



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### การใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนธรรมชาติเพื่อเป็นวัสดุประสาน

โดย

ผศ.ดร. ชีรวัฒน์ สันศิริ

ศ.ดร. ปริญญ์ จินดาประเสริฐ

หัวหน้าโครงการวิจัย

นักวิจัยที่ปรึกษา

พฤษภาคม 2555

สัญญาเลขที่ MRG5280178

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้วัสดุพอลิโพรไพลีนธรรมชาติเพื่อเป็นวัสดุประสาน

โดย

ผศ.ดร. ชีรวัฒน์ สันศิริ หัวหน้าโครงการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ศ.ดร. ปริญญ์ จินดาประเสริฐ นักวิจัยที่ปรึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เสนอ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและ  
สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย

(ความเห็นในรายงานเป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ : การใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติเพื่อเป็นวัสดุประสาน  
(UTILIZATION OF NATURAL POZZOLANS AS CEMENTITIOUS MATERIALS)  
นักวิจัยที่ปรึกษา : ศ. ดร. ปริญา จินดาประเสริฐ, 167 หน้า

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ ศึกษาการใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติเพื่อเป็นวัสดุเชื่อมประสาน การศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการใช้เพอร์ไลต์ในงานคอนกรีตมวลเบา ซึ่งเพอร์ไลต์ที่ใช้เป็นเพอร์ไลต์ Type III ที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก มีอนุภาคนาขนาดเล็ก มีรูพรุนสูง และมีน้ำหนักเบา โดยการศึกษาจะนำเพอร์ไลต์แทนที่ทราย และแทนที่ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ความคุมการไหลแผ่ที่ร้อยละ 105–115 และเปรียบเทียบกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักกับมอร์ตาร์ควบคุม

ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาถึงความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไคอะตอมไมท์ โดยใช้การแทนที่ไคอะตอมไมท์ในเถ้าลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก โดยการศึกษาใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยา ทำการแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายต่อวัสดุเชื่อมประสาน เท่ากับ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.70 อัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ ร้อยละ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5, 10, 15 และ 20 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 24 ชั่วโมง ทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ และทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน

ส่วนที่ 3 ศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งจากตะกอนโรงสูบโดยใช้ชีโอไลต์ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุยึดประสาน ในอัตราส่วนการแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยชีโอไลต์ร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และผสมจากตะกอนในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ความคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.40 ทำการศึกษาคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็ง โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด, การรั่วไหลของโลหะหนักโดยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), คุณสมบัติทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer Analysis (XRD) และ X-Ray Fluorescence Analysis (XRF), ถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และทดสอบหาความพรุนโดยวิธี Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

ส่วนที่ 4 เป็นการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียดแตกต่างกัน 2 ขนาดคือขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์และขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทดสอบความไม่เป็นผลึกของเถ้าปาล์มน้ำมันโดยวิธีเรียวเวลด์ กำลังอัดของเพสต์ การทดสอบเพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน การวิเคราะห์การกระจายตัวโพรงของเพสต์และการถ่ายภาพขยายของเพสต์

ผลการศึกษาในส่วนที่ 1 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์เท่ากับ 0.50 เมื่อใช้เพอร์ไลต์แทนที่วัสดุประสานจะทำให้ความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นด้วย และการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเพอร์ไลต์จะแปรผกผันกับปริมาณของเพอร์ไลต์ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ยิ่งทำให้ค่ากำลังอัดลดลง อย่างไรก็ตามจากการวิจัยจะได้คอนกรีตมวลเบาที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยเมื่อแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 แทนที่ซีเมนต์มีค่ากำลังอัด 101 กก./ซม.<sup>2</sup> ค่าหน่วยน้ำหนัก 1,460 กก./ม.<sup>3</sup> และเมื่อแทนที่ทรายค่ากำลังอัดเท่ากับ 59 กก./ซม.<sup>2</sup> และมีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุดเท่ากับ 990 กก./ม.<sup>3</sup>

ผลการทดสอบในส่วนที่ 2 พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5-2.5 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดที่สูง ซึ่งมีค่ากำลังอัดระหว่าง 223-939 กก./ซม.<sup>2</sup> นอกจากนั้นพบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมช่วยเพิ่มความสามารถทำงาน แต่ค่ากำลังอัดจะลดลง และค่ากำลังอัดมีแนวโน้มพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของอายุการบ่ม แต่ช่วงอายุปลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักหรือไม่มีเลย ผลการทดสอบยังพบอีกว่าการแทนที่โคอะคอมไมท์ในเถ้าลอยร้อยละ 60 และ 80 มีความเหมาะสมทั้งการให้ค่ากำลังอัดและการไหลแผ่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน

ผลการทดสอบในส่วนที่ 3 พบว่าความสามารถรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีภาคตะกอนโลหะหนักในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมภาคตะกอนโลหะหนักผสมอยู่ ส่วนการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่ US.EPA กำหนด ในขณะที่ผลของภาพถ่ายพื้นผิวของก้อนหล่อแข็งด้วย SEM และความพรุนของก้อนหล่อแข็งด้วย MIP พบว่าก้อนหล่อแข็งมีความหนาแน่น และปริมาตรโพรงทั้งหมดของก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นแต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ซีโอไลท์เพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาในส่วนที่ 4 ผลการทดสอบพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก กำลังอัดของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงมีกำลังอัดสูงกว่าเพสต์ OPC เพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงร้อยละ 20 มีปริมาตรโพรงต่ำที่สุด ปริมาณแคลเซียม

ไฮดรอกไซด์ของเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันลดลงด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นและมีปริมาณที่ต่ำกว่าเพสต์ OPC นอกจากนี้ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันมีผลต่ออัตราการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อีกประการหนึ่งขนาดโพรงวิกฤตและขนาดโพรงเฉลี่ยต่ำกว่าเพสต์ OPC

ASST. PROF. DR. THEERAWAT SINSIRI : UTILIZATION OF  
NATURAL POZZOLANS AS CEMENTITIOUS MATERIALS.  
RESEARCH ADVISOR : PROF. DR. PRINYA CHINDAPRASIRT,  
167 PP.

NATURAL POZZOLAN / DIATOMITE / PERLITE / ZELITE / PALM OIL FUEL  
ASH/ LIGHTWEIGHT CONCRETE / GEOPOLYMER MORTARS / SOLIDIFIED  
WASTES / LEACHING OF HEAVY METALS / TCLP / POROSITY

This aims of paper are to investigate the utilization of natural pozzolans as cementitious materials. The mix proportions used in the study were designed in 4 series. In series 1, this study presented the usage of perlite in lightweight concrete. The perlite in this study is perlite type III, is a type of mineralogical material containing large quantities of reactive  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , small particles, high porosity and lightweight. In the study, used the perlite to replace sand and cement at ratio of 0, 10, 20, 30, 40 and 50% by weight of binder. Comparison of the compressive strength and density of perlite mortar was performed with control mortar at in range of 105 to 115 %.

In series 2, this study 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 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium hydroxide ( $\text{NaOH}$ ) solutions were mixed together and then used as a liquid portion in the mixture in order to activate the geopolymerization. The ratios between  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  and  $\text{NaOH}$  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 addition, 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.

In series 3, the property of solidified wastes using OPC containing synthesized zeolite (SZ) and natural zeolite (NZ) as binders. Zeolites were used to partially replace OPC the rate of 0, 20, and 40% by weight. The plating sludge was used as contaminated waste to replace binder at the rate of 40, 50 and 60% by weight. The water to binder (w/b) ratio of 0.40 was used for all mixes. Setting time and compressive strength of solidified wastes were tested and leachability of heavy metals were determined by TCLP. In addition, XRD, XRF, SEM of fractured surface and pore size distribution by MIP were investigated.

Finally in series 4, This study presents the effect of palm oil fuel ash fineness on microstructure of blended cement paste. Palm oil fuel ash (POA) was ground by ball mill with 2 types of different finenesses. Ordinary Portland cement (OPC) was partially replaced with ground palm oil fuel ash at the rate of 20% and 40% by weight of binder. The water to binder ratio (w/b) of 0.35 was used for all mixes. The amorphous of ground palm oil fuel ash by Rietveld method, compressive strength, thermogravimetric analysis, pore size distribution of blended cement paste were investigated.

The results in series 1 revealed that the perlite specific gravity was 0.50, the increasing quantity of perlite were direct effected to increase setting time and decrease compressive strength. The use of perlite of 50% cement replacement at 28 days obtained compressive strength and density were 101 kg/m<sup>2</sup> and 1,460 kg/m<sup>3</sup> respectively. And using perlite of 50% sand replacement gave the compressive strength and density were 59 kg/m<sup>2</sup> and 990 kg/m<sup>3</sup> respectively.

Test results in series 2 revealed that the mixture having Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH of 1.5-2.5, 15M of NaOH concentration, and 75°C of curing temperature showed compressive strength between 223-939 kg/m<sup>2</sup> 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.

Test results in series 3 indicated that the compressive strength of all solidified wastes made with 40, 50 and 60% by weight of plating sludge was decreased as compared to those samples without the wastes. TCLP results showed that concentration of heavy metals in leachates weren't exceeded the limit specified by US.EPA. SEM and MIP results revealed that the solidified wastes became denser and the replacement of Portland cement by zeolite increased the total porosity but decreased the average pore size.

Finally in series 4, Test results indicated that the ground palm oil fuel ash was amorphous silica material. The compressive strengths of cement paste containing



POA fineness were as high as that of OPC cement paste. Paste containing 20% of POA with high fineness had the lowest total porosity.  $\text{Ca(OH}_2\text{)}$  contents of cement paste containing POA decreased with the increasing replacement of POA and was lower than that of the OPC cement paste. In addition, fineness of POA had an effect on the reduction rate of  $\text{Ca(OH}_2\text{)}$ . Furthermore, the critical pore size and average pore of cement paste containing POA was lower than the OPC cement paste.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การใช้วัสดุพอลิโพรไพลีนธรรมชาติเพื่อเป็นวัสดุประสาน สามารถดำเนินการได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และการสนับสนุนจากหน่วยงานหรือบุคคล ซึ่งผู้วิจัยขออนุญาตเอ่ยนามดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งผู้วิจัยทำงานอยู่ ที่สนับสนุนการดำเนินงานตลอดจนสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยตั้งแต่ต้นจนเสร็จสิ้นโครงการ

ขอขอบคุณที่ปรึกษาโครงการวิจัย ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ที่กรุณาให้ความเห็นและคำแนะนำที่ดีและเป็นประโยชน์ต่อโครงการหลายครั้ง ทั้งเรื่อง การตีพิมพ์และความร่วมมือในการทำวิจัยร่วมกัน

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้จะไม่สามารถดำเนินการได้ หากขาดการสนับสนุนด้านทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) ซึ่งได้เห็นความสำคัญและสนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ตามสัญญาเลขที่ MRG5280178 ประจำปี 2552

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด ประโยชน์อันใดอันเนื่องมาจากงานวิจัยเล่มนี้ ขอมอบแด่บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอน

ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป .....	ฉ

## บทที่

<b>1</b>	<b>บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1	ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย .....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3	ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	4
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
1.6	เนื้อหาของรายงานฉบับนี้ .....	5
<b>2</b>	<b>ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>6</b>
2.1	ปอชโซลาน .....	6
2.2	ปอชโซลานธรรมชาติ .....	14
2.3	ไดอะคอมไมท์.....	17
2.4	เพอร์ไลท์.....	26
2.5	ซีโอไลท์ .....	43
2.6	สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	48
2.7	เอกสารอ้างอิง .....	50

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>54</b>
3.1	ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา .....	54
3.1.1	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย .....	55
3.1.2	การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ .....	57
3.2	การใช้ไคอะตอมไมท์ในงานจีโอโพลิเมอร์ .....	61
3.2.1	วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ .....	61
3.2.2	สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ .....	61
3.2.3	วิธีผสมและทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ .....	62
3.2.4	ทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ .....	62
3.2.5	ทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ .....	62
3.3	การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ ผสมวัสดุพอซโซลานด้วยการหล่อแข็งเป็นก้อน .....	63
3.3.1	วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ .....	63
3.3.2	วิธีการทดสอบ .....	66
3.4	การศึกษาซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน .....	73
3.4.1	วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ .....	73
3.4.2	การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ.....	73
3.4.3	อัตราส่วนผสมและการทดสอบกำลังอัดของ.....	73
3.4.4	การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเพสต์.....	74
<b>4</b>	<b>การใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา.....</b>	<b>75</b>
4.1	บทนำ.....	75
4.2	วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	77
4.3	ลักษณะทางกายภาพของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ Type 1 และ Type 2.....	77
4.4	องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ Type 1 และ Type 2.....	78
4.5	ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ Type 1 และ Type 2.....	79
4.6	ความเป็นผลึกของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลท์ Type 1 และ Type 2.....	81

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำ .....	82
4.7.1 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม .....	82
4.7.2 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ.....	83
4.8 คุณสมบัติด้านกำลังอัด .....	84
4.8.1 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และ เพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม .....	84
4.8.2 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และ เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ.....	87
4.9 ให้น้ำหนัก .....	94
4.9.1 ให้น้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และ เพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม .....	94
4.9.2 ให้น้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และ เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ.....	95
4.10 อัตราส่วนกำลัง .....	97
4.11 การวิเคราะห์ราคา .....	97
4.11.1 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และ เพอร์ไลต์ Type 1 กับราคาคอนกรีตมวลเบาในท้องตลาด .....	97
4.11.2 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และ เพอร์ไลต์ Type 2 ที่ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติกับคอนกรีตทั่วไป ผสมเถ้าลอย.....	99
4.12 สรุปงานวิจัย .....	96
4.12.1 ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในงานคอนกรีตมวลเบา.....	101
4.12.2 ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในการเป็นวัสดุปอซโซลาน .....	102
4.13 ข้อเสนอแนะ .....	104
4.14 เอกสารอ้างอิง.....	105

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>5</b>	<b>จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากวัสดุปอชลานธรรมชาติ .....</b>	<b>109</b>
5.1	บทนำ .....	109
5.2	วัตถุประสงค์ .....	110
5.3	การเตรียมวัสดุและการทดสอบ .....	110
5.3.1	วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ .....	110
5.3.2	สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ .....	110
5.4	วิธีผสมและทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ .....	111
5.5	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล .....	112
5.5.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ .....	112
5.5.2	ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ .....	118
5.5.3	ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder .....	120
5.5.4	ผลกระทบของความเข้มข้น NaOH .....	121
5.5.5	ผลกระทบของอัตราส่วน Addition water/binder .....	122
5.5.6	ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา .....	124
5.5.7	ผลกระทบของเวลาการบ่มตัวอย่าง .....	125
5.5.8	ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	126
5.5.9	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ .....	128
5.6	สรุปผลการทดสอบ .....	130
5.7	เอกสารอ้างอิง .....	130
<b>6</b>	<b>การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกาทะคอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีโอไลท์เป็นวัสดุยึดประสาน .....</b>	<b>133</b>
6.1	บทนำ .....	133
6.2	วัตถุประสงค์ .....	134
6.3	วิธีการศึกษา .....	134
6.3.1	วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ .....	134
6.3.2	การเตรียมวัสดุ .....	134

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

6.3.3 อัตราส่วนผสม .....	134
6.3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย .....	134
6.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ .....	135
6.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ .....	135
6.4.2 องค์ประกอบทางเคมี .....	136
6.4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของก้อนตัวอย่าง.....	137
6.4.4 ปริมาตรและการกระจายตัวของโพรงของก้อนหล่อแข็ง.....	139
6.4.5 การวิเคราะห์ Fracture surface ของก้อนหล่อแข็ง.....	143
6.4.6 การวิเคราะห์การชะละลายของก้อนหล่อแข็ง .....	145
6.5 สรุป .....	146
6.6 เอกสารอ้างอิง .....	146
7 โครงสร้างจุลภาคของเพสต์ผสมได้จากโรงงานอุตสาหกรรม.....	147
7.1 บทนำ .....	147
7.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	149
7.3 วิธีการศึกษา.....	149
7.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ .....	149
7.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ.....	149
7.3.3 อัตราส่วนผสมและการทดสอบกำลังของเพสต์ .....	149
7.4 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเพสต์.....	150
7.4.1 การทดสอบเพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน.....	150
7.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างโพรงของเพสต์ .....	150
7.4.3 การถ่ายภาพขยายของเพสต์.....	151
7.5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	151
7.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ.....	151
7.5.2 กำลังอัดของเพสต์ .....	153
7.5.3 การวิเคราะห์เพสต์โดยเทคนิคทางความร้อน .....	154

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.5.4 โครงสร้างโพรงของเพสต์.....	157
7.6 สรุปผลการทดลอง.....	161
7.7 เอกสารอ้างอิง.....	161
<b>8 ผลการดำเนินการ (Output) ที่ได้จากโครงการวิจัย.....</b>	<b>165</b>
8.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่มี Impact Factor.....	165
8.2 การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์เชิงวิชาการ.....	165
8.3 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การนำเสนอผลงาน ในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติและระดับชาติ.....	166

### ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	167
--	-----



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618..... 8
2.2	ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลานเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ..... 8
2.3	ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618..... 9
2.4	ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ..... 10
2.5	คุณสมบัติของเถ้าลอยและปอชโซลานธรรมชาติ ตามมาตรฐาน ASTM C 618..... 14
2.6	การวิเคราะห์ทางเคมี และคุณสมบัติทั่วไปของ เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟุ้ง ดินดานเผา และดินขาว (จันทนา สุขุมานนท์, 2550) ..... 15
2.7	แสดงคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008) ..... 14
2.8	องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2005)..... 22
2.9	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์ประเทศตุรกีกับปูนซีเมนต์ (Aydin and Gul, 2007)..... 24
2.10	องค์ประกอบเคมีของหินเพอร์ไลต์ (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546) ..... 28
2.11	แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์ (จิตรกร ตั้งอนุสรณ์สุข และคณะ, 2548) ..... 28
2.12	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546) ..... 30
2.13	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ Expanded Perlite ประเทศตุรกี (Demirboga and Gul, 2003)..... 34
2.14	การนำความร้อนและค่าความหนาแน่นของคอนกรีตผสมเพอร์ไลต์ (Demirboga and Gul, 2003)..... 36

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.15 กำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วันของคอนกรีตผสมเพอร์ไลต์ (Demirboga and Gul, 2003).....	38
2.16 คุณสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ (วัฒนชัย อยู่ในวงศ์, 2546) .....	46
2.17 แสดงการเปรียบเทียบสารประกอบของซีโอไลต์ (ไกรภพ อินทร์แสง, 2550).....	47
3.1 ส่วนผสมและจำนวนก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม.....	58
3.2 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์ และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตมวลเบา .....	58
3.3 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตมวลเบา .....	59
3.4 ส่วนผสมโดยแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์ และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ.....	59
3.5 ส่วนผสมโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ.....	60
3.6 ส่วนผสมโดยผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ.....	60
3.7 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	62
3.8 อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอซโซลานและกากตะกอนของเสีย ..	65
3.9 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน.....	73
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type I และ เพอร์ไลต์ Type 3.....	77
4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์เพอร์ไลต์ Type I และ เพอร์ไลต์ Type ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF).....	79
4.3 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมไคอะตอมไมท์ และ เพอร์ไลต์ Type I ในส่วนผสม .....	95

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสม 5, 10 และ 15% เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ.....	96
4.5 ค่าอัตราส่วนกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสม 5, 10 และ 15% เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ.....	97
4.6 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม 40% กับราคาท้องตลาดทั่วไป .....	98
4.7 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตที่ใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 กับคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตผสมถั่วลอย .....	100
5.1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์.....	112
5.2 องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุประสาน .....	113
5.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน .....	113
5.4 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอายุการบ่ม.....	114
5.5 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน Addition water/binder.....	115
5.6 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา.....	116
5.7 ผลทดสอบเมื่อแปรผันความเข้มข้น NaOH.....	116
5.8 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ .....	117
5.9 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน Liquid alkaline/binder .....	118
6.1 ความถ่วงจำพัวและอนุภาคเฉลี่ย.....	135
6.2 องค์ประกอบเคมีของ OPC, ZS, ZN และ S .....	137
6.3 กำลังอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์ .....	138
6.4 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง .....	139
6.5 แสดงปริมาณของพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย และพื้นที่โพรงทั้งหมดของเพสต์ ที่อายุ 28 วัน .....	140
6.6 แสดงประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน.....	145
7.1 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมถั่วปาล์มน้ำมัน.....	150
7.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ.....	152
7.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ.....	152

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.4	กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์..... 154
7.5	ปริมาตรโพรงของเพสต์และเพสต์ผสมถ้าปาล์มน้ำมัน ..... 157

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพถ่าย SEM ของเถ้านหินจากโรงไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2550) .....	11
2.2 ภาพถ่าย SEM ของเถ้านหินที่มีลักษณะแบบ Pherospheres (ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 2550) .....	12
2.3 ลักษณะของไคอะตอมไมท์ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, ออนไลน์ม, 2543).....	17
2.4 (ก) แสดงชั้นของไคอะตอมไมท์ (สสวท., ออนไลน์, 2540) (ข) ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์ (สสวท., ออนไลน์, 2540).....	18
2.5 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008) .....	19
2.6 กราฟ DTA และ TGA ของไคอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008) .....	20
2.7 ผลิตภัณฑ์มวลรวมเบา (production of lightweight aggregates, LWAs) (Fragoulisa et al., 2004) .....	21
2.8 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004) .....	22
2.9 ความสัมพันธ์กำลังอัดของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม (Aydin and Gul, 2007).....	25
2.10 ความสัมพันธ์โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม (Aydin and Gul, 2007) .....	25
2.11 แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์ ( ณรงค์ศักดิ์ นันทกำภิรา และคณะ, ออนไลน์, 2547).....	26
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Expanded Perlite กับค่ากำลังอัด (Demirboga, Orung and Gul, 2001).....	35
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณปูนซีเมนต์ของ EPA Concrete ที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% (Topcu and Isikday, 2007).....	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับปริมาณปูนซีเมนต์ของ EPA Concrete ที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% (Topcu and Isikday, 2007) .....	41
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท CEM I 42.5R (Topcu and Isikday, 2007).....	42
2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภท CEM I 42.5R (Topcu and Isikday, 2007).....	42
2.17 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ (อุษา อินทอง และคณะ, 2549).....	44
2.18 ลักษณะของซีโอไลต์ (ไกรภพ อินทร์แสง และคณะ, 2550).....	47
3.1 แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย .....	54
3.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและค่าดูดซึมน้ำของทราย.....	55
3.3 การทดสอบการหาขนาดคละของทราย.....	56
3.4 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์.....	56
3.5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจะเพาะและหน่วยน้ำหนักของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์....	57
3.6 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM).....	67
3.7 เครื่องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).....	67
3.8 เครื่องทดสอบ Themo Gravimetric Analyzer (TGA) .....	68
3.9 เครื่องทดสอบองค์ประกอบของธาตุ X-Ray Diffractometer Analysis (XRD).....	70
3.10 การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 .....	71
3.11 การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี DLT.....	72
4.1 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์ .....	79
4.2 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลต์ Type 1 .....	80
4.3 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลต์ Type 2 .....	80
4.4 ผลการทดสอบ XRD ของไดอะตอมไมท์ .....	81
4.5 ผลการทดสอบ XRD ของเพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2.....	81

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับปริมาณไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ Type 1 ในคอนกรีตมวลเบา.....	82
4.7 ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นวัสดุปอซโซลาน .....	83
4.8 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย .....	84
4.9 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์.....	85
4.10 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทราย .....	85
4.11 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์.....	86
4.12 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และ เพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม ที่อายุบ่ม 28 วัน .....	87
4.13 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย .....	88
4.14 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์.....	89
4.15 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม .....	90
4.16 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย .....	91
4.17 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์.....	92
4.18 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม .....	93
4.19 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่มในส่วนผสม 5, 10 และ 15% ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน .....	94
4.20 แสดงลักษณะของ Calcium Sulfoaluminate ที่มีลักษณะเป็นแผ่น .....	96
5.1 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์ .....	113

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2	ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย ..... 114
5.3	ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังอัด..... 119
5.4	ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อการไหลแผ่..... 119
5.5	ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ต่อกำลังอัด..... 120
5.6	ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ต่อการไหลแผ่..... 121
5.7	ผลกระทบของความเข้มข้น NaOH ต่อกำลังอัด ..... 121
5.8	ผลกระทบของความเข้มข้น NaOH ต่อการไหลแผ่ ..... 122
5.9	ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อกำลังอัด ..... 123
5.10	ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อการไหลแผ่ ..... 123
5.11	ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาต่อกำลังอัด ..... 124
5.12	ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาต่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ..... 125
5.13	ผลกระทบของระยะเวลาการบ่มต่อกำลังอัด ..... 126
5.14	ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อกำลังอัด..... 126
5.15	ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อการไหลแผ่..... 127
5.16	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากผลกระทบ ของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ..... 128
5.17	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากผลกระทบ ของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ..... 128
5.18	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากผลกระทบ ของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา ..... 129
5.19	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากผลกระทบของความเข้มข้น NaOH ..... 129
5.20	หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ จากผลกระทบ ของอัตราส่วน Addition water/binder ..... 129
6.1	ภาพถ่ายขยายของวัสดุโดย SEM
	ก. ภาพถ่ายขยาย 4,000 เท่าของ OPC ..... 135
	ข. ภาพถ่ายขยาย 15,000 เท่าของ ZS ..... 135
	ค. ภาพถ่ายขยาย 1,500 เท่าของ ZN..... 136



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ. ภาพถ่ายขยาย 1,500 เท่าของ S .....	136
6.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุ .....	137
6.3 กำลังอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์ .....	138
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง ของซีเมนต์เพสต์อายุ 28 วัน .....	140
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง ของก้อนหล่อแข็ง อายุ 28 วัน	
ก. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีไอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 20 .....	141
ข. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีไอไลต์สังเคราะห์ร้อยละ 40 .....	141
ค. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีไอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 20 .....	142
ง. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีไอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 40 .....	142
6.6 ภาพถ่ายขยาย Fracture Surface ที่อายุ 28 วัน	
ก. ภาพขยายของ OPC100 .....	143
ข. ภาพขยายของ OPC20ZS .....	143
ค. ภาพขยายของ OPC40ZS .....	143
ง. ภาพขยายของ OPC20ZN .....	144
จ. ภาพขยายของ OPC40ZN .....	144
ฉ. ภาพขยายของ OPC40S .....	144
ช. ภาพขยายของ OPC50S .....	144
ซ. ภาพขยายของ OPC60S .....	144
7.1 การกระจายอนุภาคของวัสดุ .....	152
7.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ G1POA และ G2POA .....	153
7.3 เพอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสม เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 .....	155
7.4 เพอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และ เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40 .....	155

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.5 อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์และ เพสต์ผสมเถ้าปลาล่มน้ำมันร้อยละ 20 .....	155
7.6 อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์และ เพสต์ผสมเถ้าปลาล่มน้ำมันร้อยละ 40 .....	156
7.7 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์.....	157
7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรโพรงสะสมกับขนาดโพรงของเพสต์ 20POA.....	159
7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรโพรงสะสมกับขนาดโพรงของเพสต์ 40POA.....	159
7.10 ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโพรงกับขนาดโพรงของเพสต์ 20POA.....	159
7.11 ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโพรงกับขนาดโพรงของเพสต์ 40POA.....	160
7.12 แสดงขนาดโพรงเฉลี่ยของเพสต์.....	160

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การผลิตคอนกรีตในปัจจุบันได้มีความเจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว โดยมีทั้งการพัฒนาในด้านการออกแบบ วิธีการก่อสร้าง รวมทั้งวัสดุที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้าง รวมไปถึงงานวิจัยและการพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีต เพื่อปรับปรุงในด้านของคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีประสิทธิภาพในทุกสภาพการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตที่อยู่ในสภาพของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่อยู่ในสภาพที่แข็งตัวแล้ว จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาในเรื่องของวัสดุผสมเพิ่มในงานคอนกรีต ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ส่วนใหญ่เป็นสารผสมแบบแร่ธาตุของกลุ่มสารปอซโซลาน เช่น ขี้เถ้าลอย (fly ash), เถ้าแกลบ (rice husk ash), ขี้ตะกรันจากเตาถลุง (blast furnace slag), ซิลิกาฟูม (silica fume) เป็นต้น ความหมายของวัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีสารซิลิกา และอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยวัสดุดังกล่าวไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้องแล้ว ผลของปฏิกิริยาที่ได้จะมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์ และในปัจจุบันมีการพัฒนาอนุภาคให้มีขนาดเล็กลงเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านวิทยาศาสตร์และด้านวิศวกรรม จึงเกิดทางเลือกใหม่ๆ ในการเลือกใช้วัสดุเพื่อที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้าง

เป็นที่ทราบกันดีว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดก๊าซที่มีผลต่อการทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด ดังนั้น จึงมีความพยายามที่จะลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง โดยมีการศึกษาพัฒนาสารซีเมนต์อื่นมาใช้ทดแทน ตัวอย่างเช่นการใช้ของเหลือจากธรรมชาติ มาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำปูนซีเมนต์ผสม (blended cement) สารที่ใช้ผสมดังกล่าวเป็นสารปอซโซลาน (pozzolanic materials) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุยึดประสานในตัวเอง แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) จะสามารถก่อตัว และแข็งตัวได้ โดยสารปอซโซลานที่นิยมใช้มาก ได้แก่ ขี้เถ้าลอย (fly ash) เถ้าแกลบ (rice husk ash), เถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash) และวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ เป็นต้น

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือก ไดอะตอมไมท์ (diatomite) เพอร์ไลต์ (perlite) และ ซีโอไลต์ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม ประเภทปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan) โดยจัดเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) หรือสารอะลูมิโนฟอสเฟต (aluminophosphate) จึงน่าจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี งานวิจัยในประเทศจีนได้มีการนำปอซโซลานจาก

ธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตมากมาย เช่น นำมาใช้ในงานคอนกรีตมวลเบา ทำเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลในคอนกรีต ลดปัญหาการเกิดการเยิ้ม ลดการแยกตัว ลดการซึมผ่าน เพิ่มความทนทาน และเพิ่มกำลัง เป็นต้น โดยจะนำมาใช้แทนที่ทราย และแทนที่ปูนซีเมนต์ตามอัตราส่วน เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานธรรมชาติมีคุณสมบัติที่ดีคือ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูง มีความแข็งแรง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปเป็นส่วนประกอบในคอนกรีต และได้คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักที่เบาลง ดังนั้นถ้าสามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้น้อยลงโดยที่สามารถรับแรงอัดได้ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ จึงน่าจะสามารถลดค่าใช้จ่ายลงไปได้มากทั้งทางด้านค่าใช้จ่ายด้านฐานรากและตัวอาคารเอง

ในประเทศไทยมีแหล่งปอซโซลานธรรมชาติอยู่หลายแหล่ง เช่น เพอร์ไลต์ บริเวณที่พบในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดลพบุรี และกาญจนบุรี ไคอะตอมไมท์ พบบริเวณ จังหวัดลำปาง จังหวัดปราจีนบุรี ส่วนซีโอไลท์พบมากในจังหวัดลพบุรี แต่การใช้งานส่วนใหญ่มักจะอยู่ในอุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมผงซักฟอก เป็นต้น ข้อมูลในการศึกษาเกี่ยวกับงานนำปอซโซลานธรรมชาติมาใช้ในงานคอนกรีตยังมีอยู่น้อย ซึ่งแตกต่างจากกรณีเถ้าลอยและซิลิกาฟูมที่ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายและนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตในก่อสร้างทั่วไป ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงผลกระทบของการผสมปอซโซลานธรรมชาติที่มีผลต่อคุณสมบัติเพสต์และมอร์ตาร์ โดยเน้นการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructure) ซึ่งมีการศึกษาน้อยมากในประเทศไทย เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมผลกระทบของวัสดุปอซโซลานธรรมชาติต่อเพสต์และมอร์ตาร์มากขึ้น และเพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อให้มีการนำวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ประเทศมาใช้เป็นวัสดุประสาน เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของซีเมนต์เพสต์ และ มอร์ตาร์ที่นำวัสดุปอซโซลานธรรมชาติมาแทนที่ซีเมนต์
3. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ในงานคอนกรีตมวลเบา
4. เพื่อศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากไคอะตอมไมท์
5. เพื่อศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกาตะคอนที่ใช้น้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลท์เป็นวัสดุยึดประสาน
6. เพื่อศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กของเพสต์ผสมเถ้าชีวมวล

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาโครงการวิจัยได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัย ประกอบด้วยดังนี้

#### 1.3.1 การใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา

- ศึกษาการใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ Type 1 ในงานคอนกรีตมวลเบา โดยการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ 0, 10, 20, 30 และ 40% และศึกษาการใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ Type 2 เพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม โดยการแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่ม ที่ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
- ใช้อัตราส่วนมอร์ตาร์ควบคุม ที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย 1:2.75
- ทำการหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50×50×50 mm โดยควบคุมอัตราการไหลแผ่นทุกอัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 105 ถึง 115
- ทดสอบเปรียบเทียบค่ากำลังอัด (compressive strength) และค่าหน่วยน้ำหนัก (unit weight) กับมอร์ตาร์ควบคุม (control mortar) โดยในการศึกษาการใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา บ่มที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน และการศึกษาสารปอซโซลานประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม บ่มที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน โดยการแช่น้ำ

#### 1.3.2 การศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากไคอะตอมไมท์

- ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 0 60 80 และ 100 โดยน้ำหนัก
- ใช้อัตราส่วนของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เท่ากับ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5
- ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เท่ากับ 5 10 15 และ 20 โมลาร์
- ใช้ทรายแม่น้ำจากจังหวัดนครราชสีมา คัดขนาดตามมาตรฐาน ASTM C 33
- ขนาดของก้อนตัวอย่างมาตรฐานทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm และใช้
- อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 75 และ 90°C
- ทดสอบคุณสมบัติด้านการไหลแผ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1437
- ทดสอบคุณสมบัติด้านระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 191
- ทดสอบคุณสมบัติทางด้านกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 109

### 1.3.3 ศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกาจตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลท์เป็นวัสดุยึดประสาน

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถูกแทนที่ด้วยซีโอไลท์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักและผสมกาจตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
- ควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40
- หล่อตัวอย่างก้อนเพสต์รูปลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม ตามมาตรฐาน ASTM C 109
- หลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบออก และทำการบ่มโดยการนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบเมื่ออายุครบ 7, 28 และ 90 วัน

### 1.3.4 ศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กของเพสต์ผสมเถ้าชีวมวล

- การหล่อซีเมนต์เพสต์ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
- ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทุกอัตราส่วนผสม
- หล่อตัวอย่างเพสต์ขนาด 50x50x50 มม<sup>3</sup> ตามมาตรฐาน ASTM C 109 และถอดแบบเพสต์ที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำและทดสอบที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงวิธีการในการทดสอบ
- 1.4.2 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ และวางแผนดำเนินการทดสอบ
- 1.4.3 ทดลองหาสัดส่วนผสม และดำเนินการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ผสม
- 1.4.4 ทำการหล่อก้อนตัวอย่างทดสอบ และดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์
- 1.4.5 วิเคราะห์ผล และสรุปผลการทดสอบ
- 1.4.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มรายงาน

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถประยุกต์ใช้วัสดุที่หาได้ในประเทศ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีตและนำมาใช้ให้เกิดคุณค่ามากที่สุด

