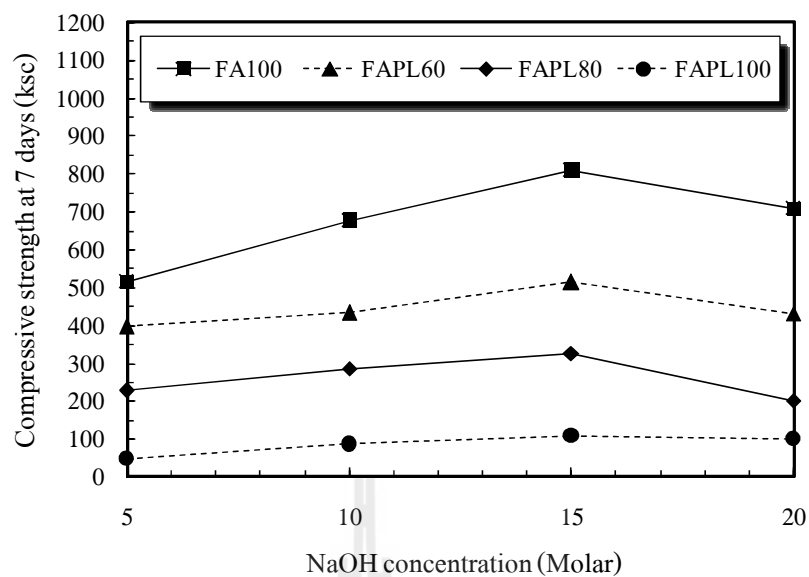
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน การแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยโคอะตอมไมต์ และเพอร์ไลต์เท่ากับร้อยละ 36.27 และ 12.65 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.37

4.7.3 ผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

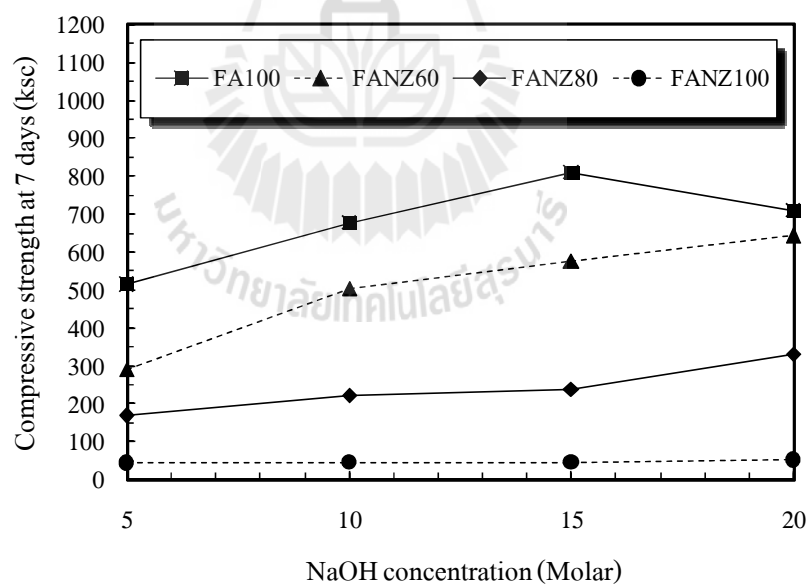
ผลการทดสอบที่แปรผันตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH concentration) ใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา 75°C ทดสอบกำลังอัดที่ระยะการบ่ม 7 วัน พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และปริมาณการแทนที่ของโคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยส่งผลต่อกำลังอัด กล่าวคือกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น เป็นผลเนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงมีความสามารถในการชะลอออนของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากวัสดุตั้งต้นได้มาก อีกทั้งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว (Rattanasak, U., et al., 2009)



รูปที่ 4.38 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมโคอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.39 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

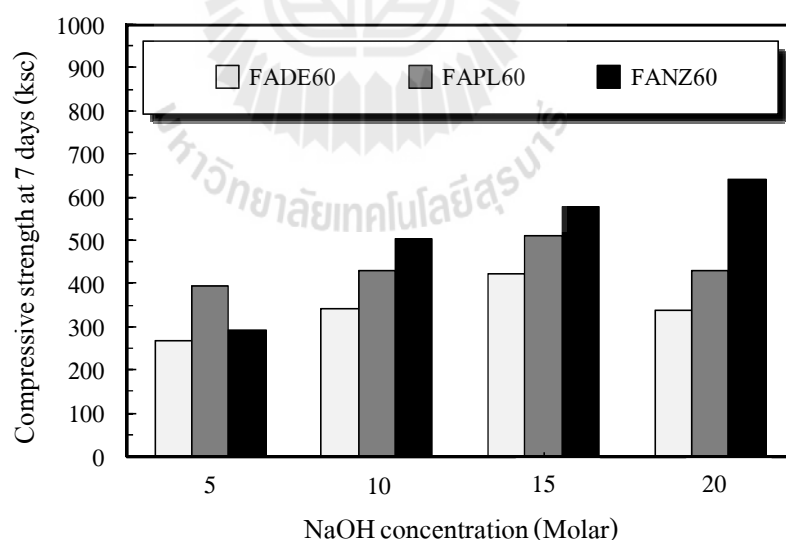


รูปที่ 4.40 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 4.38 บ่งบอกถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไคอะตอมไมต์มีความเหมาะสมที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10-15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 243-423 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถทำงานได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 424 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 61%

จากรูปที่ 4.39 บ่งบอกถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์มีความเหมาะสมที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10-15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 286-513 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถทำงานได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 513 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 46%

จากรูปที่ 4.40 บ่งบอกถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติมีความเหมาะสมที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10-15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 222-577 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถทำงานได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 577 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 42%



รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ของการแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ กำลังอัดมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่น ๆ อาจเนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่น้อยทำให้ความสามารถในการชะอออนของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากวัสดุตั้งต้นได้น้อย (Rattanasak, U., et al., 2009) อีกทั้งความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่น้อยมีปริมาณของน้ำในส่วนผสมมากส่งผลให้กำลังอัดลดลง ในทำนองเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water/Cement ratio, W/C) ที่สูงในงานคอนกรีตทั่วไป ส่วนที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 โมลาร์ กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อีกทั้งการผสมค่อนข้างผสมยาก เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงส่งผลให้มีการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วและส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อีกทั้งยากต่อการหล่อตัวอย่าง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน การแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยโคอะตอมไมต์ และเพอร์ไลต์เท่ากับร้อยละ 36.27 และ 12.65 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.41

4.7.4 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

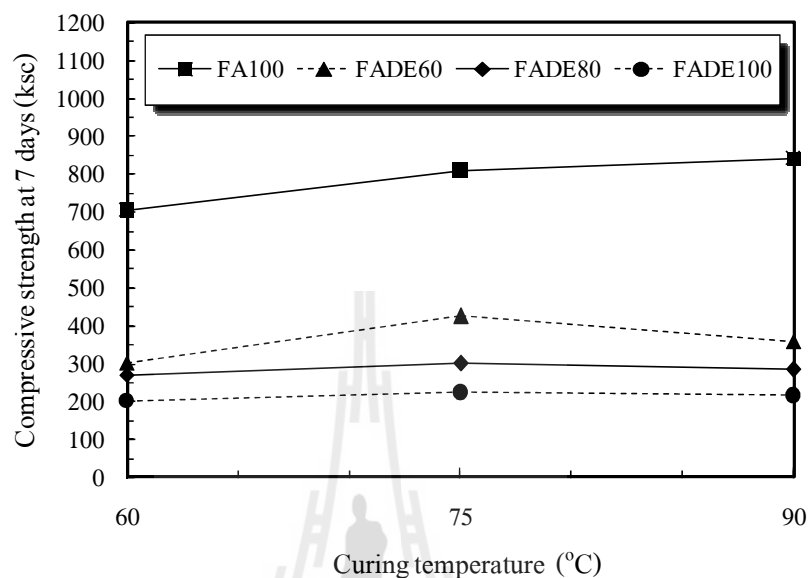
ผลการทดสอบที่แปรผันตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 ทดสอบกำลังอัดที่ระยะการบ่ม 7 วัน พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่สูงขึ้น

จากรูปที่ 4.42 บ่งบอกถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมโคอะตอมไมต์มีความเหมาะสมที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75-90°C ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 283-423 ksc แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 424 ksc

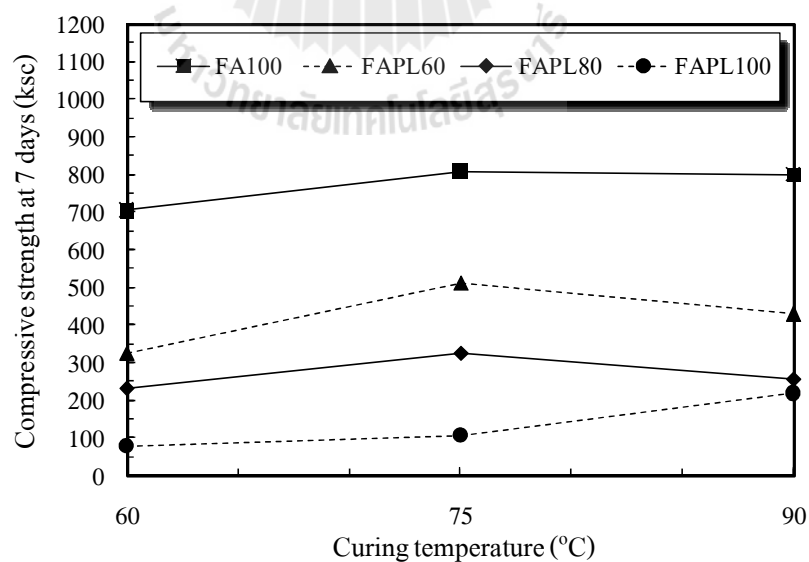
จากรูปที่ 4.43 บ่งบอกถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์มีความเหมาะสมที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75-90°C ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 258-513 ksc แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 513 ksc

จากรูปที่ 4.44 บ่งบอกถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติมีความเหมาะสมที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75-90°C ปริมาณการแทนที่

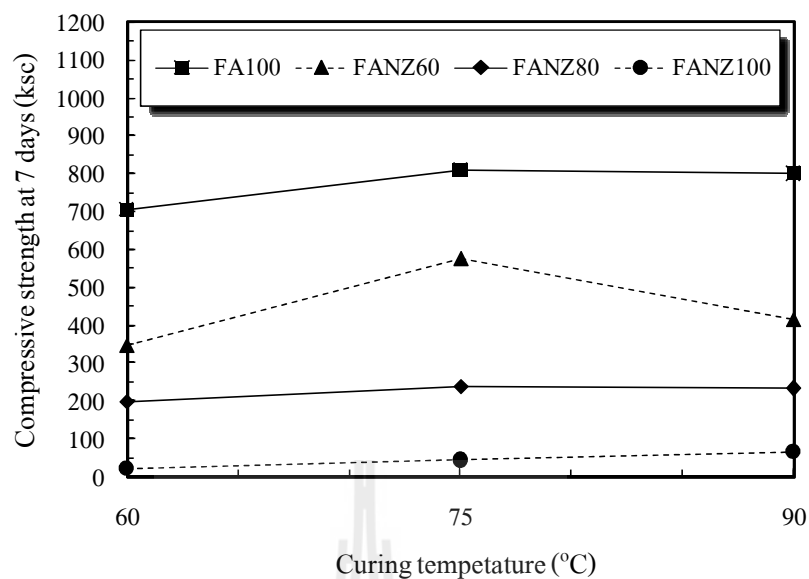
ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 234-577 ksc แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 577 ksc



รูปที่ 4.42 ค่ากำลังอัดของอีโพอซีโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะทอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

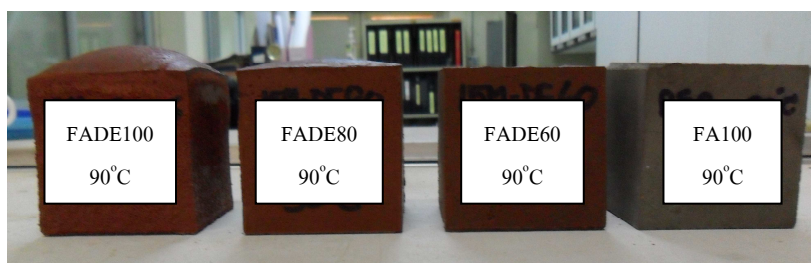


รูปที่ 4.43 ค่ากำลังอัดของอีโพอซีโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา



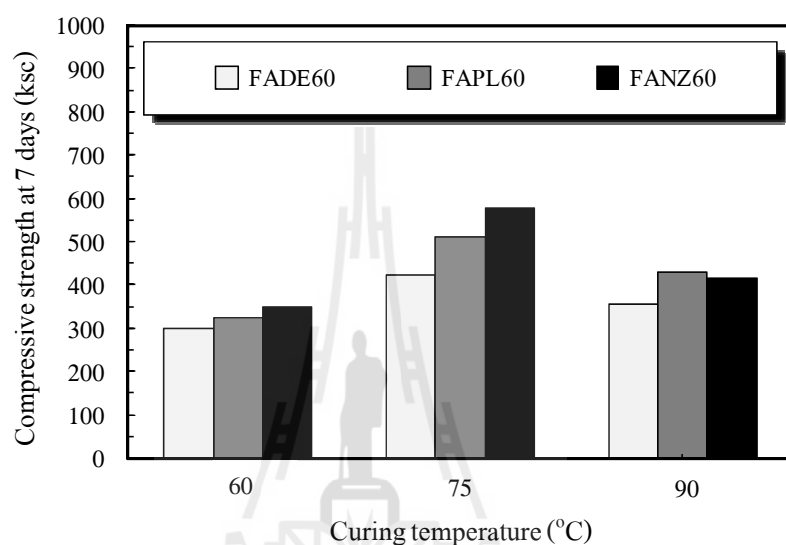
รูปที่ 4.44 ค่ากำลังอัดของอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอล์ดธรรมชาติ
ที่แปรผันตามผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60°C มีกำลังอัดที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ ส่วนอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 90°C กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C นอกจากนี้ยังพบว่าการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์ทั้งหมดตัวอย่างมีเกิดการบวมตัวเกิดขึ้นอย่างชัดเจน อาจเนื่องจากไดอะตอมไมต์มีค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOD) ที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับเพอร์ไลต์ ซีโอล์ดธรรมชาติ และเถ้าลอย อีกทั้งไดอะตอมไมต์มีลักษณะเป็นโพรงสูง จึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วและเกิดการบวมตัวเมื่อใช้อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาต่ออีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย
ผสมไดอะตอมไมต์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน การแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ซึ่งเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมต์ และเพอร์ไลต์เท่ากับร้อยละ 36.27 และ 12.65 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.46



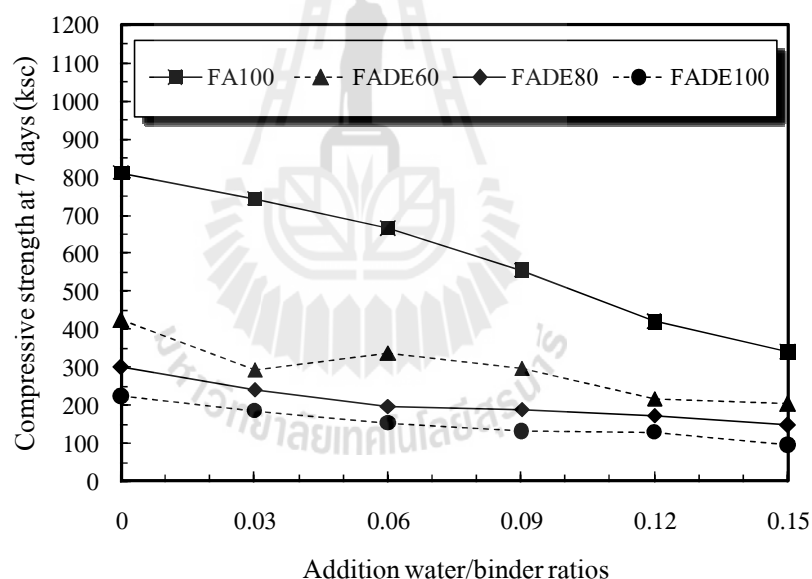
รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา ของการแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60

อย่างไรก็ดีอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาควรคำนึงถึงการสลายตัวของปริมาณสารประกอบของวัสดุพอลิไซลัน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาสารประกอบของวัสดุพอลิไซลันมีการสลายที่อุณหภูมิประมาณ 110°C ดังนั้นควรใช้อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่ประมาณร้อยละ 60 ถึง 80 ของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสารประกอบหลัก (Chaipanich, A., et al., 2010 and Wongkeo, W., et al., 2010) อีกทั้งการเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงทำให้ความชื้นในตัวอย่างระเหยอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กำลังอัดลดลงได้ (Chindapasirt, P., et al., 2007) และการเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกร้าวส่งผลเสียต่อโครงสร้างและคุณสมบัติกายภาพของจีโอโพลิเมอร์ (Jaarsveld, J.G.S.Van., et al., 2002)

4.7.5 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสม

ผลการทดสอบแปรผันตามอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา 75°C ทดสอบกำลังอัดที่ระยะการบ่ม 7 วัน พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมและปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ส่งผลต่อกำลังอัด

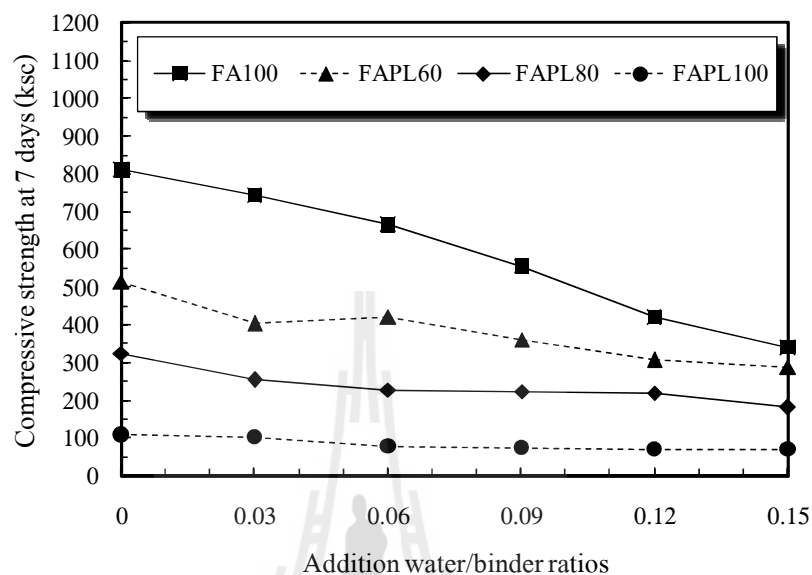
จากรูปที่ 4.47 บ่งบอกถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์มีความเหมาะสมที่อัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 3 ถึง 6 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 198-337 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถทำงานได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 6 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 337 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 72%



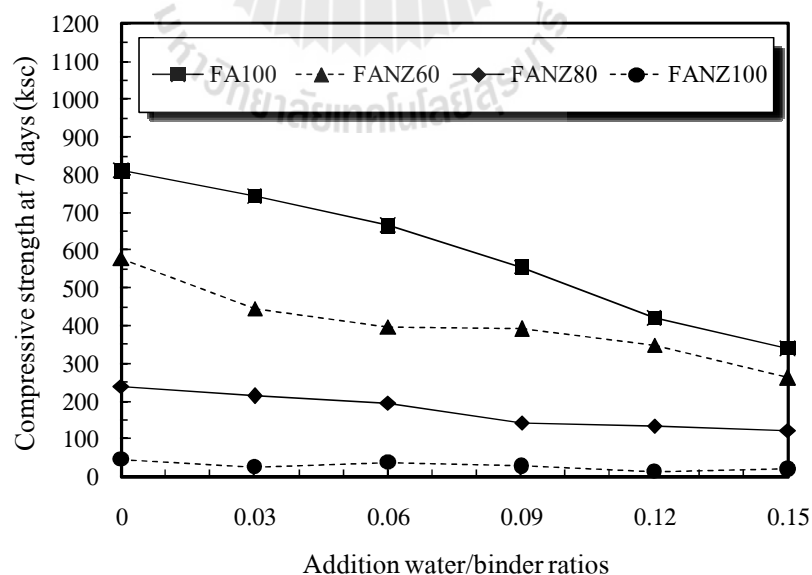
รูปที่ 4.47 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสม ไดอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.48 บ่งบอกถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์มีความเหมาะสมที่อัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 3 ถึง 6 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 227-420 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและ

ความสามารถทำงาน ได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ ร้อยละ 6 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 420 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 97%



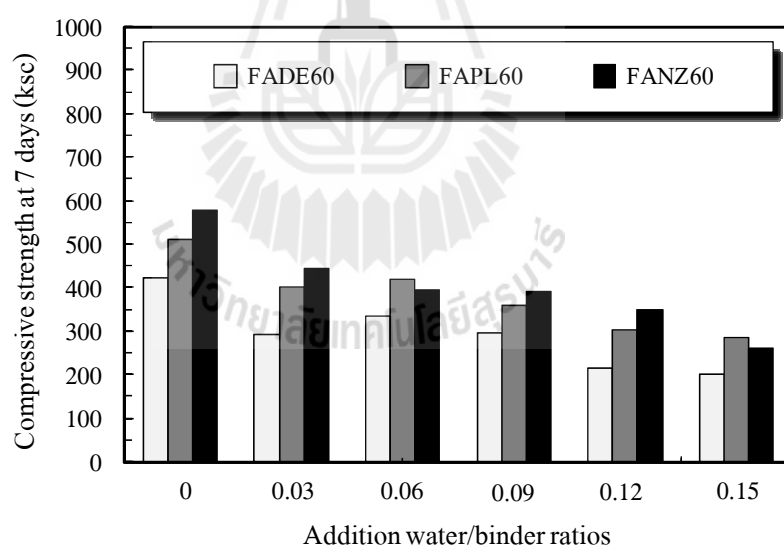
รูปที่ 4.48 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตาม ผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.49 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน

จากรูปที่ 4.49 บ่งบอกถึงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอโลต์ธรรมชาติมีความเหมาะสมที่อัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 3 ถึง 6 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดระหว่าง 195-445 ksc เมื่อพิจารณากำลังอัดและความสามารถทำงานได้พบว่าภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 3 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้กำลังอัดเท่ากับ 445 ksc และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 67%

นอกจากนี้อัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 9 ถึง 15 การแทนที่ด้วยไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอโลต์ธรรมชาติทั้งหมดกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงแต่ยังลดลงในสัดส่วนที่น้อย เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มน้ำในส่วนผสมดูเหมือนไม่ค่อยจำเป็นนัก เนื่องจากการแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอโลต์ธรรมชาติ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานอยู่แล้ว นอกจากนี้เป็นอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่น้อย ๆ อาจส่งผลดีต่อกำลังอัด ส่วนการแทนที่ด้วยถ้ำลอยทั้งหมดกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ อาจเนื่องจากการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเหมือนกับการปรับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ลดลง ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำที่มากขึ้นในส่วนผสม

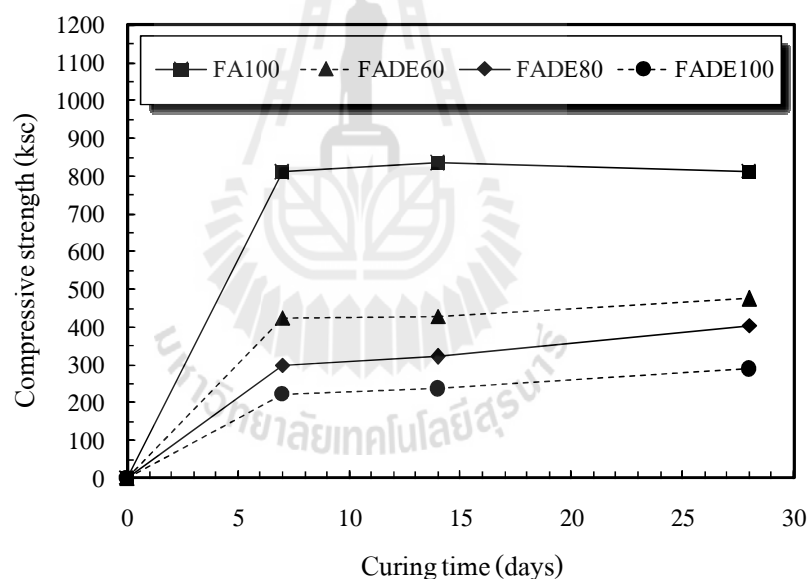


รูปที่ 4.50 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ของการแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอโลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน การแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 3 พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมต์ และเพอร์ไลต์เท่ากับร้อยละ 51.41 และ 10.47 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.50