1.5.2 เพื่อพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตประเภทปอซโซลานธรรมชาติ ให้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต และได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่เหมาะสมสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

1.5.3 ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตมาตรฐาน ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้

1.5.4 สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ผสมวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ เหมาะแก่การนำไปใช้งาน

1.5.5 สามารถนำเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรม แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์

1.5.6 ช่วยลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ ลดภาวะโลกร้อน

## 1.6 เนื้อหาของรายงานฉบับนี้

เนื้อหาของรายงานฉบับนี้ประกอบด้วย บทที่ 1 เป็นบทนำเกี่ยวกับการนำวัสดุปอซโซลานธรรมชาติมาแทนที่ปูนซีเมนต์ บทที่ 2 อธิบายถึงวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ บทที่ 3 เป็นการพูดถึงการศึกษาและการทดลองของงานวิจัย บทที่ 4 เป็นผลการศึกษาการใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ในงานคอนกรีตมวลเบา บทที่ 5 เป็นการศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมซีโอไลท์ธรรมชาติ และ ไคอะตอมไมท์ บทที่ 6 ศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกาคตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีโอไลท์เป็นวัสดุยึดประสาน บทที่ 7 เป็นผลการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กของเพสต์ผสมเถ้าชีวมวล ส่วนบทที่ 8 เป็นผลการดำเนินงาน (Output) ที่ได้จากโครงการวิจัย

ภาคผนวก ก. แสดงผลงานตีพิมพ์บทความซึ่งเกิดจากโครงการนี้ โดยนำบทความฉบับเต็มที่ได้รับการพิมพ์หรือตอบรับให้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มี Impact Factor

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปอชโซลาน

ตามรายงานของ อนันท์ ป้อมประสิทธิ์ (2545) ได้มีการบันทึกไว้ว่า ปอชโซลาน เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างตั้งแต่สมัยโบราณกว่า 2,000 ปี และในปัจจุบันก็ยังเป็นที่นิยมใช้กันอยู่ในสมัยโบราณได้นำเอาวัสดุพวกปอชโซลาน เช่น มีการนำเถ้าจากภูเขาไฟมาผสมกับปูนขาวเพื่อผลิตเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (hydraulic cement) โดยใช้ปอชโซลาน 2 ส่วน ต่อปูนขาว 1 ส่วน มาใช้ในการก่อสร้าง โดยมีไขมัน นม และเลือดจากสัตว์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้งาน และสิ่งก่อสร้างที่ทำจากปอชโซลานนั้นก็ยังมีความคงทนมาจนถึงทุกวันนี้

มาตรฐาน ASTM C 618 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอชโซลานไว้ว่า “วัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอชโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอชโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

วัสดุปอชโซลาน เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีต หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น วัสดุปอชโซลานที่ใช้ในงานคอนกรีตมีอยู่หลายชนิด เช่น เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟุ้ง เถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังวัสดุปอชโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยาคลายกับปูนซีเมนต์ได้ คือ ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซึ่งเป็นวัสดุประเภทกึ่งปอชโซลานและกึ่งซีเมนต์

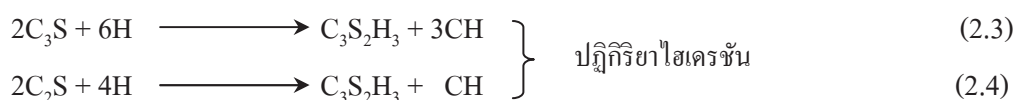
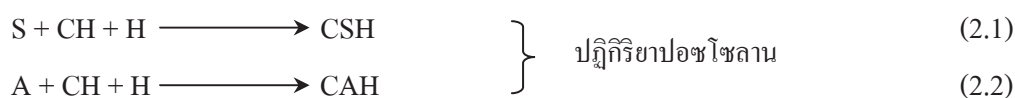
ในการปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีตสามารถใช้วัสดุบางชนิดผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ วัสดุเฉื่อย (inert materials) วัสดุซีเมนต์ (cementing materials) และ วัสดุปอชโซลาน (pozzolanic materials) การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ขาดมวบรวมที่ค่อนข้างละเอียด ที่เกิดปัญหาการแยกตัว และไม่เหมาะสมในการลำเลียงโดยการสูบส่งหรือการเทโดยใช้ท่อ หรือต้องการเพิ่มการเกาะตัวของคอนกรีตสามารถทำได้โดยใช้วัสดุเฉื่อยจำพวก หินปูนบดละเอียด ทรายละเอียด และหินฝุ่น เป็นต้น การใช้วัสดุละเอียดผสมเพิ่มในคอนกรีตยังช่วยลดการแตกร้าวและการแตงผิวของคอนกรีตทำได้ง่ายขึ้น ปูนซีเมนต์ผสมที่นิยมใช้ในการก่ออิฐและฉาบได้มาจากการบดปูนเม็ดกับวัสดุเฉื่อย การใช้วัสดุ



เพื่อลดค่าใช้จ่ายเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดกำลังของคอนกรีตเพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ในงานโครงสร้างของอาคารซึ่งต้องรับแรงสูง

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2547) ยังบันทึกไว้ว่า วัสดุซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน นอกจากใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเช่นเดียวกับการใช้วัสดุเฉื่อยแล้วยังทำให้คอนกรีตมีกำลังและความทนทานดีขึ้นด้วย วัสดุซีเมนต์ได้แก่ ปูนซีเมนต์ธรรมดาและตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นปูนซีเมนต์ในตัวเองแล้วยังสามารถใช้ทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ได้ ดังนั้นเมื่อทำปฏิกิริยาเคมีจะให้สารประกอบของ CSH และ CAH เหมือนกับปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate,  $C_3S$ ) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate,  $C_2S$ ) แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช้ากว่า และกำลังในช่วงแรกจะต่ำกว่าปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนทำให้ปริมาณ  $C_3S$ ,  $C_2S$ , ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (tricalcium aluminate,  $C_3A$ ) และ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (tetracalcium aluminoferrite,  $C_4AF$ ) ในคอนกรีตลดลง การทำปฏิกิริยาของสารซีเมนต์จะช้าลง การคายความร้อนจากปฏิกิริยาจะชะลอตัวออกไป ปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอซโซลานและน้ำจะเกิดขึ้นระหว่าง  $SiO_2$  และ  $Al_2O_3$  กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $[Ca(OH)_2]$  ที่ได้จากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2 เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในสมการ 2.3 และ 2.4 (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)



วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์ และถึงแม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮดรชันแต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหนา วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยมีปริมาณที่ค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานบางชนิดที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟูมที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

ตาม ASTM C 618 (1991) ได้จำแนกปอชโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1) ชั้นคุณภาพ N (class N) เป็นปอชโซลานจากธรรมชาติหรือปอชโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ (อนนท์ ป้อมประสิทธิ์, 2545)

2) ชั้นคุณภาพ F (class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผากำถ่านหินแอนทราไซต์ (anthracite) หรือบิทูมินัส (bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (1991) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ถึง 2.4 ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F มีปริมาณ  $\text{CaO}$  ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ  $\text{SiO}_2$  มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ เนื่องจากกำถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี  $\text{SiO}_2$  สูง สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างและการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ไอร์ออนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) ไม่เกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, ไม่เกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ	10.0	6.0	6.0

หมายเหตุ 1. สารปอชโซลานชั้นคุณภาพ N เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ

2. สามารถใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ที่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสู่ถึงร้อยละ 12 ได้ ถ้ามีผลของการใช้งานหรือผลของการทดสอบที่เชื่อถือได้

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลานเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

ข้อกำหนดทางเคมีเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ปริมาณอัลคาไลสูงสุดเมื่อเทียบเท่า $\text{Na}_2\text{O}$ , ไม่เกินร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ ใช้สำหรับระบุคอนกรีตที่มีมวลรวมทำปฏิกิริยาและต้องใช้ซีเมนต์ที่มีปฏิกิริยาอัลคาไลไม่เกินกำหนด

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

ข้อกำหนดทางกายภาพ	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
<b>ความละเอียด :</b> - ปริมาณที่ค้ำแรงเบอร์ 325 <sup>A</sup> ร่อนโดยใช้น้ำ, ไม่เกินร้อยละ <b>ดัชนีกำลัง เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</b> - ที่อายุ 7 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม 75 <sup>B</sup> - ที่อายุ 28 วัน อย่างต่ำร้อยละของส่วนผสมควบคุม 75 <sup>B</sup> - ความต้องการน้ำ, สูงสุดร้อยละของส่วนผสมควบคุม 115	34	34	34
<b>ความคงตัว (soundness)<sup>C</sup></b> - การขยายตัวหรือหดตัวอโตเคลฟ, ไม่เกินร้อยละ	0.8	0.8	0.8
<b>ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ<sup>D</sup></b> - ความหนาแน่น, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5
- ร้อยละที่ค้ำแรงเบอร์ 325, ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ	5	5	5

หมายเหตุ A ระวังไม่ให้มีผลละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้างบนร่ง

B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด

C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ชิ้นส่วนทดสอบของการขยายตัวอโตเคลฟควรมีสารปอซโซลานอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

D ความหนาแน่น (density) และความละเอียดของตัวอย่างต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้านี้หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้านี้ทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง

3) ชั้นคุณภาพ C (class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ (lignite) หรือซับบิ-ทูมินัส (subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618, (1991) เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำ ทำให้เถ้าลอย Class C นอกจากมี  $\text{SiO}_2$  ต่ำแล้ว ยัง  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำด้วย (ACI 232.2R-96, 2000)

เถ้าลอย Class C นอกจากจะมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง เนื่องจากมีปริมาณ CaO สูง เถ้าลอยแม่เมาะในระยะแรกส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอย CaO สูง โดยมีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 40 และมีความเป็นสารซีเมนต์ในตัวเอง (ปริญญา จินดาประเสริฐ

และอินทรชัย หอวิจิตร, 2548) แต่ในปัจจุบันถ้าลอยแม่เมาะมีปริมาณ CaO ต่ำลง โดยมีสารนี้อยู่ประมาณร้อยละ 10 (Parinya Chindaprasirt et al., 2001 and Chai Jaturapitakkul et al., 2004)

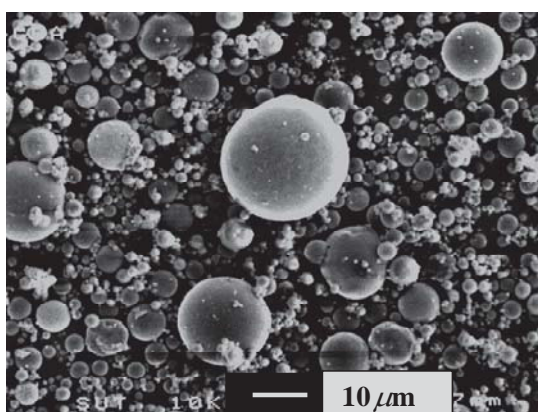
ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
แฟกเตอร์ผลคูณ (multiple factor) ของ LOI กับปริมาณที่ค้างแรงเบอร์ 325 เมื่อร่อนโดยใช้น้ำ, ไม่เกินร้อยละ		255	
การหดตัวแห้งที่ 28 วัน ที่เพิ่มขึ้นของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม, ไม่เกินร้อยละ	0.3	0.3	0.3
<b>ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ</b> เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศที่ทำให้มีปริมาตรอากาศร้อยละ 18 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้านี้หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้านี้ทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง, ไม่เกินร้อยละ	20	20	20
<b>ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลของมวลรวม</b> การขยายตัวของตัวอย่างที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ, ไม่เกินร้อยละ	100	100	100
<b>ประสิทธิภาพในการช่วยต้านทานสารซัลเฟต</b> วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ - สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ - สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ - เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ ทนซัลเฟตในสภาวะซัลเฟต 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ	0.10 0.05 100	0.10 0.05 100	0.10 0.05 100

วัสดุจำพวกปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีที่มาจาก 2 แหล่ง ซึ่งได้แก่ ปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ และปอซโซลานที่ได้จากขบวนการผลิต (artificial pozzolan) ปอซโซลานที่มาจากธรรมชาติ ได้แก่ ไคอะตอมมาเซียสเอิร์ธ หรือไคอะตอมไมท์ (diatomaceous earth or diatomite)

เถ้าภูเขาไฟ เปลือกหอย หินภูเขาไฟ วัสดุเหล่านี้เมื่อนำไปใช้งานจะต้องนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ ก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ เช่น กระบวนการเผา การบด และการทำให้แห้ง เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเอาปอซโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟต และช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างด่างกับซิลิกา นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้ในการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย

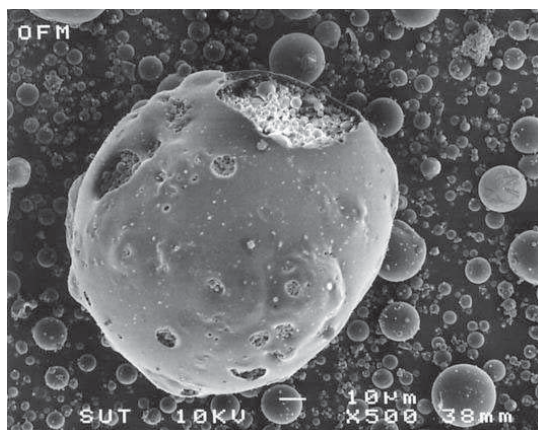
ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่ถูกบดในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคทรงกลม ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประมาณ 66 ถึง 68% เถ้าลอยบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับปูนขาวและด่าง เกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน แต่เถ้าลอยบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและแข็งตัวได้เช่นเดียวกัน เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยโดยลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 micron จนถึง 0.15 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง  
(ธีรวัฒน์ ลินศิริ, 2548)

เถ้าถ่านหินที่กลวงมีน้ำหนักเบาและอาจจะลอยน้ำได้เรียกว่าเถ้าถ่านหินกลวง (cenospheres) และในบางครั้งภายในเถ้าถ่านหินที่มีรูพรุนอาจมีเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ๆ อยู่ภายในก็ได้เรียกว่า plerospheres ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินจะขึ้นอยู่กับ การบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา ถ่านหินละเอียดมากขึ้นและเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผา จะได้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและมีทรงกลม แต่ในกรณีที่ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของเถ้าถ่านหินจะไม่แน่นอน สำหรับเถ้าถ่านหินในประเทศไทยพบว่า

ความละเอียดของเถ้านหินจากโรงไฟฟ้าที่แม่เมาะ ซึ่งทดสอบโดยวิธีของเบลน โดยมีความละเอียดอยู่ในช่วง 2,500 ถึง 3,500 cm<sup>2</sup>/g (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2543; สุรพล พฤษยานุกูล, 2546; Chindaprasirt, 2001 อ้างถึงใน ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)



รูปที่ 2.2 ภาพถ่าย SEM ของเถ้านหินที่มีลักษณะแบบ Plerospheres (ธีรวัฒน์ สินศิริ, 2548)

การวัดความละเอียดของเถ้านหินมี 2 วิธีที่นิยมใช้กันคือวิธีการร่อนผ่านแรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 micron) กับวิธีวัดพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักโดยวิธีของเบลน ในสหรัฐอเมริกาใช้วิธีการร่อนผ่านแรงเป็นวิธีมาตรฐานวิธีเดียวในการกำหนดความละเอียดของเถ้านหิน กล่าวคือ เถ้านหินต้องมีขนาดของอนุภาคที่ร่อนผ่านแรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก เถ้านหินที่ละเอียดขึ้นจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นและทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้านหินที่หยาบกว่า ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถวัดได้โดยใช้ค่าดัชนีกำลัง (strength activity index) ดังแสดงในสมการที่ 2.5

$$\text{ดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์} = (A/B) \times 100 \quad (2.5)$$

โดย A = กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้านหินร้อยละ 20  
B = กำลังอัดของมอร์ต้าร์มาตรฐานซึ่งไม่มีเถ้านหินในส่วนผสม

มาตรฐาน ASTM C 618 ได้กำหนดค่าดัชนีกำลังของเถ้านหินทั้ง Class F และ Class C ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่อายุ 7 หรือ 28 วัน

ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าถ่านหินจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีการยึดประสานดีขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเถ้าถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้น (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)

การใช้ปอซโซลานในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้ปอซโซลานจะมีข้อเสียด้วย คือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสถานะการแข็งตัวและละลายน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพิ่มฟองอากาศมากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่ (Lane and Best, 1982 อ้างถึงใน ปริญา จินดาประเสริฐ, 2547)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าประโยชน์สูงสุดของเถ้าลอยคือ การสร้างเขื่อน ซึ่งที่เห็นอย่างเป็นรูปธรรม คือ โครงการเขื่อนคลองท่าด่าน นอกจากนั้นเป็นการนำเถ้าลอยมาใช้ในการทำตอม่อของอาคารผู้โดยสารที่สนามบินสุวรรณภูมิ โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ประมาณ 50% ทั้งนี้ผู้ใช้งานจะต้องมีความรู้และสามารถทดสอบคุณสมบัติของเถ้าลอยว่าสามารถนำมาใช้งานได้จริง ๆ รวมทั้งการสร้างท่อน้ำเสีย ซึ่งหากนำเถ้าลอยเป็นส่วนผสมในการผลิตท่อน้ำเสีย จะทำให้ท่อน้ำเสียการใช้งานยืนยาวมากกว่าท่อปกติหลายเท่า เนื่องจากท่อที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะมีคุณสมบัติต้านทานน้ำเสียได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา อีกทั้งการก่อสร้างในโครงการขนาดใหญ่หรือตึกสูง คอนกรีตที่ใช้ควรจะมีส่วนผสมของเถ้าลอย เพื่อให้เนื้อคอนกรีตลื่นไหลสามารถส่งลำเลียงคอนกรีตด้วยท่อขึ้นไปตามชั้นต่าง ๆ ของการก่อสร้างได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป

ที่ผ่านมามีการนำเข้าเถ้าลอยจากต่างประเทศ เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยในขณะนั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่ามีปัญหาหรือไม่ เช่น ค่าซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เมื่อช่วงที่ทำวิจัยแรก ๆ พบว่ามีค่าสูงถึง 12 ถึง 15% ซึ่งตามปกติ จะต้องไม่เกิน 3% จึงไม่แน่ใจว่าจะสามารถนำเถ้าลอยมาใช้ได้ เพราะเกรงว่าจะเสี่ยงต่อการก่อสร้างอาคารสูง แต่ปัจจุบันมั่นใจคุณภาพของเถ้าลอยได้ เนื่องจากค่า  $\text{SO}_3$  ไม่เกิน 2% (จิรภัทร ขำญาติ, 2546)



## 2.2 ปอชโซลานธรรมชาติ

วัสดุปอชโซลานธรรมชาติได้ถูกนำมาใช้หลายร้อยปีมาแล้ว คำว่า “ปอชโซลาน” มาจากถ้ำภูเขาไฟของหมู่บ้านปอซซูลิ (pozzuoli) ใกล้กับเมืองเนเปิล ประเทศอิตาลี โดยในปีคริสต์ศักราช 79 เกิดการระเบิดของภูเขาไฟวิซุเวียส (viesuvius) แต่อย่างไรก็ตามก่อนคริสต์ศักราช 2000 ได้มีการนำถ้ำภูเขาไฟและดินเฝ้า มาใช้ในงานก่อสร้างมากมายที่ โรม กรีก อินเดีย และอียิปต์ โดยโครงสร้างคอนกรีตผสมวัสดุปอชโซลานยังคงสามารถยืนหยัดให้เห็นได้จนถึงปัจจุบันนี้จึงเป็นหลักฐานแสดงให้เห็นถึงความทนทานของการใช้วัสดุปอชโซลาน ต่อมาในต้นศตวรรษที่ 20 ได้มีการนำวัสดุปอชโซลานธรรมชาติมาใช้ในอเมริกาเหนือ ในโครงการก่อสร้างสาธารณูปโภค เช่น การสร้างเขื่อน ซึ่งการใช้วัสดุปอชโซลานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตขนาดใหญ่ และเป็นการเพิ่มปริมาณวัสดุซีเมนต์ นอกจากการใช้วัสดุปอชโซลานเพื่อควบคุมความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นแล้ว วัสดุปอชโซลานยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อซัลเฟตอีกด้วย วัสดุปอชโซลานเป็นวัสดุชนิดแรกๆที่พบว่าช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา ในคอนกรีต ปัจจุบันวัสดุปอชโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่จะผ่านการปรับปรุง เช่น กระบวนการให้ความร้อนในเตาเผาและบดเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจเป็นดินเฝ้า (calcined clay) ดินดานเฝ้า (calcined shale) และดินขาว (metakaolin) ซึ่งดินขาวที่กล่าวถึงนี้เป็นดินเฝ้าพิเศษ ผลิตโดยเอาดินเหนียวขาวล้วนมาเผาที่อุณหภูมิต่ำ หลังจากนั้นจึงบดจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ถึง 2 micron ดินขาวนำมาใช้ในงานที่ต้องการความซึมผ่านที่ต่ำ หรือต้องการกำลังที่สูง ดินขาวได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีตมากกว่านำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปจะใส่เพิ่มในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของเถ้าลอยและปอชโซลานธรรมชาติ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

Class F	เถ้าลอย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอชโซลานิก
Class C	เถ้าลอย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปอชโซลานิก และวัสดุประสานในซีเมนต์
Class N	<p>ปอชโซลานธรรมชาติที่ถูกเผาหรือมีลักษณะหยาบ ประกอบด้วย :</p> <p>Diatomaceous Earths (diatomite)</p> <p>Opaline Cherts และ ดินดาน</p> <p>Tuffs และ ถ้ำภูเขาไฟ หรือพิมิไซท์</p> <p>ดินเฝ้า รวมทั้งดินขาว และดินดาน</p>



วัสดุปอชโซลานจากธรรมชาติถูกจำแนกโดยมาตรฐาน ASTM C 618 โดยจำแนกเป็นวัสดุปอชโซลาน Class N ดังตารางที่ 2.6 ซึ่งได้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาวัสดุปอชโซลานธรรมชาติ ส่วนตารางที่ 2.7 แสดงผลการวิเคราะห์ทางเคมีและคุณสมบัติของวัสดุปอชโซลาน และวัสดุปอชโซลานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง (จันทนา สุขุมานนท์, 2550)

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ทางเคมี และคุณสมบัติทั่วไปของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟุ้ง ดินดานเผาและดินขาว (จันทนา สุขุมานนท์, 2550)

สารประกอบ	ปริมาณสารประกอบ (%)					
	เถ้าลอย Class F	เถ้าลอย Class C	ตะกรัน บด	ซิลิกา ฟุ้ง	ดินดาน เผา	ดินขาว
SiO <sub>2</sub>	52	35	35	90	50	53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23	18	12	0.4	20	43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11	6	1	0.4	8	0.5
CaO	5	21	40	1.6	8	0.1
SO <sub>3</sub>	0.8	4.1	9	0.4	0.4	0.1
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	5.8	0.3	0.5	-	0.05
K <sub>2</sub> O	2.0	0.7	0.4	2.2	-	0.4
Total Na (eq. Alk)	2.2	6.3	0.6	1.9	-	0.3
Loss On Ignition (LOI)	2.8	0.5	1.0	3.0	3.0	0.7
Blaine Fineness, cm <sup>2</sup> /g	4,200	4,200	4,000	200,000	7,300	190,000
Relative Density	2.38	2.65	2.94	2.40	2.63	2.50

เมื่อนำดินไปผ่านกระบวนการเผาก็สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลานธรรมชาติในงานก่อสร้างได้เช่นกัน ซึ่งจากรายงานของ จันทนา สุขุมานนท์ (2550) พบว่า ดินเผาสามารถเอามาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน โดยทั่วไปจะใช้แทนที่ในช่วงประมาณระหว่าง 15 ถึง 35% เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานต่อสารละลายซัลเฟต ควบคุมปฏิกิริยาระหว่างอัลคาไลกับมวลรวม และลดค่าการซึมผ่านของน้ำ ดินเผามีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.40 ถึง 2.61 และมีความละเอียดด้วยวิธีเบลนประมาณ 6,500 ถึง 13,500 cm<sup>2</sup>/g ส่วนดินดานเผามีปริมาณแคลเซียม 5 ถึง 10% ซึ่งค่าแคลเซียมที่มีอยู่ทำให้วัสดุนั้นมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานหรือเป็นไฮดรอลิกซีเมนต์ (hydraulic cement) ในตัวเอง เนื่องจากปริมาณของกากแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นเผาไม่สมบูรณ์ และดินดานเผามีปริมาณโมเลกุลน้ำในเม็ดดินสะสมอยู่จึงทำให้มีค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On

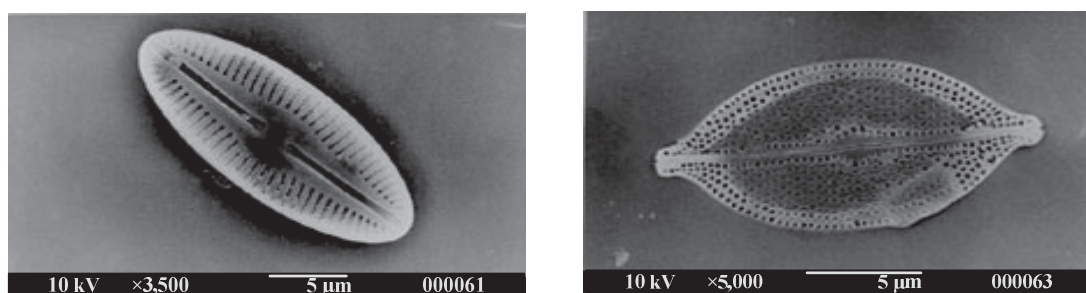
Ignition, LOI) ค่อนข้างมาก คือ มีค่า LOI ประมาณ 1 ถึง 5% โดยค่า LOI สำหรับดินดานเผาไม่ได้ แสดงปริมาณคาร์บอนเหมือนกับกรณีของถ่านลอย

จากงานวิจัยในอดีตในเรื่องของการนำเอาปอชโซลานธรรมชาติมาใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตของ Shannag and Shania (2003) ที่ศึกษาความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตสมรรถนะสูง (sulfates resistant of high-performance concrete, HPC) โดยได้มีการออกแบบส่วนผสมของ HPC จำนวน 5 ส่วนผสม แล้วแช่ตัวอย่างมอร์ตาร์ในสภาวะรุนแรงต่าง ๆ ได้แก่ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (magnesium sulfates,  $MgSO_4$ ) และสารละลายโซเดียมซัลเฟต (sodium sulfates,  $NaSO_4$ ) ที่ความเข้มข้น 20% และยังเปรียบเทียบการแช่ในน้ำทะเล จากทะเลแดง (Red Sea) น้ำจากทะเลเดดซี (Dead Sea) และน้ำธรรมชาติ โดยในแต่ละสภาวะได้ทำการทดลองกับส่วนผสมของ HPC ทั้ง 5 ส่วนผสม และทำการทดสอบกำลังอัด จากการวิจัยได้พบว่า หลังจากแช่ตัวอย่างทดสอบในสารละลายซัลเฟตและในน้ำทะเลที่สภาวะต่าง ๆ คอนกรีตผสมซิลิกาฟูม 15% และสารปอชโซลานธรรมชาติ 15% มีความสามารถในการต้านทานซัลเฟตได้สูงที่สุด สำหรับ HPC ที่ผสมซิลิกาฟูม และสารปอชโซลานธรรมชาติ มีความเหมาะสมทั้งในด้านกำลังอัดและความทนทาน โดยแนะนำให้ใช้กับคอนกรีตในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการกำลังและความทนทานสูง ส่วน HPC ที่มีเฉพาะปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาประเภทที่ 1 นั้น มีความทนทานต่อซัลเฟตและน้ำทะเลต่ำ

Pekmezci and Akyc (2004) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณปอชโซลานธรรมชาติที่มีต่อคอนกรีต ศึกษาโดยการทดสอบคอนกรีตทั้งหมด 15 ส่วนผสม โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตควบคุมที่มีปริมาณซีเมนต์ 300, 350 และ 400  $kg/m^3$  และได้ดัดแปลงส่วนผสมเพื่อศึกษาเปรียบเทียบโดยลดปริมาณซีเมนต์ลงเป็น 250, 300 และ 350  $kg/m^3$  ของคอนกรีตควบคุม และได้เพิ่มปริมาณปอชโซลานธรรมชาติเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ 40, 50, 75 และ 100  $kg/m^3$  และได้พบว่าการเพิ่มปริมาณสารปอชโซลานธรรมชาติที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดต่ำลง จึงควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้กำลังอัดของคอนกรีตที่สูงที่สุด และ Pekmezci (2004) ยังพบอีกว่า ในกรณีที่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม แล้วแทนที่ด้วยปอชโซลานธรรมชาตินั้น ส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเช่นกัน เนื่องจากปอชโซลานธรรมชาติไม่มีคุณสมบัติในการเป็นสารซีเมนต์ (cementitious material) และเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าสารปอชโซลานธรรมชาติจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดจากผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเช่นกัน ในกรณีนี้ถ้าต้องการเพิ่มปริมาณปอชโซลานในส่วนผสมก็ควรที่จะเพิ่มปริมาณซีเมนต์ให้มากขึ้นด้วย จึงจะส่งผลทำให้การใช้ปริมาณปอชโซลานในปริมาณที่มากมีประสิทธิภาพได้ โดยที่อัตราส่วนระหว่าง Pozzolan ต่อ Cement, (P/C) ratio ที่ 0.28 เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

## 2.3 ไดอะตอมไมท์

ไดอะตอม (diatom) เป็นพืชเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก มีผนังเป็นฝาสิลิกาประกบกัน บางชนิดว่ายน้ำได้ บางชนิดอาศัยกระแสน้ำพัดพาไป มีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 2,000 micron ขนาดใหญ่มีน้อย พบในแหล่งน้ำทั่วโลกทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม เมื่อไดอะตอมตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกเป็นตะกอนสะสมกันจำนวนมากหาศาลบนพื้นทะเลหรือพื้นทะเลสาบ แล้วในที่สุดจะกลายเป็นไดอะตอมไมท์ (diatomite) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ดินเบา (diatomaceous earth) เพราะมีลักษณะเป็นดิน เกิดจากซากไดอะตอมในแหล่งอะตอม เป็นดินซุย เบา เนื้อพรุน มีลักษณะคล้ายขอล็ก มีปฏิกิริยาเชิงซ้ำ และเป็นตัวนำความร้อนที่เลว ไดอะตอมไมท์จะมีลักษณะต่าง ๆ กัน ตามแต่ชนิดของไดอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (เสรีวัฒน์ สมิทธิ์ปัญญา, 2538)



รูปที่ 2.3 ลักษณะของไดอะตอมไมท์ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ออนไลน์, 2543)

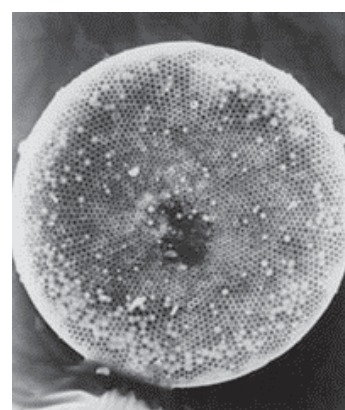
ไดอะตอมไมท์บางทีอาจใช้คำว่า เรดิโอลาเรียนเอิร์ธ (radiolarian earth) เพราะมีโครงสร้างประกอบด้วยโอปอของไดอะตอมและเรดิโอลาเรียน มีสีขาวหรือสีครีมเป็นส่วนใหญ่ แต่ก็อาจพบสีเหลืองอ่อน สีแดง หรือสีน้ำตาลบ้าง (เสรีวัฒน์ สมิทธิ์ปัญญา, 2538) แต่บางครั้งก็พบว่าไดอะตอมไมท์เป็นซากสัตว์ขนาดเล็กที่เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว หรือเป็นสาหร่ายเซลล์เดียวที่มีเปลือกหุ้มที่เป็นซิลิกา เปลือกเหล่านี้เมื่อทับถมกันมาก ๆ จะสามารถคงสภาพของซากอยู่ในชั้นหินได้เป็นเวลานาน จนแข็งตัวอัดกันแน่นจนกลายเป็นหิน (สสวท., ออนไลน์, 2550)

แหล่งดินเบาในประเทศไทยพบอยู่ในจังหวัดลำปาง โดยจะพบเป็นแหล่งเล็กใหญ่กระจายอยู่เป็นบริเวณกว้างในแอ่งลำปาง และแอ่งเล็ก ๆ ใกล้เคียง ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตอำเภอเมืองลำปาง อำเภอแม่ทะ และอำเภอเกาะคา นอกจากนั้นยังสามารถพบได้บ้างในบริเวณบ้านแม่กั่ว อำเภอสบปราบ และบ้านทุ่งคูน ตำบลวอแก้ว อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง จากการสำรวจของกองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี บริเวณแอ่งลำปาง สามารถประเมินปริมาณสำรองของ

ดินเผาได้ทั้งหมดประมาณ 245 ล้านตัน (กรมทรัพยากรธรณี, ออนไลน์, 2548) จากรายงานของสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้มีการเก็บตัวอย่างสำรวจในบริเวณเหมืองบ้านฟอน จังหวัดลำปาง พบว่าชั้นของไคอะตอมไมท์จะทับถมยึดกันแน่นอยู่ใต้ชั้นกรวดทราย ซึ่งมีระดับความลึกไม่ต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) และเมื่อนำไคอะตอมไมท์ไปถ่ายภาพขยาย 350 เท่า ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) แล้วทำการตรวจสอบ พบว่าไคอะตอมไมท์มีอายุตั้งแต่ 25 ล้านปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน และยังรายงานอีกว่าสามารถพบได้ในชั้นตะกอนบริเวณที่ลุ่มอำเภอศรีมโหสถ จังหวัดปราจีนบุรี อีกด้วย (สสวท., ออนไลน์, 2550)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 (ก) แสดงชั้นของไคอะตอมไมท์ (สสวท., ออนไลน์, 2550)

(ข) ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์ (สสวท., ออนไลน์, 2550)

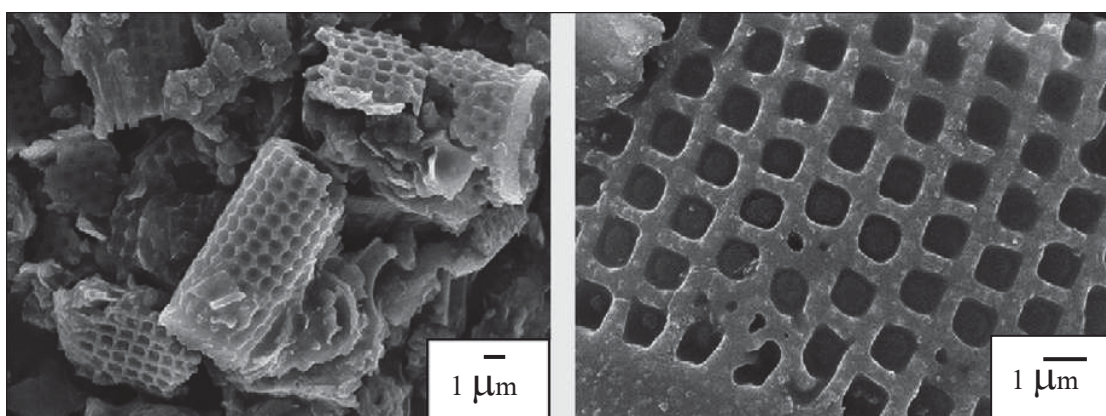
โดยทั่วไปไคอะตอมไมท์มีประโยชน์ในทางด้านอุตสาหกรรม คือ ใช้เป็นส่วนผสมในการทำกระดาษ เพื่อให้เนื้อกระดาษแน่นเนียน ทำเป็นฉนวนและเป็นสารที่ใช้ในการกรองได้ดี เช่น กรองน้ำตาลและสารอื่น ๆ หรือใช้ขัดโลหะได้ดีเพราะมีซิลิกาที่มีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ภายใน (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538) หรือใช้ในอุตสาหกรรม ดั้มกลั่น ทำปูนขาว และเซรามิก เป็นต้น (สสวท., ออนไลน์, 2550)

ไคอะตอมไมท์ไม่ใช่เพียงแต่มีประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมเพียงเท่านั้น แต่ในการก่อสร้างก็ยังมีการนำเอาไคอะตอมไมท์มาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น นำมาใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา หรืออิฐมวลเบา เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาของ Kedrarin Pimraksa และ Prinya Chindaprasirt (2008) ได้รายงานว่า ไคอะตอมไมท์ (ดินเบาลำปาง) จากจังหวัดลำปาง ประเทศไทย

มีปริมาณค่อนข้างมากถึง 100 ล้านตัน จึงได้ทดลองทำการศึกษาคุณสมบัติของอิฐมวลเบาที่ทำจากไคอะตอมไมท์ลำปาง ปูนขาว และยิปซัม เป็นส่วนผสม เนื่องจากได้พบว่าไคอะตอมไมท์จากแหล่งลำปางมีคุณสมบัติในการเป็นสารปอซโซลานสามารถนำมาทำอิฐมวลเบาได้ เนื่องจากมีสารประกอบออลูมิโนซิลิเกต โดยมีปริมาณออกไซด์หลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ในปริมาณที่เหมาะสม และยังมีความพรุนสูง เช่นเดียวกับสารปอซโซลานธรรมชาติทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.7 และ รูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

Oxide Compositions	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SO}_3$
(%) by mass	77.5	14.16	5.24	2.08	0.20	0.00	0.46	0.53	0.25	0.01

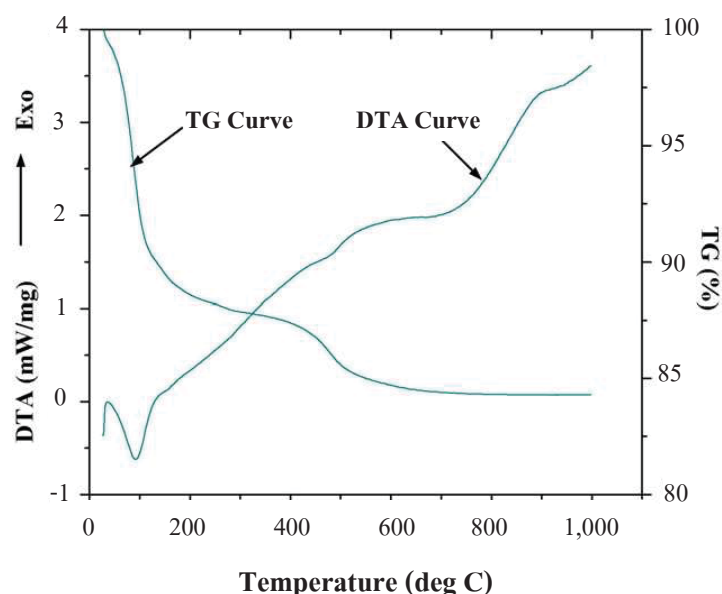


รูปที่ 2.5 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

ไคอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง มีปริมาณออกไซด์หลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มีค่า 77.5, 14.6 และ 5.24% ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าไคอะตอมไมท์นี้จัดเป็นปอซโซลานธรรมชาติ Class N ตามการจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C 618 และจากภาพถ่าย SEM จะเห็นอนุภาคที่มีลักษณะแบบทรงกระบอก ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) ประมาณ  $32\text{ }\mu\text{m}$  มีโครงสร้างผนังเป็นตารางคล้ายรวงผึ้ง ขนาดของช่องประมาณ  $1\text{ }\mu\text{m}$  มีพื้นที่ผิวที่สูงถึง  $170,000\text{ cm}^2/\text{g}$  จึงทำให้ไคอะตอมไมท์นี้มีน้ำหนักเบาและมีความพรุนสูง และจากกราฟ Differential Thermal Analysis (DTA) และ Thermal Gravity Analysis (TGA) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ของไคอะตอมไมท์ลำปางที่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ



500°C จะทำให้น้ำหนักที่เบาลง มีค่าการสูญเสียน้ำหนักในช่วง 450 ถึง 500°C และจะค่อย ๆ คงที่เมื่ออุณหภูมิเกินกว่า 500°C โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ 0.7



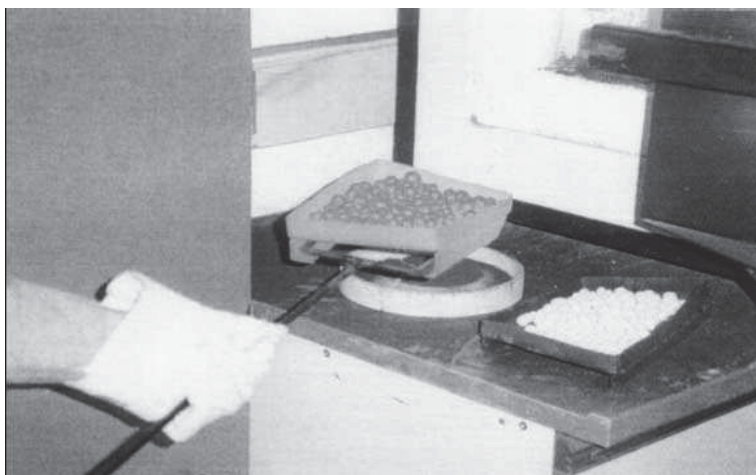
รูปที่ 2.6 กราฟ DTA และ TGA ของไคอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

การศึกษาของ Kedsarin Pimraksa (2008) ได้นำไคอะตอมไมท์มาผสมกับปูนขาวร้อยละ 15 และยิปซัมร้อยละ 5 หล่อตัวอย่างขนาด 3.5×7.5×15 cm และใช้เครื่องอัดเข้าแบบที่มีแรงกดอัดประมาณ 35 ksc บ่มที่อุณหภูมิห้องระหว่าง 27 ถึง 28°C โดยแปรผันระยะเวลาการบ่ม 3, 5, 6, 7 และ 11 วัน และบ่มด้วยตู้อบไอน้ำความดันสูง (autoclave) ที่ความดันประมาณ 0.14 MPa อุณหภูมิ 130°C ต่ออีก 4 ชั่วโมง จากผลการทดสอบพบว่าส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำ 50% ได้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด 147.8 ksc และมีหน่วยน้ำหนัก 1,020 kg/m<sup>3</sup> ที่อายุการบ่ม 6 วัน แต่เมื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่านี้จะให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่า เนื่องจากเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สามารถทำให้อิฐที่ทำจากไคอะตอมไมท์นี้มีความหนาแน่นมากที่สุด จึงส่งผลให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัด และภาพถ่าย SEM ของอิฐที่ทำการแปรผันการเผาไคอะตอมไมท์ที่อุณหภูมิ 0, 200, 350, 500 และ 700°C พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาไคอะตอมไมท์ที่สามารถทำได้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด คือ 500°C มีค่ากำลังอัด 177.4 ksc ค่าหน่วยน้ำหนัก 730 kg/m<sup>3</sup> และมีโครงสร้าง phases ที่ดีกว่า แต่เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น 700°C จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง เหลือเพียง 127.4 ksc และมีโครงสร้าง phases ไม่ค่อยหนาแน่นเท่าที่ควร ซึ่งน่าจะเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิในการเผาที่สูงเกินไปอาจจะทำให้ปริมาณสารประกอบหลักบางอย่างใน

ไคอะตอมไมท์สูญเสียไปด้วย อย่างไรก็ตามในการทำอิฐที่มีส่วนผสมของไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านการเผาเลยก็สามารถทำได้ โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 147.8 ksc และมีหน่วยน้ำหนัก  $880 \text{ kg/m}^3$

งานวิจัยในต่างประเทศก็มีการนำไคอะตอมไมท์มาใช้ในการงานคอนกรีตมวลเบาเช่นกัน โดยจากงานวิจัยของ Fragoulisa et al. (2004) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมมวลรวมเบา (lightweight aggregates) ในคอนกรีตมวลเบา ซึ่งใช้ไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์มวลรวมเบา (production of lightweight aggregates, LWAs) โดยนำไคอะตอมไมท์ที่มีขนาดเล็กกว่า  $100 \mu\text{m}$  และขี้เลื่อยคิบ (saw dust) ขนาดประมาณ 1 mm ผสมไคอะตอมไมท์ 20 kg ผสมกับขี้เลื่อยคิบที่ปริมาณ 2, 3.5 และ 5% ใช้ปริมาณน้ำต่อขี้เลื่อยคิบ ( $W/S \leq 0.5$ ) จากนั้นปั้นเป็นก้อนกลม (pellets) ขนาด 5 ถึง 20 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $1,100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ถึง 15 นาที และทำการทดสอบเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์มวลรวมเบา LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน



รูปที่ 2.7 ผลิตภัณฑ์มวลรวมเบา (production of lightweight aggregates, LWAs)  
ของ (Fragoulisa et al., 2004)

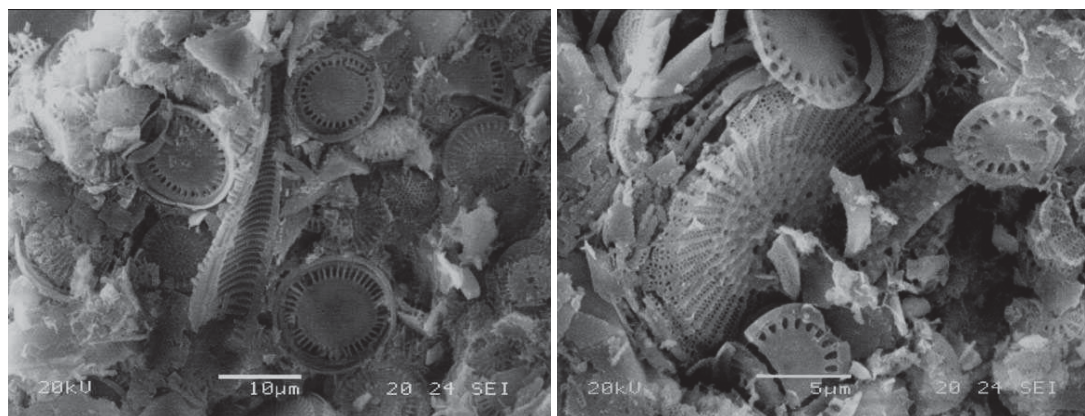
จากผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence (XRF) ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ พบว่ามีปริมาณออกไซด์หลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  รวมกันแล้วมากกว่า 70% ดังแสดงในตารางที่ 2.9 และมีค่า LOI ไม่มากกว่า 10% ซึ่งค่า LOI ที่สูญเสียไปนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียน้ำเนื่องจากการเผา เพราะไคอะตอมไมท์เกิดขึ้นจากการทับถมเป็นเวลานานจึงมีส่วนประกอบของดินเหนียวปะปนอยู่ รวมทั้งผนังเซลล์ของไคอะตอมไมท์ประกอบด้วยซิลิกาที่มีปริมาณน้ำ ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) อยู่ด้วย และจะมีปริมาณมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของผนังเซลล์ และจากการทดสอบ

SEM ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ พบว่ารูปแบบของผนังเซลล์ที่ประกอบด้วยซิลิกานั้นค่อนข้างสมบูรณ์ มีลักษณะทรงกระบอก แบบจาน หรือคล้ายเรือ มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 30  $\mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004)

Component	GRE-1 (%)	GRE-3 (%)
Na <sub>2</sub> O	1.28	0.48
K <sub>2</sub> O	2.58	1.92
CaO	1.82	1.35
MgO	1.79	1.81
MnO	n.a.	n.a.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.08	5.90
TiO <sub>2</sub>	n.a.	n.a.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.83	16.68
SiO <sub>2</sub>	59.52	64.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	n.a.	n.a.
LOI	7.37	8.06
Total	100.27	100.20

n.a. = not analysed.



รูปที่ 2.8 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004)



ตัวอย่าง LWAs ของประเทศกรีซที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วส่วนใหญ่จะยังคงรูปร่างเป็นทรงกลมเช่นเดิม มีสีน้ำตาลแดง เนื้อสีเป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน แต่มีบางก้อนที่มีลักษณะคล้ายหัวกะหล่ำปลี และจากการเผาทำให้ pellets บางก้อนขยายตัวเป็นรูเล็ก ๆ หรือมีรอยแยกเล็ก ๆ ที่ผิว และจากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดและความหนาแน่นพบว่ามีความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกับ LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน และในบางอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมทั้งขนาดและส่วนผสม ผลิตภัณฑ์ LWAs ของกรีซ จะได้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าและสามารถรับแรงกดได้ดีกว่า LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน คือ ที่อัตราส่วนที่ใช้ไคอะตอมไมท์ 20 kg ปริมาณจีเลียดิบ 5% อัตราส่วน W/S น้อยกว่า 0.5 สามารถรับแรงกดได้ 2,029 g มีค่าความหนาแน่น  $0.93 \text{ g/cm}^3$  โดยที่ LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน สามารถรับแรงกดได้เพียง 580 g และ 986 g มีค่าความหนาแน่น  $0.65 \text{ g/cm}^3$  และ  $0.73 \text{ g/cm}^3$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างความสามารถในการรับแรงกดกับค่าความหนาแน่นแล้วพบว่า LWAs ของประเทศกรีซมีคุณสมบัติในการรับแรงกดที่ดีกว่า LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน ที่ขนาดเท่ากัน คือ ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ถึง 10 mm ส่วนค่าความพรุนจะมีค่าลดต่ำลงและมีการกระจายตัวของช่องว่างดีกว่า ลักษณะของโพรงมีทั้งขนาดเล็กแบบเหลี่ยมคมและกลมมน คล้ายรวงผึ้ง มีขนาดตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 500 micron และมีโครงสร้างที่เป็นแบบอสัณฐาน

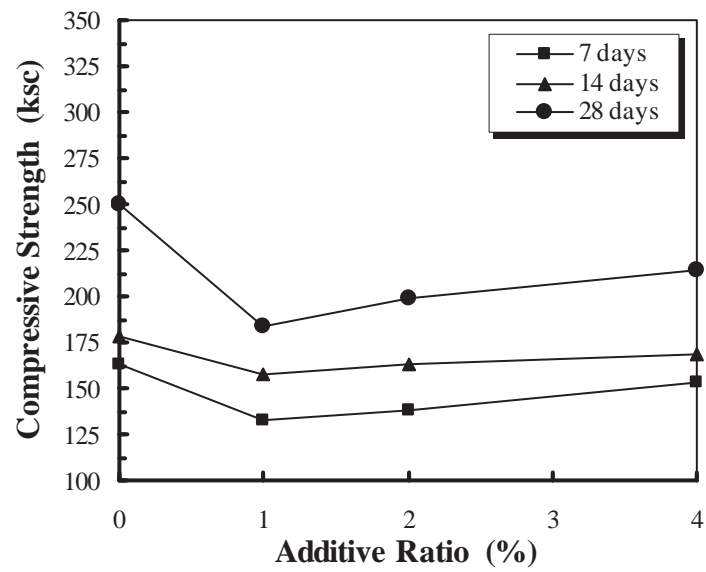
เมื่อทำการเปรียบเทียบจากงานวิจัยของ Pimraksa (2008) ทำให้ทราบว่าไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งจะมีรูปร่างและปริมาณออกไซด์หลักที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทับถม แหล่งกำเนิด และชนิดของไคอะตอม ดังนั้นในการศึกษาควรคำนึงถึงทั้งลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งกำเนิด รวมถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่ดีของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

Aydin and Gul (2007) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการก่อตัว และคุณสมบัติเชิงกลบางประการของคอนกรีต ที่เกิดจากการนำวัสดุธรรมชาติที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟมาใช้ในการส่วนผสม ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมท์ กับหินพัมมิช โดยนำวัสดุ 2 ชนิด แทนที่ซีเมนต์ 1, 2 และ 4% ใช้คอนกรีตควบคุมที่ถูกออกแบบโดยมาตรฐาน ACI ที่มีปริมาณซีเมนต์  $300 \text{ kg/m}^3$  ค่ายุบตัวเฉลี่ย 5 cm และเมื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 2.10 พบว่าไคอะตอมไมท์ มีปริมาณสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เมื่อรวมกันแล้วมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติในการเป็นวัสดุพอซโซลาน

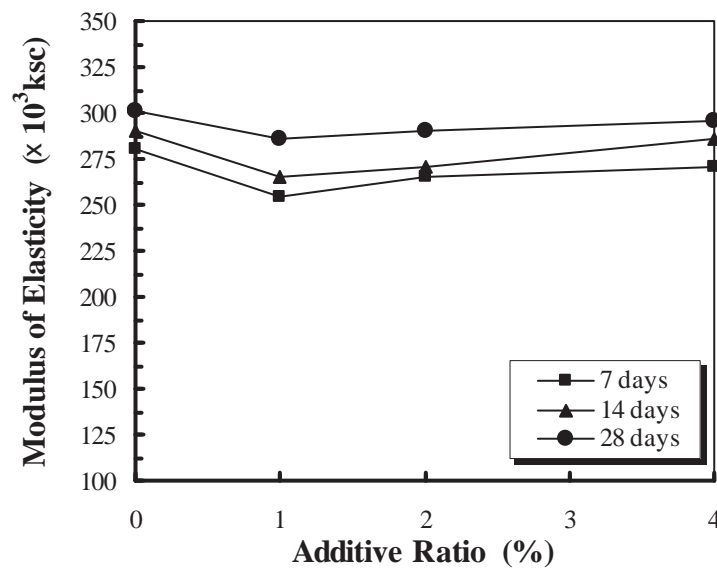
ตารางที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไดอะตอมไมท์ประเทศตุรกีกับปูนซีเมนต์ (Aydin and Gul, 2007)

Component	Cement (%)	Diatomite (%)
$\text{SiO}_2$	17.69	77.14
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3.59	1.6
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.89	3.9
CaO	57.69	1.96
MgO	3.39	1.2
$\text{SO}_3$	2.57	-
$\text{K}_2\text{O}$	0.3	-
$\text{TiO}_2$	0.2	-

จากข้อมูลผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ Aydin (2007) ด้านกำลังอัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้ไดอะตอมไมท์ในส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ไดอะตอมไมท์ผสมเพิ่มเข้าไปในส่วนผสม 1, 2 และ 4% จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลงเหลือเพียง 73.5, 79.6 และ 85.7% และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเหลือเพียง 90.9, 96.6 และ 98.3% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างปริมาณการผสมเพิ่มทั้งสามกับคอนกรีตควบคุม พบว่าค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณไดอะตอมไมท์เพิ่มขึ้น อีกทั้งกำลังอัดจะแปรผันตามอายุการบ่มและมีการพัฒนากำลังอัดที่ดีกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ของไดอะตอมไมท์ ที่มีอยู่ในส่วนประกอบมากถึง 77.14% ที่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในช่วงอายุการบ่มที่สูงขึ้น และยังพบอีกว่าการเพิ่มปริมาณไดอะตอมไมท์จะส่งผลให้ความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้นและขึ้นปลายสูงขึ้นเนื่องจากไดอะตอมไมท์มีพื้นที่ผิวมากและอนุภาคค่อนข้างละเอียด



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม  
(Aydin and Gul, 2007)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม  
(Aydin and Gul, 2007)

## 2.4 เพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์ หมายถึงหินภูเขาไฟเนื้อแก้วทุกชนิด เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ในเวลาที่รวดเร็วจะขยายตัว มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง หินเพอร์ไลต์ ดังรูปที่ 2.11 ได้แก่ หินภูเขาไฟเนื้อแก้ว ที่มีลักษณะรอยแตกเป็นวงซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม และเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาที่รวดเร็วจะขยายตัวออกไปได้ ตั้งแต่ 4 ถึง 20 เท่าของปริมาตรเดิม ทำให้เปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูง และมีลักษณะคล้ายหินพัมมิส สารที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลต์นี้ เรียกว่า “เพอร์ไลต์” (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของหินเพอร์ไลต์ (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีรา และคณะ, ออนไลน์, 2547)

เพอร์ไลต์ที่พบในประเทศไทยมี 3 ชนิด คือ

- 1) สีเขียวแถบแดง (banded perlite) เพอร์ไลต์สีเขียวเนื้อประสานอัดแน่น จุดสีขาวทั่วไป คือ Feldspar เนื้อเดิมเป็น Glass แล้วแปรสภาพมาเป็นแถบแดง ๆ ที่เรียกว่า Red Devitrification Product
- 2) เพอร์ไลต์สีเขียว (classical perlite) เป็นเพอร์ไลต์เนื้ออัดแน่นมีผลึกสีเขียว ถ้าดูด้วยกล้องขยายจะพบรอยแตกกร้าวโค้งไปโค้งมา คือ Perlite Crack และยังมีจุดขาว Feldspar รวมอยู่ด้วย แร่เพอร์ไลต์ชนิดนี้ถือว่ามีความปลอดภัย ขยายตัวได้สูง แต่อุณหภูมิการขยายตัวอาจแตกต่างกัน
- 3) เพอร์ไลต์สีขาว (pumicious perlite) ประกอบไปด้วยเส้นใยของแก้ว (glass fiber) สีค่อนข้างขาว มีรูพรุนสูง อาจมี Feldspar ปะปนอยู่ด้วยเล็กน้อย และมีการขยายตัวอยู่บ้างเล็กน้อย

### 2.4.1 ลักษณะการเกิดของหินเพอร์ไลต์

เพอร์ไลต์จัดอยู่ในประเภทหินอัคนีพุ มีเนื้อละเอียดเป็นแก้ว เนื่องจากเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของหินหนืด เป็นแร่องค์ประกอบร่วมกับหินไรโอไลต์ ที่เกิดในระดับดิน และมี

การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว บริเวณที่พบในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดลพบุรี และกาญจนบุรี ประโยชน์ใช้เป็นส่วนผสมวัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบา และเป็นส่วนเติมเต็มในอุตสาหกรรมปุ๋ยและอุตสาหกรรมสี (ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีรา และคณะ, ออนไลน์, 2547)

หินเพอร์ไลต์เกิดเป็น Effusive Rock แทรกเข้ามาในชั้น Pumicious Tuffs ซึ่งเข้าใจว่าจะมีน้ำอยู่ในรูปฟองค่อนข้างมาก ภายหลังจากที่ Magma แทรกเข้ามาและเย็นตัวเป็นแก้วภูเขาไฟแล้ว น้ำที่อยู่ในชั้น Tuff จะค่อย ๆ แทรกซึมลงไปรวมกับแก้วภูเขาไฟ ซึ่งแต่เดิมมีน้ำอยู่เพียง 1 ถึง 2% กลับเพิ่มมากขึ้นเป็น 3 ถึง 5% พร้อม ๆ กับเกิดการขยายตัว และแตกเป็นรูปเปลือกของหัวหอม (peritic crack) ขึ้น สำหรับ Pumicious Perlite มีลักษณะการเกิดที่แสดงให้เห็นถึงการถูกความกดดันและการระเหยหนีไปของ Volatile ที่ละลายปนอยู่ใน Magma ขณะเคลื่อนตัวขึ้นมาใกล้ผิวโลก ด้วยขณะที่เกิดยังเป็นของเหลวอยู่ แรงดันและแรงระเหยหนีของ volatile ผ่านช่องว่างที่มีอยู่อย่างจำกัด จึงเกิดการริดเป็นเส้นใยแก้วมีรูพรุนสูง แล้วจึงดูดซับน้ำเข้าไปในเนื้อ ซึ่งเชื่อว่าเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อย การขยายตัวของเพอร์ไลต์ชนิดนี้จึงค่อนข้างต่ำ แก้วภูเขาไฟมีลักษณะใสไม่สามารถคงตัวอยู่ได้นาน ๆ อาจเป็นเพราะแรงกดเนื่องจากมีน้ำหนักหินปิดทับและมีน้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา บางส่วนของแก้วจึงเปลี่ยนเป็น Feldspar กับ Quartz ขนาดเล็ก ๆ อยู่ด้วยกันและมักจะมีสีแดง เรียกว่า Devitrified Glass หรือ Spherulite (กรมทรัพยากรธรณี, ออนไลน์, 2548)

#### 2.4.2 คุณสมบัติทางเคมีของหินเพอร์ไลต์

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

เพอร์ไลต์จะมีองค์ประกอบหลักทางเคมีคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และไดอะตอมไมท์ ส่วนประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์จะอยู่ในรูปของออกไซด์ของธาตุต่าง ๆ ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 2.11 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของหินเพอร์ไลต์ทั่วโลก กับของประเทศไทย จากการสำรวจของสำนักเหมืองแร่และสัมปทาน เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นทางสถิติ ในการศึกษาเพื่อพัฒนาการใช้เพอร์ไลต์ในงานอุตสาหกรรม (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, 2546)

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบเคมีของหินเพอร์ไลต์ (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

องค์ประกอบเคมี	ค่าเฉลี่ยหินเพอร์ไลต์	
	ทั่วโลก	ประเทศไทย
SiO <sub>2</sub>	71.0 - 75.0	71.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.5 - 18.0	16.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O	2.90 - 4.00	0.90
K <sub>2</sub> O	4.00 - 5.00	5.59
H <sub>2</sub> O (comb)	3.00 - 5.00	3.57

ตารางที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์ (จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ, 2548)

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

ต่อมา จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ (2548) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเพอร์ไลต์ในประเทศไทย โดยใช้วิธี X-Ray Fluorescence ในการวิเคราะห์ แล้วนำองค์ประกอบดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังตารางที่ 2.12 เพื่อจะทำการศึกษาคูสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของเพอร์ไลต์และของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้เป็นข้อมูลคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ที่สำคัญให้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ เช่น นำมาใช้ในการทำคอนกรีตมวลเบาที่เป็นคอนกรีตฉนวน เป็นต้น

#### 2.4.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์ส่วนใหญ่เนื้อหินมีลักษณะเป็นแก้ว มักจะมีรอยแตกเป็นวง ๆ ซ้อนกัน คล้ายกลีบหัวหอม รอยแตกนี้อาจจะมองเห็นด้วยตา หรืออาจจะต้องอาศัยคูด้วยแว่นขยายหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ โดยทั่วไปจะมีสีเทาอ่อนแต่อาจจะพบสีดำ สีน้ำตาล หรือสีเขียวได้ และในเนื้อหินมักจะมีผลึกแร่ควอตซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่ไบโอไทต์ แร่ฮอร์เนเบลนด์ และมีชิ้นส่วนของเศษหินชนิดอื่นฝังตัวอยู่ มีความแข็งตามมาตรฐานของโมห์ (moh's scale) ระหว่าง 5.5 ถึง 7.0 ค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.3 ถึง 2.8 จุดหลอมตัวระหว่าง 760 ถึง 1,300 องศาเซลเซียส และมีค่าดัชนีการหักเหแสงอยู่ระหว่าง 1.490 ถึง 1.610

#### 2.4.4 การใช้ประโยชน์

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

##### ด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

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

นอกจากนี้เมื่อนำเพอร์ไลต์ไปผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการทำคอนกรีตใช้ในงานก่อสร้างต่าง ๆ จะทำให้ลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนั้นลงได้ และยังทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อน และป้องกันการสะท้อนของเสียงได้เป็นอย่างดี คอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลต์ผสมจะมีความหนาแน่นต่ำถึง  $320 \text{ kg/m}^3$  และถ้ามีความหนาแน่นประมาณ 2 นิ้ว จะมีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนได้เท่ากับแผ่นฉนวนมาตรฐาน แต่มีความแข็งแรงและคงทนกว่าแผ่นฉนวนมาตรฐานมาก ซึ่งได้มีการทดลองและเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา โดยบริษัทผลิตเพอร์ไลต์ของประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในตารางที่ 2.12 (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

ตารางที่ 2.12 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ผสมแบบธรรมดา (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

	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

### เป็นฉนวน

ห้องที่ต้องการรักษาอุณหภูมิทั้งความเย็นหรือความร้อนเป็นพิเศษ ได้มีการใช้เพอร์ไลต์ อัดเข้าไปในช่องว่างระหว่างผนังของห้อง ซึ่งมักจะใช้เพอร์ไลต์ที่มีความหนาแน่นที่น้อยกว่า  $64 \text{ kg/m}^3$  เช่น ห้องเก็บเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ต้องการอุณหภูมิภายในห้องต่ำ

### เป็นเครื่องกรอง

เนื่องจากเพอร์ไลต์มีปริมาณออกไซด์ของธาตุซิลิกาสูง อาจมีมากกว่าร้อยละ 70 มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซึมที่ดี และยังเป็นสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงสามารถนำเพอร์ไลต์ไปใช้เป็นตัวกรองและตัวดูดซึมที่ดี

### ด้านอื่น ๆ

นอกจากที่กล่าวมาแล้ว เพอร์ไลต์ยังสามารถนำไปใช้ผสมกับสีทาได้ทั้งภายในและภายนอกของอาคารบ้านเรือน และมีการนำเพอร์ไลต์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ใช้เป็นผงขัด และผสมซีเมนต์ใช้ในการฉาบผนังบ่อน้ำมัน



#### 2.4.5 แหล่งเพอร์ไลต์ในประเทศไทย

แหล่งเพอร์ไลต์พบอยู่ในบริเวณกลุ่มหินภูเขาไฟตอนกลางของประเทศ ซึ่งจัดอยู่ในหน่วยหินภูเขาไฟล้านรายณ์ (นิคม จิงอยู่สุข และปัญญา สุริยะฉาย, 2530) กลุ่มพื้นที่ประมาณ 1,200 ตารางกิโลเมตร อยู่ในเขตจังหวัดลพบุรี และจังหวัดเพชรบูรณ์ หน่วยหินภูเขาไฟล้านรายณ์ประกอบด้วยหินภูเขาไฟชนิดต่าง ๆ ตั้งแต่ บะซอลต์ แอนดีไซต์ ไปจนถึงไรโอไลต์

เพอร์ไลต์เกิดร่วมกับไรโอไลต์ และหินเถ้าถ่านภูเขาไฟ (ash-flow tuffs) โดยเกิดลักษณะแบบลาวา และเกิดแบบพ่นัง โผล่ให้เห็นเป็นชั้นหนาตามบริเวณของภูเขาไฟล้านรายณ์ โดยเฉพาะขอบด้านตะวันตก เพอร์ไลต์ที่พบมีสีดำ น้ำตาล เขียวเข้ม หรือเขียวอ่อน มีลักษณะเนื้อเป็นแก้ว และมีผลึกของเฟลด์สปาร์ประมาณ 2 ถึง 10% และผลึกของไบโอไทต์ประมาณ 1 ถึง 2% ชั้นของเพอร์ไลต์ที่โผล่มีความหนาตั้งแต่ 1 ถึง 20 m วางตัวค่อนข้างราบ และส่วนมากจะวางตัวอยู่บนหินเถ้าถ่านภูเขาไฟ และถูกปิดทับด้วยไรโอไลต์

#### 2.4.6 สถานการณ์เพอร์ไลต์ของประเทศไทย

ในปัจจุบันเพอร์ไลต์มีการผลิตจากประทานบัตรของ ห้างหุ้นส่วนจำกัดคลองยาง จำนวน 1 แปลง เพียงแหล่งเดียว ตั้งอยู่ที่ตำบลมหาโพธิ์ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี มีอัตราการผลิตประมาณ 2,400 ตันต่อปี สำหรับแร่เกรดสูงที่เหมาะสำหรับทำวัสดุกรองคุณภาพสูงจะถูกจำหน่ายให้กับโรงงานน้ำผลไม้ การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (hydroponic) ตัวเติมสำหรับปูนฉาบสำเร็จ และอิฐทนไฟ โดยจำหน่ายให้กับโรงเผาที่จังหวัดราชบุรี ราคาของเพอร์ไลต์คุณภาพสูงก่อนการเผาที่ 650 บาทต่อตัน เมื่อเผาแล้วราคาจะเพิ่มขึ้นเป็น 6,000 ถึง 12,000 บาทต่อตัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความขาว และความหนาแน่น (สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน, ออนไลน์, 2546)

ประพัทธ์ กรังพานิชย์ (2540) ได้ศึกษาถึงการนำกากแร่สังกะสีและวัสดุพูนเบาเพอร์ไลต์มาผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบา โดยนำกากแร่สังกะสีใช้เป็นวัสดุผสมแทนทรายและเพอร์ไลต์เพื่อลดน้ำหนักของคอนกรีต และยังสามารถศึกษาถึงองค์ประกอบและคุณสมบัติของเพอร์ไลต์ในด้านต่าง ๆ เช่น องค์ประกอบหลักทางเคมีของเพอร์ไลต์ โดยวิธี X-Ray Fluorescence ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักของเพอร์ไลต์ที่มีปริมาณสูง ได้แก่  $\text{SiO}_2$  ซึ่งพบในปริมาณ 70.29% ส่วน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  พบในปริมาณ 13.64 และ 5.73% ตามลำดับ ด้านองค์ประกอบรอง (trace element) ที่พบในปริมาณไม่มากนัก ได้แก่  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  และยังสามารถศึกษาถึงความหนาแน่นรวม (bulk density) โดยนำเพอร์ไลต์มาบดแล้วคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน เพื่อหาขนาดของเพอร์ไลต์ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นมวลรวมผสมคอนกรีต ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ขนาด 0.850 mm มีความเหมาะสมในการใช้งาน และค่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีการใช้โดยทั่วไป คือ 40 ถึง 300  $\text{kg/m}^3$

คม บัวคลี และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์ (2540) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนการผสมมอร์ตาร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์มาแทนที่ทรายบางส่วน เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการและสามารถนำมอร์ตาร์มวลเบาไปใช้งานได้จริงในการผลิตผนังมวลเบา โดยในการทดลองได้ใช้ทั้งขนาดหยาบและขนาดละเอียดปนกัน เพอร์ไลต์ในการทดสอบมีหน่วยน้ำหนักประมาณ  $252 \text{ kg/m}^3$  การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์นั้น แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบหน่วยน้ำหนัก การทดสอบความสามารถเทได้โดยใช้โต๊ะการไหล และการทดสอบกำลังอัด โดยกำหนดเป้าหมาย คือ ด้านหน่วยน้ำหนักไม่เกิน  $800 \text{ kg/m}^3$  ค่าการไหลแผ่ควรมากกว่า 70% และกำลังอัดควรจะมีมากกว่า 35 ksc ที่อายุ 7 วัน ผลการวิจัยพบว่าหน่วยน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเพอร์ไลต์ที่ใช้แทนที่ทรายและปริมาณช่องว่างอากาศที่แทรกในเนื้อมอร์ตาร์ โดยปริมาณเพอร์ไลต์ที่เหมาะสมที่สุดคือแทนที่ทราย 90% โดยปริมาตร ด้านการไหลขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์เป็นหลัก กล่าวคือ การไหลจะดีเมื่อปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์อยู่ระหว่าง 90 ถึง 100% ส่วนด้านกำลังอัดพบว่ามอร์ตาร์ที่ใส่ทั้งสารกระจายกักฟองอากาศและสารลดน้ำอย่างมากมีคุณสมบัติตรงตามเป้าหมายคือ ค่ากำลังอัด 37 ksc ที่อายุการบ่ม 7 วัน คุณสมบัติด้านหน่วยน้ำหนักและความสามารถเทได้นั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ แต่ที่ควรระมัดระวังเป็นพิเศษคือปริมาณความชื้นในเพอร์ไลต์และขนาดของเพอร์ไลต์ที่ใช้ในการผสม