4.7.6 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม

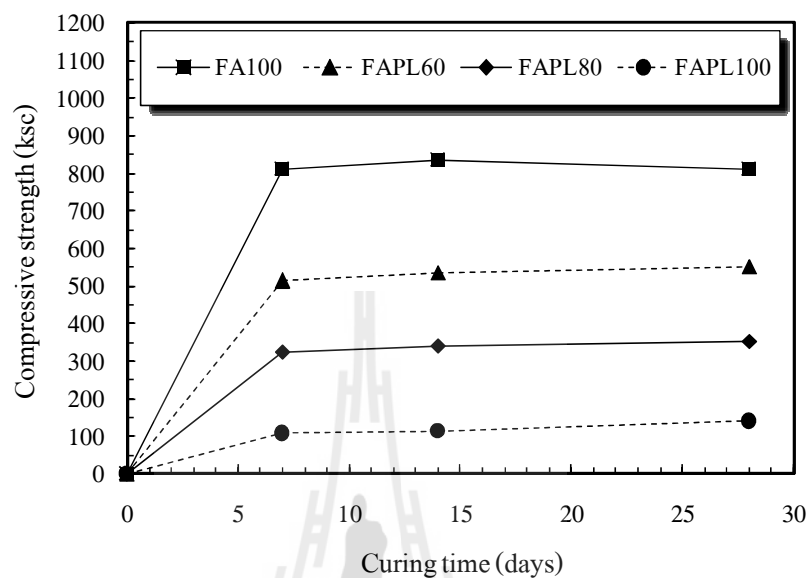
ผลการทดสอบที่แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง ใช้ความความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา 75°C ทดสอบกำลังอัดที่ระยะการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาการบ่มที่อายุ 7 วัน หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากหรือไม่มีเลย ดังแสดงในรูปที่ 4.51 ถึง 4.53



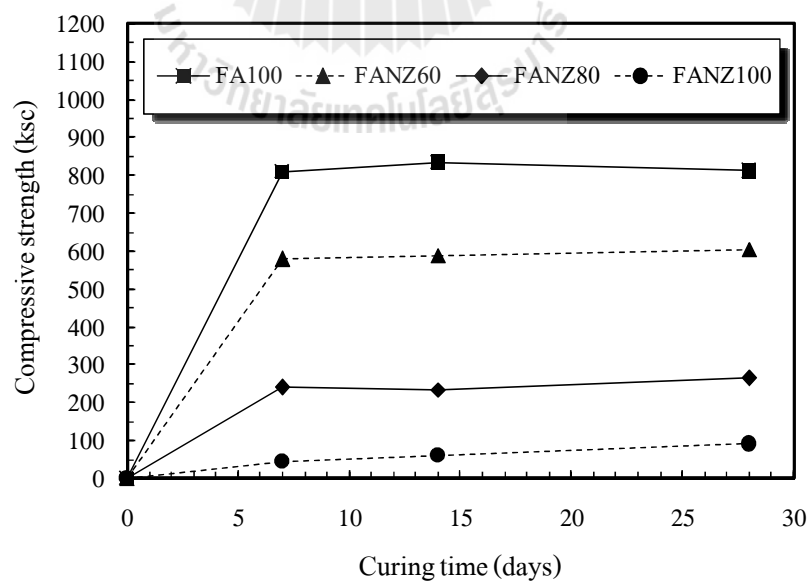
รูปที่ 4.51 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไคอะตอมไมต์ ที่แปรผันตามผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม

โดยสมมติฐานเบื้องต้นอาจเนื่องจากการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงทำให้มีการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็ว แต่อาจมีสารละลายบางส่วนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด และด้วยลักษณะของสารละลายที่มีความหนืดทำให้ลักษณะโครงสร้างมีความพรุน อีกทั้งความหนาแน่นของโครงสร้างไม่ได้แตกต่างจากที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่งผลให้กำลังอัดไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

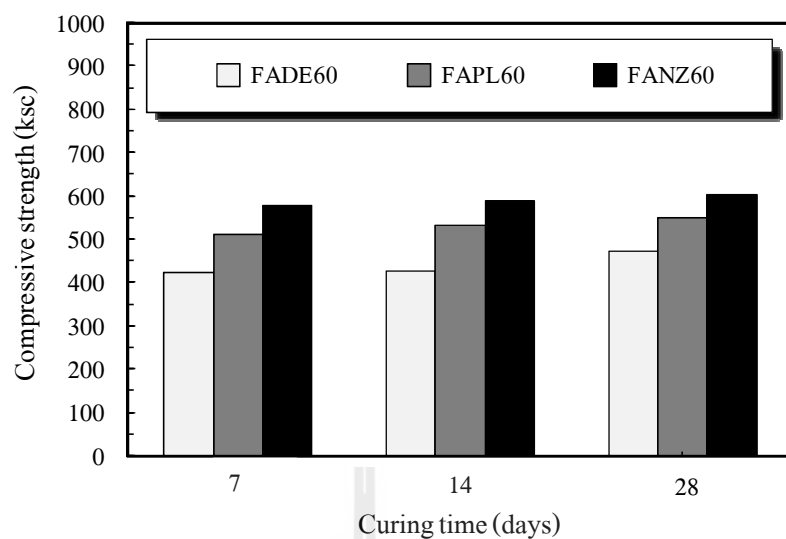
เมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ในปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะของขนาดโพรงเล็กลง ส่งผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น (Chindaprasirt, P., et al., 2005)



รูปที่ 4.52 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตาม ผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม



รูปที่ 4.53 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม



รูปที่ 4.54 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่แปรผันตามผลกระทบของระยะเวลาการบ่ม ของการแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในแก้วลอยร้อยละ 60

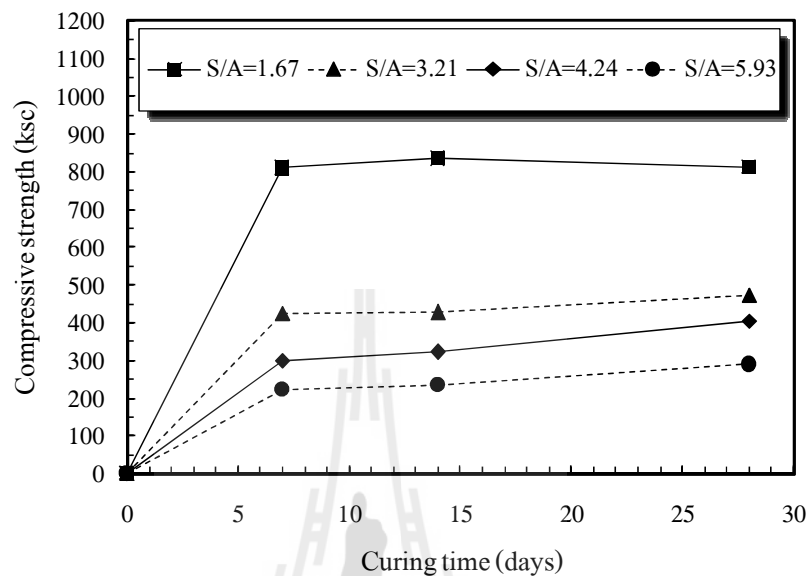
สำหรับการแทนที่แก้วลอยด้วยไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ มีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่มีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ เชื่องช้า (Castaldi, P., et al., 2008) มีความต้องการระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้นเพื่อให้มีการทำ ปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ขึ้น (Villa, C., et al., 2010) ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลการ ทดสอบต่อไป

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ของการแทนที่ ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในแก้วลอยร้อยละ 60 ที่แปรผันตามระยะเวลา การบ่ม พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีแนวโน้มให้ค่ากำลังอัดสูงสุด เมื่อพิจารณาที่ ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 11.92 การแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 7.55 และการแทนที่ด้วยซีโอไลต์- ธรรมชาติมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 4.66 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.54

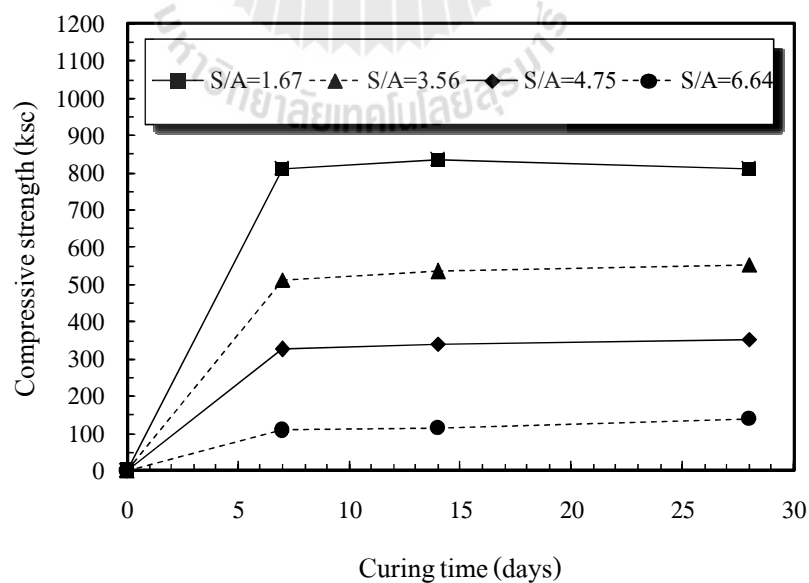
4.7.7 ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา

การพัฒนา กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วนซิลิกาต่อ อลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.55 ถึง 4.57 พบว่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมมี การพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีการเลยในช่วงอายุ ปลาย (Wongpa, J., et al., 2010) ซึ่งทุกส่วนผสมของอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)

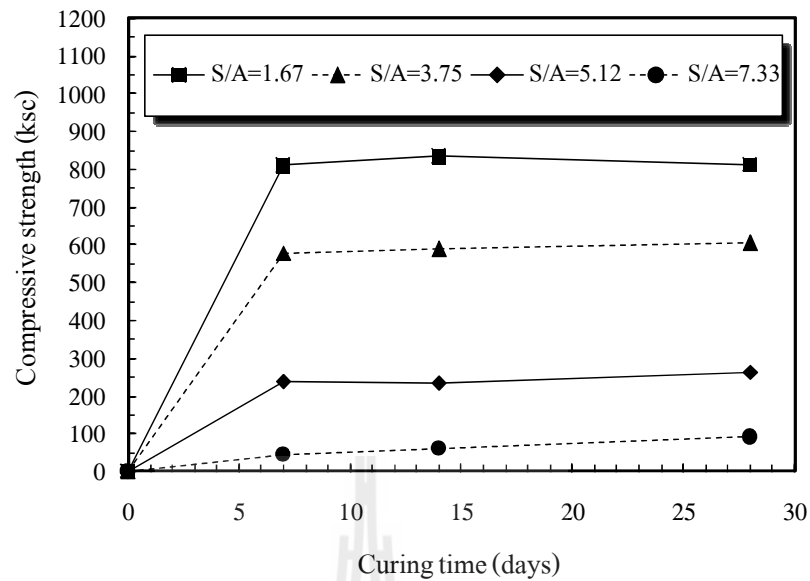
ที่แตกต่างกันมีกำลังอัดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงถึงอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)
ที่แตกต่างกันส่งผลกระทบท่อกำลังอัดอย่างมาก



รูปที่ 4.55 ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ต่อกำลังอัด
ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไคอะตอมไมต์

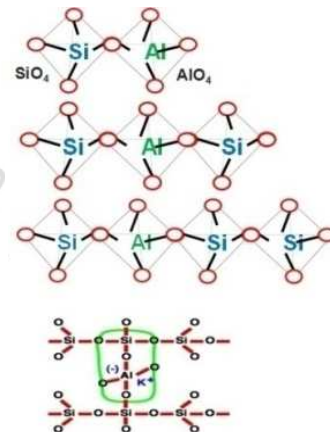


รูปที่ 4.56 ผลกระทบของอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ต่อกำลังอัด
ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์



รูปที่ 4.57 ผลกระทบของซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอโลต์ธรรมชาติ

Si:Al = 1	โพลีไซอะเลต (PS)	Poly (Sialate) (-Si-O-Al-O-)
Si:Al = 2	โพลีไซอะเลต ไซลอกโซ (PSS)	Poly (Sialate-siloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-)
Si:Al = 3	โพลีไซอะเลต ไดไซลอกโซ (PSDS)	Poly (Sialate-disiloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)
Si:Al > 3	ไซอะเลตเชื่อมขวางกัน	



รูปที่ 4.58 โครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซอะเลต (Davidovits, J., 1999)

อีกทั้งจากงานวิจัย Songpiriyakij et al. (2010) ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่าโครงสร้างแบบโพลีไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate-Siloxo; PSS) มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าโครงสร้างแบบโพลีไซอะเลตที่เป็นแบบ 2 มิติและไซอะเลตเชื่อมขวางกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.58 ซึ่งโครงสร้างแบบโพลีไซอะเลตที่เป็นแบบ 2 มิติและไซอะเลตเชื่อมขวางกันจะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มีการแทนที่ไดอะอะตอมไมต์ในเถ้าลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100

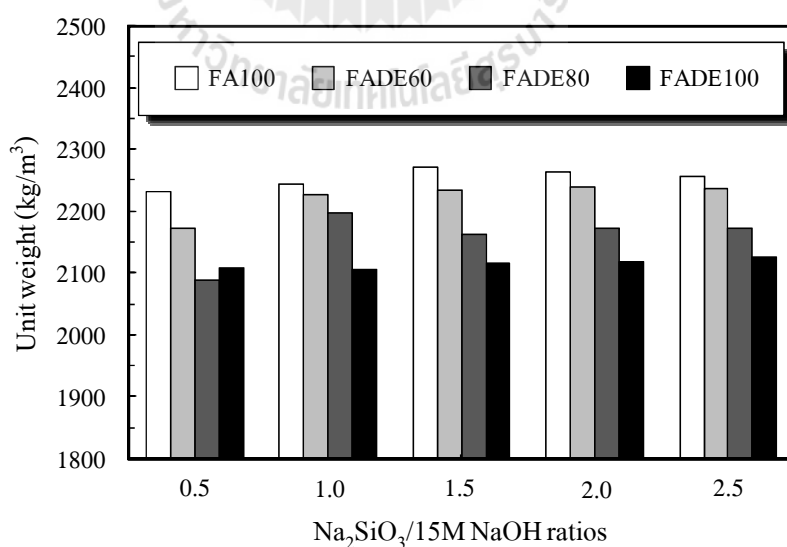
มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) เท่ากับ 1.67 3.21 4.24 และ 5.93 ตามลำดับ การแทนที่เพอร์ไลต์ในแก้วลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) เท่ากับ 1.67 3.56 4.75 และ 6.64 ตามลำดับ การแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในแก้วลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) เท่ากับ 1.67 3.75 5.12 และ 7.33 ตามลำดับ

4.8 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

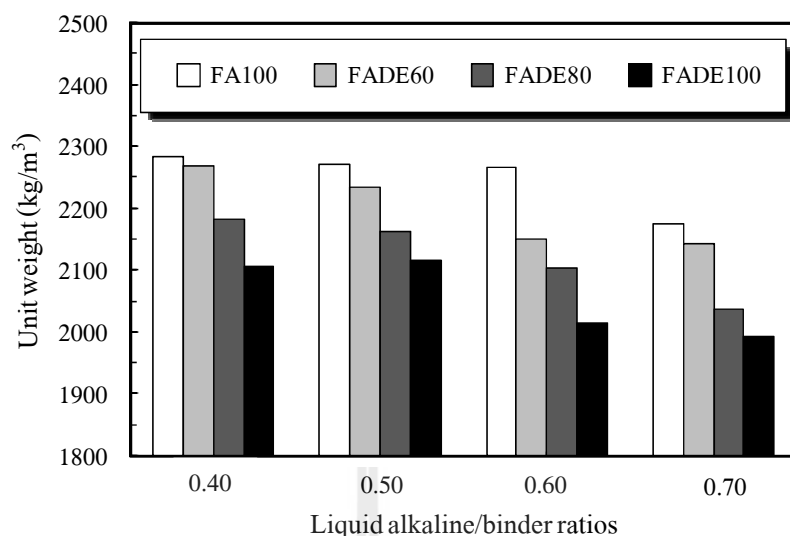
4.8.1 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วผสมไคอะตอมไมต์

ค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วผสมไคอะตอมไมต์ที่แปรผันตามผลกระทบต่าง ๆ พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณการแทนที่ในส่วนผสมมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ด้วยแก้วลอยทั้งหมด นอกจากนั้นยังพบอีกว่าปริมาณของเหลวที่มากขึ้นในส่วนผสมทำให้สามารถลดค่าหน่วยน้ำหนักลงได้ เนื่องจากไคอะตอมไมต์มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามากกว่าแก้วลอย ดังแสดงในรูปที่ 4.59 ถึง 4.62

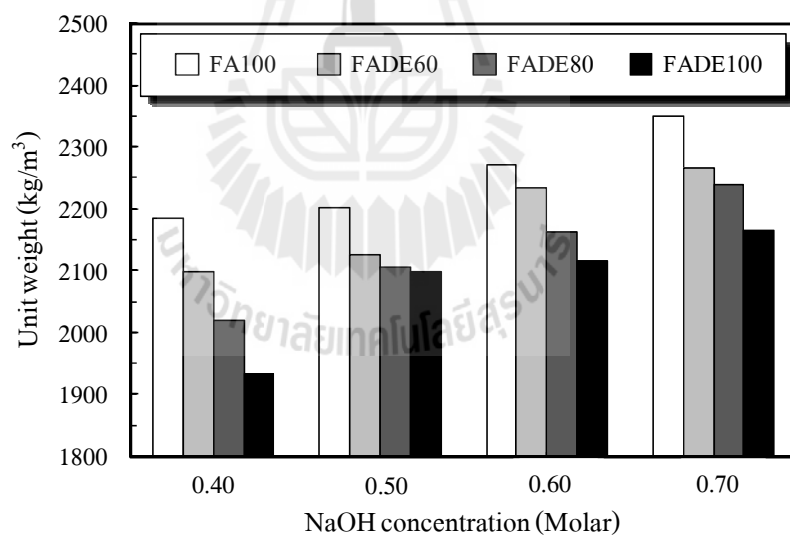
เมื่อพิจารณาค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วผสมไคอะตอมไมต์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา 75°C ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน พบว่าการแทนที่ไคอะตอมไมต์ในแก้วลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2,115 2,163 2,234 และ $2,270 \text{ kg/m}^3$ ตามลำดับ



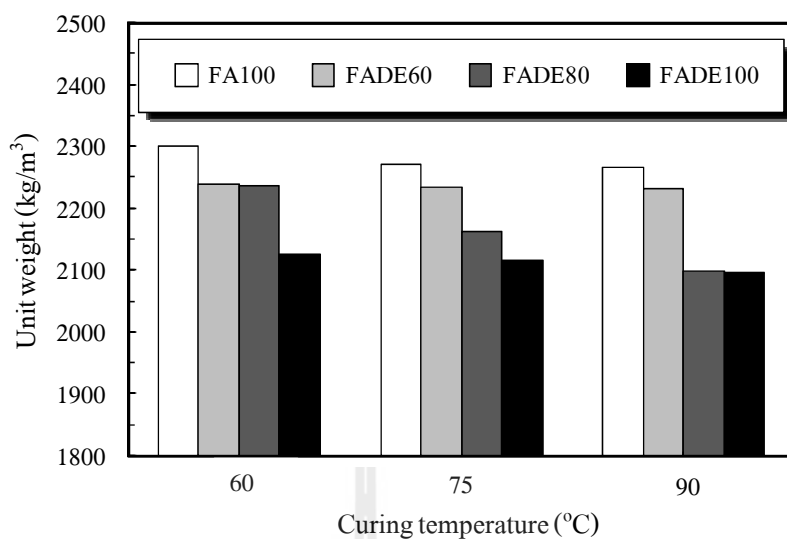
รูปที่ 4.59 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากแก้วผสมไคอะตอมไมต์ จากผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.60 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไคอะตอมไมต์ จากผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.61 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไคอะตอมไมต์ จากผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์

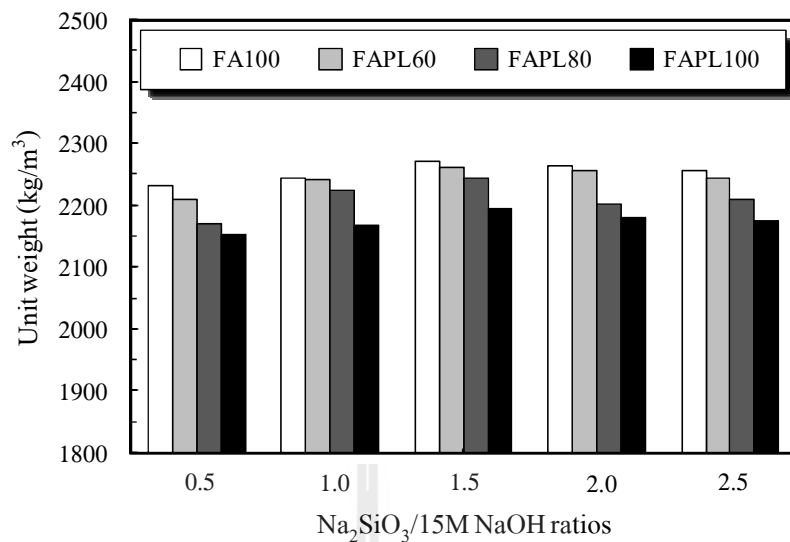


รูปที่ 4.62 หน่วยน้ำหนักของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมต์ จากผลกระทบบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

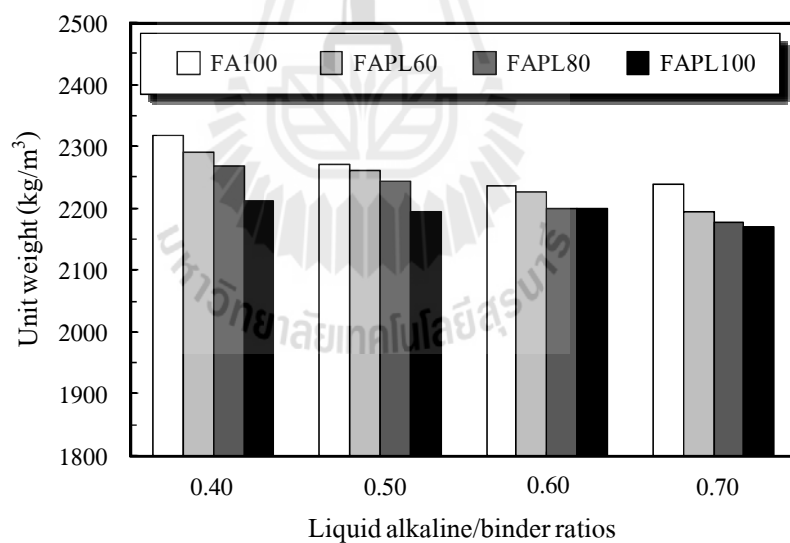
4.8.2 หน่วยน้ำหนักของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์

ค่าหน่วยน้ำหนักของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่แปรผันตามผลกระทบบต่าง ๆ พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมด เนื่องจากเพอร์ไลต์มีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับเถ้าลอย นอกจากนั้นจากงานวิจัยและข้อมูลของสำนักเหมืองแร่ ได้ให้ข้อมูลของเพอร์ไลต์ว่ามีการสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 760-1,300°C ซึ่งส่งผลให้มีน้ำหนักเบา แต่กำลังอัดลดลงอย่างมาก (www.dpim.go.th) ซึ่งงานวิจัยครั้งนี้ได้นำเพอร์ไลต์ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเผาใช้เป็นส่วนผสม จึงทำให้มีค่าหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกับการใช้เถ้าลอยทั้งหมดในส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.63 ถึง 4.66

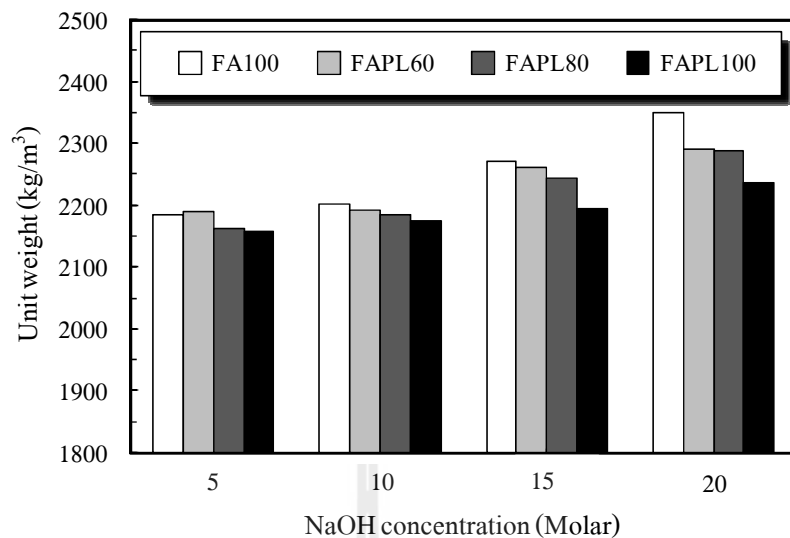
เมื่อพิจารณาค่าหน่วยน้ำหนักของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา 75°C ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน พบว่าการแทนที่เพอร์ไลต์ในเถ้าลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2,195 2,243 2,261 และ 2,270 kg/m³ ตามลำดับ



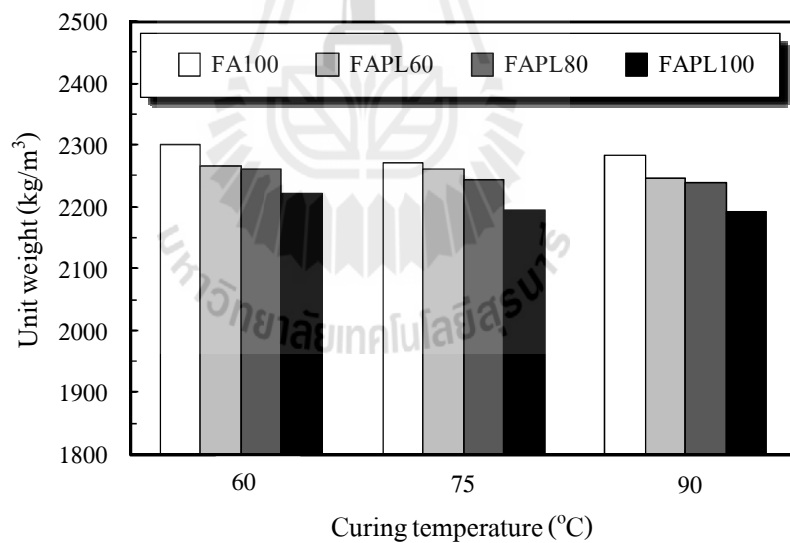
รูปที่ 4.63 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ จากผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.64 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ จากผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.65 หน่วยน้ำหนักของอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ จากผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์