Demirboga, Orung and Gul (2001) กล่าวว่า มีวิธีการมากมายที่ใช้ผลิตคอนกรีตมวลเบา (LWC) หนึ่งในวิธีนั้นคือ การไม่ใช้มวลรวมละเอียด (fine aggregate) ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า “no-fines” ส่วนวิธีอื่นที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา คือ การใส่สารเคมีผสมเพิ่มเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศภายในคอนกรีต โดยที่รู้จักกันคือ Aerated Concrete, Cellular Concrete or Gas Concrete วิธีที่ได้รับความนิยมในการผลิต LWC คือ การใช้ส่วนผสมมวลเบาจากธรรมชาติหรือจากการผลิต ซึ่งสามารถหาได้และสามารถใช้ผลิตคอนกรีตให้มีความเหมาะสมในการใช้งานได้ทั้งหน่วยน้ำหนักและความแข็งแรง อิฐมวลเบา (LWC blocks) ได้ถูกกำหนดให้ต้องมีกำลังอัดอย่างน้อยที่สุด ประมาณ 36 ksc หน่วยน้ำหนัก  $1,680 \text{ kg/m}^3$  โดยมาก LWC blocks ใช้สำหรับทำผนัง เป็นฉนวนกันความร้อนของหลังคาและพื้นของอาคาร

จากข้อมูลของ Demirboga, Orung and Gul (2001) พบว่าทั่วโลกได้มีการพัฒนาวัสดุซีเมนต์ที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต เช่น ซิลิกาฟุ้ง และเถ้าลอย เป็นต้น ซึ่งซิลิกาฟุ้งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตโลหะจำพวก Silicon ส่วนเถ้าลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ปริมาณของเถ้าลอยทั่วโลกมีอยู่ประมาณ 600 ล้านตัน แต่มีการนำมาใช้ในงานคอนกรีตเพียง 10% เท่านั้น และเนื่องจากการพัฒนาทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว การใช้พลังงานของประชากรโลกจึงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดปัญหามลภาวะเป็นพิษทางอากาศและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ให้เกิด

ประโยชน์ ซึ่งเถ้าลอยและซิลิกาฟูมสามารถใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน

ความแข็งแรงและคุณสมบัติอื่น ๆ ของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างขนาดเล็ก (microstructure) ซึ่งโครงสร้างขนาดเล็กของคอนกรีตขึ้นอยู่กับ ชนิด ปริมาณ และโครงสร้างของวัสดุผสมอื่น ๆ วัสดุผสมของคอนกรีตรวมทั้งมวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และ Hydrated Cement Paste ที่ได้จากปฏิกิริยา Hydration or Pozzolanic กับน้ำ โครงสร้างของคอนกรีตส่วนใหญ่จะขึ้นกับอัตราการเกิด ชนิด หรือรูปร่างผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา Hydration และการกระจายตัวของปฏิกิริยา Hydration ใน Cement Paste ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิด และผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา Hydration ได้โดยใส่สารผสมเพิ่มประเภทสารเคมีผสมเพิ่ม หรือสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม เป็นต้น

คอนกรีตมวลเบาที่ทำจากการใช้วัสดุมวลรวมเบา มีคุณสมบัติที่เด่นชัดคือ มีน้ำหนักเบา เป็นฉนวนความร้อน ต้านทานการแข็งตัวและการละลายตัวของน้ำ และป้องกันไฟ แต่มีข้อเสียคือ คุณสมบัติเชิงกลต่ำ อย่างไรก็ตามข้อมูลในการศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟูม (SF) และเถ้าลอย (FA) ต่อคุณสมบัติของคอนกรีต และต่อคอนกรีตที่ผสมวัสดุมวลรวมเบายังมีไม่เพียงพอ คุณสมบัติของมวลเบาชนิดอื่นและผลกระทบของซิลิกาฟูม และเถ้าลอย ต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยมวลรวมเบาที่ใช้กันส่วนใหญ่จะเป็น Expanded Clay, Expanded Perlite Aggregate (EPA) และเถ้าลอย ซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°C หรือมากกว่า อุณหภูมิที่สูงอาจมีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นจึงได้ศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลาน ของ EPA และผลกระทบของซิลิกาฟูม และเถ้าลอย ที่มีต่อคอนกรีตมวลเบา (LWAC) โดยใช้ EPA ผสมรวมกับ pumice aggregate (PA)

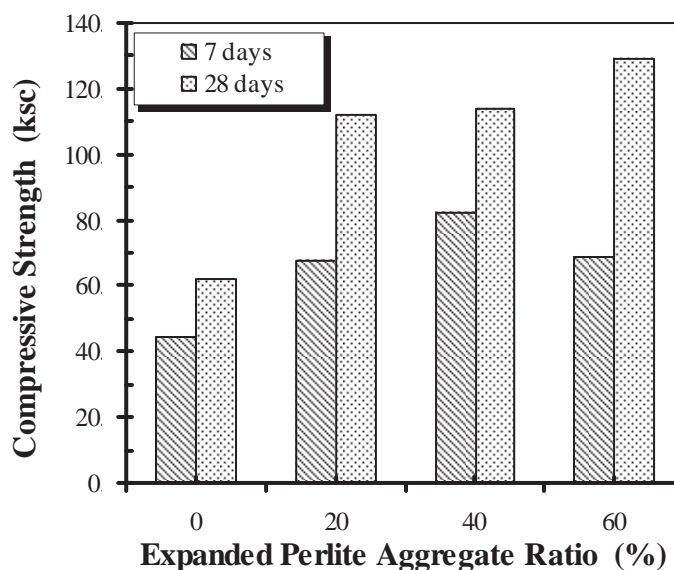
Demirboga, Orung and Gul (2001) จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของ Expanded Perlite Aggregate (EPA) และสารแร่ธาตุผสมเพิ่มที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่หินพัมมิช 20, 40 และ 60% โดยเพอร์ไลต์ในการศึกษานี้มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.14 โดยได้ทำการศึกษถึงผลกระทบด้านกำลังอัดที่ใช้ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย Class C แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 ใช้สารลดน้ำจำนวนมากร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมปริมาณซีเมนต์ที่ 200 kg/m<sup>3</sup> ใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาด 100×200 mm ควบคุมค่ายุบตัวที่ 20±5 mm ทำการบ่มในแบบหล่อ 1 วัน และบ่มในน้ำอีก 6 และ 27 วัน แล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 192

ตารางที่ 2.13 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของ Expanded Perlite ประเทศตุรกี (Demirboga, Orung and Gul, 2001)

Component	PC (%)	SF (%)	FA (%)	EPA (%)
SiO <sub>2</sub>	19.8	85-95	30.6	71-75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.61	1.0-3.0	14.8	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.42	0.5-1.0	5.5	12-16
CaO	62.97	0.8-1.2	36.8	0.2-0.5
MgO	1.81	1.0-2.0	2.5	-
SO <sub>3</sub>	2.36	-	4.9	-
C	-	0.5-1.0	-	-
K <sub>2</sub> O	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	2.9-4
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	-
LOI	0.36	0.5-1.0	2.4	-

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของ EPA ของประเทศตุรกี ที่ Demirboga and Orung ทำการศึกษานั้น พบว่ามีปริมาณสารประกอบหลัก SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เมื่อรวมกันแล้วมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติในการเป็นวัสดุพอลิโซลาน

เมื่อเพิ่มปริมาณ Expanded Perlite ความหนาแน่นของตัวอย่างทั้งหมดลดลงจาก 1,150 เหลือ 753 kg/m<sup>3</sup> ทั้งส่วนผสมที่ใช้ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย และค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีซิลิกาฟูมหรือเถ้าลอย ในส่วนผสม และใช้ Expanded Perlite แทนที่หินพัมมิช 20, 40 และ 60% มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น 52, 85 และ 55% ที่อายุการบ่ม 7 วัน และมีค่าเพิ่มขึ้น 80, 84 และ 108% ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ Expanded Perlite แทนที่หินพัมมิชในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบานี้เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เนื่องจากหินพัมมิชมีลักษณะค่อนข้างเปราะ และโพรงอากาศภายในเนื้อของหินพัมมิช มีการกระจายตัวไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อเปรียบเทียบกับเพอร์ไลต์ที่มีขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีกว่า แต่วัสดุทั้งสองมีคุณสมบัติเหมือนกัน คือ มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน Expanded Perlite กับค่ากำลังอัด  
(Demirboga, Orung and Gul, 2001)

ส่วนการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีซิลิกาฟูมอยู่ในส่วนผสม 10 ถึง 20% มีปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ที่ 10, 20 และ 40 % ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเพอร์ไลต์ 60% ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ 20% จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง เนื่องจากปริมาณการแทนที่เพอร์ไลต์ที่มากเกินไปทำให้ปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอเพราะเพอร์ไลต์มีการดูดซึมน้ำที่สูง อีกทั้งในการเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูมที่มากเกินไปก็ทำให้ความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วยเพราะซิลิกาฟูมมีความละเอียดมากจึงมีพื้นที่ผิวที่ต้องการน้ำมากเช่นกัน และลักษณะการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาทั่วไป คือเมื่อมีซิลิกาฟูมในส่วนผสมคอนกรีตเบา จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน มีค่าลดลงแต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น

ต่อมาในปี ค.ศ. 2003 Demirboga and Gul ยังได้นำเสนอถึงผลกระทบของสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติด้านการนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้ Perlite ในส่วนผสม เนื่องจากในงานคอนกรีตส่วนใหญ่จะให้ความสำคัญในเรื่องของผลกระทบของสารผสมเพิ่มและกำลังของคอนกรีตเท่านั้น จึงให้ความสำคัญในการศึกษานี้ว่า พฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิก็มีความสำคัญต่อคอนกรีตเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องความสัมพันธ์ของคอนกรีตที่ต้องออกแบบให้มีการนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งการนำความร้อนของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ถึง 5 เท่า ของอากาศ และเป็นที่น่าสนใจว่าเมื่อมีความชื้นหรือน้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างอากาศในคอนกรีตจะส่งผลให้การนำความร้อนเพิ่มมากขึ้น และ

Demirboga (2003) ยังได้นำเสนอรายงานวิจัยของ Steiger and Hurd ที่ได้รายงานไว้ว่า ถ้าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเนื่องจากการดูดซึม 1% จะส่งผลให้การนำความร้อนเพิ่มขึ้น 5%

การนำความร้อนนอกจากจะขึ้นอยู่กับช่องว่าง และปริมาณความชื้นแล้วยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำความร้อนของมวลรวมอีกด้วย Demirboga จึงได้ลองทำการศึกษาก่อนหน้านี้โดยใช้อัตราส่วนผสมเดิม คือใช้ Expanded Perlite แทนที่หินพัมมิช 20, 40 และ 60% ใช้ซิลิกาฟูม และเถ้าลอย Class C แทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ใช้สารลดน้ำจำนวนมาก 1.5% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมปริมาณซีเมนต์ที่  $200 \text{ kg/m}^3$  ทดสอบโดยใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาด  $100 \times 200 \text{ mm}$  ควบคุมค่าชุบตัวที่  $20 \pm 5 \text{ mm}$  ทำการบ่มในแบบหล่อ 1 วัน และบ่มในน้ำต่อ 6 และ 27 วัน แล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 192 ส่วนเพอร์ไลต์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นเพอร์ไลต์จากแหล่งเดิมที่มีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.14

จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบการนำความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 2.14 โดยใช้เครื่องทดสอบ QTM 500 device ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท Kyoto Electronics Manufacturing Co.,Ltd., ประเทศญี่ปุ่น ที่มีช่วงการวัด  $0.0116$  ถึง  $6 \text{ W/mK} \pm 5\%$  สามารถควบคุมความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง  $100$  ถึง  $1,000^\circ\text{C}$  ทดสอบกับก้อนตัวอย่างที่มีขนาด  $100\text{W} \times 80\text{L} \times 40 \text{ mm}$  ใช้เวลาในการให้ความร้อน  $100$  ถึง  $120$  วินาที

ตารางที่ 2.14 ค่าการนำความร้อนและค่าความหนาแน่น ของคอนกรีตที่ผสมเพอร์ไลต์

(Demirboga and Gul, 2003)

EPAC groups	Content	Silica Fume (%)			Fly Ash (%)		
	0	10	20	30	10	20	30
Thermal conductivity (W/mK)	0.1797	0.1720	0.1552	0.1558	0.1676	0.1643	0.1472
Reduction (-) or increment (+) (%)	0	-4	-14	-13	-7	-9	-18
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	522	509	493	485	511	498	483

จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตมวลเบาผสม Expanded Perlite ที่มีซิลิกาฟูม หรือเถ้าลอยในส่วนผสม ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง เป็นเหตุผลเนื่องมาจากความหนาแน่นของตัวอย่างที่ลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการแทนที่ของซิลิกาฟูม และเถ้าลอย โดยเมื่อใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลง 4, 14 และ 13% และในทำนองเดียวกันเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% ค่าการนำความร้อนลดลง 7, 9 และ

18% ของตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ และในการแทนที่ด้วยเถ้าลอย ที่การแทนที่ 10 และ 30% ทำให้ค่าการนำความร้อนลดลงได้มากกว่าการแทนที่ด้วย Silica Fume และยังพบอีกว่าค่าการนำความร้อนยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของคอนกรีตอีกด้วย กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นด้วย

จากข้อมูลผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มี Expanded Perlite ในส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 2.15 พบว่าคอนกรีตที่มีซิลิกาฟุ้ง แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง 12, 19 และ 29% ที่อายุการบ่ม 7 วัน และค่ากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น 9, 13 และ 4% ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ และค่าการนำความร้อนก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของ Silica Fume ที่สามารถทำให้ช่องว่างเล็ก ๆ ของคอนกรีตลดลง (filler effect) เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ส่วนคอนกรีตมวลเบาผสม Expanded Perlite และมีเถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ 10% ค่ากำลังอัดลดลงที่อายุการบ่ม 7 วัน แต่ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และค่าการนำความร้อนก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย ส่วนที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 20 และ 30% ทั้งที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง และค่าการนำความร้อนลดลง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากเถ้าลอยต้องการระยะเวลาในการบ่มเพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่นานกว่า (long curing period) ของซิลิกาฟุ้ง

ตารางที่ 2.15 ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน (Demirboga and Gul, 2003)

EPAC groups	Content	Silica Fume (%)			Fly Ash (%)		
	0	10	20	30	10	20	30
7-Days compressive strength (ksc)	28.13	24.87	22.83	19.98	21.10	19.88	18.04
Reduction (-) or increment (+) (%)	0	-12	-19	-29	-25	-29	-36
28-Days compressive strength (ksc)	44.24	48.32	49.95	45.87	45.06	37.41	32.21
Reduction (-) or increment (+) (%)	0	+9	+13	+4	+2	-15	-27

จากงานวิจัยของ Demirboga (2003) ทำให้สามารถสรุปได้ว่า คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเพอไรไลท์สามารถทำให้การนำความร้อนลดลง การนำความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่าง ปริมาณความชื้น และความสามารถในการนำความร้อนของมวลรวม ซึ่งความหนาแน่นของคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นด้วย

Topcu and Isikdag (2007) ได้ตระหนักถึงประโยชน์ของ Expand Perlite Aggregate (EPA) ว่าเป็นได้ทั้งฉนวนกันความร้อนและเสียง และยังเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าจะสามารถทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างได้ และ Topcu ได้กล่าวถึงการศึกษาของ Gunning (1994) ที่ได้



รายงานพบว่า Perlite สามารถเผาให้ขยายตัวได้ 15 ถึง 20 เท่า เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1,100°C และ Topcu ยังได้กล่าวถึงการก่อสร้างอาคารสูงที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว (earth quake) ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลกระทบเนื่องจากคอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักมาก และจากการศึกษาของ Topcu ในรายงานวิจัยของ Durmus (1985) พบว่าการใช้ Expanded Perlite ในคอนกรีต เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถลดความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหวได้เนื่องจากมีความเบา

ในการใช้ Expanded Perlite ในคอนกรีต สามารถทำได้โดยการแทนที่ส่วนผสมละเอียด การแปรผันปริมาณการแทนที่จะขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังอัด และเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์ เพอร์ไลต์สามารถเผาและบดให้ละเอียดได้ง่ายกว่าปูนซีเมนต์ โดย Perlite จะถูกเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิ 900 ถึง 1,100°C ในขณะที่ Portland Cement เผาที่อุณหภูมิ 1,400 ถึง 1,500°C ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าเพอร์ไลต์ใช้พลังงานในการผลิตที่น้อยกว่า ถึงแม้ว่าในการเพิ่ม Expanded Perlite ในส่วนผสมของคอนกรีตจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงในช่วงอายุต้น แต่กำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ Expanded Perlite ก็สามารถพัฒนา กำลังอัดให้เพิ่มสูงขึ้นได้คล้ายคลึงกับปอซโซลานทั่วไป เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น และยังมีข้อได้เปรียบคือ มีหน่วยน้ำหนักที่เบากว่า อีกทั้งยังมีความต้านทานต่อการ แช่แข็ง-ละลายตัว (freezing-thawing) ของโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพอากาศหนาวหรือในห้องเย็นได้ดีอีกด้วย

ในปี ค.ศ.2007 Topcu and Isikdag จึงได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ Expanded Perlite เป็นมวลรวมในส่วนผสม ปริมาณออกไซด์หลักของ Expanded Perlite ที่ใช้ในการศึกษา มีส่วนประกอบของ  $\text{SiO}_2$  ประมาณ 70 ถึง 75% และมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ประมาณ 12 ถึง 16% ใช้ปูนซีเมนต์ 2 ชนิด คือ CEM II 32.5R และ CEM I 42.5R ควบคุมปริมาณซีเมนต์ที่ 300, 350 และ 400  $\text{kg/m}^3$  และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย EPA ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0, 15, 30, 45 และ 60% ทำการทดสอบพฤติกรรมทั้งคอนกรีตที่อยู่ในสภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว หล่อแท้งตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 150×150×150 mm และทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm สูง 300 mm ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.5 ใช้หินที่มีขนาดโตสุด 3.15 mm ปริมาณทรายและหินในส่วนผสมคงที่เท่ากับ 2,600 และ 2,700  $\text{kg/m}^3$  ตามลำดับ ทำการบ่มตัวอย่างในน้ำที่อายุการบ่ม 28 วัน อุณหภูมิในการบ่ม  $23\pm 1^\circ\text{C}$  หลังจากนั้นทำการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดและการรับแรงดึงของคอนกรีตที่มี Expanded Perlite ในส่วนผสม เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม

จากการศึกษาพบว่า EPA Concrete มีค่ากำลังอัดและค่ากำลังดึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และคุณภาพของปูนซีเมนต์สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงปริมาณ คุณภาพ และชนิดของปูนซีเมนต์ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสามารถในการทำงานที่ดี แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณและคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้ Vebe Time และหน่วยน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้น ค่าการยุบตัวลดต่ำลง และถึงแม้ว่าการเพิ่มปริมาณ Expanded Perlite จะส่งผล

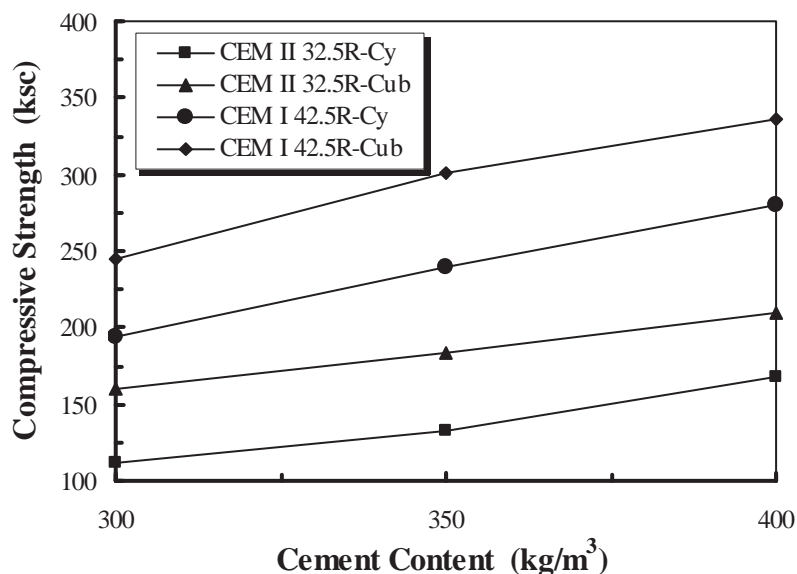


ให้กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตลดลง แต่เป็นที่น่าสนใจว่าในการเพิ่มปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ในอัตราส่วนที่ต่ำ ยังคงสามารถทำให้กำลังของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถรับได้ ถ้าไม่คำนึงถึงกำลังของคอนกรีตที่สูญเสียไปบางส่วน

ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจากการออกแบบส่วนผสม อยู่ระหว่าง 1,800 ถึง 2,400  $\text{kg/m}^3$  โดยที่หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (fresh concrete) ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM II 32.5R ในปริมาณ 350 และ 400  $\text{kg/m}^3$  มีค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4.72 และ 8.89% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300  $\text{kg/m}^3$  ตามลำดับ ในขณะที่ EPA Concrete ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ในปริมาณ 350 และ 400  $\text{kg/m}^3$  มีค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่า คือมีหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4.78 และ 10.87% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300  $\text{kg/m}^3$  ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย

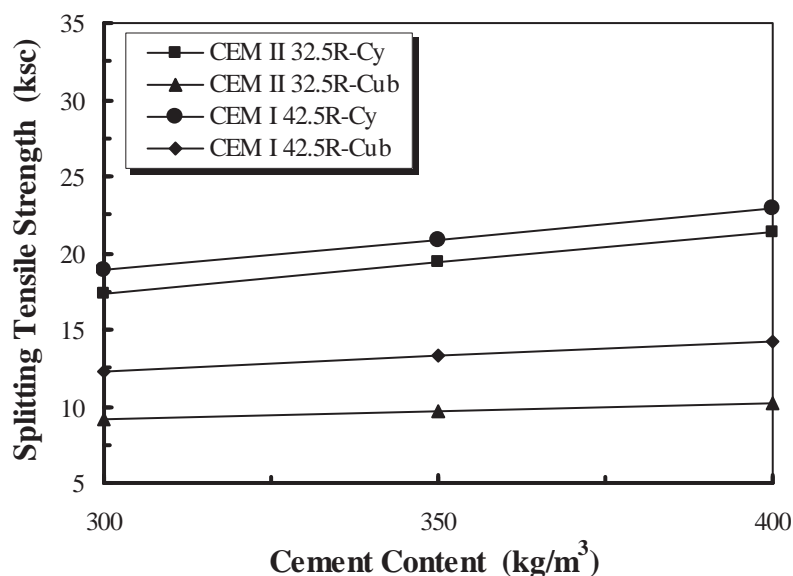
ความสามารถเทได้ของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของคอนกรีต ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่า Vebe Time ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 3.4 ถึง 3.85 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM II 32.5R ที่ปริมาณ 350 และ 400  $\text{kg/m}^3$  ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 5.88 และ 8.82% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300  $\text{kg/m}^3$  ตามลำดับ ส่วนในการใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ที่ปริมาณ 350 และ 400  $\text{kg/m}^3$  มีค่า Vebe Time เพิ่มขึ้น 5.71 และ 8.57% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300  $\text{kg/m}^3$  ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด พบว่า Vebe Time ของ CEM II 32.5R มีค่าน้อยกว่า CEM I 42.5R ประมาณ 2.75% ส่วนการทดสอบการไหลแผ่ (flow table) และค่าการยุบตัว (slump) พบว่าค่าการยุบตัวของ EPA Concrete มีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 130 mm ส่วนผสมที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำมีค่าการยุบตัวสูงกว่า เนื่องจากภายในเนื้อคอนกรีตมีรูพรุนมากกว่า โดยที่ค่าการยุบตัวที่ใช้ CEM II 32.5R และ CEM I 42.5R ที่ปริมาณ 400  $\text{kg/m}^3$  มีค่าการยุบตัวลดลง 7.69 และ 0.09% ตามลำดับ และมีค่าการไหลแผ่อยู่ที่ 310 และ 360 mm เมื่อเปรียบเทียบกับ EPA Concrete ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 300  $\text{kg/m}^3$  สรุปได้ว่าค่าการยุบตัวของ EPA concrete ที่ใช้ CEM II 32.5R มีค่าสูงกว่า CEM I 42.5R เนื่องจากมีคุณภาพที่ดีกว่าหรือมีความละเอียดมากกว่า

เมื่อพิจารณาเฉพาะผลการทดสอบค่ากำลังอัดและค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของ EPA Concrete ที่มีปริมาณ Perlite 30% พบว่ามีค่ากำลังลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากัน โดยที่ค่ากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกที่น้อยที่สุดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 300  $\text{kg/m}^3$  มีค่าเท่ากับ 112.13 และ 9.00 ksc และมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 400  $\text{kg/m}^3$  มีค่าเท่ากับ 265.04 และ 23.45 ksc ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14



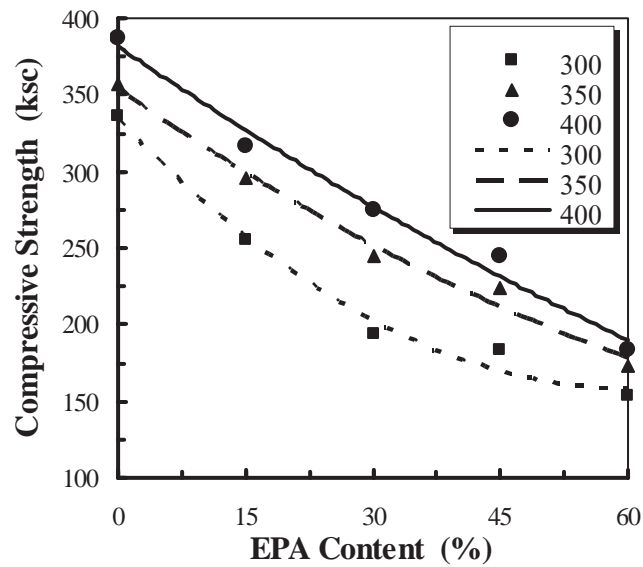
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณปูนซีเมนต์ของ EPA Concrete ที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% (Topcu and Isikdag, 2007)

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีปริมาณ EPA 30% มีค่าอยู่ที่ระหว่าง 112.13 และ 336.39 ksc ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของปูนซีเมนต์ รวมทั้งลักษณะรูปร่างของก้อนตัวอย่างด้วย โดยที่ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น 20 และ 30% ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 350 และ 400 kg/m³ เมื่อเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ 300 kg/m³ ตามลำดับ โดยที่แท่งตัวอย่างทรงกระบอก มีค่ากำลังอัดน้อยกว่าแท่งตัวอย่างทรงลูกบาศก์ 30% และค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ที่ 9.17 และ 23.45 ksc ซึ่งเพิ่มขึ้น 13 และ 22% ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 350 และ 400 kg/m³ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 300 kg/m³ ตามลำดับ และยังพบอีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ CEM II 32.5R ให้ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกที่น้อยกว่า CEM I 42.5R อยู่ 8%

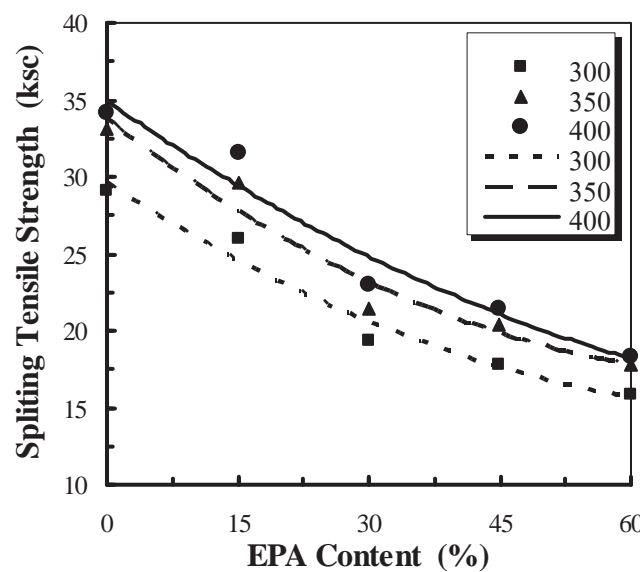


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับปริมาณปูนซีเมนต์ของ EPA Concrete ที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% (Topcu and Isikdag, 2007)

EPA concrete ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 300, 350 และ 400 kg/m<sup>3</sup> และใช้เพอร์ไลต์ แทนที่ปูนซีเมนต์ 0, 15, 30, 45 และ 60% ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 พบว่ามีค่ากำลังอัดและค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกต่ำสุด 152.91 และ 15.29 ksc ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 kg/m<sup>3</sup> และมีค่ามากที่สุด 377.17 และ 35.68 ksc เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 400 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ดังนั้นค่ากำลังอัดที่เหมาะสมสำหรับการผลิต EPA Concrete คือแทนที่ด้วย EPA ที่ปริมาณ 15 และ 30% ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 และ 400 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ส่วนการใช้ EPA ที่ปริมาณ 60% แม้ว่าจะทำให้เกิดผลกระทบในเชิงลบทั้งด้านกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก แต่ยังเป็นผลดีในเรื่องคุณสมบัติในการเป็นคอนกรีตมวลเบา



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ที่ใช้  
ปูนซีเมนต์ประเภท CEM I 42.5R (Topcu and Isikdag, 2007)



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ที่ใช้  
ปูนซีเมนต์ประเภท CEM I 42.5R (Topcu and Isikdag, 2007)

จากการพิจารณาผลการวิจัยของ Topcu (2007) สามารถสรุปได้ว่า กำลังของ EPA Concrete ขึ้นอยู่กับคุณภาพของปูนซีเมนต์ ชนิดของปูนซีเมนต์ และเปอร์เซ็นต์การแทนที่ด้วย EPA และในการใช้ EPA ในคอนกรีตจะส่งผลให้ทั้งกำลังดึงและกำลังอัดลดลง แต่จะเกิดผลดีในด้านคุณสมบัติ

ของการเป็นคอนกรีตมวลเบา ยิ่งไปกว่านั้นยังได้คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักที่น้อยที่สุด โดยใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM II 32.5R ที่ปริมาณ EPA 30% ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานคอนกรีตมวลเบา คือ การใช้ EPA ที่ปริมาณ 15 และ 30% โดยใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ในปริมาณ 350 และ 400 kg/m<sup>3</sup>

ถึงแม้ว่ากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่สูงขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของปูนซีเมนต์ แต่ก็ไม่ได้ทำให้ค่าความสามารถเทได้ดีขึ้น โดยสังเกตจากค่าการทดสอบ Flow Table Test และ Slump Test ที่ลดลง และค่า Vebe Time ที่เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากัน แต่ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจะแปรผันโดยตรงกับการเพิ่มปริมาณและคุณภาพปูนซีเมนต์ และสามารถกล่าวสรุปได้ว่า Expanded Perlite สามารถใช้เป็นส่วนผสมละเอียดได้ แต่ต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ดี

## 2.5 ซีโอไลต์ (zeolite)

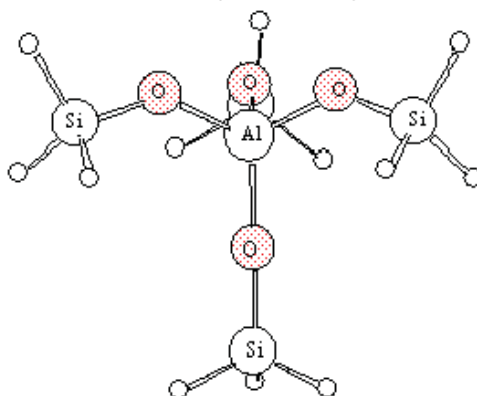
ซีโอไลต์ (Zeolite) คือสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO<sub>4</sub> หรือ AlO<sub>4</sub>) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอม เท่ากับ 1x10<sup>-10</sup> m) นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้วในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวม ๆ และมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึกสามารถดักให้เดือดระเหยออกไปได้

ซีโอไลต์อาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของแร่ธาตุ มีการทำเป็นเหมือนซีโอไลต์ในพื้นที่หลายแห่งของโลก หรืออาจสังเคราะห์ขึ้นได้โดยกระบวนการทางเคมี เพื่อประโยชน์ทางการค้า ซึ่งทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีสมบัติเฉพาะเจาะจง รวมทั้งอาจมีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ในห้องปฏิบัติการเพื่อประโยชน์ในการศึกษาลักษณะทางเคมีของซีโอไลต์ ซีโอไลต์มีมากกว่า 600 ชนิด แต่สามารถแบ่งกลุ่มตามชนิดของโครงสร้างได้ประมาณ 40 ชนิด ซึ่งความแตกต่างในโครงสร้างนี้มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของซีโอไลต์ เช่น โครงสร้างผลึก ความหนาแน่น ขนาดของโพรง ความแข็งแรงของพันธะ เป็นต้น การจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้น อาศัยขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลต์เป็นหลัก ซึ่งทำให้นำซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในงานที่แตกต่างกันไป ลักษณะเด่นของซีโอไลต์คือ โครงสร้างที่เป็นรูพรุนอย่างเป็นระเบียบของซีโอไลต์ ซึ่งอาจใช้เป็นตัวกรองสารที่ต้องการ โดย

โมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดโพรงซีโอไลต์ก็สามารถผ่านไปได้ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านออกมา และโมเลกุลที่ต้องการซึ่งมีขนาดพอดีกับโพรงซีโอไลต์ก็ถูกกักไว้ภายในโพรง

### 2.5.1 โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นแร่ที่ประกอบด้วย ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีน้ำผลึกของโลหะอัลคาไลน์หรือโลหะอัลคาไลน์เอิร์ทซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะโซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม สตรอนเชียม และแบเรียม โดยโครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็น โครงสร้าง 3 มิติ ของอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{AlO}_4$ ) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{SiO}_4$ ) ซึ่งประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกต โดยมีการเชื่อมต่อของอะตอมออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือเป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) โครงสร้างซีโอไลต์แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ



รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ (อุษา อันทอง และคณะ, 2549)

1. โครงสร้างปฐมภูมิ  $\text{SiO}_4$  และ  $\text{AlO}_4$  แต่ละหน่วยจะจัดเรียงตัวในลักษณะรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เชื่อมต่อกันโดยอะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางส่วนอะตอมของออกซิเจนอยู่ที่จุดยอดมุมสามเหลี่ยมทรงสี่หน้า
2. โครงสร้างทุติยภูมิ จะเกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิแต่ละหน่วยมาเชื่อมต่อกันโดยอาศัยจุดยอดมุมทั้งสี่เป็นจุดเชื่อมต่อ เพื่อให้ได้เป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น โครงสร้างที่เกิดจากโครงสร้างขั้นปฐมภูมิมาเชื่อมต่อกันเป็นวงขนาดเล็กในรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่น สี่เหลี่ยม ห้าเหลี่ยม และแปดเหลี่ยมโดยเป็นวงเดี่ยว หรือวงซ้อนก็ได้ เรียกว่า โครงสร้างทุติยภูมิ

3. โครงสร้างรูปทรงหลายหน้า เมื่อนำโครงสร้างทฤษฎีมาเชื่อมต่อกันจะเกิดเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่ ซีโอไลต์ต่างชนิดกันจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ทำให้คุณสมบัติของซีโอไลต์นั้น ๆ มีคุณสมบัติแตกต่างกันไปด้วย

### 2.5.2 คุณสมบัติของซีโอไลต์

เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์ที่เป็นแบบเปิดประกอบด้วยช่องว่าง และการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก ซึ่งมีแคลิอออน และโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ภายใน โดยสามารถแลกเปลี่ยนกับแคลิอออนอื่นได้ คือมีคุณสมบัติเป็น Ion exchange นำไปใช้ขบวนการ Water softening และ Water treatment นอกจากนี้โลหะอื่น ๆ เช่น ตะกั่วปรอท แคดเมียม ซิลเวอร์ ไอออนก็สามารถแลกเปลี่ยนได้เช่นเดียวกัน ยังมีคุณสมบัติเป็น Reversible dehydration ซึ่งเป็น Molecular sieve ที่ทำให้มีคุณสมบัติต่างจากการดูดซับ และมีคุณสมบัติเป็นสารดูดซับที่ดีสามารถแยกในการแยกแก๊สและไอของผสม เช่น แอมโมเนีย ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ด้วย เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างกัน

### 2.5.3 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 มีลักษณะคล้ายขอล็ก ซีโอไลต์ธรรมชาติที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด คือ Clinoptilolite Chabazite และ Mordenite บางอุตสาหกรรม อาจจะใช้ Phillipsite ชนิดของซีโอไลต์ที่สำคัญคือ (วัณชัย 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 2.16 คุณสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ (วัฒนชัย อยู่ในวงศ์, 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
Phiplippisite	$\text{K/Na} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	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  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{SiO}_2$   $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  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 <sub>2</sub>	71.75	61 ถึง 67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.19	11 ถึง 12.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.20	4.3 ถึง 6.98
CaO	0.11	2.25 ถึง 3.24
MgO	0.40	1.54 ถึง 1.64



รูปที่ 2.18 ลักษณะของซีโอไลต์ (ไกรภพ อินทร์แสง และคณะ, 2550)

#### 2.5.4 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<sub>2</sub> และสารประกอบซัลเฟอร์จากแก๊สธรรมชาติแยกสารที่ทำให้เกิดสารมลภาวะ เช่น SO<sub>2</sub> NO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> จากอากาศ เป็นต้น
3. Water softeners ซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออนได้จึงช่วยลดความกระด้างของน้ำ

4. ใช้เป็น Ion exchange resins จากคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของ ซีโอไลต์ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเรซิน เพื่อแลกเปลี่ยนกับไอออนบวก Univalent หรือ Divalent selectivity ของซีโอไลต์ของไอออนบวกที่เป็น Univalent จากมากไปหาน้อย

5. ใช้เป็น Detergent builder ซีโอไลต์เป็นที่นิยมในต่างประเทศที่เจริญแล้ว โดยใช้เป็นส่วนผสมของผงซักฟอกเนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับทำผงซักฟอก คือมีค่า Capacity และ Kinetics ซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนบวกเป็นไปได้อย่างมากและเร็ว นอกจากนี้ ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วยซึ่งฟอสเฟตทำให้พืชน้ำหรือพวกสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้มีปัญหาในการกำจัดและเมื่อมีการตายแล้วทับถมกันเข้าจึงทำให้น้ำเน่าเสียและสัตว์น้ำที่จำเป็นลดจำนวนลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

## 2.6 สรุปปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### ปอชโซลาน

การใช้ปอชโซลานในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ เช่น เพิ่มความสามารถในการเทได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว และลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต ถึงแม้ว่าอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น แต่สามารถเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตมวลเบา

### ไคอะตอมไมท์

แหล่งของไคอะตอมไมท์ในประเทศไทยพบมากในจังหวัดลำปาง โดยมีปริมาณสำรองของไคอะตอมไมท์ทั้งหมดประมาณ 245 ล้านตัน

ไคอะตอมไมท์ลำปางทั้งที่ผ่าน และไม่ผ่านกระบวนการเผา สามารถนำมาทำอิฐมวลเบาได้จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบาได้เช่นกัน และถึงแม้ว่าไคอะตอมไมท์จะไม่ผ่านกระบวนการเผา แต่ก็ยังมีคุณสมบัติที่ดี คือ มีความเบา และมีรูพรุนสูง และยังมีองค์ประกอบเคมีที่แสดงถึงความเป็นวัสดุปอชโซลานธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมทั้งการนำมาใช้เป็นวัสดุผสมมวลรวมเบาในคอนกรีตมวลเบา และใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในคอนกรีต

ไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งจะมีรูปร่างและปริมาณออกไซด์หลักที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทับถม แหล่งกำเนิด และชนิดของไคอะตอม ดังนั้นในการศึกษาควรคำนึงถึงทั้งลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งกำเนิด

การเพิ่มปริมาณไคอะตอมไมท์ทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้นและขึ้นปลายสูงขึ้น เนื่องจากไคอะตอมไมท์มีพื้นที่ผิวมากและ

อนุภาคก่อนข้างละเอียด ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด

### เพอร์ไลต์

คอนกรีตที่มีเพอร์ไลต์ในส่วนผสม มีความเป็นฉนวนกันความร้อนและเสียง และยังทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาลง ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าจะสามารถทำให้ประหยัดค่าก่อสร้างได้ อัตราการผลิตเพอร์ไลต์ ประมาณ 2,400 ตันต่อปี ราคาของเพอร์ไลต์คุณภาพสูงก่อนการเผาที่ 650 บาทต่อตัน เมื่อเผาแล้วราคาจะเพิ่มขึ้นเป็น 6,000 ถึง 12,000 บาทต่อตัน

ปริมาณการแทนที่เพอร์ไลต์ในส่วนผสมที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอเนื่องจากเพอร์ไลต์มีการดูดซึมน้ำที่สูง การใช้เพอร์ไลต์ในคอนกรีตจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง แต่ยังคงสามารถทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ และยังเกิดผลดีในด้านคุณสมบัติของการเป็นคอนกรีตมวลเบา ถ้าไม่คำนึงถึงกำลังของคอนกรีตที่สูญเสียไปบางส่วน แต่ถ้าต้องการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นก็ต้องคำนึงถึง คุณภาพ ชนิด และปริมาณของปูนซีเมนต์อีกด้วย

ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของเพอร์ไลต์จะคล้ายกับปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานทั่วไป คือค่ากำลังอัดในช่วงต้นมีค่าลดลง แต่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น

คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเพอร์ไลต์สามารถทำให้การนำความร้อนลดลง การนำความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณช่องว่าง ปริมาณความชื้น และความสามารถในการนำความร้อนของมวลรวม

### ซีโอไลต์

ซีโอไลต์ ได้ชื่อว่าเป็น Molecular sieve เนื่องจากโมเลกุลมีช่องว่างที่สม่ำเสมอจำนวนมาก ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติคล้าย sieve บนโมเลกุลที่มีช่องว่างที่สม่ำเสมอ เนื่องจากซีโอไลต์มีมากมายหลายชนิดและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซีโอไลต์แต่ละชนิดจึงมีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานในด้านใดจึงควรศึกษาคุณสมบัติให้เหมาะสมก่อนเพื่อให้สามารถใช้งานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด

## 2.7 เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. (2548). เพอร์ไลต์. [ออนไลน์]. ได้จาก: [http://www.dmr.go.th/Interest /Data /TI2dataD.htm](http://www.dmr.go.th/Interest/Data/TI2dataD.htm).
- คม บัวคลี และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์. (2540). การพัฒนามอร์ต้าร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์. เอกสารงานวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- จันทนา สุขุมานนท์. (2550). **INSEE Concrete Handbook**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัท เซอร์คัส เพรส จำกัด.
- จิตรกร ดั่งอนุสรณ์สุข และคณะ. (2548). ผลกระทบของเพอร์ไลต์ต่อการซึมผ่านอากาศ และปริมาณช่องว่างอากาศภายในซีเมนต์มอร์ต้าร์. ปรินูญานพนธ์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- จิรภัทร ขำญาติ. (2546). เทคโนโลยีไทย. Engineering Today. 1 (3): 17.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2536). คอนกรีตเทคโนโลยี. บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2551). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. บริษัทเอสซีจี ซีเมนต์ จำกัด ในธุรกิจซีเมนต์ เครือซีเมนต์ไทย (SCG CEMENT).
- ณรงค์ศักดิ์ นันทคำภีรา และคณะ. (2547). หินอัคนี.[ออนไลน์]. ได้จาก: [http://www.soil.civil.rmut.ac.th /rock/index1.html](http://www.soil.civil.rmut.ac.th/rock/index1.html).
- ธีรวัฒน์ ลินศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2548). ผลกระทบของขนาดอนุภาคและรูปร่างเม็ดถ่านหินต่อความพรุนและการซึมผ่านอากาศของเพสต์. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1. (หน้า CON22-CON29). กรุงเทพฯ. สมาคมคอนกรีตไทย.
- บุรณัฏฐ นัฏฐวิระ และ ทวีศักดิ์ คงทรัพย์. (2545). ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 25 ฉบับที่ 4 (ตุลาคม-ธันวาคม).
- ประพัทธ์ กรังพานิชย์. (2540). การนำกากแร่สังกะสีและวัสดุพูนเบาเพอร์ไลต์มาผลิตเป็นคอนกรีตเบา. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย.

- ปริญญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร. (2548). **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ**. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. (2543). **ฟิสิกส์ราชมงคล ศัพท์ชีวะ**. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.electron.rmutphysics.com/bio-glossary>.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2541). **ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ**. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 2411 (พ.ศ. 2541). สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. (มอก.1505-2541.)
- วินิต ช่อวิเชียร. (2544). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ.
- ศิริรัตน์ รัตนจันทร์. (2543). **การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมวัสดุเพื่อผสมทำคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาจากดินที่มีอยู่ในท้องถิ่น**. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [สสวท.]. (2550). **ชาวดึกดำบรรพ์**. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.ipst.ac.th/science/index.shtml>.
- สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน กลุ่มวิศวกรรมและความปลอดภัย. (2546). **เพอร์ไลต์**. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.dpim.go.th/ppr/title.php?tid=000001074149948>.
- เสรีวัฒน์ สมนิทร์ปัญญา. (2538). **โลกและหิน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ สุริยวิทยาสาน.
- อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2545). **กรมวิทยาศาสตร์บริการ ศูนย์ความรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. **ปอซโซลาน**. [ออนไลน์]. ได้จาก: [http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep\\_11\\_2545\\_pozzalan.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_11_2545_pozzalan.pdf).
- Aydin, A.C. and Gul, R. (2007). **Influence of Volcanic Originated Natural Materials as Additives on The Setting Time and Some Mechanical Properties of Concrete**. Construction and Building Materials. 21. p.1277-1281.
- American Concrete Institute. (1999). **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. (ACI 213 R-87, Reapproved 1999)
- American Concrete Institute. (2000). **State of The Art Report on High-Strength Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. Part 2. Michigan. (ACI 363 R-92, Reapproved 1997)
- American Concrete Institute. (2000). **Use of Fly Ash in Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. Michigan. (ACI 232.2 R-96)
- American Society for Testing and Materials. (1991). **Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 618-91).

- American Society for Testing and Materials. (1998). **Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 311-98).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 109/ C 109 M-99).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 128-97).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 138/ C 138 M-01a).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.02. (ASTM C 204).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 40-99).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 136-96a).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 204).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.02. (ASTM C 29/ C 29 M-97a).
- Pekmezci, B.Y. and Akyüz, S. (2004). **Optimum Usage of A Natural Pozzolan for The Maximum Compressive Strength of Concrete**. Cement and Concrete Research. 34. p.2175-2179.

- Fragoulisa, D., Stamatakisb, M.G., Chaniotakis E. and Columbusb, G. (2004). **Characterization of Lightweight Aggregates Produced with Diatomite Rocks Originating From Greece**. Materials Characterization. 53. p.307-316.
- Topcu, I.B. and Isikdag, B. (2007). **Effect of Expanded Perlite Aggregate on The Properties of Lightweight Concrete**. Journal of Materials Processing Technology PROTEC-11355; No. of Pages 5.
- Kedsarin Pimraksa and Prinya Chindapasirt. (2008). **Lightweight Bricks Made of Diatomaceous Earth, Lime and Gypsum**. Ceramics International. CERI-2954; No of Pages 8.
- Shannag, M.J. and Shania, H.A. (2003). **Sulfates Resistant of High-performance Concrete**. Cement and Concrete Composites 25:363-369.
- Demirboga, R. and Gul, R. (2003). **Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures**. Energy and Buildings. 35. p.1155-1159.
- Demirboga, R., Orung, I. and Gul, R. (2001). **Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on The Compressive Strength of Low-Density Concretes**. Cement and Concrete Research. 31. p.1627-1632.

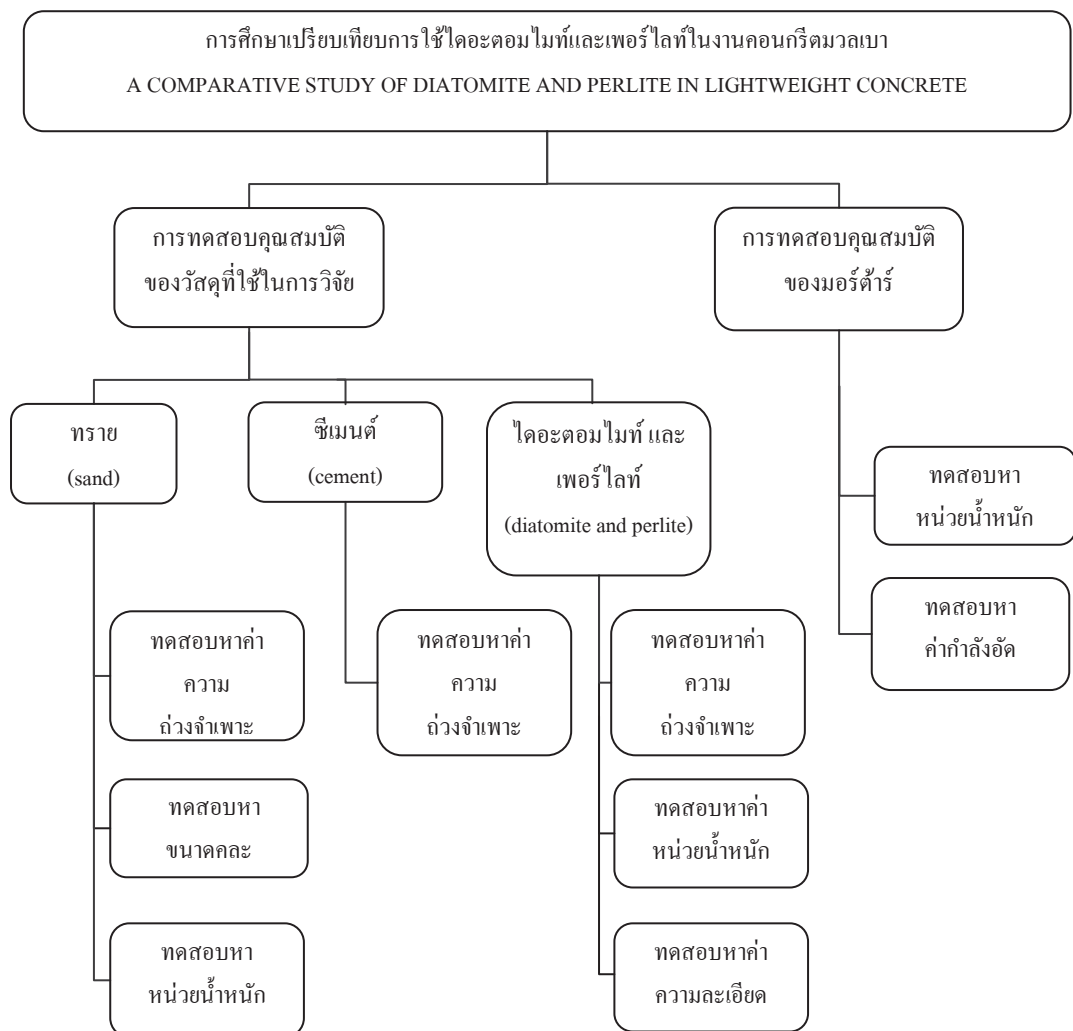
### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ในงานคอนกรีตมวลเบา

ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- 1) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย
- 2) การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการดำเนินงานวิจัย



### 3.1.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

#### - การทดสอบคุณสมบัติของทราย

##### 1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพต่าง ๆ ของมวลรวมละเอียดโดยเฉพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (saturated surface dry) และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (absorption) ของมวลรวมละเอียด และนำค่าไปออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะนี้ จะหาได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างมวลรวมต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ามวลรวม โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.4 ถึง 3.0 และโดยทั่วไปจะใช้ค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่ดูดซึมน้ำและไม่คายน้ำ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำไว้ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 128 (2001) รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย

##### 2) การทดสอบหาขนาดผลของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาการกระจายตัวและส่วนผลของทราย ส่วนผลของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถได้ และแต่ละก้อนของมวลรวมละเอียดจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ไม่ว่ามวลรวมนั้นจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ตาม ในการทดสอบใช้วิธีการตะแกรงร่อนให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C 136 (2001) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

##### 3) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อให้สามารถหาค่าหน่วยน้ำหนักของทรายได้ และนำค่าที่ได้มาออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2001)



รูปที่ 3.3 การทดสอบการหาขนาดละเอียดของทราย

- การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ในการวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.15 สามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน ASTM C 188 (2001) รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

- การทดสอบคุณสมบัติของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ สามารถวัดได้โดยการทดสอบเช่นเดียวกับทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 128 (2001) รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

## 2) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2001) ดังแสดงในรูปที่ 3.5

## 3) การทดสอบหาค่าความละเอียดของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความละเอียดของไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ โดยวัดจากปริมาณที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

### 3.1.2 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์

#### 1. การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม แล้วเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 7 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 138 (2001)

#### 2. การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของมอร์ตาร์ได้เป็นอย่างดี และเพื่อหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม แล้วเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 (2001)

3. ส่วนผสมและจำนวนของก้อนตัวอย่าง ก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งสิ้น (ทั้ง perlite และ diatomite) 750 ตัวอย่าง โดยแยกตามลักษณะการผสม ดังนี้

#### 1) ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม (control mortar)

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมและจำนวนก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม

ลำดับที่	อายุการบ่ม (วัน)	อัตราส่วน (C:S)	อัตราส่วน (C:S) (%)	จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)
1	3	1 : 2.75	100 : 100	3
2	7	1 : 2.75	100 : 100	3
3	14	1 : 2.75	100 : 100	3
4	28	1 : 2.75	100 : 100	3
5	60	1 : 2.75	100 : 100	3
6	90	1 : 2.75	100 : 100	3
			รวม	18

2) ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา

ลำดับที่	อัตราส่วน (C:S:D, P)	อัตราส่วน (C:S:D, P) (%)	จำนวนของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ (ก้อน)				จำนวน ก้อน ตัวอย่าง (ก้อน)
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
1	1 : 2.475 : 0.275	100 : 90 : 10	6	6	6	6	24
2	1 : 2.200 : 0.550	100 : 80 : 20	6	6	6	6	24
3	1 : 1.925 : 0.825	100 : 70 : 30	6	6	6	6	24
4	1 : 1.650 : 1.100	100 : 60 : 40	6	6	6	6	24
			รวม				96

3) ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีตมวลเบา

ลำดับที่	อัตราส่วน (C:S:D, P)	อัตราส่วน (C:S:D, P) (%)	จำนวนของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ (ก้อน)				จำนวน ก้อน ตัวอย่าง (ก้อน)
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
1	0.90 : 2.75 : 0.10	90 : 100 : 10	6	6	6	6	24
2	0.80 : 2.75 : 0.20	80 : 100 : 20	6	6	6	6	24
3	0.70 : 2.75 : 0.30	70 : 100 : 30	6	6	6	6	24
4	0.60 : 2.75 : 0.40	60 : 100 : 40	6	6	6	6	24
			รวม				96

4) ส่วนผสมโดยแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสาร  
ปอซโซลานธรรมชาติ

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมโดยแทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสาร  
ปอซโซลานธรรมชาติ

ลำดับที่	อัตราส่วน (C:S:D, P)	อัตราส่วน (C:S:D, P) (%)	จำนวนของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ (ก้อน)						จำนวน ก้อน ตัวอย่าง (ก้อน)
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	
1	1 : 2.6125 : 0.1375	100 : 95 : 5	6	6	6	6	6	6	36
2	1 : 2.4750 : 0.2750	100 : 90 : 10	6	6	6	6	6	6	36
3	1 : 2.3375 : 0.4125	100 : 80 : 15	6	6	6	6	6	6	36
4	1 : 2.2000 : 0.5500	100 : 80 : 20	6	6	6	6	6	6	36
5	1 : 2.0625 : 0.6875	100 : 75 : 25	6	6	6	6	6	6	36
			รวม						180

5) ส่วนผสมโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ

ลำดับที่	อัตราส่วน (C:S:D, P)	อัตราส่วน (C:S:D, P) (%)	จำนวนของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ (ก้อน)						จำนวน ก้อน ตัวอย่าง (ก้อน)
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	
1	0.95 : 2.75 : 0.05	95 : 100 : 5	6	6	6	6	6	6	36
2	0.90 : 2.75 : 0.10	90 : 100 : 10	6	6	6	6	6	6	36
3	0.85 : 2.75 : 0.15	85 : 100 : 15	6	6	6	6	6	6	36
4	0.80 : 2.75 : 0.20	80 : 100 : 20	6	6	6	6	6	6	36
5	0.75 : 2.75 : 0.25	75 : 100 : 25	6	6	6	6	6	6	36
			รวม						180

6) ส่วนผสมโดยผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ

ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมโดยผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ เพื่อใช้เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ

ลำดับที่	อัตราส่วน (C:S:D, P)	อัตราส่วน (C:S:D, P) (%)	จำนวนของก้อนตัวอย่าง ที่อายุการบ่มต่าง ๆ (ก้อน)						จำนวน ก้อน ตัวอย่าง (ก้อน)
			3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	
1	1 : 2.75 : 0.05	100 : 100 : 5	6	6	6	6	6	6	36
2	1 : 2.75 : 0.10	100 : 100 : 10	6	6	6	6	6	6	36
3	1 : 2.75 : 0.15	100 : 100 : 15	6	6	6	6	6	6	36
4	1 : 2.75 : 0.20	100 : 100 : 20	6	6	6	6	6	6	36
5	1 : 2.75 : 0.25	100 : 100 : 25	6	6	6	6	6	6	36
			รวม						180

## 3.2 การใช้ไดอะตอมไมท์ในงานจีโอโพลิเมอร์

### 3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ไดอะตอมไมท์ (DE) จากอำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดลพบุรี โดยนำมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้ธาตุหลักของไดอะตอมไมท์มีการแตกตัวที่ดีขึ้น
2. เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
3. สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งประกอบด้วย  $\text{Na}_2\text{O} = 15.32\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 32.87\%$  และ น้ำ = 51.81% โดยน้ำหนัก และมี  $\text{pH} = 9.05$  ตรวจสอบโดยเครื่องพีเอชมิเตอร์
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

### 3.2.2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ไดอะตอมไมท์แทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ระยะเวลาทิ้งให้ตัวอย่างก่อตัวก่อนการเร่งปฏิกิริยาตัวอย่างเท่ากับ 1 ชั่วโมง และเวลาการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 24 ชั่วโมง ทุกอัตราส่วนผสม โดยทำการแปรผันตามผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดังนี้

- 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

- 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

- Series C : แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) 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

- 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



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

- Series F : แปรผันตามระยะเวลาการบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 7, 14 และ 28 วัน

- 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

### 3.2.3 วิธีผสมและทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

1. การผสมทำในอุณหภูมิห้องมีค่าระหว่าง 25 ถึง 45 องศาเซลเซียส
2. ขั้นตอนการผสมเริ่มต้นด้วยคลุกเคล้าระหว่างวัสดุประสานกับทรายให้เข้ากันดีประมาณ 1 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เสร็จแล้วผสมอีกประมาณ 10 นาที

### 3.2.4 ทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C1437

3.2.5 ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C109 ที่อายุการบ่ม เท่ากับ 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้แบบอาคริลิก ขนาด 50x50x50 mm. หล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Mix ID.*	Mix Proportion (g.)			
	Binder	Sand	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	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



### 3.3 การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอชโซลานด้วยการหล่อแข็งให้เป็นก้อน

จากปัญหาการปนเปื้อนของสารโลหะหนักสู่สภาพแวดล้อมและการจัดการกับกากตะกอนของเสีย จึงนำมาสู่แนวความคิดในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุปอชโซลาน ได้แก่ ซิลิกาฟุ้ง เถ้าลอย ซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลท์ธรรมชาติ มาใช้ในการเก็บกักหรือกรองสารปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยการศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอชโซลานด้วยการหล่อแข็งให้เป็นก้อน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง รวมถึงวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพและวิเคราะห์โครงสร้างระดับโมเลกุลของตัวอย่าง โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุได้แก่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1, ซิลิกาฟุ้ง, เถ้าลอย, ซีโอไลท์สังเคราะห์, ซีโอไลท์ธรรมชาติ และกากตะกอนของเสีย

ส่วนที่ 2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยซิลิกาฟุ้ง, เถ้าลอย, ซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลท์ธรรมชาติ เป็นวัสดุยึดประสาน และผสมกากตะกอนของเสียจากโรงชุบโลหะ ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ของตัวอย่างอายุ 7, 28 และ 60 วัน

ส่วนที่ 3 ศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) และ Dynamic Leaching Test (DLT)

#### 3.3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

##### 1. วัสดุอุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
- 2) ซิลิกาฟุ้ง
- 3) เถ้าลอย เป็นเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 4) ซีโอไลท์สังเคราะห์ จากบริษัทไทยซิลิเกตเคมีคัล จำกัด จังหวัดชลบุรี
- 5) ซีโอไลท์ธรรมชาติ จากโรงงานปูนขาวโกวิท จังหวัดสระบุรี
- 6) กากตะกอนของเสีย จากโรงงานชุบโลหะ จังหวัดชลบุรี
- 7) น้ำประปา
- 8) กรดอะซิติก

9) กรดซัลฟูริก

10) กรดไนตริก

## 2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี วิธี X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)
- 2) เครื่องทดสอบองค์ประกอบทางเคมี วิธี X-Ray Diffractometer Analysis (XRD)
- 3) เครื่องทดสอบ Thermo Gravimetric Analyzer (TGA) / Differential Thermal Analyzer (DTA)
- 4) เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)
- 5) เครื่องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)
- 6) เครื่องทดสอบ X-ray Absorption Spectroscopy (XAS)
- 7) เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Particle Size Analyzer
- 8) เครื่องทดสอบ Mercury Intrusion Porosity (MIP)
- 9) ชุดทดสอบ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)
- 10) ชุดทดสอบ Dynamic Leaching Test (DLT)
- 11) เครื่องทดสอบ Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)
- 12) ตู้อบปรับอุณหภูมิได้
- 13) ตู้ดูดความชื้น
- 14) ชุดตะแกรงร่อน
- 15) แบบหล่อก้อนตัวอย่าง ขนาด 50 x 50 x 50 mm.
- 16) ชุดอุปกรณ์เตรียมก้อนเพสต์

ตารางที่ 3.8 อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุปอชโซลานและกากตะกอนของ  
เสี้ยน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	วัสดุปอชโซลาน	กากตะกอนของเสี้ยน
PC - 100%	-	40%
		50%
		60%
PC - 90%	Si - 10%	40%
		50%
		60%
PC - 70%	FA - 30%	40%
		50%
		60%
PC - 80%	ZeS - 20%	40%
		50%
		60%
PC - 70%	ZeS - 30%	40%
		50%
		60%
PC - 60%	ZeS - 40%	40%
		50%
		60%
PC - 80%	ZeN - 20%	40%
		50%
		60%
PC - 70%	ZeN - 30%	40%
		50%
		60%
PC - 60%	ZeN - 40%	40%
		50%
		60%

### 3.3.2 วิธีการทดสอบ

#### การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

##### 1) การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลอชาเตอลิแอร์ (Le Chatelier Flask) ตาม ASTM C 188 ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำ ที่มีปริมาตรเท่าวัสดุ นั้นโดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอชโซลานหาได้จากการแทนที่ในน้ำมันก๊าด

##### 2) การทดสอบความละเอียด

โดยทดสอบหาปริมาณที่ค้างบนตะแกรงขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร (เบอร์ 325) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอชโซลาน โดยใช้การร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) ตาม ASTM C 430 เป็นการวัดความละเอียดของวัสดุที่มีอนุภาคนขนาดเล็กและไม่ละลายน้ำ ค่าที่ได้เป็นร้อยละของอัตราส่วนของน้ำหนักที่ค้างต่อน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ

##### 3) การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาค

วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอชโซลาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer)

##### 4) การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี

โดยการนำผงตัวอย่างมาบดในครกบดสาร (Ceramic or agate mortar) เพื่อให้ตัวอย่างเป็นผงที่ละเอียดขึ้น และมีขนาดของเม็ดผงใกล้เคียงกัน ทาตัวอย่างลงบนเทปด้านที่เป็นกาวบนแผ่นเฟรมที่เตรียมไว้ ใช้พู่กันที่สะอาดเกลี่ยผงตัวอย่างให้ติดบนเทปเป็นชั้นบางอย่างสม่ำเสมอ ทำความสะอาดแผ่นตัวอย่างให้เรียบร้อย ตรวจสอบความสม่ำเสมอของแผ่นตัวอย่างใช้เทปกาวปิดทับตัวอย่าง เพื่อกันไม่ให้ผงหลุดออกจากแผ่นเฟรม จากนั้นนำไปทดสอบ ด้วยเทคนิค X-ray Absorption Spectroscopy (XAS) และ X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

##### 5) การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

โดยการนำผงตัวอย่างมาโรยบนแท่นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 ซม. ที่ติดแผ่นกาว 2 หน้า เตรียมไว้แล้ว โดยให้ผงตัวอย่างติดแผ่นกาวเป็นแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำไปเป่าด้วยลมออกซิเจนเพื่อให้ผงตัวอย่างหลุดออกให้เหลือเพียงชั้นเดียว นำแท่นตัวอย่างไปอบด้วยแสงไฟเพื่อไล่ความชื้น แล้วนำแท่นตัวอย่างไปเคลือบด้วยออรอนทองคำ หลังจากนั้นจึงนำไปถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM



รูปที่ 3.6 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM)

#### 6) การถ่ายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

โดยการนำผงตัวอย่างไปละลายในน้ำกลั่น แล้วนำสารละลายที่ได้หยดใส่แผ่นเก็บตัวอย่าง แล้วจึงนำไปอบด้วยแสงไฟเพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นจึงนำไปถ่ายภาพด้วยเครื่อง TEM



รูปที่ 3.7 เครื่องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

#### 7) การทดสอบ Thermo Gravimetric Analyzer (TGA)

เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงมวลสารตัวอย่างและปริมาณองค์ประกอบของสารเมื่อได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่วิเคราะห์ ซึ่งสามารถกำหนดอุณหภูมิการใช้งานและอัตราการเร่งของอุณหภูมิได้ มีการประมวลผลในรูปของเทอร์โมแกรมระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปกับอุณหภูมิ และสามารถคำนวณปริมาณมวลของสารที่หายไปกับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปภายใต้การควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์

สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งชนิดของแข็ง ของเหลว และชนิดผงได้ สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ ในช่วงอุณหภูมิ 50 – 1,500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบ Thermo Gravimetric Analyzer (TGA)

**การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์**

โดยการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยวัสดุปอซโซลาน และผสมกากตะกอนของเสียในอัตราส่วนดังนี้

ซิลิกาฟุ่ม ร้อยละ 10 , เถ้าลอย ร้อยละ 30 , ซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลท์ธรรมชาติ ร้อยละ 20, 30 และ 40 ทำหน้าที่เป็นวัสดุยึดประสานและผสมกากตะกอนของเสียจากโรงชุบโลหะ ในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ระหว่าง 0.35 - 0.45

1) การทดสอบความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์

โดยใช้เครื่องมือไวแคต (Vicat Apparatus) เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่พอเหมาะสำหรับเพสต์ โดยพิจารณาจากการจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เป็นระยะ  $10 \pm 1$  มม. ในเวลา 30 วินาที ตาม ASTM C 187 ซึ่งวิธีการผสมเพสต์เป็นไปตาม ASTM C 305\

## 2) การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว

ทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลาย ตาม ASTM C 191 โดยใช้ปริมาณน้ำที่พอเหมาะจากการทดสอบความชื้นเหลวปกติ ซึ่งการก่อตัวระยะต้นคือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนทำให้เข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเองได้

## 3) การหาความสามารถในการไหลตัว

ควบคุมค่าการไหลตัว (Flow) ของซีเมนต์เพสต์ทุกอัตราส่วนผสม โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 230 เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างมีค่าความสามารถเทได้ (Workability) ใกล้เคียงกัน

4) การทดสอบหาขนาดโพรง และการกระจายโพรง ด้วยเครื่อง Mercury Intrusion Porosimeter (MIP) หรือ base analysis

ทุบก้อนลูกบาศก์ให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆประมาณ 5-8 มิลลิเมตร เลือกชิ้นตัวอย่างซึ่งอยู่ตรงกลางก้อนลูกบาศก์ประมาณ 8 กรัม นำชิ้นตัวอย่างไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวซึ่งมีอุณหภูมิที่  $-195^{\circ}\text{C}$  ประมาณ 5 นาที นำตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ  $-40^{\circ}\text{C}$  ความดัน 0.5 ปาสคาล เป็นเวลา 2 วัน นำชิ้นตัวอย่างประมาณ 1-1.5 กรัม ใส่ในแท่งใส่ตัวอย่าง (Penetrometer) แล้วติดตั้งในช่องความดันต่ำ เดินเครื่องเพื่อให้ระบบเป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นเพิ่มความดันจนถึง 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และนำแท่งใส่ตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักและติดตั้งที่ช่องความดันสูงเพื่ออัดความดันจนกระทั่งถึงความดันสูงสุดที่ 33,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

## 5) การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ทุบก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดความกว้าง 10 x 10 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร นำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ  $-40^{\circ}\text{C}$  ความดัน 0.5 ปาสคาล เป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบด้วยทองและนำไปทดสอบถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM

## 6) การทดสอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดย X-Ray Diffraction (XRD)

ทุบก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 5 – 10 มิลลิเมตร นำชิ้นตัวอย่างไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ  $-195^{\circ}\text{C}$  ประมาณ 5 นาที นำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ  $-40^{\circ}\text{C}$  ความดัน 0.5 ปาสคาล เป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบ XRD เพื่อวิเคราะห์แคลเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบองค์ประกอบทางเคมี X-Ray Diffractometer Analysis (XRD)

#### 7) การทดสอบ Thermo Gravimetric Analyzer (TGA)

เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงมวลสารตัวอย่างและปริมาณองค์ประกอบของสารเมื่อได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่วิเคราะห์ ซึ่งสามารถกำหนดอุณหภูมิการใช้งานและอัตราการเร่งของอุณหภูมิได้ มีการประมวลผลในรูปของเทอร์โมแกรมระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปกับอุณหภูมิ และสามารถคำนวณปริมาณมวลของสารที่หายไปกับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปภายใต้การควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งชนิดของแข็ง ของเหลว และชนิดผงได้ สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในช่วงอุณหภูมิ 50 – 1,500 องศาเซลเซียส