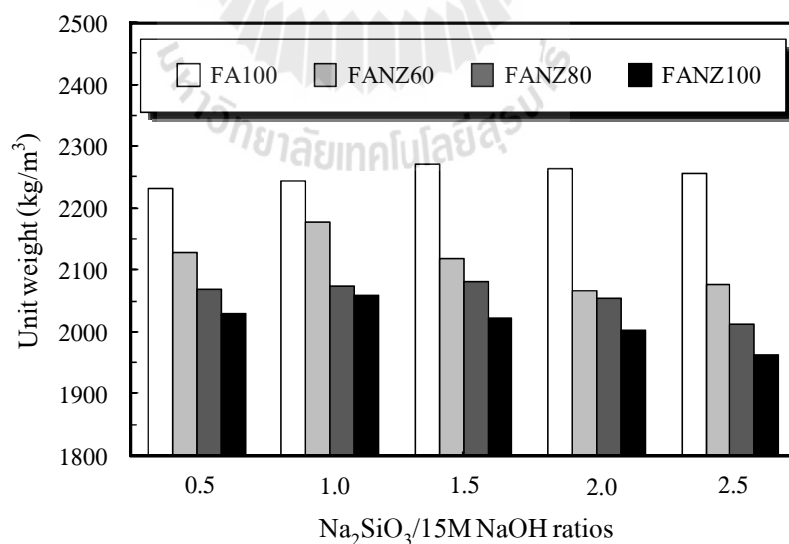
รูปที่ 4.66 หน่วยน้ำหนักของอีโพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเพอร์ไลต์ จากผลกระทบบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

4.8.3 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ

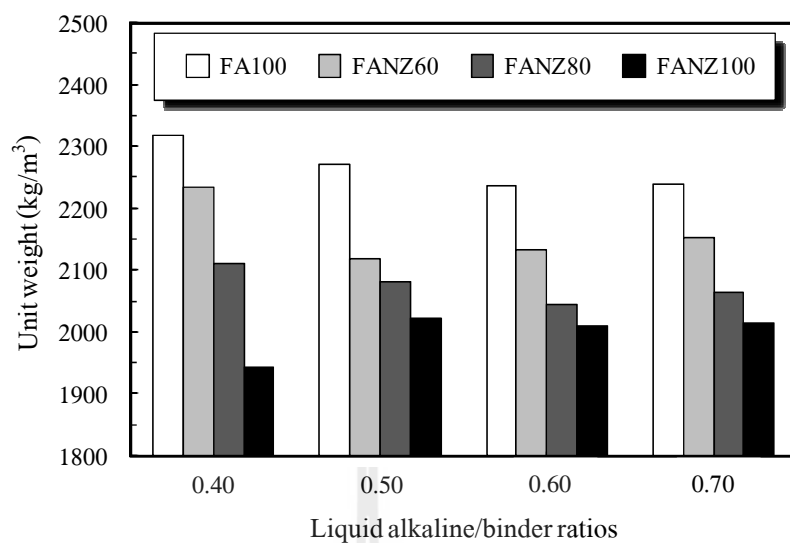
ค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติที่แปรผันตามผลกระทบต่าง ๆ พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณการแทนที่ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เปรียบเทียบกับ การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมด เนื่องจากซีโอไลต์ธรรมชาติมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเถ้าลอย ดังแสดงในรูปที่ 4.67 ถึง 4.70

เมื่อพิจารณาค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา 75°C ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน พบว่าการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2,022 2,081 2,118 และ 2,270 kg/m³ ตามลำดับ

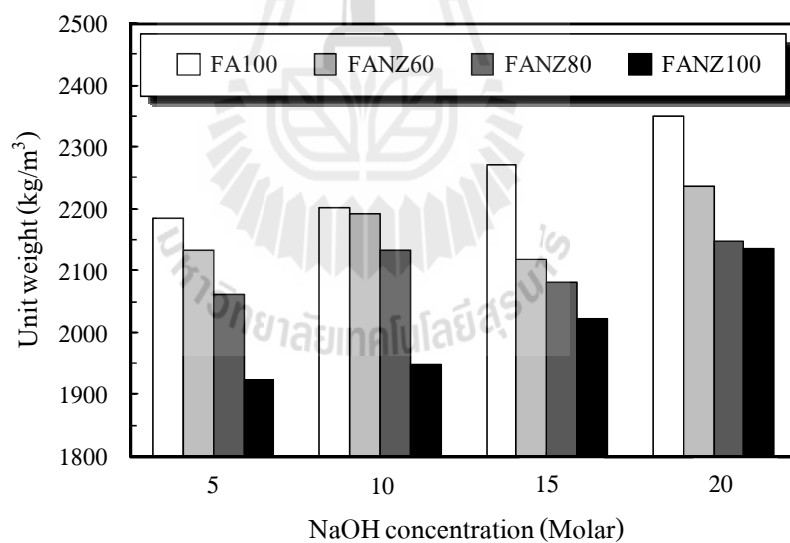
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ของการแทนที่ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60 พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีแนวโน้มมีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำสุด ซึ่งการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมต์ และเพอร์ไลต์เท่ากับร้อยละ 5.48 และ 6.75 ตามลำดับ เนื่องจากซีโอไลต์ธรรมชาติมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าและมีความพรุนมากกว่าไคอะตอมไมต์และเพอร์ไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.71



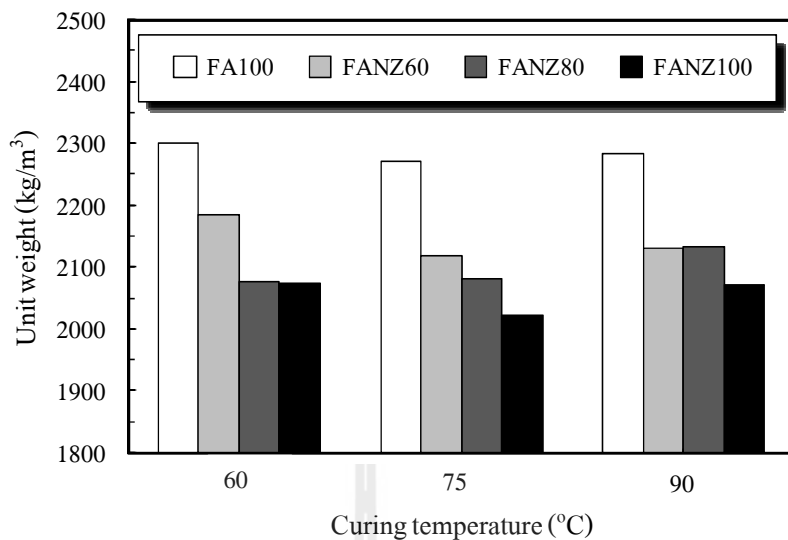
รูปที่ 4.67 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ จากผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์



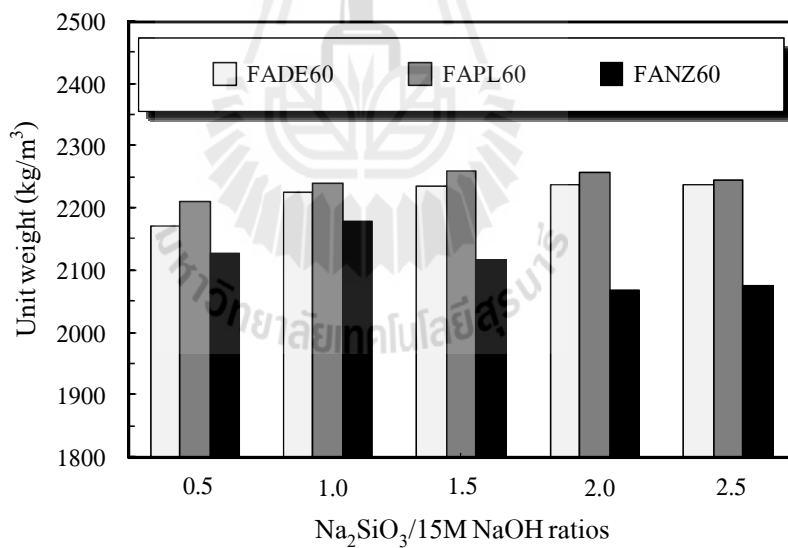
รูปที่ 4.68 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีไอไลต์ธรรมชาติ จากผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.69 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีไอไลต์ธรรมชาติ จากผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์



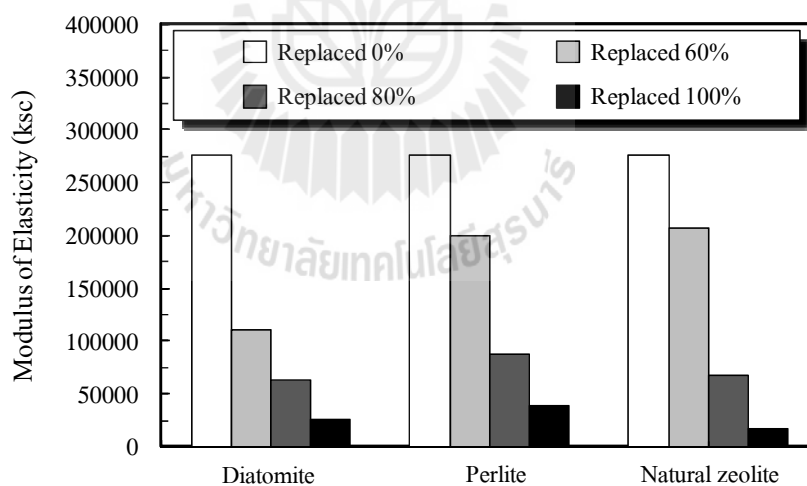
รูปที่ 4.70 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ จากผลกระทบของอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา



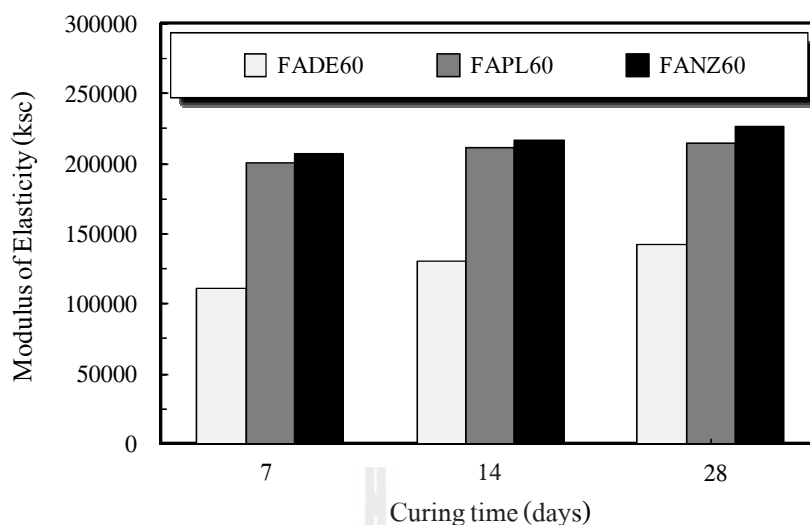
รูปที่ 4.71 เปรียบเทียบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ของการแทนที่ไดอะทอมไมต์ เพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60

4.9 โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm การวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นทำการตัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM 469 (2002) ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่แปรผันตามผลกระทบบ้าง ๆ พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C ทดสอบกำลังอัดที่ระยะการบ่ม 7 วัน พบว่าการแทนที่ด้วยถ้ำลอยทั้งหมดมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 276,000 ksc การแทนที่ไดอะตอมไมต์ในถ้ำลอยร้อยละ 60 80 และ 100 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 111,000 63,000 และ 26,000 ksc ตามลำดับ การแทนที่เพอร์ไลต์ในถ้ำลอยร้อยละ 60 80 และ 100 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 200,000 87,500 และ 39,000 ksc ตามลำดับ การแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 80 และ 100 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 207,000 68,000 และ 17,000 ksc ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.72



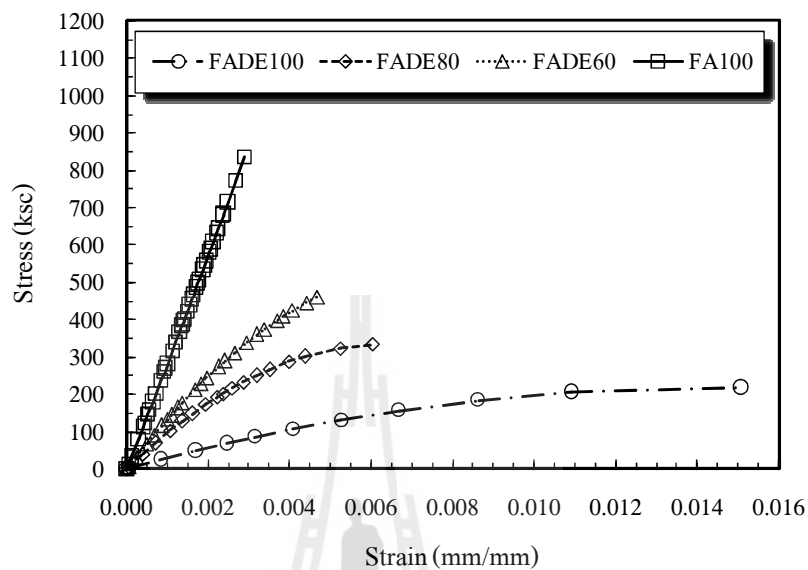
รูปที่ 4.72 เปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 และอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C



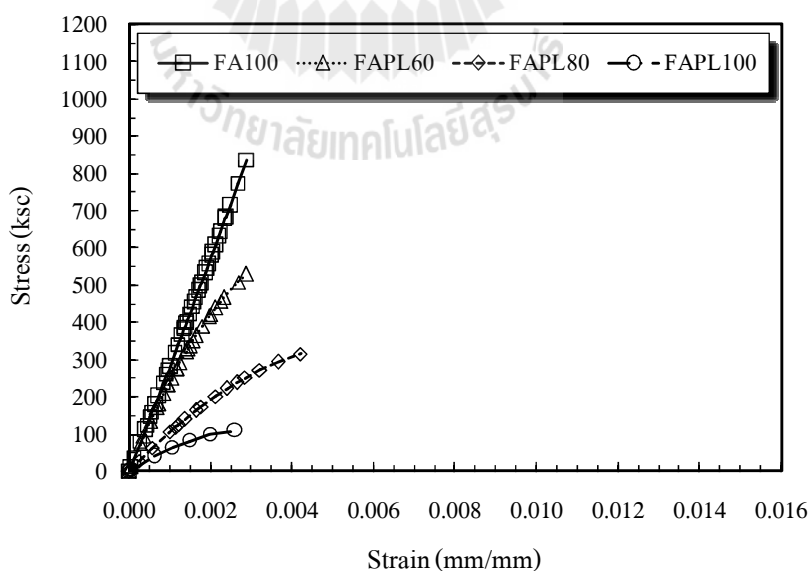
รูปที่ 4.73 เปรียบเทียบ โมดูลัสยืดหยุ่นของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมด์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 และอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ของการแทนที่ไดอะตอมไมด์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 100 พบว่าเพอร์ไลต์มีค่าความแกร่งมากที่สุด และไดอะตอมไมด์มีค่าความแกร่งมากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ อาจเนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีของเพอร์ไลต์ที่มีลักษณะไม่เป็นผลึกหรือมีรูปร่างอสัณฐาน (Glassy phase or Amorphous) แสดงถึงความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่าไดอะตอมไมด์และซีโอไลต์ธรรมชาติ ที่มีแนวโน้มเป็นลักษณะความเป็นผลึก (Crystallinity) ดังที่ได้สรุปไว้ข้างต้น ซึ่งหากพิจารณาการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมด์มีกำลังอัดมากกว่าทั้งการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ ก็จริง แต่การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมด์มีการเสีรูปร่างหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่า เพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ ทำให้กราฟมีความชันลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ ส่วนการแทนที่ไดอะตอมไมด์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 80 พบว่าเพอร์ไลต์มีค่าความแกร่งมากที่สุด ส่วนไดอะตอมไมด์และซีโอไลต์ธรรมชาติมีความแกร่งใกล้เคียงกัน ส่วนการแทนที่ไดอะตอมไมด์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60 พบว่าเพอร์ไลต์มีค่าความแกร่งมากที่สุด และซีโอไลต์ธรรมชาติมีความแกร่งมากกว่าไดอะตอมไมด์ จากวิจัย Castaldi et al. (2008) ได้ให้ข้อสรุปไว้ว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ

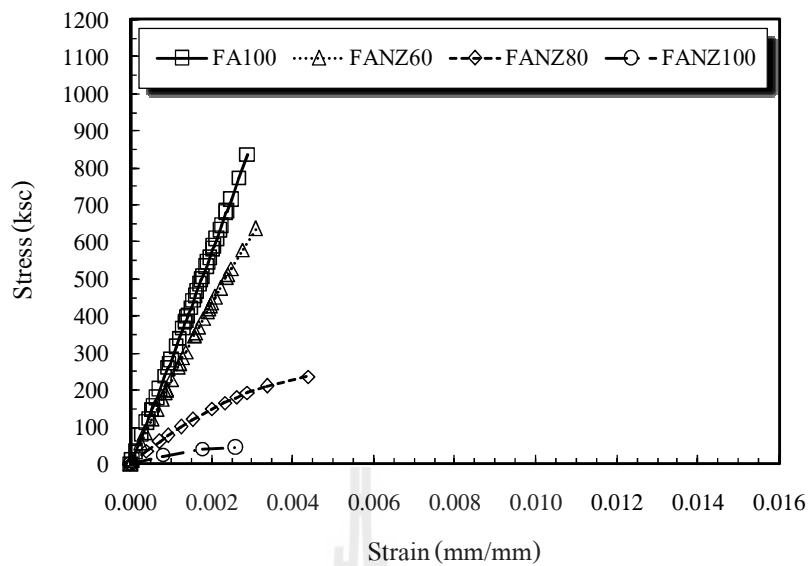
มีแนวโน้มของคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ ไคอะตอมไมต์และ เพอร์ไลต์ ส่งผลให้มีกำลังอัดและความแกร่งเพิ่มขึ้น



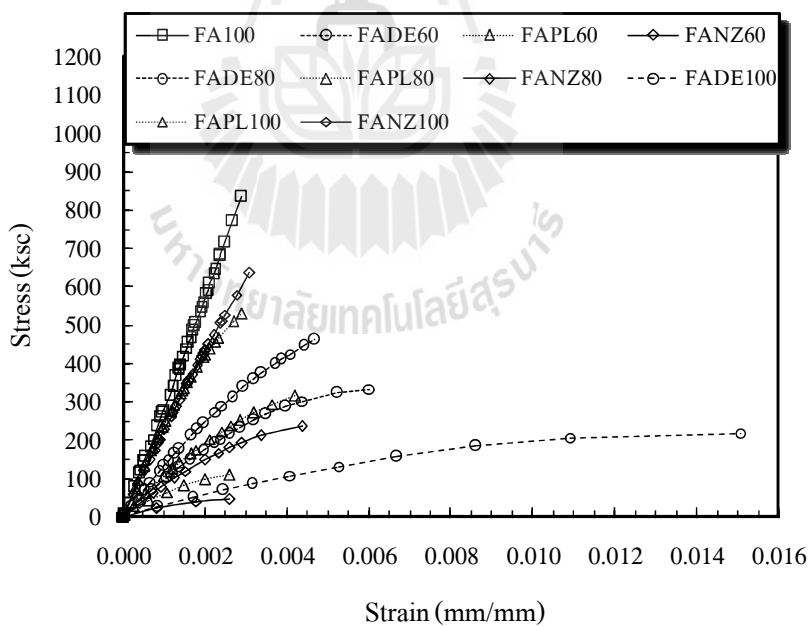
รูปที่ 4.74 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากถั่วลยผสมไคอะตอมไมต์



รูปที่ 4.75 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากถั่วลยผสมเพอร์ไลต์



รูปที่ 4.76 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ



รูปที่ 4.77 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากถ้ำลอยผสมไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.73 แสดงถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน การแทนที่ไคอะตอมไมด์เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมด์มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 29.02 การแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 7.14 และการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 9.59

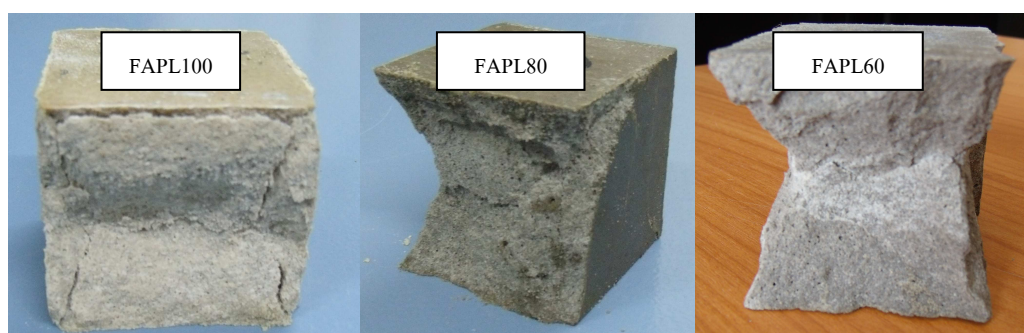
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.74 ถึง 4.77 พบว่าแนวโน้มของกราฟมีความชันลดลงและความเค้นมีค่าลดลงแต่ความเครียดมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ไคอะตอมไมด์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยเพิ่มมากขึ้น โดยลักษณะเส้นกราฟคล้ายพาราโบลาคว่ำคล้ายกับคอนกรีตทั่วไป และพฤติกรรมการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในช่วงเริ่มต้นมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น (Linear) จนถึงจุดที่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์รับแรงกดอัดได้ประมาณร้อยละ 40 ถึง 70 ของกำลังอัดประลัย จากนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีลักษณะที่โค้งมากขึ้นและเกิดรอยแตกร้าวเล็ก ๆ (Microcrack) อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อแรงกระทำสูงขึ้นรอยแตกร้าวจะเกิดและขยายใหญ่มากขึ้นและพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีความโค้งมากขึ้นจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ นอกจากนี้ยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยทั้งหมดที่มีกำลังอัดสูง เมื่อถึงจุดกำลังอัดประลัยพบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและเกิดการวิบัติอย่างรุนแรงและทันทีทันใด ในทางตรงกันข้ามกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ของการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมด์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอย ที่มีกำลังอัดต่ำกว่าการใช้ถ้ำลอยทั้งหมดในส่วนผสมพบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ และมีค่าความเครียดสูง ซึ่งแสดงว่ามีความเหนียวในแนวแกน (Axial ductility) ที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ใกล้เคียงกับซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งปกติแล้วซีเมนต์มอร์ตาร์จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างประมาณ 0.003 mm/mm แต่ขณะที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่การแทนที่ไคอะตอมไมด์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 ซึ่งเป็นสัดส่วนของการแทนที่ที่สามารถประยุกต์นำไปใช้งานได้ มีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างประมาณ 0.0047 0.0029 และ 0.0031 mm/mm ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ถ้ำลอยในส่วนผสมทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

ประมาณ 0.0029 mm/mm จากเหตุผลข้างต้นสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของงานวิจัยนี้ใกล้เคียงกับซีเมนต์มอร์ตาร์ เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของการแทนที่โคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 พบว่าโคอะตอมไมต์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากที่สุด อาจเนื่องจากโคอะตอมไมต์ มีลักษณะของความพรุนและช่องว่างสูงกว่าเพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ทำให้เมื่อได้รับแรงอัดแทนที่จะเกิดการแตกร้าวตามผิวสัมผัสเหมือนกับซีเมนต์มอร์ตาร์ แต่มีผลทำให้โพรงและช่องว่างของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะยุบตัวลง โดยไม่เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ยังมีการยึดเกาะกันอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.78 ถึง 4.80 ส่วนการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์มีลักษณะของความพรุนและช่องว่างน้อยกว่า อีกทั้งลักษณะอนุภาคที่ค่อนข้างกลมส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างใกล้เคียงกับส่วนผสมของถ้ำลอยล้วนและซีเมนต์มอร์ตาร์



รูปที่ 4.78 ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมโคอะตอมไมต์



รูปที่ 4.79 ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมเพอร์ไลต์



รูปที่ 4.80 ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ



รูปที่ 4.81 ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย

จากรูปที่ 4.78 ถึง 4.81 พบว่าลักษณะการวิบัติจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีการวิบัติเกิดขึ้นได้ทั้งสามลักษณะคือ แบบเฉือนหรือรูปกรวย แบบผ่าซีกหรือแนวตรง และแบบระเบิด ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอย พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 100 ถึง 700 ksc มีลักษณะการวิบัติแบบเฉือนหรือรูปกรวย และจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดสูงที่อยู่ในช่วง 700 ถึง 950 ksc มีลักษณะการวิบัติแบบระเบิด ส่วนลักษณะการวิบัติแบบผ่าซีกหรือแนวตรงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์นั้นถือเป็นส่วนน้อยของการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด นอกจากนั้นยังพบว่าลักษณะการวิบัติของการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยมีแนวโน้มที่มีการวิบัติแบบเฉือนหรือรูปกรวย เนื่องจากมีกำลังอัดที่ต่ำและมีความเหนียวในแนวแกนมากกว่าการใช้เถ้าลอยทั้งหมดในส่วนผสมดังแสดงในความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ

ความเครียด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนเทียบเท่าหรือจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าจะมีลักษณะการวิบัติเกิดขึ้นแบบเนียนหรือรูปกรวย

ในกรณีที่วัสดุประสานทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการวิบัติโดยใช้แรงเสียดทานภายในและแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) ระหว่างอนุภาคในวัสดุนั้น มุมที่เกิดการวิบัติจะไม่ทำมุม 45 องศา กับแนวราบตามที่สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ Mohr's circle แต่มุมดังกล่าวจะเป็น Function กับมุมของความเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคในวัสดุด้วย โดยทั่วไปแล้วค่าของมุมที่เกิดการวิบัติของคอนกรีตจะอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 องศา แต่สำหรับงานวิจัยครั้งนี้เป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าของมุมที่เกิดการวิบัติอยู่ในช่วง 30 ถึง 45 องศา อาจเนื่องมาจากงานวิจัยนี้เป็นมอร์ตาร์และมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีต อีกทั้งงานวิจัยครั้งนี้ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C 109 (2002) ที่ให้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ส่งผลให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ทำให้รูปแบบของการวิบัติและความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่างจากการวิบัติทั่วไป อีกสาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากงานวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวอย่างทดสอบเป็นทรงลูกบาศก์ซึ่งมีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับตัวอย่างทดสอบน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกทำให้การขยายตัวทางด้านข้างน้อยกว่า จึงทำให้สถานะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเปลี่ยนไป (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2000)

4.10 วิเคราะห์ราคาของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

จากตารางการเปรียบเทียบราคาของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.3 แสดงถึงถ้ำลอยมีราคาต้นทุนถูกที่สุด โดยมีราคาต้นทุนถูกกว่าไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์-ธรรมชาติประมาณ 3.5 2.0 และ 12 เท่าของราคาต้นทุนถ้ำลอย แต่แนวโน้มการใช้ไคอะตอมไมต์และซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถลดหน่วยน้ำหนักลงได้ประมาณ 300 ถึง 500 kg/m³ ยกเว้นการใช้เพอร์ไลต์ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีแนวโน้มลดหน่วยน้ำหนักได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ในการนำไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติมาใช้ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยการแทนที่ในถ้ำลอยร้อยละ 60 พบว่าการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยมีค่ากำลังอัดสูงที่สุดและค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด แต่เมื่อพิจารณาราคาต้นทุนต่อ 1 m³ จะมีราคาต้นทุนสูงการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมต์และเพอร์ไลต์เท่ากับ 1.60 และ 1.80 เท่าของราคาต้นทุนการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบราคาของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	ราคา/กก (บาท)	แหล่งที่มา ของวัสดุ	บริษัทจัดจำหน่าย
ไดอะตอมไมต์	3.5	ลำปาง	หจก. โกวิทปูนขาว
เพอร์ไลต์	2.0	ลพบุรี	บริษัท ทองมาการเกษตร จำกัด
ซีโอไลต์ธรรมชาติ	12.0	รัสเซีย	บริษัท ซีโอเทค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
เถ้าลอย	1.0	ลำปาง	หจก.เจ เอ ไอ เอ็นจิเนียริ่ง

หมายเหตุ: หจก. โกวิทปูนขาว 29 หมู่ 7 ตำบลหน้าพระลาน อำเภอเฉลิมพระเกียรติ
จังหวัดสระบุรี โทรศัพท์ 036-334-4444
บริษัท ทองมาการเกษตร จำกัด 247 หมู่ 6 ตำบลลำนารายณ์ อำเภอชัยบาดาล
จังหวัดลพบุรี โทรศัพท์ 036-630-8135
บริษัท ซีโอเทค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด 2922/146 ชั้น 4 ถนนเพชรบุรีตัดใหม่
แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ โทรศัพท์ 02-716-5388
หจก.เจ เอ ไอ เอ็นจิเนียริ่ง 368/64 หมู่ 2 หมู่บ้านเพ็ญพร ถนนพุทธบูชา 44
แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ โทรศัพท์ 02-869-3549

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบราคาค่าต้นทุนของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์

รายการ	กำลังอัด (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (kg/m ³)	ราคา (บาท/m ³)	ราคา/กำลังอัด (บาท/ksc)
FADE60*	474	2,180	6,715	14.17
FAPL60*	551	2,241	5,995	10.88
FANZ60*	604	2,095	10,795	17.87
Cement mortar**	321	2,335	1,953	6.08

หมายเหตุ: * จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50
อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5
อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50
ทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน
** ซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50
อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2.75 (ASTM C 109)
ทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบราคาต้นทุนระหว่างจีโอ โพลีเมอร์มอร์ตาร์กับซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่าราคาต้นทุนของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มีราคาต้นทุนที่สูงกว่าราคาต้นทุนของซีเมนต์มอร์ตาร์ประมาณ 3 ถึง 5 เท่า แต่กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มีค่าสูงกว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ประมาณ 2 เท่า ดังนั้นยังมีความเป็นไปได้ในการลดราคาต้นทุนในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ เนื่องจากมีกำลังอัดที่สูงกว่า โดยการใช้น้ำและเถ้าลอยเพื่อลดปริมาณของเหลวในส่วนผสม เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยมากขึ้นและการใช้น้ำแทนที่ของเหลวในส่วนผสมสามารถปรับอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานให้มากขึ้นได้ เพราะทรายมีราคาต้นทุนที่ถูกกว่าวัสดุอื่น ๆ อีกทั้งยังสามารถปรับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ลดลงได้ อย่างไรก็ตามการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ยังมีความเป็นไปได้โดยการปรับอัตราส่วนให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้นทั้ง น้ำหนัก กำลังอัด และราคาต้นทุน เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานต่อไป



บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากำลัษณ์ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไคอะตอมไมต์เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ จากผลค้ำเนินการสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไคอะตอมไมต์

การใช้ไคอะตอมไมต์ในส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ส่งผลให้กำลัษณ์ลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลัษณ์มีค่าสูงขึ้นตามระยะอายุการบ่ม และจากคุณสมบัติที่มีน้ำหนักเบา มีรูพรุนสูง สามารถลดหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ลงได้

1. ความสามารถทำงานได้ขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ไคอะตอมไมต์ในถ้ำลอย ปริมาณของโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสม อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

2. การแทนที่ไคอะตอมไมต์ในถ้ำลอยสามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ได้

3. การแทนที่ไคอะตอมไมต์ในถ้ำลอยร้อยละ 60 ถึง 100 กำลัษณ์มีแนวโน้มต้องการปริมาณของโซเดียมซิลิเกตมากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์

4. การแทนที่ไคอะตอมไมต์ในถ้ำลอยร้อยละ 60 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C เป็นภาวะที่ดีที่สุดทั้งความสามารถทำงานได้และกำลัษณ์ ซึ่งมีค่ากำลัษณ์และการไหลแผ่เท่ากับ 486 ksc และ 35% ตามลำดับ

5. การแทนที่ด้วยไคอะตอมไมต์มีแนวโน้มที่ต้องการระยะเวลาการบ่มมากขึ้น เพื่อให้มีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และกำลัษณ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะการบ่มที่มากขึ้นเช่นเดียวกันกับการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ

6. อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ แต่กำลัษณ์ลดลงเช่นเดียวกันกับการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ

7. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ไคอะตอมไมด์ในเส้นใยมากขึ้นเช่นเดียวกันกับการแทนที่ด้วยเปอร์ไลต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ

8. อัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสมที่สุดทั้งในเรื่องของความสามารถทำงานได้ กำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และราคาต้นทุนในการผลิตของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ คือการแทนที่ไคอะตอมไมด์ในเส้นใยร้อยละ 60 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C

5.1.2 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเส้นใยผสมเปอร์ไลต์

การใช้เปอร์ไลต์ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ส่งผลให้กำลังอัดลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น การพัฒนา กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม และจากคุณสมบัติที่มีน้ำหนักและรูพรุนใกล้เคียงกับเส้นใย ทำให้สามารถลดหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลงได้ไม่มาก

1. ความสามารถทำงานได้ขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่เปอร์ไลต์ในเส้นใย ปริมาณของโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสม อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

2. การแทนที่เปอร์ไลต์ในเส้นใยสามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ แต่มีค่าใกล้เคียงกับเส้นใย และเร็วกว่าการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมด์และซีโอไลต์ธรรมชาติ เนื่องจากเปอร์ไลต์มีคุณสมบัติที่มีความไม่เป็นผลึกเช่นเดียวกันกับเส้นใย ส่งผลให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็ว

3. การแทนที่เปอร์ไลต์ในเส้นใยร้อยละ 60 ถึง 100 กำลังอัดมีแนวโน้มต้องการปริมาณของโซเดียมซิลิเกตมากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์

4. การแทนที่เปอร์ไลต์ในเส้นใยร้อยละ 60 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C เป็นภาวะที่ดีที่สุดทั้งความสามารถทำงานได้และกำลังอัด ซึ่งมีค่ากำลังอัดและการไหลแผ่เท่ากับ 589 ksc และ 53% ตามลำดับ

5. การแทนที่ด้วยเปอร์ไลต์มีแนวโน้มที่ต้องการระยะเวลาการบ่มมากขึ้น เพื่อให้มีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้นเช่นเดียวกันกับการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมด์และซีโอไลต์ธรรมชาติ

6. อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ แต่กำลังอัดลดลงเช่นเดียวกันกับการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ

7. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพอร์ไลต์ในถ้ำลอยมากขึ้นเช่นเดียวกันกับการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์และซีโอไลต์ธรรมชาติ

8. อัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสมที่สุดทั้งในเรื่องของความสามารถทำงานได้ กำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และราคาต้นทุนในการผลิตของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ คือการแทนที่เพอร์ไลต์ในถ้ำลอยร้อยละ 60 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C

5.1.3 จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ

การใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ส่งผลให้กำลังอัดลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น การพัฒนา กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม และจากคุณสมบัติที่มีน้ำหนักเบา มีรูพรุนสูง สามารถลดหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลงได้

1. ความสามารถทำงานได้ขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยปริมาณของโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสม อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

2. การแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยสามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะก่อตัวสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ได้

3. การแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 ถึง 100 กำลังอัดมีแนวโน้มต้องการปริมาณของโซเดียมซิลิเกตมากกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์

4. การแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C เป็นภาวะที่ดีที่สุดทั้งความสามารถทำงานได้และกำลังอัด ซึ่งมีค่ากำลังอัดและการไหลแผ่เท่ากับ 632 ksc และ 52% ตามลำดับ

5. การแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีแนวโน้มที่ต้องการระยะเวลาการบ่มมากขึ้น เพื่อให้มีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาบ่มที่มากขึ้นเช่นเดียวกันกับการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์และเพอร์ไลต์

6. อัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมินาที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้แต่กำลังอัดลดลงเช่นเดียวกันกับการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมต์และเพอร์ไลต์

7. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยมากขึ้นเช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมต์และเพอร์ไลต์

8. อัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสมที่สุดทั้งในเรื่องของความสามารถทำงานได้ กำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และราคาต้นทุนในการผลิตของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ คือการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C

เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสมที่สุดของการใช้ไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสม พบว่าการใช้ไคอะตอมไมต์ในส่วนผสมเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งาน ถึงแม้ว่าการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติจะมีค่าหน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และความสามารถทำงานได้ดีกว่าการใช้ไคอะตอมไมต์ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ แต่ด้วยราคาต้นทุนของซีโอไลต์ธรรมชาติมีราคาที่สูงกว่าไคอะตอมไมต์ประมาณ 4 เท่าของราคาต้นทุนไคอะตอมไมต์ อีกทั้งค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ส่วนการใช้เพอร์ไลต์ในส่วนผสมถึงแม้ว่าจะมีราคาต้นทุนถูกกว่าการใช้ไคอะตอมไมต์ แต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและความสามารถทำงานได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เพอร์ไลต์ยังมีค่าหน่วยน้ำหนักที่มากกว่าไคอะตอมไมต์ประมาณ 200 ถึง 300 kg/m^3

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่ระยะการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมที่ระยะเวลาการบ่ม 60 และ 90 วัน เพื่อศึกษาถึงแนวโน้มกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะการบ่มมากขึ้น อีกทั้งศึกษาถึงโครงสร้างระดับจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมไคอะตอมไมต์ เพอร์ไลต์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดสอบทางด้านกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

รายการอ้างอิง

- เกียรติศักดิ์ ศรีชัยเลิง และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2550). การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมเถ้าแกลบ, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3, หน้า 41- 47.
- คม บัวคดี และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์. (2540). การพัฒนามอร์ต้าร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์, เอกสารงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ. (2548). ผลกระทบของเพอร์ไลต์ต่อการซึมผ่านอากาศ และปริมาณช่องว่างอากาศภายในซีเมนต์มอร์ต้าร์, วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เจริญชัย ฤทธิรุท และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2550). การศึกษาสารละลายที่แตกต่างกันในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์จากดินขาวเผา, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3, หน้า 150-153.
- ณรงค์ศักดิ์ นันทกาลภิรา และคณะ. (2547). หินอัคนี.[ออนไลน์], <http://www.soil.civil .rmut.ac.th/rock/index1.html>.
- ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2548). ผลกระทบของขนาดอนุภาคและรูปร่างเถ้าถ่านหินต่อความพรุนและการซึมผ่านอากาศของเพสต์, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, หน้า 22-29.
- เกียรติศักดิ์ กลัปประสิทธิ์ และคณะ. (2550). ผลกระทบของสัดส่วนซิลิกาต่ออุณหภูมินำต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3, หน้า 30-36.
- ประมวล โสมละคร และคณะ. (2550). การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมแร่ดินเบา, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3, หน้า 37-40.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัยจาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร. (2548). ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอยแม่เมาะ. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอาภา สชนเสาวภาคย์. (2550). การศึกษาการกระตุ้นเถ้าหนักด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุจีโอโพลีเมอร์, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3, หน้า 48-52 .

- ภากร ไตรศิริวานิชย์ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2550). การศึกษาจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำหน้า,
การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3, หน้า 37–40.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. (2543). พลาสติกฯราชมงคล ศัพท์ชีวะ, [ออนไลน์],
<http://www.electron.rmutphysics.com/bio-glossary>.
- วิฒนชัย อยู่ในวงศ์. (2546). การใช้ซีโพลต์กำจัดแคดเมียม ตะกั่ว พรอท และสังกะสีในน้ำเสีย
สังเคราะห์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [สสวท.]. (2550). ชากดักด่างบรรพ์,
[ออนไลน์], <http://www.ipst.ac.th/science/index.shtml>.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2000). เอกสารประกอบการสอนวิชา 410 214 Material Testing, สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน กลุ่มวิศวกรรมและความปลอดภัย. (2546). เพอร์ไลต์, [ออนไลน์],
<http://www.dpim.go.th/ppr/title.php?tid=000001074149948>.
- อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2545). ปอซโซลาน. [ออนไลน์], กรมวิทยาศาสตร์บริการ ศูนย์ความรู้
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, [http://www.dss.go.th/dssweb/starticles/files/pep_11_2545_pozzalan .pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/starticles/files/pep_11_2545_pozzalan.pdf).
- อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ. (2549). การศึกษาสารจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอย และดินขาวเผา,
วิทยานิพนธ์ศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อุษา อันทอง และคณะ. (2549). การศึกษาการใช้ประโยชน์ของซีโพลต์ในการลดของเสียในฟาร์ม
เลี้ยงสัตว์ และการนำซีโพลต์ที่ผ่านการใช้ในการลดของเสียไปใช้เป็นปุ๋ยในการปลูกพืช,
มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- American Society for Testing and Materials (2007). ASTM C 29/C 29M: **Standard Test Method
for Unit Weight of Aggregate**. Annual Book of ASTM Standard Vol.04.01.
- American Society for Testing and Materials (2008). ASTM C 33: **Standard Test Method for
Specification for Concrete Aggregate**. Annual Book of ASTM Standard Vol.04.01.
- American Society for Testing and Materials (2002). ASTM C 109/C 109M-02: **Standard Test
Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar**. Annual Book of
ASTM Standard Vol.04.02.

- American Society for Testing and Materials (2007). ASTM C 128:**Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate**. Annual Book of ASTM Standard Vol.04.01.
- American Society for Testing and Materials (2006). ASTM C 136-06:**Standard Test Method for Sieve Analysis of fine and coarse Aggregate**. Annual Book of ASTM Standard Vol.04.06.
- American Society for Testing and Materials (2009). ASTM C 138/C 138M:**Standard Test Method for Unit Weight of Mortars**. Annual Book of ASTM Standard Vol.04.01.
- American Society for Testing and Materials (2008). ASTM C 191-08:**Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicate Needle**. Annual Book of ASTM Standard Vol.04.08.
- American Society for Testing and Materials (2007). ASTM C 204-07:**Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus**. Annual Book of ASTM Standard Vol.04.01.
- American Society for Testing and Materials (2008). 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 Vol.04.08a.
- American Society for Testing and Materials (2007). ASTM C 1437-07:**Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar**. Annual Book of ASTM Standard Vol.04.08a.
- Aydin, A.C., and Gul, R. (2006). **Influence of Volcanic Originated Natural Materials as Additives on The Setting Time and Some Mechanical Properties of Concrete**. Construction and Building Materials. Vol.21. pp.1277-1281.
- Bakharev, T. (2006). **Thermal behavior of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing**. Cement and Concrete Research. Vol.36(6). pp.1134-1147.
- Castaldi, P., Santona, L., Enzo, S., and Melis, P. (2008). **Sorption processes and XRD analysis of a natural zeolite exchanged with Pb^{2+} , Cd^{2+} and Zn^{2+} cations**. Journal of Hazardous Materials. Vol.156. pp.428-434.
- Chaipanich, A., and Nochaiya, T. (2010). **Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes**. J Therm Anal Calorim. Vol.99. pp.487-493.

- Chaisena, A. et al. (2004). **Effect of thermal and acid treatments on some physico-chemical properties of Lampang diatomite**. Journal Science Technology. Vol.11. pp.289-299.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri T. (2005). **Effect of fly ash finness on compressive strength and pore size of blended cement paste**. Cement&Concrete Cposites. Vol.27. pp.425-428
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivatnanon, V. (2007). **Workability and strength of coarse fly ash geopolymer**. Cement&Concrete Cposites. Vol.29. pp.224-229.
- Davidovits, J. (1999). **Chemistry of Geopolymer Systems Terminology in Geopolymer'99**. International Conference, France. pp.9-40.
- Demirboga, R., and Gul, R. (2003). **Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures**. Energy and Buildings. Vol.35. pp.1155-1159.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. (2004). **On the development of fly ash based geopolymer concrete**. ACI Master J. Vol.101(6). pp.467-472
- Hardjito, D., and Rangan, B.V. (2005). **Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete**. Research Report GC 1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Hardjito, D., Chua Chung Cheak., and Carrie Ho Lee Ing. (2008). **Strength and setting times of low calcium fly ash based geopolymer mortar**. Modern Applied Science. Vol.2(4). pp.3-11.
- Hu Mingyu et al. (2007). **Alkali-activated fly ash based geopolymer with zeolite or bentonite as additive**. Cement & concrete composites. Vol.31. pp.762-768.
- Jaarsveld, J.G.S.van., Deventer, J.S.J.van., and Lukey G.C. (2002). **The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymer**. Chemical Engineering Journal. Vol.89. pp.63-73.
- Lertkositpong, T., Pimraksa, K., and Chindaprasirt, P. (2009). **Synthesis of lightweight geopolymer materials from diatomaceous earth**. Annual Concrete Conference 5, Nakhonratchasima. pp.96-101 (In Thai).
- McCaffrey, R. (2002). **Global Cement and Lime Magazine**. Environmental Special Issue. pp.15-19.

- Nguyen Van Chanh et al. (2008). **Geopolymer concrete**. The 3rd ACF International Conference –ACF/VCA 2008. pp.235-241.
- Pekmezci, B.Y., and Akyz, S. (2004). **Optimum Usage of A Natural Pozzolan for The Maximum Compressive Strength of Concrete**. Cement and Concrete Research. Vol.34. pp.2175-2179.
- Rattanasak, U., and Chindapasirt, P. (2009). **Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer**. Minerals Engineering. Vol.22. pp.1073-1078.
- Sarker, P.K. (2009). **Analysis of geopolymer concrete column**. Materials and Structures. Vol.42. pp.715-724.
- Sathonsaowaphak, A., Chindapasirt, P., and Primraksa, K. (2009). **Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar**. Journal of Hazardous Materials. Vol.168(1). pp.44-50.
- Songpiriyakij, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C., and Chindapasirt, P. (2010). **Compressive strength and degree of reaction of bio-mass and fly ash based geopolymer**. Construction and Building Materials. Vol.24. pp.236-240.
- Swanepoel, J.C., and Strydom, C.A. (2002). **Utilisation of fly ash in a geopolymeric material**. Department of Chemistry, University of Pretoria, Pretoria, South Africa Applied Geochemistry 17. pp.1143-1148.
- Temuujin, J., Van Riessen, A., Williams, R. (2009). **Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes**. Construction and Building Materials. Vol.24. pp.2084-2090.
- Villa, C., Pecina, E.T., Torres, R., and Gomez, L. (2010). **Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite**. Journal of Hazardous Materials. Vol.167. pp.82-88.
- Wongkeo, W., and 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. Vol.527. pp.3676-3684.

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the center of the page. It features a stylized figure of a person standing on a platform, with a large 'S' and 'R' on either side, all within a circular emblem. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของไดอะตอมไมต์

Description	Results		
	Test No.1	Test No.2	Test No.3
Initial flask reading, ml	0.80	1.00	0.80
Initial kerosene temperature, °C	28.00	28.00	28.00
Initial weight of sample & pan, g	147.13	145.21	147.00
Final flask reading, ml	21.30	22.20	22.20
Final kerosene temperature, °C	28.00	28.00	28.00
Final weight of sample & pan, g	98.84	96.23	97.73
Weight of sample used, (W_c) g	48.29	48.98	49.27
Volume displaced, (V_c) ml	20.50	21.20	21.40
Density of water at temperature, (R) g/cm ³	0.9963	0.9963	0.9963
Specific gravity, $S_G = W_c / (V_c * R)$	2.364	2.319	2.311
Average specific gravity	2.33		

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์

Description	Results		
	Test No.1	Test No.2	Test No.3
Initial flask reading, ml	0.40	0.80	0.60
Initial kerosene temperature, °C	22.00	22.00	22.00
Initial weight of sample & pan, g	140.00	140.00	140.00
Final flask reading, ml	23.00	23.10	23.30
Final kerosene temperature, °C	22.00	22.00	22.00
Final weight of sample & pan, g	86.45	86.13	86.16
Weight of sample used, (W_c) g	53.55	53.87	53.84
Volume displaced, (V_c) ml	22.60	22.30	22.70
Density of water at temperature, (R) g/cm ³	0.9978	0.9978	0.9978
Specific gravity, $S_G = W_c / (V_c * R)$	2.375	2.421	2.377
Average specific gravity	2.39		

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของซีโอดีธรรมชาติ

Description	Results		
	Test No.1	Test No.2	Test No.3
Initial flask reading, ml	0.70	0.35	0.50
Initial kerosene temperature, °C	25.00	25.00	25.00
Initial weight of sample & pan, g	200.00	200.00	200.00
Final flask reading, ml	22.20	22.30	22.10
Final kerosene temperature, °C	25.00	25.00	25.00
Final weight of sample & pan, g	150.40	150.50	151.50
Weight of sample used, (W_c) g	49.60	49.50	48.50
Volume displaced, (V_c) ml	21.50	21.95	21.60
Density of water at temperature, (R) g/cm ³	0.9965	0.9965	0.9965
Specific gravity, $S_G = W_c / (V_c * R)$	2.315	2.263	2.253
Average specific gravity	2.28		

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

Description	Results		
	Test No.1	Test No.2	Test No.3
Initial flask reading, ml	0.50	0.50	0.40
Initial kerosene temperature, °C	25.00	25.00	25.00
Initial weight of sample & pan, g	200.00	200.00	200.00
Final flask reading, ml	21.20	21.00	22.30
Final kerosene temperature, °C	25.00	25.00	25.00
Final weight of sample & pan, g	150.20	150.60	147.50
Weight of sample used, (W_c) g	49.80	49.40	52.50
Volume displaced, (V_c) ml	20.70	20.50	21.90
Density of water at temperature, (R) g/cm ³	0.9965	0.9965	0.9965
Specific gravity, $S_G = W_c / (V_c * R)$	2.414	2.418	2.406
Average specific gravity	2.41		

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของทราย

Description	Results		
	Test No.1	Test No.2	Test No.3
Weight of sand (saturat) (B), g	502.50	500.00	501.15
Weight of flask + sand + water (C), g	973.19	971.43	970.95
Weight of bowl, g	337.19	337.19	337.20
Weight of bowl + dry sand, g	829.59	827.23	828.32
weight of dry sand (A), g	492.40	490.04	491.12
Weight of flask + water (D), g	663.25	663.44	662.68
Bulk specific gravity, $A/(B+D-C)$	2.557	2.552	2.546
Bulk specific gravity (SSD), $B/(B+D-C)$	2.610	2.604	2.598
Apparent specific gravity, $A/(D+A-C)$	2.699	2.692	2.686
Percent absorption (%), $(B-A)*100/A$	2.051	2.032	2.042
Average bulk specific gravity	2.55		
Average bulk specific gravity (SSD)	2.60		
Average apparent specific gravity	2.69		
Average absorption (%)	2.04		

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของไคอะตอมไมด์

Description	Results		
	Test No.1	Test No.2	Test No.3
Weight of measuring cylinder, T (kg)	2.78	2.78	2.78
Weight of cylinder and water, (kg)	5.48	5.49	5.48
Weight of water, (kg)	2.70	2.72	2.70
High of measuring cylinder, (m)	0.15	0.15	0.15
Diameter of measuring cylinder, (m)	0.15	0.15	0.15
Volume of measuring cylinder, V (m ³)	0.00265	0.00265	0.00265
Volume of water, W (m ³)	1,018.59	1,025.38	1,018.59
Weight of cylinder + sample, G (kg)	4.12	4.06	4.06
Weight of sample alone, (kg)	1.34	1.28	1.28
Unit weight of sample, M=(G-T)/V (kg/m ³)	505.52	482.89	482.89
Average unit weight of sample, (kg/ m ³)	490.43		

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของเพอร์ไลต์

Description	Results		
	Test No.1	Test No.2	Test No.3
Weight of measuring cylinder, T (kg)	2.78	2.78	2.78
Weight of cylinder and water, (kg)	5.48	5.49	5.48
Weight of water, (kg)	2.70	2.72	2.70
High of measuring cylinder, (m)	0.15	0.15	0.15
Diameter of measuring cylinder, (m)	0.15	0.15	0.15
Volume of measuring cylinder, V (m ³)	0.00265	0.00265	0.00265
Volume of water, W (m ³)	1,018.59	1,025.38	1,018.59
Weight of cylinder + sample, G (kg)	4.95	4.97	4.94
Weight of sample alone, (kg)	2.17	2.19	2.16
Unit weight of sample, M=(G-T)/V (kg/m ³)	818.65	826.19	814.87
Average unit weight of sample, (kg/ m ³)	819.90		

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของซีโพลีไธร์ธรรมชาติ

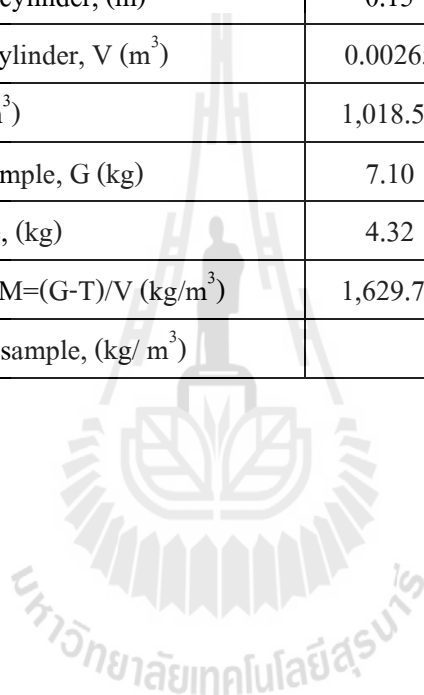
Description	Results		
	Test No.1	Test No.2	Test No.3
Weight of measuring cylinder, T (kg)	2.78	2.78	2.78
Weight of cylinder and water, (kg)	5.48	5.49	5.48
Weight of water, (kg)	2.70	2.72	2.70
High of measuring cylinder, (m)	0.15	0.15	0.15
Diameter of measuring cylinder, (m)	0.15	0.15	0.15
Volume of measuring cylinder, V (m ³)	0.00265	0.00265	0.00265
Volume of water, W (m ³)	1,018.59	1,025.38	1,018.59
Weight of cylinder + sample, G (kg)	3.95	3.94	3.95
Weight of sample alone, (kg)	1.17	1.16	1.17
Unit weight of sample, M=(G-T)/V (kg/m ³)	441.39	437.62	441.39
Average unit weight of sample, (kg/ m ³)	440.13		

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของเถ้าลอย

Description	Results		
	Test No.1	Test No.2	Test No.3
Weight of measuring cylinder, T (kg)	2.78	2.78	2.78
Weight of cylinder and water, (kg)	5.48	5.49	5.48
Weight of water, (kg)	2.70	2.70	2.70
High of measuring cylinder, (m)	0.15	0.15	0.15
Diameter of measuring cylinder, (m)	0.15	0.15	0.15
Volume of measuring cylinder, V (m ³)	0.00265	0.00265	0.00265
Volume of water, W (m ³)	1,018.59	1,018.59	1,018.59
Weight of cylinder + sample, G (kg)	5.36	5.35	5.37
Weight of sample alone, (kg)	2.58	2.57	2.59
Unit weight of sample, M=(G-T)/V (kg/m ³)	973.32	969.55	977.09
Average unit weight of sample, (kg/ m ³)	973.32		

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของทราย

Description	Results		
	Test No.1	Test No.2	Test No.3
Weight of measuring cylinder, T (kg)	2.78	2.78	2.78
Weight of cylinder and water, (kg)	5.48	5.48	5.48
Weight of water, (kg)	2.70	2.70	2.70
High of measuring cylinder, (m)	0.15	0.15	0.15
Diameter of measuring cylinder, (m)	0.15	0.15	0.15
Volume of measuring cylinder, V (m ³)	0.00265	0.00265	0.00265
Volume of water, W (m ³)	1,018.59	1,018.59	1,018.59
Weight of cylinder + sample, G (kg)	7.10	7.06	7.10
Weight of sample alone, (kg)	4.32	4.28	4.32
Unit weight of sample, $M=(G-T)/V$ (kg/m ³)	1,629.75	1,614.66	1,629.75
Average unit weight of sample, (kg/ m ³)	1,624.72		





ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Symbol	Setting times (min)	
	Initial	Final
FA100	25	47
FADE60	115	132
FADE80	183	217
FADE100	270	349
FAPL60	55	93
FAPL80	65	112
FAPL100	105	158
FANZ60	142	169
FANZ80	178	213
FANZ100	357	449

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

Symbol	Flow (%)				
	Na ₂ SiO ₃ /NaOH ratios				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
FA100	0	5	35	60	67
FADE60	28	51	61	35	29
FADE80	98	94	86	71	65
FADE100	83	75	72	62	59
FAPL60	5	8	42	53	51
FAPL80	29	42	57	58	56
FAPL100	41	47	59	70	65
FANZ60	21	43	46	52	38
FANZ80	28	47	46	60	47
FANZ100	86	80	69	64	60

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

Symbol	Flow (%)			
	Liquid alkaline/binder ratios			
	0.40	0.50	0.60	0.70
FA100	2	35	53	85
FADE60	4	61	82	109
FADE80	9	86	108	117
FADE100	16	72	96	126
FAPL60	18	42	80	99
FAPL80	34	57	89	101
FAPL100	48	59	81	108
FANZ60	8	46	73	97
FANZ80	9	58	84	105
FANZ100	22	83	96	113



ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
อัตราส่วนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

Symbol	Flow (%)			
	NaOH concentration (Molar)			
	5	10	15	20
FA100	84	48	35	0
FADE60	89	76	61	13
FADE80	126	105	86	25
FADE100	115	89	72	36
FAPL60	104	81	42	12
FAPL80	110	87	51	20
FAPL100	125	92	57	22
FANZ60	87	59	46	27
FANZ80	95	79	58	33
FANZ100	114	90	86	38



ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบค่าการไหลแห้งของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
อัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน

Symbol	Flow (%)					
	Addition water/binder ratios					
	0	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15
FA100	35	45	43	35	22	10
FADE60	61	62	72	97	112	128
FADE80	86	94	110	117	123	135
FADE100	72	80	96	111	114	134
FAPL60	42	71	97	105	120	128
FAPL80	57	78	107	112	125	136
FAPL100	59	84	112	133	141	148
FANZ60	46	67	85	126	142	146
FANZ80	58	70	86	107	129	135
FANZ100	86	91	102	104	117	131

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

Symbol	Unit weight (kg/m ³)				
	Na ₂ SiO ₃ /NaOH ratios				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
FA100	2,232	2,244	2,270	2,264	2,256
FADE60	2,173	2,227	2,234	2,238	2,237
FADE80	2,088	2,198	2,163	2,172	2,172
FADE100	2,108	2,105	2,115	2,120	2,127
FAPL60	2,210	2,241	2,261	2,258	2,245
FAPL80	2,171	2,225	2,243	2,202	2,209
FAPL100	2,152	2,167	2,195	2,179	2,177
FANZ60	2,128	2,178	2,118	2,067	2,076
FANZ80	2,070	2,074	2,081	2,056	2,013
FANZ100	2,030	2,059	2,022	2,003	1,963



ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

Symbol	Unit weight (kg/m ³)			
	Liquid alkaline/binder ratios			
	0.40	0.50	0.60	0.70
FA100	2,283	2,270	2,267	2,175
FADE60	2,269	2,234	2,150	2,144
FADE80	2,183	2,163	2,104	2,038
FADE100	2,107	2,115	2,015	1,994
FAPL60	2,291	2,261	2,228	2,194
FAPL80	2,269	2,243	2,200	2,178
FAPL100	2,211	2,195	2,201	2,171
FANZ60	2,235	2,118	2,134	2,153
FANZ80	2,112	2,081	2,044	2,065
FANZ100	1,945	2,022	2,011	2,015

ตารางที่ ข.8 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

Symbol	Unit weight (kg/m ³)		
	Curing temperature (°C)		
	60	75	90
FA100	2,300	2,270	2,266
FADE60	2,239	2,234	2,232
FADE80	2,237	2,163	2,099
FADE100	2,126	2,115	2,097
FAPL60	2,268	2,261	2,247
FAPL80	2,261	2,243	2,240
FAPL100	2,222	2,195	2,192
FANZ60	2,186	2,118	2,131
FANZ80	2,077	2,081	2,133
FANZ100	2,073	2,022	2,071



ตารางที่ ข.9 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

Symbol	Unit weight (kg/m ³)			
	NaOH concentration (Molar)			
	5	10	15	20
FA100	2,186	2,202	2,270	2,351
FADE60	2,098	2,127	2,234	2,265
FADE80	2,020	2,107	2,163	2,239
FADE100	1,934	2,099	2,115	2,166
FAPL60	2,191	2,193	2,261	2,290
FAPL80	2,163	2,185	2,243	2,290
FAPL100	2,158	2,176	2,195	2,236
FANZ60	2,134	2,192	2,118	2,238
FANZ80	2,061	2,134	2,081	2,149
FANZ100	1,924	1,949	2,022	2,137

ตารางที่ ข.10 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
อัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน

Symbol	Unit weight (kg/m ³)					
	Addition water/binder ratios					
	0	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15
FA100	2,270	2,246	2,236	2,205	2,196	2,130
FADE60	2,234	2,161	2,177	2,146	2,083	2,043
FADE80	2,163	2,097	2,095	2,085	2,050	2,019
FADE100	2,115	2,080	2,062	2,052	2,036	2,036
FAPL60	2,261	2,251	2,233	2,181	2,160	2,117
FAPL80	2,243	2,239	2,230	2,182	2,167	2,102
FAPL100	2,195	2,231	2,184	2,180	2,154	2,095
FANZ60	2,118	2,231	2,134	2,058	2,096	2,099
FANZ80	2,081	2,124	2,032	1,987	2,020	1,996
FANZ100	2,022	1,991	1,946	1,915	1,978	1,941



ตารางที่ ข.11 ผลการทดสอบค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
ระยะเวลาการบ่ม

Symbol	Unit weight (kg/m ³)		
	Curing time (days)		
	7	14	28
FA100	2,270	2,243	2,238
FADE60	2,234	2,174	2,180
FADE80	2,163	2,141	2,139
FADE100	2,115	2,104	2,098
FAPL60	2,261	2,245	2,241
FAPL80	2,243	2,239	2,251
FAPL100	2,195	2,222	2,233
FANZ60	2,118	2,098	2,095
FANZ80	2,081	2,034	1,999
FANZ100	2,022	1,995	1,978



ตารางที่ ข.12 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

Symbol	Compressive strength (ksc)				
	Na ₂ SiO ₃ /NaOH ratios				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
FA100	522	768	810	939	755
FADE60	252	265	424	468	474
FADE80	102	180	299	353	358
FADE100	15	92	223	240	281
FAPL60	194	295	513	589	605
FAPL80	185	232	325	362	404
FAPL100	64	92	108	98	113
FANZ60	254	440	577	632	456
FANZ80	145	246	240	343	282
FANZ100	61	48	45	97	86

ตารางที่ ข.13 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

Symbol	Compressive strength (ksc)			
	Liquid alkaline/binder ratios			
	0.40	0.50	0.60	0.70
FA100	801	810	655	435
FADE60	419	424	284	220
FADE80	243	299	166	109
FADE100	235	223	84	22
FAPL60	524	513	353	262
FAPL80	327	325	281	206
FAPL100	103	108	95	103
FANZ60	414	577	520	408
FANZ80	285	240	245	229
FANZ100	47	45	34	23



ตารางที่ ข.14 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

Symbol	Compressive strength (ksc)		
	Curing temperature (°C)		
	60	75	90
FA100	705	810	841
FADE60	301	424	357
FADE80	269	299	283
FADE100	199	223	215
FAPL60	326	513	430
FAPL80	233	325	258
FAPL100	80	108	219
FANZ60	349	577	417
FANZ80	200	240	234
FANZ100	23	45	67



ตารางที่ ข.15 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

Symbol	Compressive strength (ksc)			
	NaOH concentration (Molar)			
	5	10	15	20
FA100	515	677	810	709
FADE60	267	342	424	340
FADE80	232	244	299	263
FADE100	145	198	223	222
FAPL60	396	432	513	430
FAPL80	227	286	325	200
FAPL100	47	85	108	99
FANZ60	292	504	577	643
FANZ80	168	222	240	331
FANZ100	43	47	45	51



ตารางที่ ข.16 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
อัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน

Symbol	Compressive strength (ksc)					
	Addition water/binder ratios					
	0	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15
FA100	810	742	664	555	419	339
FADE60	424	294	337	296	215	202
FADE80	299	240	198	188	171	146
FADE100	223	184	154	131	129	94
FAPL60	513	403	420	360	306	287
FAPL80	325	253	227	224	219	181
FAPL100	108	102	77	72	71	69
FANZ60	577	445	396	391	349	261
FANZ80	240	213	195	142	135	122
FANZ100	45	26	36	27	15	19



ตารางที่ ข.17 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตาม
ระยะเวลาการบ่ม

Symbol	Compressive strength (ksc)		
	Curing time (days)		
	7	14	28
FA100	810	834	811
FADE60	424	427	474
FADE80	299	322	404
FADE100	223	236	289
FAPL60	513	534	551
FAPL80	325	340	352
FAPL100	108	114	140
FANZ60	577	588	604
FANZ80	240	233	264
FANZ100	45	61	92



ตารางที่ ข.18 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากการแปรผันตามระยะเวลาการบ่ม
ที่อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 ความเข้มข้น
โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ และอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75°C

Symbol	Modulus of Elasticity (ksc)		
	Curing time (days)		
	7	14	28
FA100	276,000	290,000	304,000
FADE60	111,000	131,000	143,000
FADE80	63,000	67,000	79,000
FADE100	26,000	32,000	33,000
FAPL60	200,000	211,000	214,000
FAPL80	88,000	93,000	108,000
FAPL100	39,000	52,000	56,000
FANZ60	207,000	217,000	227,000
FANZ80	68,000	69,000	74,000
FANZ100	17,000	17,000	19,000



ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

ชนากร ภูเงินขำ, ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, และศักดิ์สิทธิ์ พันทวิ. (2553). การศึกษากำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากซีโอไลท์ธรรมชาติ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, MAT.119-124.

ชนากร ภูเงินขำ, และชีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2554). ความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมท์. วิศวกรรมสาร มข. (มหาวิทยาลัยขอนแก่น), ฉบับที่ 38(1), หน้า 11-26.

ชนากร ภูเงินขำ, และชีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2554). การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากเถ้าลอยผสมซีโอไลท์ธรรมชาติ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี), ฉบับที่ 34(1). (ตอบรับแล้ว ตีพิมพ์ ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2554)



การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากซีโอไลต์ธรรมชาติ

A study of compressive strength of geopolymer mortar from natural zeolite

ธนกร ภูจินขำ (Tanakorn Phoo-ngernkham)¹ธีรวัฒน์ สินศิริ (Theerawat Sinsiri)²ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (Saksith Pantawee)³¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (tp_civil@hotmail.com)²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (sinsiri@g.sut.ac.th)³อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (sacred13@hotmail.com)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากซีโอไลต์ธรรมชาติ โดยใช้การแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเนื้อล่อร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก โดยการศึกษาใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวแทนทำปฏิกิริยา ทำการแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสาน เท่ากับ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.70 อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5, 10, 15 และ 20 โมลาร์ ทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ และทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.50 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้กำลังอัดสูงสุด และผลการทดสอบยังพบอีกว่าการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเนื้อล่อร้อยละ 60 มีความเหมาะสมทั้งการให้กำลังรับแรงอัดและการไหลแผ่เหมาะแก่การนำไปใช้งาน

ABSTRACT : In this research, a study of compressive strength of geopolymer mortar used the natural zeolite to replaced fly ash at 0, 60, 80 and 100% by weight. Sodium silicate and sodium hydroxide were used as liquid alkaline for the mixture and heat curing was used to activate the geopolymerization. This study was the concentration of sodium hydroxide as 5, 10, 15 and 20 molar and various factors which influence to 7 day compressive strength. Varied the sodium silicate to sodium hydroxide ratio, the liquid alkaline to binder and the curing temperature in oven.

The results revealed at the sodium silicate to sodium hydroxide ratio of 1.5 with the concentration of sodium hydroxide solution at 15 molar, curing temperature in oven at 90°C for 24 hours provided the highest compressive strength. The results also showed that the replaced at 60% by weight provided the good trend in compressive strength and flow of geopolymer mortar suitable for implementation.

KEYWORDS : Geopolymer, Geopolymerization, Natural zeolite, Fly ash, Compressive strength

1. บทนำ

จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) [1] เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจในการพัฒนาขึ้นมาเพื่อเป็นทางเลือกใหม่สำหรับทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ [2] อาจเนื่องจากในสภาวะปัจจุบันวัสดุเคมีที่ใช้อยู่มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบที่ใช้ผลิต อีกทั้งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิต ตลอดจนโครงสร้างที่ต้องการให้มีลักษณะพิเศษ อาจมีความจำเป็นที่ต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น โดยการใช้วัสดุที่เหลือใช้หรือวัสดุตามธรรมชาติมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

สารจีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) เป็นวัสดุใหม่ที่ได้มีความพยายามที่จะพัฒนาสารซีเมนต์ชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบซิลิกา (silica, SiO_2) และสารอลูมินา (alumina, Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ สารจีโอโพลิเมอร์จะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา และอลูมินาให้เป็นโมเลกุลถูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้สารซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการรับแรงได้ ดังนั้นสารจีโอโพลิเมอร์จึงสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สำหรับสารปอซโซลานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) แต่ [3,4] ขณะเดียวกันยังมีวัสดุปอซโซลานอีกหลายชนิดที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับเถ้าลอย (fly ash) อาทิเช่นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ เช่น ซีโอไลท์ ไคอะคอมไมท์ เพอร์ไลท์ เป็นต้น

ซีโอไลท์ (zeolite) จัดเป็นสารประกอบออลูมิโนซิลิเกตหรือสารออลูมิโนฟอสเฟตซ้อนกันเป็นโครงข่าย 3 มิติ แบบรูปทรง 4 หน้า ซีโอไลท์อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือเกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี นอกจากนี้ยังมีความพรุนสูง (micro porous molecules) มีโพรงภายในโครงสร้างที่มีรูปแบบแน่นอน ขนาดประมาณ 3-30Å ภายในโพรงจะเต็มไปด้วยไอออนบวกและโมเลกุลของน้ำ ซึ่งโมเลกุลทั้งสองชนิดสามารถเคลื่อนย้ายได้ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ ดังนั้นจึงอาจจะถือได้ว่าซีโอไลท์ที่มีคุณสมบัติคล้าย

วัสดุปอซโซลาน มีอนุภาคขนาดเล็กและมีรูพรุนสูงจึงน่าจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาถึงความสามารถของการรับกำลังอัดและการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เมื่อใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติเป็นวัสดุตั้งต้น

3. การเตรียมวัสดุและการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ซีโอไลท์ธรรมชาติ (NZ) โดยนำมาบดจนได้ความละเอียดที่มีอนุภาคของวัสดุข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่า 35%

เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งประกอบด้วย $\text{Na}_2\text{O} = 15.32\%$, $\text{SiO}_2 = 32.87\%$ และน้ำ = 51.81% โดยน้ำหนัก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย

3.2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติแทนที่เถ้าลอย ร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก

อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 1.50

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.50, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสาน เท่ากับ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.70

อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส

เวลาในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 โมลาร์

ทดสอบค่าการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (ASTM C230)

ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุ 7 วัน (ASTM C109)

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

Mix ID.*	Mix Proportion (g.)		
	Binder	Na ₂ SiO ₃	NaOH
M-NZ-0.5	400	66.67	133.33
M-NZ-1.0	400	100.00	100.00
M-NZ-1.5	400	120.00	80.00
M-NZ-2.0	400	133.33	66.67
M-NZ-2.5	400	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 4.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

Chemicals	NZ (%)	FA (%)
SiO ₂	75.32	34.10
Al ₂ O ₃	10.28	20.56
Fe ₂ O ₃	2.66	15.34
CaO	3.95	17.08
MgO	1.20	2.77
LOI	1.41	0.32

จากตารางที่ 4.1 พบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติมีองค์ประกอบทางเคมี SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃= 88.26% จัดเป็นปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001) ซึ่งกำหนดให้สารประกอบหลักต้องมีค่ามากกว่า 70% และเช่นเดียวกันกับเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบทางเคมี SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃=70%

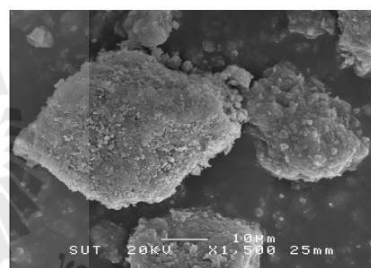
สัดส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาของซีโอไลต์ธรรมชาติเท่ากับ 7.33 และสัดส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาของเถ้าลอยเท่ากับ 1.66 จากงานวิจัยผลกระทบของสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้า

แกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน [5] พบว่าสัดส่วนของซิลิกาต่ออลูมินามีผลต่อกำลังรับแรงอัดของวัสดุ ซึ่งสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาที่สูงจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

Physical properties	NZ	FA	Sand
Specific gravity	2.28	2.41	2.69
Bulk density (kg/m ³)	440	973	1,625
Median Particle Size (µm)	5.50	17.60	-

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนาแน่นของซีโอไลต์ธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 2.28 และ 440 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยและทรายแล้วจะมีค่าความถ่วงจำเพาะลดลงประมาณ 5% และ 20% ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นลดลงประมาณ 27% และ 73% ตามลำดับ

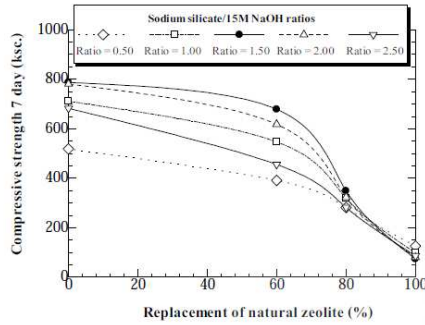


รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ธรรมชาติ

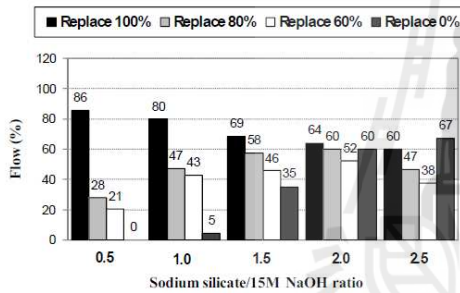


รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย

4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.3 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เนื่องจากผลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เปลี่ยนแปลง

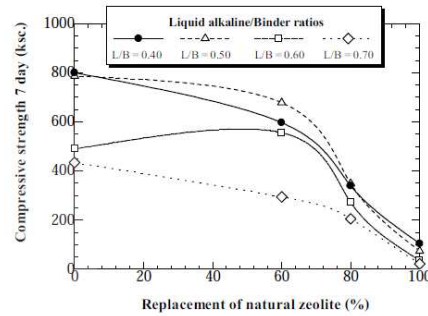


รูปที่ 4.4 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เนื่องจากผลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เปลี่ยนแปลง

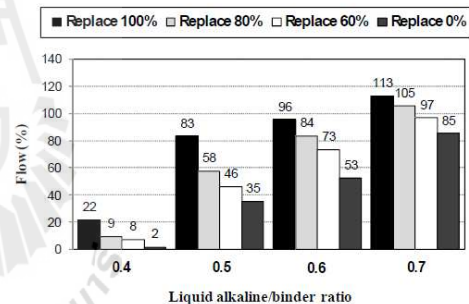
จากการทดลองที่แปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าค่ากำลังอัดและความสามารถในการทำงานนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของโซเดียมซิลิเกตและปริมาณการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติ เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมจะได้ว่าที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.0-2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80, 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 319-678 ksc. และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 43-64% แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 678 ksc. และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 46%

ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5 การผสมค่อนข้างจะผสมยากส่งผลให้ได้ค่าการไหลแผ่ที่น้อย อีกทั้งการอัดมอร์ตาร์ลงแบบนั้นยากส่งผลให้ได้กำลังน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ

4.3 ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.5 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เนื่องจากผลของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.6 ค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เนื่องจากผลของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ที่เปลี่ยนแปลง

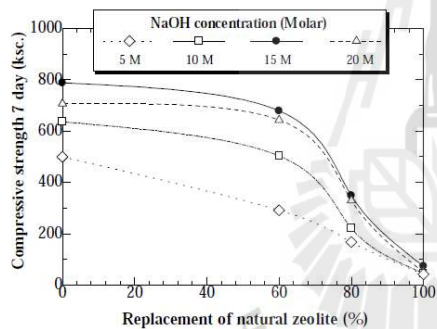
จากการทดลองที่แปรผันตามอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่ของซีโอไลต์ธรรมชาติจะส่งผลต่อค่ากำลังอัดและความสามารถในการทำงาน กล่าวคือความสามารถในการทำงานเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น แต่จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยลง เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังรับแรงอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมจะได้ว่าที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50-0.60 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ

80, 60 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 272-678 ksc. และค่าการไหลแผ่น 46-84% แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 678 ksc. และค่าการไหลแผ่น เท่ากับ 46%

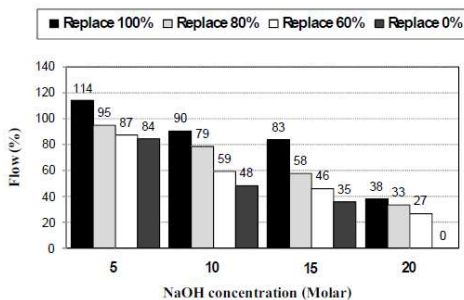
ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.40 ส่วนผสมมีความแข็งแรงมาก ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่นมีค่าน้อยมาก อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง

ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.70 ส่วนผสมมีความเหลวมาก ส่งผลให้ได้ค่าการไหลแผ่นที่สูง แต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและงบประมาณ อัตราส่วนนี้จะไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

4.4 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.7 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ธรรมดาเนื่องจากผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลง



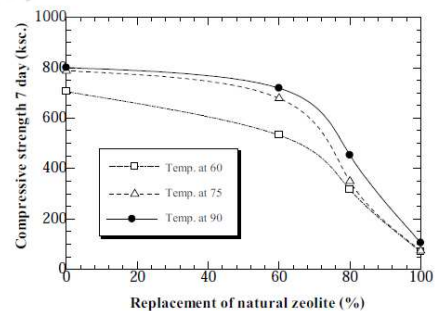
รูปที่ 4.8 ค่าการไหลแผ่นของจีโอโพลิเมอร์ธรรมดาเนื่องจากผลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เปลี่ยนแปลง

จากการทดลองที่แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และปริมาณการแทนที่ของซีโอไลท์ธรรมชาติจะส่งผลต่อกำลังอัดและความสามารถในการทำงาน กล่าวคือค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นแต่ความสามารถในการทำงานจะลดลง เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่นที่เหมาะสมจะได้ว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 10-15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80, 60 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 222-678 ksc. และค่าการไหลแผ่น 46-79% แต่ภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 678 ksc. และค่าการไหลแผ่นเท่ากับ 46%

ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 5 โมลาร์ มีค่าการไหลแผ่นสูงแต่ได้ค่ากำลังอัดที่น้อยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่นๆ

ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 โมลาร์ ค่าการไหลแผ่นพอทำงานได้ แต่เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วส่งผลให้ค่าการไหลแผ่นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่นๆ อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง

4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.9 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ธรรมดาเนื่องจากผลของอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลง

จากการทดลองที่แปรผันอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาที่สูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดที่แปรผันตามอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา และค่าการไหลแก่ที่เหมาะสมของอัตราส่วนที่ใช้ จะได้ว่าที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80, 60 มีความเหมาะสม ซึ่งมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 316-718 ksc. ซึ่งภาวะที่ดีที่สุดของอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา คือ 90 องศาเซลเซียส ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้ค่ากำลังอัด เท่ากับ 718 ksc.

เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมพบว่าอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาที่ 75 และ 90 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 75 ถึง 90 องศาเซลเซียส

5. สรุปผลการทดลอง

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1.50 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเหลวต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 800.82 ksc. ที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 0

แต่เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งาน จะเห็นว่าที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 0 (ใช้ถ้ำลอย 100 %) มีค่าการไหลแก่ที่น้อยและระยะเวลาการก่อตัวที่ค่อนข้างเร็วทำให้การนำไปใช้งานค่อนข้างยาก ดังนั้นปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีความเหมาะสมที่สุดทั้งด้านกำลังอัดและค่าการไหลแก่ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน

6. ข้อเสนอแนะ

การใช้ซิลิโกลิโธรมชาติเป็นวัสดุตั้งต้นในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์นั้น นอกจากจะช่วยเพิ่มความสามารถทำงานของจีโอโพลิเมอร์ให้ดีขึ้นแล้ว อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากการใช้ถ้ำลอยในส่วนผสมเพียง

อย่างเดียวนั้นมีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็ว (พิจารณาจากคุณสมบัติของวัสดุ)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานควรศึกษาถึงเรื่องของระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ที่เร็วจากซิลิโกลิโธรมชาติเพิ่มเติม อีกทั้งผลจากการเพิ่มน้ำหรือสารลดน้ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานให้ดีขึ้น เพื่อเป็นการพัฒนาทั้งด้านกำลังอัดและความสามารถในการทำงาน ทำให้เกิดความเชื่อมั่นในการนำไปใช้งานต่อไปในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย และผู้เกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้ทุกท่าน

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Davidovits, J., 1982. Mineral polymers and methods of making them. United states Patent no.4349386. page.6
- [2] Davidovits, J., 1994. Properties of geopolymers cements. Proceedings of the first international conference on alkaline cements and concrete., Kiev state Technical University., Vol 1 : page.131-149
- [3] Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV., 2004. On the development of fly ash based geopolymer concrete. ACI Master J; 101(6) : page.467-472
- [4] ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549. สารจีโอโพลิเมอร์ วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช่ปูนซีเมนต์. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ประเทศไทย
- [5] เขียวศักดิ์ กลับประสิทธิ์ และคณะ, 2550. ผลกระทบของสัดส่วนซิลิกาต่ออุณหภูมิของกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากถ้ำแคลบ-เปลือกไม้ผสมถ้ำถ่านหิน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี 2550 ครั้งที่ 3 ณ โรงแรมลองบีชการ์เด้นไฮเทล แอนด์ สปา รีสอร์ท พัทยา จังหวัดชลบุรี : หน้า MAT 24-29

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) เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจในการพัฒนาขึ้นมาเพื่อเป็นทางเลือกใหม่สำหรับทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ (Davidovits J., 1994) อาจเนื่องจากในสภาวะปัจจุบันวัสดุเดิมที่ใช้อยู่มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบที่ใช้ผลิต อีกทั้งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิต ตลอดจนโครงสร้างที่ต้องการให้มีลักษณะพิเศษ อาจมีความจำเป็นที่ต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น โดยการนำวัสดุที่เหลือใช้หรือวัสดุตามธรรมชาติมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

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

ไดอะตอม (diatom) เป็นพืชเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก มีผนังเป็นฝาซิลิกาประกบกัน บางชนิดสามารถว่ายน้ำได้ บางชนิดอาศัยกระแสพัดพาไป มีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 2,000 micron พบในแหล่งน้ำทั่วโลกทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม เมื่อไดอะตอมตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกเป็นตะกอนสะสมกันจำนวนมากตามพื้นทะเลหรือพื้นทะเลสาบ แล้วในที่สุดกลายเป็นไดอะตอมไมท์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ดินเบา (diatomaceous earth) เพราะมี

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

ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในงานจีโอโพลิเมอร์นั้น มีระยะเวลาก่อตัวที่รวดเร็ว ส่งผลให้ความสามารถทำงานได้น้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นที่การปรับปรุงคุณสมบัติของความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ อีกทั้งกำลังอัดที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานได้ โดยจากลักษณะของไดอะตอมไมท์ที่มีน้ำหนักเบา ความพรุนสูง มีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้า จึงน่าที่จะปรับปรุงคุณสมบัติตรงประเด็นนี้ได้ดี อีกทั้งสามารถช่วยลดหน่วงน้ำหนักได้

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงความสามารถทำงานได้และการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เมื่อใช้ไดอะตอมไมท์เป็นวัสดุตั้งต้น โดยวิเคราะห์ในเชิงกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ไดอะตอมไมท์ (DE) จากอำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดลพบุรี โดยนำมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้ธาตุหลักของไดอะตอมไมท์มีการแตกตัวที่ดีขึ้น (Lertkositpong 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 โดอะตอมไมท์แทนที่ในแก้วลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ระยะเวลาทิ้งให้ตัวอย่างก่อตัวก่อนการเร่งปฏิกิริยาตัวอย่างเท่ากับ 1 ชั่วโมง และเวลาการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 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 : แปรผันตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 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 โดยใช้แบบอาคริลิค ขนาด 50x50x50 mm. หล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของซีโพลิเมอร์มอร์ตาร์

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

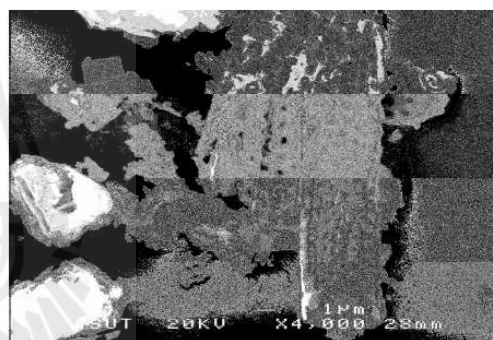
จากตารางที่ 2 พบว่าไดอะตอมไมท์มีองค์ประกอบทางเคมี SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃=87.80% จัดเป็นปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001) ซึ่งกำหนดให้สารประกอบหลักต้องมีค่ามากกว่า 70% และเช่นเดียวกันกับเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบทางเคมี SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃=81.01% เป็นปอซโซลาน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001)

สัดส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาของไดอะตอมไมท์เท่ากับ 5.93 และสัดส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาของเถ้าลอยเท่ากับ 1.67 จากงานวิจัยผลกระทบของสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาต่อกำลังอัดของซีโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบเปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน (เรียวศักดิ์ และคณะ, 2008) พบว่าสัดส่วนของซิลิกาต่ออลูมินามีผลต่อกำลังอัดของวัสดุ ดังนั้นโดยสมมุติฐานเบื้องต้นของงานวิจัยนี้สัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาของไดอะตอมไมท์ที่สูงอาจจะส่งผลต่อกำลังอัด

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

16

ธนากร ภูเงินข้า และ ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ

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	

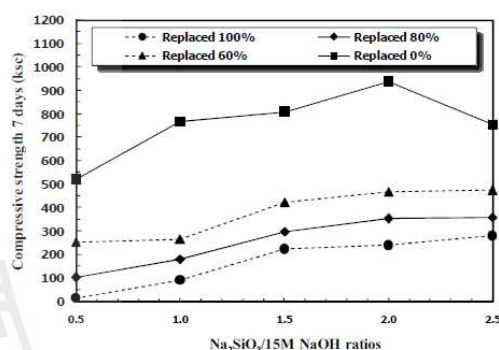
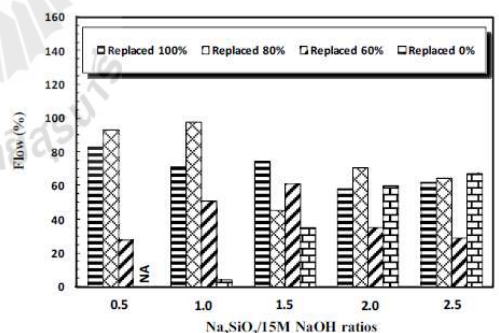
ตารางที่ 9 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน

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 $Na_2SiO_3/NaOH$ ใช้ความความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 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 $Na_2SiO_3/NaOH$ ต่อการไหลแม่

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

ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5 และ 1.0 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีค่าการไหลแม่ที่ดี แต่ค่ากำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดพบว่าการผสมค่อนข้างยากส่งผลให้ค่าการไหลแม่ที่น้อย อีกทั้งการหลอมหรือตำรลงแบบยากส่งผลให้ได้กำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ

ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีค่าการไหลแม่พอทำงานได้เนื่องจากปริมาณของ Na_2SiO_3 ที่มากขึ้นทำให้ส่วนผสมมีความเหนียวมากขึ้น แต่ค่ากำลังอัดดีขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของ Na_2SiO_3 ที่มากขึ้นด้วย ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีค่าการไหลแม่ที่ดี แต่กำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 อย่างไรก็ตามการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีการแข็งตัวที่เร็ว เมื่อพิจารณาจากกระบวนการผสม

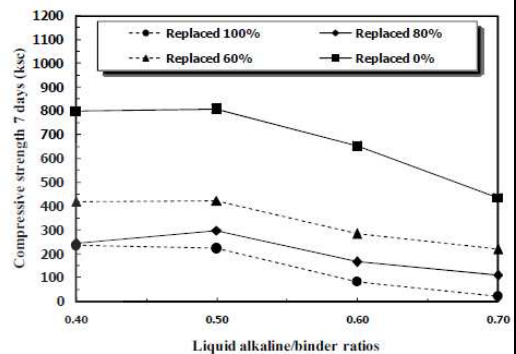
4.3 ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder

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)

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

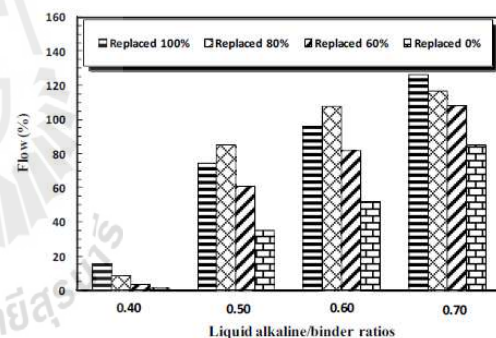
ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ส่วนผสมค่อนข้างแห้งมากส่งผลให้ค่าการไหลแม่มีค่าน้อยมาก อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง

ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 ส่วนผสมมีความเหลวมากส่งผลให้ค่าการไหลแม่ที่สูง แต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและงบประมาณ อัตราส่วนนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน



รูปที่ 5 ผลกระทบของอัตราส่วน

Liquid alkaline/binder ต่อกำลังอัด



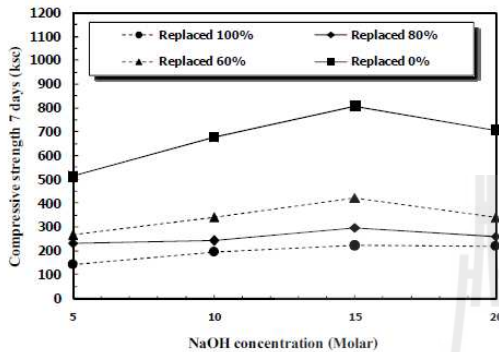
รูปที่ 6 ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder

ต่อการไหลแม่

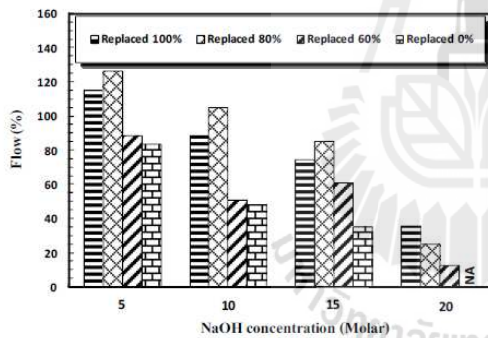
4.4 ผลกระทบของความเข้มข้น NaOH

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) อีกทั้งความเข้มข้นที่น้อยจะมีปริมาณของน้ำในส่วนผสมมากส่งผลให้ความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นแต่กำลังอัดลดลง ในทำนองเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่สูงในงานคอนกรีตทั่วไป

ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 โมลาร์ การแทนที่ด้วยโคอะตอมไมท์ทั้งหมดจะมีค่าการไหลแผ่พอทำงานได้ แต่ค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดการผสมค่อนข้างยากเนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงส่งผลให้มีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วส่งผลให้ค่าการไหลแผ่น้อยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่นๆ อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง

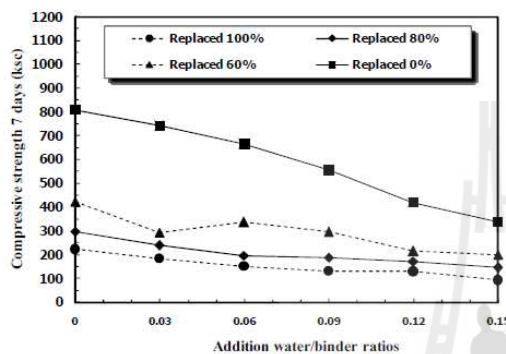
4.5 ผลกระทบของอัตราส่วน addition water/binder

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

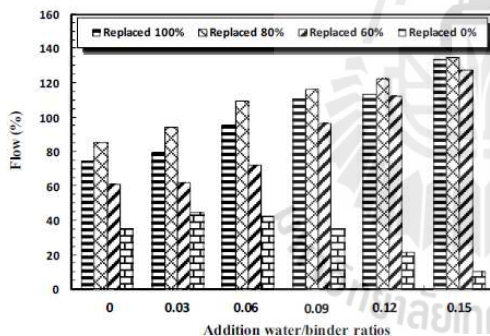
เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมพบว่าที่อัตราส่วนของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3-6% ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 197-337 กก/ซม² และค่าการไหลแผ่ 62-110%

ที่อัตราส่วนของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 9-15% การแทนที่ด้วยโคอะตอมไมท์ทั้งหมดมีค่าการไหลที่สูง แต่ค่ากำลังอัดลดลง แต่ยังคงลดลงในสัดส่วนที่น้อย เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มน้ำในส่วนผสมของการ

แทนที่ไดอะตอมไมท์ทั้งหมดดูเหมือนไม่ค่อยจำเป็นนัก เนื่องจากการแทนที่ไดอะตอมไมท์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานอยู่แล้ว นอกจากนี้จะเป็นอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่น้อยๆ อาจจะมีผลดีต่อทั้งค่าการไหลแผ่และกำลังอัด



รูปที่ 9 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อกำลังอัด

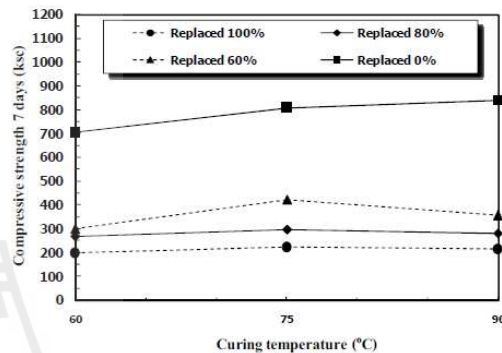


รูปที่ 10 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อการไหลแผ่

ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่เพิ่มขึ้นที่การเพิ่มปริมาณน้ำเท่ากับ 3% แต่หลังจากนั้นค่าการไหลลดลงเรื่อยๆ อีกทั้งค่ากำลังอัดลดลงด้วย อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่งระหว่างน้ำกับไซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ส่วนผสมมีการแข็งตัวที่เร็วขึ้น แต่ค่ากำลังอัดลดลงเนื่องจากการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเหมือนกับการปรับความเข้มข้นของไซเดียมไฮดรอกไซด์ให้น้อยลง ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำที่มากขึ้นในส่วนผสม

4.6 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

การทดสอบที่แปรผันอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย (Chindaprasit 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 และประมวล, 2007)



รูปที่ 11 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาต่อกำลังอัด

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

ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ

ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส การแทนที่ไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีลักษณะการบวมตัวของตัวอย่างเกิดขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการแทนที่ไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีระยะเวลาการแข็งตัวที่ช้า ประกอบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่สูงทำให้สูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วจึงเกิดการบวมตัวของส่วนการแทนที่เถ้าลอยทั้งหมดไม่เกิดการบวมตัวของ

ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 12 เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยทั้งหมดมีระยะเวลาการแข็งตัวที่เร็ว ด้วยสาเหตุนี้ตัวอย่างจึงแข็งตัวก่อนที่นำไปเร่งปฏิกิริยาในตู้อบ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความชื้นน้อยกว่าการแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมด



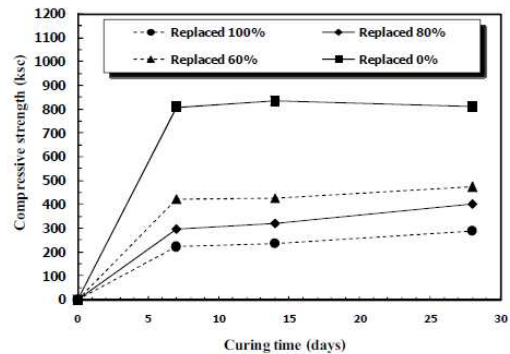
รูปที่ 12 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาต่อซีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์

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

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

4.7 ผลกระทบของเวลาการบ่มตัวอย่าง

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

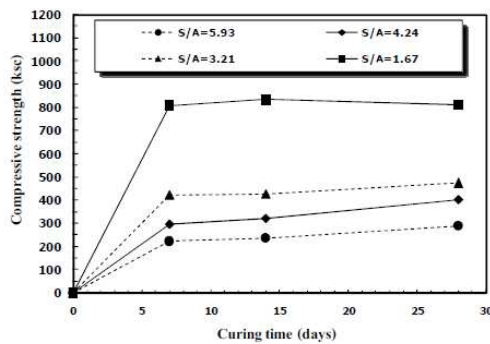


รูปที่ 13 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่มต่อกำลังอัด

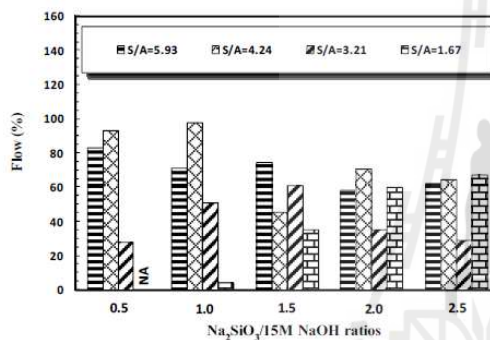
โดยสมมติฐานเบื้องต้นอาจเนื่องจากการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงทำให้มีการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็ว แต่อาจมีสารละลายบางส่วนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ทำให้ลักษณะโครงสร้างมีความพรุน อีกทั้งความหนาแน่นของโครงสร้างไม่ได้แตกต่างที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มีลักษณะของขนาดโพรงขนาดเล็กลง ส่งผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้มีค่ากำลังที่เพิ่มขึ้น (Chindaprasirt P. et al., 2005)

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

การพัฒนา กำลังอัดของซีไอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 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 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อการไหลแม่

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

นอกจากนั้นม้งงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 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 และมีจำนวนโพรงที่มากขึ้น จึงส่งผลให้กำลังอัดน้อยลง 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 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

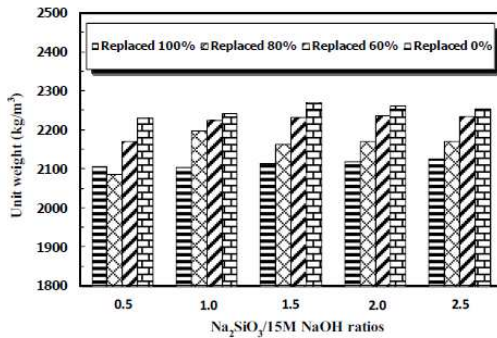
รูปที่ 15 แสดงถึงค่าการไหลแม่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่ช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ดีขึ้น แต่กำลังอัดลดลง ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

4.9 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

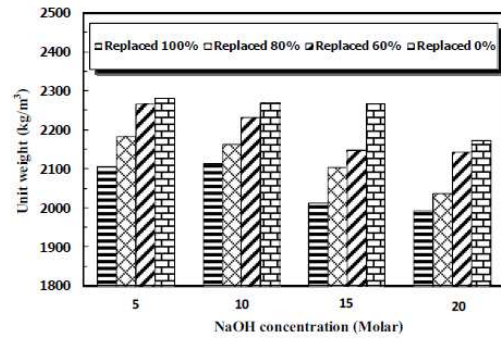
ค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แปรผันตามผลกระทบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 16-20 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อแทนที่ไดอะตอมไมทในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เทียบกับการแทนที่ด้วยแก้วลอยทั้งหมด นอกจากนั้นยังพบอีกว่าปริมาณของเหลวที่มากขึ้นในส่วนผสมทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักลดลงได้ อีกทั้งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

ความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมโคอะตอมไมท์

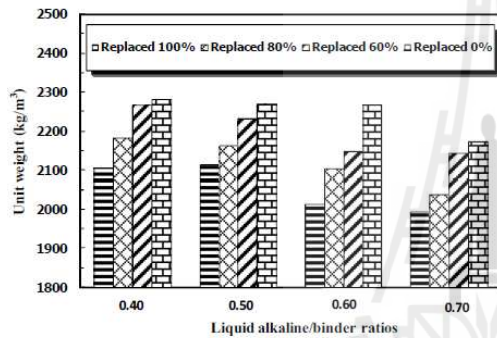
23



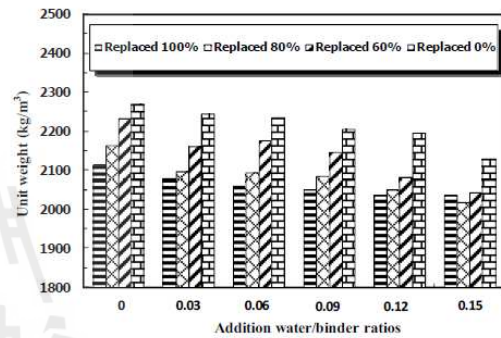
รูปที่ 16 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากผลกระทบบของอัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$



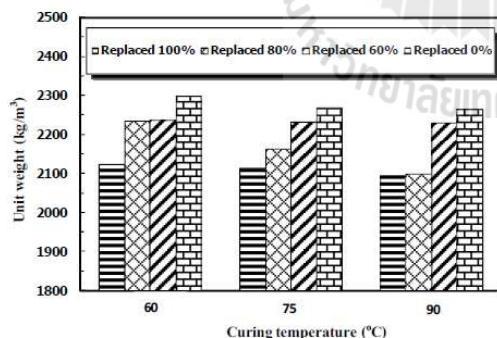
รูปที่ 19 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากผลกระทบบของความเข้มข้น NaOH



รูปที่ 17 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากผลกระทบบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder



รูปที่ 20 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากผลกระทบบของอัตราส่วน Addition water/binder



รูปที่ 18 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากผลกระทบบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

5 สรุปผลการทดสอบ

5.1 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยโคอะตอมไมท์ทั้งหมดมีแนวโน้มต้องการปริมาณสารละลายไซเดียมซิลิเกตมากกว่าสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์

5.2 การแทนที่โคอะตอมไมท์ในเถ้าลอยร้อยละ 60 และ 80 อัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$ เท่ากับ 1.5-2.5 Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นไซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 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 และอัตราส่วน Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50-0.60 มีความเหมาะสมที่สุดทั้งค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ของ จีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยมีค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ระหว่าง 284-423 กก/ซม² และ 61-108% ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50

5.5 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์มีแนวโน้มที่ ต้องการระยะเวลาการบ่มมากขึ้น เพื่อให้มีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นเนื่องจากมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้ากว่าถ้าลอย และกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาการบ่มมากขึ้น

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

6 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ สนับสนุนทุนงานวิจัยครั้งนี้ 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 และกำลังอัดของจีโพลิเมอร์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6. อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. MAT 111-118

ธนากร ภูเงินชำ ชีร์วัฒน์ สิ้นศิริ และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2010). การศึกษากำลังของจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากซีโอไลท์ธรรมชาติ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6. อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. MAT 119-124

เกียรติศักดิ์ กลับประสิทธิ์ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ปริญญาจินดาประเสริฐ และสมิตร ส่งพิริยะกิจ (2008). ผลกระทบของสัดส่วนซิลิกาต่ออลูมินาต่อกำลังอัดของจีโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ผสมเถ้าถ่านหิน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3. โรงแรมทองปัทมาการ์เดนไฮเทล แอนด์ สปาร์ อำเภอพญา จังหวัดชลบุรี. MAT 24-29

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และณรงค์ศักดิ์ มากุล (2004). สมรรถนะของแร่ดินเบาในปูนฉาบฉนวนกันความร้อนมวลเบา. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2. จังหวัดอุดรธานี. MAT 23-32.

ปริญญา จินดาประเสริฐ (2004). สารจีโพลิเมอร์ วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ประเทศไทย

ประมวล โสมละคร และปริญญา จินดาประเสริฐ. (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



การศึกษาคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอย ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ

ธนากร ภูเงินขำ^{1*} และ ชีรวัฒน์ สินศิริ²
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ โดยการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก การศึกษาใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เวลาในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 24 ชั่วโมง ทำการแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.70 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 โมลาร์ ทดสอบการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 7, 14, 28 และ 60 วัน

ผลการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5-2.0 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดที่สูง ซึ่งมีค่ากำลังอัดระหว่าง 240-940 กก./ซม.² และค่ากำลังอัดมีแนวโน้มที่จะพัฒนาเร็วในช่วงแรกของการบ่ม แต่ช่วงปลายจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนักหรือไม่มีเลย อีกทั้งผลการทดสอบยังพบอีกว่าการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในถ้ำลอยร้อยละ 60 มีความเหมาะสมทั้งการให้ค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ เหมาะแก่การนำไปใช้งาน

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์ / การไหลแผ่ / ระยะเวลาการก่อตัว / กำลังอัด / ซีโอไลต์ธรรมชาติ

* Corresponding author. E-mail: tpcivil2526@gmail.com

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

A Study on Properties of Geopolymer Mortar Made from Fly Ash Incorporated Natural Zeolite

Tanakorn Phoo-ngernkham^{1*} and Theerawat Sinsiri²

Suranaree University of Technology, Maung, Nakhonratchasima, Thailand 30000

Abstract

This article presented properties of geopolymer mortar using fly ash and natural zeolite as a binder. The fly ash was replaced by natural zeolite at the rate 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, namely, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 by weight whereas the liquid/binder ratios of 0.40, 0.50, 0.60, and 0.70 by weight were used. In addition, the NaOH concentrations of 5M, 10M, 15M, and 20M were also used as variables. Each mixture was separated and cured in the oven at the temperature of 75°C for 24 h. Flowability and setting times of all fresh geopolymer mortars were investigated. Additionally, the compressive strength was tested at the ages of 7, 14, 28, and 60 days.

The results revealed that the mixture having $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ of 1.5-2.0, 15M of NaOH concentration and 75°C of curing temperature, showed a compressive strength ranged between 240-940 ksc which high enough for using as normal and high strength concretes. Additionally, the compressive strength of geopolymer mortar obviously increased at early age. However, at the later age, it slightly increased or did not increase at all for some mixtures. Furthermore, the replacement of natural zeolite at the rate of 60% by weight were well-suited for both compressive strength and workability.

Keywords : Geopolymer / Flow test / Setting times / Compressive strength / Natural zeolite

* Corresponding author. E-mail: tpcivil2526@gmail.com

¹ Graduate Student, School of Civil Engineering, Institute of Engineering.

² Assistant Professor, School of Civil Engineering, Institute of Engineering.

1. บทนำ

จีโอพอลิเมอร์ [1] เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจในการพัฒนาขึ้นมาเพื่อเป็นทางเลือกใหม่สำหรับทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ [2] อาจเนื่องจากในสภาวะปัจจุบันวัสดุเดิมที่ใช้อยู่มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบที่ใช้ผลิต อีกทั้งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิต ตลอดจนโครงสร้างที่ต้องการให้มีลักษณะพิเศษ อาจมีความจำเป็นที่ต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น โดยการใช้วัสดุที่เลือกใช้หรือวัสดุตามธรรมชาติมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จีโอพอลิเมอร์ (geopolymer) เป็นการพัฒนาสารซีเมนต์ชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบซิลิกา (silica, SiO₂) และอะลูมินา (alumina, Al₂O₃) เป็นองค์ประกอบ [3] จีโอพอลิเมอร์ใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินาให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ กระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงแล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้สารซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการรับแรงได้ ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จึงสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สำหรับวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้เป็นวัสดุตั้งต้นได้แก่ เถ้าลอย [4-5] แต่ขณะเดียวกันนอกเหนือจากเถ้าลอยยังมีวัสดุปอซโซลานอีกหลายชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์ โดอะตอมไมต์ เพอร์ไลท์ เป็นต้น ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นหลักเช่นเดียวกัน

ซีโอไลต์ซึ่งจัดเป็นสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตหรือสารอลูมิโนฟอสเฟตต่อกันเป็นโครงข่าย 3 มิติ แบบรูปทรง 4 หน้า ซีโอไลต์อาจจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือเกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมีนอกจากนี้ยังมีความพรุนสูง (micro porous molecules) มีโพรงภายในโครงสร้างที่มีรูปแบบแน่นอน ขนาดประมาณ 3-30 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10⁻¹⁰ ม.) ภายในโพรงจะเต็มไปด้วยไอออนบวกและโมเลกุลของน้ำ ซึ่งโมเลกุลทั้งสองชนิดสามารถเคลื่อนย้ายได้ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน

บวกได้ดี [6-7]

ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในงานจีโอพอลิเมอร์มีระยะเวลาก่อตัวที่รวดเร็วส่งผลให้ความสามารถทำงานได้น้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นศึกษาถึงคุณสมบัติความสามารถทำงานได้ของจีโอพอลิเมอร์ อีกทั้งกำลังอัดพอเหมาะแก่การนำไปใช้งานได้ โดยจากลักษณะของซีโอไลต์ธรรมชาติที่มีน้ำหนักเบา ความพรุนสูงมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้าจึงน่าที่จะปรับปรุงคุณสมบัติตรงประเด็นนี้ได้ อีกทั้งสามารถช่วยลดหน่วงน้ำหนักลงได้

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงความสามารถทำงานได้ ระยะเวลาการก่อตัวและการรับกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เมื่อใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นวัสดุตั้งต้น โดยวิเคราะห์ในเชิงกายภาพของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

3. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยเถ้าลอย Class F (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และซีโอไลต์ธรรมชาติ (NZ) ประเภท Clinoptilolite (Na,K,Ca)₆(Si,Al)₃₆O₇₂·2(OH₂O) จากบริษัทเอกชนในจังหวัดกรุงเทพมหานคร

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.69

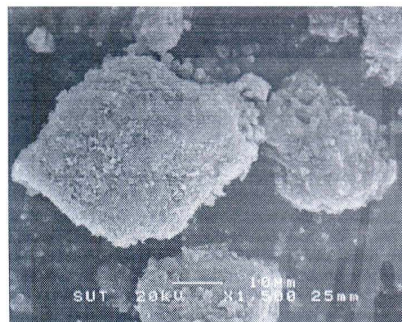
สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ซึ่งประกอบด้วย Na₂O ร้อยละ 15.32 SiO₂ ร้อยละ 32.87 และ น้ำร้อยละ 51.81 โดยน้ำหนัก และมี pH 9.05 ตรวจสอบโดยเครื่องพีเอชมิเตอร์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุประสาน

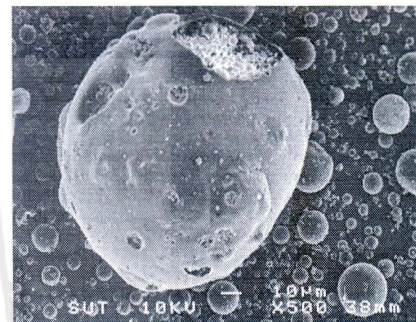
Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	LOI
FA	43.87	26.33	10.81	12.69	2.74	1.23
NZ	75.32	10.28	2.66	3.95	1.20	1.41

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Physical properties	NZ	FA	Sand
Specific gravity	2.28	2.41	2.69
Bulk density (kg/m ³)	440	973	1,625
Median particle size (μm)	16.17	17.60	-



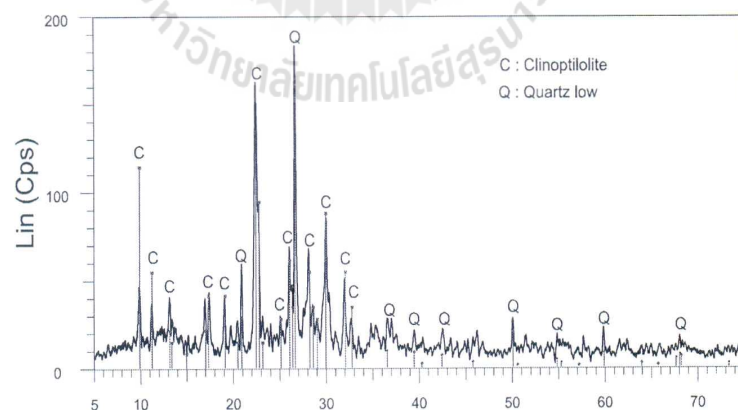
(ก) ซีโอไลต์ธรรมชาติ



(ข) ฝั่ลอย

รูปที่ 1 SEM ของซีโอไลต์ธรรมชาติและฝั่ลอย

จากตารางที่ 2 ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนาแน่นของซีโอไลต์ธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 2.28 และ 440 กก./ม.³ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับฝั่ลอยและทรายแล้วมีค่าความถ่วงจำเพาะลดลงประมาณร้อยละ 5 และร้อยละ 20 ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นลดลงประมาณร้อยละ 27 และร้อยละ 73 ตามลำดับ



รูปที่ 2 XRD ของซีโอไลต์ธรรมชาติ ประเภท Clinoptilolite

3.2 สัต์ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

สัต์ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ในฝั่ลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ระยะเวลาทิ้งให้ตัวอย่างก่อตัวก่อนการเร่งปฏิกิริยาตัวอย่าง

เท่ากับ 1 ชั่วโมง และเวลาการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 24 ชั่วโมง ทุกอัตราส่วนผสม โดยทำการแปรผันตามอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดังนี้

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

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) Series C : แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (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

4) Series D : แปรผันตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 7, 14, 28 และ 60 วัน

5) Series F : แปรผันตามอัตราส่วนของ Si/Al (S/A) เท่ากับ 1.67, 3.75, 5.12 และ 7.33 ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5 และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แปรผันตามการแทนที่ในแก้วลอย

Mix ID.	Mix Proportion (g)					
	FA	NZ	Sand	Na_2SiO_3	NaOH	S/A*
15M-FA100-1.5	400	-	600	120	80	1.67
15M-FANZ60-1.5	160	240	600	120	80	3.75
15M-FANZ80-1.5	80	320	600	120	80	5.12
15M-FANZ100-1.5	-	400	600	120	80	7.33

หมายเหตุ * คืออัตราส่วน Si/Al ของวัสดุประสาน

สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีความหมายดังนี้ 15M คือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ FA100 คือ ส่วนผสมควบคุมที่ใช้แก้วลอยทั้งหมด FANZ60, FANZ80,

FANZ100 คือการแทนที่ของซีโอไลด์ธรรมชาติในแก้วลอย ร้อยละ 60, 80, 100 ตามลำดับ และ S/A คืออัตราส่วน ของ Si/Al ของวัสดุประสาน

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Mix Proportion (g)				
	ratios	Binder	Sand	Na_2SiO_3	NaOH
0.5		400	600	66.7	133.3
1.0		400	600	100.0	100.0
1.5		400	600	120.0	80.0
2.0		400	600	133.3	66.7
2.5		400	600	142.9	57.1

3.3 วิธีผสมและการทดสอบตัวอย่าง

การผสมทำในอุณหภูมิห้องมีค่าระหว่าง 25-45 องศาเซลเซียส เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพอากาศประเทศไทย และการผสมเริ่มต้นด้วยคลุกเคล้าระหว่างวัสดุประสาน

กับทรายให้เข้ากันดี ประมาณ 1 นาที หลังจากนั้นเติม สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เสร็จ แล้วผสมอีกประมาณ 10 นาที

การทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [8]

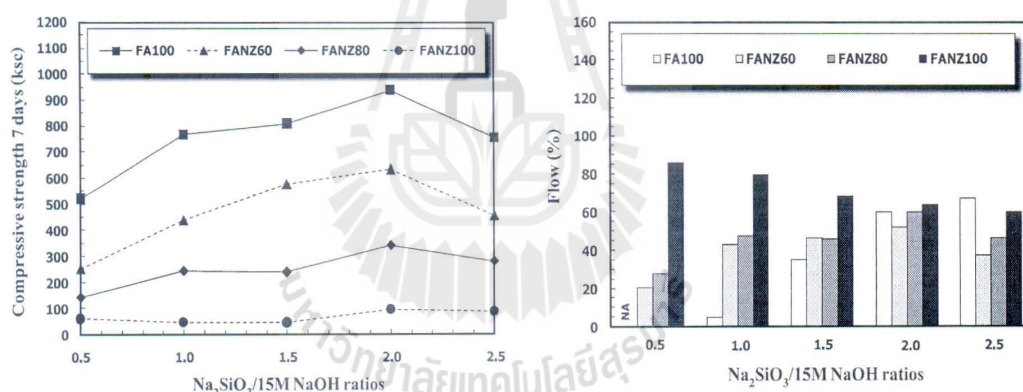
การทดสอบหาค่าระยะการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยทำการดัดแปลงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191 [9]

การทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C109 [10] ที่อายุการบ่ม เท่ากับ 7, 14, 28 และ 60 วัน โดยใช้แบบอาคริลิคขนาด 50 x 50 x 50 มม. หล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 อิทธิพลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

การทดสอบแปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$



รูปที่ 3 อิทธิพลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังอัดและการไหลแผ่

ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5 การแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่ที่ดี แต่ค่ากำลังอัดน้อย ส่วนการแทนที่ด้วยแก้วลอยทั้งหมดพบว่าการผสมค่อนข้างยากส่งผลให้มีค่าการไหลแผ่ที่น้อย อีกทั้งการหลอมมอร์ตาร์ลงแบบยากส่งผลให้ได้กำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ

ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 การแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่พอทำงานได้ เนื่องจากปริมาณของ Na_2SiO_3 ที่มากขึ้นทำให้ส่วนผสมมีความเหนียวมากขึ้น อีกทั้งค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบอัตราส่วนเท่ากับ 2.0 แต่การแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นตามปริมาณของ Na_2SiO_3

และใช้ความความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าค่ากำลังอัดและความสามารถทำงานได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของโซเดียมซิลิเกตและปริมาณการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติ กล่าวคือแนวโน้มของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัย [4,11-18]

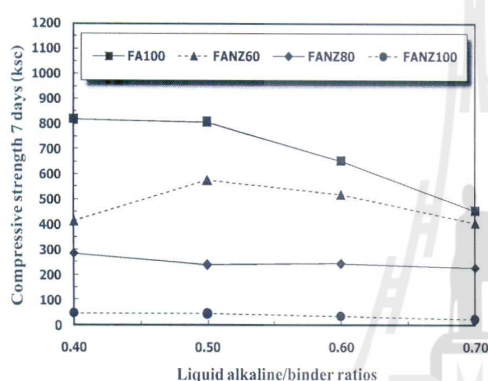
เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมพบว่าที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.0-2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60, 80 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 240-630 กก./ชม.² และค่าการไหลแผ่ เท่ากับร้อยละ 43-60 แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 630 กก./ชม.² และค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 52

ที่มากขึ้น [19] ส่วนการแทนที่ด้วยแก้วลอยทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่ที่ดี แต่กำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.0 อย่างไรก็ตาม การแทนที่ด้วยแก้วลอยทั้งหมดมีการแข็งตัวที่เร็ว เมื่อพิจารณาจากกระบวนการผสม

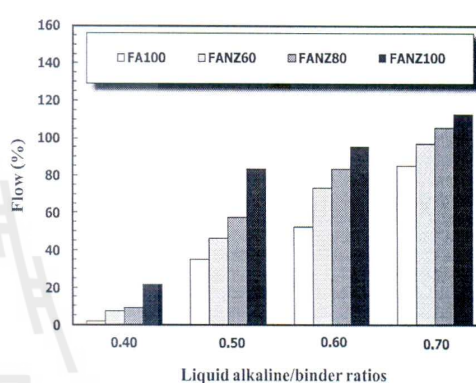
จากเหตุผลข้างต้นพอสรุปได้ว่าอิทธิพลของปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่ากำลังอัด เนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวเพิ่มปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) แก่ส่วนผสม ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ชะเอาซิลิกาและอะลูมินาออกมาจากสารตั้งต้น เพื่อให้ทำให้อัดตัวเป็นสารประกอบจีโอพอลิเมอร์ ดังนั้น โดยแนวโน้ม

ปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่น้อยทำให้ค่ากำลังอัดของซีโอพอลิเมอร์ลดลง ในทำนองเดียวกัน การเพิ่มปริมาณโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสมมากขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้น

4.2 อิทธิพลของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder การทดสอบที่แปรผันตามอัตราส่วน Liquid



alkaline/binder ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานและปริมาณ การแทนที่ของซีโอไลต์ธรรมชาติส่งผลต่อค่ากำลังอัด และความสามารถทำงานได้ กล่าวคือความสามารถ ทำงานได้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน เพิ่มขึ้นแต่ค่ากำลังอัดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัย [4,11-13,15,17]



รูปที่ 4 อิทธิพลของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ต่อกำลังอัดและการไหลแผ่

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสม พบว่าอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50-0.60 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60, 80 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 240-580 กก./ซม.² และค่าการไหลแผ่ร้อยละ 46-84 แต่ ภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 580 กก./ซม.² และค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 46

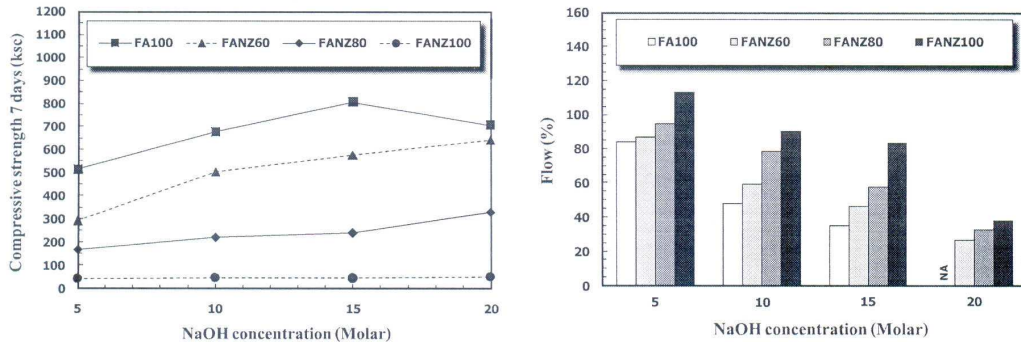
ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 การแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งหมดปริมาณของเหลว ไม่เพียงพอต่อความต้องการของส่วนผสมส่งผลให้ ส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดส่วนผสมค่อนข้าง แห้งมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่มีค่าน้อยมาก อีกทั้ง ส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง ส่วนที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 ส่วนผสมมีความเหลวมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ที่สูง

แต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและงบประมาณ อัตราส่วนนี้ ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ จากงานวิจัย [5,17] ได้มีการให้ข้อสรุปไว้ ว่าการเพิ่มขึ้นของสารละลายในส่วนผสมทำให้เกิดโพรง ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีจำนวนโพรงที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ กำลังอัดน้อยลง ในทำนองเดียวกับ W/C ของคอนกรีตทั่วไป

4.3 อิทธิพลของความเข้มข้น NaOH

การทดสอบที่แปรผันตามความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดสอบดังแสดง ในรูปที่ 5 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และปริมาณการแทนที่ของซีโอไลต์ธรรมชาติส่งผลต่อ ค่ากำลังอัดและความสามารถทำงานได้ สอดคล้องกับ งานวิจัย [4,11-15,17-18] กล่าวคือกำลังอัดมีแนวโน้ม สูงขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น แต่ความสามารถทำงานได้ลดลง



รูปที่ 5 อิทธิพลของความเข้มข้น NaOH ต่อกำลังอัดและการไหล

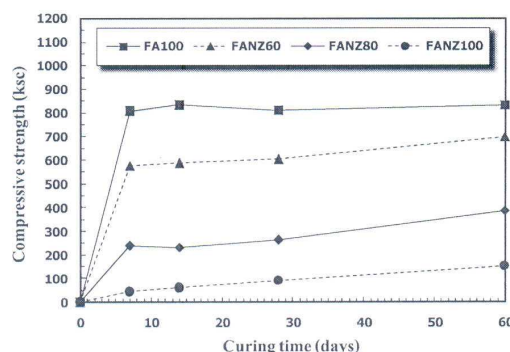
เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลที่เหมาะสมพบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10-15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60, 80 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 220-580 กก./ซม.² และค่าการไหลแปรร้อยละ 46-79 แต่ภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 580 กก./ซม.² และค่าการไหลแปรเท่ากับร้อยละ 46

ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงทำให้การทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วแต่อาจมีสารละลายบางส่วนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด และด้วยลักษณะของสารละลายที่มีความหนืดทำให้ลักษณะโครงสร้างมีความพรุน อีกทั้งความหนาแน่นของโครงสร้างไม่ได้แตกต่างจากที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่งผลให้กำลังอัดไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่ทำให้ขนาดโพรงเล็กลง ส่งผลให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น [22]

4.4 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง

การทดสอบที่แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 6 ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาการบ่มที่อายุ 7 วัน หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากหรือไม่มีเลย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [4-5,13-14,17-20] โดยสมมติฐานเบื้องต้นอาจเนื่องจากการใช้ความเข้มข้น

สำหรับการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ พบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้า [7] ช่วงแรกของระยะเวลาการบ่มอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดที่มากนัก โดยสมมติฐานที่ซีโอไลต์ธรรมชาติมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้าจำเป็นต้องการระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้น เพื่อให้มีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ขึ้น [19] ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการทดสอบถึงระยะเวลาการบ่มที่ 60 วัน ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลการทดสอบต่อไป

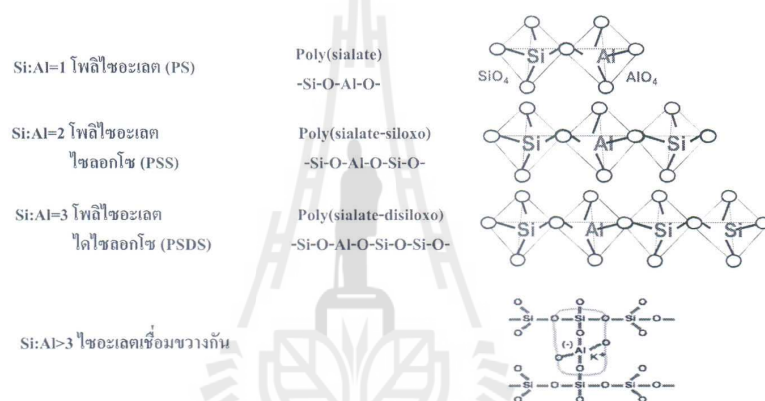


รูปที่ 6 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มต่อกำลังอัด

4.5 อิทธิพลของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

การพัฒนากำลังอัดของซีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกัน พบว่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีการเลยในช่วงอายุปลาย [23] นอกจากนี้ยังพบว่าทุกส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันมีกำลังอัดที่ต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อกำลังอัดอย่างมาก สอดคล้องกับงานวิจัย [18, 23]

อีกทั้งจากงานวิจัย [18] ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่าโครงสร้างแบบโพลีไซอะเลตซิลอกโซ (Polysialate-Siloxo; PSS) มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าโครงสร้างแบบโพลีไซอะเลตที่เป็นแบบ 2 มิติ และไซอะเลตเชื่อมขวางกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งโครงสร้างแบบโพลีไซอะเลตที่เป็นแบบ 2 มิติ และไซอะเลตเชื่อมขวางกันจะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มีการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในแก้วลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 1.67, 3.75, 5.12 และ 7.33 ตามลำดับ



รูปที่ 7 โครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซอะเลต [3]

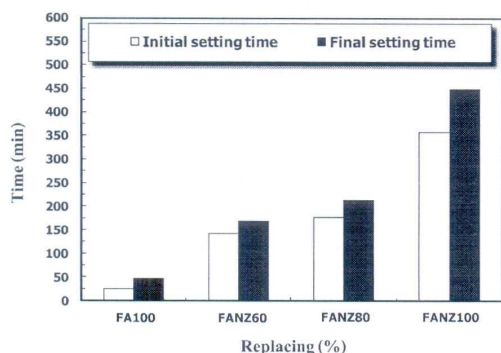
เมื่อพิจารณาจากกระบวนการผสมและผลทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ในเบื้องต้นพบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ต่ำกว่า ซึ่งแสดงถึงการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมช่วยเพิ่มสามารถทำงานได้ดีขึ้น เนื่องจากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่าการแทนที่ด้วยแก้วลอยทั้งหมด แต่มีกำลังอัดน้อยกว่า ดังนั้นการนำไปใช้งานจำเป็นต้องเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

4.6 ระยะเวลาก่อตัวของซีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

การทดสอบหาค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายมีความสำคัญอย่างมากเพื่อบ่งบอกถึงความสามารถทำงานได้ของซีโอพอลิเมอร์ นอกจากนี้การทดสอบการไหลแผ่ของซีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยทดสอบครั้งนี้ได้ทำการดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C191 [9]

ตารางที่ 5 ระยะเวลาก่อตัวของซีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

สัญลักษณ์	ระยะเวลาก่อตัว (นาที)	
	เริ่มต้น	สุดท้าย
FA100	25	47
FANZ60	142	169
FANZ80	178	213
FANZ100	357	449



รูปที่ 8 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย

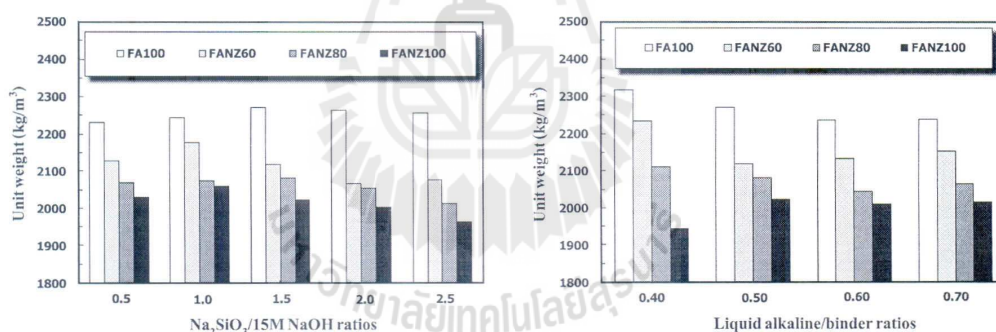
ผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 8 ซึ่งมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 25 และ 47 นาที เมื่อแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมพบว่าสามารถยืดระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายมากขึ้น ซึ่งมีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติ

ในเถ้าลอยร้อยละ 60, 80 และ 100 เท่ากับ 142, 178 และ 357 นาที ส่วนระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของการแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในเถ้าลอยร้อยละ 60, 80 และ 100 เท่ากับ 169, 213 และ 449 นาที

จากงานวิจัยของ [19] ได้ทำการศึกษา Strength and setting time of low calcium fly ash based geopolymer mortar มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 129 และ 270 นาที ซึ่งงานวิจัยนี้มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายเร็วกว่ามาก ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากการใช้แหล่งที่มาของวัสดุที่แตกต่างกัน [24]

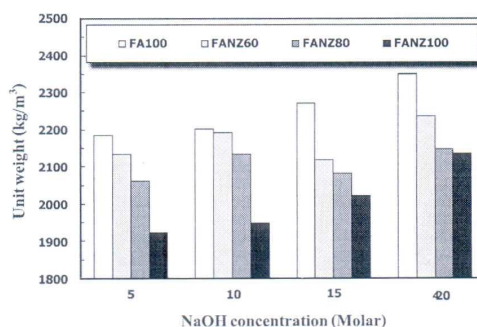
4.7 หน่วยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

ค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แปรผันตามผลกระทบต่างๆ พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อแทนที่ซีโอไลต์ธรรมชาติในส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เทียบกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 9



(ก) อิทธิพลของอัตราส่วน Na₂SiO₃/NaOH

(ข) อิทธิพลของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder



(ค) อิทธิพลของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์

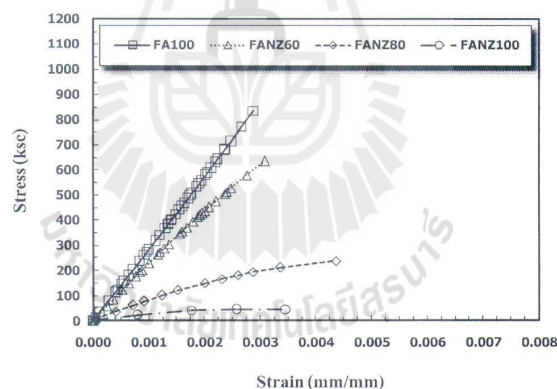
รูปที่ 9 หน่วยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากผลกระทบต่างๆ

เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการแทนที่ซีโพลีเอทิลีนในส่วผสมค่าน้ำหนักมีแนวโน้มลดลง และที่การแทนที่ซีโพลีเอทิลีนในถั่วลยร้อยละ 60 และ 80 มีกำลังอัดเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน อีกทั้งเป็นอีกหน้ทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาซีโพลีเอทิลีนมวลเวลา

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าแนวโน้มของกราฟมีความชันลดลงและความเค้นมีค่าลดลงแต่ความเครียดมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ซีโพลีเอทิลีนในถั่วลยเพิ่มมากขึ้น โดยลักษณะเส้นกราฟคล้ายพาราโบลาคล้ายกับคอนกรีตทั่วไป และพฤติกรรมการรับกำลังอัดของซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์ในช่วงเริ่มต้นมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น (linear) จนถึงจุดที่

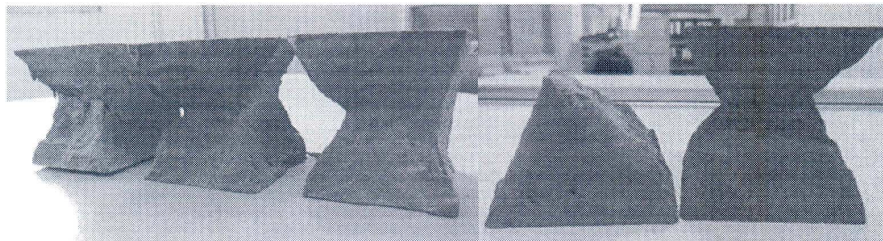
ซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์รับแรงกดอัดได้ประมาณร้อยละ 40-70 ของกำลังอัดประลัย จากนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีลักษณะที่โค้งมากขึ้นและเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆ (microcrack) อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อแรงกระทำสูงขึ้นรอยแตกร้าวจะเกิดและขยายใหญ่มากขึ้นและพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีความโค้งมากขึ้น จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ นอกจากนั้นยังพบว่า ซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์จากถั่วลยทั้งหมดในส่วนผสมซึ่งมีกำลังอัดสูง พบว่าเมื่อถึงจุดกำลังอัดประลัยกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วและเกิดการวิบัติอย่างรุนแรงและทันทีทันใดในทางตรงกันข้ามกับซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์ของการแทนที่ด้วยซีโพลีเอทิลีนในถั่วลยซึ่งมีกำลังอัดต่ำกว่าการใช้ถั่วลยทั้งหมดในส่วนผสมพบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ และมีค่าความเครียดสูง ซึ่งแสดงว่ามีความเหนียวในแนวแกน (axial ductility) ที่สูงขึ้น



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์

จากรูปที่ 11 พบว่าลักษณะการวิบัติซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์มีการวิบัติเกิดขึ้นได้ทั้งสามลักษณะคือแบบเฉือนหรือรูปกรวย แบบผ่าซีกหรือแนวตรง และแบบระเบิด ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดของซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์ และปริมาณการแทนที่ของซีโพลีเอทิลีนในถั่วลย พบว่าซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 100 ถึง 700 กก./ซม.² มีลักษณะการวิบัติแบบเฉือนหรือรูปกรวย และซีโพลีเอทิลีนมอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 700 ถึง 950

กก./ซม.² มีลักษณะการวิบัติแบบระเบิด ส่วนลักษณะการวิบัติแบบผ่าซีกหรือแนวตรงของซีโพลีเอทิลีนมอร์แตร์นั้นถือเป็นส่วนน้อยของการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด นอกจากนั้นยังพบว่าลักษณะการวิบัติของการแทนที่ด้วยซีโพลีเอทิลีนในถั่วลยมีแนวโน้มที่มีการวิบัติแบบเฉือนหรือรูปกรวย เนื่องจากมีกำลังอัดที่ต่ำและมีความเหนียวในแนวแกนมากกว่าการใช้ถั่วลยทั้งหมดในส่วนผสม ดังแสดงในความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



รูปที่ 11 ลักษณะการวิบัติของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

ในกรณีที่วัสดุเปราะต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการวิบัติโดยใช้แรงเสียดทานภายในและแรงยึดเหนี่ยว (cohesion) ระหว่างอนุภาคในวัสดุนั้น มุมที่เกิดการวิบัติจะไม่ทำมุม 45 องศา กับแนวราบตามที่สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้ Mohr's circle แต่มุมดังกล่าวจะเป็น function กับมุมของความเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคในวัสดุด้วย โดยทั่วไปแล้วค่าของมุมที่เกิดการวิบัติของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานจะอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 องศา แต่สำหรับงานวิจัยครั้งนี้เป็นจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าของมุมที่เกิดการวิบัติอยู่ในช่วง 30 ถึง 45 องศา อาจเนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นมอร์ตาร์และมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีต อีกทั้งงานวิจัยครั้งนี้ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C 109 [10] ที่ให้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 ส่งผลให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน (ASTM C 109) ทำให้รูปแบบของการวิบัติและความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่างจากการวิบัติทั่วไป อีกสาเหตุหนึ่งเนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวอย่างทดสอบเป็นทรงลูกบาศก์ซึ่งมีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับตัวอย่างทดสอบน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกทำให้การขยายตัวทางด้านข้างน้อยกว่า จึงทำให้สภาวะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเปลี่ยนไป

5. สรุปผลการทดสอบ

1) การแทนที่ไดอะตอมไมท์ในแก้วลอยร้อยละ 60 และ 80 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5-2.0 อัตราส่วน Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10-15 โมลาร์ ให้ค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน ซึ่งมีค่า

กำลังอัดและการไหลแผ่เท่ากับ 220-630 กก./ซม.² และร้อยละ 46-79 ตามลำดับ

2) อัตราส่วน Liquid alkaline/binder ที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้แต่กำลังลดลง และอัตราส่วน Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50-0.60 มีความเหมาะสมที่สุดทั้งค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยมีค่ากำลังอัดและการไหลแผ่เท่ากับ 240-580 กก./ซม.² และร้อยละ 46-84 ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50

3) การแทนที่แก้วลอยด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติช่วยยืดระยะเวลาการก่อตัวให้มากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนงานวิจัย และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องในการวิจัยครั้งนี้ทุกท่าน

7. เอกสารอ้างอิง

1. Davidovits, J., 1982, "Mineral Polymers and Methods of Making Them", *United States Patent no. 4349386*.
2. Davidovits, J., 1994, "Properties of Geopolymer Cements", *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concrete*, Kiev State Technical University, Vol. 1, pp. 131-149.
3. Davidovits, J., 1999, "Chemistry of Geopolymeric Systems", *Terminology Proceeding* :

2nd International Conference on Geopolymer, Paris, France, pp. 9-40.

4. Hardjito, D., Wallah, S.E, Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V., 2004, "On the Development of Fly Ash Based Geopolymer Concrete", *ACI Mater Journal*, Vol. 101, No. 6, pp. 467-472.

5. Bakharev, T., 2006, "Thermal Behavior of Geopolymers Prepared using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing", *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 6, pp. 1134-1147.

6. Sprynskyy, M., Buszewski, B., Terzyk, A.P., and Namiesnik, J., 2007, "Study of the Selection Mechanism of Heavy Metal Adsorption on Clinoptilolite", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 304, pp. 21-28.

7. Castaldi, P., Santona, L., Enzo, S., and Melis, P., 2008, "Sorption Processes and XRD Analysis of a Natural Zeolite Exchanged with Pb²⁺, Cd²⁺ and Zn²⁺ Cations", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 156, pp. 428-434.

8. American Society for Testing and Materials., 2007, "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar", *Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.08a, ASTM C 1437-07*.

9. American Society for Testing and Materials., 2008, "Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicate Needle", *Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.08, ASTM C 191-08*.

10. American Society for Testing and Materials., 2002, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar", *Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.02, ASTM C 109/C 109M-02*.

11. ธนากร ภูเงินขำ, วีรวัฒน์ ลินศิริ และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2553, "การศึกษากำลังอัดของซีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากซีโอไลต์ธรรมชาติ", *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี*, MAT. 119-124.

12. Hardjito, D., Wallah, S.E, Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V., 2004, "Factors Influencing the Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Concrete", *Civil Engineering Dimention*, Vol. 6, No. 2, pp. 88-93.

13. Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivatnanon, V., 2007, "Workability and Strength of Coarse Fly Ash Geopolymer", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 224-229.

14. Nguyen Van Chanh, Bui Dang Trung, and Dang Van Tuan, 2008, "Geopolymer Concrete", *The 3rd ACF International Conference ACF/ICA 2008*, pp. 235-241.

15. Daniel, L.Y.Kong, and Jay, G. Sanjayan, 2008, "Damage Behavior of Geopolymer Composites Exposed to Elevated Temperatures", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, pp. 986-991.

16. Detphan, S. and Chindaprasirt, P., 2009, "Preparation of Fly Ash and Rice Husk Ash Geopolymer", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 16, No. 6, pp. 720-726.

17. Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., and Primraksa, K., 2009, "Workability and Strength of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 168, No. 1, pp. 44-50.

18. Songpiriyakij, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt, P., 2010, "Compressive Strength and Degree of Reaction of Bio-mass and Fly Ash Based Geopolymer", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 236-240.

19. Villa, C., Pecina, E.T., Torres, R., and Gomez, L., 2010, "Geopolymer Synthesis Using Alkaline Activation of Natural Zeolite", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2084-2090.

20. Hardjito, D., Chua Chung Cheak., and Carrie Ho Lee Ing., 2008, "Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Mortar", *Modern Applied Science*, Vol. 2, No. 4, pp. 3-11.

21. Ravindra, N. and Somnath, G., 2009, "Effect of Mix Composition on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Composites", *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 4, No. 4, pp. 68-74.

22. Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T., 2005, "Effect of Fly Ash Finness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 425-428.

23. Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., and Chindapasirt, P., 2010, "Compressive Strength and, Modulus of Elastic and Water Permeability of Inorganic Polymer Concrete", *Materials and Design*, Vol. 24, pp. 236-240.

24. Jaarsveld, J.G.S.van., Deventer, J.S.J.van., and Lukey, G.C., 2002, "The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly ash and Kaolinite Based Geopolymer", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 89, pp. 63-73.



ประวัติผู้วิจัย

Name-Surname (in Thai) : ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ **(in English)** : Theerawat Sinsiri
Gender : Male **Marital status** : Married
Dated of Birth : 18 November 1969
Current Position : Assistant Professor
Office address : School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology
Nakhon Rathasrima 30000, Thailand
Tel : (044) 224-420-1 **Fax** : (044) 224-607 **E-mail address** : sinsiri@sut.ac.th

Education background

Bachelor's degree : Civil Engineering
Institute : Khon Kaen University
Year of graduation : 1992
Master's degree : Civil Engineering (Structure)
Institute : Khon Kaen University
Year of graduation : 1995
Doctor's degree : Ph.D. (Civil Engineering)
Institute : King Mongkut's University of Technology Thonburi
Year of graduation : 2005

Publications in International Journals

1. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., **Sinsiri, T.**, 2005, Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste, Cement and Concrete Composites, 27(4), 425-428.
2. **Sinsiri, T.**, Teeromit, P., Jaturapitakkul, C., Kiattikomom, K., 2206, Effect of fineness of fly ash on express of fly ash on expansion of mortars in magnesium sulfate, ScienceAsia Journal, 32(1), 63-69.

3. Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., **Sinsiri, T.**, 2007, Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste, *Construction and Building Materials* 21(7), 1534-1541.
4. **Sinsiri, T.**, Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C., 2010, Influence of Fly ash Fineness and Shape on the Porosity and Permeability of Blended Cement Pastes, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 17(6), 683-690.
5. Kroehong, W., **Sinsiri, T.**, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., 2011, Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, *Construction and Building Materials*, 25(11), 4095-4104.
6. Phoo-ngernkham, T., **Sinsiri, T.**, Sata V., Chindapasirt, P., The effect of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar, *Computer and Concretes*, Accepted for publication

Publications in International conference proceedings

1. **Sinsiri, T.**, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., 2004, Effect of fly ash on pore size and microstructure of hardened blended cement paste, The First Asian Concrete Federation (ACF) Conference, Chiang Mai, Thailand, October 18-19, 626-632.
2. **Sinsiri, T.**, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., 2006, Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash and ground river sand on porosity and permeability of blended cement paste, *Proceeding of International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer*, Khon Kaen, Thailand, May 24-25, 305-315.
3. **Sinsiri, T.**, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., 2006, Influence of fly ash fineness on calcium hydroxide in blended cement paste, *Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2006)*, Khon Kaen, Thailand, January 25-27, (In CD Rom).
4. Napia, C., **Sinsiri, T.**, Chindapasert, P., 2008, The Effect of zeolite on microstructure of blended cement paste, *Proceedings of Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-11)*, Thipei, TAIWAN, November 19-21, 1-7.
5. Pantawee, S., **Sinsiri, T.**, 2008, The Use of natural pozzolans in lightweight concrete, *Proceedings of the 3rd ACF International Conference ACF/VCA-2008 on Sustainable Concrete Technology and Structure in Local Climate and Environment Conditions*, Ho Chi Minh City, Vietnam, November 11-13, 224-230.

6. Kroehong, W., **Sinsiri, T.**, Jaturapitakkul, C., 2011, Effect of Palm Oil Fuel Ash Fineness and Pozzolanic Reaction on Microstructure of Blended Cement Paste, The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), Hong Kong Special Administrative Region, China, 24-26 January 2011 (In CD Rom).
7. Jitchaiyaphum, K., **Sinsiri, T.**, Chindaprasirt, P., 2011, Cellular Lightweight Concrete Contain with Pozzolan Materials, The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), Hong Kong Special Administrative Region, China, 24-26 January 2011 (In CD Rom).

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

1. Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasert, P., 2006, "Packing Effect and Pozzolanic Reaction of Fly Ash and Ground River Sand on Porosity and Permeability of Blended Cement Paste" Journal of Research in Engineering and Technology, Vol. 3, No. 2, April-June , Kasetsart University, pp. 107-119.
2. Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasert, P., 2004, "Effect of Fly Ash on Pore Size and Microstructure of Hardened Blended Cement Paste" The First Asian Concrete Federation (ACF) Conference, October 18-19, Chiang-Mai, pp. 626-632.
3. ชีร์วัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547, "ผลกระทบของความละเอียดเม็ดผ่านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในเพสต์", วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 15, ฉบับที่ 4, หน้า 1-8.
4. ชีร์วัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548, "ผลกระทบของความละเอียดเม็ดผ่านหินต่อกำลังอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงในซีเมนต์เพสต์", วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม, หน้า 17-28.
5. ธนากร ภูเงินขำ และชีร์วัฒน์ สิ้นศิริ. (2554). ความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมท์. วิศวกรรมสาร มข. (มหาวิทยาลัยขอนแก่น), ฉบับที่ 38(1), หน้า 11-26.
6. ธนากร ภูเงินขำ และชีร์วัฒน์ สิ้นศิริ. (2554). การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลท์ธรรมชาติ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี), ฉบับที่ 34(1), มกราคม-มีนาคม 2554, หน้า 31-44.

ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติ

1. ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, วิเชียร ชาลี, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2546, “ผลกระทบของความละเอียดต่ำลดยต่อกำลังอัดและโครงสร้างโพรงในเพสต์”, การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1, 14-16 พฤษภาคม, กาญจนบุรี, หน้า 225-232.
2. ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547, “ผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อปริมาตรโพรงและปฏิกิริยาปอซโซลานในเพสต์”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, 19-21 พฤษภาคม, เพชรบุรี, หน้า MAT149-MAT 154.
3. ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547, “โครงสร้างขนาดเล็กของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าถ่านหิน”, การนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการงานคอนกรีต ครั้งที่ 1, 26 เมษายน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 71-78.
4. ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547, “ผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของเพสต์”, การนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในการงานคอนกรีต ครั้งที่ 2, 28 เมษายน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 64-82.
5. ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548, “ผลกระทบของขนาดอนุภาคและรูปร่างเถ้าถ่านหินต่อความพรุนและการซึมผ่านอากาศของเพสต์”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 1, 25-27 ตุลาคม, ระยอง, หน้า CON22-CON29.
6. ปริญญา จินดาประเสริฐ, สมศักดิ์ เมตตะนันท์, สุรเชษฐ์ มั่งมีศรี และ ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2543, “คุณสมบัติของคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าลดยและเถ้าแกลบดำ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, 10-12 พฤษภาคม, เพชรบุรี, หน้า MAT47-MAT57.
7. ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2549, “ผลกระทบของซีโอไลต์ต่อคุณสมบัติของเพสต์และมอร์ตาร์”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 2, 25-27 ตุลาคม, อุตรธานี, หน้า MAT12-MAT17.
8. ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2549, “การวัดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตโดย TGA และ XRD ของเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 2, 25-27 ตุลาคม, อุตรธานี, หน้า MAT64-MAT72.
9. สุขสันต์ หอพิบูลสุข, รุ่งลาวัลย์ ราชัน, ศิวฤทธิ์ หิรัญเรือง และ ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2549, “โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวซีเมนต์เถ้าลดย”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, 20-22 เมษายน, ภูเก็ต, In CD-ROM.
10. ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชูวิทย์ นาเพ็ญ, ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550, “ผลกระทบของซีโอไลต์ต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม, พิษณุโลก, In CD-ROM.

11. ยุทธนา รักษาขมม, สุขสันต์ หอพิบูลสุข, ชีรวัดน์ สิ้นศิริ, 2550, “อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังอัดของดินเหนียวซีเมนต์บดอัด”,การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม, พิษณุโลก, In CD-ROM.
12. ชีรวัดน์ สิ้นศิริ, ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550, “การใช้เฟอร์ไรต์ในงานคอนกรีตมวลเบา”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 3, 25-27 ตุลาคม, ชลบุรี, หน้า 225-229.
13. ชีรวัดน์ สิ้นศิริ, ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, 2550, “การใช้ซีโอไลท์ธรรมชาติในงานคอนกรีต”, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 3, 25-27 ตุลาคม, ชลบุรี, หน้า 230-235 .
14. ชูวิทย์ นาเพีย, ชีรวัดน์ สิ้นศิริ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2552).การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งภาคตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลท์เป็นวัสดุประสาน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, หน้า MAT-206-MAT-213.
15. วัฒนโชค เครือหงษ์, เศติมชัย ชื่นตา, ชีรวัดน์ สิ้นศิริ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปฏิกริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, หน้า MAT-136-MAT-143.
16. ธนากร ภูเงินขำ, ชีรวัดน์ สิ้นศิริ และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี. (2553). การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์จากซีโอไลท์ธรรมชาติ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, หน้า 119-124.

Patent/Petty Parten

1. Sinsiri, T., Jitchaiyaphum, K., Chindaprasirt, P., 2009, Compressed air foam producing tank, Petty patent application no. 1003001033.

Research Interest

Microstructure of cement based materials, Lightweight concrete, Pozzolan in Concrete

Research Honors and Awards

1. Thailand Research Fund (TRF) who sponsored the research under the Royal Golden Jubilee Ph.D. program.
2. The Ministry of Education of Thailand under the Ministry Staff Development Project.
3. Thailand Research Fund (TRF) under grant No. RDG525008, the Siam City Cement Public Company Limited.
4. Thailand Research Fund (TRF) New Researcher Scholar, grant No. MRG5280178.