#### 8) การทดสอบกำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

หล่อก้อนซีเมนต์เพสต์ขนาด 50x50x50 มม. โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ ซิลิกาฟูม ร้อยละ 10 , เถ้าลอย ร้อยละ 30 , ซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลท์ธรรมชาติ ร้อยละ 20, 30 และ 40 เป็นวัสดุยึดประสาน และผสมกากตะกอนของเสียจากโรงชุบโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ปริมาณน้ำที่ใช้คือปริมาณน้ำที่ทำให้ค่าการไหลแผ่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 60 ตามมาตรฐาน ASTM C 109

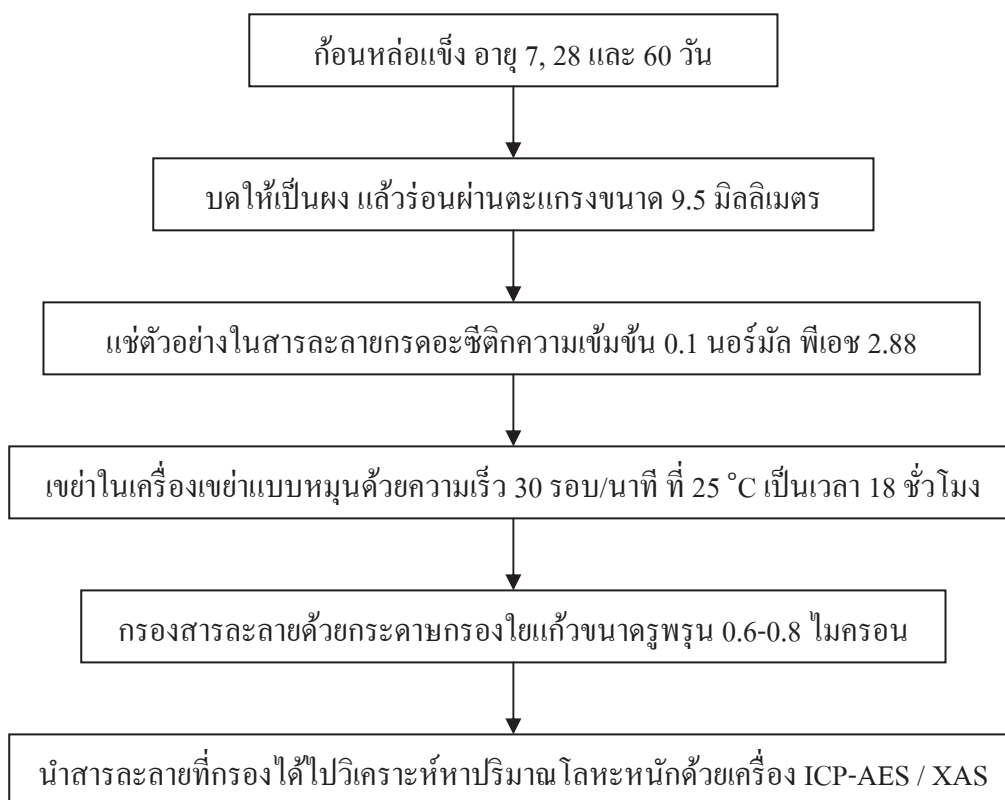
#### การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักของก้อนหล่อแข็ง

##### 1) การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)



นำก้อนหล่อแข็งตัวอย่างที่บ่มเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 60 วัน มาบดให้เป็นผงละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 9.5 มิลลิเมตรหรือน้อยกว่า จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายกรดอะซีติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2.88 โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักของของแข็งต่อปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 1 : 20 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุนที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C กรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว ขนาดรูพรุน 0.6-0.8 ไมครอน หลังจากนั้นนำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP - AES

การเตรียมสารละลายกรดอะซีติกที่มีพีเอชเท่ากับ 2.88 โดยเจือจางกรดอะซีติก 5.7 มิลลิลิตร ด้วยน้ำที่ปราศจากไอออนจนได้ปริมาตร 1 ลิตร สารละลายที่เตรียมได้จะมีพีเอชเท่ากับ 2.88



รูปที่ 3.10 การทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6

## 2) การทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Dynamic Leach Test (DLT)

การทดสอบการชะละลายจะใช้สารชะ 2 ชนิด คือ สารละลายกรดอะซีติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล และสารละลายฟอสเฟตสังเคราะห์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยนำก้อนหล่อแข็งตัวอย่างที่บ่มเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 60 วัน มาแช่ในสารชะในขวดพลาสติกขนาด 1 ลิตร โดย

ก้อนตัวอย่างบรรจุอยู่ในตาข่ายพลาสติก และแขวนอยู่ตรงกึ่งกลางของสารละลายเพื่อให้ก้อนตัวอย่างสัมผัสกับสารละลายทุกทิศทาง ใช้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของของแข็งต่อปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 1 : 20

เปลี่ยนสารละลาย และนำสารละลายไปวัดค่าฟิเอชและวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-AES และ XAS ดังนี้

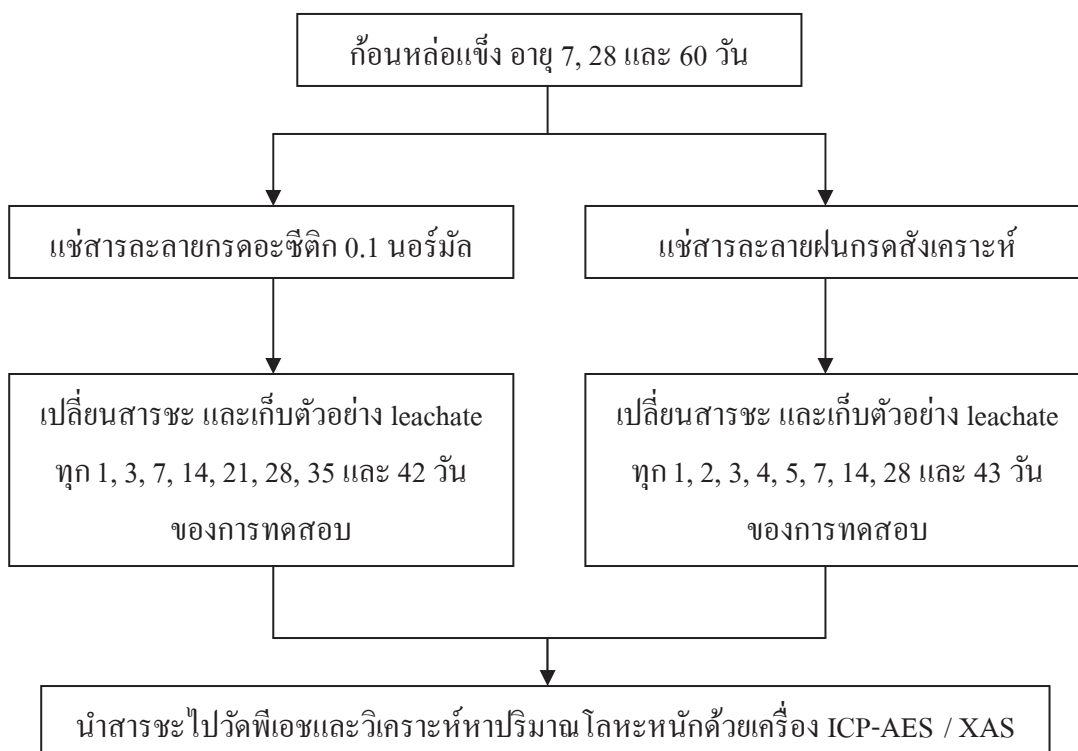
สารชะเป็นสารละลายกรดอะซีติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

เปลี่ยนสารละลาย และนำสารละลายไปวัดค่าฟิเอชและวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-AES ทุก 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35 และ 42 วันของการทดสอบ (พิเชษฐ์, 2542)

สารชะเป็นสารละลายฝนกรดสังเคราะห์

เปลี่ยนสารละลาย และนำสารละลายไปวัดค่าฟิเอชและวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-AES ทุก 1, 2, 3, 4, 5, 7, 14, 28 และ 43 วันของการทดสอบ (Jeffrey and Means, 1955)

การเตรียมสารละลายฝนกรดสังเคราะห์ โดยนำน้ำที่ปราศจากไอออนมาผสมกับสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล และสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก จนกว่าฟิเอชของสารละลายจะมีค่าเท่ากับ 5



รูปที่ 3.11 การทดสอบการชะละลายโดยวิธี DLT

### 3.4 การศึกษาซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

#### 3.4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตาม ASTM C150
2. เถ้าปาล์มน้ำมัน ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม นำเถ้าปาล์มน้ำมันมา ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และอนุภาคที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หลังจากนั้นนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียด 2 ขนาด คือขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ เรียกว่า GIPOA และอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์เรียกว่า G2POA
3. น้ำ ใช้น้ำประปา

#### 3.4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย การขนาดเฉลี่ยและการกระจายของอนุภาคโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบ เลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer) ความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 188 องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้วิธี (X-Ray Fluorescence) และทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบรตตาม มาตรฐาน ASTM C 204

#### 3.4.3 อัตราส่วนผสมและการทดสอบกำลังอัดของเพสต์

การหล่อซีเมนต์เพสต์ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงตารางที่ 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทุกอัตราส่วนผสม หล่อตัวอย่างเพสต์ขนาด 50x50x50 มม<sup>3</sup> ตามมาตรฐาน ASTM C 109 และถอดแบบเพสต์ที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำและทดสอบกำลังอัดที่ อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 3.9 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

เพสต์	OPC	GIPOA	G2POA
OPC	100	-	-
20GIPOA	80	20	-
40GIPOA	60	40	-
20G2POA	80	-	20
40G2POA	60	-	40

### 3.4.4 การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเพสต์

การเตรียมตัวอย่างทดสอบโครงสร้างจุลภาคของเพสต์ เลือกชิ้นตัวอย่างซึ่งอยู่ตรงกลางก้อนลูกบาศก์ ใช้สิ่วสกัดตัวอย่างเพสต์ให้แตกเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ต่อจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อยับยั้งปฏิกิริยา ไฮเดรชัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างทำให้แห้งด้วยเครื่อง Freeze Dry ที่ความดันสุญญากาศ -0.5 Pa อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างไว้ในโถดูดความชื้น

#### 1) การทดสอบเพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน

การวิเคราะห์เพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน โดยใช้เครื่องมือ Simultaneous Thermal analysis เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์หนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นำตัวอย่างที่หยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 หลังจากนั้นนำตัวอย่างทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Simultaneous Thermal analysis วิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1000 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

#### 2) การวิเคราะห์โครงสร้างโพรงของเพสต์

การวิเคราะห์การกระจายตัวโพรงของเพสต์ด้วยเครื่องมือ Mercury Intrusion porosimeter นำตัวอย่างที่ยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันชิ้นเล็กๆ ที่มีขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ใส่ในแท่งใส่ตัวอย่าง (Penetrometer) แล้วติดตั้งในช่องความดันต่ำ เดินเครื่องเพื่อให้ระบบเป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นเพิ่มความดันจนถึง 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และนำแท่งใส่ตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักและติดตั้งที่ช่องความดันสูงเพื่ออัดความดันจนกระทั่งถึงความดันสูงสุดที่ 33,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

#### 3) การถ่ายภาพขยายของเพสต์

การถ่ายภาพขยายของเพสต์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) นำตัวอย่างที่ยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันชิ้นเล็กๆ ที่มีขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร เคลือบตัวอย่างด้วยเครื่อง Iron sputtering device หลังจากนั้นนำตัวอย่างถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## บทที่ 4

### การใช้โอะอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา

#### 4.1 บทนำ

การผลิตคอนกรีตในปัจจุบันได้มีความเจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว โดยมีทั้งการพัฒนาในด้านการออกแบบ วิธีการก่อสร้าง และวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยและการพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตเพื่อปรับปรุงในด้านคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นและสามารถใช้งานได้ทุกสภาพการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตในสภาพเหลวและคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว คอนกรีตในงานก่อสร้างมีส่วนประกอบหลัก คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุมวลรวมละเอียด (ส่วนมากเป็นทราย) วัสดุมวลรวมหยาบ (ส่วนมากเป็นหินหรือกรวด) และน้ำ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กลายเป็นซีเมนต์เพสต์และจะยึดเกาะวัสดุมวลรวมเข้าไว้ด้วยกันเป็นคอนกรีต โดยทั่วไปคอนกรีตมีน้ำหนักประมาณ 2,300 ถึง 2,400 kg/m<sup>3</sup> และมีค่ากำลังอัดประมาณ 240 ksc ซึ่งน้ำหนักที่มากเช่นนี้ถือว่ามากพอสมควรที่ทำให้โครงสร้างต้องสูญเสียกำลังส่วนหนึ่งไปกับการรองรับน้ำหนักของโครงสร้างเอง โดยเฉพาะในงานโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารสูง น้ำหนักของตัวอาคารที่ทับถมลงมาจากชั้นบนสุดจนถึงฐานรากจะมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในการออกแบบและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาในเรื่องของวัสดุผสมในงานคอนกรีต เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักน้อยลงและยังคงมีกำลังอัดที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยวัสดุที่นำมาใช้มีกันอย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่จะเป็นมวลรวมที่มีน้ำหนักเบา หรืออาจเป็นสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (mineral admixture) ที่มีน้ำหนักเบาที่อยู่ในกลุ่มสารปอซโซลาน (pozzolan) ตัวอย่างเช่น เถ้าลอย (fly ash) ตะกรันจากเตาถลุง (blast furnace slag) ซิลิกาฟูม (silica fume) และเถ้าแกลบ (rice husk ash) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันวัสดุปอซโซลานเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในงานคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานจัดเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (alumino silicate) ที่มีซิลิกา (Si) หรือมีซิลิกา (Si) และอะลูมินา (Al) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมาก และมีน้ำหรือความชื้นเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Ca(OH)<sub>2</sub>] ที่อุณหภูมิปกติ จะได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” วัสดุปอซโซลาน

เมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหยาบ และวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยมีปริมาณค่อนข้างมาก และสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ และนอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุปอซโซลานบางชนิดที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ เช่น ซิลิกาฟูมที่มีความละเอียดสูงมากในการทำคอนกรีตกำลังสูง แต่มีราคาที่แพงมาก (ปริญญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2547)

ปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan) เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการศึกษาการเป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolanic materials) จากการจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C 618 จัดเป็นปอซโซลานชั้นคุณภาพ N (Class N) คือ ปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ (อนนท์ ป้อมประสิทธิ์, 2545) ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่จะผ่านการปรับปรุง เช่น กระบวนการให้ความร้อนในเตาเผาและบดเป็นผงละเอียด ซึ่งอาจเป็นดินเผา (calcined clay) ดินดานเผา (calcined shale) และดินขาวเผา (metakaolin) (จันทนา สุขุมานนท์, 2550) ในประเทศไทยยังมีวัสดุปอซโซลานธรรมชาติอีกสองชนิดที่มีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุปอซโซลานเช่นกัน คือ ไดอะตอมไมท์ (diatomite) และเพอร์ไลต์ (perlite) โดยจัดเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต หรือสารอะลูมิเนียมฟอสเฟต จึงน่าจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีและเพิ่มกำลังให้กับคอนกรีตในช่วงอายุปลายได้ อีกทั้งยังสามารถทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาได้ เนื่องจากไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์มีคุณสมบัติที่ดี คือ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ มีความพรุนสูง และจากการค้นคว้ารายงานวิจัยในต่างประเทศพบว่าได้มีการนำไดอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ มาประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตมากมาย เช่น นำมาใช้ในงานคอนกรีตมวลเบา ทำเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไลในคอนกรีต ลดปัญหาการแตกร้าว ช่วยลดการซึมผ่าน เพิ่มความทนทาน และเพิ่มกำลัง เป็นต้น แต่ในประเทศไทยยังมีการศึกษาเรื่องการนำไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ มาใช้ในงานคอนกรีตไม่มากนัก งานวิจัยครั้งนี้จึงได้นำไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์มาใช้ในการคอนกรีตซึ่งถ้าสามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้น้อยลง โดยที่สามารถรับแรงอัดได้ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลงไปได้มาก

## 4.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทดลองหาสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม และทำการศึกษาเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม กับมอร์ตาร์ควบคุม ให้ได้มอร์ตาร์ที่มีหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุด และมีกำลังอัดมากที่สุดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตได้

## 4.3 ลักษณะทางกายภาพของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ Type 2

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์และทราย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 มีความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าปูนซีเมนต์ และทราย โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.62, 0.16 และ 0.29 เท่าของปูนซีเมนต์ และเท่ากับ 0.73, 0.19 และ 0.33 เท่าของทรายตามลำดับ โดยที่ไคอะตอมไมท์มีค่าความถ่วงจำเพาะมากที่สุด และเพอร์ไลต์ Type 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าเพอร์ไลต์ Type 2 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าในการนำสารปอซโซลานธรรมชาติทั้งสามชนิดนี้ไปใช้ในส่วนผสม สามารถทำให้หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากเพอร์ไลต์มีน้ำหนักเบา และมีความพรุนสูง

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2

	Portland Cement Type 1	Sand	Diatomite	Perlite Type 1	Perlite Type 2
Specific Gravity	3.15	2.70	1.96	0.50	0.92
Dry Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	1,450	1,584	530-820	160-205	120-150
Median Particle Size (μm)	11.24	-	7.46	77.68	28.80

จากผลการทดสอบ Laser Particle Size ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าไคอะตอมไมท์ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย Median Particle Size ( $d_{50}$ ) เท่ากับ 7.46 micron ซึ่งเล็กกว่าปูนซีเมนต์ที่มีขนาด  $d_{50}$  เท่ากับ 11.24 micron อยู่ 0.66 เท่า แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแทรกเข้าไปในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นได้ ส่วนเพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 มีขนาดอนุภาค  $d_{50}$  เท่ากับ 77.68 และ 28.20 micron ซึ่งใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ 6.91 และ 2.56 เท่าตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดน้ำหนักของมอร์ตาร์ลงได้ เนื่องจากมีขนาดที่ใหญ่กว่าแต่มีความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่า

#### 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ Type 2

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และเพอร์ไลต์ Type 2 ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า

1) ไคอะตอมไมท์ มีปริมาณสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 93.42\%$  ปริมาณ  $\text{SO}_3 = 386 \text{ ppm}$  ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน (LOI)  $8.11\%$  และมีเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณ  $87.3\%$  ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2001) ซึ่งกำหนดให้ปริมาณสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ต้องมีค่ามากกว่า  $70\%$  ค่า LOI ไม่มากกว่า  $10\%$  ค่า  $\text{SO}_3$  ไม่มากกว่า  $4\%$  และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด  $45 \text{ micron}$ ) ไม่น้อยกว่า  $66\%$

2) เพอร์ไลต์ Type 1 มีปริมาณสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 88.01\%$  ปริมาณ  $\text{SO}_3 = 251 \text{ ppm}$  และมีการสูญเสียเนื่องจากความร้อน  $1.02\%$

3) เพอร์ไลต์ Type 2 มีปริมาณสารประกอบหลัก  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 84.63\%$  ปริมาณ  $\text{SO}_3 = 358 \text{ ppm}$  ค่าการสูญเสียเนื่องจากความร้อน  $1.25\%$  และมีเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ประมาณ  $82.5\%$

เพอร์ไลต์ Type 1 และ Type 2 มีปริมาณสารประกอบหลักใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าเพอร์ไลต์ที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (2001) ซึ่งกำหนดให้ปริมาณสารประกอบหลักดังกล่าวต้องมีค่ามากกว่า  $70\%$  และมีค่า LOI ไม่มากกว่า  $10$  และ  $6\%$  ค่า  $\text{SO}_3$  ไม่มากกว่า  $4\%$  ตามลำดับ และควรมีเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่า  $66\%$

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา และเพอร์ไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการเผาแล้ว สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักทางเคมีตามมาตรฐานกำหนด



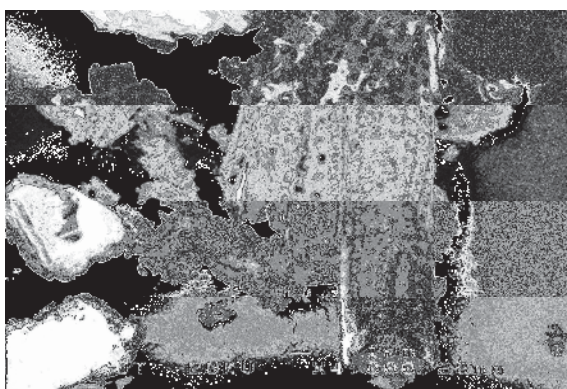
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

Chemical Composition (%)	Portland Cement Type 1*	Diatomite	Perlite Type 1	Perlite Type 2
SiO <sub>2</sub>	17-25	68.27	75.16	71.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8	9.93	10.46	10.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-6.0	15.22	2.39	2.58
CaO	60-67	0.80	1.60	1.86
K <sub>2</sub> O	0.1-1.8	1.65	9.46	8.35
MgO	0.1-4.0	-	-	-
N <sub>2</sub> O	0.1-1.8	-	-	-
SO <sub>3</sub>	0.5-3.0	386 ppm	251 ppm	358 ppm
Loss on Ignition (LOI)	0.1-3.0	8.11	1.02	1.25

หมายเหตุ : \* ข้อมูลจาก ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัยจตุรพิทักษ์กุล (2547)

#### 4.5 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 โดยทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3

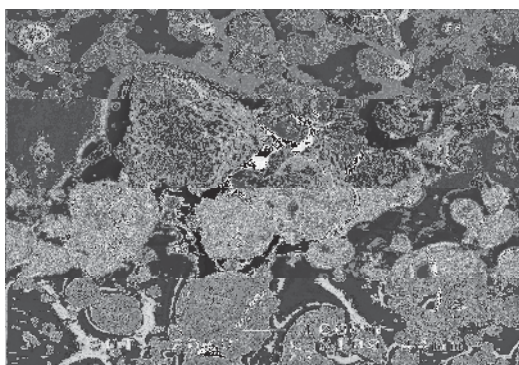


รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์

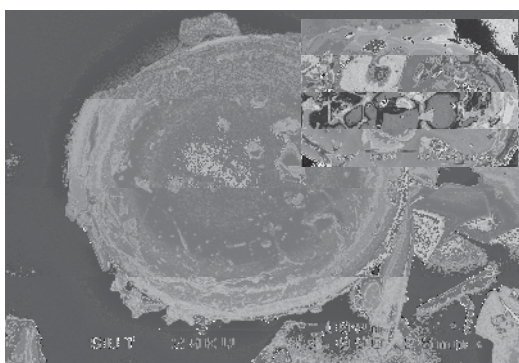
พบว่าไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาหรืออบ มีลักษณะอนุภาคเป็นแท่ง ทรงกระบอกกลวง มีผนังลักษณะเป็นโครงข่ายที่ค่อนข้างสมบูรณ์และเป็นระเบียบคล้ายรังผึ้ง มีความพรุนสูง ขนาดอนุภาคประมาณ 5 ถึง 25 micron ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า เพอร์ไลต์ Type 1 มีขนาดอนุภาคประมาณ 60 ถึง 300 micron ส่วนเพอร์ไลต์ Type 2 มีขนาดอนุภาคประมาณ 15 ถึง 35 micron จากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเพอร์ไลต์ทั้งสองชนิดที่คล้ายกันคือ มีลักษณะอนุภาคแบบกลวงกลม เพราะมีลักษณะเป็นโครงข่าย บางอนุภาคมีลักษณะคล้ายเปลือกไข่ และมีความพรุนสูงเนื่องจากผ่านกระบวนการเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัว

จากลักษณะอนุภาคของ Natural Pozzolan ทั้งสามชนิดดังกล่าว เมื่อนำมาใช้เป็นสารผสมในคอนกรีตจึงสามารถทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่ลงเบาได้ แต่เนื่องจากความพรุนที่สูงนี้ทำให้ความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น



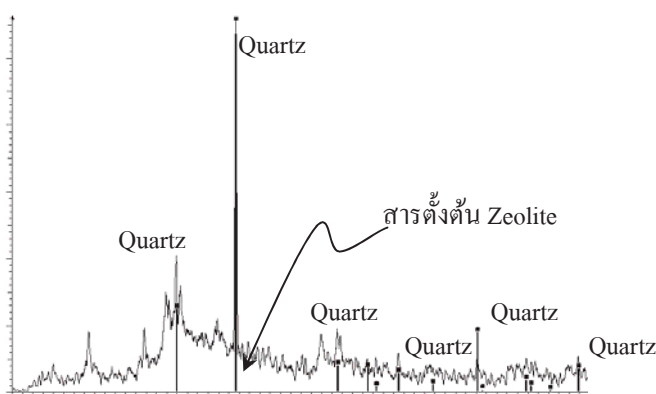
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลต์ Type



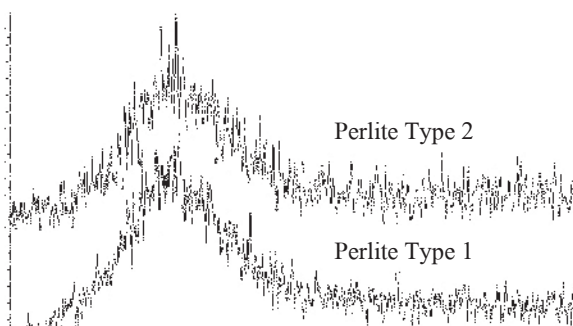
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลต์ Type 2

#### 4.6 ความเป็นผลึกของไคอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และเพอร์ไลต์ Type 2

จากผลการทดสอบความเป็นผลึกของไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ โดยวิธี X-Ray Diffraction Analysis (XRD) พบว่าเพอร์ไลต์ Type 1 และ Type 2 มีลักษณะคล้ายกันคือ มีลักษณะไม่เป็นผลึกหรือมีรูปร่างอสัณฐาน (glassy phase or amorphous) ส่วน XRD ของไคอะตอมไมท์เมื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้นที่เป็น Zeolite พบว่าไคอะตอมไมท์มีลักษณะความเป็นผลึก (crystalline) ของ Quartz ปะปนอยู่ แต่แนวโน้มส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นกึ่งอสัณฐาน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งความเป็นอสัณฐานนี้สามารถบ่งบอกได้ถึงความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) และเพอร์ไลต์จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าไคอะตอมไมท์ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผล XRD ของเถ้าแกลบดำ เรื่องความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว ของ บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ ทวีศักดิ์ คงทรัพย์ (2545) พบว่ามีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ความไม่เป็นผลึกสามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบ XRD ของไคอะตอมไมท์



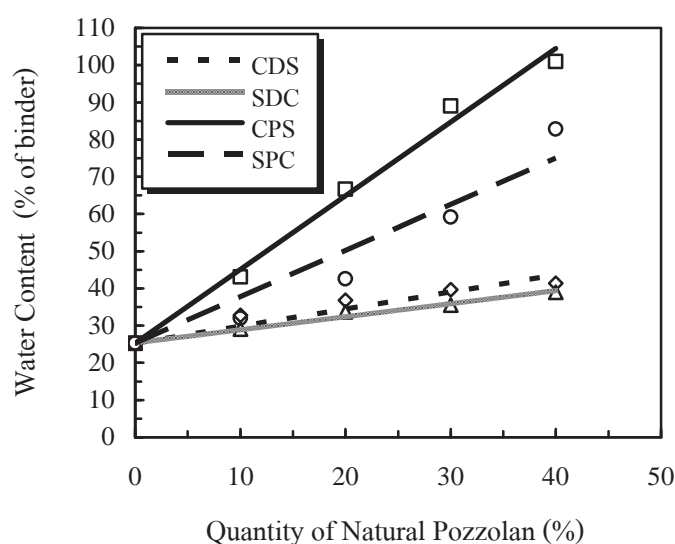
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบ XRD ของเพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2

## 4.7 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำ

### 4.7.1 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์

#### Type 1 ในส่วนผสม

ปริมาณการเพิ่มขึ้นทั้งของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณน้ำ เนื่องจากในการวิจัยนี้มีการควบคุมปริมาณน้ำที่สามารถทำให้คอนกรีตมวลเบาามีค่าการไหลผ่าน 105 ถึง 115% ส่วนผสมทั้งที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 โดยการแทนที่ทรายทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำมากกว่าการแทนที่ด้วยซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณทรายในส่วนผสมมีถึง 2.75 เท่าของปริมาณซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

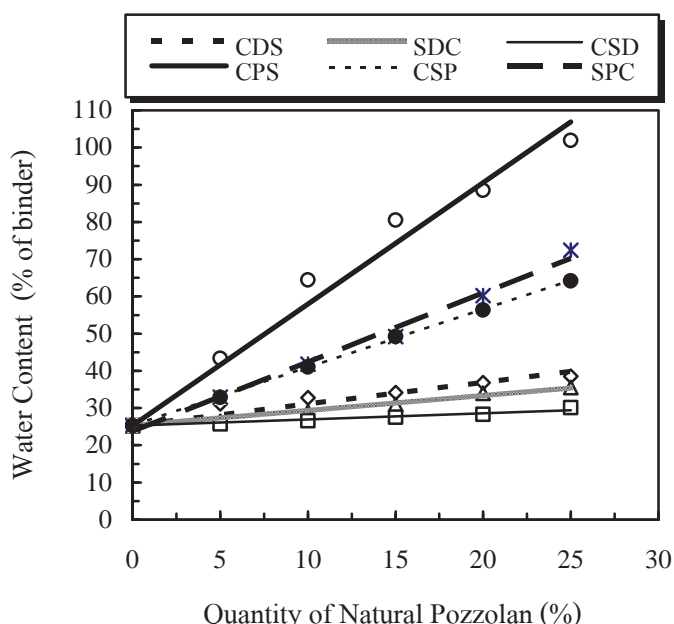


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับปริมาณไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ Type 1 ในคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทรายและปูนซีเมนต์จะมีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 20 และ 12.50% ทุกปริมาณการแทนที่ 10% ส่วนการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์จะมีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น 4.55 และ 3.75% ทุกปริมาณการแทนที่ 10% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณน้ำของมอร์ตาร์ควบคุม ตามลำดับ การใช้เพอร์ไลต์ Type 1 ในคอนกรีตมวลเบามีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำมากกว่าการใช้ไคอะตอมไมท์ เนื่องจากเพอร์ไลต์ Type 1 มีความพรุนสูงกว่า และมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า ถึงแม้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำจะส่งผลดีต่อความสามารถเทได้ แต่จะมีผลเสียโดยตรงต่อกำลังอัด เนื่องจากค่าปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (water/binder, W/B) ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลง

#### 4.7.2 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

การใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมเช่นเดียวกับการใช้ในคอนกรีตมวลเบา เมื่อทำการแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ ทุก 5% จะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 5.88, 3.88 และ 1.88% แต่การใช้เพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสมจะต้องการปริมาณน้ำมากกว่า โดยมีค่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นทุกปริมาณการแทนที่ 5% ประมาณ 32.28, 17.88 และ 15.48% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณน้ำของมอร์ตาร์ควบคุมตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

การแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 มีความต้องการน้ำมากกว่าไคอะตอมไมท์ และการแทนที่ทรายมีความต้องการปริมาณน้ำมากที่สุด แม้ว่าไคอะตอมไมท์จะมีอนุภาคเฉลี่ยที่ละเอียดกว่า แต่เพอร์ไลต์ Type 2 มีความพรุนมากกว่า หน่วยน้ำหนักน้อยกว่า และมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้ควรคำนึงถึงอัตราส่วน W/B ที่เพิ่มขึ้นด้วย เพราะปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังอัด ถ้าใช้ไคอะตอมไมท์หรือเพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสมเพื่อเป็นสารปอซโซลานธรรมชาติในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลงตามไปด้วย

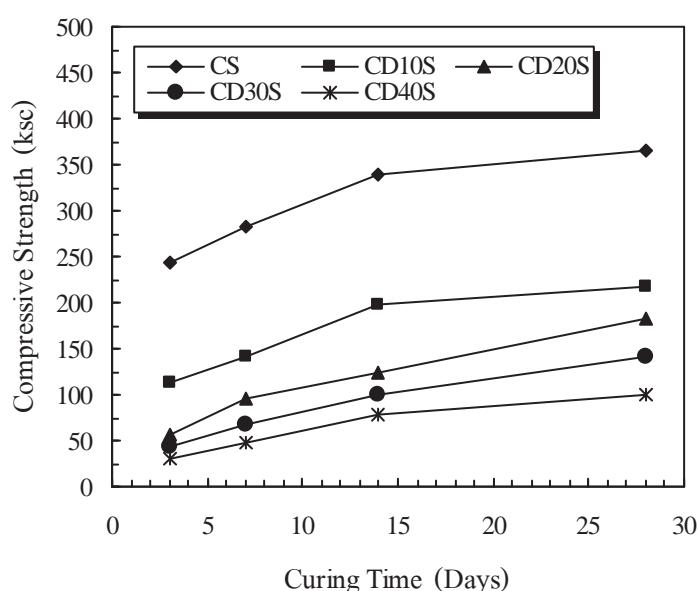
## 4.8 คุณสมบัติด้านกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสมสามารถแยกวิเคราะห์ได้ ดังนี้

### 4.8.1 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม

#### 1) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย

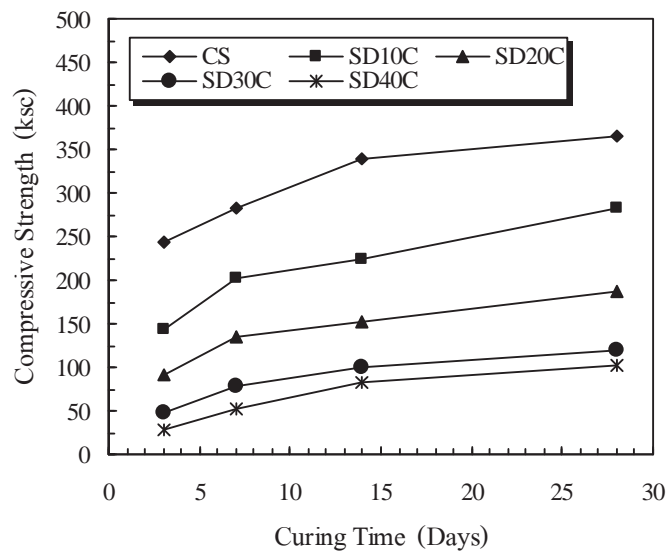
จากรูปที่ 4.8 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทรายมีค่าลดลงตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุมตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทรายมีค่าสูงที่สุด 218 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 100 ksc เมื่อใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 10 และ 40% ซึ่งมีค่าลดลง 40.42 และ 72.58% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย

#### 2) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์

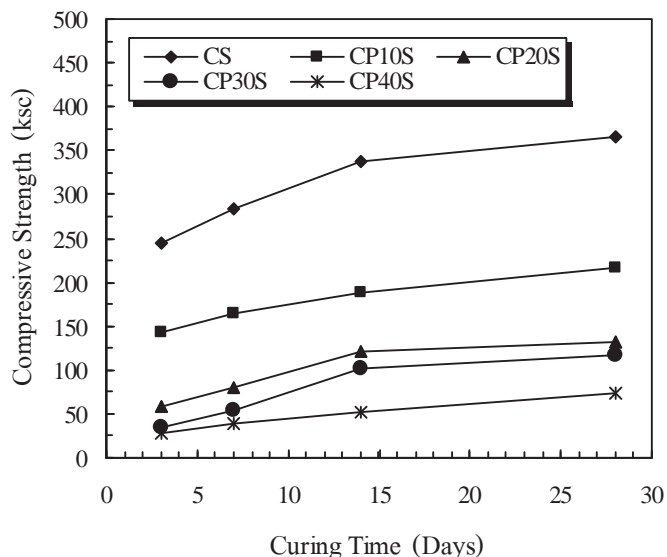
กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับการแทนที่ด้วยทราย โดยมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุมตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุด 283 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 102 ksc เมื่อใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 10 และ 40% ซึ่งมีค่าลดลง 22.64 และ 72.08% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไออะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์

### 3) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ทราย

กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ทรายมีลักษณะคล้ายคลึงกับการแทนที่ทรายด้วยไออะตอมไมท์ โดยมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น แต่มีค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าการแทนที่ทรายด้วยไออะตอมไมท์ แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนา กำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับมอร์ต้าร์ควบคุมตามอายุการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.10

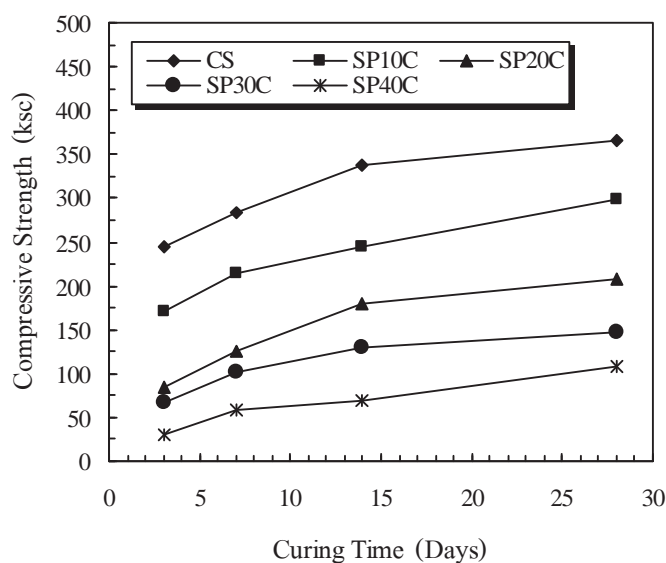


รูปที่ 4.10 กราฟกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ทราย

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทรายมีค่าสูงที่สุด 216 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 73 ksc เมื่อใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทราย 10 และ 40% ซึ่งมีการลดลง 40.99 และ 80.03% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ

#### 4) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์

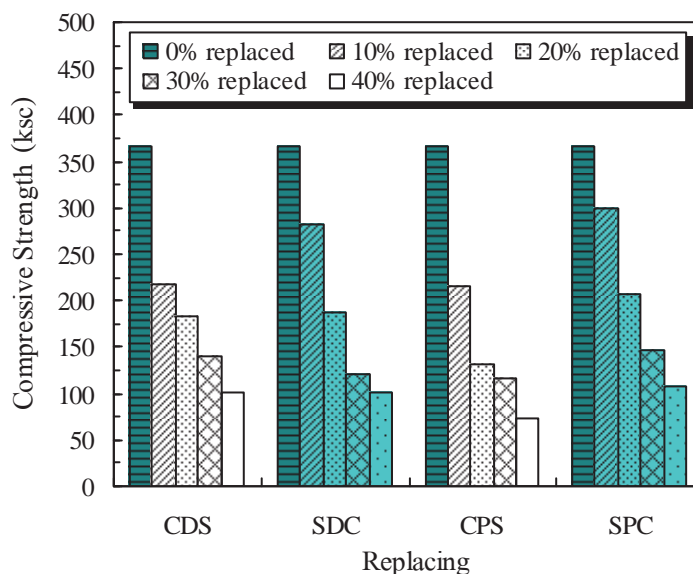
จากรูปที่ 4.11 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ โดยมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น แต่มีค่ากำลังอัดที่มากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ อย่างไรก็ตามการพัฒนา กำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุมตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุด 299 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 108 ksc เมื่อใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ 10 และ 40% ซึ่งมีการลดลง 18.30 และ 70.54% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์

เมื่อพิจารณากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 เปรียบเทียบกับไคอะตอมไมท์ พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเพอร์ไลต์ Type 1 ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าไคอะตอมไมท์ 0.95 และ 27.17% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 10 และ 40% ตามลำดับ แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์พบว่าการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์ Type 1 ให้ค่า กำลังอัดที่สูงกว่าไคอะตอมไมท์ โดยในการแทนที่ด้วยเพอร์ไลต์ Type 1 ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าไคอะตอมไมท์ 5.60 และ 27.17% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ 10 และ 40% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.12





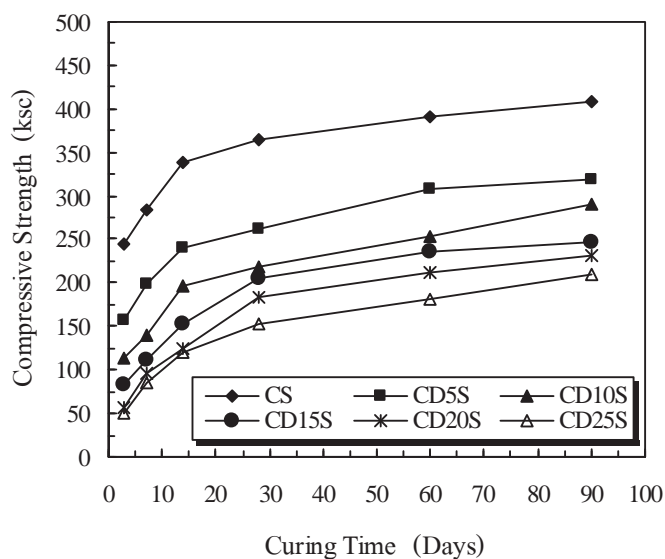
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ในการพิจารณาค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม ยังมีปัจจัยอื่นที่ควรคำนึงถึงด้วย เช่น ค่าหน่วยน้ำหนัก ที่ต้องคำนึงถึงเพื่อต้องการคอนกรีตมวลเบาที่มีค่ากำลังอัดสูงและมีหน่วยน้ำหนักต่ำ เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน

#### 4.8.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ

##### 1) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติโดยการแทนที่ทราย

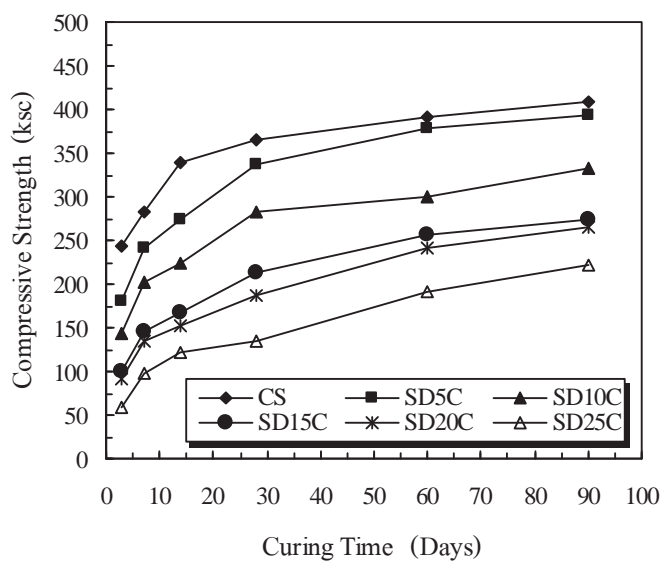
จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ทราย มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 5% มีค่าสูงที่สุด 262 และ 320 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 40.42 และ 72.58% และเมื่อใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 25% มีค่าน้อยที่สุด 153 และ 210 ksc ซึ่งมีค่าลดลง 40.42 และ 72.58% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ  
โดยการแทนที่ทราย

## 2) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติโดยการ แทนที่ปูนซีเมนต์

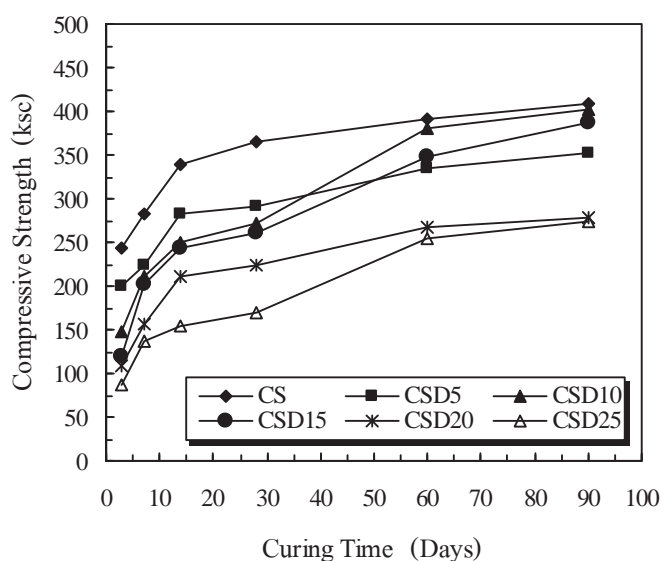
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ  
ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่  
ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์  
ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 5% มีค่าสูงที่สุด 337 และ  
394 ksc มีค่าลดลง 7.92 และ 3.38% ซึ่งมีค่าลดลงที่น้อยกว่าการแทนที่ทราย และเมื่อใช้  
ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 25% มีค่ากำลังอัดน้อยที่สุด 135 และ 221 ksc มีค่าลดลง 62.98  
และ 45.90% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ  
โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

### 3) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติโดยการผสมเพิ่ม

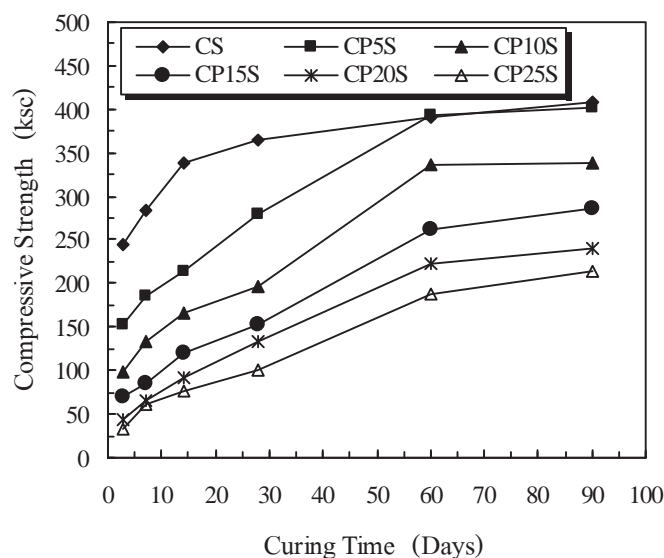
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการผสมเพิ่ม มีค่าลดลงตามปริมาณการผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดลดลงน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ทรายและแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่วนการพัฒนา กำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์ผสมเพิ่ม 10% รับกำลังอัดได้ดีที่สุด 273 และ 401 ksc มีค่าลดลง 25.44 และ 1.69% และเมื่อใช้ไคอะตอมไมท์ผสมเพิ่ม 15% มีค่ากำลังอัด 261 และ 386 ksc มีค่าลดลง 28.67 และ 5.38% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้โคอะคอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

#### 4) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย

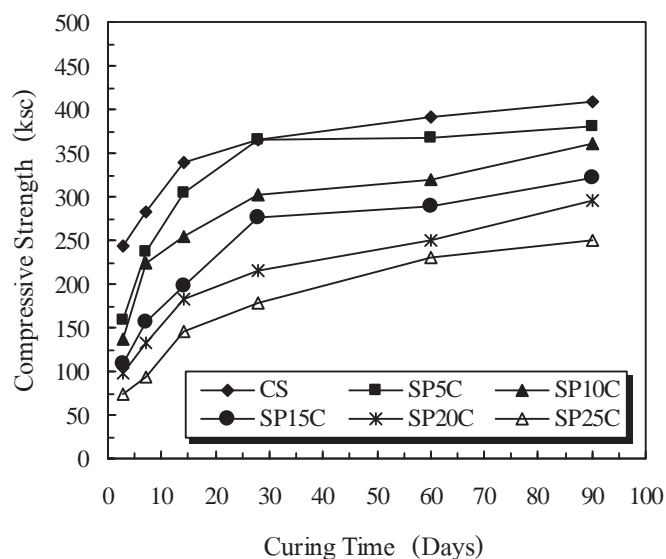
จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ทราย มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ทราย 5% มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม โดยมีค่าสูงที่สุด 279 และ 401 ksc ซึ่งมีค่าลดลงเพียง 23.55 และ 1.70% ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ แต่ที่อายุ 60 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 393 ksc ซึ่งสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม 0.36%



รูปที่ 4.16 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ทราย

#### 5) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

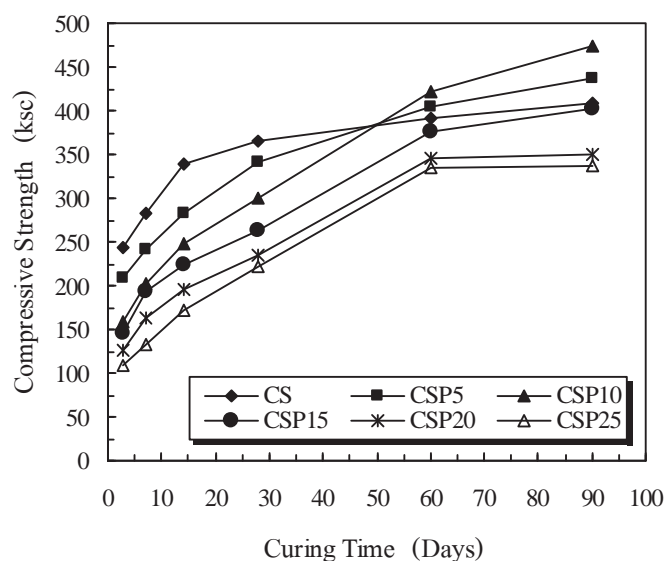
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ 5% มีค่าลดลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการแทนที่ทราย ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่เท่ากัน โดยมีค่าสูงที่สุด 365 และ 381 ksc มีค่าลดลง 0.17 และ 6.57% และเมื่อใช้เพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ 25% มีค่ากำลังอัดน้อยที่สุด 179 และ 250 ksc มีค่าลดลง 51.15 และ 38.88% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

6) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการผสมเพิ่ม มีค่าลดลงที่ปริมาณการผสมเพิ่ม 20 และ 25% แต่กำลังอัดที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% มีค่าลดลงน้อยมากหรือมีค่าเพิ่มมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในบางช่วงอายุการบ่ม โดยเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5% มีค่ากำลังอัด 342, 405 และ 437 ksc มีค่าลดลง 6.43 และมีค่าเพิ่มขึ้น 3.54 และ 7.14% ส่วนการใช้เพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัด 300, 423 และ 473 ksc มีค่าลดลง 17.92 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 8.04 และ 15.89% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้เพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่ม 15% ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงน้อยมากหรือใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น โดยมีค่ากำลังอัด 263, 377 และ 401 ksc มีค่าลดลง 28.05, 3.74 และ 1.71% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.18

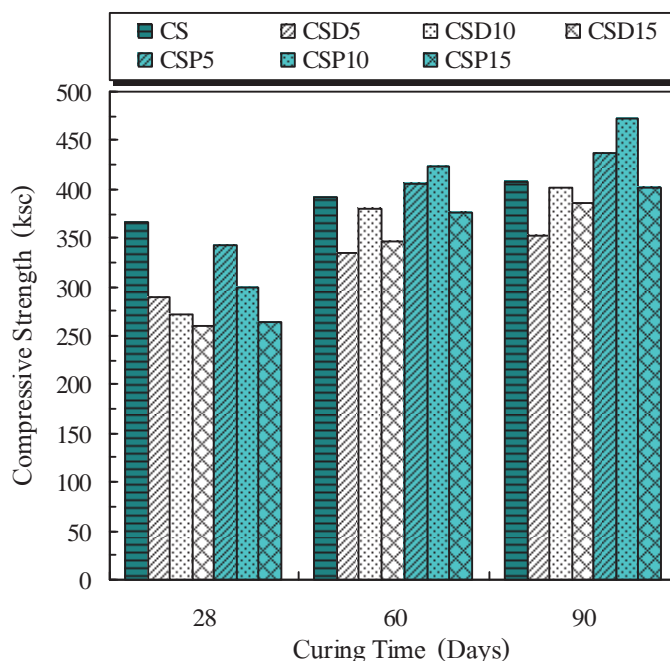


รูปที่ 4.18 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของวัสดุปอซโซลานธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด เพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุการบ่มมากขึ้นของมอร์ตาร์ที่ผสมเพอร์ไลต์ Type 2 ที่ 5 และ 10% มีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมด้วยไคอะตอมไมท์และมอร์ตาร์ควบคุม โดยที่การผสมเพิ่ม 5% มีค่ากำลังอัด 405 และ 437 ksc เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่มเดียวกันที่มีค่ากำลังอัด 334 และ 352 ksc พบว่ามีค่ามากกว่า 21.18 และ 24.44% และมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ที่มีค่ากำลังอัด 391 และ 408 ksc อยู่ 3.54 และ 7.14% ที่อายุการบ่ม 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ส่วนการใช้เพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัด 423 และ 473 ksc เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่มเดียวกันที่มีค่ากำลังอัด 380 และ 347 ksc พบว่ามีค่ามากกว่า 11.24 และ 36.25% และมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม 8.04 และ 15.89% ที่อายุการบ่ม 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

ในการใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม มีประสิทธิภาพมากกว่าไคอะตอมไมท์ และได้รับค่ากำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม แต่ควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสม คือ ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5 ถึง 10% เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการพัฒนากำลังอัดมากที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้ไคอะตอมไมท์ในส่วนผสมที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5 ถึง 10% สามารถทำได้ และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุม แต่การพัฒนากำลัง

ช้ากว่า เพอร์ไลต์ Type 2 จึงต้องการอายุการบ่มมากขึ้น เพราะจากการสังเกตข้อมูลผลการทดสอบพบว่า มีแนวโน้มในการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่มในส่วนผสม 5, 10 และ 15% ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน

## 4.9 หน่วยน้ำหนัก

### 4.9.1 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม

ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ในส่วนผสม ทั้งการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าการใช้ไคอะตอมไมท์ เนื่องจากเพอร์ไลต์ Type 1 มีความพรุนมากกว่าและมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าไคอะตอมไมท์ ค่าหน่วยน้ำหนักที่มีค่าต่ำสุดที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่ทราย 40% มีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,115 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายด้วยไคอะตอมไมท์ 38.59% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่เท่ากัน และมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม 94.96% ส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ Type 1 มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุดที่ปริมาณการแทนที่ 40% เช่นกัน โดยมีค่าหน่วยน้ำหนัก  $1,640 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ 14.28% ที่เปอร์เซ็นต์การแทนที่เท่ากัน และมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม 25.53%



ตารางที่ 4.3 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 1 ใน ส่วนผสม

Curing Time (Days)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )			
	3	7	14	28
CS	2,180	2,195	2,000	2,205
CD10S	2,055	2,075	2,115	2,125
CD20S	1,965	1,980	2,000	2,015
CD30S	1,830	1,860	1,870	1,890
CD40S	1,745	1,800	1,810	1,820
SD10C	2,045	2,050	2,115	2,135
SD20C	1,960	1,975	2,040	2,070
SD30C	1,895	1,900	1,945	1,995
SD40C	1,810	1,815	1,875	1,915
CP10S	1,820	1,825	1,825	1,830
CP20S	1,505	1,545	1,565	1,595
CP30S	1,215	1,270	1,345	1,395
CP40S	1,035	1,055	1,100	1,115
SP10C	1,980	2,035	2,040	2,050
SP20C	1,800	1,840	1,880	1,865
SP30C	1,675	1,710	1,730	1,755
SP40C	1,530	1,535	1,570	1,640

หมายเหตุ หน่วยน้ำหนักที่ทดสอบเป็นหน่วยน้ำหนักแห้งในอากาศ (air dry unit weight)

#### 4.9.2 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม สรุปได้ว่าปริมาณของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ที่ผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% มีการพัฒนาโครงสร้างจากปฏิกิริยาปอชโซลานภายในเนื้อของมอร์ตาร์ทำให้โครงสร้างของมอร์ตาร์แน่นขึ้นหรือที่เรียกกันว่า Filler Effect คล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม จึงส่งผลให้มีค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่อายุการบ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.4 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใช้โคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสม 5, 10 และ 15% เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

Curing Time (Days)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )					
	3	7	14	28	60	90
CS	2,180	2,195	2,200	2,205	2,240	2,280
CSD5	2,125	2,125	2,125	2,135	2,150	2,150
CSD10	1,980	2,050	2,070	2,100	2,130	2,140
CSD15	1,955	2,020	2,050	2,080	2,105	2,110
CSP5	2,135	2,160	2,160	2,165	2,180	2,190
CSP10	2,080	2,080	2,090	2,115	2,150	2,155
CSP15	2,030	2,055	2,060	2,060	2,110	2,110

อย่างไรก็ตาม ในการใช้เพอร์ไลต์ Type 2 ในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักบางส่วนมีค่าลดลงที่อายุการบ่ม 90 วัน ดังแสดงในตารางที่ ข.5 ถึง ข.10 ซึ่งเป็นสาเหตุเนื่องจากปริมาณที่มากเกินไปทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ หรืออาจเกิดปฏิกิริยามากเกินไปทำให้มอร์ตาร์เกิดการขยายตัวและเกิดช่องว่างที่น้ำสามารถแทรกซึมผ่านได้ จนทำให้ Calcium Sulfoaluminate แทรกซึมออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) และ (ข) ทำให้หน่วยน้ำหนักลดลง ส่งผลให้การพัฒนากำลังลดลงด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะของ Calcium Sulfoaluminate ที่มีลักษณะเป็นแผ่น

เมื่อมีช่องว่างในโครงสร้างของมอร์ตาร์  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  จะขยายเข้าสู่ช่องว่างและจะหยุดเมื่อไม่มีช่องว่างเหลืออยู่ และยังเป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลงเนื่องจากเป็นสารที่ละลายได้และถูกชะล้าง (leach) ออกมาได้ง่าย นอกจากนี้การให้กำลังของ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ก่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่ได้จากแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และเมื่อไม่มีช่องว่างเหลืออยู่ Ettringite จะพยายามดันส่วนที่อยู่รอบ ๆ ออก เกิดแรงดันในเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ทำให้ซีเมนต์เพสต์ขยายตัวและแตกร้าว เมื่อไอออนของซัลเฟตหมด Ettringite จะทำปฏิกิริยาและเปลี่ยนเป็น Calcium Sulfoaluminate ที่มีลักษณะเป็นแผ่น (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

#### 4.10 อัตราส่วนกำลัง

โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อย ๆ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547) ค่าอัตราส่วนกำลังเป็นค่าที่สามารถบ่งบอกถึงความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมไคอะตอมไมท์มีค่าอัตราส่วนกำลังที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 0.79 และ 0.75 และเพอร์ไลต์ Type 2 มีค่าเท่ากับ 0.94 และ 0.82 ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5 และ 10% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าปอซโซลานทั้งสองชนิดมีอัตราส่วนกำลังใกล้เคียงเกณฑ์มาตรฐานที่ได้กำหนดค่าอัตราส่วนกำลัง หรือที่เรียกตาม ASTM C 618 ว่า “ค่าดัชนีกำลัง” ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุการบ่ม 7 หรือ 28 วัน และสรุปได้ว่า เพอร์ไลต์ Type 2 มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าไคอะตอมไมท์ เนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานมากกว่า ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าอัตราส่วนกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในส่วนผสม 5, 10 และ 15% เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

Curing Time (Days)	CS	CSD5	CSD10	CSD15	CSP5	CSP10	CSP15
7	1.00	0.79	0.75	0.71	0.85	0.71	0.68
28	1.00	0.79	0.75	0.71	0.94	0.82	0.72

#### 4.11 การวิเคราะห์ราคา

4.11.1 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาผสมไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 กับราคาคอนกรีตมวลเบาในท้องตลาด

จากตารางการเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม 40% กับราคาท้องตลาดทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 40% (D40C SUT Block) มีราคา 28.95 บาทต่อก้อน ซึ่งมีราคาต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ขายในท้องตลาด 3.05 ถึง 4.65 บาทต่อก้อน เนื่องจากมีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในการผลิตลง แต่อย่างไรก็ตาม D40C SUT Block ยังมีน้ำหนักต่อก้อนที่มากกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด โดยมีน้ำหนัก 22.98 kg/ก้อน ซึ่งมากกว่าน้ำหนักต่อก้อนของคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด 3.5 ถึง 15.5 kg/ก้อน แต่เมื่อพิจารณาในเรื่องของกำลังอัด พบว่า D40C SUT Block มีค่ามากกว่าประมาณ 20 ถึง 70 ksc ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่า ถ้าต้องการค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดจะทำให้น้ำหนักต่อก้อนของ D40C SUT Block ลดลง

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม 40% กับราคาท้องตลาดทั่วไป

ผลิตภัณฑ์	น้ำหนัก/ ก้อน*	น้ำหนัก/ลบ.ม. (kg/m <sup>3</sup> )	กำลังอัด (ksc)	ราคา/ก้อน (บาท)	ราคา/ตร.ม. (บาท)
CLC Sepur Block	19.35	1,610	50	33.60	282
AAC P-CAC Block	7.45 - 10.90	620 - 910	30 - 50	31.20	260
AAC C-QON Block	8.5	700	30 - 80	32.00	266
D40S SUT Block	21.85	1,819	100	45.81	382
D40C SUT Block	23.00	1,916	102	28.95	241
P40S SUT Block	13.40	1,117	73	54.84	455
P40C SUT Block	19.70	1,642	108	39.23	327

หมายเหตุ : \* = คอนกรีตมวลเบาขนาด 0.20×0.60×0.10 m

D40S SUT Block = SUT คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจากการใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 40%

D40C SUT Block = SUT คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจากการใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 40%

P40S SUT Block = SUT คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจากการใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทราย 40%

P40C SUT Block = SUT คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตจากการใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ 40%

สำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทราย 40% (P40S SUT Block) ทำให้น้ำหนักต่อก้อนมีค่าต่ำที่สุด 13.40 kg/ก้อน และมีกำลังอัด 73 ksc ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาถึงราคาต่อก้อนยังถือว่าแพงกว่ามาก ส่วนการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์ 40% (P40C SUT Block) มีราคา 39.23 บาทต่อก้อน ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดมากที่สุด แต่ยังมีความเป็นไปได้ในการลดน้ำหนักต่อก้อนลงเนื่องจากยังมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดค่อนข้างมาก

ถึงแม้ว่าการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 มีราคา และน้ำหนักต่อก้อนที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด แต่ยังมีความเป็นไปได้ในการลดน้ำหนักและราคา เนื่องจากยังมีกำลังอัดที่สูงกว่า ดังนั้นในการผลิตอาจทำการเพิ่มปริมาณในการแทนที่มากขึ้นเพื่อลดน้ำหนักต่อก้อนลง แต่จะทำให้กำลังอัดลดลงด้วยเพราะในการเพิ่มปริมาณไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสมทำให้กำลังอัดลดลงตามอัตราส่วน อย่างไรก็ตามในการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ยังมีความเป็นไปได้โดยอาจมีการปรับสัดส่วนในการผสมให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้นทั้ง น้ำหนัก กำลังอัด และราคาต่อก้อน เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานต่อไป

#### 4.11.2 การเปรียบเทียบราคาของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ที่ใช้เป็นวัสดุ ปอซโซลานธรรมชาติกับคอนกรีตทั่วไปและถั่วลอย

จากการเปรียบเทียบราคาโดยการลองคำนวณการใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติกับคอนกรีตทั่วไป (C300<sub>cy</sub>) และถั่วลอย ดังตารางที่ 4.6 พบว่าทั้งการใช้ถั่วลอย ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่มในส่วนผสมด้วยการผสมเพิ่ม 10% โดยไม่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง (FA10<sup>+</sup>, D10<sup>+</sup>, P10<sup>+</sup>) ทำให้ราคาคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้น 11.55, 93.50 และ 453.11 บาท ตามลำดับ เนื่องจากการผสมเพิ่ม (ดูตารางที่ ค.10 ถึง ค.11 ประกอบ) จึงทำให้อัตราส่วนต่าง ๆ ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ทั้งปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ลดลงตามไปด้วย จึงสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้เพียง 6.31, 6.76 และ 14.41 กิโลกรัม คิดเป็นราคาปูนซีเมนต์ ที่ลดลง 18.92, 20.28 และ 43.24 บาทต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร และสามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลงได้ 4, 7 และ 55 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ

เป็นที่น่าสังเกตว่าเหตุใดราคาคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานทั้งถั่วลอย ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่มในส่วนผสมโดยไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์จึงมีราคาเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองคำนวณราคาของคอนกรีตที่ใช้ถั่วลอย ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ 10% (FA10C, D10C, P10C) จากผลการ

คำนวณพบว่าทั้ง FA10C, D10C และ P10C สามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้ 36.40 กิโลกรัม คิดเป็นราคาปูนซีเมนต์ที่ลดลง 109.20 บาทต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร และสามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลงได้ 51, 54 และ 111 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ C300<sub>cy</sub> พบว่าทั้ง D10C และ P10C นั้น ส่งผลให้ราคาค้นทุนคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้น 7.76 บาท และเพอร์ไลต์ Type 2 สูงถึง 387.40 บาท แต่ FA10C มีราคาค้นทุนลดลง 75.40 บาทต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากเถ้าลอยมีราคาเพียง 1,000 บาทต่อตัน ในขณะที่โดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 มีราคาถึง 3,300 และ 14,000 บาทต่อตัน ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้เถ้าลอยในส่วนผสมที่จะสามารถทำให้ลดราคาก่อสร้างได้นั้นจะต้องผสมเข้าไปโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงเท่านั้น แต่จะส่งผลให้กำลังอัดในช่วงแรกมีค่าลดลง และเหมาะสมกับคอนกรีตที่เทในปริมาณมาก ๆ ที่ไม่ต้องการกำลังอัดในช่วงอายุต้นที่สูง

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตที่ใช้โดอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 กับคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตผสมเถ้าลอย

รายการ	ปริมาณซีเมนต์ (kg/m <sup>3</sup> )	ราคาซีเมนต์ (บาท/m <sup>3</sup> )	ราคาคอนกรีต (บาท/m <sup>3</sup> )	หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )	ผลต่างของ			
					ปริมาณซีเมนต์ (kg/m <sup>3</sup> )	ราคาซีเมนต์ (บาท/m <sup>3</sup> )	ราคาคอนกรีต (บาท/m <sup>3</sup> )	หน่วยน้ำหนัก (kg/m <sup>3</sup> )
C300 <sub>cy</sub>	364.00	1,092.00	1,439.76	2,328	-	-	-	-
FA10C	327.60	982.80	1,364.37	2,277	-36.40	-109.20	-75.39	-51
D10C	327.60	982.80	1,447.53	2,274	-36.40	-109.20	+7.77	-54
P10C	327.60	982.80	1,827.16	2,217	-36.40	-109.20	+387.40	-111
FA10 <sup>+</sup>	357.69	1,073.08	1,451.31	2,324	-6.31	-18.92	+11.55	-4
D10 <sup>+</sup>	357.24	1,071.72	1,533.26	2,321	-6.76	-20.28	+93.50	-7
P10 <sup>+</sup>	349.59	1,048.76	1,892.87	2,273	-14.41	-43.24	+453.11	-55

หมายเหตุ : C300<sub>cy</sub> = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน (ออกแบบตามมาตรฐาน ACI)

FA10C = คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 10% (เพื่อเปรียบเทียบ แต่ไม่ระบุกำลังอัด)

D10C = คอนกรีตที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 10% กำลังอัด 210 ksc ที่อายุ 28 วัน

P10C = คอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ 10% กำลังอัด 210 ksc ที่อายุ 28 วัน

FA10<sup>+</sup> = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน และผสมเพิ่มด้วยเถ้าลอย 10%

D10<sup>+</sup> = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน และผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ 10%

P10<sup>+</sup> = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน และผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 10%

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 10% ที่ส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักลดลงได้ถึง 111 kg/m<sup>3</sup> นั้น เป็นผลดีในด้านการลดหน่วยน้ำหนัก แต่ราคาค้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปมาก และถ้ามองถึงประโยชน์ด้านการลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงนั้น ทุกสัดส่วนผสมที่มีการนำวัสดุปอซโซลานทุกชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่เท่ากันสามารถลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงได้เท่ากัน แต่ถ้าทำการนำวัสดุปอซโซลานผสมเพิ่มเข้าไปโดยยังคงที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรเท่าเดิมนั้นจะทำให้ราคาคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตรสูงขึ้น และยังสามารถสรุปได้ว่าวัสดุที่มีความเบาสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้มากกว่าวัสดุที่มีน้ำหนักมากกว่า เพราะขึ้นอยู่กับน้ำหนักต่อปริมาตรของวัสดุปอซโซลานที่นำมาผสม

ในการนำวัสดุปอซโซลานทุกชนิดมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีต สามารถลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงได้ ส่วนในการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้นควรคำนึงถึงความเหมาะสมในเรื่องของความต้องการที่จะพยายามลดน้ำหนักของคอนกรีต ลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต หรือต้องการประหยัดราคาก่อสร้าง

## 4.12 สรุปผลงานวิจัย

### 4.12.1 ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในงานคอนกรีตมวลเบา

การใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา ส่งผลมีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่ากำลังอัดค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่ม และจากคุณสมบัติที่เบา มีรูพรุนสูง สามารถลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้เบาลงได้

#### 1) ไคอะตอมไมท์ในงานคอนกรีตมวลเบา

1.1) คอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ทรายและปูนซีเมนต์ด้วยไคอะตอมไมท์ จะมีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น 4.55 และ 3.75% ทุกปริมาณการแทนที่ 10%



1.2) การแทนที่ทราย 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด  $1,820 \text{ kg/m}^3$  มีค่ากำลังอัด 100 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน

1.3) ไคอะตอมไมท์สามารถนำมาผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ และทำให้ประหยัดมากที่สุด ที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด  $1,915 \text{ kg/m}^3$  มีค่ากำลังอัด 102 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน

1.4) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 40% (D40C SUT Block) มีราคา 28.95 บาทต่อก้อน ซึ่งมีราคาต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ขายในท้องตลาด 3.05 ถึง 4.65 บาทต่อก้อน เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในการผลิตลง มีน้ำหนัก  $23.0 \text{ kg/ก้อน}$  ซึ่งมากกว่าน้ำหนักต่อก้อนของคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด 3.5 ถึง  $15.5 \text{ kg/ก้อน}$  แต่ค่ากำลังอัดมีค่ามากกว่าประมาณ 20 ถึง 70 ksc

## 2) เพอร์ไลต์ Type 1 ในงานคอนกรีตมวลเบา

2.1) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทรายและปูนซีเมนต์จะมีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 20.00 และ 12.50% ทุกปริมาณการแทนที่ 10%

2.2) การใช้เพอร์ไลต์ Type 1 ในงานคอนกรีตมวลเบา ที่การแทนที่ทราย 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด  $1,115 \text{ kg/m}^3$  มีค่ากำลังอัด 73 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน

2.3) เพอร์ไลต์ Type 1 สามารถนำมาผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ และทำให้ประหยัดมากที่สุด ที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ 40% มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด  $1,640 \text{ kg/m}^3$  มีค่ากำลังอัด 108 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน

2.4) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ทราย 40% (P40S SUT Block) มีน้ำหนักต่อก้อนต่ำที่สุด  $13.4 \text{ kg/ก้อน}$  และมีค่ากำลังอัด 73 ksc ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักและค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด แต่ราคาต่อก้อนแพงกว่ามาก ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ 40% (P40C SUT Block) มีราคา 39.23 บาทต่อก้อน ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดมากที่สุด แต่ยังคงมีความเป็นไปได้ในการลดน้ำหนักต่อก้อนลง เนื่องจากยังมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดค่อนข้างมาก

## 4.12.2 ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในการเป็นวัสดุปอซโซลาน

ผลรวมองค์ประกอบหลักทางเคมี  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 แสดงถึงคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอซโซลาน ปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีความต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น อัตราส่วน W/B เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง แต่การพัฒนา กำลังอัดมีค่าสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ปริมาณที่เหมาะสมสามารถทำให้ได้กำลังอัดที่สูงที่สุด



และจากคุณสมบัติที่เบา มีรูปทรงสูง ทำให้ลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตให้เบาลงสามารถลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้

### 1) ไคอะตอมไมท์ในการเป็นวัสดุป่อชโซลาน

การแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ทุก 5% จะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 5.88, 3.88 และ 1.88% ตามลำดับ ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์ผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัดลดลง 25.44 และ 1.69% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ตามลำดับ และที่ปริมาณการผสมเพิ่ม 5 ถึง 10% คือค่าที่เหมาะสมที่สามารถทำให้กำลังอัดสูงสุด โดยมีค่า Strength Activity Index ที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ในเกณฑ์กำหนด

### 2) เพอร์ไลท์ Type 2 ในการเป็นวัสดุป่อชโซลาน

เพอร์ไลท์ Type 2 มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากไคอะตอมไมท์ คือ มีลักษณะไม่เป็นผลึก หรือมีรูปร่างออสฐาน มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าไคอะตอมไมท์ การแทนที่ทราย แทนที่ปูนซีเมนต์ และผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลท์ Type 2 ทุก 5% จะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 32.28, 17.88 และ 15.48% ตามลำดับ ค่ากำลังอัดที่เปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5, 10 และ 15% มีค่าลดลงน้อยมากหรือมีค่าเพิ่มมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในบางช่วงอายุการบ่ม โดยเปอร์เซ็นต์การผสมเพิ่ม 5% มีค่ากำลังอัดลดลง 6.43 และมีค่าเพิ่มขึ้น 3.54 และ 7.14% ส่วนการผสมเพิ่ม 10% มีค่ากำลังอัดลดลง 17.92 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้น 8.04 และ 15.89% ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ปริมาณการผสมเพิ่ม 5 ถึง 15% คือค่าที่เหมาะสมที่สามารถทำให้กำลังอัดสูงสุด โดยมีค่า Strength Activity Index ที่อายุการบ่ม 28 วัน อยู่ในเกณฑ์กำหนด

ทั้งการใช้ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลท์ผสมเพิ่ม 10% โดยไม่ลดปริมาณปูนซีเมนต์ ทำให้ราคาคอนกรีตต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรเพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสมเพิ่ม จึงทำให้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ ทราย และหิน ลดลงตามไปด้วย จึงสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าต้องการลดราคาก่อสร้างลงจะต้องใช้สารป่อชโซลานโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์หรือแทนที่มวลรวม และถ้ามองถึงประโยชน์ด้านการลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลง ทุกสัดส่วนผสมที่มีการนำวัสดุป่อชโซลานทุกชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงได้ แต่ในการประยุกต์ใช้งานควรคำนึงถึงความเหมาะสมในเรื่องของความต้องการที่จะพยายามลดน้ำหนักของคอนกรีต ลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต หรือต้องการประหยัดราคาก่อสร้าง

#### 4.13 ข้อเสนอแนะ

การใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในการทำคอนกรีตมวลเบา มีวิธีการที่ง่ายกว่าการผลิตคอนกรีตที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด เนื่องจากสามารถผสมและหล่อเป็นก้อนได้โดยไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการผลิตมากนัก แต่ถ้าต้องการผลิตเพื่อจำหน่ายในปริมาณมาก ๆ อาจมีการเร่งกำลังอัดให้เร็วขึ้น โดยการบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันสูงเกิน  $100^{\circ}\text{C}$  (high pressure steam curing) โดยใช้ Autoclave อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 160 ถึง  $210^{\circ}\text{C}$  ที่ความดัน 6 ถึง 20 atm จะได้คอนกรีตมวลเบาที่มีกำลังอัดที่อายุ 1 วัน เทียบเท่ากับคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2551) เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณในการผลิตได้ ส่วนในเรื่องของราคาที่แพงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดนั้น ยังมีความเป็นไปได้ในการลดน้ำหนักต่อก้อนลง เนื่องจากยังมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดค่อนข้างมาก และจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตลงได้อีกด้วย

การศึกษาการฉาบคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสมก็เป็นเรื่องที่น่าสนใจ เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดโดยทั่วไปมีวิธีการฉาบค่อนข้างยาก และจะต้องใช้ปูนฉาบเฉพาะคอนกรีตมวลเบาของยี่ห้ออื่น ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 อาจใช้ปูนฉาบธรรมดาที่สามารถผสมขึ้นเองโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมทั่วไป

แม้ว่าการใช้ไคอะตอมไมท์ในส่วนผสมจะมีค่ากำลังอัดไม่สูงเท่าเพอร์ไลต์ แต่เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำสารปอซโซลานธรรมชาติทั้งสองชนิดนี้มาใช้ร่วมกันในส่วนผสมเดียวน่าจะมีความเป็นไปได้ เนื่องจากไคอะตอมไมท์มีอนุภาคที่ละเอียดมากกว่า จึงน่าจะแทรกเข้าในช่องว่างได้ดีขึ้นมากกว่าการใช้เพอร์ไลต์เพียงอย่างเดียว

ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นในการนำไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์มาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตมวลเบาเท่านั้น ข้อมูลในการศึกษาหรืออ้างอิงในเรื่องนี้มียังไม่มากพอ เพราะเป็นวัสดุใหม่ที่ต้องทำการศึกษาอีกมาก การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตมวลเบาโครงสร้าง (structural lightweight concrete) ก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจ แต่ในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ให้ได้คุณภาพที่ดี และมีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานนั้น ควรต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเบา และมีรูพรุนสูง จึงมีความต้องการน้ำในปริมาณมากในส่วนผสมจึงส่งผลให้การพัฒนา กำลังอัดไม่มากเท่าที่ควร ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปจึงควรมีการศึกษาในเรื่องผลกระทบของการนำสารลดน้ำจำนวนมาก หรือซิลิกาฟูมมาใช้ปรับปรุงคุณภาพร่วมด้วย ซึ่งจะทำให้ได้กำลังอัดที่สูงขึ้น เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างต่อไป

#### 4.14 เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. (2548). **เพอร์ไลต์**. [ออนไลน์]. ได้จาก: [http://www.dmr.go.th/Interest /Data /TI2dataD.htm](http://www.dmr.go.th/Interest/Data/TI2dataD.htm).
- คม บัวคดี และรังสรรค์ รังสีมาวงศ์. (2540). **การพัฒนาออร์ตาร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์**. เอกสารงานวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- จันทนา สุขมานนท์. (2550). **INSEE Concrete Handbook**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัท เซอร์คัส เพรส จำกัด.
- จิตรกร ดั่งอนุสรณ์สุข และคณะ. (2548). **ผลกระทบของเพอร์ไลต์ต่อการซึมผ่านอากาศ และปริมาณช่องว่างอากาศภายในซีเมนต์มอร์ตาร์**. ปรินูญานพนธ์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- จิรภัทร ขำญาติ. (2546). **เทคโนโลยีไทย**. Engineering Today. 1 (3): 17.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2536). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. (2551). **ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน**. บริษัทเอสซีจี ซีเมนต์ จำกัด ในธุรกิจซีเมนต์ เครือซีเมนต์ไทย (SCG CEMENT).
- ณรงค์ศักดิ์ นันทกำภิรา และคณะ. (2547). **หินอัคนี**. [ออนไลน์]. ได้จาก: [http://www.soil.civil .rmut.ac.th /rock/index1.html](http://www.soil.civil.rmut.ac.th/rock/index1.html).
- ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2548). **ผลกระทบของขนาดอนุภาคและรูปร่างเม็ดถ่านหินต่อความพรุนและการซึมผ่านอากาศของเพสต์**. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1. (หน้า CON22-CON29). กรุงเทพฯ. สมาคมคอนกรีตไทย.
- บุรณัฏฐ์ ฉัตรวิระ และ ทวีศักดิ์ คงทรัพย์. (2545). **ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว**. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 25 ฉบับที่ 4 (ตุลาคม-ธันวาคม).
- ประพัทธ์ กรังพานิชย์. (2540). **การนำกากแร่สังกะสีและวัสดุพูนเบาเพอร์ไลต์มาผลิตเป็นคอนกรีตเบา**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต**. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร. (2548). **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ**. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. (2543). **ฟิสิกส์ราชมงคล ศัพท์ชีวะ**. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.electron.rmutphysics.com/bio-glossary>.

- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2541). **ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ**. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 2411 (พ.ศ. 2541). สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. (มอก.1505-2541.)
- วินิต ช่อวิเชียร. (2544). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ.
- ศิริรัตน์ รัตนจันทร์. (2543). **การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมวัสดุเพื่อผสมทำคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาจากดินที่มีอยู่ในท้องถิ่น**. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [สสวท.]. (2550). **ซากดึกดำบรรพ์**. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.ipst.ac.th/science/index.shtml>.
- สำนักเหมืองแร่และสัมปทาน กลุ่มวิศวกรรมและความปลอดภัย. (2546). **เพอร์ไลต์**. [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://www.dpim.go.th/ppr/title.php?tid=000001074149948>.
- เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา. (2538). **โลกและหิน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ สุริยวิทยาสาน.
- อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2545). **กรมวิทยาศาสตร์บริการ ศูนย์ความรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. **ปอซโซลาน**. [ออนไลน์]. ได้จาก: [http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep\\_11\\_2545\\_pozzalan.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_11_2545_pozzalan.pdf).
- Aydin, A.C. and Gul, R. (2007). **Influence of Volcanic Originated Natural Materials as Additives on The Setting Time and Some Mechanical Properties of Concrete**. Construction and Building Materials. 21. p.1277-1281.
- American Concrete Institute. (1999). **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. (ACI 213 R-87, Reapproved 1999)
- American Concrete Institute. (2000). **State of The Art Report on High-Strength Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. Part 2. Michigan. (ACI 363 R-92, Reapproved 1997)
- American Concrete Institute. (2000). **Use of Fly Ash in Concrete**. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. Michigan. (ACI 232.2 R-96)
- American Society for Testing and Materials. (1991). **Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 618-91).

- American Society for Testing and Materials. (1998). **Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 311-98).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 109/ C 109 M-99).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 128-97).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 138/ C 138 M-01a).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.02. (ASTM C 204).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 40-99).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 136-96a).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 204).
- American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.02. (ASTM C 29/ C 29 M-97a).
- Pekmezci, B.Y. and Akyüz, S. (2004). **Optimum Usage of A Natural Pozzolan for The Maximum Compressive Strength of Concrete**. Cement and Concrete Research. 34. p.2175-2179.

- Fragoulisa, D., Stamatakisb, M.G., Chaniotakis E. and Columbusb, G. (2004). **Characterization of Lightweight Aggregates Produced with Diatomite Rocks Originating From Greece**. Materials Characterization. 53. p.307-316.
- Topcu, I.B. and Isikdag, B. (2007). **Effect of Expanded Perlite Aggregate on The Properties of Lightweight Concrete**. Journal of Materials Processing Technology PROTEC-11355; No. of Pages 5.
- Kedsarin Pimraksa and Prinya Chindapasirt. (2008). **Lightweight Bricks Made of Diatomaceous Earth, Lime and Gypsum**. Ceramics International. CERI-2954; No of Pages 8.
- Shannag, M.J. and Shania, H.A. (2003). **Sulfates Resistant of High-performance Concrete**. Cement and Concrete Composites 25:363-369.
- Demirboga, R. and Gul, R. (2003). **Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures**. Energy and Buildings. 35. p.1155-1159.
- Demirboga, R., Orung, I. and Gul, R. (2001). **Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on The Compressive Strength of Low-Density Concretes**. Cement and Concrete Research. 31. p.1627-1632.

## บทที่ 5

### จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

#### 5.1 บทนำ

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

จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) เป็นการพัฒนาศาสนิเมนต์ชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบซิลิกา (silica,  $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา (alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบ จีโอโพลิเมอร์ใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาของซิลิกา และอลูมินาให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้สารซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการรับแรงได้ ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์จึงสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สำหรับวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ เถ้าลอย (fly ash) (Hardjito D.,2004, Bakharev T., 2006 และปริญญา, 2004) แต่ขณะเดียวกันยังมีวัสดุปอซโซลานอีกหลายชนิดที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับเถ้าลอย (fly ash) เช่น ซีโอไลท์ (zeolite) ไดอะตอมไมท์ (diatomite) เพอร์ไลท์ (perlite) เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ

ไดอะตอม (diatom) เป็นพืชเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก มีผนังเป็นฝาซิลิกาประกบกัน บางชนิดสามารถว่ายน้ำได้ บางชนิดอาศัยกระแสน้ำพัดพาไป มีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 2,000 micron พบในแหล่งน้ำทั่วโลกทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม เมื่อไดอะตอมตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกเป็นตะกอนสะสมกันจำนวนมากสาละบนพื้นทะเลหรือพื้นทะเลสาบ แล้วในที่สุดกลายเป็นไดอะตอมไมท์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ดินเบา (diatomaceous earth) เพราะมีลักษณะเป็นดินที่เกิดจากซากไดอะตอมในแหล่งอะตอม เป็นดินซุย เบา เนื้อพรุน มีลักษณะคล้ายขอล็ก มีปฏิกิริยาเชิงซ้า ไดอะตอมไมท์จะมีลักษณะต่างๆ กัน ตามแต่ชนิดของไดอะตอม แร่ดินเบาหรือไดอะตอมไมท์ (diatomite) เป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเชิงโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา มีความเปราะมากกว่าหินทั่วไป (Chaisena A., 2004 และบุรฉัตร, 2004) แหล่งดินเบาในประเทศไทยพบอยู่ในจังหวัดลำปาง โดยจะ

พบเป็นแหล่งเล็กใหญ่กระจายอยู่เป็นบริเวณกว้างในแอ่งลำปาง และแอ่งเล็กๆ ใกล้เคียง (กรมทรัพยากรธรณี, 2003)

ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในงานจีโอโพลิเมอร์นั้น มีระยะเวลาก่อตัวที่รวดเร็ว ส่งผลให้ความสามารถทำงานได้น้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นที่ การปรับปรุงคุณสมบัติของความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์ อีกทั้งกำลังอัดพอเหมาะแก่ การนำไปใช้งานได้ โดยจากลักษณะของโคอะตอมไมท์ที่มีน้ำหนักเบา ความพรุนสูง มีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้าจึงน่าที่จะปรับปรุงคุณสมบัติตรงประเด็นนี้ได้ อีกทั้งสามารถช่วยลดหน่วยน้ำหนักลงได้

## 5.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงความสามารถทำงานได้และการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เมื่อใช้โคอะตอมไมท์เป็นวัสดุตั้งต้น โดยวิเคราะห์ในเชิงกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

## 5.3 การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

### 5.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1) โคอะตอมไมท์ (DE) จากอำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดลพบุรี โดยนำมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้ธาตุหลักของโคอะตอมไมท์มีการแตกตัวที่ดีขึ้น (Lertkhositpong T. et al, 2009)

2) เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

3) สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งประกอบด้วย  $\text{Na}_2\text{O} = 15.32\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 32.87\%$  และน้ำ = 51.81% โดยน้ำหนัก และมี pH = 9.05 ตรวจสอบโดยเครื่องพีเอชมิเตอร์

4) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

### 5.3.2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้โคอะตอมไมท์แทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 0, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 ระยะเวลาทิ้งให้ตัวอย่างก่อตัวก่อนการเร่งปฏิกิริยาตัวอย่างเท่ากับ 1 ชั่วโมง และเวลาการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่างเท่ากับ 24 ชั่วโมง ทุกอัตราส่วนผสม โดยทำการแปรผันตามผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดังนี้



- 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 : 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
- 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
- 5) Series E : แปรผันตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง เท่ากับ 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 1.5 และทดสอบกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มเท่ากับ 7 วัน
- 6) Series F : แปรผันตามระยะเวลาการบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เท่ากับ 7, 14 และ 28 วัน
- 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

#### 5.4 วิธีผสมและทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

- 1) การผสมทำในอุณหภูมิห้องมีค่าระหว่าง 25 ถึง 45 องศาเซลเซียส เพื่อให้สอดคล้องกับอากาศประเทศไทย
- 2) ขั้นตอนการผสมเริ่มต้นด้วยคลุกเคล้าระหว่างวัสดุประสานกับทรายให้เข้ากันดี ประมาณ 1 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เสร็จแล้วผสมอีกประมาณ 10 นาที
- 3) ทดสอบค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์-มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C1437

4) ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์-มอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109 ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้แบบอาคริลิก ขนาด 50x50x50 mm. หล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 5.1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Mix ID.*	Mix Proportion (g.)			
	Binder	Sand	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	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

## 5.5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

### 5.5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

จากตารางที่ 5.2 พบว่าไดอะตอมไมท์มีองค์ประกอบทางเคมี  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 87.80\%$  จัดเป็นปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001) ซึ่งกำหนดให้สารประกอบหลักต้องมีค่ามากกว่า 70% และเช่นเดียวกันกับเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบทางเคมี  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 81.01\%$  เป็นปอซโซลาน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2001)

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

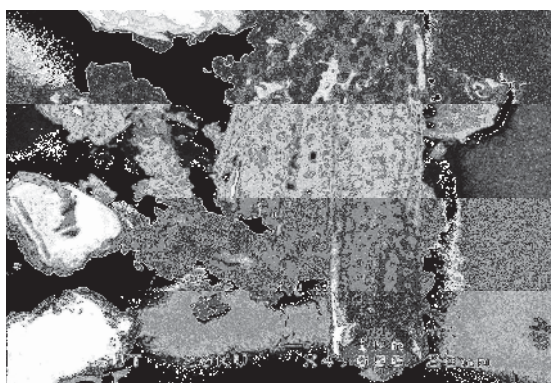
จากตารางที่ 5.3 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนาแน่นของไดอะตอมไมท์ มีค่าเท่ากับ 2.33 และ 490 กก/ม<sup>3</sup> ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยและทราย ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าประมาณ 3.32% และ 13.38% ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าประมาณ 49.64% และ 69.85% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุประสาน

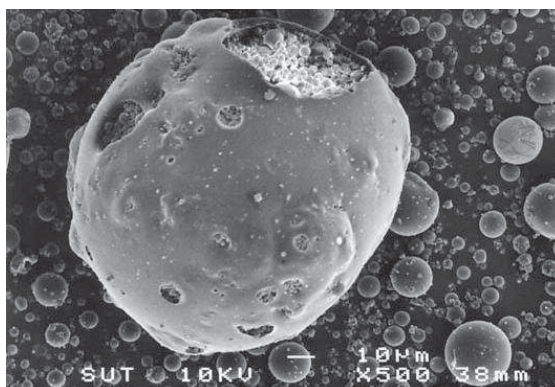
Chemicals	DE (%)	FA (%)
SiO <sub>2</sub>	59.30	43.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.00	26.33
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.50	10.81
CaO	1.20	12.69
SO <sub>3</sub>	0.02	2.74
LOI	8.10	1.23

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

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



รูปที่ 5.1 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์



รูปที่ 5.2 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย

ตารางที่ 5.4 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 5.5 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน Addition water/binder

Symbol	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	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 5.6 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

Symbol	Curing temp. (°C)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	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 5.7 ผลทดสอบเมื่อแปรผันความเข้มข้น NaOH

Symbol	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	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 5.8 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

Symbol	Unit weight ( $\text{kg/m}^3$ )	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

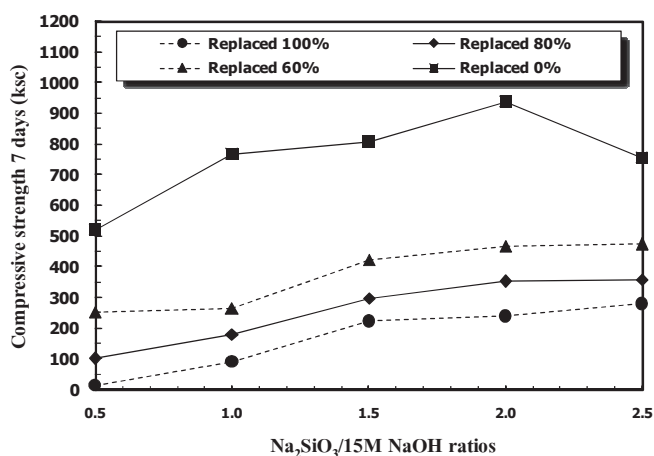
ตารางที่ 5.9 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน Liquid alkaline/binder

Symbol	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	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

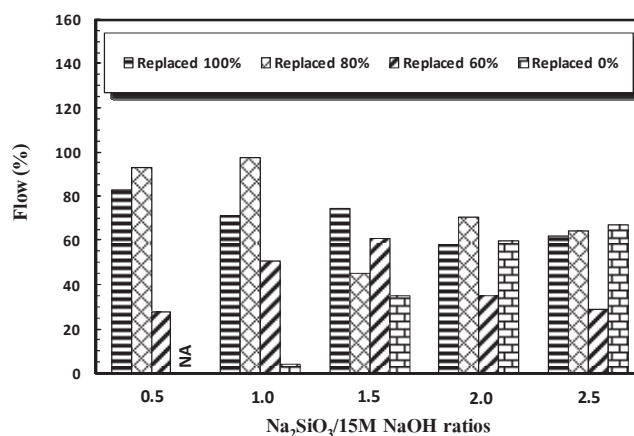
### 5.5.2 ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

การทดสอบที่แปรผันตามอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ใช้ความความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4 พบว่าค่ากำลังอัดและความสามารถทำงานได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของโซเดียมซิลิเกตและปริมาณการแทนที่ไดอะตอมไมท์ สอดคล้องกับงานวิจัย (Sathonsaowaphak A. et al,2009 และ ธนากร และคณะ,2010)





รูปที่ 5.3 ผลกระทบของอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อกำลังอัด



รูปที่ 5.4 ผลกระทบของอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ต่อการไหลแผ่

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมพบว่าที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 1.5-2.5 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 299-474 กก/ซม<sup>2</sup> และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 29-65% แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 468 กก/ซม<sup>2</sup> และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 35%

ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 0.5 และ 1.0 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่ที่ดี แต่ค่ากำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดพบว่าการผสมค่อนข้างยากส่งผลให้มีค่าการไหลแผ่น้อย อีกทั้งการหล่อมอร์ต้าร์ลงแบบยากส่งผลให้ได้ค่าน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ

ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 2.5 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่พอทำงานได้ เนื่องจากปริมาณของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่มากขึ้นทำให้ส่วนผสมมีความหนืดมากขึ้น แต่ค่ากำลังอัดดีขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ที่มากขึ้นด้วย

ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่ที่ดี แต่กำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  เท่ากับ 1.5 อย่างไรก็ตามการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีการแข็งตัวที่เร็ว เมื่อพิจารณาจากกระบวนการผสม

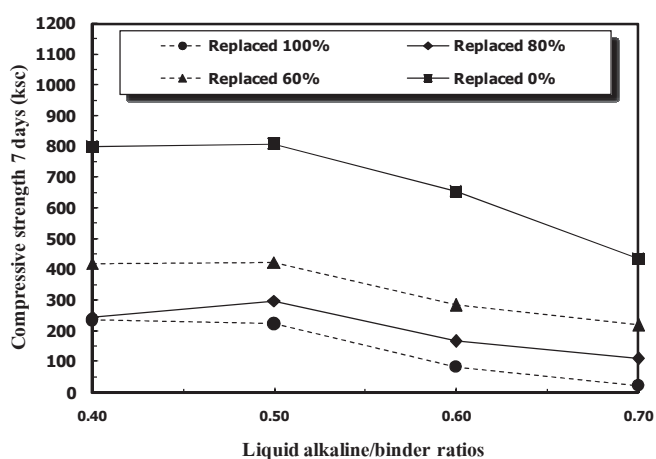
### 5.5.3 ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder

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

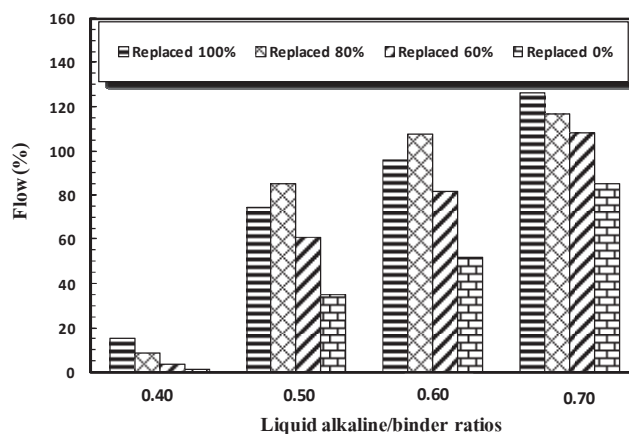
เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสม พบว่าที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 เป็นภาวะที่ดีที่สุด มีกำลังอัดเท่ากับ 299-423 กก/ซม<sup>2</sup> และค่าการไหลแผ่ 61-86%

ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ส่วนผสมค่อนข้างแห้งมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่น้อยมาก อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง

ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 ส่วนผสมมีความเหลวมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ที่สูง แต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและงบประมาณ อัตราส่วนนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน



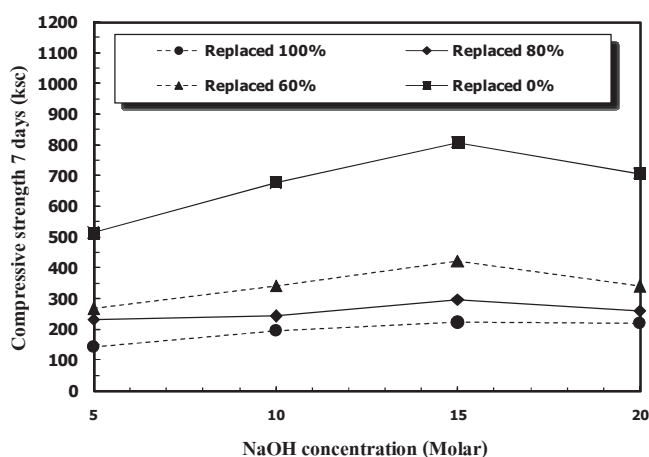
รูปที่ 5.5 ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ต่อกำลังอัด



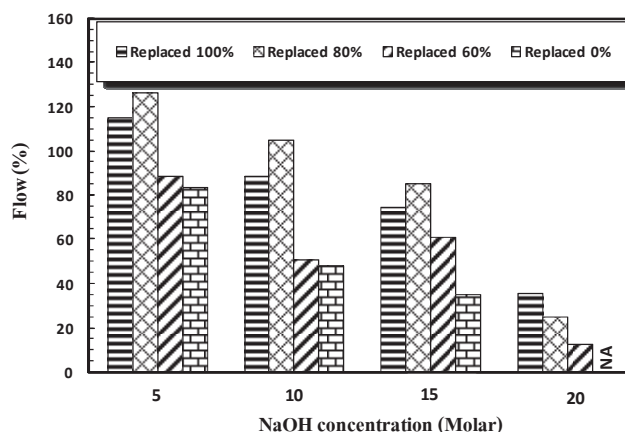
รูปที่ 5.6 ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ต่อการไหลแผ่

#### 5.5.4 ผลกระทบของความเข้มข้น NaOH

การทดสอบที่แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.7 และ 5.8 พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมท์ส่งผลต่อค่ากำลังอัดและความสามารถทำงานได้ สอดคล้องกับงานวิจัย (Chindaprasirt P. et al., 2007, Hardjito D. et al., 2008, Sathonsaowaphak A. et al., 2009, และ ธนากร และคณะ, 2010) กล่าวคือกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นแต่ความสามารถในการทำงานลดลง เป็นผลเนื่องจากความเข้มข้นที่สูงมีความสามารถในการชะลอตัวของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากวัสดุตั้งต้นได้มาก อีกทั้งมีอัตราการเกิด ปฏิกิริยาที่รวดเร็ว (Rattanasak U. et al., 2009)



รูปที่ 5.7 ผลกระทบของความเข้มข้น NaOH ต่อกำลังอัด



รูปที่ 5.8 ผลกระทบของความเข้มข้น NaOH ต่อการไหลแผ่

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมพบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10-15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 มีค่ากำลังอัด เท่ากับ 243-423 กก/ซม<sup>2</sup> และค่าการไหลแผ่ 51-105% แต่ภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 423 กก/ซม<sup>2</sup> และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 61%

ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 5 โมลาร์ มีค่าการไหลแผ่สูงแต่ค่ากำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่นๆ อาจเนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่น้อยทำให้ความสามารถในการชะอ้อนของซิลิกาและอลูมินาออกมาจากวัสดุตั้งต้นได้น้อย (Rattanasak U. et al., 2009) อีกทั้งความเข้มข้นที่น้อยจะมีปริมาณของน้ำในส่วนผสมมาก ส่งผลให้ความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นแต่กำลังอัดลดลง ในทำนองเดียวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่สูงในงานคอนกรีตทั่วไป

ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 โมลาร์ การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมดจะมีค่าการไหลแผ่พอทำงานได้ แต่ค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดการผสมค่อนข้างยากเนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงส่งผลให้มีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วส่งผลให้ค่าการไหลแผ่น้อยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่นๆ อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง

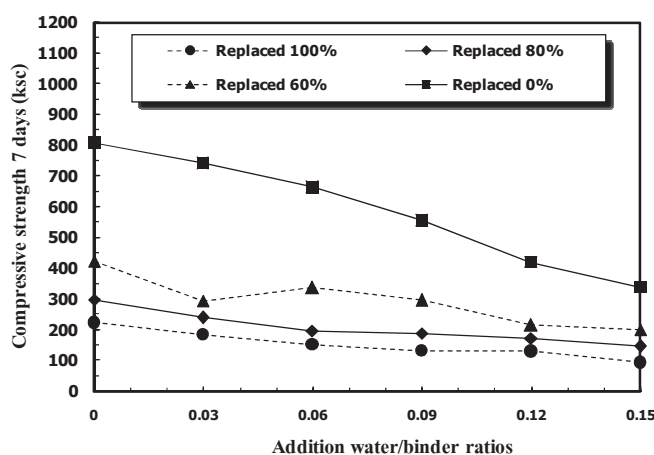
### 5.5.5 ผลกระทบของอัตราส่วน Addition water/binder

ผลการทดสอบที่แปรผันตามอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมและปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมท์ส่งผลต่อกำลังอัดและความ สามารถทำงานได้ กล่าวคือความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ

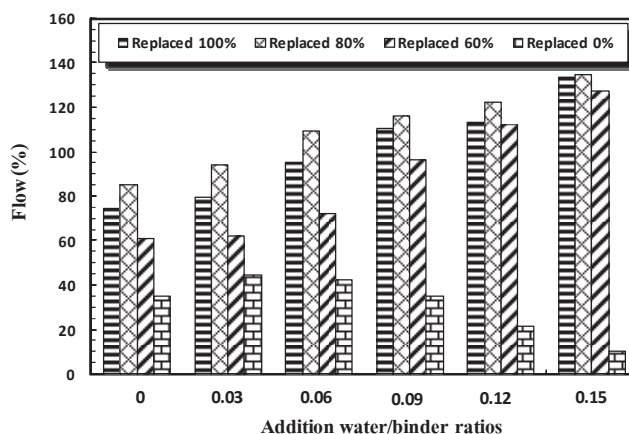
การเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัย (Chindaprasirt P. et al., 2007 และ Sathonsaowaphak A. et al, 2009)

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสม พบว่าที่อัตราส่วนของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 3-6% ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 197-337 กก/ซม<sup>2</sup> และค่าการไหลแผ่ 62-110%

ที่อัตราส่วนของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 9-15% การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีค่าการไหลที่สูง แต่กำลังอัดลดลง แต่ยังลดลงในสัดส่วนที่น้อย เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มน้ำในส่วนผสมของการแทนที่ไดอะตอมไมท์ทั้งหมดดูเหมือนไม่ค่อยจำเป็นนัก เนื่องจากการแทนที่ไดอะตอมไมท์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานอยู่แล้ว นอกจากว่าจะเป็นอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่น้อยๆ อาจจะส่งผลดีต่อทั้งค่าการไหลแผ่และกำลังอัด



รูปที่ 5.9 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อกำลังอัด

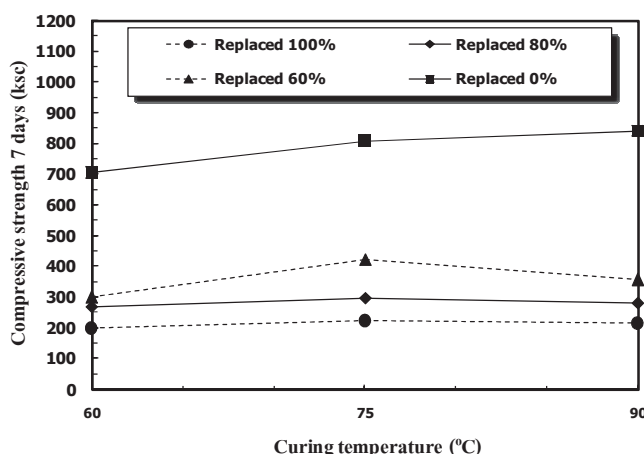


รูปที่ 5.10 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อการไหลแผ่

ส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมดมีค่าการไหลแต่เพิ่มขึ้นที่การเพิ่มปริมาณน้ำเท่ากับ 3% แต่หลังจากนั้นค่าการไหลลดลงเรื่อยๆ อีกทั้งค่ากำลังอัดลดลงด้วย อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่งระหว่างน้ำกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ส่วนผสมมีการแข็งตัวที่เร็วขึ้น แต่ค่ากำลังอัดลดลงเนื่องจากการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเหมือนกับการปรับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้น้อยลง ซึ่งแสดงถึงปริมาณน้ำที่มากขึ้นในส่วนผสม

#### 5.5.6 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

การทดสอบที่แปรผันอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.11 พบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย (Chindaprasirt P. et al., 2007, Hardjito D. et al., 2004, Hardjito D. et al., 2008, Bakharev T., 2006, Nguyen Van Chan et al., 2008, ธนากร, 2010 และประมวล, 2007)



รูปที่ 5.11 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาต่อกำลังอัด

เมื่อพิจารณาถึงค่ากำลังอัดที่แปรผันตามอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา และค่าการไหลแต่ที่เหมาะสมของอัตราส่วนที่ใช้ พบว่าที่ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 มีความเหมาะสมซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 269-423 กก/ซม<sup>2</sup> และภาวะที่ดีที่สุดของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา คือ 75 องศาเซลเซียส ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 423 กก/ซม<sup>2</sup>

ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ

ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส การแทนที่ใดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีลักษณะการบวมตัวของตัวอย่างเกิดขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการแทนที่ใดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีระยะการ