



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนเพื่อเป็นวัสดุประสาน

โดย

ผศ.ดร. ชีรวัฒน์ สันศิริ

ศ.ดร. ปริญญ์ จินดาประเสริฐ

หัวหน้าโครงการวิจัย

นักวิจัยที่ปรึกษา

พฤษภาคม 2555

สัญญาเลขที่ MRG5280178

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนเพื่อเป็นวัสดุประสาน

โดย

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

เสนอ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและ
สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย

(ความเห็นในรายงานเป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ : 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.² ค่าหน่วยน้ำหนัก 1,460 กก./ม.³ และเมื่อแทนที่ทรายค่ากำลังอัดเท่ากับ 59 กก./ซม.² และมีค่าหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุดเท่ากับ 990 กก./ม.³

ผลการทดสอบในส่วนที่ 2 พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5-2.5 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาของตัวอย่าง 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดที่สูง ซึ่งมีค่ากำลังอัดระหว่าง 223-939 กก./ซม.² 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 ผลการทดสอบพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุซิลิกาที่ไม่เป็นผลึกกำลังอัดของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงมีกำลังอัดสูงกว่าเพสต์ 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 SiO_2 and Al_2O_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 (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions were mixed together and then used as a liquid portion in the mixture in order to activate the geopolymerization. The ratios between Na_2SiO_3 and NaOH were varied, namesly, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 by weight whereas the

ratios between liquid binder of 0.40, 0.50, 0.60, and 0.70 by weight were varied. The additional water was added to improve the workability of fresh geopolymer mortar. The ratios between additional water and binder were varied, that is to say, 0, 3, 6, 9, 12, and 15% by weight. In 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^2 and $1,460 \text{ kg/m}^3$ respectively. And using perlite of 50% sand replacement gave the compressive strength and density were 59 kg/m^2 and 990 kg/m^3 respectively.

Test results in series 2 revealed that the mixture having $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ of 1.5-2.5, 15M of NaOH concentration, and 75°C of curing temperature showed compressive strength between $223\text{-}939 \text{ kg/m}^2$ 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 สิ้นศิริ

สารบัญ

หน้า

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

บทที่

1	บทนำ	1
1.1	ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3	ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	4
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.6	เนื้อหาของรายงานฉบับนี้	5
2	ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
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

3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	54
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
4	การใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ในงานคอนกรีตมวลเบา.....	75
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

5	จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากวัสดุปอชลานธรรมชาติ	109
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
6	การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกาทะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีโอไลท์เป็นวัสดุยึดประสาน	133
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
8 ผลการดำเนินการ (Output) ที่ได้จากโครงการวิจัย.....	165
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 ใคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ Type 2 ในส่วนผสม 5, 10 และ 15% เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ.....	96
4.5 ค่าอัตราส่วนกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้ใคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ Type 2 ในส่วนผสม 5, 10 และ 15% เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ.....	97
4.6 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ใคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ Type 1 ในส่วนผสม 40% กับราคาท้องตลาดทั่วไป	98
4.7 การเปรียบเทียบราคาของคอนกรีตที่ใช้ใคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ Type 2 กับคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตผสมเถ้าลอย	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 ความถ่วงจำพำและอนุภาคเฉลี่ย.....	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 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน.....	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
ช. 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 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ G1POA และ G2POA	153
7.3 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสม เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20	155
7.4 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และ 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 เถ้าลอย (fly ash) เถ้าแกลบ (rice husk ash), เถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash) และวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ เป็นต้น

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือก ไดอะตอมไมท์ (diatomite) เพอร์ไลต์ (perlite) และ ซีโอไลต์ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม ประเภทปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan) โดยจัดเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (alumino silicate) หรือสารอะลูมิโนฟอสเฟต (alumino phosphate) 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 (Na_2SO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5
- ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (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 มม³ 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 เหมาะกับการนำไปใช้งาน

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)

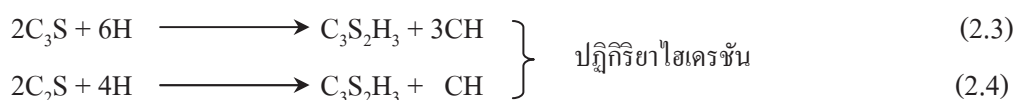
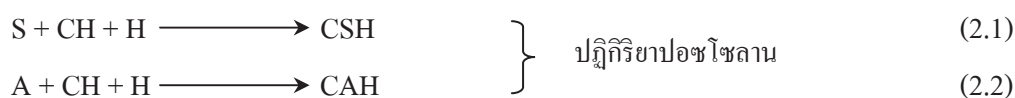
วัสดุปอชโซลาน เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีต หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น วัสดุปอชโซลานที่ใช้ในงานคอนกรีตมีอยู่หลายชนิด 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)



วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และถึงแม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันแต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหนา 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 SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618 (1991) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ถึง 2.4 ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F มีปริมาณ CaO ที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ สำหรับ SiO_2 มาจากแร่ดินเหนียวและควอร์ตซ์ เนื่องจากกำถ่านหินแอนทราไซต์และบิทูมินัสมีแร่ดินเหนียวสูงจึงให้เถ้าลอยที่มี SiO_2 สูง สำหรับวิธีการเก็บตัวอย่างและการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของปอชโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

ข้อกำหนดทางเคมี	ชั้นคุณภาพ		
	N	F	C
ผลรวมของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ไอร์ออนออกไซด์ (Fe_2O_3) ไม่น้อยกว่าร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไม่เกินร้อยละ	4.0	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, ไม่เกินร้อยละ	3.0	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกินร้อยละ	10.0	6.0	6.0

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 Na_2O , ไม่เกินร้อยละ	1.5	1.5	1.5

หมายเหตุ ใช้สำหรับระบุคอนกรีตที่มีมวลรวมทำปฏิกิริยาและต้องใช้ซีเมนต์ที่มีปฏิกิริยาอัลคาไลไม่เกินกำหนด

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางกายภาพ ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

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

หมายเหตุ A ระวังไม่ให้มีผลละเอียดที่เกาะตัวกันเป็นก้อนค้ำบนแรง

B เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน หรือ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนด

C ถ้ามีสารปอซโซลานผสมเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของสารซีเมนต์ในคอนกรีต ชิ้นส่วนทดสอบของการขยายตัวของโตเคิลฟควรมีสารปอซโซลานอยู่ร้อยละของสารซีเมนต์ตามนั้น

D ความหนาแน่น (density) และความละเอียดของตัวอย่างต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้านี้หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้านี้ทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง

3) ชั้นคุณภาพ C (class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ (lignite) หรือซับบิ-ทูมินัส (subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณ CaO สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618, (1991) เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำ ทำให้เถ้าลอย Class C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้ว ยัง Al_2O_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)

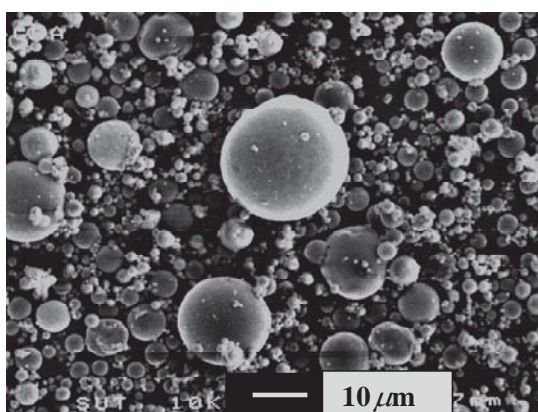
ตารางที่ 2.4 ข้อกำหนดทางกายภาพเพิ่มเติม ตามมาตรฐาน ASTM C 618 (1991)

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
ข้อกำหนดด้านความสม่ำเสมอ เมื่อใช้สารกักกระจายฟองอากาศ ปริมาณสารกักกระจายฟองอากาศที่ทำให้มีปริมาตรอากาศร้อยละ 18 จะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของสิบตัวอย่างที่ทดสอบก่อนหน้านี้หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้านี้ทั้งหมด ถ้าทดสอบไม่ถึงสิบตัวอย่าง, ไม่เกินร้อยละ	20	20	20
ประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยาอัลคาไลของมวลรวม การขยายตัวของตัวอย่างที่ 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์อัลคาไลต่ำ, ไม่เกินร้อยละ	100	100	100
ประสิทธิภาพในการช่วยด้านทนสารซัลเฟต วิธีที่ 1 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ - สภาวะซัลเฟตปานกลาง 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ - สภาวะซัลเฟตสูง 6 เดือน, ไม่เกินร้อยละ วิธีที่ 2 การขยายตัวของส่วนผสมทดสอบ - เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตในสภาวะซัลเฟต 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

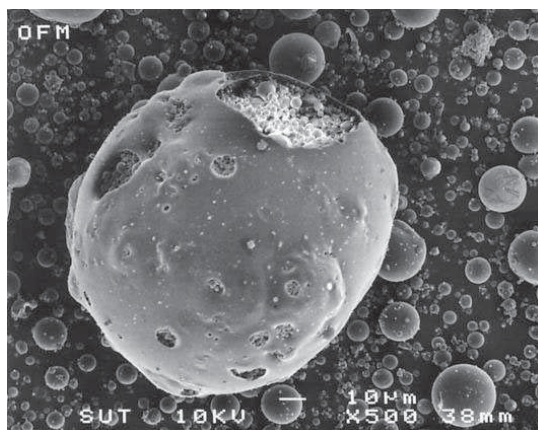
ปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่ถูกบดในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคทรงกลม ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประมาณ 66 ถึง 68% เถ้าลอยบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับปูนขาวและด่าง เกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน แต่เถ้าลอยบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและแข็งตัวได้เช่นเดียวกัน เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปแล้วจะมีความละเอียดใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์เพียงเล็กน้อยโดยลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 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 cm²/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 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 (SO_3) เมื่อช่วงที่ทำวิจัยแรก ๆ พบว่ามีค่าสูงถึง 12 ถึง 15% ซึ่งตามปกติ จะต้องไม่เกิน 3% จึงไม่แน่ใจว่าจะสามารถนำเถ้าลอยมาใช้ได้ เพราะเกรงว่าจะเสี่ยงต่อการก่อสร้างอาคารสูง แต่ปัจจุบันมั่นใจคุณภาพของเถ้าลอยได้ เนื่องจากค่า SO_3 ไม่เกิน 2% (จิรภัทร ขำญาติ, 2546)

2.2 ปอชโซลานธรรมชาติ

วัสดุปอชโซลานธรรมชาติได้ถูกนำมาใช้หลายร้อยปีมาแล้ว คำว่า “ปอชโซลาน” มาจากถ้ำภูเขาไฟของหมู่บ้านปอชซูลิ (pozzuoli) ใกล้กับเมืองเนเปิล ประเทศอิตาลี โดยในปีคริสต์ศักราช 79 เกิดการระเบิดของภูเขาไฟวิซุเวียส (Vesuvius) 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 ₂	52	35	35	90	50	53
Al ₂ O ₃	23	18	12	0.4	20	43
Fe ₂ O ₃	11	6	1	0.4	8	0.5
CaO	5	21	40	1.6	8	0.1
SO ₃	0.8	4.1	9	0.4	0.4	0.1
Na ₂ O ₃	1.0	5.8	0.3	0.5	-	0.05
K ₂ 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 ² /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 cm²/g ส่วนดินดานเผามีปริมาณแคลเซียม 5 ถึง 10% ซึ่งค่าแคลเซียมที่มีอยู่ทำให้วัสดุนั้นมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานหรือเป็นไฮดรอลิกซีเมนต์ (hydraulic cement) ในตัวเอง เนื่องจากปริมาณของกากแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นเผาไม่สมบูรณ์ และดินดานเผามีปริมาณโมเลกุลน้ำในเม็ดดินสะสมอยู่จึงทำให้มีค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On

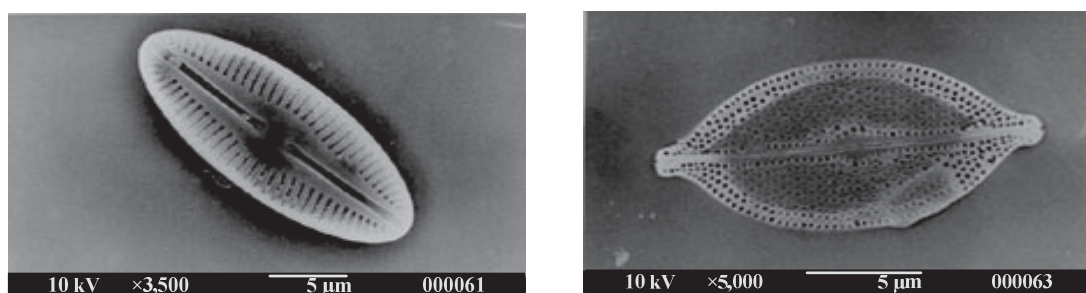
Ignition, LOI) ค่อนข้างมาก คือ มีค่า LOI ประมาณ 1 ถึง 5% โดยค่า LOI สำหรับดินดานเผาไม่ได้ แสดงปริมาณคาร์บอนเหมือนกับกรณีของถ่านลอย

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 ในกรณีนี้ถ้าต้องการเพิ่มปริมาณปอชโซลานในส่วนผสมก็ควรจะเพิ่มปริมาณซีเมนต์ให้มากขึ้นด้วย 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)

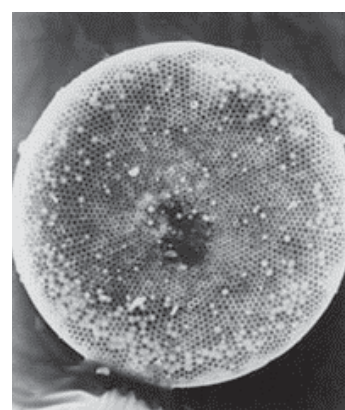
ไดอะตอมไมท์บางทีอาจใช้คำว่า เรดิโอลาเรียนเอิร์ธ (radiolarian earth) เพราะมีโครงสร้างประกอบด้วยโอปอของไดอะตอมและเรดิโอลาเรียน มีสีขาวหรือสีครีมเป็นส่วนใหญ่ แต่ก็อาจพบสีเหลืองอ่อน สีแดง หรือสีน้ำตาลบ้าง (เสรีวัฒน์ สมิทธิ์ปัญญา, 2538) แต่บางครั้งก็พบว่าไดอะตอมไมท์เป็นซากสัตว์ขนาดเล็กที่เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว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

แหล่งดินเบาในประเทศไทยพบอยู่ในจังหวัดลำปาง โดยจะพบเป็นแหล่งเล็กใหญ่กระจายอยู่เป็นบริเวณกว้างในแอ่งลำปาง และแอ่งเล็ก ๆ ใกล้เคียง ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตอำเภอเมืองลำปาง อำเภอแม่ทะ และอำเภอเกาะคา นอกจากนั้นยังสามารถพบได้บ้างในบริเวณบ้านแม่กัว 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)

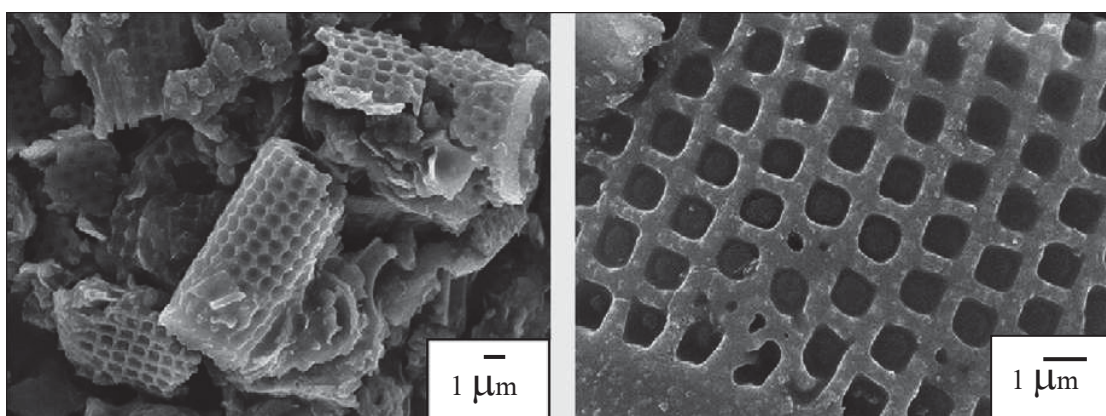
โดยทั่วไปไคอะตอมไมท์มีประโยชน์ในทางด้านอุตสาหกรรม คือ ใช้เป็นส่วนผสมในการทำกระดาษ เพื่อให้เนื้อกระดาษแน่นเนียน ทำเป็นฉนวนและเป็นสารที่ใช้ในการกรองได้ดี เช่น กรองน้ำตาลและสารอื่น ๆ หรือใช้ขัดโลหะได้ดีเพราะมีซิลิกาที่มีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ภายใน (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538) หรือใช้ในอุตสาหกรรม ดั้มกลั่น 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 SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ในปริมาณที่เหมาะสม และยังมีความพรุนสูง เช่นเดียวกับสารปอซโซลานธรรมชาติทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.7 และ รูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

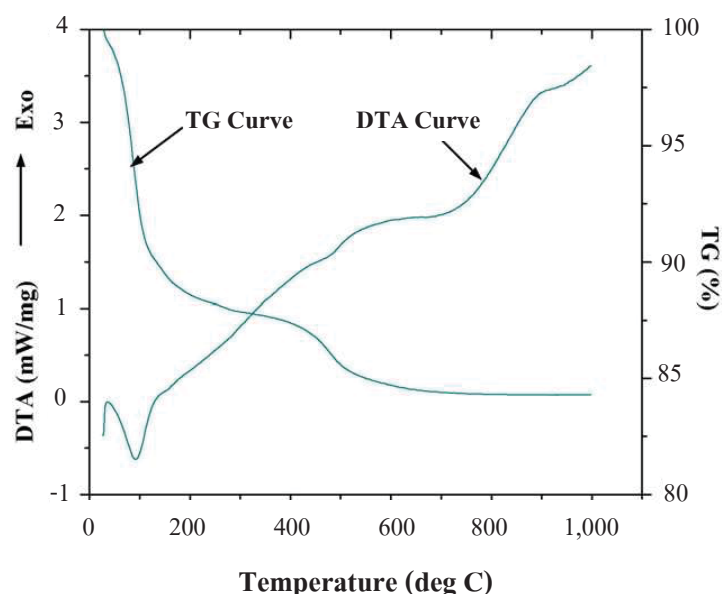
Oxide Compositions	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	SO_3
(%) by mass	77.5	14.16	5.24	2.08	0.20	0.00	0.46	0.53	0.25	0.01



รูปที่ 2.5 ภาพถ่าย SEM ของไคอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

ไคอะตอมไมท์จากแหล่งลำปาง มีปริมาณออกไซด์หลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_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



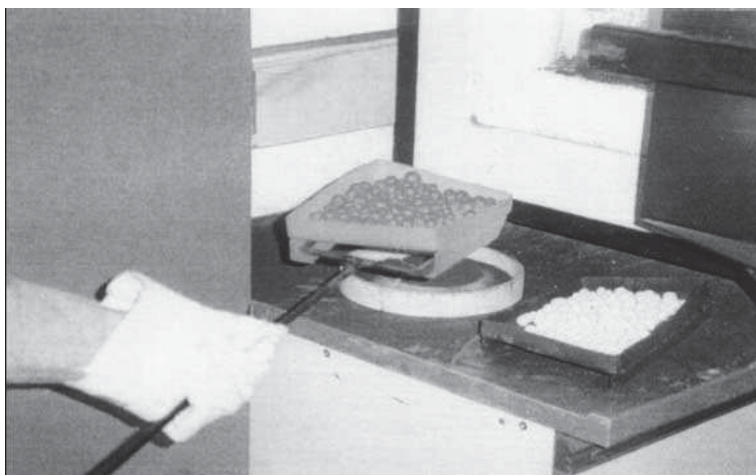
รูปที่ 2.6 กราฟ DTA และ TGA ของไคอะตอมไมท์ลำปาง (Kedsarin Pimraksa, 2008)

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/m³ 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/m³ และมีโครงสร้าง phases ที่ดีกว่า แต่เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น 700°C จะส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง เหลือเพียง 127.4 ksc และมีโครงสร้าง phases ไม่ค่อยหนาแน่นเท่าที่ควร ซึ่งน่าจะเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิในการเผาที่สูงเกินไปอาจจะทำให้ปริมาณสารประกอบหลักบางอย่างใน

ไคอะตอมไมท์สูญเสียไปด้วย อย่างไรก็ตามในการทำอิฐที่มีส่วนผสมของไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านการเผาเลยก็สามารถทำได้ โดยมีค่ากำลังอัดประมาณ 147.8 ksc และมีหน่วยน้ำหนัก 880 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°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)

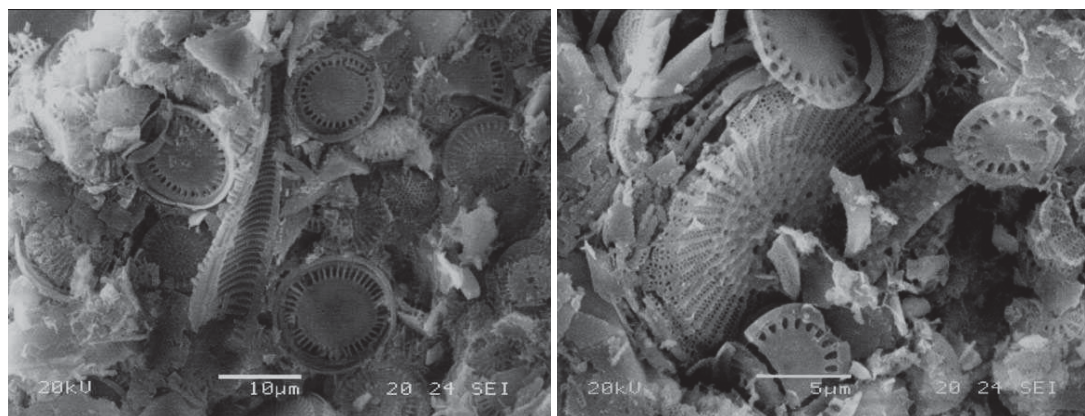
จากผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence (XRF) ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ พบว่ามีปริมาณออกไซด์หลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันแล้วมากกว่า 70% ดังแสดงในตารางที่ 2.9 และมีค่า LOI ไม่มากกว่า 10% ซึ่งค่า LOI ที่สูญเสียไปนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียน้ำเนื่องจากการเผา เพราะไคอะตอมไมท์เกิดขึ้นจากการทับถมเป็นเวลานานจึงมีส่วนประกอบของดินเหนียวปะปนอยู่ รวมทั้งผนังเซลล์ของไคอะตอมไมท์ประกอบด้วยซิลิกาที่มีปริมาณน้ำ ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) อยู่ด้วย และจะมีปริมาณมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของผนังเซลล์ และจากการทดสอบ

SEM ของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ พบว่ารูปแบบของผนังเซลล์ที่ประกอบด้วยซิลิกานั้นค่อนข้างสมบูรณ์ มีลักษณะทรงกระบอก แบบจาน หรือคล้ายเรือ มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 30 μm ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของไคอะตอมไมท์จากประเทศกรีซ (Fragoulisa et al., 2004)

Component	GRE-1 (%)	GRE-3 (%)
Na ₂ O	1.28	0.48
K ₂ O	2.58	1.92
CaO	1.82	1.35
MgO	1.79	1.81
MnO	n.a.	n.a.
Fe ₂ O ₃	8.08	5.90
TiO ₂	n.a.	n.a.
Al ₂ O ₃	17.83	16.68
SiO ₂	59.52	64.04
P ₂ O ₅	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 ปริมาณซีลีออสดิบ 5% อัตราส่วน W/S น้อยกว่า 0.5 สามารถรับแรงกดได้ 2,029 g มีค่าความหนาแน่น 0.93 g/cm^3 โดยที่ LWAs ของประเทศเดนมาร์กและเยอรมัน สามารถรับแรงกดได้เพียง 580 g และ 986 g มีค่าความหนาแน่น 0.65 g/cm^3 และ 0.73 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

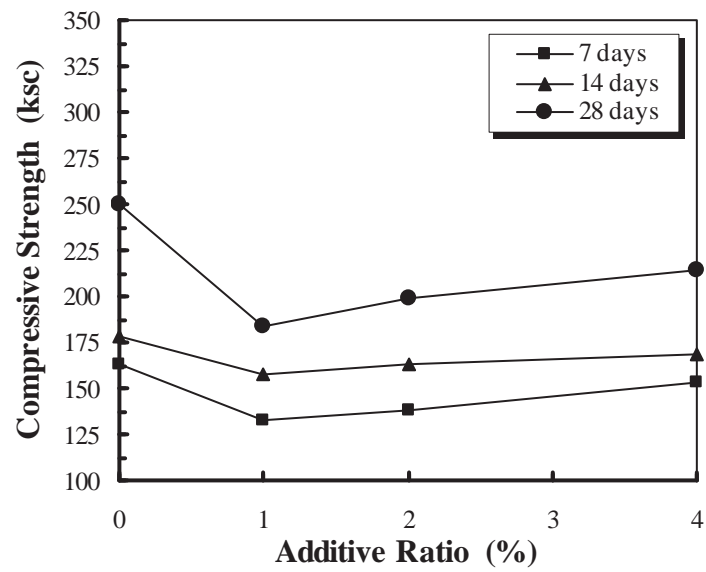
เมื่อทำการเปรียบเทียบจากงานวิจัยของ Pimraksa (2008) ทำให้ทราบว่าไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งจะมีรูปร่างและปริมาณออกไซด์หลักที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาการทับถม แหล่งกำเนิด และชนิดของไคอะตอม ดังนั้นในการศึกษาควรคำนึงถึงทั้งลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของไคอะตอมไมท์ในแต่ละแหล่งกำเนิด รวมถึงอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่ดีของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

Aydin and Gul (2007) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาการก่อตัว และคุณสมบัติเชิงกลบางประการของคอนกรีต ที่เกิดจากการนำวัสดุธรรมชาติที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟมาใช้ในการส่วนผสม ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมท์ กับหินพัมมิช โดยนำวัสดุ 2 ชนิด แทนที่ซีเมนต์ 1, 2 และ 4% ใช้คอนกรีตควบคุมที่ถูกออกแบบโดยมาตรฐาน ACI ที่มีปริมาณซีเมนต์ 300 kg/m^3 ค่ายุบตัวเฉลี่ย 5 cm และเมื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไคอะตอมไมท์กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 2.10 พบว่าไคอะตอมไมท์ มีปริมาณสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เมื่อรวมกันแล้วมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติในการเป็นวัสดุพอชโซลาน

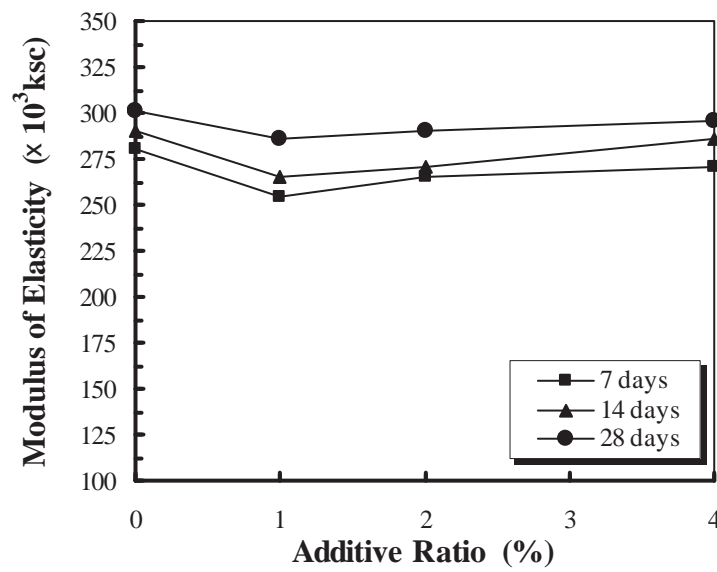
ตารางที่ 2.9 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของไดอะตอมไมท์ประเทศตุรกีกับปูนซีเมนต์
(Aydin and Gul, 2007)

Component	Cement (%)	Diatomite (%)
SiO_2	17.69	77.14
Al_2O_3	3.59	1.6
Fe_2O_3	5.89	3.9
CaO	57.69	1.96
MgO	3.39	1.2
SO_3	2.57	-
K_2O	0.3	-
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 SiO_2 ของไดอะตอมไมท์ ที่มีอยู่ในส่วนประกอบมากถึง 77.14% ที่ทำปฏิกิริยาปอซโซแลนกับ 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 แร่เพอร์ไลต์ชนิดนี้ถือว่ามีความคุณภาพดี 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 จึงเกิดการริดเป็นเส้นใยแก้วมีรูปฟองสูง 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 ₂	71.0 - 75.0	71.02
Al ₂ O ₃	12.5 - 18.0	16.09
Fe ₂ O ₃	0.50 - 1.50	0.71
FeO	0.00 - 0.10	0.73
MgO	0.10 - 0.50	0.41
CaO	0.50 - 2.00	0.58
Na ₂ O	2.90 - 4.00	0.90
K ₂ O	4.00 - 5.00	5.59
H ₂ O (comb)	3.00 - 5.00	3.57

ตารางที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์กับเพอร์ไลต์ (จิตรกร ตังอนุสรณ์สุข และคณะ, 2548)

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

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

2.4.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์ส่วนใหญ่เนื้อหินมีลักษณะเป็นแก้ว มักจะมีรอยแตกเป็นวง ๆ ซ้อนกัน คล้ายกลีบหัวหอม รอยแตกนี้อาจจะมองเห็นด้วยตา หรืออาจจะต้องอาศัยคู่มือแว่นขยายหรือใช้กล้องจุลทรรศน์ 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

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

นอกจากนี้เมื่อนำเพอร์ไลต์ไปผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการทำคอนกรีตใช้ในงานก่อสร้างต่าง ๆ จะทำให้ลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนั้นลงได้ และยังทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อน และป้องกันการสะท้อนของเสียงได้เป็นอย่างดี คอนกรีตที่ใช้เพอร์ไลต์ผสมจะมีความหนาแน่นต่ำถึง 320 kg/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 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 และยังได้ศึกษาถึงองค์ประกอบและคุณสมบัติของเพอร์ไลต์ในด้านต่าง ๆ เช่น องค์ประกอบหลักทางเคมีของเพอร์ไลต์ โดยวิธี X-Ray Fluorescence ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักของเพอร์ไลต์ที่มีปริมาณสูง ได้แก่ SiO_2 ซึ่งพบในปริมาณ 70.29% ส่วน Al_2O_3 และ K_2O พบในปริมาณ 13.64 และ 5.73% ตามลำดับ ด้านองค์ประกอบรอง (trace element) ที่พบในปริมาณไม่มากนัก ได้แก่ P_2O_5 , MgO , CaO และยังได้ศึกษาถึงความหนาแน่นรวม (bulk density) โดยนำเพอร์ไลต์มาบดแล้วคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐาน เพื่อหาขนาดของเพอร์ไลต์ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นมวลรวมผสมคอนกรีต ซึ่งจากการทดสอบพบว่า ขนาด 0.850 mm มีความเหมาะสมในการใช้งาน และค่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่มีการใช้โดยทั่วไป คือ 40 ถึง 300 kg/m^3

คม บัวคลี และรังสรรค์ รังสิมาวงศ์ (2540) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนการผสมมอร์ตาร์มวลเบาโดยใช้เพอร์ไลต์มาแทนที่ทรายบางส่วน เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการและสามารถนำมอร์ตาร์มวลเบาไปใช้งานได้จริงในการผลิตผนังมวลเบา โดยในการทดลองได้ใช้ทั้งขนาดหยาบและขนาดละเอียดปนกัน เพอร์ไลต์ในการทดสอบมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 252 kg/m^3 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์นั้น แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบหน่วยน้ำหนัก การทดสอบความสามารถเทได้โดยใช้โต๊ะการไหล และการทดสอบกำลังอัด โดยกำหนดเป้าหมาย คือ ด้านหน่วยน้ำหนักไม่เกิน 800 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)

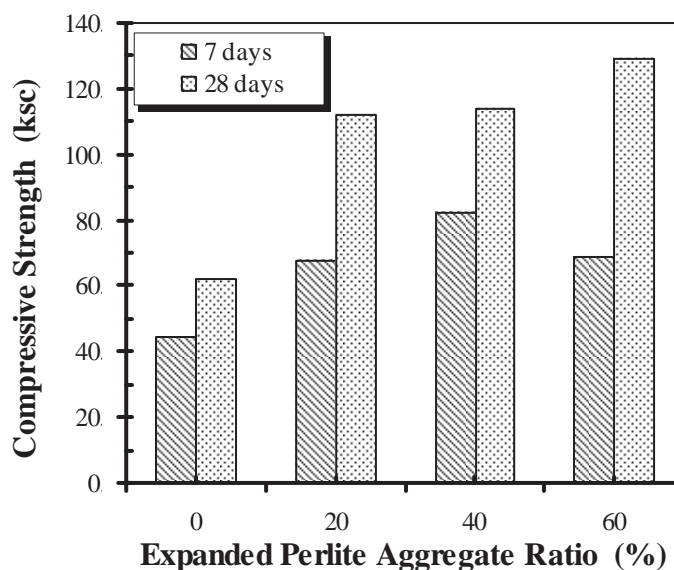
Demirboga, Orung and Gul (2001) จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของ Expanded Perlite Aggregate (EPA) และสารแร่ธาตุผสมเพิ่มที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่หินพัมมิช 20, 40 และ 60% โดยเพอร์ไลต์ในการศึกษานี้มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.14 โดยได้ทำการศึกษถึงผลกระทบด้านกำลังอัดที่ใช้ซิลิกาฟูมและเถ้าลอย Class C แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 ใช้สารลดน้ำจำนวนมากร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมปริมาณซีเมนต์ที่ 200 kg/m³ 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 ₂	19.8	85-95	30.6	71-75
Al ₂ O ₃	5.61	1.0-3.0	14.8	-
Fe ₂ O ₃	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 ₃	2.36	-	4.9	-
C	-	0.5-1.0	-	-
K ₂ O	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	2.9-4
TiO ₂	-	-	-	-
LOI	0.36	0.5-1.0	2.4	-

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของ EPA ของประเทศตุรกี ที่ Demirboga and Orung ทำการศึกษานั้น พบว่ามีปริมาณสารประกอบหลัก SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เมื่อรวมกันแล้วมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติในการเป็นวัสดุพอลิโซลาน

เมื่อเพิ่มปริมาณ Expanded Perlite ความหนาแน่นของตัวอย่างทั้งหมดลดลงจาก 1,150 เหลือ 753 kg/m³ 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 และเป็นที่น่าพอใจว่าเมื่อมีความชื้นหรือน้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างอากาศในคอนกรีตจะส่งผลให้การนำความร้อนเพิ่มมากขึ้น 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 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 (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 พบว่าคอนกรีตที่มีซิลิกาฟูม 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) ของซิลิกาฟูม

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 คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเพอไรท์สามารถทำให้การนำความร้อนลดลง 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 SiO_2 ประมาณ 70 ถึง 75% และมี Al_2O_3 ประมาณ 12 ถึง 16% ใช้ปูนซีเมนต์ 2 ชนิด คือ CEM II 32.5R และ CEM I 42.5R ควบคุมปริมาณซีเมนต์ที่ 300, 350 และ 400 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 kg/m^3 ตามลำดับ ทำการบ่มตัวอย่างในน้ำที่อายุการบ่ม 28 วัน อุณหภูมิในการบ่ม $23\pm 1^\circ\text{C}$ หลังจากนั้นทำการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดและการรับแรงดึงของคอนกรีตที่มี Expanded Perlite ในส่วนผสม เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม

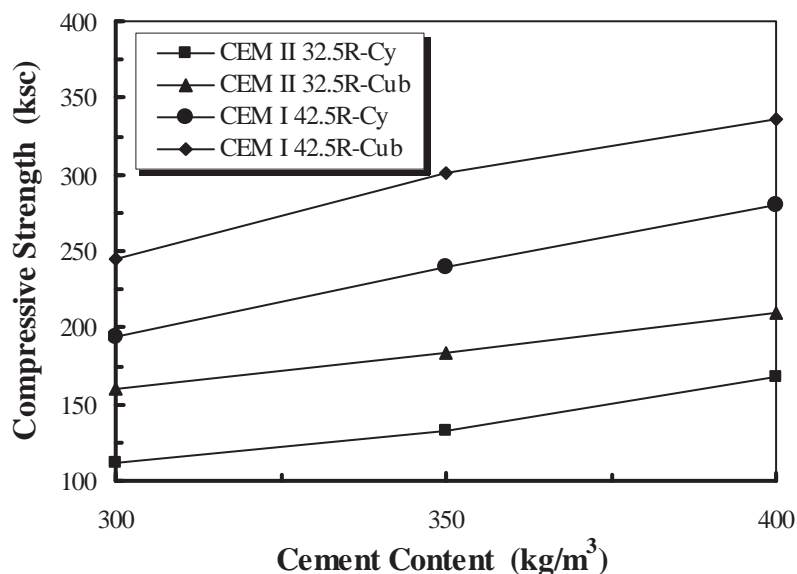
จากการศึกษาพบว่า EPA Concrete มีค่ากำลังอัดและค่ากำลังดึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และคุณภาพของปูนซีเมนต์สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงปริมาณ คุณภาพ และชนิดของปูนซีเมนต์ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสามารถในการทำงานที่ดี แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณและคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้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

ให้กำลังอัดและกำลังดึงของคอนกรีตลดลง แต่เป็นที่น่าสนใจว่าในการเพิ่มปริมาณการแทนที่ Expanded Perlite ในอัตราส่วนที่ต่ำ ยังคงสามารถทำให้กำลังของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถรับได้ ถ้าไม่คำนึงถึงกำลังของคอนกรีตที่สูญเสียไปบางส่วน

ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตจากการออกแบบส่วนผสม อยู่ระหว่าง 1,800 ถึง 2,400 kg/m³ โดยที่หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด (fresh concrete) ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM II 32.5R ในปริมาณ 350 และ 400 kg/m³ มีค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4.72 และ 8.89% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300 kg/m³ ตามลำดับ ในขณะที่ EPA Concrete ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ในปริมาณ 350 และ 400 kg/m³ มีค่าหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่า คือมีหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4.78 และ 10.87% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย

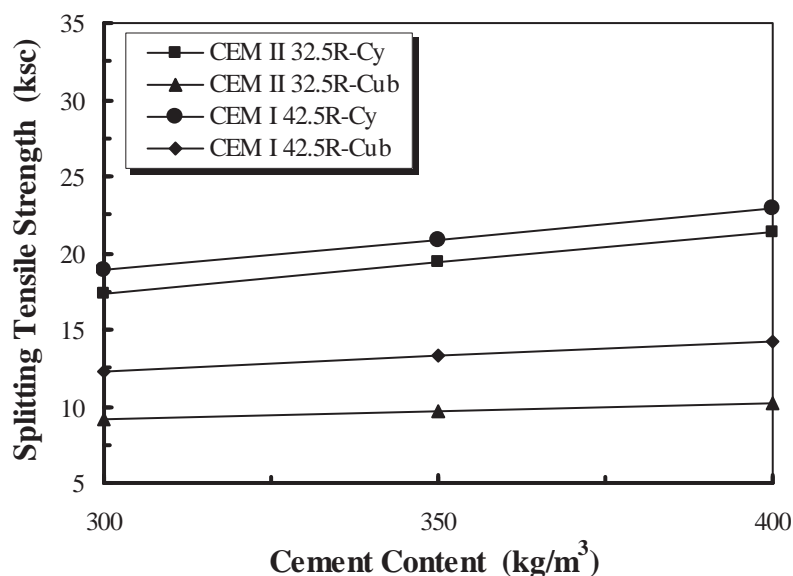
ความสามารถเทได้ของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของคอนกรีต ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่า Vebe Time ของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 3.4 ถึง 3.85 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM II 32.5R ที่ปริมาณ 350 และ 400 kg/m³ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 5.88 และ 8.82% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300 kg/m³ ตามลำดับ ส่วนในการใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ที่ปริมาณ 350 และ 400 kg/m³ มีค่า Vebe Time เพิ่มขึ้น 5.71 และ 8.57% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ชนิดเดียวกันที่ปริมาณ 300 kg/m³ 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 kg/m³ มีค่าการยุบตัวลดลง 7.69 และ 0.09% ตามลำดับ และมีค่าการไหลแผ่อยู่ที่ 310 และ 360 mm เมื่อเปรียบเทียบกับ EPA Concrete ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ 300 kg/m³ สรุปได้ว่าค่าการยุบตัวของ EPA concrete ที่ใช้ CEM II 32.5R มีค่าสูงกว่า CEM I 42.5R เนื่องจากมีคุณภาพที่ดีกว่าหรือมีความละเอียดมากกว่า

เมื่อพิจารณาเฉพาะผลการทดสอบค่ากำลังอัดและค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกของ EPA Concrete ที่มีปริมาณ Perlite 30% พบว่ามีค่ากำลังลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่มีปริมาณซีเมนต์เท่ากัน โดยที่ค่ากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกที่น้อยที่สุดที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 kg/m³ มีค่าเท่ากับ 112.13 และ 9.00 ksc และมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 400 kg/m³ มีค่าเท่ากับ 265.04 และ 23.45 ksc ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14



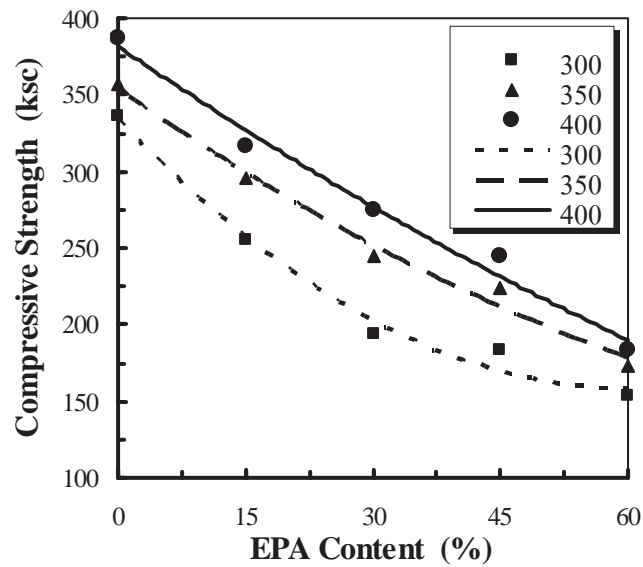
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับปริมาณปูนซีเมนต์ของ EPA Concrete ที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% (Topcu and Isikdag, 2007)

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%

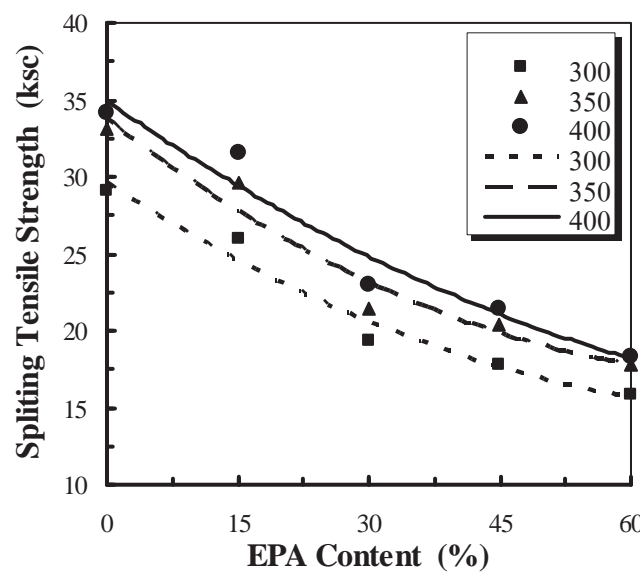


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกกับปริมาณปูนซีเมนต์ของ EPA Concrete ที่ใช้ Expanded Perlite แทนที่ปูนซีเมนต์ 30% (Topcu and Isikdag, 2007)

EPA concrete ที่ใช้ปูนซีเมนต์ชนิด CEM I 42.5R ที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ 300, 350 และ 400 kg/m³ และใช้เพอร์ไลต์ แทนที่ปูนซีเมนต์ 0, 15, 30, 45 และ 60% ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 พบว่ามีค่ากำลังอัดและค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกต่ำสุด 152.91 และ 15.29 ksc ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 kg/m³ และมีค่ามากที่สุด 377.17 และ 35.68 ksc เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 400 kg/m³ ตามลำดับ ดังนั้นค่ากำลังอัดที่เหมาะสมสำหรับการผลิต EPA Concrete คือแทนที่ด้วย EPA ที่ปริมาณ 15 และ 30% ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ 300 และ 400 kg/m³ 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/m³

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)

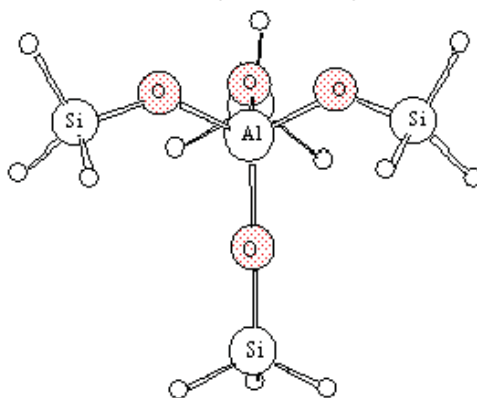
ซีโอไลต์ (Zeolite) คือสารประกอบออลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO₄ หรือ AlO₄) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอม เท่ากับ 1x10⁻¹⁰ m) นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้วในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวม ๆ และมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึกสามารถดักให้เคือกระเหยออกไปได้

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 (AlO_4) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ซึ่งประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกต โดยมีการเชื่อมต่อของอะตอมออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือเป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) โครงสร้างซีโอไลต์แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ



รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ (อุษา อันทอง และคณะ, 2549)

1. โครงสร้างปฐมภูมิ SiO_4 และ 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 Al_2O_3 SiO_2 Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่เป็นเจล (Gelatin) จนถึงเป็นรูพรุน (Porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (Sandlike) ได้แก่ Zeolite A Zeolite Y Zeolite F Zeolite M เป็นต้น

ตารางที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบสารประกอบของซีโอไลต์ (ไกรภพ อินทร์แสง, 2550)

สารประกอบ	NZ (%)	SZ (%)
SiO ₂	71.75	61 ถึง 67
Al ₂ O ₃	13.19	11 ถึง 12.4
Fe ₂ O ₃	2.20	4.3 ถึง 6.98
CaO	0.11	2.25 ถึง 3.24
MgO	0.40	1.54 ถึง 1.64



รูปที่ 2.18 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 CO₂ และสารประกอบซัลเฟอร์จากแก๊สธรรมชาติแยกสารที่ทำให้เกิดสารมลภาวะ เช่น SO₂ NO₂ และ O₂ 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 คือมี ค่า 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 การใช้เพอร์ไลต์ในคอนกรีตจะส่งผลให้กำลังอัดลดลง แต่ยังคงสามารถทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานได้ และยังเกิดผลดีในด้านคุณสมบัติของการเป็นคอนกรีตมวลเบา ถ้าไม่คำนึงถึงกำลังของคอนกรีตที่สูญเสียไปบางส่วน แต่ถ้าต้องการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นก็ต้องคำนึงถึง คุณภาพ ชนิด และปริมาณของปูนซีเมนต์อีกด้วย

ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของเพอร์ไลต์จะคล้ายกับปฏิกิริยาของวัสดุพอซโซลานทั่วไป 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 นันทคำภิรา 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). ผลกระทบของขนาดอนุภาคและรูปร่างเม็ดผ่านหินต่อความพรุนและการซึมผ่านอากาศของเพสต์. 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). ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย
แม่เมาะ. 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). สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์
อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. (มอก.1505-2541.)
- วินิต ช่อวิเชียร. (2544). คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ.
- ศิริรัตน์ รัตนจันทร์. (2543). การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมวัสดุเพื่อผสมทำคอนกรีตที่มีน้ำหนัก
เบาจากดินที่มีอยู่ในท้องถิ่น. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [สสวท.]. (2550). [ชาดึกดำบรรพ์](#).
[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.
- 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.

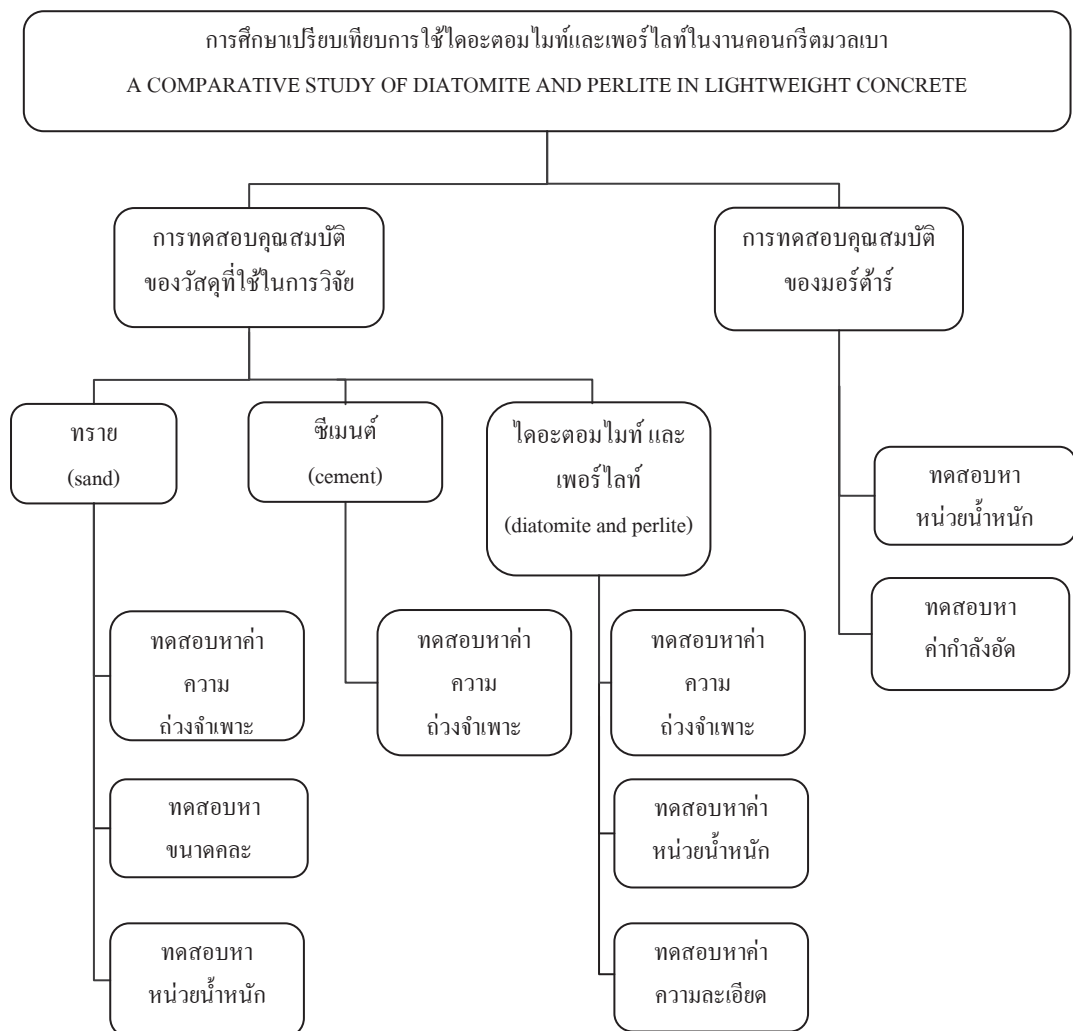
บทที่ 3

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

- การทดสอบคุณสมบัติของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์

เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ 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 (Na_2SiO_3) ซึ่งประกอบด้วย $\text{Na}_2\text{O} = 15.32\%$, $\text{SiO}_2 = 32.87\%$ และน้ำ = 51.81% โดยน้ำหนัก และมี $\text{pH} = 9.05$ ตรวจสอบโดยเครื่องพีเอชมิเตอร์
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (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 (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	Na_2SiO_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
เลี้ยว

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	วัสดุปอชโซลาน	กากตะกอนของเลี้ยว
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) เพื่อให้ตัวอย่าง เป็นผงที่ละเอียดขึ้น และมีขนาดของเม็ดผงใกล้เคียงกัน ทาตัวอย่างลงบนเทปด้านที่เป็นกาวบนแผ่น เพรมที่เตรียมไว้ ใช้พู่กันที่สะอาดเกลี่ยผงตัวอย่างให้ติดบนเทปเป็นชั้นบางอย่างสม่ำเสมอ ทำความ สะอาดแผ่นตัวอย่างให้เรียบร้อย ตรวจสอบความสม่ำเสมอของแผ่นตัวอย่างใช้เทปกาวปิดทับ ตัวอย่าง เพื่อกันไม่ให้ผงหลุดออกจากแผ่นเฟรม จากนั้นนำไปทดสอบ ด้วยเทคนิค X-ray Absorption Spectroscopy (XAS) และ X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

5) การถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

โดยการนำผงตัวอย่างมาโรยบนแท่นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 ซม. ที่ติด แผ่นกาว 2 หน้า เตรียมไว้แล้ว โดยให้ผงตัวอย่างติดแผ่นกาวเป็นแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำไปเป่าด้วย ลมออกซิเจนเพื่อให้ผงตัวอย่างหลุดออกให้เหลือเพียงชั้นเดียว นำแท่นตัวอย่างไปอบด้วยแสงไฟ เพื่อไล่ความชื้น แล้วนำแท่นตัวอย่างไปเคลือบด้วยออรอนทองคำ หลังจากนั้นจึงนำไปถ่ายภาพขยาย อนุภาคด้วยเครื่อง 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 , ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ 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 ± 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°C ประมาณ 5 นาที นำตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ -40°C ความดัน 0.5 ปาสกาล 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°C ความดัน 0.5 ปาสกาล เป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบด้วยทองและนำไปทดสอบถ่ายภาพขยายอนุภาคด้วยเครื่อง SEM

6) การทดสอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดย X-Ray Diffraction (XRD)

ทุบก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 5 – 10 มิลลิเมตร นำชิ้นตัวอย่างไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -195°C ประมาณ 5 นาที นำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ -40°C ความดัน 0.5 ปาสกาล 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

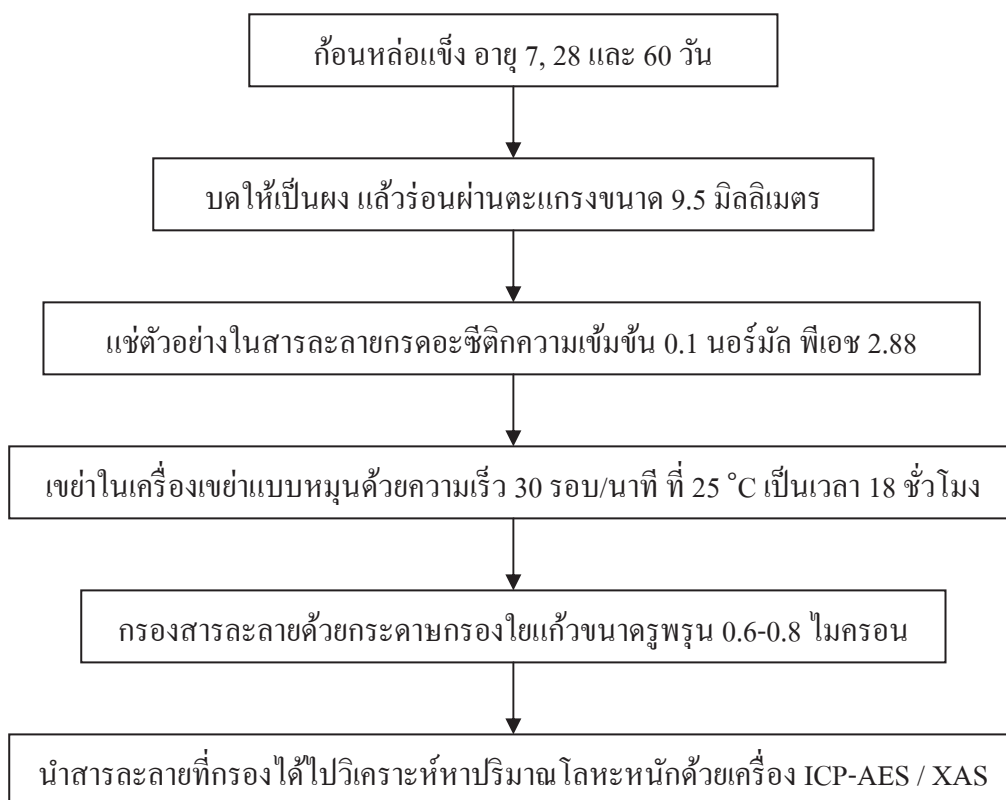
หล่อก้อนซีเมนต์เพสต์ขนาด 50x50x50 มม. โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ ซิลิกาฟูม ร้อยละ 10 , เถ้าลอย ร้อยละ 30 , ซีโอไลท์สังเคราะห์ และซีโอไลท์ธรรมชาติ ร้อยละ 20, 30 และ 40 เป็นวัสดุยึดประสาน และผสมกากตะกอนของเสียจากโรงชุบโลหะในอัตราส่วนร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน 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 จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย กรดอะซิติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2.88 โดยใช้อัตราส่วนน้ำหนักของของแข็ง ต่อปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 1 : 20 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุนที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C กรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว ขนาดรูพรุน 0.6-0.8 ไมครอน หลังจากนั้นนำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักด้วยเครื่อง ICP - AES

การเตรียมสารละลายกรดอะซิติกที่มีพีเอชเท่ากับ 2.88 โดยเจือจางกรดอะซิติก 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 สารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล และสารละลายฟีนอลสังเคราะห์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยนำก้อนหล่อแข็ง ตัวอย่างที่บ่มเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 60 วัน มาแช่ในสารชะในขวดพลาสติกขนาด 1 ลิตร โดย

ก้อนตัวอย่างบรรจุอยู่ในตาข่ายพลาสติก และแขวนอยู่ตรงกึ่งกลางของสารละลายเพื่อให้ก้อนตัวอย่างสัมผัสกับสารละลายทุกทิศทาง ใช้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของของแข็งต่อปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 1 : 20

เปลี่ยนสารละลาย และนำสารละลายไปวัดค่าฟิเอชและวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-AES และ XAS ดังนี้

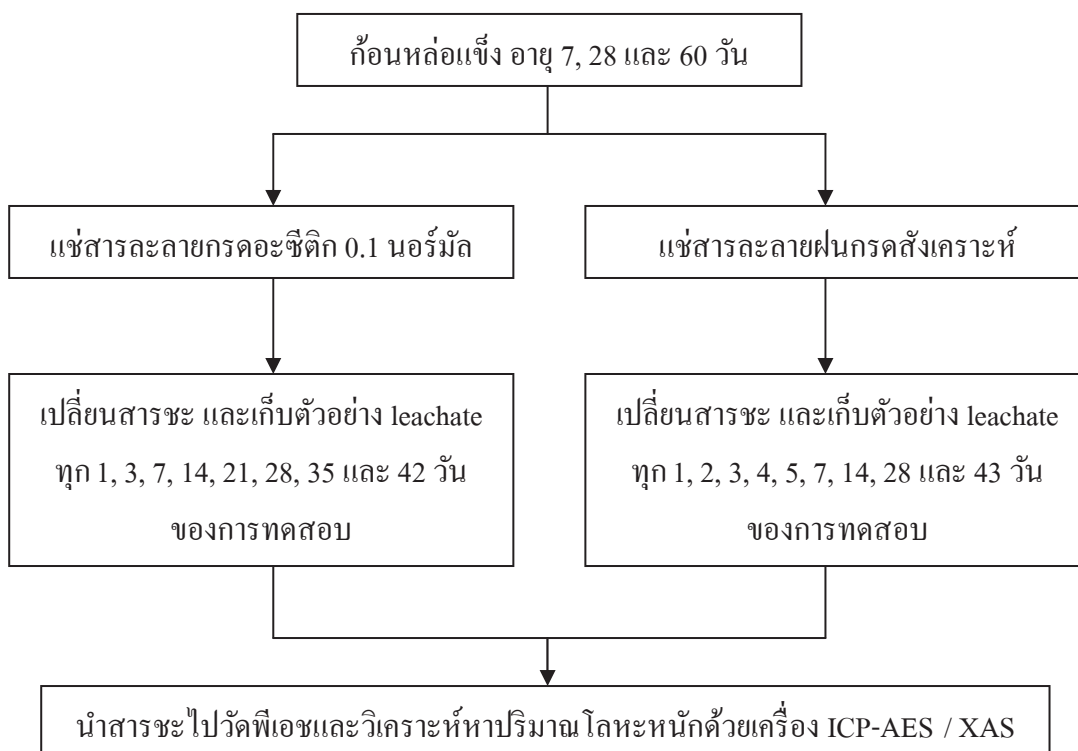
สารชะเป็นสารละลายกรดอะซีติกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

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 ประกอบด้วยการขนาดเฉลี่ยและการกระจายของอนุภาคโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบ 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 มม³ 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 องศาเซลเซียสต่อ นาที

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/m³ 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)₂] 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) โดยจัดเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต หรือสารอะลูมิโนฟอสเฟต 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 ³)	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 SO_3 ไม่มากกว่า 4% และเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 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 SO_3 ไม่มากกว่า 4% ตามลำดับ และควรมีเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่า 66%

จากผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา และเพอร์ไลต์ทั้งสองชนิดที่ผ่านการเผาแล้ว สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักทางเคมีตามมาตรฐานกำหนด

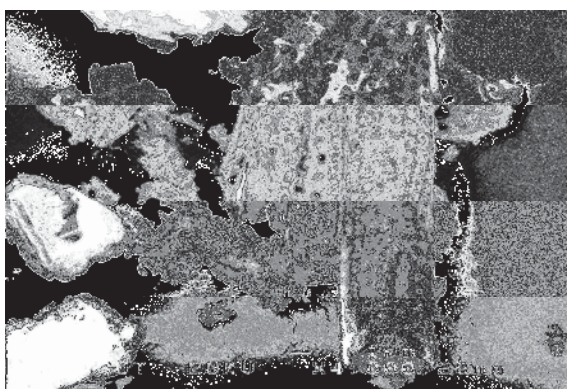
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไดอะตอมไมท์ เพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2 ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)

Chemical Composition (%)	Portland Cement Type 1*	Diatomite	Perlite Type 1	Perlite Type 2
SiO ₂	17-25	68.27	75.16	71.32
Al ₂ O ₃	3-8	9.93	10.46	10.73
Fe ₂ O ₃	0.5-6.0	15.22	2.39	2.58
CaO	60-67	0.80	1.60	1.86
K ₂ O	0.1-1.8	1.65	9.46	8.35
MgO	0.1-4.0	-	-	-
N ₂ O	0.1-1.8	-	-	-
SO ₃	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

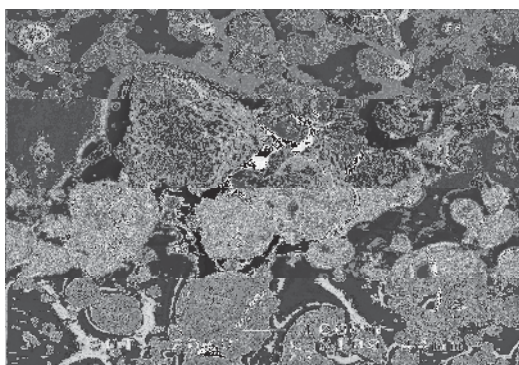


รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของไดอะตอมไมท์

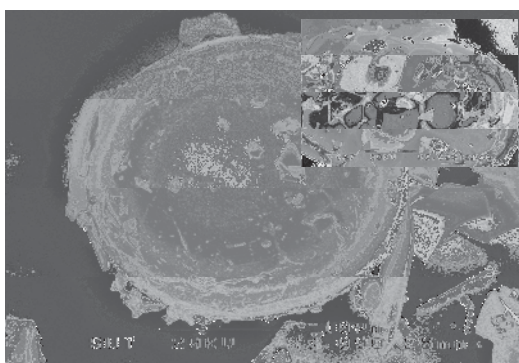
พบว่าไคอะตอมไมท์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาหรืออบ มีลักษณะอนุภาคเป็นแท่ง ทรงกระบอกกลวง มีผนังลักษณะเป็นโครงข่ายที่ค่อนข้างสมบูรณ์และเป็นระเบียบคล้ายรังผึ้ง มีความพรุนสูง ขนาดอนุภาคประมาณ 5 ถึง 25 micron ดังแสดงในรูปที่ 4.1

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



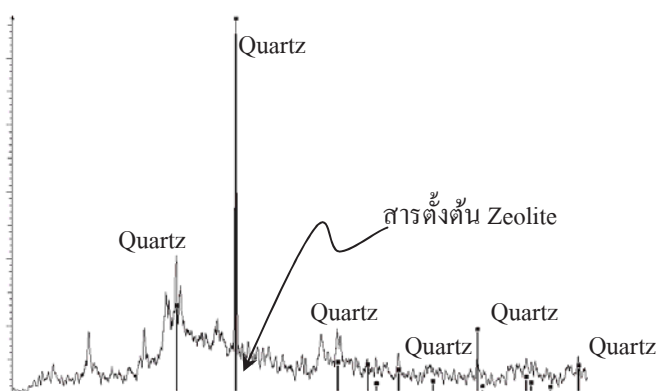
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลต์ Type



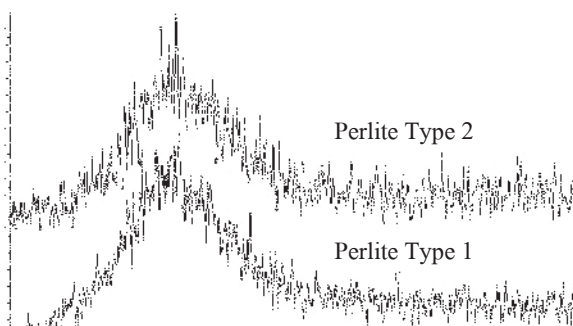
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของเพอร์ไลต์ Type 2

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 ฉัตรวิระ และ ทวีศักดิ์ คงทรัพย์ (2545) พบว่ามีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ความไม่เป็นผลึกสามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบ XRD ของไคอะตอมไมท์



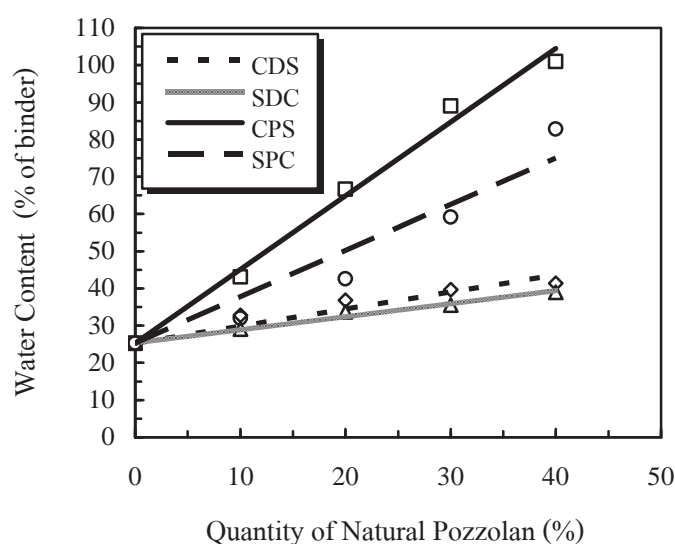
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบ XRD ของเพอร์ไลต์ Type 1 และ เพอร์ไลต์ Type 2

4.7 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำ

4.7.1 ผลกระทบต่อปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์

Type 1 ในส่วนผสม

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

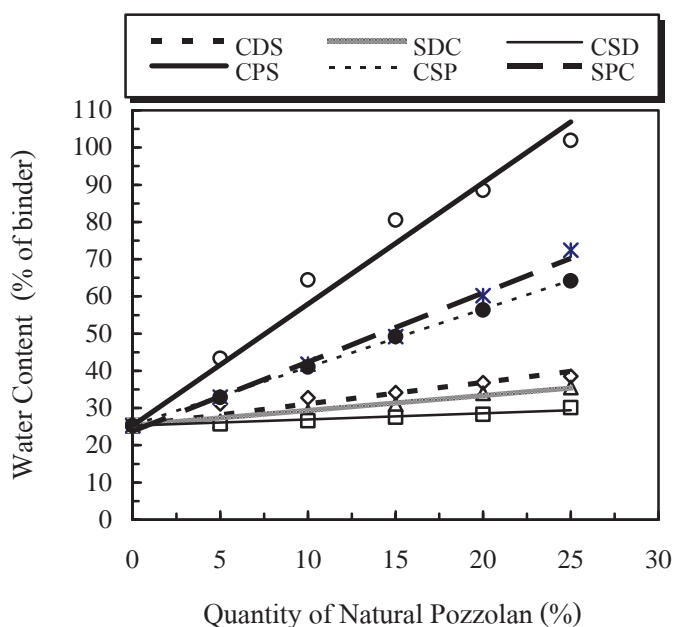


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับปริมาณไคอะตอมไมท์และ/หรือเพอร์ไลต์ Type 1 ในคอนกรีตมวลเบา

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

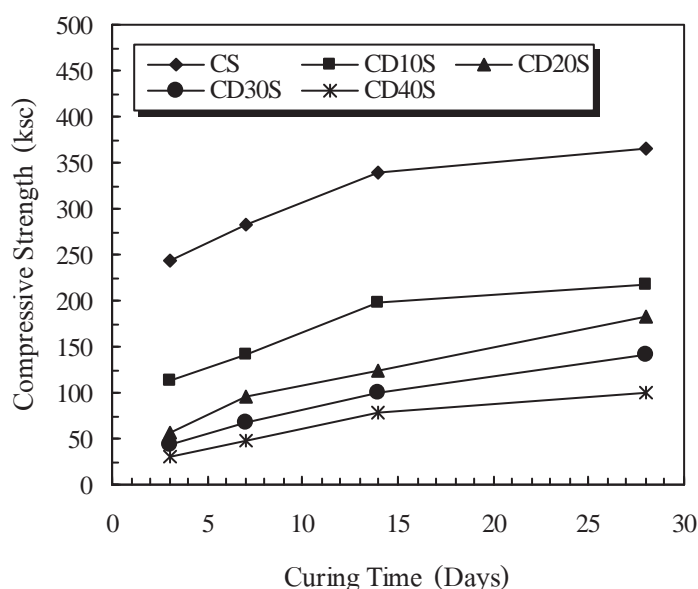
4.8 คุณสมบัติด้านกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสมสามารถแยกวิเคราะห์ได้ ดังนี้

4.8.1 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม

1) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย

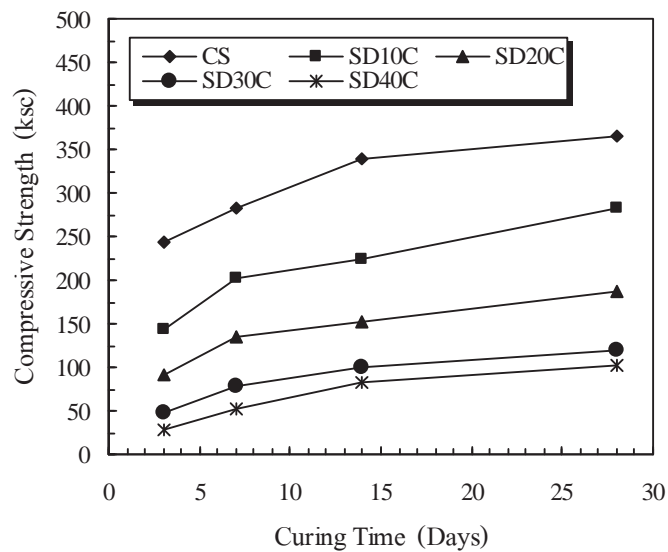
จากรูปที่ 4.8 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทรายมีค่าลดลงตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุมตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทรายมีค่าสูงที่สุด 218 ksc และมีค่าน้อยที่สุด 100 ksc เมื่อใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย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



รูปที่ 4.8 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย

2) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์

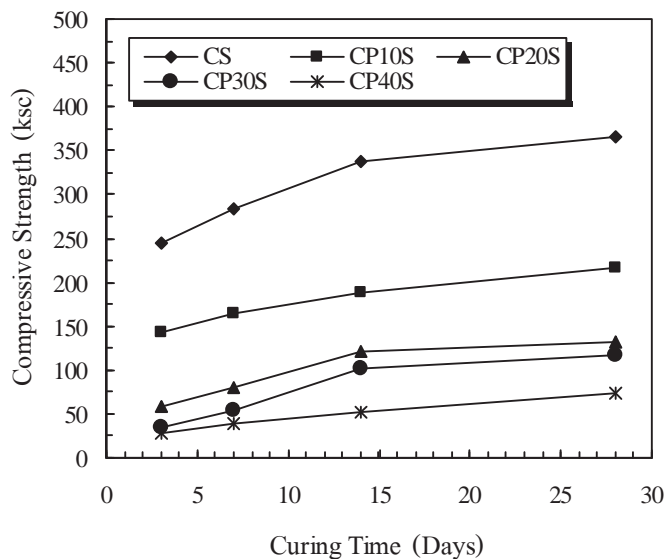
กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับการแทนที่ด้วยทราย โดยมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุมตามอายุการบ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุด 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

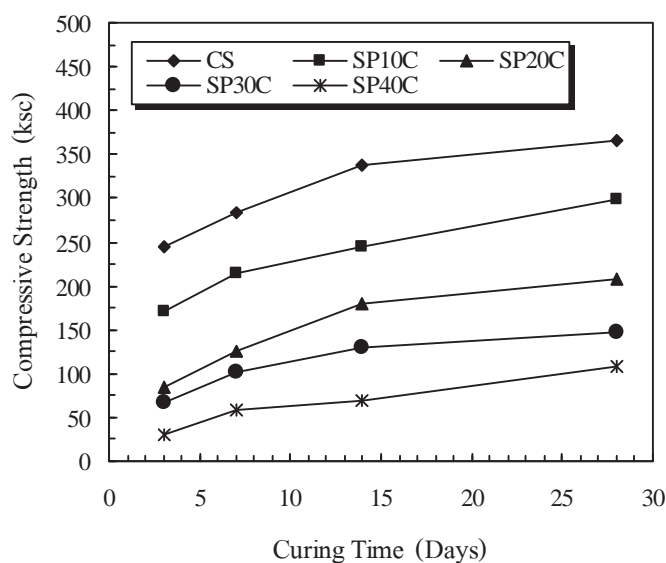


รูปที่ 4.10 กราฟกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เฟอร์ไรท์ Type 1 แทนที่ทราย

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

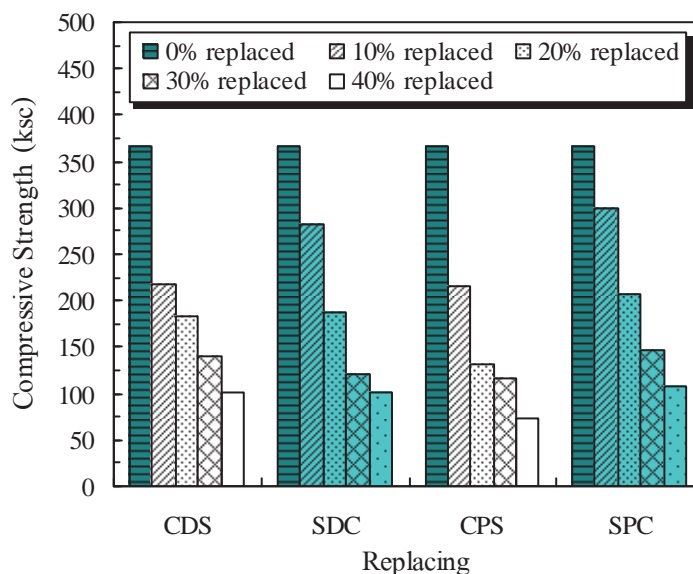
4) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 1 แทนที่ปูนซีเมนต์

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



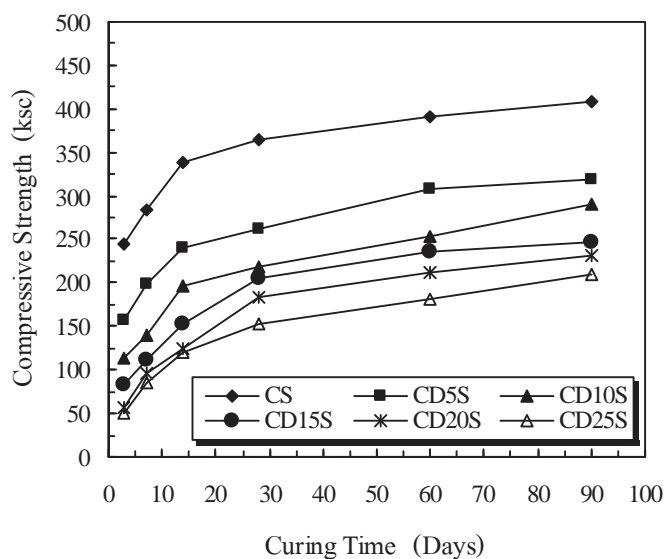
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ในการพิจารณาค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 1 ในส่วนผสม ยังมีปัจจัยอื่นที่ควรคำนึงถึงด้วย เช่น ค่าหน่วยน้ำหนัก ที่ต้องคำนึงถึงเพื่อต้องการคอนกรีตมวลเบาที่มีค่ากำลังอัดสูงและมีหน่วยน้ำหนักต่ำ เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน

4.8.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ

1) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติโดยการแทนที่ทราย

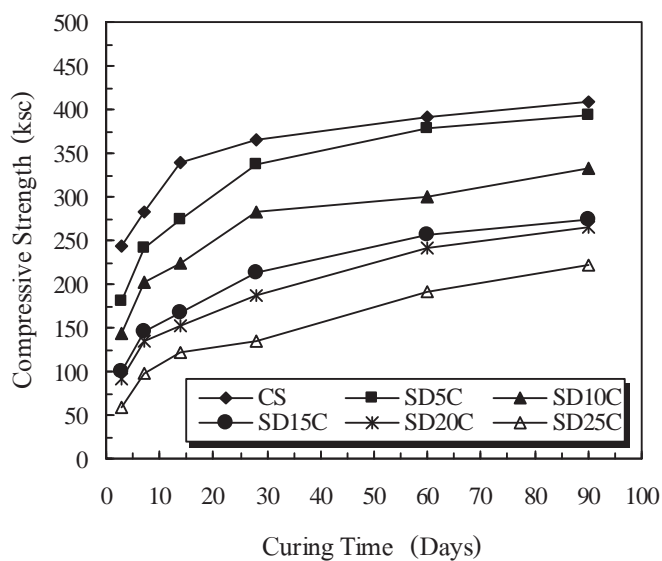
จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ทราย มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ทราย 5% มีค่าสูงที่สุด 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

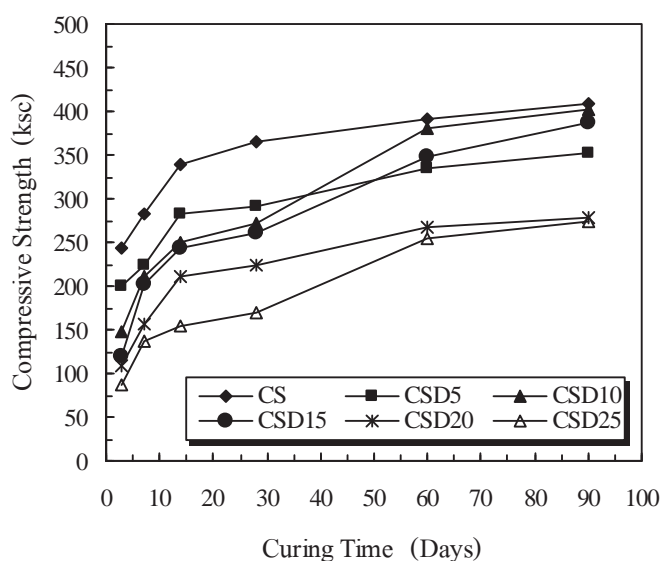
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ
ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่
ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์
ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 5% 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 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติ
โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์

3) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติโดยการผสมเพิ่ม

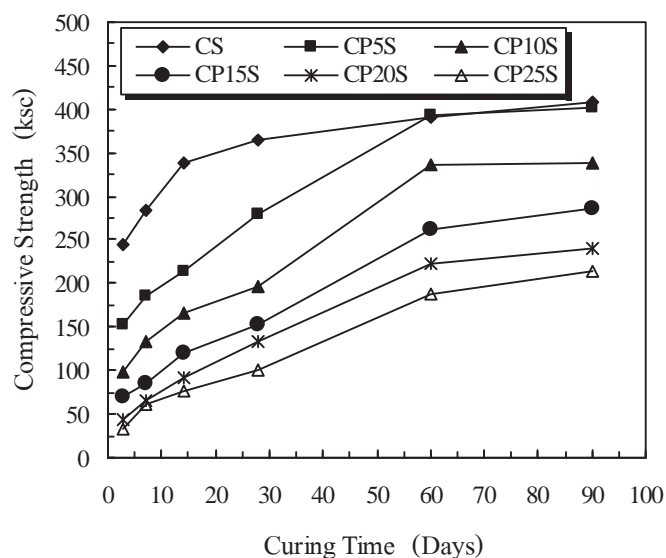
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ไคอะตอมไมท์เป็นสารปอชโซลานธรรมชาติประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการผสมเพิ่ม มีค่าลดลงตามปริมาณการผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดลดลงน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ทรายและแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่วนการพัฒนา กำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม 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

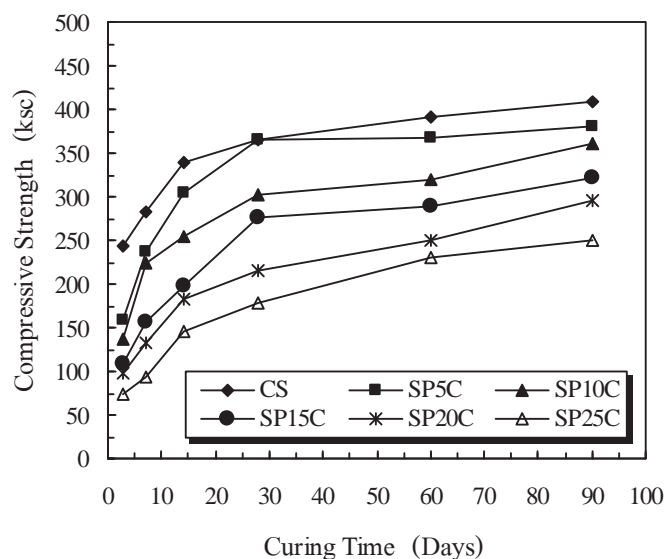
จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มโดยการแทนที่ทราย มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ทราย 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

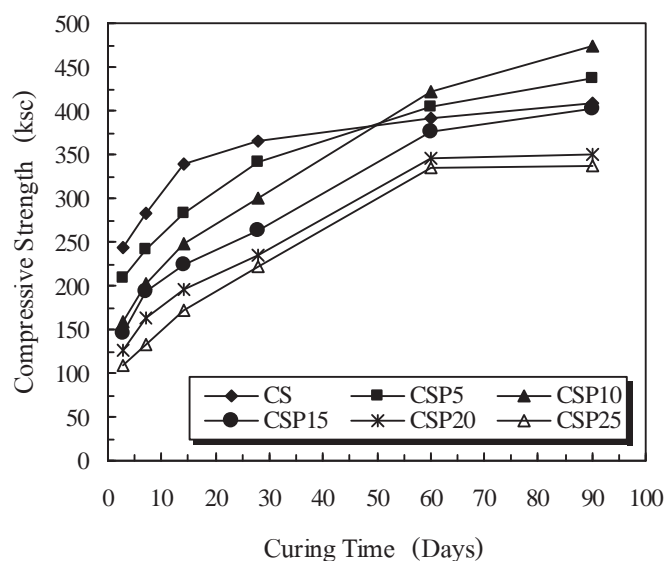
ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ ประเภทสารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอายุการบ่มคล้ายกับมอร์ตาร์ควบคุม ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ 5% มีค่าลดลงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ทราย 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

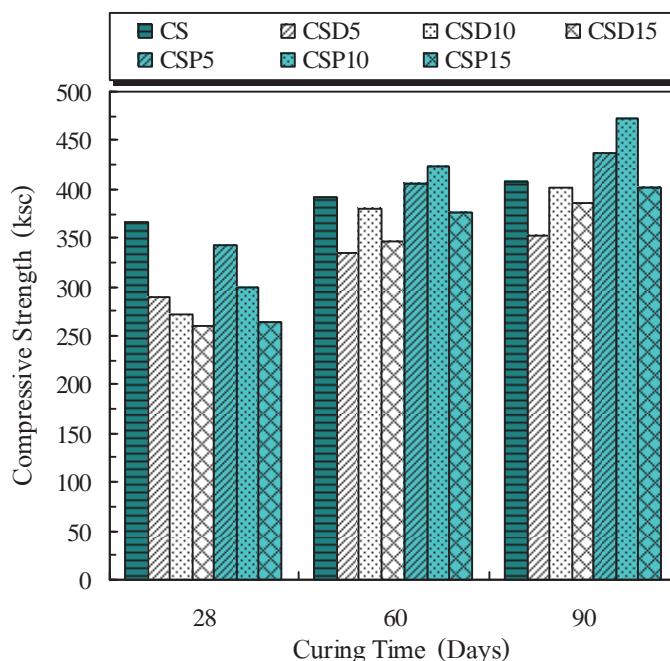


รูปที่ 4.18 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เพอร์ไลต์ Type 2 เป็นสารปอซโซลานธรรมชาติ โดยการผสมเพิ่ม

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 ³)			
	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 ³)					
	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 ³)	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_{cy}) และถั่วลอย ดังตารางที่ 4.6 พบว่าทั้งการใช้ถั่วลอย ไคอะตอมไมท์ และเพอร์ไลต์ Type 2 ผสมเพิ่มในส่วนผสมด้วยการผสมเพิ่ม 10% โดยไม่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง (FA10⁺, D10⁺, P10⁺) 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/m³ 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/m³ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ C300_{cy} 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	ปริมาณ ซีเมนต์ (kg/m ³)	ราคา ซีเมนต์ (บาท/m ³)	ราคา คอนกรีต (บาท/ m ³)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m ³)	ผลต่างของ			
					ปริมาณ ซีเมนต์ (kg/m ³)	ราคา ซีเมนต์ (บาท/m ³)	ราคา คอนกรีต (บาท/ m ³)	หน่วย น้ำหนัก (kg/m ³)
C300 _{cy}	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 ⁺	357.69	1,073.08	1,451.31	2,324	-6.31	-18.92	+11.55	-4
D10 ⁺	357.24	1,071.72	1,533.26	2,321	-6.76	-20.28	+93.50	-7
P10 ⁺	349.59	1,048.76	1,892.87	2,273	-14.41	-43.24	+453.11	-55

หมายเหตุ : C300_{cy} = 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⁺ = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน และผสมเพิ่มด้วยเถ้าลอย 10%

D10⁺ = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน และผสมเพิ่มด้วยไคอะตอมไมท์ 10%

P10⁺ = คอนกรีตทั่วไปที่มีกำลังอัด 300 ksc ที่อายุ 28 วัน และผสมเพิ่มด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 10%

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลต์ Type 2 10% ที่ส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักลดลงได้ถึง 111 kg/m³ นั้น เป็นผลดีในด้านการลดหน่วยน้ำหนัก แต่ราคาค้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปมาก และถ้ามองถึงประโยชน์ด้านการลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงนั้น ทุกสัดส่วนผสมที่มีการนำวัสดุปอซโซลานทุกชนิดแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่เท่ากันสามารถลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลงได้เท่ากัน แต่ถ้าทำการนำวัสดุปอซโซลานผสมเพิ่มเข้าไปโดยยังคงที่ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อปริมาตรเท่าเดิมนั้นจะทำให้ราคาคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตรสูงขึ้น และยังสรุปได้ว่าวัสดุที่มีความเบาสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมได้มากกว่าวัสดุที่มีน้ำหนักมากกว่า 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 kg/ก้อน ซึ่งมากกว่าน้ำหนักต่อก้อนของคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด 3.5 ถึง 15.5 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 kg/ก้อน และมีค่ากำลังอัด 73 ksc ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนักและค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาด แต่ราคาต่อก้อนแพงกว่ามาก ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ 40% (P40C SUT Block) มีราคา 39.23 บาทต่อก้อน ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดมากที่สุด แต่ยังมีความเป็นไปได้ในการลดน้ำหนักต่อก้อนลง เนื่องจากยังมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาตามท้องตลาดค่อนข้างมาก

4.12.2 ไคอะตอมไมท์และเพอร์ไลต์ Type 2 ในการเป็นวัสดุปอซโซลาน

ผลรวมองค์ประกอบหลักทางเคมี SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_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 มีความอ่อนไหวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าไคอะตอมไมท์ 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°C (high pressure steam curing) โดยใช้ Autoclave อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 160 ถึง 210°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 ข้อมูลในการศึกษาหรืออ้างอิงในเรื่องนี้ยังมีไม่มากพอ 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 รังสิมาวงศ์. (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.
- 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) เป็นการพัฒนาสารซีเมนต์ชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบซิลิกา (silica, SiO_2) และอลูมินา (alumina, Al_2O_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 มีปฏิกิริยาเชิงซ้ำ 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 โดยจากลักษณะของไคอะตอมไมท์ที่มีน้ำหนักเบา ความพรุนสูง มีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้าจึงน่าที่จะปรับปรุงคุณสมบัติตรงประเด็นนี้ได้ อีกทั้งสามารถช่วยลดหน่วยน้ำหนักลงได้

5.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงความสามารถทำงานได้และการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เมื่อใช้ไคอะตอมไมท์เป็นวัสดุตั้งต้น โดยวิเคราะห์ในเชิงกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

5.3 การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

5.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

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

2) เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

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

4) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

5.3.2 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ไคอะตอมไมท์แทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 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 ₂ SiO ₃	NaOH
M-DE-0.5	400	600	66.67	133.33
M-DE-1.0	400	600	100.00	100.00
M-DE-1.5	400	600	120.00	80.00
M-DE-2.0	400	600	133.33	66.67
M-DE-2.5	400	600	142.86	57.14

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

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

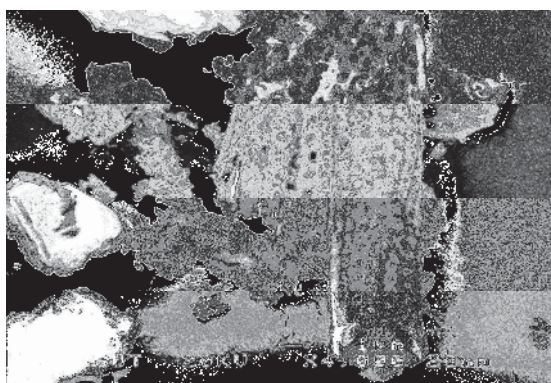
จากตารางที่ 5.3 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนาแน่นของไดอะตอมไมท์ มีค่าเท่ากับ 2.33 และ 490 กก/ม³ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยและทราย ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าประมาณ 3.32% และ 13.38% ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าประมาณ 49.64% และ 69.85% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 องค์ประกอบหลักทางเคมีของวัสดุประสาน

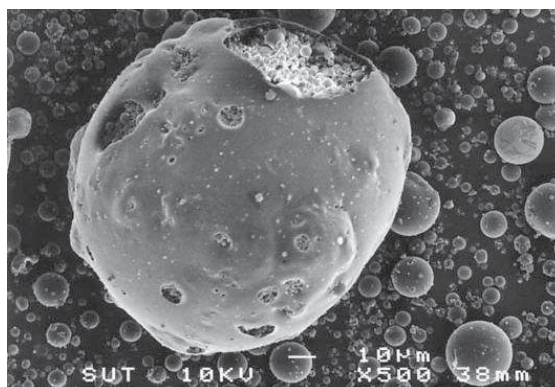
Chemicals	DE (%)	FA (%)
SiO ₂	59.30	43.87
Al ₂ O ₃	10.00	26.33
Fe ₂ O ₃	18.50	10.81
CaO	1.20	12.69
SO ₃	0.02	2.74
LOI	8.10	1.23

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

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



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

ตารางที่ 5.6 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา

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

ตารางที่ 5.7 ผลทดสอบเมื่อแปรผันความเข้มข้น NaOH

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

ตารางที่ 5.8 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

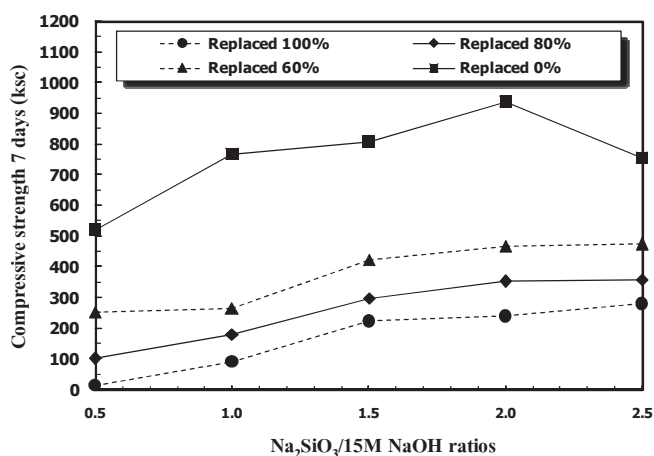
Symbol	Unit weight (kg/m^3)	Flow (%)	Compressive strength 7 days (ksc)
15M-DE100-0.5	2108	83	14.6
15M-DE80-0.5	2088	94	101.6
15M-DE60-0.5	2173	28	252.3
15M-DE0-0.5	2226	0	522.2
15M-DE100-1.0	2105	72	91.8
15M-DE80-1.0	2198	98	179.7
15M-DE60-1.0	2227	51	264.9
15M-DE0-1.0	2287	5	767.7
15M-DE100-1.5	2115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

ตารางที่ 5.9 ผลทดสอบเมื่อแปรผันอัตราส่วน Liquid alkaline/binder

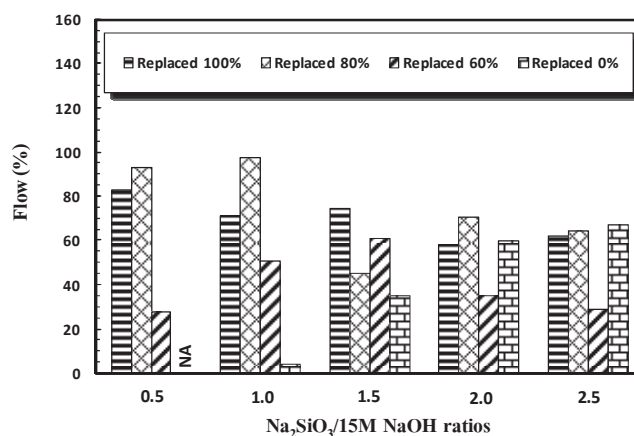
Symbol	Unit weight (kg/m ³)	Flow (%)	Compressive strength 7 days (ksc)
15M-DE100-1.5(0.4)	2107	16	235.0
15M-DE80-1.5(0.4*)	2183	9	243.1
15M-DE60-1.5(0.4)	2269	4	419.4
15M-DE0-1.5(0.4)	2283	2	800.8
15M-DE100-1.5(0.5)	2115	75	222.9
15M-DE80-1.5(0.5)	2163	86	299.3
15M-DE60-1.5(0.5)	2234	61	423.7
15M-DE0-1.5(0.5)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

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/ซม² และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 29-65% แต่ภาวะที่ดีที่สุดคืออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.0 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 468 กก/ซม² และค่าการไหลแผ่เท่ากับ 35%

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

ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 2.5 การแทนที่ด้วยไดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีค่าการไหลแผ่พอทำงานได้ เนื่องจากปริมาณของ Na_2SiO_3 ที่มากขึ้นทำให้ส่วนผสมมีความหนืดมากขึ้น แต่ค่ากำลังอัดดีขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของ Na_2SiO_3 ที่มากขึ้นด้วย

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

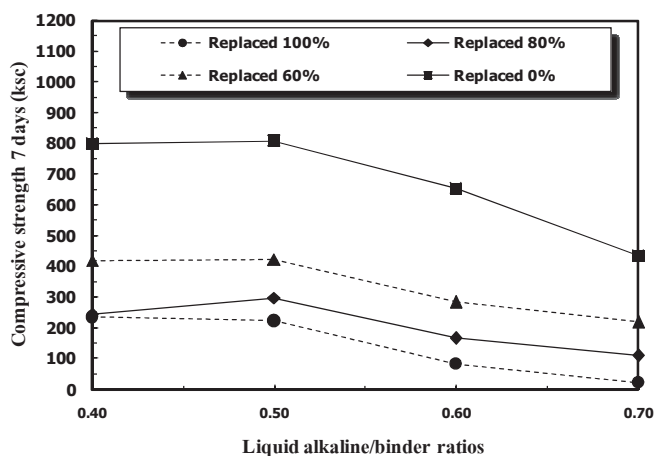
5.5.3 ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder

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)

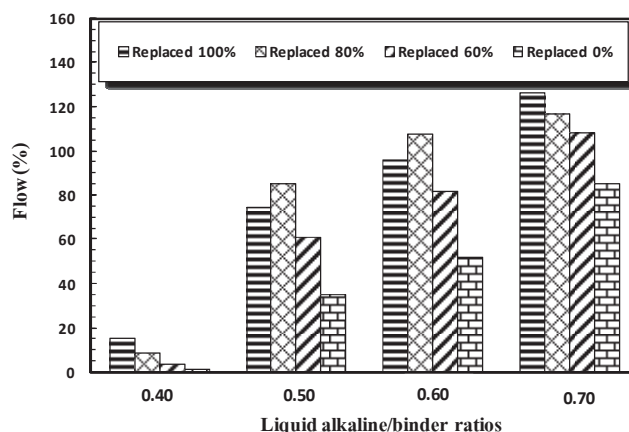
เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสม พบว่าที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 80 และ 60 เป็นภาวะที่ดีที่สุด มีกำลังอัดเท่ากับ 299-423 กก/ซม² และค่าการไหลแผ่ 61-86%

ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ส่วนผสมค่อนข้างแห้งมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่น้อยมาก อีกทั้งส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันและยากต่อการหล่อตัวอย่าง

ที่อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.70 ส่วนผสมมีความเหลวมากส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ที่สูง แต่เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดและงบประมาณ อัตราส่วนนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน



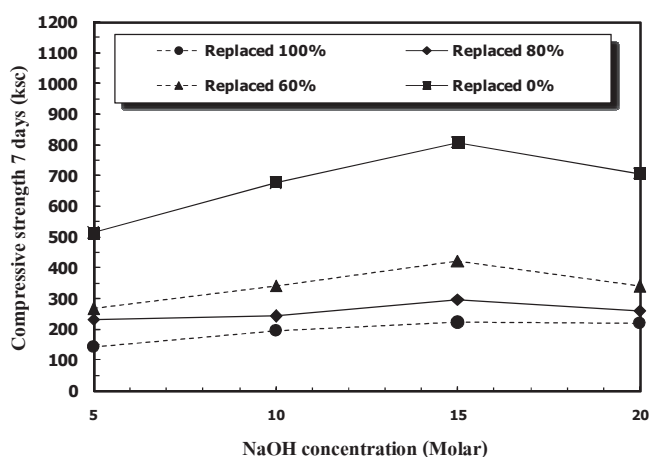
รูปที่ 5.5 ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ต่อกำลังอัด



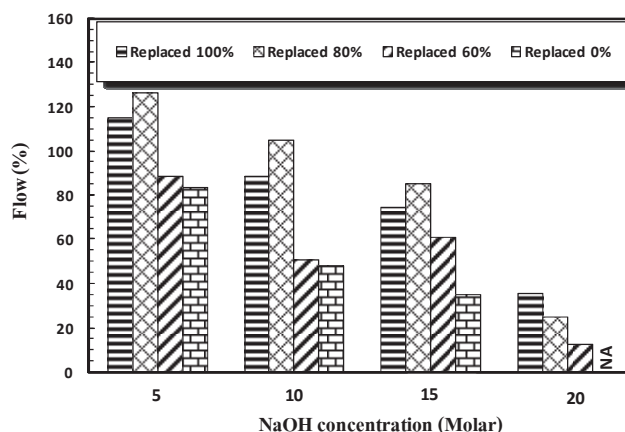
รูปที่ 5.6 ผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder ต่อการไหลแผ่

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/ซม² และค่าการไหลแผ่ 51-105% แต่ภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 15 โมลาร์ ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 423 กก/ซม² 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

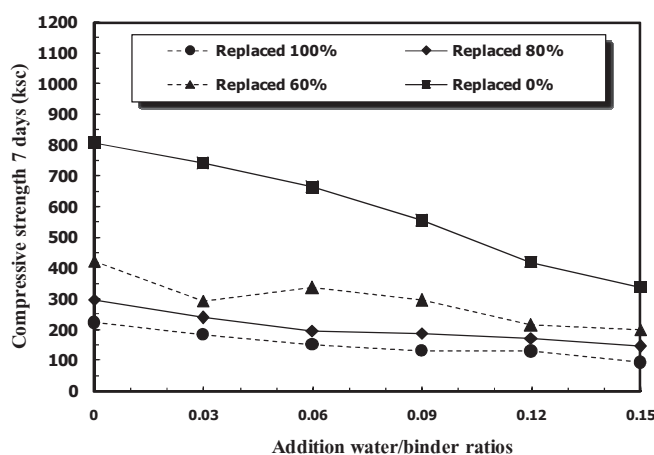
5.5.5 ผลกระทบของอัตราส่วน Addition water/binder

ผลการทดสอบที่แปรผันตามอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมและปริมาณการแทนที่ของไดอะตอมไมท์ส่งผลต่อกำลังอัดและความ สามารถทำงานได้ กล่าวคือความสามารถทำงานได้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ

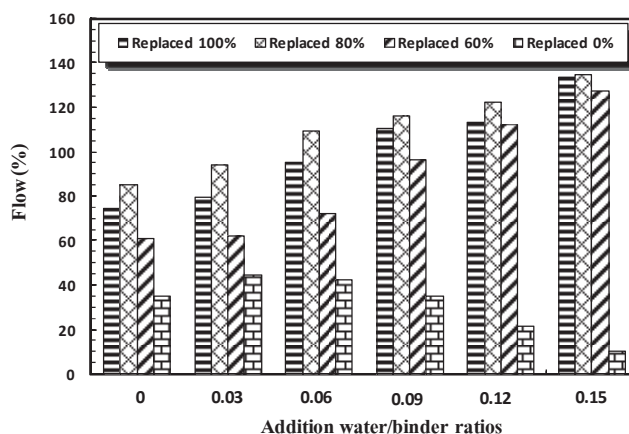
การเพิ่มปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น แต่กำลังอัดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัย (Chindaprasirt P. et al., 2007 และ Sathonsaowaphak A. et al, 2009)

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

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



รูปที่ 5.9 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อกำลังอัด

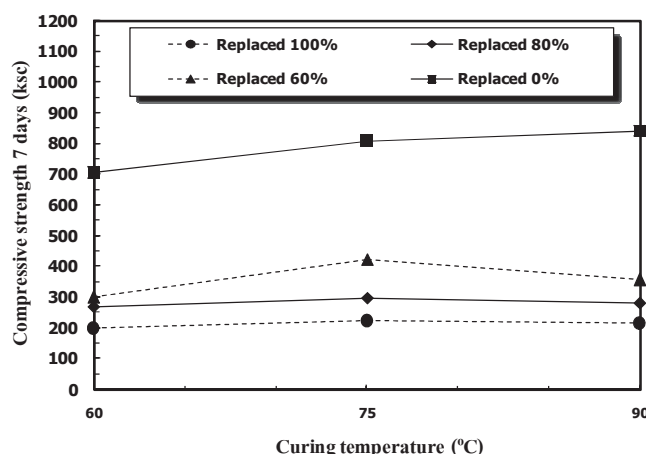


รูปที่ 5.10 ผลกระทบของการเพิ่มปริมาณน้ำต่อการไหลแผ่

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/ซม² และภาวะที่ดีที่สุดของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา คือ 75 องศาเซลเซียส ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 60 ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 423 กก/ซม²

ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ

ที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส การแทนที่ใดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีลักษณะการบวมตัวของตัวอย่างเกิดขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการแทนที่ใดอะตอมไมท์ทั้งหมดมีระยะการ

แข็งตัวที่ช้า ประกอบกับอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่สูงทำให้สูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วจึงเกิดการบวมตัว ส่วนการแทนที่เถ้าลอยทั้งหมดไม่เกิดการบวมตัวของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 12 เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยทั้งหมดมีระยะการแข็งตัวที่เร็ว ด้วยสาเหตุนี้ตัวอย่างจึงแข็งตัวก่อนที่นำไปเร่งปฏิกิริยาในตู้อบ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความชื้นน้อยกว่าการแทนที่ด้วยไคอะตอมไมท์ทั้งหมด



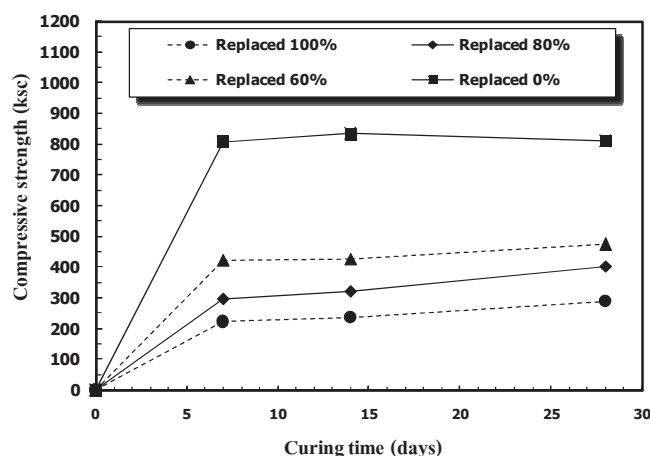
รูปที่ 5.12 ผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาต่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

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

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

5.5.7 ผลกระทบของเวลาการบ่มตัวอย่าง

การทดสอบที่แปรผันระยะเวลาการบ่มตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาการบ่มที่อายุ 7 วัน หลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากหรือไม่เลย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Hardjito D. et al., 2004, Wongpa J. et al., 2010 และ จักรพันธุ์ และคณะ, 2010)

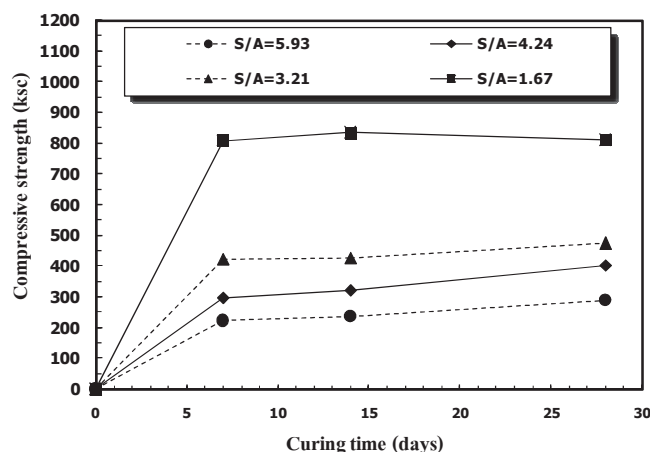


รูปที่ 5.13 ผลกระทบของระยะเวลาการบ่มต่อกำลังอัด

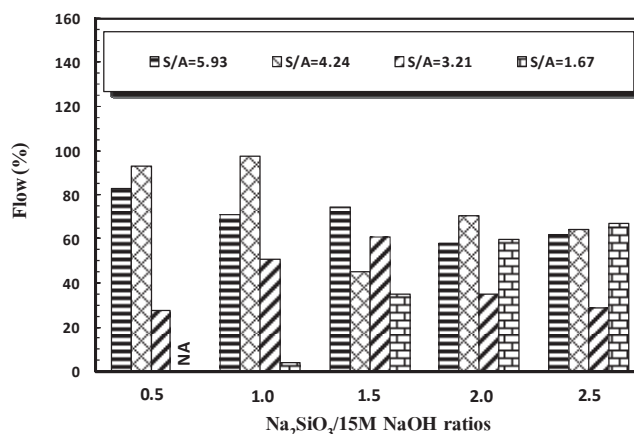
โดยสมมติฐานเบื้องต้นอาจเนื่องจากการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงทำให้มีการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็ว แต่อาจมีสารละลายบางส่วนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ทำให้ลักษณะโครงสร้างมีความพรุน อีกทั้งความหนาแน่นของโครงสร้างไม่ได้แตกต่างจากที่อายุการบ่ม 7 วัน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มีลักษณะของขนาดโพรงข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

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

การพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.14 พบว่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีการเลยในช่วงอายุปลาย (จักรพันธ์ และคณะ, 2010) และทุกส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันมีกำลังอัดที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงถึงอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันส่งผลกระทบท่อกำลังอัดอย่างมาก



รูปที่ 5.14 ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อกำลังอัด



รูปที่ 5.15 ผลกระทบของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ต่อการไหลแผ่น

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

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

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

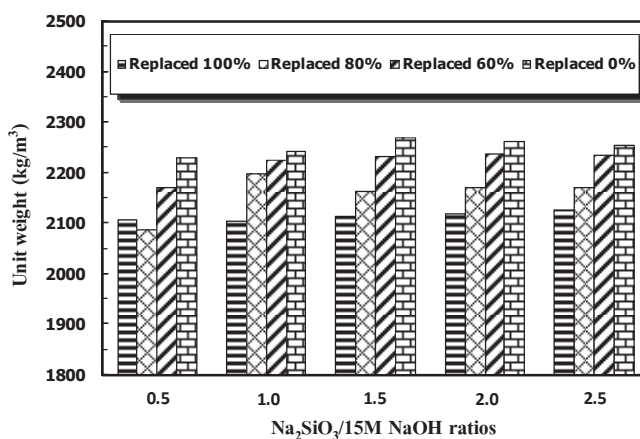
นอกจากนี้จากงานวิจัยของจักรพันธุ์ และคณะ (2010) ได้ให้ข้อสรุปไว้ว่าอัตราส่วน Liquid alkaline /binder ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไม่มากนัก แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงด้านกำลังอัด ขณะที่อัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ไม่ได้ส่งผลให้เห็นอย่างชัดเจนด้านกำลัง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า

ปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นอัตราส่วน Liquid alkaline /binder มากกว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

รูปที่ 5.15 แสดงถึงค่าการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่สูงขึ้นมีแนวโน้มที่ช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ดีขึ้น แต่กำลังอัดลดลง ดังนั้นการนำไปใช้งานต้องเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

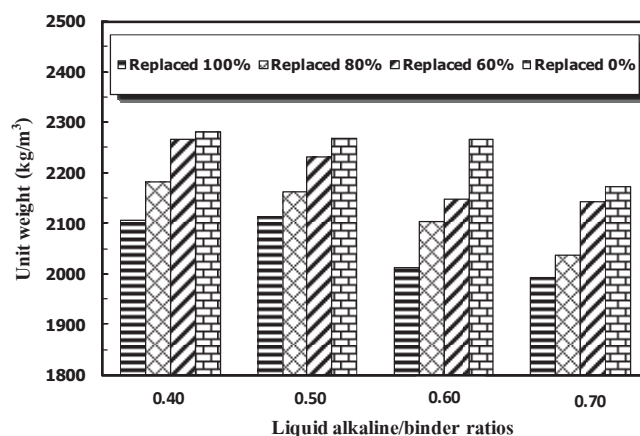
5.5.9 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ค่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่แปรผันตามผลกระทบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 16-20 พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ เมื่อแทนที่ไดอะตอมไมท์ในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เทียบกับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยทั้งหมด นอกจากนั้นยังพบอีกว่าปริมาณของเหลวที่มากขึ้นในส่วนผสมทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักลดลงได้ อีกทั้งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา



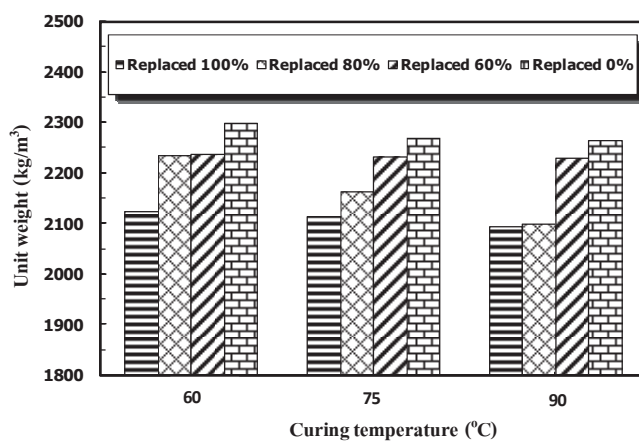
รูปที่ 5.16 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

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

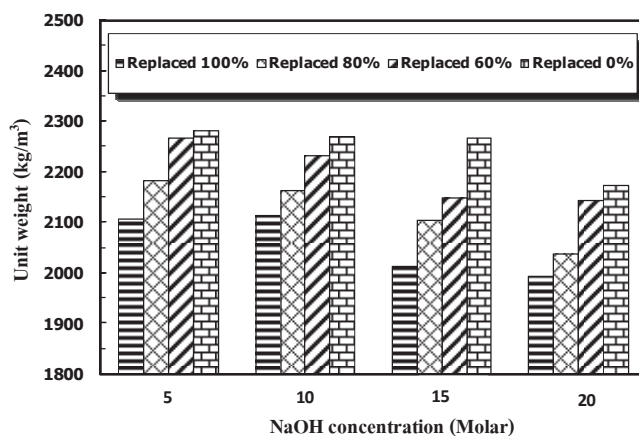


รูปที่ 17 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

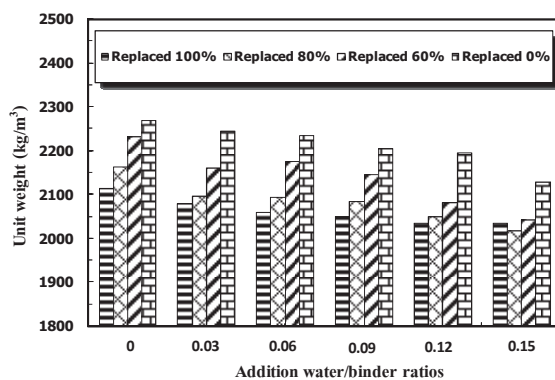
จากผลกระทบของอัตราส่วน Liquid alkaline/binder



รูปที่ 5.18 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 5.19 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของความเข้มข้น NaOH



รูปที่ 5.20 หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
จากผลกระทบของอัตราส่วน Addition water/binder

5.6 สรุปผลการทดสอบ

5.1 ค่าลึงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยไคอะตอมไมท์ทั้งหมดมีแนวโน้มต้องการปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตมากกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

5.2 การแทนที่ไคอะตอมไมท์ในเถ้าลอยร้อยละ 60 และ 80 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.5-2.5 Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50 ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 10-15 โมลาร์ ให้ค่าค่าลึงอัดและการไหลแผ่ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน ซึ่งมีค่าค่าลึงอัดและการไหลแผ่เท่ากับ 243-474 กก/ชม² และ 29-105% ตามลำดับ

5.3 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดคือ 75 องศาเซลเซียส

5.4 อัตราส่วน Liquid alkaline/binder ที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้แต่ค่าลึงลดลง และอัตราส่วน Liquid alkaline/binder เท่ากับ 0.50-0.60 มีความเหมาะสมที่สุดทั้งค่าค่าลึงอัดและการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยมีค่าค่าลึงอัดและการไหลแผ่ระหว่าง 284-423 กก/ชม² และ 61-108% ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50

5.5 การแทนที่ด้วยไคอะตอมไมท์มีแนวโน้มที่ต้องการระยะเวลาการบ่มมากขึ้น เพื่อให้มีการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นเนื่องจากมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่ช้ากว่าเถ้าลอย และค่าลึงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาการบ่มมากขึ้น

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

5.7 เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี (2005). ไคอะตอมไมท์ [ออนไลน์]

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

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

ธนากร ภูเงินคำ ชีรวัดน์ สิ้นสิริ และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี (2010). การศึกษาค่าลึงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากซีไอโอไลต์ธรรมชาติ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6. อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี. MAT 119-124

เชียรศักดิ์ กลับประสิทธิ์ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ปริญญา จินดาประเสริฐ และสมิตร ส่งพิริยะกิจ (2008). ผลกระทบของสัดส่วนซิลิกาต่อลูนินาต่อค่าลึงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้า

- แกลบ-เปลือกไม้ผสมเข้ากัน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3. โรงแรมลองบีชการ์เดนโฮเทล แอนด์ สปา อำเภอยะนิง จังหวัดชลบุรี. MAT 24-29
- บุรฉัตร จัทรวิระ และณรงศักดิ์ มากุล (2004). สมรรถนะของเรซินเบาในปูนฉาบฉนวนกันความร้อนมวลเบา. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2. จังหวัดอุดรธานี. MAT 23-32.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ (2004). สารจีโอโพลิเมอร์ วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ประเทศไทย
- ประมวล ไชยละคร และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2007). การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมเรซินเบา. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 3. จังหวัดอุบลราชธานี. MAT 37-40.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C 109/C 109M-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.02.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C 618-08a, Standard Test Method for Coal fly ash and raw or Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.08a.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C 1437-07, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia, Vol. 04.08a.
- Bakharev T., (2006). Thermal behavior of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. Cement and Concrete Research ., 36(6) : 1134-1147
- Chaipanich A., Nochaiya T., (2010). Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes. J Therm Anal Calorim., 99 : 487-493.
- Chaisena A. et al., (2004). Effect of thermal and acid treatments on some physic-chemical properties of Lampang diatomite. Journal Science Technology., 11 : 289-299.
- Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C., Sinsiri T., (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. Cement&Concrete Coposites., 27: 425-428
- Chindaprasirt P., Chareerat T., Sirivivatnanon V., (2007). Workability and strength of coarse fly ash geopolymer. Cement&Concrete Coposites., 29 : 224-229
- Davidovits, J., (1982). Mineral polymers and methods of making them. United states Patent no.4349386.

- Davidovits, J., (1994). Properties of geopolymer cements. Proceedings of the first international conference on alkaline cements and concrete., Kiev state Technical University., 1 : 131-149
- Davidovits J., (1999). Chemistry of geopolymetric systems, Terminology. Proceedingd : 2nd International Conference on Geopolymer. France:Paris : 9-40.
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV., (2004). On the development of fly ash based geopolymer concrete. ACI Master J., 101(6) : 467-472
- Hardjito D.,Chua Chung Cheak., Carrie Ho Lee Ing., (2008). Strength and setting times of low calcium fly ash based geopolymer mortar. Modern Applied Science., 2(4) : 3-11
- Jaarsveld J.G.S.van., Deventer J.S.J.van., Lukey G.C., (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymer. Chemical Engineering Journal., 89 : 63-73.
- Lertkositpong T., Pimraksa K., Chindaprasirt P., (2009). Synthesis of lightweight geopolymer materials from diatomaceous earth. Annual Concrete Conference 5, Nakhonratsima ., MAT 96-101 (In Thai)
- Nguyen Van Chanh et al., (2008). Geopolymer concrete. The 3rd ACF International Conference ACF/VCA 2008 : 235-241
- Rattanasak U., Chindaprasirt P., (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. Minerals Engineering., 22 : 1073-1078.
- Sathonsaowaphak A., Chindaprasirt P., Primraksa K., (2009). Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. Journal of Hazardous Materials., 168(1) : 44-50
- Songpiriyakij S., Kubprasit T., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P., (2010). Compressive strength and degree of reaction of bio-mass and fly ash based geopolymer. Construction and Building Materials., 24 : 236-240
- Wongkeo W., Chaipanich A., (2010). Compressive strength, microstructure and analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume. Materials Science and Engineering A., 527 : 3676-3684.
- Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. (2010). Compressive strength and modulus of elastic and water permeability of inorganic polymer concrete. Materials and Design., 24 :236-240
- Zuhua Z., Xiao Y., Huajun Z., Yue C. (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. Applied Clay Science., 43(2) : 218-22

บทที่ 6

การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนที่ใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลต์เป็นวัสดุยึดประสาน

6.1 บทนำ

ของเสียอันตรายที่ถูกปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่นน้ำทิ้งจากโรงงาน ถึงแม้ว่าจะผ่านการบำบัดกระบวนการต่าง ๆ เพื่อลดความเข้มข้นของสารพิษแล้ว แต่ก็ยังคงมีกากตะกอนตกค้าง ซึ่งจะถูกนำมาตากแห้งเพื่อกำจัดขั้นสุดท้ายต่อไป การกำจัดกากตะกอนในลักษณะนี้ไม่ปลอดภัยต่อผู้เก็บและขนย้าย เนื่องจากโลหะหนักบางชนิดอยู่ในสภาพที่ไม่คงตัว ทำให้มีโอกาสแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดปัญหาต่อไป เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จำเป็นต้องมีกระบวนการลดความเป็นพิษ หรือกักเก็บกากสารพิษอันตรายไม่ให้แพร่กระจายความเป็นพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยง่าย ซึ่งการหล่อแข็ง (Solidification) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอันตรายประเภท สารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้ตัวยึดประสานชนิดต่าง ๆ ตรึงของเสียอันตราย ซึ่งสารอันตรายจะถูกเก็บไว้ในโครงสร้างของตัวยึดประสานด้วยพันธะเคมีและทำให้สารอันตรายอยู่ในสภาพคงตัว ลดโอกาสการแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมภายหลังจากการแข็งตัวแล้ว ตัวยึดประสานที่ใช้มากได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย ซิลิกา กากตะกอนจากเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ซึ่งการหล่อแข็งทำให้สามารถจัดเก็บก้อนหล่อแข็งได้ง่ายและสะดวกต่อการนำไปกำจัดโดยวิธีฝังกลบอย่างปลอดภัย (Cheng and Bishop, 1992).

ซีโอไลต์ (Zeolite) ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ลักษณะเด่นของซีโอไลต์ คือ โครงสร้างที่เป็นรูพรุนอย่างเป็นระเบียบของซีโอไลต์ ที่ประกอบด้วยช่องว่าง และการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก ซึ่งมีแคทไอออน และโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่ภายใน ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนอื่นได้ นอกจากนี้โลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว โปรท แคดเมียม ซิลเวอร์ไอออนก็สามารถแลกเปลี่ยนได้เช่นเดียวกัน (Feng et al., 2000; Feng and Peng, 2005; Quanlin and Naiqian, 2005; Poon et al., 1999) จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงนำมาสู่แนวความคิดในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำซีโอไลต์มาใช้ในการเก็บกักหรือกรองโลหะหนักจากกากของเสียของโรงงานอุตสาหกรรม

6.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาความสามารถในการเก็บกักสารปนเปื้อนโลหะหนักและความสามารถในการรับกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์ตามอัตราส่วนที่กำหนด

6.3 วิธีการศึกษา

6.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (มาตรฐาน ASTM C150)
2. ซีโอไลต์สังเคราะห์ ประเภท Sodium Aluminum Silicate
3. ซีโอไลต์ธรรมชาติ ประเภท Clinoptilolite
4. กากตะกอนของเสียจากโรงชุบนิเกิล
5. น้ำประปา

6.3.2 การเตรียมวัสดุ

นำกากตะกอนของเสียจากโรงชุบนิเกิลมาอบให้แห้งจากนั้นทำการบดให้มีขนาดเล็ก ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100

6.3.3 อัตราส่วนผสม

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถูกแทนที่ด้วยซีโอไลต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักและผสมกากตะกอนของเสียอัตราส่วนร้อยละ 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

6.3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย

OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ZS, ZN หมายถึง ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติ ตามลำดับ

20ZS, 40ZS, 20ZN, 40ZN หมายถึง การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก

S หมายถึง กากตะกอนของเสีย

40S, 50S, 60S หมายถึง การผสมกากตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

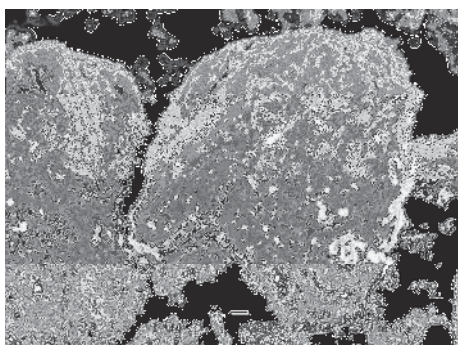
6.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

6.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

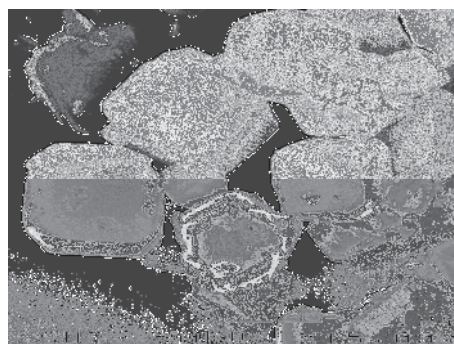
ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซีโอไลท์สังเคราะห์, ซีโอไลท์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสีย ซึ่งพบว่า ซีโอไลท์สังเคราะห์, ซีโอไลท์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสีย มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และจากการนำตัวอย่างไปทำการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซีโอไลท์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสีย มีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม และมีเนื้อแน่น ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ก., ก. และ ง. ตามลำดับ และเมื่อพิจารณารูปที่ 6.1 ข. พบว่า ซีโอไลท์สังเคราะห์ มีพื้นผิวเรียบ รูปร่างมีลักษณะเป็น 6 เหลี่ยม ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ OPC, ZS, ZN และ S เท่ากับ 14.12, 2.51, 16.17 และ 34.81 ไมครอน ตามลำดับ โดยกราฟแสดงการกระจายขนาดของ OPC, ZS, ZN และ S ด้วยเครื่อง Mastersizer แสดงในรูปที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 ความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ย

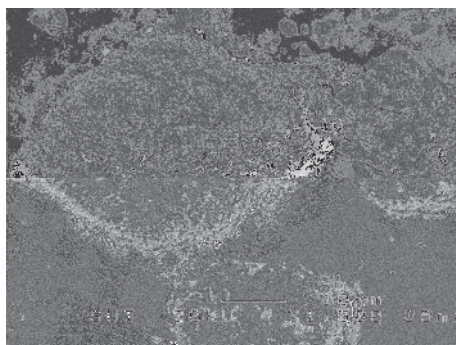
Sample	Specific Gravity	Mean Particle Size d_{50} (micron)
OPC	3.15	14.12
ZS	1.87	2.51
ZN	2.09	16.17
S	2.14	34.81



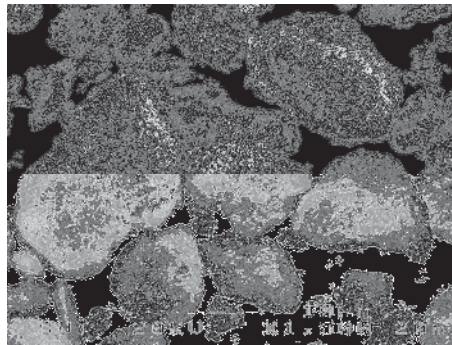
ก. ภาพถ่ายขยาย 4,000 เท่าของ OPC



ข. ภาพถ่ายขยาย 15,000 เท่าของ ZS

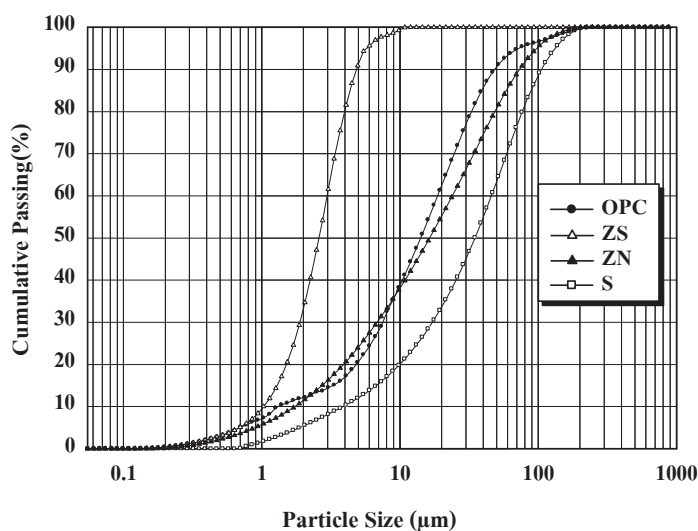


ค. ภาพถ่ายขยาย 1,500 เท่าของ ZN



ง. ภาพถ่ายขยาย 1,500 เท่าของ S

รูปที่ 6.1 ภาพถ่ายขยายของวัสดุโดย SEM



รูปที่ 6.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุ

6.4.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ซีโอไลต์สังเคราะห์, ซีโอไลต์ธรรมชาติ และ กากตะกอนของเสียด้วยเครื่อง XRF พบว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์ และซีโอไลต์ธรรมชาติมีออกไซด์ของซิลิกา และ อลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนกากตะกอนของเสียมีออกไซด์ของโลหะหนัก คือ นิกเกิล, ทองแดง, สังกะสี และโครเมียม นอกจากนี้ยังมีออกไซด์ของแคลเซียมด้วย

ตารางที่ 6.2 องค์ประกอบเคมีของ OPC, ZS, ZN และ S

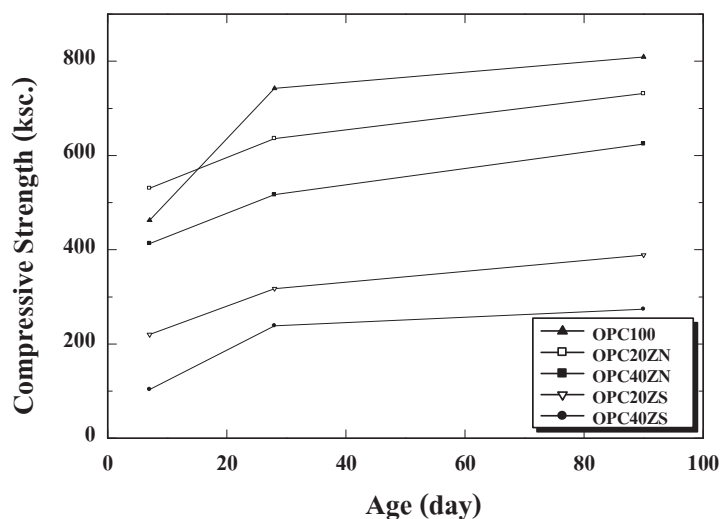
Chemical Composition (%)	OPC	ZS	ZN	S
SiO ₂	19.85	65.30	75.32	5.53
Al ₂ O ₃	4.49	26.18	10.28	3.78
Fe ₂ O ₃	3.56	0.03	2.66	-
CaO	66.96	0.12	3.95	25.32
MgO	1.36	0.08	1.20	-
K ₂ O	0.34	2.64	4.29	-
Na ₂ O	-	1.87	0.89	-
NiO	-	-	-	40.88
CuO	-	-	-	13.08
ZnO	-	-	-	10.33
CrO	-	-	-	0.64
LOI	0.98	5.65	2.30	0.44

6.4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของก้อนตัวอย่าง

ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่า เมื่อมีการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดของก้อนตัวอย่างจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนซีเมนต์เพสต์ควบคุม และการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติจะมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ทุกอายุของก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 กำลังอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์

Sample	Compressive Strength (ksc.) - (Percentag, %)		
	7 Days	28 Days	90 Days
OPC100	462.5 (100)	742.7 (100)	809.2 (100)
OPC20ZS	220.2 (47.6)	317.2 (42.7)	389.0 (48.1)
OPC40ZS	103.6 (22.4)	238.6 (32.1)	273.8 (33.8)
OPC20ZN	530.5 (114.7)	635.9 (85.6)	731.4 (90.4)
OPC40ZN	413.3 (89.4)	516.8 (69.6)	624.6 (77.2)



รูปที่ 6.3 กำลังอัดของก้อนซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 6.4 แสดงค่ากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียในอัตราร้อยละ 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน พบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มตัวในแต่ละอัตราส่วนผสม และจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม เนื่องจากโลหะหนักเข้ายับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Jong, 1990) และกากตะกอนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็งมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมกากตะกอนของเสียบางอัตราส่วนมีกำลังอัดต่ำกว่าค่ามาตรฐานความสามารถในการรับแรงอัดของการหล่อแข็งของเสียเพื่อการฝังกลบ ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานจะต้องมากกว่า 10 ksc. (Wiles, 1990)

ตารางที่ 6.4 กำลังอัดของก้อนหล่อแข็ง

Sample	Compressive Strength (ksc.)		
	7 Days	28 Days	90 Days
OPC40S	8.8	13.3	15.1
OPC50S	5.8	9.7	11.8
OPC60S	5.4	8.4	10.5
OPC20ZS40S	20.6	136.7	164.0
OPC20ZS50S	13.2	49.8	108.6
OPC20ZS60S	8.0	13.6	19.7
OPC40ZS40S	2.5	60.6	177.2
OPC40ZS50S	2.6	42.6	139.0
OPC40ZS60S	1.3	4.9	33.4
OPC20ZN40S	441.9	584.0	664.7
OPC20ZN50S	363.7	500.5	594.8
OPC20ZN60S	311.3	420.9	513.4
OPC40ZN40S	198.6	368.5	442.9
OPC40ZN50S	155.0	321.2	401.3
OPC40ZN60S	123.0	264.9	345.1

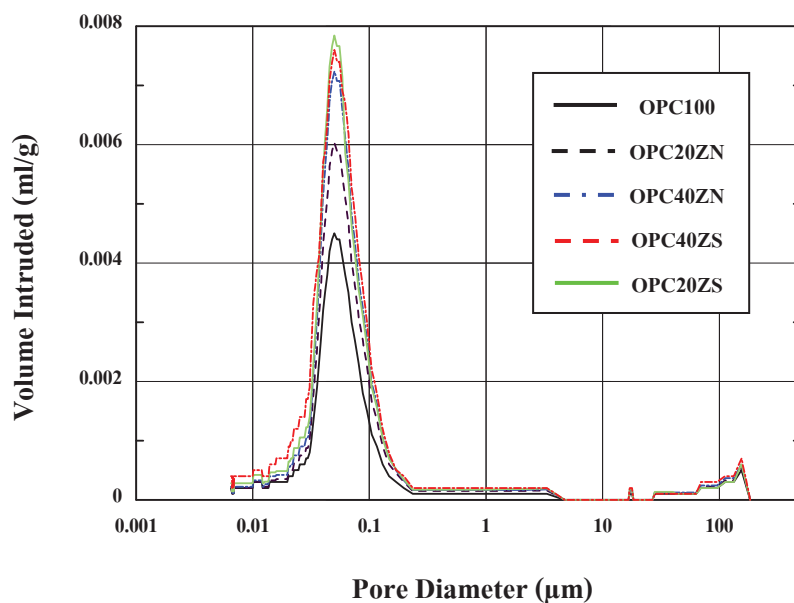
6.4.4 ปริมาตรและการกระจายตัวของโพรงของก้อนหล่อแข็ง

ตารางที่ 6.5 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย, และพื้นที่โพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่าปริมาณโพรงทั้งหมด (Total Porosity) และพื้นที่โพรงทั้งหมด (Total Pore Area) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ซีโอไลต์สังเคราะห์และซีโอไลต์ธรรมชาติในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของ ซีโอไลต์มีรูพรุนหรือโพรงขนาดเล็กเชื่อมต่อกัน ส่งผลให้ปริมาณโพรง และพื้นที่โพรงสูงขึ้น แต่ถ้ามพิจารณขนาดเฉลี่ยของโพรง (Average Pore) พบว่ามีขนาดเล็กลง เมื่อมีการแทนที่ซีโอไลต์สังเคราะห์ในปริมาณที่มากขึ้น เป็นเพราะว่าขนาดอนุภาคของซีโอไลต์มีขนาดเล็กมาก (ขนาดเฉลี่ยประมาณ 2.51 ไมครอน) เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 14.12 ไมครอน ขนาดที่เล็กของซีโอไลต์ไปแทรกตัวระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้ช่องว่างลดลง ส่วนการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมี

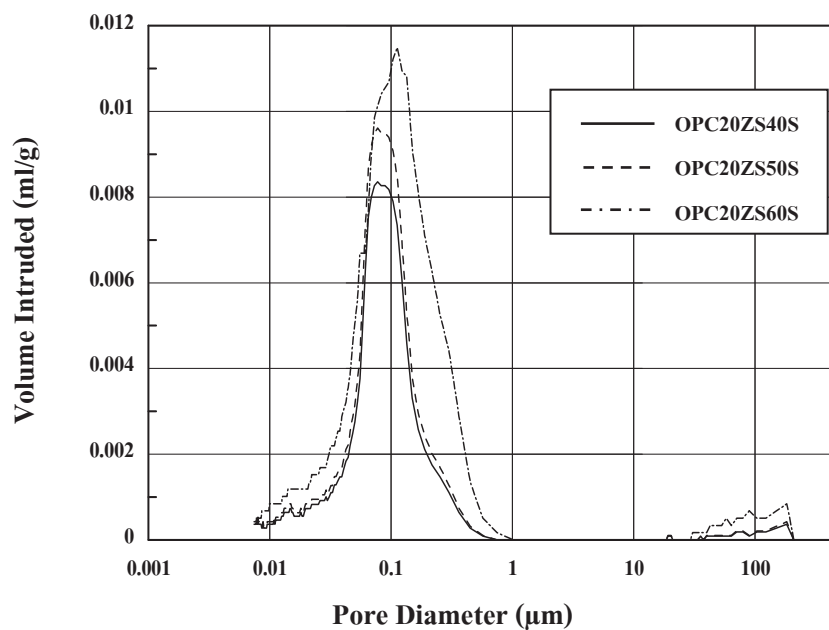
ขนาดเฉลี่ยของโพรงใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากขนาดอนุภาคของซีโอไลท์ธรรมชาติกับปูนซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6.5 แสดงปริมาณของโพรงชนิดต่างๆ, ขนาดโพรงเฉลี่ย, และพื้นที่โพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์ ที่อายุ 28 วัน

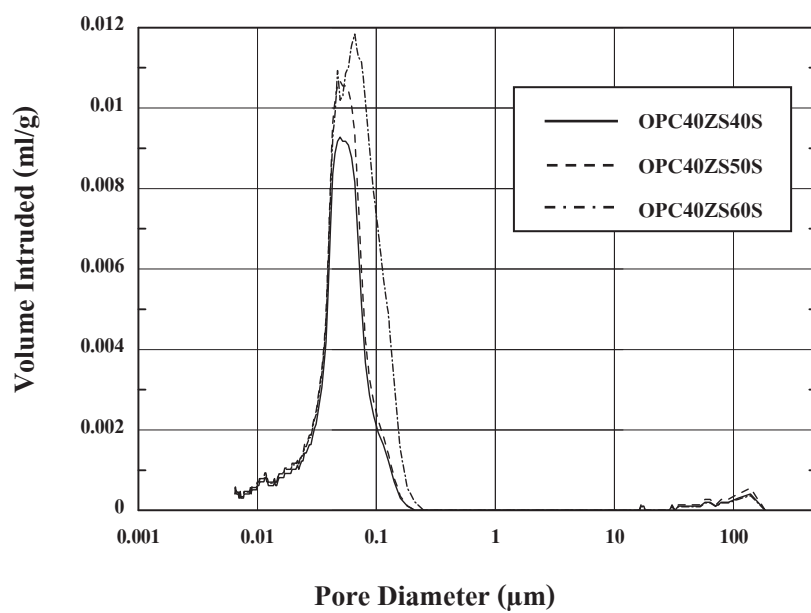
	OPC100	OPC20ZS	OPC40ZS	OPC20ZN	OPC40ZN
Air Void (%) (> 1.0 μm)	6.36	8.37	10.75	7.11	9.24
Large Capillary (%) (0.05-1.0 μm)	8.12	9.72	6.54	12.32	11.41
Medium Capillary (%) (0.01-0.05 μm)	5.31	11.75	23.30	6.19	10.52
Total Porosity (%)	19.79	29.84	40.59	25.62	31.17
Average Pore (nm)	47.11	44.00	40.25	46.68	45.99
Total Pore Area (m^2/g)	8.80	17.14	25.90	13.84	21.57



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงของซีเมนต์เพสต์ อายุ 28 วัน

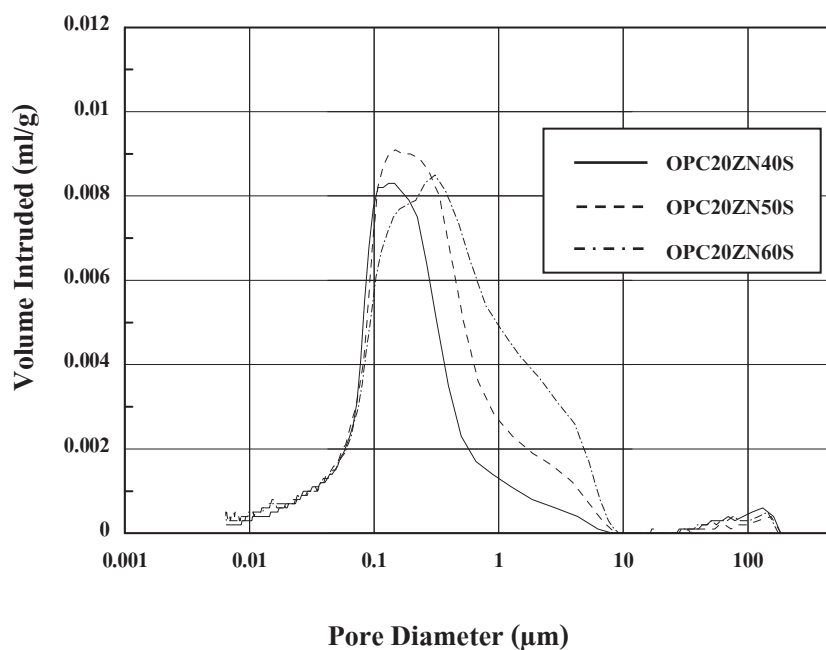


ก. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ร้อยละ 20

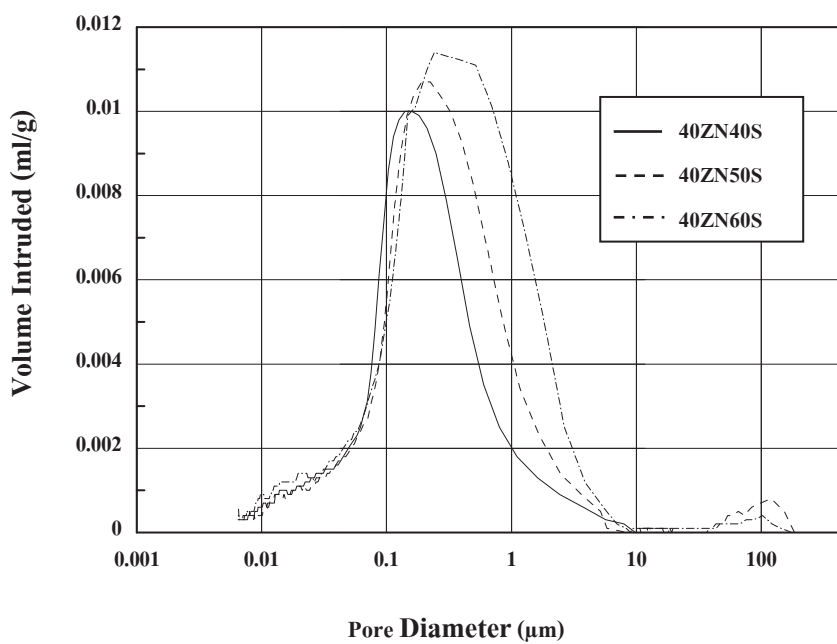


ข. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ ร้อยละ 40

รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงของก้อนหล่อแข็ง อายุ 28 วัน



ค. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 20

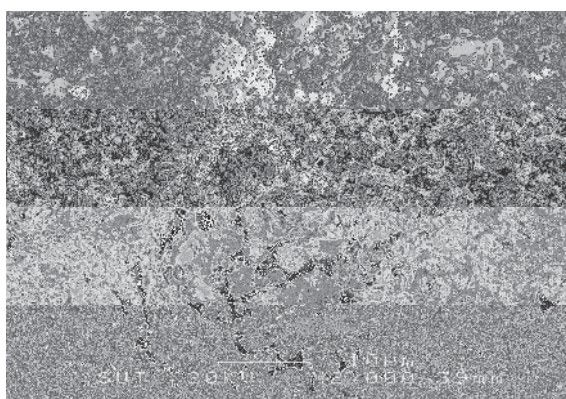


ง. ก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ ร้อยละ 40

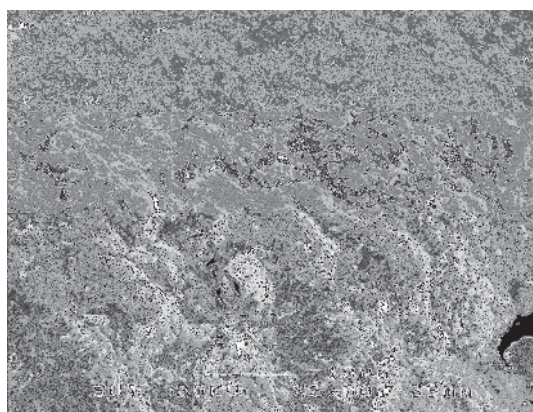
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงของก้อนหล่อแข็ง อายุ 28 วัน (ต่อ)

6.4.5 การวิเคราะห์ Fracture surface ของก้อนหล่อแข็ง

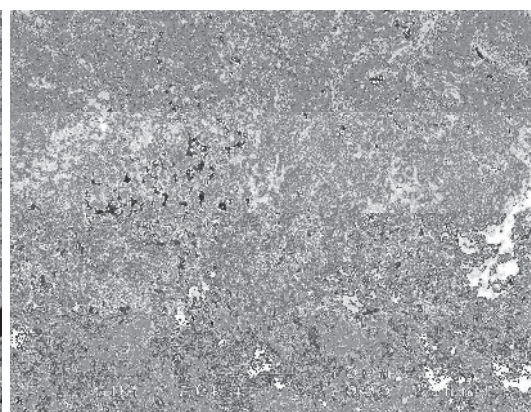
จากรูปที่ 6.7 พบว่าเพสต์ OPC100 มีความพรุนและช่องว่างมาก เมื่อพิจารณาเพสต์ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีโอไลต์ พบว่าเพสต์มีความแน่นขึ้น สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.4 กล่าวคือเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ ทำให้ขนาดโพรงลดลง ทำให้เพสต์แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อ่อนนุ่มของ ซีโอไลต์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะในเพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ในปริมาณมาก ซึ่งทำหน้าที่อุดช่องว่างในเพสต์ ส่งผลให้โครงสร้างเพสต์แน่นขึ้น



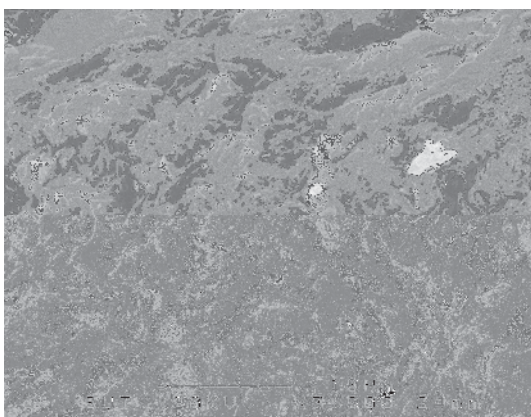
ก. ภาพขยายของ OPC100



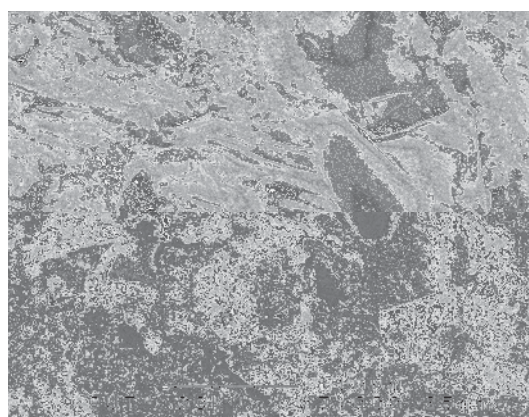
ข. ภาพขยายของ OPC20ZS



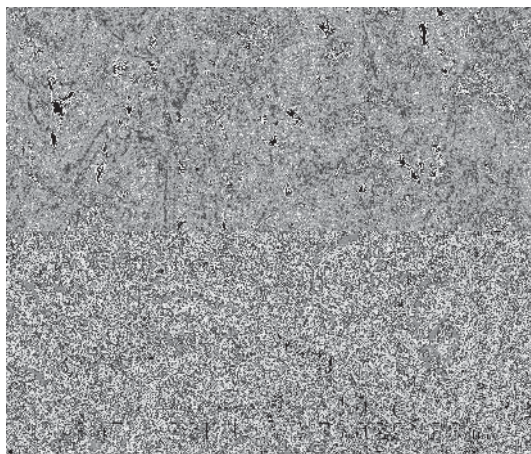
ค. ภาพขยายของ OPC40ZS



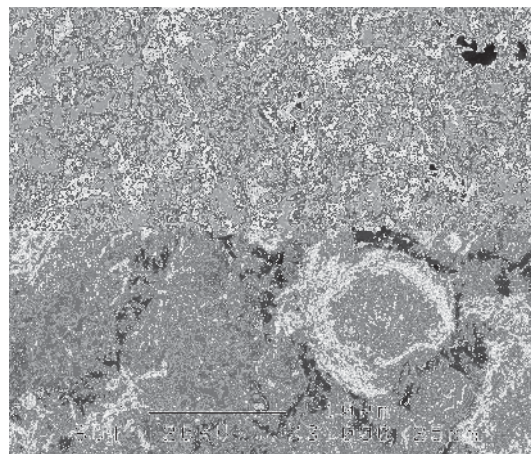
ง. ภาพขยายของ OPC20ZN



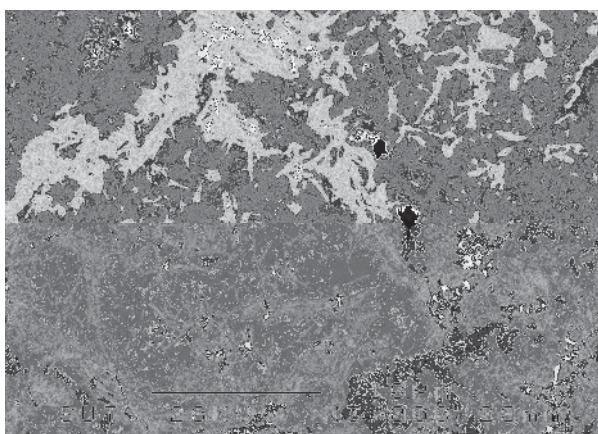
จ. ภาพขยายของ OPC40ZN



ฉ. ภาพขยายของ OPC40S



ช. ภาพขยายของ OPC50S



ซ. ภาพขยายของ OPC60S

รูปที่ 6.6 ภาพถ่ายขยาย Fracture Surface ที่อายุ 28 วัน

6.4.6 การวิเคราะห์การชะละลายของก้อนหล่อแข็ง

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยวิธีการชะละลาย พบว่าประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของก้อนหล่อแข็งที่มีเฉพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสานจะมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติ และพบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนของกากตะกอนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการลดการชะละลายจะลดลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติ จะพบว่าการแทนที่ด้วย ซีโอไลท์ธรรมชาติจะมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายได้ดีกว่า ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 แสดงประสิทธิภาพในการลดการชะละลายโลหะหนักของก้อนหล่อแข็งอายุ 28 วัน

ก้อนตัวอย่าง	ประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย (%)			
	Ni	Cu	Zn	Cr
OPC40S	63.21	61.64	68.31	82.21
OPC50S	55.72	58.47	60.09	78.42
OPC60S	51.43	53.71	61.11	78.10
OPC20ZS40S	83.54	80.85	86.42	100.0
OPC20ZS50S	81.93	83.31	84.61	98.81
OPC20ZS60S	77.22	76.63	85.72	97.33
OPC40ZS40S	82.13	83.80	84.2	99.73
OPC40ZS50S	81.02	87.87	79.51	99.34
OPC40ZS60S	74.35	70.02	82.10	99.33
OPC20ZN40S	92.56	91.67	94.11	100.0
OPC20ZN50S	92.72	91.43	94.33	100.0
OPC20ZN60S	91.40	91.34	92.83	100.0
OPC40ZN40S	90.84	90.31	94.0	100.0
OPC40ZN50S	90.22	91.11	94.24	100.0
OPC40ZN60S	90.41	90.15	90.06	100.0

6.5 สรุป

จากผลการศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลท์เป็นวัสดุยึดประสานสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์และซีโอไลท์ธรรมชาติ ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดสูงขึ้น แต่ขนาดเฉลี่ยของโพรงลดลง ส่งผลให้เพสต์มีโครงสร้างที่แน่นขึ้น อาจเป็นผลของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานบางส่วน นอกจากนี้อนุภาคของซีโอไลท์บางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะในเพสต์ที่มีการแทนที่ซีโอไลท์ในปริมาณมากทำหน้าที่อุดช่องว่างในเพสต์
2. กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งลดลงเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนในส่วนผสม โดยเปรียบเทียบกับเพสต์ที่ผสมปูนซีเมนต์ล้วน
3. ความสามารถในการชะละลายของก้อนหล่อแข็งมีค่ามากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอน และพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลท์ธรรมชาติจะมีกำลังอัดมากกว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลท์สังเคราะห์ และมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายได้ดีกว่าด้วย
4. ความสัมพันธ์ของปริมาตรโพรง กำลังรับแรงอัดและประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย คือ ปริมาตรโพรงมากจะรับกำลังอัดได้น้อยและประสิทธิภาพในการลดการชะละลายก็จะต่ำ

6.6 เอกสารอ้างอิง

- Cheng KY, Bishop P. 1992. Metal distribution in solidified/stabilized waste forms after leaching J Hazardous Waste & Hazardous Materials; 9: 163-171
- Feng, N.-Q., Xing, F. and Leng, F.-G. 2000. Zeolite Ceramsite Cellular Concrete. Magazine of Concrete Research. 52 (2): 117-122.
- Feng, N.-Q. and Peng, G.-F. 2005. Applications of Natural Zeolite to Construction and Building Materials in China. Construction and Building Matyerials, 19: 579-584.
- Jong, H.Y., 1990, Solidification of laboratory waste by using ordinary portland cement andrice husk ash cement, Master of Engineering Thesis, Environmental Program, AIT, Bangkok, 78 Pages.
- Quanlin, N. and Naiqian, F. 2005 Effect of Modified Zeolite on Expansion of Alkaline Silica Reaction. Cement and Concrete Research, 35 (9): 1784-1788.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C. and Lin, Z. S. 1999. A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Paste. Construction and Building Materials. 13: 427-432.
- Wiles, C.C. 1990. Solidification and stabilization technology, U.S.EPA, US.

บทที่ 7

โครงสร้างจุลภาคของเพสต์ผสมเถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรม

7.1 บทนำ

การผลิตปูนซีเมนต์จะต้องใช้ความร้อนเผาวัตถุดิบให้กลายเป็นเม็ดปูนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,450 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตออกสู่ชั้นบรรยากาศ โดยการผลิตปูนซีเมนต์ 1,000 กิโลกรัม จะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาประมาณ 850 กิโลกรัม (Hendrik, G., et al., 2003) นักวิจัยแก้ปัญหาโดยใช้วัสดุจากเถ้าจากอุตสาหกรรมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เถ้าจากอุตสาหกรรมเป็นวัสดุผสมเพิ่ม เช่น เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าขานอ้อย วัสดุเหล่านี้ได้มีนักวิจัยศึกษาพบว่าทำให้ความต้านทานของเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตเพิ่มขึ้น (Chindapasirt, P. et al., 2008; Chusilp, N., et al., 2009 and Tangchirapat, W., et al., 2007)

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการนำกากของผลปาล์ม น้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้าพบว่า ในประเทศไทยเถ้าปาล์มน้ำมันถึง 100,000 ตันต่อปี (Chindapasirt, P. et al., 2007) ปัจจุบันเถ้าปาล์มน้ำมันยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์และจะเป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อมในอนาคต องค์ประกอบหลักเถ้าปาล์มน้ำมันคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) (Tangchirapat, W., et al., 2007 and Chindapasirt, P., et al., 2008) นักวิจัยได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีต Tangchirapat (2007) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีและเมื่อนำมาบดสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ร้อยละ 20-30 Sata et al. (2004) พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อบดให้มีความละเอียดสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง อีกประการหนึ่งยังช่วยในการปรับปรุงกำลังอัดและการซึมผ่านของคอนกรีต (Chindapasirt, P., et al., 2007) นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยการต้านทานซัลเฟต (Tangchirapat, W., et al., 2009) และการแทรกซึมของคลอไรด์ (Chindapasirt, P. et al., 2008)

ซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินาไดออกไซด์ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมโมโนซัลเฟตอลูมินेट (C_2ASH_8) และแคลเซียมอลูมินेटไฮเดรต (C_4AH_3) นักวิจัยได้ศึกษาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์แทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานโดยโดยวิธีการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetry Analysis) พบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ลดลงด้วยการ

แทนวัสดุปอชโซลานที่เพิ่มขึ้นและความละเอียด (Chindaprasirt, P., et al., 2007) Barbhuiya et al. (2009) พบว่าการลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลาน นอกจากนี้การใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงส่งผลคอนกรีตช่วยต้านทานซัลเฟต ขณะที่การศึกษาปฏิกิริยาปอชโซลาน Chaipanich and Nochiya (2010) ใช้อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ (Derivative Thermogravimetric) หาปฏิกิริยาและการอธิบายการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของเพสต์ พบว่าเอททริงไกต์, แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต, แคลเซียมโมโนซัลเฟตออลูมิเนตและแอมโมเนียมคาร์บอเนต พบพืชของปฏิกิริยาดังกล่าว และการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ผลรวมของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH), แคลเซียมโมโนซัลเฟตออลูมิเนต (C_2ASH_8) และแคลเซียมออลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) เพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น

ปริมาตรโพรงและโครงสร้างโพรงของคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญต่อการซึมผ่านและความทนทาน โครงสร้างในซีเมนต์เพสต์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท (Chindaprasirt, P., et al., 2007 and Mindress, S, and Young, J.F., 1981) ประกอบไปด้วยโพรงเจล (Gel pore) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 0.5–10 นาโนเมตร ส่งผลต่อการหดตัวและการล้า โพรงคาปิลารีสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ขนาด คือโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่ (Large capillary) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 50 นาโนเมตร–10 ไมครอน ส่งผลต่อกำลังอัด การซึมผ่าน และโพรงคาปิลารีขนาดกลาง (Medium capillary) มีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 10–50 นาโนเมตร ส่งผลต่อกำลังอัด การซึมผ่าน การหดตัว ส่วนโพรงอากาศมีขนาดโพรงอยู่ระหว่าง 10 ไมครอน – 100 มิลลิเมตร มีผลต่อกำลัง Khatib and Wild (1996) ศึกษาเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยดินขาวร้อยละ 5, 10 และ 15 พบว่าเพสต์มีการปรับโครงสร้างของโพรง Chindraprasirt et al (2005) ใช้เกลือยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนพบว่าเพสต์ผสมด้วยเกลือยทำให้ขนาดโพรงเฉลี่ยต่ำกว่าเพสต์ควบคุม นอกจากนี้ Halamickova et al (1995) ศึกษาการซึมผ่านน้ำผ่านคอนกรีตและแทรกซึมของคลอไรด์พบว่าขนาดโพรงวิกฤตเป็นปัจจัยต่อการซึมผ่านน้ำและคลอไรด์

การศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่เป็นการศึกษาด้านกายภาพเป็นส่วนใหญ่ เช่น กำลังอัด การต้านทานซัลเฟต และแทรกซึมของคลอไรด์ อย่างไรก็ตามการศึกษาลักษณะละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์ผสมยังไม่มีการศึกษา เพื่อให้เข้าใจผลของละเอียดของเถ้าปาล์มต่อโครงสร้างจุลภาคของเพสต์และสามารถนำเถ้าปาล์มที่ปูนซีเมนต์บางส่วนนอกจากนี้ลดปริมาณพื้นที่ในการฝังกลบ

7.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

ศึกษาผลของความละเอียดของเก้าปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเก้าปาล์มน้ำมัน ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีความไม่เป็นผลึกของเก้าปาล์มน้ำมัน ผลของความละเอียดต่อกำลังอัด ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโครงสร้างโพรงของเพสต์

7.3 วิธีการศึกษา

7.3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตาม ASTM C150
2. เก้าปาล์มน้ำมัน ใช้เก้าปาล์มน้ำมันจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม นำเก้าปาล์มน้ำมันมา ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และอนุภาคที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หลังจากนั้นนำเก้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียด 2 ขนาด คือขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ เรียกว่า GIPOA และอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์เรียกว่า G2POA
3. น้ำ ใช้น้ำประปา

7.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเก้าปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย การขนาดเฉลี่ยและการกระจายของอนุภาคโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบ เลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer) ความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 188 องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้วิธี (X-Ray Fluorescence) และทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลมตามมาตรฐาน ASTM C 204

7.3.3 อัตราส่วนผสมและการทดสอบกำลังอัดของเพสต์

การหล่อซีเมนต์เพสต์ใช้เก้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเก้าปาล์มน้ำมันแสดงตารางที่ 1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 ทุกอัตราส่วนผสม หล่อตัวอย่างเพสต์ขนาด 50x50x50 มม³ ตามมาตรฐาน ASTM C 109 และถอดแบบเพสต์ที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำและทดสอบกำลังอัดที่ อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 7.1 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

เพสต์	OPC	G1POA	G2POA
OPC	100	-	-
20G1POA	80	20	-
40G1POA	60	40	-
20G2POA	80	-	20
40G2POA	60	-	40

7.4 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

7.4.1 การทดสอบเพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน

การวิเคราะห์เพสต์โดยใช้เทคนิคทางความร้อน โดยใช้เครื่องมือ Simultaneous Thermal analysis เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์หนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ นำตัวอย่างที่หุุดปฏิกิริยาไฮเดรชันบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 หลังจากนั้นนำตัวอย่างทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Simultaneous Thermal analysis วิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1000 องศาเซลเซียส อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที

7.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างโพรงของเพสต์

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

7.4.3 การถ่ายภาพขยายของเฟสค์

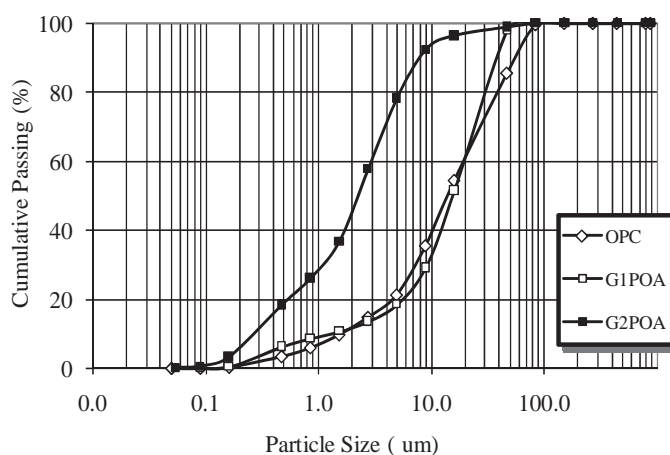
การถ่ายภาพขยายของเฟสค์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) นำตัวอย่างที่ยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นเล็กน้อย ที่มีขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร เคลือบตัวอย่างด้วยเครื่อง Iron sputtering device หลังจากนั้นนำตัวอย่างถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

7.5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

7.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

รูปที่ 7.1 กระจายอนุภาคของวัสดุ พบว่าการกระจายอนุภาคของวัสดุออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์อนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 ไมครอนและอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 2 ไมครอน ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ พบว่า ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3.14 แก๊ปาล์มน้ำมัน GIPOA ขนาดอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ และ G2POA ขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์เท่า 2.36 และ 2.48 ตามลำดับ ส่วนความละเอียดของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3,600 ซม²/ก ขณะที่แก๊ปาล์มน้ำมัน GIPOA และ G2POA เท่ากับ 2,340 และ 18,000 ซม²/ก

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุแสดงในตารางที่ 7.3 พบว่าองค์หลักของแก๊ปาล์มคือซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 54.0 และ 55.7 สำหรับ GIPOA และ G2POA ตามลำดับ ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาของ GIPOA และ G2POA เท่ากับร้อยละ 3.7 และ 4.7 ตามลำดับ ซึ่งผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ต่ำกว่าร้อยละ 70 สำหรับชั้นคุณภาพ N ตามมาตรฐาน ASTM C618 สำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ GIPOA และ G2POA แสดงในรูปที่ 2 พบองค์ประกอบหลักคือ ควอตซ์ (α -quartz) และองค์ประกอบรอง คริสโตบาไลต์ (Cristobalite) สอดคล้องกับการศึกษาของ (Chandara, C., et al., 2010) การวิเคราะห์ปริมาณการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยวิธีรีทเวลด (Rietveld method) พบว่าปริมาณความไม่บริสุทธิ์ของ GIPOA และ G2POA เท่ากับร้อยละ 70.2 และ 67.2 ตามลำดับ นอกจากนี้ ควอตซ์และ คริสโตบาไลต์ เท่ากับ ร้อยละ 65, 35 และ 73, 27 สำหรับ GIPOA และ G2POA ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความไม่บริสุทธิ์ของแก๊ปาล์มน้ำมันประมาณร้อยละ 67-70



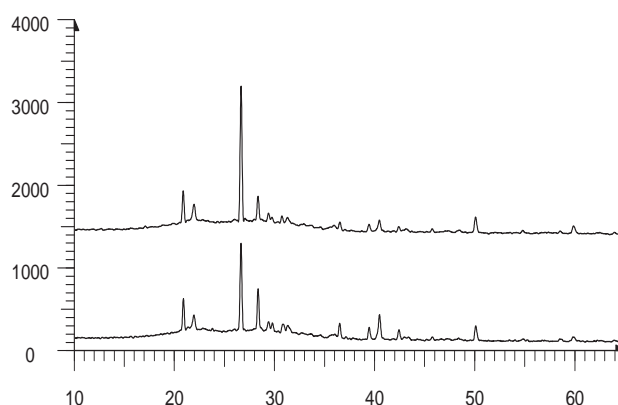
รูปที่ 7.1 กระจายอนุภาคของวัสดุ

ตารางที่ 7.2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ความ ถ่วงจำเพาะ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย , d_{50}	พื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีของเบ ลน (cm^2/g)
OPC	3.14	14.6	3,600
G1POA	2.36	15.6	6,700
G2POA	2.48	2.1	14,900

ตารางที่ 7.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	G1POA	G2POA
Silicon dioxide (SiO_2)	20.8	54.0	55.7
Aluminum oxide (Al_2O_3)	4.7	0.9	0.9
Iron oxide (Fe_2O_3)	3.4	2.0	2.0
Calcium oxide (CaO)	65.3	12.9	12.5
Magnesium oxide (MgO)	-	4.9	5.1
Sodium oxide (Na_2O)	0.1	1.0	1.0
Potassium oxide (K_2O)	0.4	13.5	11.9
Sulfur trioxide (SO_3)	2.7	4.0	2.9
Loss on ignition (LOI)	0.9	3.7	4.7
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	56.9	58.6



รูปที่ 7.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ G1POA และ G2POA

7.5.2 กำลังอัดของเพสต์

กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงในตารางที่ 7.4 ที่อายุ 7 วัน พบว่ากำลังของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าต่ำกว่าซีเมนต์ควบคุม สำหรับเพสต์ผสม G1POA ด้วยอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ กำลังอัดที่อายุ 28 วันของเพสต์ 20G1POA และ 40G1POA เท่ากับ 72.0 และ 61.5 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็นร้อยละ 96 และ 82 ตามลำดับ เมื่ออายุ 90 วัน พบว่าเพสต์ดังกล่าวมีกำลังอัดเท่ากับ 102.0 และ 88.1 เมกะปาสกาลหรือคิดเป็นร้อยละ 103 และ 89 ตามลำดับ

เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูง พบว่ากำลังอัดของกำลังอัดของ 20G2POA และ 40G2POA ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 77.3, 66.5 และ 109.6, 94.1 เมกะปาสกาล หรือคิดเป็นร้อยละ 103, 89 และ 111, 95 ตามลำดับ ค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของเพสต์เกิดขึ้นเนื่องจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ปฏิกิริยาปอซโซลานและผลของการอัดแน่นจากอนุภาคที่เล็กของเถ้าปาล์มน้ำมันเข้าอุดช่องว่างระหว่างเพสต์และทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้ดี (Isaia, G.C., et al., 2003 and Mehta, P.K. and Aietcin, P.-C.C., 1990) และ เนื่องจาก Nucleation effect เมื่อแทนที่ด้วยอนุภาคที่เล็กทำให้เกิดการกระจายตัวในซีเมนต์ทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยา (Gopalan, M.K., 1993 and Montgomery, D.G., et al., 1981) ดังนั้นทำให้เพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวและแน่นซึ่งเป็นการปรับปรุงกำลังอัดของเพสต์

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นได้ว่ากำลังอัดของเพสต์ที่ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมีความละเอียดสูงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีและสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ถึงร้อยละ 20 นอกจากนี้กำลังอัดของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ด้วยอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับร้อยละ 96 และ 103 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.4 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

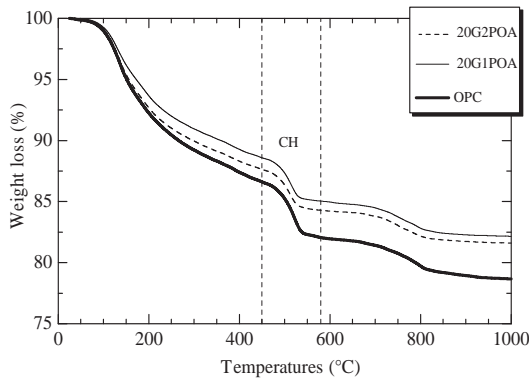
เพสต์	กำลังอัด (MPa) ร้อยละของกำลังอัด			
	7 days	28 days	60 days	90 days
OPC	53.0-100	75.0-100	84.6-100	99.1-100
20G1POA	48.3-91	72.0-96	84.6-100	102.0-103
40G1POA	41.0-77	61.5-82	72.8-86	88.1-89
20G2POA	51.9-98	77.3-103	92.2-109	109.6-111
40G2POA	44.0-83	66.5-89	78.6-93	94.1-95

7.5.3 การวิเคราะห์เพสต์โดยเทคนิคทางความร้อน

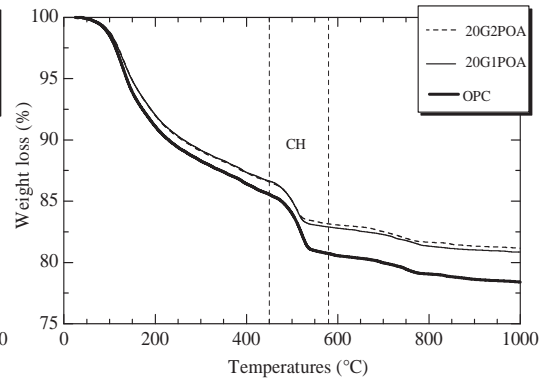
1. ปฏิกริยาของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

การวิเคราะห์เทอร์โมแกรมการสูญเสียน้ำหนักของเพสต์เมื่อได้รับความร้อนแสดงในรูปที่ 7.3 และ 7.4 พบการสูญเสียน้ำหนักแบ่งเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นการสลายตัวเนื่องจากเอททริงไกด์ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 105 – 450 °C (Bai, J., et al., 2003) ช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 450 – 580 °C (El-Jazairi, B. and Illston, J.M., 1977) และช่วงที่สามเป็นการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 580 – 1000 °C (El-Jazairi, B. and Illston, J.M., 1977)

อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์และเพสต์แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 แสดงในรูปที่ 7.5 และ 7.6 ที่อายุ 28 และ 90 วัน พบอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของ C-S-H, C_2ASH_8 , $Ca(OH)_2$, และ $CaCO_3$ ตำแหน่งที่อุณหภูมิ 126-134 °C, 188-194°C, 488-520 °C และ 741-797 °C ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ (Chaipanich, A. and Nochaiya, T., 2010) พบว่า DTG พีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ลดลงด้วยการแทนที่ในปริมาณเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันและด้วยอายุการบ่ม เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดทำให้ DTG พีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงเร็วกว่าที่มีอนุภาคนาขนาดใหญ่ การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้พีคของ C-S-H, C_2ASH_8 เพิ่มขึ้นด้วยอายุการบ่ม เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้ได้ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น (Tangchirapat, W., et al., 2009 and Sata, V., et al., 2010) ทำให้เพสต์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น

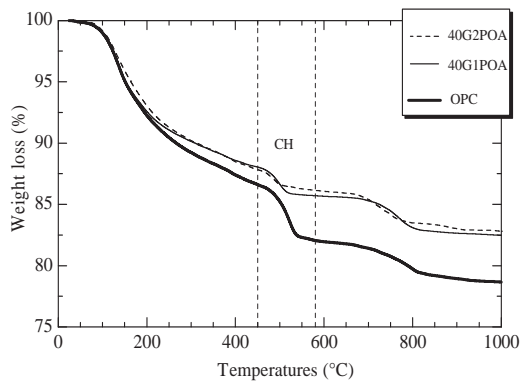


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

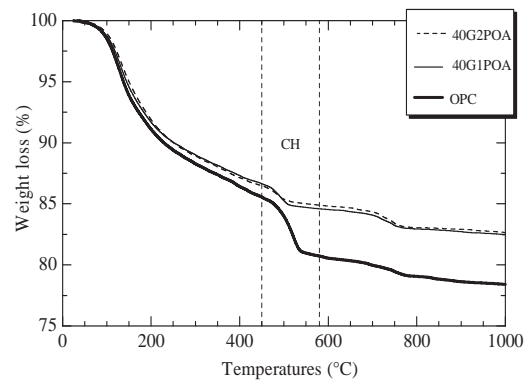


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 7.3 เปอร์เซ็นการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20

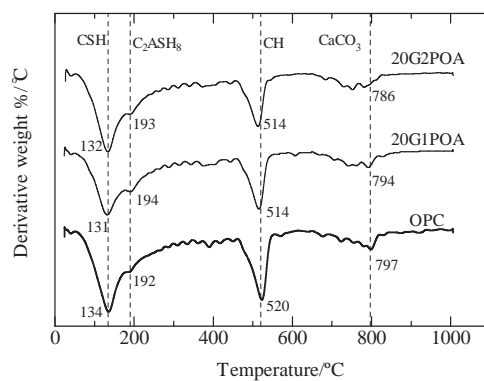


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

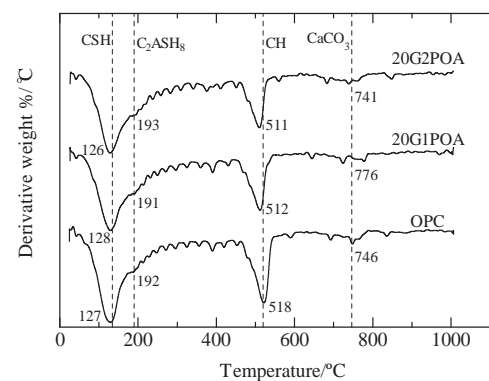


(ข) อายุการบ่ม 90

รูปที่ 7.4 เปอร์เซ็นการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40

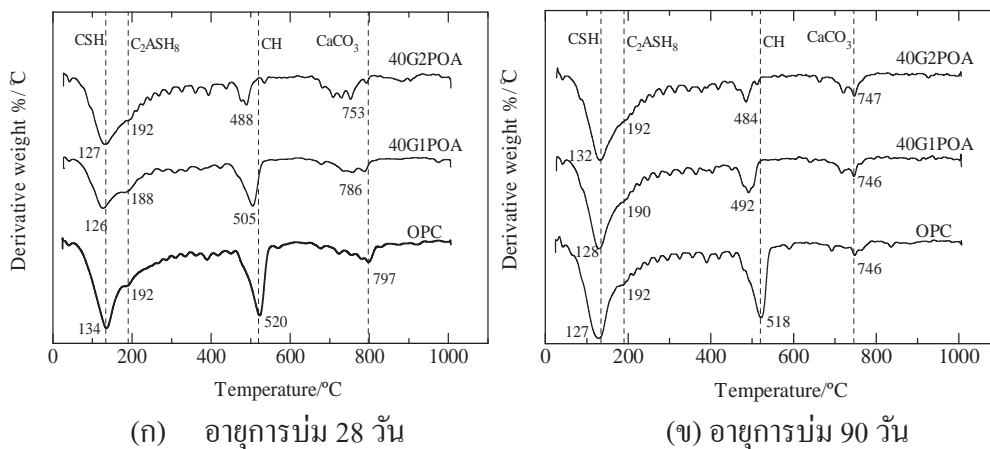


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน



(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

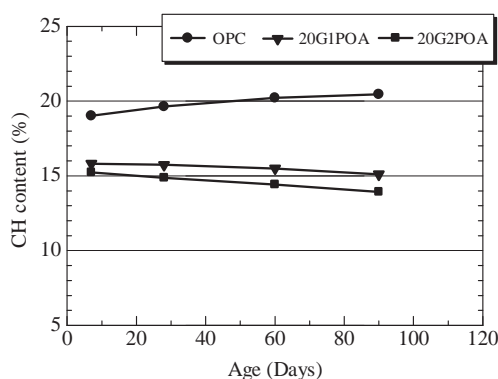
รูปที่ 7.5 อัตราการสูญเสียน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20



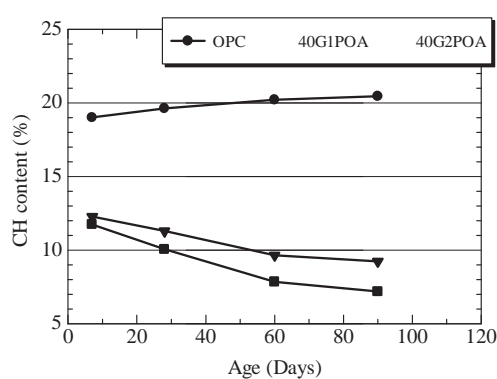
รูปที่ 7.6 อัตราการสูญเสียน้ำหนักที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40

2. ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ที่อายุการบ่มต่างๆแสดงในรูปที่ 7.7 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ OPC ที่อายุ 7, 28, 60, 90 วัน เท่ากับร้อยละ 19.02, 19.64, 20.22 และ 20.46 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เนื่องจากไฮดรเจนที่เพิ่มขึ้น ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ 20G1POA และ 20G2POA มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 15.10 - 15.82 และ 13.93 - 15.24 หรือลดลงประมาณร้อยละ 5 และ 9 หลังจากอายุการบ่ม 7 วัน ตามลำดับ การลดลงของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นการบ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับเพสต์ที่ผสมด้วย G2POA ซึ่งมีความละเอียดสูงทำให้การปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่ำกว่าเพสต์ที่ผสมด้วย G1POA เนื่องจากความละเอียดของอนุภาคและซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปริมาณร้อยละ 40 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ 40G1POA และ 40G2POA มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9.24–12.18 และ 7.19–11.75 หรือลดลงประมาณร้อยละ 24 และ 39 หลังจากอายุ 7 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการแทนที่ในปริมาณที่มากทำให้การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าการแทนที่ในปริมาณที่ต่ำ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้มีพื้นที่ผิวมากส่งผลให้การทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วและมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นการแทนที่เพิ่มขึ้นด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Chindaprasirt, P., et al., 2007)



(ก) การแทนที่ร้อยละ 20



(ข) การแทนที่ร้อยละ 40

รูปที่ 7.7 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเพสต์

7.5.4 โครงสร้างโพรงของเพสต์

1. ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์

ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 7.5 ปริมาตรโพรงของเพสต์ OPC ที่อายุการบ่ม 7, 28, 60 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 22.8, 20.1, 17.4 และ 16.6 ตามลำดับ ขณะที่เพสต์ 20G1POA และ 40G1POA มีปริมาตรโพรงสูงกว่าเพสต์ OPC ทุกช่วงอายุ สามารถสรุปได้ว่าปริมาตรโพรงของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยอนุภาคโกล์เคียนปูนซีเมนต์สูงกว่าเพสต์ OPC สำหรับเพสต์ G2POA ที่ผสมด้วยเถ้าปาล์มอนุภาคที่มีความละเอียดสูง ที่อายุการบ่ม 7 วัน เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 มีปริมาตรโพรงต่ำกว่าเพสต์ OPC ทุกช่วงอายุการบ่ม นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 40 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าเพสต์มีปริมาตรโพรงที่อายุการบ่ม 60 วันเท่ากับร้อยละ 17.3 ต่ำกว่าเพสต์ OPC ซึ่งร้อยละ 17.4 เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มมีความละเอียดทำให้มีความเร็วในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน อีกสาเหตุหนึ่งเนื่องจากอนุภาคที่เล็กทำให้อุดแทรกในช่องว่างของเพสต์ ดังนั้นทำให้โครงสร้างโพรงของเพสต์มีความแน่น (Chindaprasirt, P., et al., 2007)

ตารางที่ 7.5 ปริมาตรโพรงของเพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

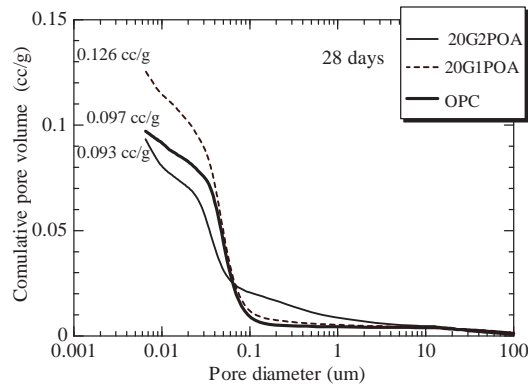
เพสต์	Total porosity (%)			
	7 days	28 days	60 days	90 days
OPC	22.8	20.1	17.4	16.6
20G1POA	26.3	21.7	18.4	17.4
40G1POA	30.2	27.5	19.3	18.5
20G2POA	20.5	17.0	15.5	11.4
40G2POA	23.8	19.7	17.3	15.6

2. ผลความละเอียดของเถาปลาล์มน้ำมันต่อการกระจายตัวโพรงของเพสต์

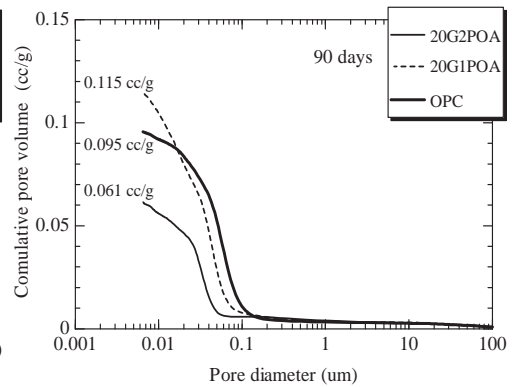
ปริมาตรโพรงสะสมของเพสต์แทนที่ด้วยเถาปลาล์มน้ำมันร้อยละ 20 และ 40 แสดงในรูปที่ 7.8 และ 7.9 พบว่าเพสต์ 20G2POA มีปริมาตรโพรงต่ำสุด เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าความละเอียดของเถาปลาล์มน้ำมันของ G2POA ความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี อนุภาคที่มีความละเอียดสูง สามารถเข้าไปอุดช่องว่างของเพสต์ ส่งผลให้ปริมาตรความพรุนลดลงและเพสต์มีความแน่นขึ้น ส่วนเพสต์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันร้อยละ 40 ที่อายุ 28 วันมีปริมาตรโพรงสะสมสูงกว่าเพสต์ OPC แต่เมื่ออายุ 90 วันปริมาตรโพรงสะสมของเพสต์ 40G2POA ต่ำกว่าเพสต์ OPC เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นขยายเข้าไปในช่องว่างของโพรง ดังนั้นทำให้โครงสร้างโพรงของเพสต์มีการเปลี่ยนแปลง (Li, Z. and Ding, Z., 2003)

ขนาดโพรงวิกฤติสามารถหาได้จากจุดตัดกลับของปริมาตรโพรงสะสมหรือค่าสูงสุดของ $dv/d(\log D)$ ซึ่งเรียกว่า ขนาดโพรงวิกฤติหรือขนาดโพรงที่มีความต่อเนื่อง (Li, Z. and Ding, Z., 2003 and Pipilikaki, P. and Beazi-Katsioti, M., 2009) ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโพรงกับขนาดของโพรงแสดงรูปที่ 7.10 และ 7.11 เมื่อพิจารณารูปที่ 10(ก) สำหรับเพสต์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน เพสต์ 20G1POA และ 20G2POA มีขนาดโพรงวิกฤติเท่ากับ 45.9 และ 38.0 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งกระจายอยู่ในช่วงโพรงคาปิลารีขนาดกลาง และมีค่าต่ำกว่าเพสต์ OPC กระจายอยู่ในช่วงโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 56.1 นาโนเมตร เมื่ออายุ 90 วัน ขนาดโพรงวิกฤติของเพสต์ OPC, 20G1POA และ 20G2POA เท่ากับ 54.6, 41.7 และ 31.1 นาโนเมตร เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของเถาปลาล์มน้ำมัน ส่งผลให้โครงสร้างของโพรงมีการปรับเปลี่ยนจากโพรงที่หยาบให้มีความละเอียดมากขึ้น สำหรับเพสต์ผสมด้วยเถาปลาล์มน้ำมันร้อยละ 40 แสดงในรูปที่ 11 พบว่าเพสต์ 40G1POA และ 40G2POA มีขนาดโพรงวิกฤติที่อายุ 28 และ 90 วันเท่ากับ 42.1, 41.8 และ 36.8, 35.0 นาโนเมตร ตามลำดับและกระจายในช่วงโพรงคาปิลารีขนาดกลาง ซึ่งต่ำกว่าเพสต์ OPC

ผลการทดสอบการกระจายตัวของโพรงแสดงให้เห็นว่าขนาดโพรงวิกฤติของเพสต์ผสมเถาปลาล์มน้ำมันด้วยอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์มีปริมาตรโพรงสูงกว่าเพสต์ OPC แต่อนุภาคที่มีความละเอียดทำให้มีปริมาตรโพรงต่ำกว่าเพสต์ OPC นอกจากนี้เพสต์ผสมด้วยเถาปลาล์มน้ำมันมีขนาดโพรงวิกฤติต่ำกว่าเพสต์ OPC เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน ผลของการอัดตัวของอนุภาค การกระจายตัวของเถาปลาล์มน้ำมันในเพสต์ทำให้โครงสร้างโพรงเปลี่ยนแปลงให้มีขนาดของโพรงที่มีความละเอียด อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัย (Ye, G., et al., 2006) พบว่าขนาดโพรงวิกฤติเป็นปัจจัยสำคัญต่อการซึมผ่านและ (Halamicikova, P., et al., 1995) ขนาดโพรงวิกฤติเป็นปัจจัยต่อการซึมผ่านของน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์

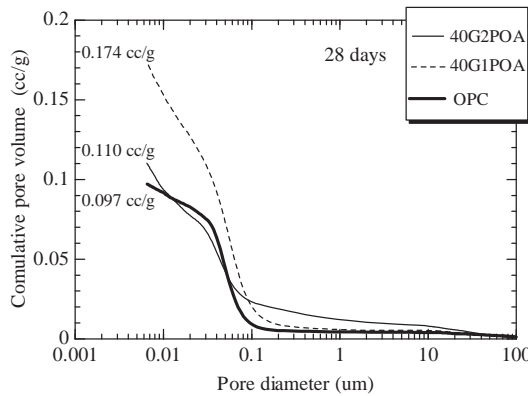


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

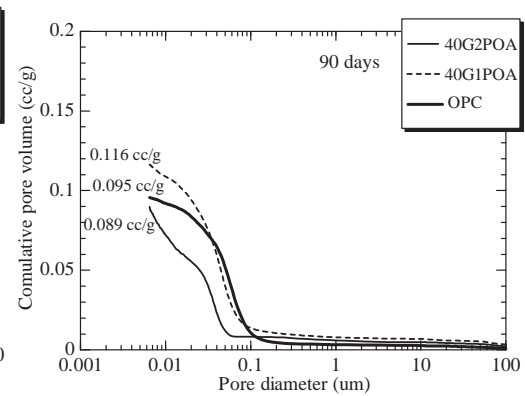


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพรงสะสมกับขนาดโพรงของเฟสค์ 20POA

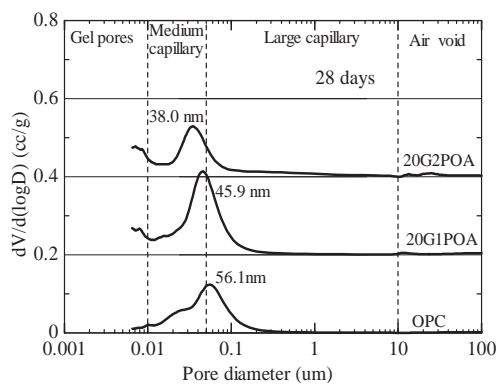


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน

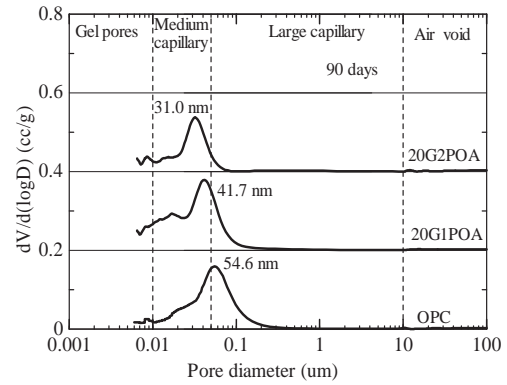


(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพรงสะสมกับขนาดโพรงของเฟสค์ 40POA

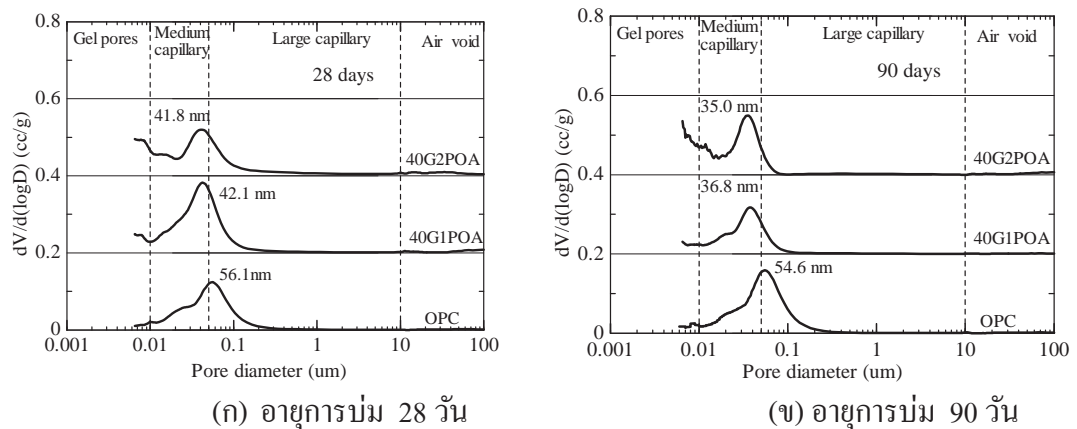


(ก) อายุการบ่ม 28 วัน



(ข) อายุการบ่ม 90 วัน

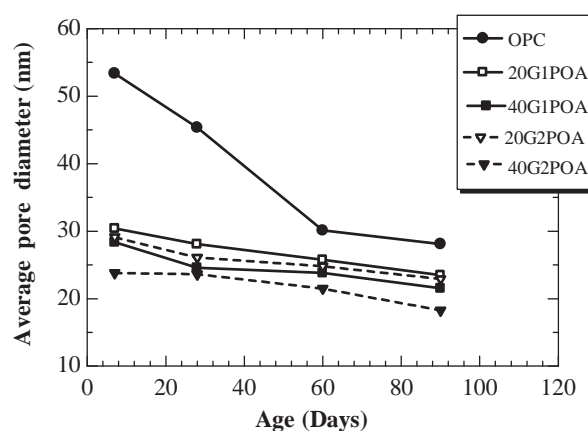
รูปที่ 7.10 ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพรงกับขนาดโพรงของเฟสค์ 20POA



รูปที่ 7.11 ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโพรงกับขนาดโพรงของเฟส 40POA

3. ผลของความละเอียดของเก้าปาล์มน้ำมันขนาดโพรงเฉลี่ยของเฟส

ผลการทดสอบขนาดโพรงเฉลี่ยของเฟสแสดงในรูปที่ 7.12 พบว่าขนาดโพรงเฉลี่ยของเฟส OPC ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 53.4, 45.3, 30.1 และ 28.1 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับเฟสผสมเก้าปาล์มน้ำมันด้วยอนุภาคใกล้เคียงปูนซีเมนต์ ขนาดโพรงเฉลี่ยของเฟส 20G1POA และ 40G1POA ต่ำกว่าเฟส OPC ทุกช่วงอายุการทดสอบ ขณะที่ปริมาตรโพรงสูงกว่าเฟส OPC สำหรับเฟส 20G2POA และ 40G2POA ซึ่งผสมด้วยเก้าปาล์มน้ำมันด้วยอนุภาคที่มีความละเอียดสูงมีขนาดโพรงเฉลี่ยต่ำกว่าเฟส OPC ทุกอายุการบ่ม เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าโครงสร้างโพรงของเฟสมีการเปลี่ยนแปลง จากผลการศึกษสามารถสรุปได้ว่าขนาดโพรงเฉลี่ยลดลงด้วยการใช้เก้าปาล์มน้ำมันและการแทนที่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโพรงเฉลี่ยลดลงด้วยความละเอียดของเก้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ (Chindaprasirt, P. et al., 2005 and Frías, M. and Cabrera, J., 2000)



รูปที่ 7.12 แสดงขนาดโพรงเฉลี่ยของเฟส

7.6 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

1. กำลังอัดของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มร้อยละ 20 ด้วยอนุภาคที่มีความละเอียดสูงมีค่าสูงกว่าเพสต์ OPC นอกจากนี้การแทนที่ร้อยละ 40 กำลังอัดของเพสต์ผสมด้วยเถ้าปาล์มที่มีความละเอียดสูงมีค่ามากกว่าร้อยละ 95 ของเพสต์ OPC ที่อายุ 90 วัน
2. เพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นและความละเอียดนอกจากนี้การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้พีคของ CSH, CASH เพิ่มขึ้นด้วยอายุการบ่ม
3. การลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลเนื่องจากการปฏิกิริยาปอซโซลานและทำให้การกระจายตัวโครงสร้างโพรงของเพสต์ที่มีขนาดหยาบเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนแปลงเป็นโพรงที่มีขนาดความละเอียด ทำให้นิวาสโพรงวิกฤติและขนาดโพรงเฉลี่ยของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันต่ำกว่าเพสต์ OPC
4. เถ้าปาล์มน้ำมันมีความไม่เป็นผลึกประมาณร้อยละ 67-70 การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 เป็นการปรับปรุงกำลังอัด นอกจากนี้ทำให้ปริมาตรโพรงเพสต์ต่ำกว่าเพสต์ OPC และส่งผลเพสต์มีความแน่นขึ้นจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดี

7.7 เอกสารอ้างอิง

- ASTM C618, (2001). A standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. *Annual book of ASTM standards*, 2001, vol. 04.02(Philadelphia), 310–313.
- Barbhuiya, S.A., Gbagbo, J.K., Russell, M.I. and Basheer, P.A.M. Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(10), 3233-3239.
- Bai, J., Chaipanich, A., Kinuthia, J.M., O'Farrell, M., Sabir, B.B., Wild, S. and Lewis, M.H. Compressive strength and hydration of wastepaper sludge ash-ground granulated blastfurnace slag blended pastes. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(8), 1189-1202.

- Chandara, C., Sakai, E., Azizli, K.A.M., Ahmad, Z.A. and Hashim, S.F.S. The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(9), 1590-1593.
- Chaipanich, A. and Nochaiya, T. Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2010, 99(2), 487-493.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27(4), 425-428.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and Jaturapitakkul, C. Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(7), 1492-1499.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(7), 1534-1541.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5), 932-938.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(8), 1701-1707.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(12), 3523-3531.
- El-Jazairi, B. and Illston, J.M. A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 1977, 7(3), 247-257.
- Frías, M. and Cabrera, J. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(4), 561-569.
- Gopalan, M.K. Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, 1993, 90(2), 117-121.

- Halamickova, P., Detwiler, R.J., Bentz, D.P. and Garboczi, E.J. Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: Relationship to sand content and critical pore diameter. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(4), 790-802.
- Hendrik, G., Oss, V. and Padovani, A.C. Cement Manufacture and the Environment Part II: Environmental Challenges and Opportunities. *Journal of Industrial Ecology*, 2003, vol. 7, 93-126.
- Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G. and Moraes, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(1), 69-76.
- Khatib, J.M. and Wild, S. Pore size distribution of metakaolin paste. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26(10), 1545-1553.
- Mindress, S. and Young, J., F. Concrete. 1981(Prentice-Hall, Engle Cliffs), .
- Mehta, P.K. and Aietcin, P.-C.C. Principles underlying production of high-performance concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 1990, 12(2), 70-78.
- Montgomery, D.G., Hughes, D.C. and Williams, R.I.T. Fly ash in concrete - a microstructure study. *Cement and Concrete Research*, 1981, 11(4), 591-603.
- Pipilikaki, P. and Beazi-Katsioti, M. The assessment of porosity and pore size distribution of limestone Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(5), 1966-1970.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K. Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(6), 623-628.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Rattanashotinunt, C. Compressive Strength and Heat Evolution of Concretes Containing Palm Oil Fuel Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(March).
- Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K. Compressive strength and expansion of blended cement mortar containing palm oil fuel ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 21(8), 426-431.
- Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. and Siripanichgorn, A. Use of waste ash from palm oil industry in concrete. *Waste Management*, 2007, 27(1), 81-88.

Ye, G., Lura, P. and van Breugel, K. Modelling of water permeability in cementitious materials.
Materials and Structures, 2006, 39(9), 877-885.

บทที่ 8

ผลการดำเนินการ (Output)ที่ได้จากโครงการวิจัย

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดสอบจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถตีพิมพ์เป็นผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติที่มี Impact Factor 4 เรื่อง ผลงานที่อยู่ในขั้นตอนรอ submit อีก 2 เรื่อง นอกจากนี้ ยังมีผลงานอีก 2 เรื่องที่ได้นำเสนอในที่ประชุมระดับนานาชาติ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ของบทความได้จากภาคผนวก ก. สำหรับรายชื่อบทความมีดังนี้

8.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่มี Impact Factor

1. Kroehong, W., Sinsiri, T.*, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P. (2011), Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, Construction and Building Materials, 25(11), 4095-4104. (IF= 1.366)
2. Sinsiri, T.*, Phoo-ngernkham, T., Sata V., Chindapasirt, P., (2012), The effect of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar, Computers and Concrete, 9 (6), 427-437. (IF= 0.763)
3. Napia, C. , Sinsiri, T.*, Jaturapitakkul C., Chindapasirt, P. (2012), Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder, Waste Management, 32, 1459-1467. (IF= 2.353)
4. Sinsiri, T.*, Kroehong, W, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P. (2012), Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on compressive strength of blended cement paste, Materials and Design, 42, 424-433. (IF= 2.200)

หมายเหตุ * หมายถึง Corresponding Author

8.2 การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์เชิงวิชาการ

มีนักศึกษาจบการศึกษาระดับปริญญาเอก 1 คน จบการศึกษาระดับปริญญาโท 2 คน และกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกอีก 1 คน คาดว่าจะจบการศึกษาในเดือน ธันวาคม 2555 ภายใต้การดูแลของนักวิจัย (ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ) ที่ทำวิจัยในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

8.3 ผลงานที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การนำเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติและระดับชาติ

8.3.1 ผลงานที่นำเสนอในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

5. Pantawee, S., Sinsiri, T., 2008, The Use of natural pozzolans in lightweight concrete, Proceedings of the 3rd ACF International Conference ACF/VCA-2008 on Sustainable Concrete Technology and Structure in Local Climate and Environment Conditions, Ho Chi Minh City, Vietnam, November 11-13, 224-230.
6. Napia, C., Sinsiri, T., Chindaprasert, P., 2008, The Effect of zeolite on microstructure of blended cement paste, Proceedings of Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-11), Thipei, TAIWAN, November 19-21, 1-7.

8.3.2 ผลงานที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ

7. ธนากร ภูเงินขำ และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2554). ความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมไดอะตอมไมท์. วิศวกรรมสาร มข. (มหาวิทยาลัยขอนแก่น), ฉบับที่ 38(1), หน้า 11-26.ค
8. ธนากร ภูเงินขำ และธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. (2554). การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมซีโอไลท์ธรรมชาติ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี), ฉบับที่ 34(1), มกราคม-มีนาคม 2554, หน้า 31-44.

8.3.3 ผลงานที่นำเสนอในการประชุมระดับชาติ

9. ชูวิทย์ นาเพีย, ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2552).การชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งภาคตะกอนที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซีโอไลท์เป็นวัสดุประสาน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, หน้า MAT-206-MAT-213.
10. วันโชค เครือหงษ์, เพลิมชัย ชื่นตา, ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปฏิริยาปอชโซลานของเถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างขนาดเล็กของซีเมนต์เพสต์ผสม.การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, หน้า MAT-136-MAT-143.
11. ธนากร ภูเงินขำ, ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และศักดิ์สิทธิ์ พันทวี. (2553). การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากซีโอไลท์ธรรมชาติ. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6, หน้า 119-124.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ก.1 รายชื่อบทความและบทความที่ได้รับการตอบรับเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่มี Impact Factor

1. Kroehong, W., **Sinsiri, T.***, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., 2011, Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 11, pp.4095-4104. (IF= 1.366)
2. Napia, C. , Sinsiri, T.* , Jaturapitakkul C., Chindapasirt, P., 2012, Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder, Waste Management, 32 (2012), 1459-1467. (IF= 2.353)
3. **Sinsiri, T.***, Phoo-ngernkham, T., Sata V., Chindapasirt, P., 2012, The effect of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar, Computer and Concretes, Vol. 9, No.6, pp. 427-437. (IF= 0.763)
4. **Sinsiri, T.***, Kroehong, W, Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., 2012, Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on compressive strength of blended cement paste, Materials and Design, Vol. 42, pp. 424-433. (IF= 2.200)

หมายเหตุ * หมายถึง Corresponding Author

1. Kroehong, W., Sinsiri, T.*, Jaturapitakkul, C., Chindaprasirt, P., Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 11, pp.4095-4104. (IF= 1.366)



Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Review

Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste

Wunchock Kroehong^a, Theerawat Sinsiri^{a,*}, Chai Jaturapitakkul^b, Prinya Chindaprasirt^c^a School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima 30000, Thailand^b Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand^c Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 January 2011

Received in revised form 2 March 2011

Accepted 22 April 2011

Available online 25 May 2011

Keywords:

Palm oil fuel ash

Amorphous

Compressive strength

Thermogravimetric

Porosity

ABSTRACT

This paper presents the effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. Palm oil fuel ash (POFA) was ground to two different finenesses. Coarse and high fineness palm oil fuel ash, with median particle sizes of 15.6 and 2.1 μm , respectively, were used to replace ordinary Portland cement (OPC) at 0%, 20% and 40% by binder weight. A water to binder (W/B) ratio of 0.35 was used for all blended cement pastes. The amorphous ground palm oil fuel ash was characterized by the Rietveld method. The compressive strength, thermogravimetric analysis and pore size distribution of the blended cement pastes were investigated. The test results indicate that the ground palm oil fuel ash was an amorphous silica material. The compressive strengths of the blended cement pastes containing coarse POFA were as high as that of OPC cement paste. Blended cement paste with high fineness POFA had a higher compressive strength than that with coarse POFA. The blended cement pastes containing 20% of POFA with high fineness had the lowest total porosity. The $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contents of blended cement paste containing POFA decreased with increasing replacement of POFA and were lower than those of the OPC cement paste. In addition, the POFA fineness had an effect on the reduction rate of $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Furthermore, the critical pore size and average pore size of blended cement paste containing POFA were lower than those of the OPC cement paste. The incorporation of high fineness POFA decreased the critical pore size and the average pore size of blended cement paste as compared to that with coarse POFA.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Contents

1. Introduction	4096
2. Experimental details	4096
2.1. Materials	4096
2.2. Mix proportion and curing	4096
2.3. Compressive strength	4096
2.4. X-ray diffraction (XRD)	4097
2.5. Thermal analysis	4097
2.6. Determination of the porosity of the pastes	4097
3. Results and discussion	4097
3.1. Properties of OPC and POFA	4097
3.2. Compressive strength	4098
3.3. Thermogravimetric analysis	4099
3.3.1. Hydrated phase of cement pastes containing palm oil fuel ash	4099
3.3.2. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content	4099
3.4. Pore size distribution of the cement paste	4100
3.4.1. Total porosity of the cement paste	4100
3.4.2. Effect of palm oil fuel ash fineness on the pore size distribution of the pastes	4100
3.4.3. Effect of palm oil fuel ash fineness on the average pore diameter of the cement paste	4101
3.5. Relationships between the compressive strength and total porosity of the pastes	4102

* Corresponding author. Tel.: +66 4422 4420; fax: +66 4422 4607.

E-mail address: sinsiri@gsu.ac.th (T. Sinsiri).

4. Conclusions.....	4103
Acknowledgments.....	4103
References.....	4103

1. Introduction

The Portland cement clinker process results in the emission of CO₂. Every ton of Portland cement produces around 850 kg of CO₂ emitted to the atmosphere, thus causing greenhouse effects [1]. Therefore, it is necessary to reduce the production of Portland cement clinker. To solve this problem, the partial replacement of ordinary Portland cement with pozzolanic materials has been proposed. Pozzolanic materials, such as fly ash, rice husk ash, palm oil fuel ash and baggase ash, are used as mineral admixtures to reduce the cement content in the mixtures. These materials have been reported to increase the durability of paste, mortar and concrete [2–4].

Palm oil fuel ash (POFA) is a by-product from biomass thermal power plants where oil palm residues are burned to generate electricity. More than approximately 100,000 tons of palm oil fuel ash are produced every year in Thailand [5]. Palm oil fuel ash is rarely utilized, and it may add to future environmental problems. Many researchers have studied the use of POFA as a partial replacement of cement in concrete. The main chemical constituent of palm oil fuel ash is silicon dioxide [4,6]. Tangchirapat et al. [4] found that ground palm oil fuel ash is a good pozzolanic material and can be used to replace Portland cement up to 30% by binder weight. Sata et al. [7] also showed that POFA with high fineness has an excellent pozzolanic reaction and can be used as a supplementary material to produce high strength concrete. In addition, the utilization of POFA can improve concrete strength and water permeability [5]. Furthermore, the partial replacement of OPC with POFA assists in the sulfate resistance [8] and chloride resistance of concrete [2].

Silicon dioxide (SiO₂) and aluminum trioxide (Al₂O₃) contents in pozzolanic material react with calcium hydroxide (Ca(OH)₂) to produce CSH, C₂ASH₈ and C₄AH₁₃. Most researchers have studied Ca(OH)₂ in cement paste containing pozzolanic material by thermogravimetry (TG). The Ca(OH)₂ content is reduced with increasing replacement of pozzolanic material and fineness [9]. Barbhuiya et al. [10] found that the reduction of the Ca(OH)₂ content indicates consumption in the pozzolanic reaction. In addition, the use of pozzolanic material to partially replace cement reduces the Ca(OH)₂ content in concrete, which could improve the sulfate resistance of the concrete. Furthermore, Chaipanich and Nochiya [11] used differential thermal analysis (DTG) to determine the hydration products involved and explained the increase in the compressive strength of paste. They showed that blended cement paste containing fly ash and silica fume reduces the amount of Ca(OH)₂ content while the mass loss of ettringite, C–S–H and C₂ASH₈ increases when the curing time is increased.

The porosity and pore structure are very important for permeability and durability. The pore system in cement-based materials consists of two types of pores [9,12]: (a) gel pores with a diameter less than 10 nm that affect shrinkage and fatigue and (b) capillary pores that are divided into large capillary pores with diameters between 50 and 10,000 nm, which affect the compressive strength and permeability, and medium capillary pores with diameters between 10 and 50 nm, which influence the compressive strength, permeability and shrinkage. Khatib and Wild [13] studied cement pastes containing metakaolin at 5%, 10% and 15% and found that the pore size of a cement paste depends on refinement of the pore

structure. In addition, Chindraprasirt et al. [14] used fly ash to replace Portland cement and showed that the cement paste containing fly ash had a smaller average pore diameter than that of control cement paste. In addition, Halamickova et al. [15] studied water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortar and showed that they are influenced by the critical pore size.

Many researchers have already reported on the influence of palm oil fuel on the physical properties of mortar and concrete, including compressive strength, sulfate resistance and chloride resistance. However, the pore size distribution and microstructure of blended cement pastes containing palm oil fuel ash with different finenesses have not been well established. An understanding of the influence of the fineness of palm oil fuel ash on the pore size distribution and microstructure of cement paste could lead to an increase in the use of palm oil fuel ash in concrete and could be productive for the environment by reducing the volume of waste disposed of in landfills. Thus, the objective of this research was to study the effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. The chemical properties and amorphous structure of ground palm oil fuel ash were determined. The effects of ground palm oil fuel ash with two different finenesses on the compressive strength, calcium hydroxide and pore size distribution of blended cement pastes were investigated.

2. Experimental details

2.1. Materials

Type I Portland cement was used in this study. Palm oil fuel ash (POFA) from a thermal power plant in Thailand was used as a pozzolan. The POFA was sieved through a No. 16 sieve to remove large particles and incompletely combusted materials [16,17]. The POFA was ground to two different sizes. The first fineness was ground to have the same as that of OPC with grinding machine. The second fineness was ground by attrition mill for 60 min at 1000 rpm using 2 mm diameter steel ball [18,19]. The abbreviations G1 and G2 were used to identify the ground POFA as having the same particle size cement and the smaller particle size, respectively.

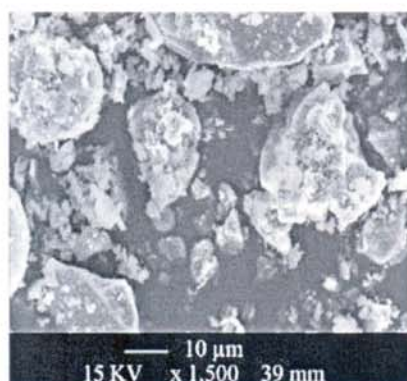
SEM photos of POFA with different finenesses are shown in Fig. 1. G1POFA and G2POFA consist of irregular and crushed shaped particles. A similar observation has also been reported by other researchers [4]. The physical properties of OPC and POFA are given in Table 1. The specific gravity of OPC was 3.14, and those of G1POFA and G2POFA were 2.36 and 2.48, respectively. The Blaine fineness values of OPC, G1POFA and G2POFA were 3600, 6700 and 14,900 cm²/g, respectively. The specific gravity and specific surface area of POFA increased with increasing grinding time [8,20,21]. The median particle sizes of OPC, G1POFA and G2POFA were 14.6, 15.6 and 2.2 μm, respectively. Fig. 2 shows a comparison of the particle size distributions of type I Portland cement and POFA. The two group of POFA particle size are similar to the particle size of the cement and smaller, respectively.

2.2. Mix proportion and curing

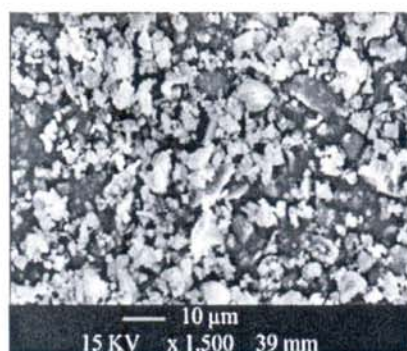
Type I Portland cement was partially replaced by POFA (G1POFA or G2POFA) at the rate of 0%, 20%, and 40% by binder weight. The water to binder (W/B) ratio was constant at 0.35 for all mixtures. The cast specimens were covered with plastic to prevent water loss. After casting for 24 h, the specimens were removed from the mold. Thereafter, they were cured in saturated lime water at a temperature of 23 ± 2 °C. The mix proportions of cement paste and blended pastes containing POFA are given in Table 2.

2.3. Compressive strength

Cube specimens of 50 × 50 × 50 mm were used for compressive strength tests of the pastes. The strengths were determined at 7, 28, 60 and 90 days according to ASTM C 109 [22]. The compressive strength of the pastes at each age was the average value of five samples.



(a)



(b)

Fig. 1. Scanning electron microscopy of palm oil fuel ash (a) ground palm oil fuel ash (G1POFA), (b) ground palm oil fuel ash (G2POFA).

Table 1
Physical properties of OPC and POFA.

Sample	Specific gravity	Median particle size, d_{50} (μm)	Blaine fineness (cm^2/g)
OPC	3.14	14.6	3600
G1POFA	2.36	15.6	6700
G2POFA	2.48	2.1	14,900

2.4. X-ray diffraction (XRD)

The XRD scans were performed for 2θ between 10° and 65° , with an increment of $0.02^\circ/\text{step}$ and a scan speed of $0.5^\circ/\text{step}$. The amorphous structure in the palm oil fuel ash was determined by quantitative XRD analysis using Bruker's TOPAS software.

2.5. Thermal analysis

Thermal analysis is a widely used method for determining hydration products such as ettringite, calcium silicate hydrate (C-S-H), calcium aluminum silicate hydrate (C_2ASH_8), calcium aluminate hydrate (C_4AH_{13}), calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) and calcium carbonate (CaCO_3) [23]. Thermogravimetric analysis was carried out using Netzsch STA 409 C/CD equipment. The sample was heated from room temperature to 1000°C at a heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$ under a nitrogen atmosphere. The thermogravimetric (TG) signal was used to calculate the weight loss during heating and to estimate the content of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and carbonated phases. The $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content was calculated from the weight loss between 450 and 580°C [24]. Furthermore, the derivative thermogravimetric (DTG) data of the weight loss can be used to further determine each phase [25].

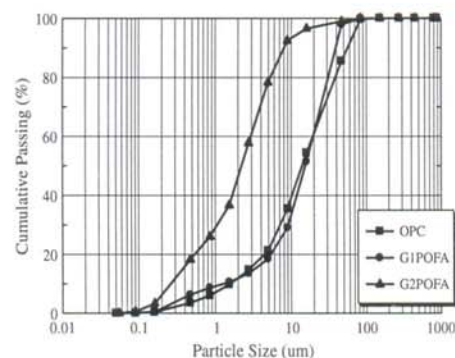


Fig. 2. Particle size distribution of OPC and POFA.

Table 2
Mix proportions of cement paste and pastes containing POFA.

Mix No.	Symbol	OPC	G1POFA	G2POFA	W/B
1	OPC	100	–	–	0.35
2	20G1POFA	80	20	–	0.35
3	40G1POFA	60	40	–	0.35
4	20G2POFA	80	–	20	0.35
5	40G2POFA	60	–	40	0.35

2.6. Determination of the porosity of the pastes

The measurement of the distribution of pore diameters in the hardened cement pastes, determined by mercury intrusion porosimetry (MIP), was conducted at a pressure capacity of 228 MPa. After curing, the samples were obtained by carefully breaking the cube specimens with a chisel. The representative samples of 3–6 mm pieces weighing between 1 and 1.5 g were taken from the middle of the specimen. To stop the hydration reaction, the samples were submerged directly into liquid nitrogen for 5 min and were then evacuated at a pressure of 0.5 Pa at -40°C for 48 h. This method has been used previously to stop the hydration reaction of cement paste [26,27]. The pressure is determined by the Washburn equation [28]. A constant contact angle of 140° and a constant surface tension of mercury of 480 dynes/cm were used for the pore size calculation.

3. Results and discussion

3.1. Properties of OPC and POFA

The chemical composition of the POFA is given in Table 3. The main chemical component of the POFA was silicon dioxide (SiO_2), which accounted for 54.0% and 55.7% for G1POFA and G2POFA, respectively. The losses on ignition (LOI) for G1POFA and G2POFA were 3.7% and 4.7%, respectively. The sums of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 for G1POFA and G2POFA were 56.9% and 58.6%, respectively. Awal and Hussin [29] reported that POFA might be grouped between Class C and Class F pozzolan as specified by ASTM C 618 [30] and the sum of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 content of palm oil fuel ash used in their study was 59.7%, which was close to the finding in this research. However, the LOI was 18.0%, which is much higher than that in this study. The burning efficiency and the material source are the major causes of differences in the chemical composition of palm oil fuel ash [7,31].

The X-ray diffraction (XRD) patterns of G1POFA and G2POFA are shown in Fig. 3. It was found that the major phase was α -quartz (SiO_2), and the minor phase was cristobalite (SiO_2). A similar result was reported by Chandara et al. [16]. Quantitative XRD analysis based on the Rietveld method was carried out using Bruker's TOPAS. The percentages of amorphous G1POFA and G2POFA were 70.2% and 67.2% (by mass), respectively. Moreover, the proportions

Table 3
Chemical composition of OPC and POFA.

Chemical composition (%)	OPC	G1POFA	G2POFA
Silicon dioxide (SiO ₂)	20.8	54.0	55.7
Aluminum trioxide (Al ₂ O ₃)	4.7	0.9	0.9
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	3.4	2.0	2.0
Calcium oxide (CaO)	65.3	12.9	12.5
Magnesium oxide (MgO)	–	4.9	5.1
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.1	1.0	1.0
Potassium oxide (K ₂ O)	0.4	13.5	11.9
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.7	4.0	2.9
Loss on ignition (LOI)	0.9	3.7	4.7
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	–	56.9	58.6

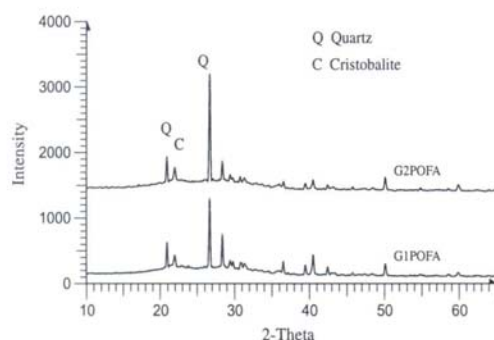


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of G1POFA and G2POFA.

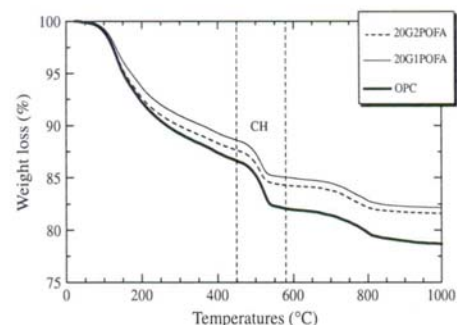
of quartz and cristobalite were 65% and 35% and 73% and 27% (by mass) for G1POFA and G2POFA, respectively. These results suggest that the amorphous content of the palm oil fuel ash was approximately 67–70%.

3.2. Compressive strength

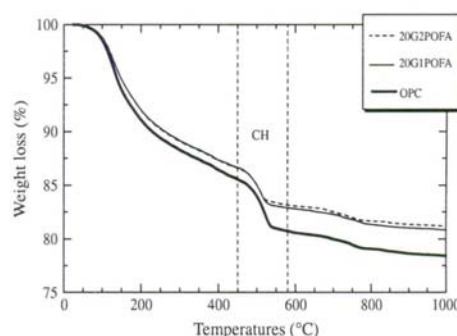
The compressive strength and normalized strength of pastes containing POFA compared to OPC paste (cement paste) are shown in Table 4. At 7 days, the compressive strength of the pastes containing palm oil fuel ash was less than that of OPC paste. For the paste containing POFA with the same particle size as cement at 28 days, the compressive strengths of the 20G1POFA and 40G1POFA pastes were 72.0 and 61.5 MPa or about 96% and 82% of that of the OPC paste, respectively. They increased to 102.0 and 88.1 MPa or about 103% and 89% of that of the OPC paste, respectively, at 90 days. The compressive strength of the 20G1POFA paste at 90 days was slightly higher than that of the OPC paste, and that of 40G1POFA was lower than that of the OPC paste. For pastes with the small particle size, the compressive strengths of 20G2POFA and 40G2POFA at 28 and 90 days were 77.3, 66.5 and 109.6, 94.1 MPa or about 103%, 89% and 111%, 95% of that of the OPC paste, respectively.

Table 4
Compressive strength of OPC paste and pastes containing ground palm oil fuel ash.

Mix no.	Symbol	Compressive strength (MPa)				Normalized compressive strength (%)			
		7 days	28 days	60 days	90 days	7 days	28 days	60 days	90 days
1	OPC	53.0	75.0	84.6	99.1	100	100	100	100
2	20G1POFA	48.3	72.0	84.6	102.0	91	96	100	103
3	40G1POFA	41.0	61.5	72.8	88.1	77	82	86	89
4	20G2POFA	51.9	77.3	92.2	109.6	98	103	109	111
5	40G2POFA	44.0	66.5	78.6	94.1	83	89	93	95



(a) Curing time 28 days



(b) Curing time 90 days

Fig. 4. TGA curve results of OPC paste and 20POFA pastes.

The compressive strength of the blended cement paste increased with curing time but decreased with an increase in the replacement of POFA. When the POFA was ground to a reasonably high fineness, the rate of compressive strength gain of the blended cement paste was significantly improved due to the hydration reaction, nucleation effect, packing effect and pozzolanic reaction. The hydration reaction occurs due to the chemical constituents in cement and water, while the pozzolanic reaction occurs due to the reaction of Ca(OH)₂ with SiO₂ and Al₂O₃ from palm oil fuel ash, which produces an increase in calcium silicate hydrate, C–S–H. The pozzolanic reaction of high fineness POFA is faster than that of coarse POFA [8,31]. The packing effect is exhibited as the small particles fill the voids of the paste, allowing for denser packing within the material particles and the matrix phase [32,33]. The nucleation effect, arising when the smaller particles are dispersed in the blended cement paste, accelerates the reactions and forms a smaller cementing paste product [34,35]. Thus, the paste containing POFA with high fineness was more homogeneous and denser, which improved the compressive strength of the paste. These

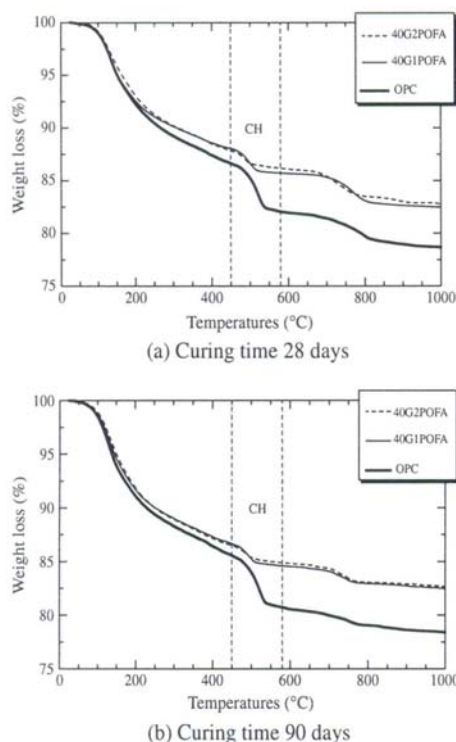


Fig. 5. TGA curve results of OPC paste and 40POFA pastes.

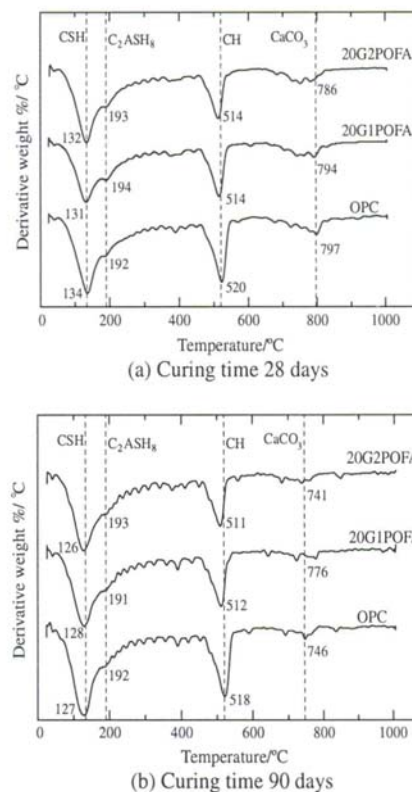


Fig. 6. DTG curve results of OPC paste and 20POFA pastes.

results are similar to those of Chindaprasirt et al. [9,14]. From these results, it can be concluded that POFA with high fineness can be used as a good pozzolan in cement-based materials and can be used to replace Portland cement up to 20%. In addition, the compressive strength of 20G1POFA at which G1POFA has the same particle size as cement is 96% and 103% of that of OPC paste at 28 and 90 days, respectively.

3.3. Thermogravimetric analysis

3.3.1. Hydrated phase of cement pastes containing palm oil fuel ash

Thermogravimetric analysis (TGA) results of the OPC paste and pastes containing POFA are given in Figs. 4 and 5, respectively. Three step mass loss transitions were found. The first step shows the mass loss of dehydration such as ettringite, C-S-H and C₂ASH₈, which occurred at 105–450 °C [23]. The second step mass loss of Ca(OH)₂ was detected between 450 and 580 °C [24], and the third step at 580 and 1000 °C showed the mass loss of calcium carbonate (CaCO₃) [24].

The derivative thermogravimetric (DTG) results of the OPC paste and 20POFA cement paste are plotted in Figs. 6 and 7, respectively. At 28 and 90 days, the DTG curves of all pastes showed similar phases, which are C-S-H, C₂ASH₈, Ca(OH)₂ and CaCO₃ detected at 126–134 °C, 188–194 °C, 488–520 °C and 741–797 °C, respectively. Similar findings have also been reported by other researchers [11,36]. The DTG curve peak for Ca(OH)₂ of the pastes containing palm oil fuel ash decreased with increasing replacement of the palm oil fuel ash and also decreased with curing time. The high fineness palm oil fuel ash was more effective for decreasing the peak intensity of Ca(OH)₂ than that with a large particle

size because the high fineness palm oil fuel ash has a large surface area to provide the silica and alumina compounds for pozzolanic reaction. These compounds reacted and consumed Ca(OH)₂. The Ca(OH)₂ consumption was used as an indicator of the pozzolanic reaction. The reduction of Ca(OH)₂ in all palm oil fuel ash pastes became more subtle with age. The fineness of the palm oil fuel ash had an effect on the pozzolanic reaction rate. The paste containing high fineness palm oil fuel ash showed a higher pozzolanic reaction rate than the paste containing coarse palm oil fuel ash. The reduction of Ca(OH)₂ led to an increased peak intensity for the C-S-H and C₂ASH₈ phases with increasing curing time, which resulted in an increase in the compressive strength.

3.3.2. Ca(OH)₂ content

The Ca(OH)₂ contents of the pastes at different ages are shown in Fig. 8. The Ca(OH)₂ contents of the OPC paste at 7, 28, 60 and 90 days were 19.02%, 19.64%, 20.22% and 20.46%, respectively. The increase in the Ca(OH)₂ contents of the OPC paste was due to hydration of the cement. The Ca(OH)₂ contents of the pastes containing POFA decreased with the pozzolanic reaction of POFA. The Ca(OH)₂ contents of 20G1POFA and 20G2POFA were between 15.10–15.82% and 13.93–15.24% or reduced by approximately 5% and 9% of that of the 20G1POFA and 20G2POFA pastes at 7 days, respectively. The reduction of Ca(OH)₂ in the blended cement paste indicates its consumption by the pozzolanic reaction [37]. In addition, the pastes containing G2POFA showed lower Ca(OH)₂ contents than that of the G1POFA due to the high fineness of the particles and the silicon dioxide (SiO₂) contents in the POFA, which

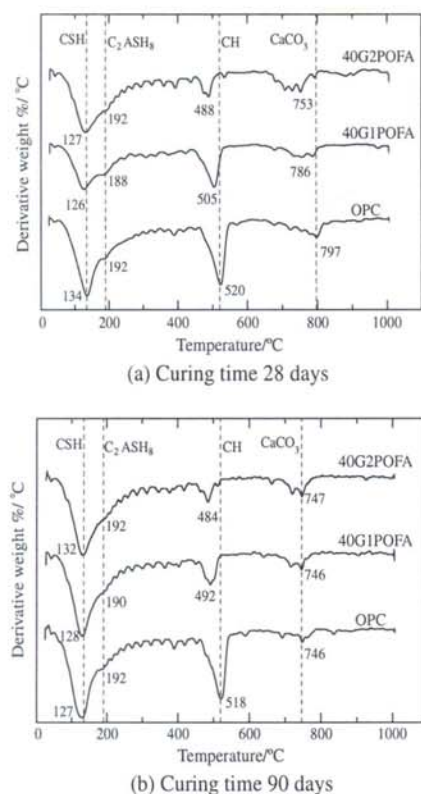


Fig. 7. DTG curve results of OPC paste and 40POFA pastes.

react with Ca(OH)_2 by the pozzolanic reaction. With a replacement ratio of 40% POFA, the Ca(OH)_2 contents of the 40G1POFA and 40G2POFA pastes were between 9.24–12.18% and 7.19–11.75% or reduced by approximately 24% and 39% as compared to the 40G1POFA and 40G2POFA pastes at 7 days, respectively. Moreover, the reduction of the Ca(OH)_2 contents of high replacement decreased more quickly than that of low replacement. These results suggest that the higher fineness palm oil fuel ash, which has a higher surface area, produces a greater pozzolanic reaction. In addition, the Ca(OH)_2 contents of pastes containing POFA decrease with increasing POFA content. These results agree with [9].

3.4. Pore size distribution of the cement paste

3.4.1. Total porosity of the cement paste

The results for the total porosity of all pastes at different ages are presented in Table 5. The total porosities of the OPC paste at 7, 28, 60 and 90 days were 22.8%, 20.1%, 17.4% and 16.6%, respectively, while the total porosities of the 20G1POFA and 40G1POFA pastes were 26.3%, 21.7%, 18.4% and 17.4% and 30.2%, 27.5%, 19.3% and 18.5% at 7, 28, 60 and 90 days, respectively, which were higher than that of the OPC paste. The results indicate that the total porosity of the pastes containing POFA with particle sizes that were the same as the cement was higher than that of the OPC cement paste. For the paste containing G2POFA at 7 days, the total porosity of the paste containing 20% palm oil fuel ash was lower than that of the OPC paste at all ages. In addition, the total porosity of the 40G2POFA paste at 60 days was 17.3%, which is slightly less than

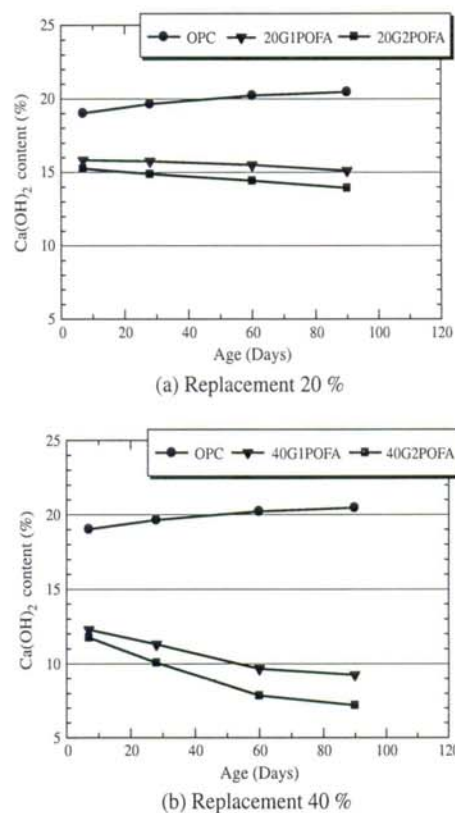


Fig. 8. Ca(OH)_2 content.

Table 5

Total porosity of OPC paste and pastes containing ground palm oil fuel ash.

Mix no.	Symbol	Total porosity (%)			
		7 days	28 days	60 days	90 days
1	OPC	22.8	20.1	17.4	16.6
2	20G1POFA	26.3	21.7	18.4	17.4
3	40G1POFA	30.2	27.5	19.3	18.5
4	20G2POFA	20.5	17.0	15.5	11.4
5	40G2POFA	23.8	19.7	17.3	15.6

17.4%, because the high fineness palm oil fuel ash had a faster pozzolanic reaction. The small particles showed a good filler effect in reducing the voids of the cement paste [32]. These results suggest that the addition of fine particles of palm oil fuel ash makes the blended cement paste denser [9].

3.4.2. Effect of palm oil fuel ash fineness on the pore size distribution of the pastes

The cumulative pore volumes of pastes containing 20% and 40% POFA are shown in Figs. 9 and 10, respectively. As shown in Fig. 9, at 28 and 90 days, the cumulative pore volume of the 20G2POFA paste is the lowest. The high fineness of G2POFA had a fast pozzolanic reaction and a greater filler effect in the voids, thus reducing the porosity and increasing the density of the paste. For pastes containing 40% POFA, as shown in Fig. 10, the cumulative pore volumes of the 40G1POFA and 40G2POFA pastes at 28 days were higher than that of the OPC cement paste. However, at 90 days,

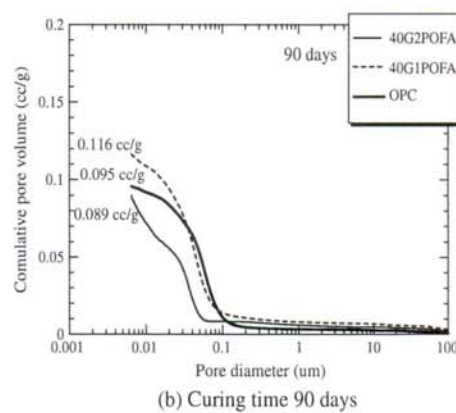
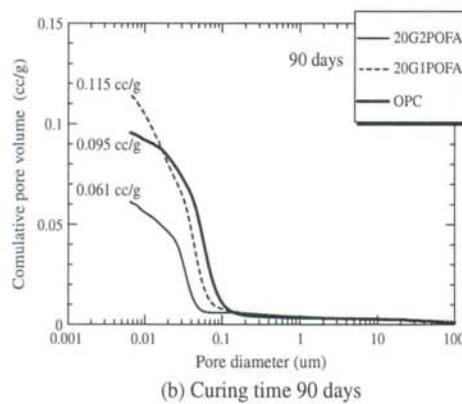
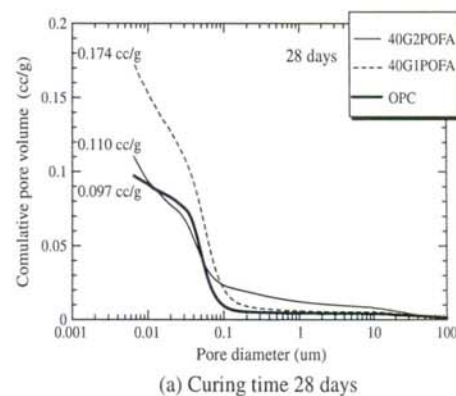
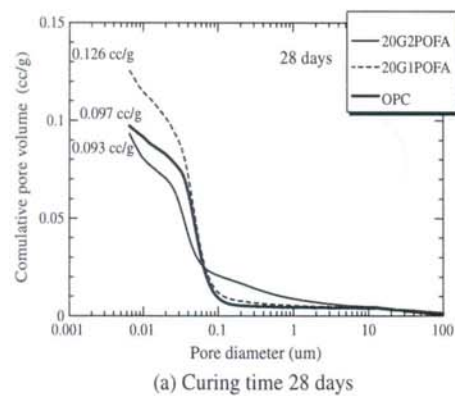


Fig. 9. Relationships between the cumulative pore volume and pore diameter of 20POFA paste.

Fig. 10. Relationships between the cumulative pore volume and pore diameter of 40POFA paste.

the cumulative pore volume of the 40G2POFA paste was lower than that of the OPC paste due to the fact that the silicon dioxide (SiO_2) reacted with the calcium hydroxide Ca(OH)_2 and reduced the Ca(OH)_2 content by the pozzolanic reaction. Thus, the pore structure in the blended cement paste was refined; these results are in agreement with Li and Ding [38].

The critical pore size is defined as the inflection point on the cumulative pore volume and pore diameter plot or as the maximum of $dv/d(\log D)$. The critical pore size is the most frequent continuous pores [15,39]. For pastes containing 20% POFA at 28 days, as shown in Fig. 11, the critical pore sizes of the 20G1POFA and 20G2POFA pastes were 45.9 nm and 38.0 nm, respectively, which were distributed as medium capillary pores. These values were lower than that of the OPC paste (56.1 nm), which was specified to contain large capillary pores. At 90 days, the critical pore sizes of the OPC, 20G1POFA and 20G2POFA pastes were 54.6 nm, 41.7 nm and 31.0 nm, respectively, due to the reaction of the palm oil fuel ash with Ca(OH)_2 . Consequently, the pore structure was transformed from coarser pores to finer pores [38]. These results suggest that the paste containing POFA had a lower critical pore size than the OPC cement paste.

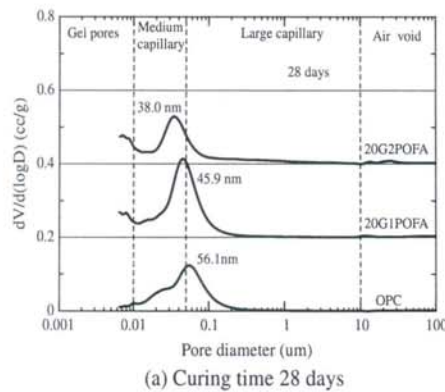
For pastes at 40% POFA, the relationships between the differential pore volume and pore diameter at 28 and 90 days are shown in Fig. 12. The critical pore sizes of the 40G1POFA and 40G2POFA pastes at 28 and 90 days were 42.1 nm, 41.8 nm and 36.8 nm, 35.0 nm, respectively, which correspond to medium capillary pores. These values are smaller than that of the OPC cement paste.

These results indicate that the paste with POFA contained critical pore sizes smaller than the OPC paste.

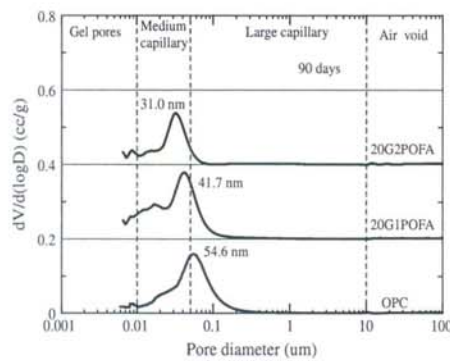
The results suggest that the total porosity of the paste containing POFA with the same particle size as cement was higher than that of the OPC cement paste, but the paste containing high fineness POFA had a lower total porosity than the OPC paste. In addition, the total porosity increased with an increase in the POFA replacement. Furthermore, the critical pore size of the paste with POFA was smaller than that of the OPC cement paste due to the filler effect, pozzolanic reaction, dispersion effect and precipitation effect [14,40]. The pore size structure of the pastes changed from coarser pores to finer pores [41]. Moreover, some researchers [42] have reported that the critical pore radius is the most important factor for permeability, and Halamickova et al. [15] found that the critical pore size affects water permeability and chloride ion diffusion.

3.4.3. Effect of palm oil fuel ash fineness on the average pore diameter of the cement paste

The results for the average pore diameter of all pastes are shown in Fig. 13. The average pore diameters of OPC paste at 7, 28, 60 and 90 days were 53.4 nm, 45.3 nm, 30.1 nm and 28.1 nm, respectively. For pastes containing G1POFA, which has the same particle sizes as OPC, the average pore diameters of the 20G1POFA and 40G1POFA pastes were lower than that of the OPC paste at all ages, while the total porosity was higher than that of the OPC paste. For pastes containing high fineness POFA, the average pore



(a) Curing time 28 days



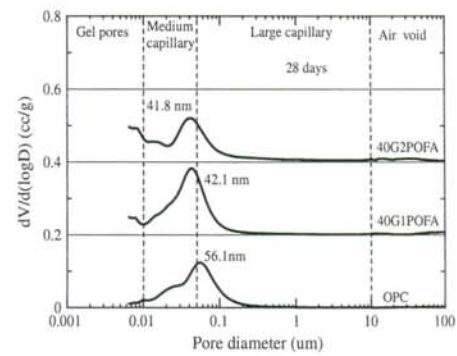
(b) Curing time 90 days

Fig. 11. Relationships between the differential pore volume and pore diameter of 20POFA paste.

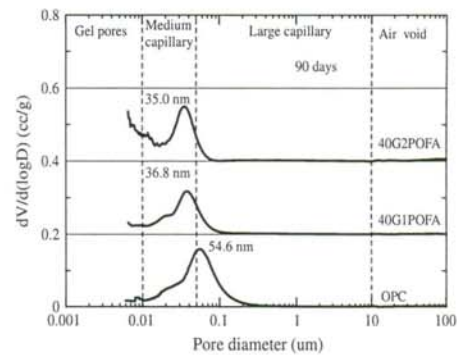
diameters of the 20G2POFA and 40G2POFA pastes were lower than that of the OPC paste, and the total porosity of the 20G2POFA paste was lower than that of the OPC paste at all ages due to pore refinement and the reduction of calcium hydroxide in the paste [41,43]. These results indicate that the average pore diameter decreases with the use of POFA and with an increase in the replacement level, which again confirms that POFA with high fineness is more effective in reducing the average pore diameter as a result of the better dispersion, packing and pozzolanic reaction of the finer POFA particles. Similar results have been reported by other researchers [14,44].

3.5. Relationships between the compressive strength and total porosity of the pastes

Relationships between the compressive strength and total porosity of the pastes are shown in Fig. 14. The figures are divided into four regions. Region I shows pastes that have both a compressive strength and total porosity higher than those of the OPC paste. Region II presents the pastes of lower compressive strength but higher total porosity in comparison to the OPC paste. Region III contains pastes that have both lower compressive strength and lower total porosity than the OPC paste. Pastes in region VI are the best pastes, which have a lower total porosity and a higher compressive strength than the OPC paste. At 28 days, the 20G1POFA, 40G1POFA and 40G2POFA pastes were located in region III, while the 20G2POFA paste was located in region VI and was designated as the best paste because its



(a) Curing time 28 days



(b) Curing time 90 days

Fig. 12. Relationships between the differential pore volume and pore diameter of 40POFA paste.

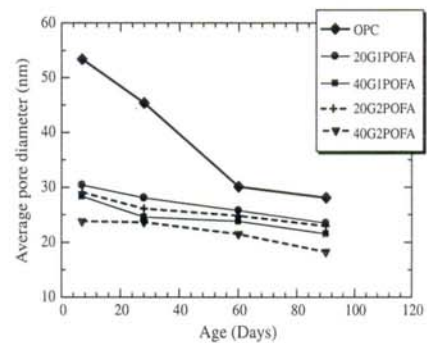


Fig. 13. Average pore diameter of curing days.

higher fineness ash can lead to greater filler effects, thus reducing the total porosity. Thus, the pastes containing POFA with high fineness increased the pozzolanic reaction rate and refined the pore structure of the paste.

At 90 days, the pastes containing POFA with the same particle size as cement were located in regions I and II. The 20G2POFA paste had a total porosity lower than that of the OPC paste, and the compressive strength was higher than that of the OPC paste, making it the best paste. However, the 40G2POFA paste had both

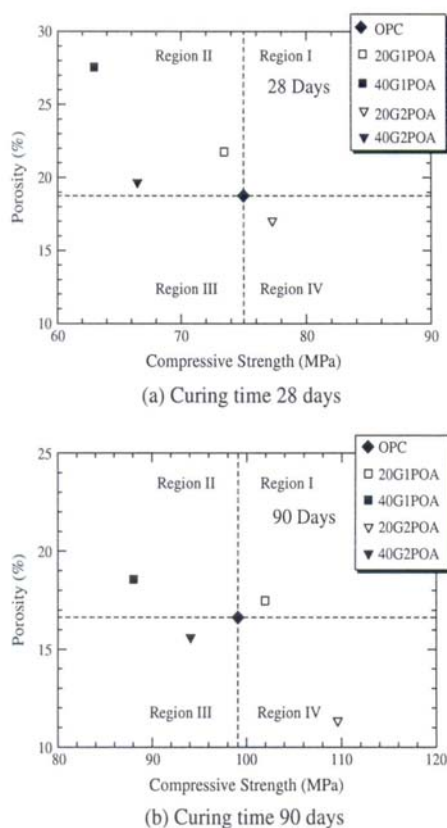


Fig. 14. Relationships between compressive strength and total porosity of paste.

a lower compressive strength and a lower total porosity than the OPC paste, which suggests that the high fineness POFA had a greater pozzolanic reaction and that the small particles of G2POFA more efficiently filled the voids of the paste. Therefore, the 20G2POFA paste was more homogeneous and had a lower total porosity than the OPC paste.

4. Conclusions

Based on the results of this study, the following conclusions can be drawn.

1. Fineness of palm oil fuel ash has the significant effect on the compressive strength of paste. Blended cement paste with high fineness palm oil fuel ash had a higher compressive strength than that with coarse palm oil fuel ash.
2. The paste containing palm oil fuel ash showed decreased $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contents with increases in the replacement and fineness of the ash. Moreover, the reduction of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ affected the increased peak intensity of the C–S–H and C_2ASH_8 phases with increasing curing time.
3. The reduction of the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content in the POFA paste was due to the pozzolanic reaction and caused the pore size structure of the paste to change from coarser pores to finer pores. Thus, the critical pore size and average pore diameter of the paste containing palm oil fuel ash were lower than those of the OPC paste.

4. The amorphous content of palm oil fuel ash was approximately 67–70%. The use of palm oil fuel ash with high fineness to replace type I Portland cement at a rate of 20% resulted in good compressive strength. In addition, the total porosity of the paste was lower than that of OPC paste.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the financial support of the Commission on Higher Education of Thailand for a grant under the Strategic Scholarships for Frontier Research Network for the Joint Ph.D. Program, Thai Doctoral degree. Thanks are also extended to the Thailand Research Fund (TRF) for financial support under the TRF Senior Research Scholar, Grant No. RTA5380002 and the TRF New Researcher Scholar, Grant No. MRG5280178.

References

- [1] Hendrik G, Oss V, Padovani AC. Cement manufacture and the environment part ii: environmental challenges and opportunities. *J Ind Ecol* 2003;7:93–126.
- [2] Chindaprasit P, Rukzon S, Sirivivatnanon V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Constr Build Mater* 2008;22(5):932–8.
- [3] Chusilp N, Jaturapitakkul C, Kiattikomol K. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Constr Build Mater* 2009;23(12):3523–31.
- [4] Tangchirapat W, Saeting T, Jaturapitakkul C, Kiattikomol K, Siripanichgorn A. Use of waste ash from palm oil industry in concrete. *Waste Manage* 2007;27(1):81–8.
- [5] Chindaprasit P, Homwuttivong S, Jaturapitakkul C. Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash. *Constr Build Mater* 2007;21(7):1492–9.
- [6] Chindaprasit P, Rukzon S, Sirivivatnanon V. Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar. *Constr Build Mater* 2008;22(8):1701–7.
- [7] Sata V, Jaturapitakkul C, Kiattikomol K. Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete. *J Mater Civ Eng* 2004;16(6):623–8.
- [8] Tangchirapat W, Jaturapitakkul C, Kiattikomol K. Compressive strength and expansion of blended cement mortar containing palm oil fuel ash. *J Mater Civ Eng* 2009;21(8):426–31.
- [9] Chindaprasit P, Jaturapitakkul C, Sinsiri T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Constr Build Mater* 2007;21(7):1534–41.
- [10] Barbhuiya SA, Gbagbo JK, Russell MI, Basheer PAM. Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume. *Constr Build Mater* 2009;23(10):3233–9.
- [11] Chaipanich A, Nochaiya T. Thermal analysis and microstructure of Portland cement–fly ash–silica fume pastes. *J Therm Anal Calorim* 2010;99(2):487–93.
- [12] Mindress S, Young JF. Concrete. Engle Cliffs: Prentice-Hall; 1981.
- [13] Khatib JM, Wild S. Pore size distribution of metakaolin paste. *Cem Concr Res* 1996;26(10):1545–53.
- [14] Chindaprasit P, Jaturapitakkul C, Sinsiri T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cem Concr Compos* 2005;27(4):425–8.
- [15] Halamickova P, Detwiler RJ, Bentz DP, Garboczi EJ. Water permeability and chloride ion diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter. *Cem Concr Res* 1995;25(4):790–802.
- [16] Chandara C, Sakai E, Azizli KAM, Ahmad ZA, Hashim SFS. The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer. *Constr Build Mater* 2010;24(9):1590–3.
- [17] Jaturapitakkul C, Kiattikomol K, Tangchirapat W, Saeting T. Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash. *Constr Build Mater* 2007;21(7):1399–405.
- [18] Kumar S, Kumar R. Mechanical activation of fly ash: effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. *Ceramics International* 2011;37(2):533–41.
- [19] Kumar S, Kumar R, Bandopadhyay A, Alex T, Ravi Kumar B, Das SK, et al. Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of Portland slag cement. *Cem Concr Compos* 2008;30(8):679–85.
- [20] Rukzon S, Chindaprasit P, Mahachai R. Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. *Int J Miner Metall Mater* 2009;16(2):242–7.
- [21] Bouzoubaâ N, Zhang MH, Bilodeau A, Malhotra VM. The effect of grinding on the physical properties of fly ashes and a Portland cement clinker. *Cem Concr Res* 1997;27(12):1861–74.
- [22] ASTM C109. 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; 2001. p. 83–8.

- [23] Bai J, Chaipanich A, Kinuthia JM, O'Farrell M, Sabir BB, Wild S, et al. Compressive strength and hydration of wastepaper sludge ash-ground granulated blastfurnace slag blended pastes. *Cem Concr Res* 2003;33(8):1189–202.
- [24] El-Jazairi B, Illston JM. A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes. *Cem Concr Res* 1977;7(3):247–57.
- [25] Chaipanich A, Nochaiya T. Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes. *J Therm Anal Calorim* 2010;99:487–93.
- [26] Galle C. Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: a comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. *Cem Concr Res* 2001;31(10):1467–77.
- [27] Konecny L, Naqvi SJ. The effect of different drying techniques on the pore size distribution of blended cement mortars. *Cem Concr Res* 1993;23(5):1223–8.
- [28] Washburn EW. Note on method of determining the distribution of pore size in porous materials. *Proc Natl Acad Sci USA* 1921;7:115–6.
- [29] Awal ASMA, Hussin MW. The effectiveness of palm oil fuel ash in preventing expansion due to alkali-silica reaction. *Cem Concr Compos* 1997;19(4):367–72.
- [30] ASTM C618. A standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. Annual book of ASTM standards, vol. 04.02; 2001. p. 310–3.
- [31] Sata V, Jaturapitakkul C, Rattanashotinunt C. Compressive strength and heat evolution of concretes containing palm oil fuel ash. *J Mater Civ Eng* 2010;22.
- [32] Isaia GC, Gastaldini ALG, Moraes R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. *Cem Concr Compos* 2003;25(1):69–76.
- [33] Mehta PK, Aietcin P-CC. Principles underlying production of high-performance concrete. *Cem Concr Aggr* 1990;12(2):70–8.
- [34] Gopalan MK. Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete. *ACI Mater J* 1993;90(2):117–21.
- [35] Montgomery DG, Hughes DC, Williams RIT. Fly ash in concrete – a microstructure study. *Cem Concr Res* 1981;11(4):591–603.
- [36] Nochaiya T, Wongkeo W, Pimraksa K, Chaipanich A. Microstructural, physical, and thermal analyses of Portland cement-fly ash-calcium hydroxide blended pastes. *J Therm Anal Calorim* 2010;100(1):101–8.
- [37] Vedalakshmi R, Sundara Raj A, Srinivasan S, Ganesh Babu K. Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique. *Thermochim Acta* 2003;407(1–2):49–60.
- [38] Li Z, Ding Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. *Cem Concr Res* 2003;33(4):579–84.
- [39] Pipilikaki P, Beazi-Katsioti M. The assessment of porosity and pore size distribution of limestone Portland cement pastes. *Constr Build Mater* 2009;23(5):1966–70.
- [40] Poon CS, Wong YL, Lam L. The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly-ash cement pastes and mortars. *Constr Build Mater* 1997;11(7–8):383–93.
- [41] Poon CS, Lam L, Kou SC, Wong YL, Wong R. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cem Concr Res* 2001;31(9):1301–6.
- [42] Ye G, Lura P, van Breugel K. Modelling of water permeability in cementitious materials. *Mater Struct* 2006;39(9):877–85.
- [43] Chindaprasit P, Rukzon S. Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. *Constr Build Mater* 2008;22(8):1601–6.
- [44] Frías M, Cabrera J. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. *Cem Concr Res* 2000;30(4):561–9.

2. Napia, C. , Sinsiri, T.* , Jaturapitakkul C., Chindaprasirt, P., 2012, Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder, Waste Management, 32 (2012), 1459-1467. (IF= 2.353)



Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder

Chuwit Napia^a, Theerawat Sinsiri^{a,*}, Chai Jaturapitakkul^b, Prinya Chindaprasirt^c

^a School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima 30000, Thailand

^b Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

^c Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 July 2011

Accepted 27 February 2012

Available online 31 March 2012

Keywords:

Leaching

Heavy metal

Solidified waste

Zeolite

ABSTRACT

This study investigated the properties of solidified waste using ordinary Portland cement (OPC) containing synthesized zeolite (SZ) and natural zeolite (NZ) as a binder. Natural and synthesized zeolites were used to partially replace the OPC at rates of 0%, 20%, and 40% by weight of the binder. Plating sludge was used as contaminated waste to replace the binder at rates of 40%, 50% and 60% by weight. A water to binder (w/b) ratio of 0.40 was used for all of the mixtures. The setting time and compressive strength of the solidified waste were investigated, while the leachability of the heavy metals was determined by TCLP. Additionally, XRD, XRF, and SEM were performed to investigate the fracture surface, while the pore size distribution was analyzed with MIP.

The results indicated that the setting time of the binders marginally increased as the amount of SZ and NZ increased in the mix. The compressive strengths of the pastes containing 20 and 40 wt.% of NZ were higher than those containing SZ. The compressive strengths at 28 days of the SZ solidified waste mixes were 1.2–31.1 MPa and those of NZ solidified waste mixes were 26.0–62.4 MPa as compared to 72.9 MPa of the control mix at the same age. The quality of the solidified waste containing zeolites was better than that with OPC alone in terms of the effectiveness in reducing the leachability. The concentrations of heavy metals in the leachates were within the limits specified by the US EPA. SEM and MIP revealed that the replacement of Portland cement by zeolites increased the total porosity but decreased the average pore size and resulted in the better containment of heavy ions from the solidified waste.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Currently, over 80% of the hazardous wastes are from industrial processes. The sludge, heavy metals, oils and infectious waste are the most abundant hazardous wastes. The amount of industrial waste and hazardous waste from industrial plants increases every year. The toxic wastes containing heavy metals are, therefore, causing serious environmental problems in the contamination of water, air and soil. It is an issue that deserves attention to find ways to properly and appropriately capture the waste.

The hazardous waste water from industries is released from industrial facilities and is also causing critical environmental problems. The treatment processes could reduce the concentrations of the toxic waste depending on the condition of the sediment's dry residue. However, the final disposal of the waste sediment is still not safe in terms of storage and transportation because some heavy metals remain unstable and may leak into the environment. To solve the problem, the method of reducing or storing hazardous

toxic waste is required to stop the leaching of toxic substances to the environment.

Solidification is a process used to treat hazardous waste from industrial plants, particularly hazardous substances or inorganic substances contaminated by heavy metals. The hazardous substances are stored in the structure by chemical bonding which neutralizes them and reduces the chance of spreading. The placeholder used in this process is normally Portland cement blended with pozzolanic materials such as fly ash, rice husk ash and silica fume. Solidification eases the safe transport of the solid cast mass and allows disposal in a landfill.

Zeolites are framework silicates consisting of interlocking tetrahedrons of SiO₄ and AlO₄. The alumino-silicate structure is negatively charged and attracts the positive ions that reside within the zeolites. This results in large vacant spaces or cages in their structures that allow space for large cations such as sodium, potassium, barium, calcium and even relatively large molecules as well as cation groups of water, ammonia, carbonate ions and nitrate ions (Feng et al., 2000). The spaces are interconnected and form long and wide channels of various sizes depending on the minerals. These channels allow easy movement of the resident ions and molecules into and

* Corresponding author. Tel.: +66 4422 4420; fax: +66 4422 4607.
E-mail address: sinsiri@sut.ac.th (T. Sinsiri).

Table 1
Sample mix proportions (by weight).

Binder			S (%)	w/b	Symbol
OPC (%)	SZ (%)	NZ (%)			
100	–	–	–	0.4	OPC100
			40	0.4	OPC40S
			50	0.4	OPC50S
			60	0.4	OPC60S
80	20	–	–	0.4	OPC20SZ
			40	0.4	OPC20SZ40S
			50	0.4	OPC20SZ50S
			60	0.4	OPC20SZ60S
60	40	–	–	0.4	OPC40SZ
			40	0.4	OPC40SZ40S
			50	0.4	OPC40SZ50S
			60	0.4	OPC40SZ60S
80	–	20	–	0.4	OPC20NZ
			40	0.4	OPC20NZ40S
			50	0.4	OPC20NZ50S
			60	0.4	OPC20NZ60S
60	–	40	–	0.4	OPC40NZ
			40	0.4	OPC40NZ40S
			50	0.4	OPC40NZ50S
			60	0.4	OPC40NZ60S

out of the structure. The zeolites are thus characterized by their ability to lose and absorb water without damaging their crystal structures (Quanlin and Naiqian, 2005).

Clinoptilolite is a naturally occurring zeolite that forms through the devitrification (the conversion of glassy material to crystalline material) of volcanic ash in lake and marine waters. It is the most studied of all zeolites and is widely regarded as the most useful. Clinoptilolite has a particularly high cation exchange capacity which provides many useful properties (Poon et al., 2000). Clinoptilolite is used in many applications such as chemical sieves, gas absorbers, feed additives, food additives, odor control agents and water filters for municipality, residential drinking water and aquariums (Feng and Peng, 2005). Clinoptilolite is well suited for these applications because of its large amount of pore space, high resistance to extreme temperatures and chemically neutral basic structure.

Sludge produced by the metal plating industry is generally considered to be "hazardous waste" because of its toxic heavy metal content. Solidification techniques applied prior to the deposition of this waste in landfills provide good results allowing the safe disposal of inorganic sludge. The use of materials such as zeolite with its pozzolanic property and the ability to bind metal ions generally gives a good performance. The solidification can store a large amount of sludge and help protecting the environment. This study, therefore, aims to investigate an effective solidification technique for sludge from a metal plating factory using both natural and synthesized zeolites in corporation with Portland cement.

2. Experimental investigation

2.1. Materials

The materials used were ordinary Portland cement (OPC) per ASTM C150, sodium aluminum silicate ($\text{Na}_{56}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}$) as synthesized zeolite (SZ), clinoptilolite ($(\text{Na,K,Ca})_6(\text{Si-Al})_{36}\text{O}_{72}\cdot 20\text{H}_2\text{O}$) as natural zeolite (NZ), sludge (S) from the treatment of wastewater from a nickel plating plant and tap water. The S contained 35% water and 65% solid. It was dried and then sieved through a No. 100 sieve.

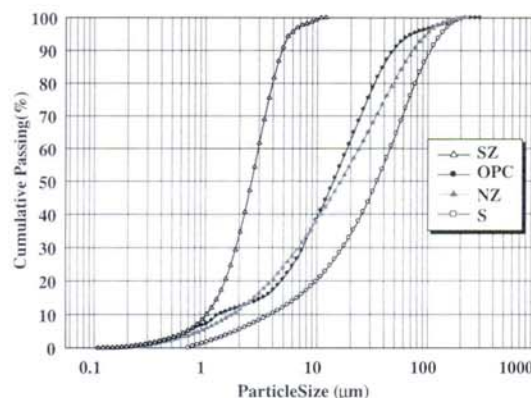


Fig. 1. Particle size distribution of OPC, SZ, NZ and S.

2.2. Mixture proportions

The sludge waste was solidified using OPC containing SZ and NZ as a binder. Zeolites were used to partially replace OPC at rates of 0%, 20%, and 40% by weight of the binder. The plating sludge was used to replace the binders at the rates of 40%, 50% and 60% by weight. A constant water to binder (w/b) ratio of 0.40 was used. The pastes were mixed in a mechanical mixer, and the specimens were cast in 50-mm cube molds. The fresh samples were covered with a plastic sheet to prevent water evaporation. After casting for 24 h, the samples were removed from the molds and cured in saturated lime water (Table 1).

3. Test programs

3.1. Specific gravity and particle size

The specific gravity of OPC, SZ, NZ and S was measured in accordance with ASTM C188, and their particle sizes were measured using laser particle size analysis.

3.2. Normal consistency

The normal consistency of the pastes was measured in accordance with ASTM C187 using Vicat apparatus.

3.3. Compressive strength

The compressive strength of the solidified waste was tested in accordance with ASTM C109 at ages of 7, 28, and 90 days. Five samples were tested for each age group.

Table 2
Specific gravity, median particle size and surface area of OPC, SZ, NZ and S.

Sample	Specific gravity	Mean particle size d_{50} (μm)	Surface area ^a (cm^2/g)
OPC	3.15	14.12	2600
SZ	1.87	2.51	32,500
NZ	2.09	16.17	5400
S	2.14	34.81	1900

^a BET analysis.

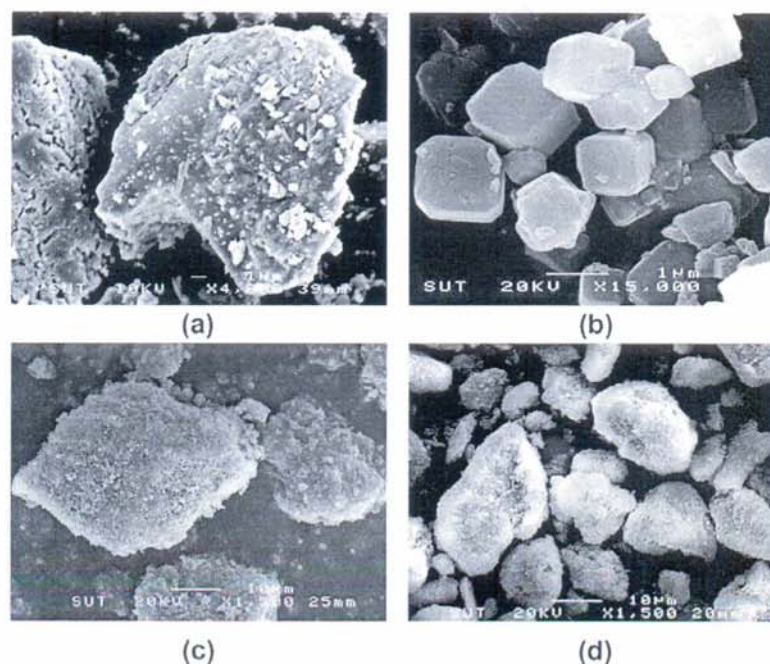


Fig. 2. SEM micrographs of (a) OPC at 4000 times, (b) SZ at 15,000 times, (c) NZ at 1500 times and (d) S at 1500 times.

Table 3
Chemical composition of materials.

Chemical composition (%)	OPC	SZ	NZ	S
SiO ₂	19.85	65.3	75.32	5.53
Al ₂ O ₃	4.49	26.18	10.28	3.78
Fe ₂ O ₃	3.56	0.03	2.66	–
CaO	66.96	0.12	3.95	25.32
MgO	1.36	0.08	1.2	–
K ₂ O	0.34	2.64	4.29	–
Na ₂ O	–	1.87	0.89	–
NiO	–	–	–	40.88
CuO	–	–	–	13.08
ZnO	–	–	–	10.33
CrO	–	–	–	0.64
LOI	0.98	5.65	2.3	0.44

3.4. Scanning electron microscopy (SEM)

A JEOL scanning electron microscope (model JSM6400) was used to examine the phase development and microstructure of the solidified plating waste. The paste cubes at the ages of 7 and 28 days were broken and the fractions in the middle part of the specimens were used for the analyses. The solid was placed on a brass stub sample holder with double stick carbon tape. Then, the sample was dried using infrared light for 5 min. Subsequently, the sample was coated with a layer of gold approximately 20–25 Å thick using a blazer sputtering coater. Micrographs were recorded at 12 kV and 500–10,000× magnifications (Chindaprasirt et al., 2005).

3.5. X-ray diffractometer (XRD) and X-ray fluorescence (XRF) analyses

The XRD scans were performed for 2θ° between 10° and 70°, with an increment of 0.03°/step and a scan speed of 0.5 s/step.

XRD analysis using Bruker's TOPAS software and using wavelength dispersive XRF (WDXRF). The positions of the diffraction peaks were identified by comparison to reference database compounds (Chindaprasirt et al., 2005).

3.6. Mercury intrusion porosimetry procedure (MIP)

The pore diameter distribution in the hardened cement pastes was measured by mercury intrusion porosimetry (MIP) at a pressure capacity of 228 MPa. After curing for 7, 28 and 90 days, the samples were split from the middle portion of the hardened blended cement paste. To stop the hydration reaction, the samples were submerged directly into liquid nitrogen for 5 min and were then evacuated at a pressure of 0.5 Pa at –40 °C for 48 h. This method has been used previously to stop the hydration reaction of cement paste (Chindaprasirt et al., 2007).

3.7. Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP)

The metal leaching from the solidified plating waste cured for 7, 28 and 90 days and was assessed using the TCLP as defined by the US EPA (Li et al., 2001). The samples were crushed to reduce the particle size to less than 9.5 mm. The crushed sample was extracted using an acetic acid solution (pH 2.88) in a volume with a weight equal to 20 times the weight of the sample. The extraction vessels were rotated in an end-over-end manner at 30 rpm for 18 h. The leachate was filtered through a 0.45-μm membrane filter to remove suspended solids and was then divided into two portions. One portion was used for a pH measurement, and the other was used for the determination of the metals present in the leachate by ICP-AES. Each extraction was performed in triplicate, and the average value was reported to ensure the reproducibility of the data (Asavapisit et al., 2005).

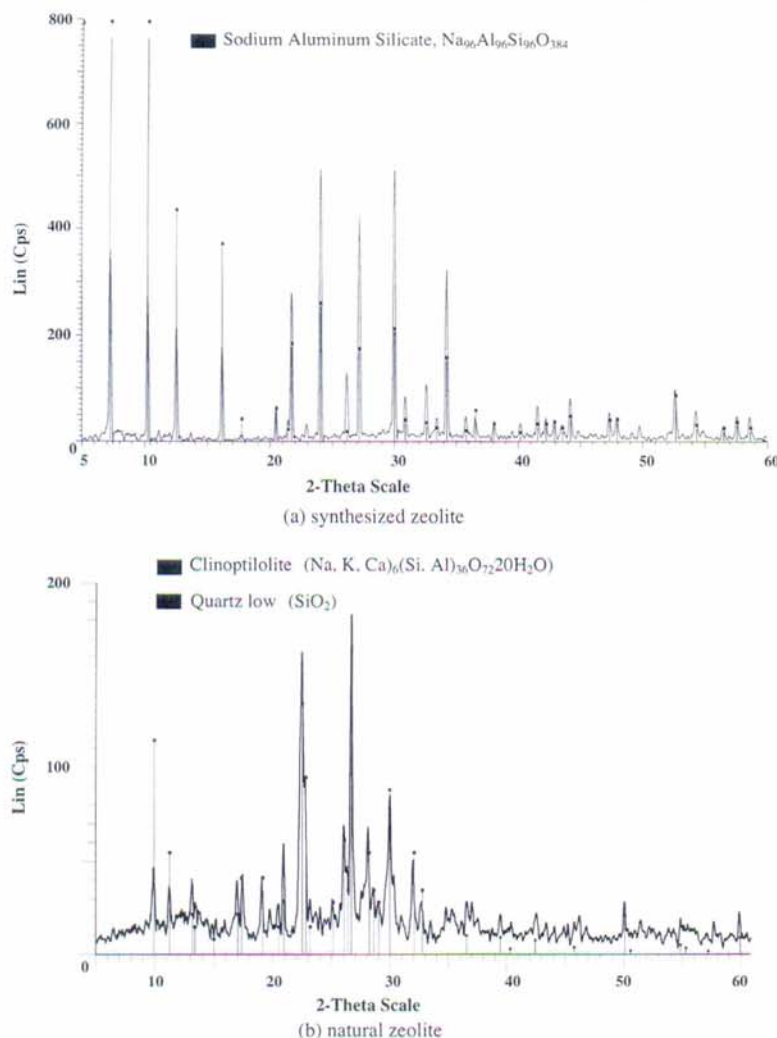


Fig. 3. XRD patterns of synthesized zeolite and natural zeolites.

4. Results and discussion

4.1. Properties of materials

4.1.1. Physical results for OPC, SZ, NZ and S

The specific gravity and median particle size (d_{50}) of the OPC, SZ, NZ and S are shown in Table 2. The median particle size (d_{50}) of the OPC was approximately 14.1 μm , while those of SZ, NZ and S were 2.5, 16.2 and 34.8 μm , respectively. The surface areas of the OPC, SZ, NZ and S were 2600, 32,500, 5400 and 1900 cm^2/g , respectively. The particle size distribution for the OPC, SZ, NZ and S was measured with a Mastersizer and is graphically shown in Fig. 1. For the OPC, NZ and S, the particle shape was solid and angular, whereas the surface of the SZ was smooth and exhibited a hexagonal character (Fig. 2).

4.1.2. Chemical composition and material patterns

Table 3 shows the chemical composition of the OPC, SZ, NZ and S, which was analyzed by XRF. SZ and NZ were found to be mainly

SiO_2 and Al_2O_3 . As can be seen, these two components were 90% for SZ and 85% for NZ. Additionally, the main elements of S were NiO (40.88%), CaO (25.32%), CuO (13.08%) and ZnO (10.33%).

Fig. 3 shows the XRD patterns for the SZ and NZ. The figure indicates that the intensity peak of sodium aluminum silicate ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}$) and $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_6(\text{Si}, \text{Al})_{36}\text{O}_{72} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$ appeared at 0–60° (2θ).

4.2. Properties of pastes

4.2.1. Normal consistency of pastes

The normal consistency of OPC100 was found to be 25.5%. Higher replacement of SZ and NZ resulted in a higher normal consistency. For example, the normal consistencies of pastes OPC20SZ, OPC40SZ, OPC20NZ and OPC40NZ were 32.4%, 34.4%, 31.2% and 32.0%, respectively. The normal consistency of pastes containing SZ and NZ, which have a higher fine content, was higher than those containing coarser zeolites. This occurs because the particles of SZ and NZ have a higher fine content and a higher porosity; thus, they absorb more water, which results in greater water consumption.

Table 4
Setting time and compressive strength of the solidified wastes.

Sample	Time (min)		Compressive Strength (MPa)		
	Initial setting time	Final setting time	7-day	28-day	90-day
OPC100	132	181	53.8	72.9	79.4
OPC40S	148	192	0.9	1.3	1.5
OPC30S	151	195	0.6	1.0	1.2
OPC60S	154	197	0.5	0.8	1.1
OPC20SZ	141	185	21.6	31.1	38.2
OPC20SZ40S	149	186	2.1	13.5	16.1
OPC20SZ50S	152	186	1.3	4.9	10.7
OPC20SZ60S	156	185	0.8	1.4	2.0
OPC40SZ	143	187	10.2	23.4	26.9
OPC40SZ40S	149	188	0.3	6.0	17.4
OPC40SZ50S	151	189	0.3	4.2	13.6
OPC40SZ60S	152	190	0.1	1.2	3.2
OPC20NZ	133	183	52.0	62.4	71.1
OPC20NZ40S	135	184	43.4	57.3	65.2
OPC20NZ50S	135	185	35.7	49.1	58.4
OPC20NZ60S	136	186	30.5	41.3	50.3
OPC40NZ	134	184	40.5	50.7	61.3
OPC40NZ40S	135	184	19.5	36.2	43.4
OPC40NZ50S	136	185	15.2	31.5	39.3
OPC40NZ60S	136	187	12.1	26.0	33.8

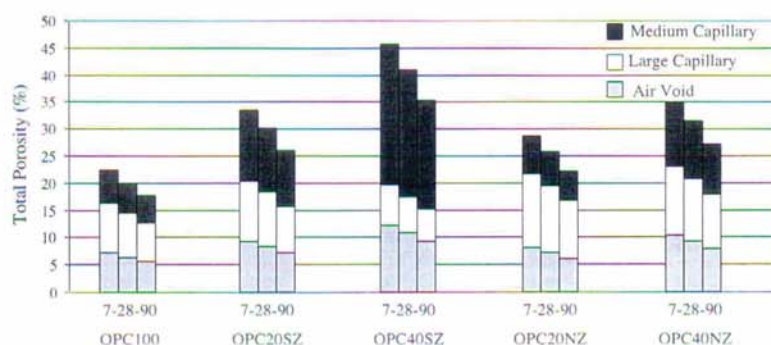


Fig. 4. Total porosity of cement paste and blended cement pastes at 7, 28 and 90 days.

4.2.2. Setting time of blended cement pastes and pastes containing solidified plating waste

The setting times of the blended cement pastes containing SZ and NZ were similar to those of the Portland cement paste. For example, the final setting times of OPC paste, was 181 min. The initial setting time of mixes with SZ was 185 and 187 min and those with NZ were 183 and 184 min. For the incorporation of S, the initial setting time was increased to 148–154 min and the final setting times to 191–192 min. The similar or slightly increase in the setting time were probably due to the pastes mixed with zeolites have higher water contents at normal consistency than Portland cement paste. Moreover, the use of zeolite to replace Portland cement resulted in a smaller amount of cement and thus caused a longer setting time to be observed. For the use of S, the reductions in the amount of cement and pozzolan resulted in an even smaller amount of cementing material and hence the setting times increased.

4.2.3. Compressive strength of the blended cement pastes

Table 4 shows the development of compressive strength in the cement paste in relation to the cement replacement level for the case of synthesized zeolites and natural zeolites. Concerning the use of SZ and NZ, replacement of 20% and 40% zeolites led to lower

compressive strengths at all ages. It was observed that the compressive strengths of the cement pastes containing NZ were higher than those with SZ for the same replacement conditions and age, because more silica dioxide (the main component of nat-

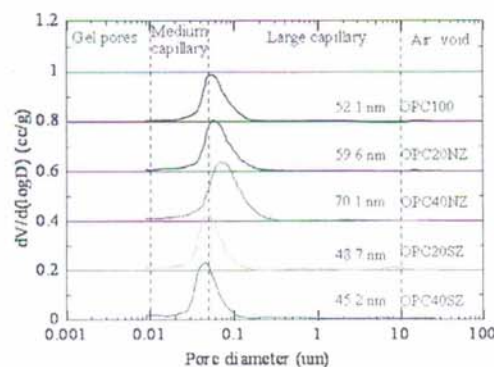


Fig. 5. Relationship between pore diameter and volume intruded of the blended cement pastes at 28 days.

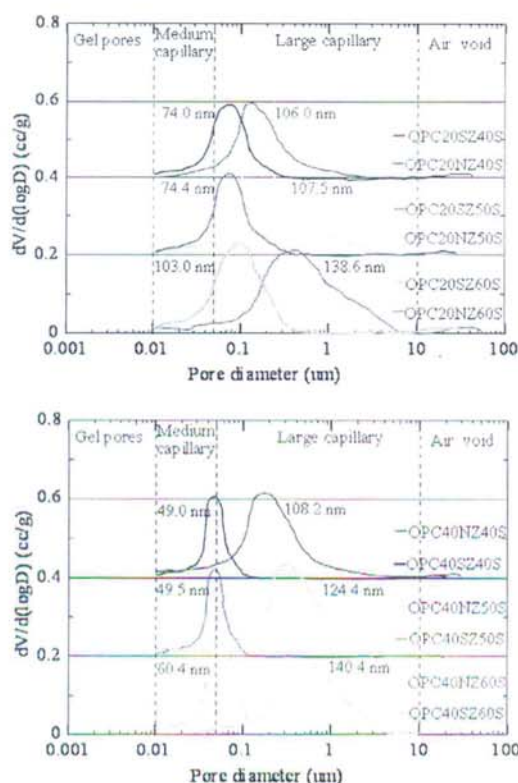


Fig. 6. Relationship between pore diameter and volume intruded of the solidified plating wastes using OPC, NZ and SZ as binders at 28 days.

ural zeolite) is contained than in the synthesized zeolites and cement. The pozzolanic activity of zeolite normally depends on the amount of the active amorphous phases of silica and alumina. As indicated in the XRD patterns in Fig. 3, the amount of the active amorphous phases of NZ is higher than that of SZ. The results of the compressive strengths of pastes OPC20SZ, OPC40SZ, OPC20NZ and OPC40NZ at 28 days of 31.1, 23.4, 62.4 and 50.7 MPa, respectively confirms the observation.

4.2.4. Compressive strength of pastes containing solidified plating waste

The experimental results showed that the rates of strength development in the solidified waste using SZ and NZ as solidification binders were higher than that with OPC. The composition of OPC hydration product is dominated by calcium silicate hydrate (C–S–H) which typically comprises 70–80% of the product (Deja, 2002). The metals may react with calcium hydroxide to produce insoluble compounds as a form of metal hydroxide; this mechanism inhibited the hydration and decreased the strength of the wastes, especially when the concentration of metal in the solidified waste was more than 0.3% by weight (Li et al., 2001; Asavapisit et al., 2001; Qin et al., 2003). The strength of these solidified wastes could be very low due to the inhibition of the cement reactions by the metal ions in the waste. Additionally, the strength of the solidified waste decreased when the amount of waste increased. For example, the strengths of pastes OPC20NZ40S, OPC20NZ50S, and OPC20NZ60S at 28 days were 57.3, 49.1 and 41.3 MPa, respectively. The results indicated that the plating sludge can be loaded in a pro-

portion as high as 60 wt.% of the cement blended with 40 wt.% SZ and NZ at a 28-day compressive strength that meets the minimum requirement for disposal in a secure landfill (0.34 MPa).

4.2.5. Porosity and average pore diameter of blended cement pastes

The total porosity, capillary porosity and average pore diameter of the pastes at 7, 28 and 90 days are shown in Fig. 4. The incorporation of SZ and NZ increased the total porosity of the blended cement pastes as compared with the OPC paste at all ages. The total porosity increased with an increase in replacement by SZ and NZ. The increase in total porosity as a result of the utilization of zeolite was mainly due to the decrease in capillary porosity. Note that the compressive strength decreased, while the porosity of the blended cement paste increased (Poon et al., 2000; Isaia et al., 2003). The capillary porosity of the cement paste blended with NZ at all replacement levels decreased in comparison to that with SZ.

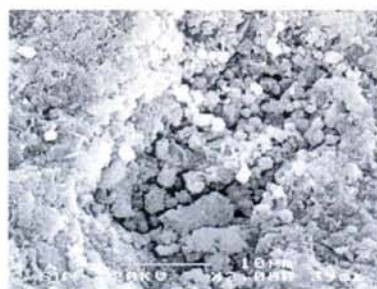
Fig. 4 shows the effect of the percent replacement of SZ and NZ on the average pore size in the cement pastes at age 7, 28 and 90 days. It can be observed that the average pore size of the additives decreased at the respective period of hydration because of the gradual filling of large pores by hydration products of cementitious materials; however, the extent of the decrease was variable. A greater decrease was observed for replacement by SZ, whereas the decrease was comparatively less for replacement by NZ. The average pore size tends to decrease as the percent replacement increases. The relationship between the pore diameter and incremental pore volume of the blended cement paste at 28 days is shown in Fig. 5. The critical pore sizes of the OPC100, OPC20NZ and OPC40NZ pastes were 52.1, 59.6 and 70.1 nm, respectively, and the pores were distributed as large capillary pores. The critical pore sizes of the OPC20SZ and OPC40SZ pastes were 48.7 and 45.2 nm, respectively, and these were distributed as medium capillary pores. These values were lower than that of the OPC100 paste. This suggests that the greater fineness of the zeolite was more effective in reducing the pore diameter of the paste. The results also showed that the blended cement paste containing zeolite presented a smaller pore size than the Portland cement paste. The pore size decreased with an increase in zeolite replacement. Similar results have also been reported in other studies (Poon et al., 1997, 1999a,b).

The relationship between the pore diameter and incremental pore volume of the solidified waste using OPC, SZ and NZ as binders at 28 days is shown in Fig. 6. The critical pore sizes of OPC20SZ40S, OPC20SZ50S and OPC20SZ60S were 74.0, 74.4 and 103.0 nm, respectively, and these pores were distributed as large capillary pores. Additionally, the critical pore sizes of the OPC40SZ40S, OPC40SZ50S and OPC40SZ60S pastes were 49.0, 49.5 and 60.4 nm, respectively. These results suggested that the increase in the amount of the plating waste resulted in increase in pore diameter of the paste. In contrast, the increase in the amount of SZ resulted in the decrease in the pore diameter of the paste.

As shown in Fig. 6, the critical pore sizes of OPC20NZ40S, OPC20NZ50S, OPC20NZ60S, OPC40NZ40S, OPC40NZ50S and OPC40NZ60S were 106.0, 107.5, 138.6, 108.2, 124.4 and 140.4 nm, respectively. These results suggested that as the amount of plating sludge increased, the pore diameter of the paste increased.

4.2.6. Fracture surface analysis by scanning electron microscopy (SEM)

The microstructure morphology of the fractured surface was determined by SEM for OPC100, OPC20SZ, OPC40SZ, OPC20NZ and OPC40NZ pastes at 28 days (see Fig. 7). The microstructure of OPC100 was porous and exhibited many voids, while OPC20SZ, OPC40SZ, OPC20NZ and OPC40NZ showed uniform and dense pastes. The incorporation of zeolites resulted in the increased hydration and pozzolanic reaction and thus reduced the pore sizes.



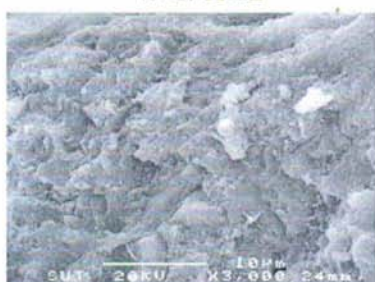
(a) OPC100



(b) OPC20SZ



(c) OPC40SZ

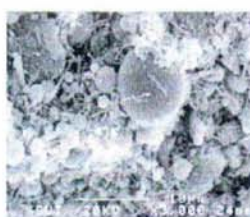


(d) OPC20NZ

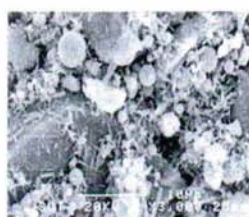


(e) OPC40NZ

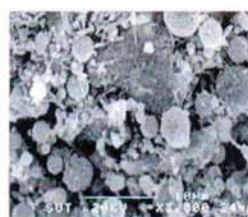
Fig. 7. Fracture surface of the blended cement pastes at 28 days.



(a) OPC40S



(b) OPC50S



(c) OPC60S



(d) OPC20NZ40S



(e) OPC20NZ50S



(f) OPC20NZ60S

Fig. 8. Fracture surfaces of the solidified plating wastes at 28 days.

Table 5
Leachate pHs in TCLP leachates.

Sample	pH		
	Age 7 days	Age 28 days	Age 90 days
OPC100	6.3	6.5	6.6
OPC40S	6.4	6.6	6.7
OPC50S	7.1	7.2	7.2
OPC60S	7.7	7.7	7.7
OPC20SZ40S	7.6	7.5	7.4
OPC20SZ50S	7.9	7.9	7.8
OPC20SZ60S	7.8	7.9	7.9
OPC40SZ40S	9.8	9.5	9.5
OPC40SZ50S	8.8	8.8	8.7
OPC40SZ60S	8.5	8.5	8.6
OPC20NZ40S	11.4	11.5	11.5
OPC20NZ50S	11.2	11.2	11.2
OPC20NZ60S	11.1	11.1	11.1
OPC40NZ40S	11.2	11.1	11.1
OPC40NZ50S	10.8	10.8	10.9
OPC40NZ60S	9.7	9.6	9.6

Thus, replacing the Portland cement with some zeolites resulted in a dense paste.

Fig. 8 shows the fractured surfaces of the solidified plating waste at 28 days, as determined by SEM. The paste with more

plating sludge showed a lower density because the proportion of binder in the mixture decreased. Because heavy metals inhibit hydration, the cement reaction was not completed, and some heavy metals did not react (Bishop et al., 2003). The replacement of Portland cement by zeolites showed a higher density than used Portland cement alone. The consequences of this are that the solidified waste was more porous, and the compressive strength of the solidified waste decreased significantly compared with those with the absence of plating sludge in the mixture.

4.2.7. Leaching analysis

Table 5 shows the leachate pH values in the TCLP leachates at 7, 28 and 90 days. The pH of the solution extracted from the solidified waste is increased from the initial pH. For example, the pH of pastes OPC100, OPC40S, OPC20SZ40S and OPC20NS40S pastes at 28 days were 6.5, 6.6, 7.5 and 11.5, respectively. The pH values increased because calcium hydroxide in the pores dissolved into the acid. Fig. 9 shows the metal concentrations in TCLP leachates, the results showed that the concentration of Cr in the leachate for all solidified waste samples was lower than the limit specified by the standards of the US EPA (<5.0 mg/l). It should be noted here that the untreated sludge also meets US EPA criteria for Cr. For example, the concentrations of Cr in the leachate of pastes

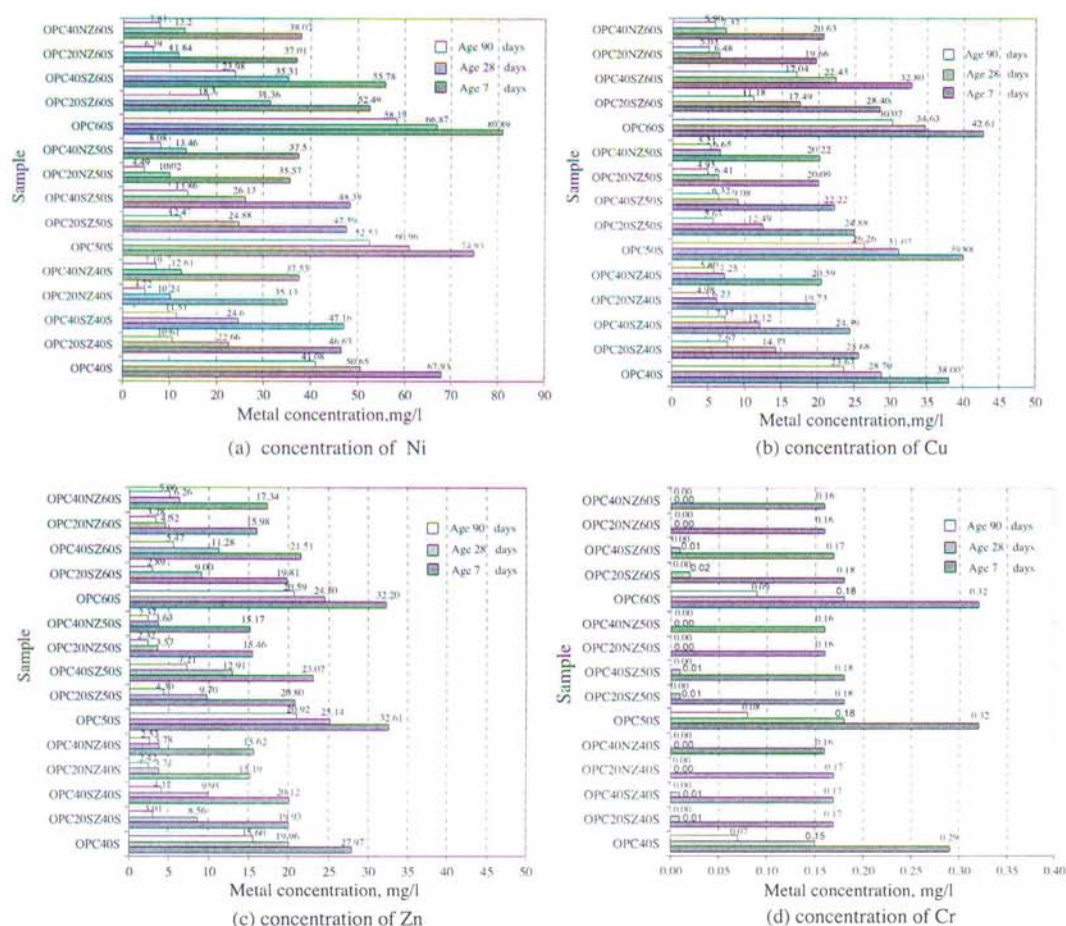


Fig. 9. Metal concentrations in TCLP leachates.

OPC20SZ40S, OPC20SZ50S, OPC20NZ40S and OPC20SZ50S at 7 days were 0.17, 0.18, 0.17 and 0.16 mg/l respectively. The Ni, Cu and Zn have no regulatory standards because these three metals are not classified as hazardous waste by the US EPA. The results showed that when sample age increased the effectiveness in reducing the leachability increased. For example, it was detected that OPC20NZ40S contained Ni of 35.13 mg/l at 7 days and this decreased to only 10.24 mg/l at 90 days. Using NZ as a binder effectively reduced leaching more than using SZ. For example, the concentrations of Ni in the leachate of pastes OPC40NZ40S and OPC40SZ40S at 28 days were 12.61 and 24.60 mg/l respectively. Additionally, the metal concentrations in the TCLP leachates that were extracted from the cement-based solidified plating waste were much lower than that extracted from the plating sludge. Effectiveness in reducing the leachability of solidified waste using SZ and NZ to replace OPC as a binder was higher than 80.0% at all ratios. This was because SZ and NZ mainly composed of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 ; and the structures of zeolites consist of three-dimensional frameworks of SiO_4 and AlO_4 tetrahedra. The aluminum ion is small enough to occupy the position in the center of the tetrahedron of four oxygen atoms, and the isomorphous replacement of Si^{4+} by Al^{3+} produces a negative charge in the lattice. The net negative charge is balanced by the exchangeable cation (Cheng and Bishop, 1992; Peralta et al., 1992). Thus, the effectiveness in reducing the leachability was higher using SZ and NZ than that with OPC alone. These results indicated that during the ion-exchange process, the metal ions had to move through the pores of zeolite mass and through channels of the lattice, and they had to replace exchangeable cations. The diffusion was fast through the pores, but was retarded when the ions moved through the smaller diameter channels. In this case, the metal ions uptake could mainly be attributed to the ion-exchange reactions in the microporous minerals of zeolite (Erdem et al., 2004).

5. Conclusions

On the basis of the results of this study, the following conclusions can be drawn.

1. The blended cement pastes containing synthesized zeolite and natural zeolite exhibited higher total porosity and capillary porosity than those containing Portland cement alone. This resulted in the lower compressive strengths of blended cement pastes compared to that of the control Portland cement paste.
2. The pore size distribution and the average pore diameter of the blended cement paste containing zeolites decreased with an increase in zeolite content which resulted in the dense structure of the paste. This effect was caused by the hydration reaction and the pozzolanic reaction.
3. The use of zeolites to partially replace Portland cement as a solidification binder produced solidified waste with lower strength. However, it is more effectiveness in terms of leachability than the use of Portland cement alone.
4. The application of natural zeolite as a binder with Portland cement to reduce the leaching of heavy metals resulted in a better outcome than using synthetic zeolites with cement, or cement alone. The use of natural zeolite with Portland cement

as a binder to solidify waste sludge is appropriate as the leachability was reduced and the compressive strength complied with the US EPA standard.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the financial support by the Higher Education Research Promotion and National Research University Project of Thailand, Office of the Higher Education Commission, through the Advanced Functional Materials Cluster of Khon Kaen University, and the Strategic Scholarships for Frontier Research Network for the Joint Ph.D. Program, Thai Doctoral degree. Thanks are also extended to the Thailand Research Fund (TRF) for financial support under the TRF Senior Research Scholar, Grant No. RTA5480004 and the TRF New Researcher Scholar, Grant No. MRG5280178.

References

- Asavapisit, S., Nanthamonty, W., Polprasert, C., 2001. Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wastes. *Cement and Concrete Research* 31, 1147–1152.
- Asavapisit, S., Naksrichum, S., Harnwajanawong, N., 2005. Strength, leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified plating sludge. *Cement and Concrete Research* 35, 1042–1049.
- Bishop, M., Bott, S.G., Barron, A.R., 2003. A new mechanism for cement hydration inhibition: solid-state chemistry of calcium nitrilotris(methylene)-triphosphonate. *Chemistry of Materials* 15 (16), 3073–3088.
- Cheng, K.Y., Bishop, P.L., 1992. Metals distribution in solidified/stabilized waste forms after leaching. *Hazardous Waste and Hazardous Materials* 9, 163–312.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T., 2005. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites* 27, 425–428.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T., 2007. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials* 21, 1534–1541.
- Deja, J., 2002. Immobilization of Cr^{6+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} and Pb^{2+} in alkali-activated slag binder. *Cement and Concrete Research* 32, 1971–1979.
- Erdem, E., Karapinar, N., Donat, R., 2004. The removal of heavy metal cations by natural zeolites. *Journal of Colloid and Interface Science* 280, 309–314.
- Feng, N.-Q., Peng, G.-F., 2005. Applications of natural zeolite to construction and building materials in China. *Construction and Building Materials* 19, 579–584.
- Feng, N.-Q., Xing, F., Leng, F.-G., 2000. Zeolite ceramsite cellular concrete. *Magazine of Concrete Research* 52, 117–122.
- Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G., Moraes, R., 2003. Physical and pozzolanic action of mineral addition on the mechanical strength of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research* 25, 69–76.
- Li, X.D., Poon, C.S., Sun, H., Lo, I.M.C., Kirk, D.W., 2001. Heavy metal speciation and leaching behaviours in cement based solidified/stabilized waste materials. *Journal of Hazardous Materials A* 82, 215–230.
- Peralta, G.L., Ballsteros, F.C., Cepeda, M.L., 1992. Treatment and Disposal of Heavy Metal Waste Using Cementitious Solidification. *Nation Engineering Center, Philippines*, pp. 2–37.
- Poon, C.S., Wong, Y.L., Lam, L., 1997. The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly ash cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials* 11, 383–393.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S., 1999a. A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement paste. *Construction and Building Materials* 13, 427–432.
- Poon, C.S., Lam, L., Wong, Y.L., 1999b. Effect of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete. *ACI Material Journal*, 197–205.
- Poon, C.S., Lam, L., Wong, Y.L., 2000. A study on high strength concrete prepared with large volume of low calcium fly ash. *Cement and Concrete Research* 30, 447–455.
- Qin, G., Sun, D.D., Tay, J.H., 2003. Characterization of mercury- and zinc-doped alkali-activated slag matrix Part II. Zinc. *Cement and Concrete Research* 33, 1257–1262.
- Quanlin, N., Naqian, F., 2005. Effect of modified zeolite on expansion of alkaline silica reaction. *Cement and Concrete Research* 35, 1784–1788.

3. Sinsiri, T.*, Phoo-ngernkham, T., Sata V., Chindaprasirt, P., 2012, The effect of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar, *Computer and Concretes*, Vol. 9, No.6, pp. 427-437. (IF= 0.763)

The effects of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar

Theerawat Sinsiri^{*1}, Tanakorn Phoo-ngernkham¹, Vanchai Sata²
and Prinya Chindaprasirt²

¹School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhonratchasima 30000, Thailand

²Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Dept. of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

(Received April 7, 2011, Revised July 29, 2011, Accepted August 22, 2011)

Abstract. This article presents the effect of replacement fly ash (FA) with diatomite (DE) on the properties of geopolymer mortars. DE was used to partially replace FA at the levels of 0, 60, 80 and 100% by weight of binder. Sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH) solutions were used as the liquid portion in the mixture in order to activate the geopolymerization. The NaOH concentrations of 15M, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios of 1.5 by weight, and the alkaline liquid/binder (LB) ratios by weight of 0.40, 0.50, 0.60 and 0.70 were used. The curing at temperature of 75°C for 24 h was used to accelerate the geopolymerization. The flows of all fresh geopolymer mortars were tested. The compressive strengths and the stress-strain characteristics of the mortar at the age of 7 days, and the unit weights were also tested. The results revealed that the use of DE to replace part of FA as source material in making geopolymer mortars resulted in the increased in the workability, and strain capacity of mortar specimens and in the reductions in the unit weights and compressive strengths. The strain capacity of the mortar increased from 0.0028 to 0.0150 with the increase in the DE replacement levels from 0 to 100%. The mixes with 15M NaOH, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ of 1.5, LB ratio of 0.50, and using 75°C curing temperature showed 7 days compressive strengths 22.0-81.0 MPa which are in the range of normal to high strength mortars.

Keywords: geopolymer; diatomite; workability; compressive strength; strain capacity.

1. Introduction

Portland cement concrete is a mixture of Portland cement, water and aggregates. Nowadays, concrete is the most used construction material. However, the process of manufacturing of Portland cement consumes a large amount of energy and as a result releases a very large amount of green house gas to the atmosphere. The use of by-products or natural binders as cement replacement can, therefore, reduce the consumption of cement in concrete work. In the last decade, geopolymer binders have emerged as one of the possible alternative to cement binders for applications in concrete industry. Geopolymer is an inorganic binder material and can be produced by a polymeric reaction of alkali activating solution with silica and alumina in source material from geological origin or pozzolanic materials such as metakaolin, fly ash (FA) and rice husk ash (Davidovits 1991). The geopolymer mortar and concrete possess similar strength and appearance to those of normal

^{*} Corresponding author, Ph.D., E-mail: sinsiri@sut.ac.th

Portland cement. Their mechanical properties, fire resistance and acid resistance are superior to those of normal Portland mortar and concrete (Palomo *et al.* 1999, Hardjito and Rangan 2005).

Diatomite (DE) or diatomaceous earth is a sedimentary deposit with origin from sedimentation of single cell seaweeds. It is light in weight due to high porosity and is relatively attractive in dark-yellow shade due to high content of ferrous compound and semi-crystalline siliceous phase (Owen and Utha-aroon 1999). The particle size is therefore quite fine with cellular surface consisting of micro-pores (Antonides 1999). DE has been used as a good source material for lightweight brick, heavy metals removal and absorbent agent in wastewater treatment process (Pimraksa and Chindaprasirt 2009, Elden *et al.* 2010). The deposit of DE or diatomaceous earth clay in Lampang province in the north of Thailand is quite large with estimation at more than 100 million tons. The mineral composition consists primarily of silica with some alumina and ferrous oxide (Sierra *et al.* 2010). It is a pozzolan and should, therefore, be suitable source material for making geopolymer.

The annual output of lignite FA from Mae Moh power station in the North of Thailand is around 3 million tons. This FA consists mainly of SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 and CaO and some impurities. The use of fly ash as pozzolan in concrete is constantly increasing because it improves the properties of concrete, namely workability, durability and long term strength in hardened concrete (Rukzon and Chindaprasirt 2008, Yeh 2008). In addition, it has also been shown to be suitable as a source material for making good geopolymer (Chindaprasirt *et al.* 2007).

This research aims to study the preparation of FA and DE geopolymer. The DE could be used for the adjustment of the silica content in the mixture. The knowledge of the use of high calcium lignite FA and silica rich DE in producing geopolymer would be beneficial to the understanding and to the future applications of the materials.

2. Experimental details

2.1 Materials

Lignite fly ash (FA) from Mae Moh power station and raw DE from Lumpang in the north of Thailand, sodium hydroxide (NaOH), and sodium silicate (Na_2SiO_3) with 15.32% Na_2O , 32.87% SiO_2 and 51.81% H_2O were the materials used. The raw DE was calcined at 800°C for 6 hours in order to improve its characteristics. (Yilmaz and Ediz 2008, Zuhua *et al.* 2009). The 6 hours calcination was used since the shorter period was found to be insufficient as the calcined products was still not properly burnt. For longer calcination, the formation of crystal could be detected. In addition, tap water and local river sand with specific gravity of 2.69 were used for making geopolymer mortar. In order to minimize the effect of the liquid absorption of fine aggregate, the sand in saturated surface condition was used.

The chemical composition and physical properties of materials are given in Tables 1 and 2, respectively. The $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ content of the FA is 81.01% and the CaO content is high at

Table 1 Chemical composition of materials (by weight)

Materials	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO	SO_3	LOI
FA	43.87	26.33	10.81	12.69	1.23	1.10	-	-	2.74	1.23
DE	59.30	10.00	18.50	1.20	0.46	1.98	0.20	0.23	0.02	8.10

Table 2 Physical properties of materials

Physical properties	FA	DE	Sand
Specific gravity	2.41	2.33	2.69
Bulk density (kg/m ³)	973	490	1625
Median particle size (μm)	17.6	18.3	-
Blaine fineness (cm ² /g)	4300	12600	-

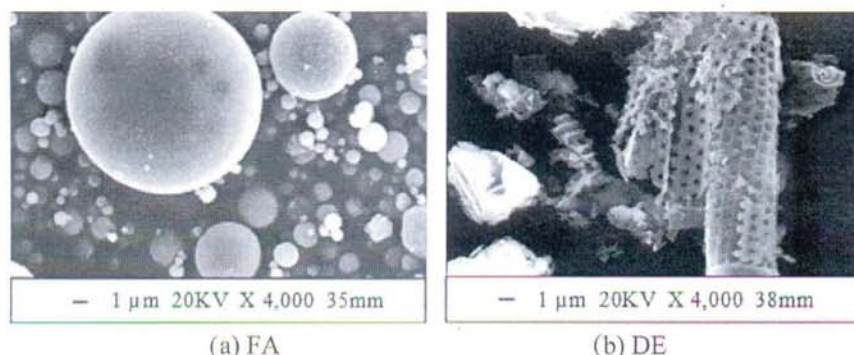


Fig. 1 The scanning electron micrographs of FA and DE

12.69% which is typical of the lignite FA. The DE consists of 59.30% SiO₂, 10.00% Al₂O₃ and 18.50% Fe₂O₃. FA has a mean particle size of 17.6 μm, a Blaine fineness of 4300 cm²/g and a specific gravity of 2.41. DE has a mean particle size of 18.3 μm, a Blaine fineness of 12600 cm²/g. Fig. 1 shows the scanning electron micrographs (SEM) of FA and DE. The FA particles are spherical and smooth in the surface while the DE particles consist of cellular porous particles with some small irregular shape plate-like particles.

2.2 Mix proportion and testing

All geopolymer mortars were made with sand to binder (FA+DE) ratio of 1.50. The FA100, FADE60, FADE80 and FADE100 mortars with corresponding FA:DE ratios of 100:0, 40:60, 20:80 and 0:100 were the mixes used. In addition, the effects of the *L/B* ratios on properties of geopolymer mortars were also studied.

The mixing was done in an air conditioned room at approximately 25°C to eliminate the possible effect of temperature variation. The NaOH and Na₂SiO₃ solutions were mixed before the start of the mixing. FA and DE were thoroughly mixed until the mixture was homogenous. Sand was incorporated into the blend of FA and DE and mixed for 1 minute. The prepared NaOH and Na₂SiO₃ solution was added and mixed for another 10 minutes. Right after the mixing, the flow values of fresh geopolymer mortar were the average of three samples and were tested in accordance with ASTM C 1437 (2003).

The fresh mortar was cast into 50 × 50 × 50 mm³ cube moulds. The specimens were compacted in two layers and tamping as described in the ASTM C 109 (2003). The specimens were immediately wrapped with vinyl sheet to protect moisture loss and kept in the controlled room at 25°C. The specimens were then placed in the oven for heat curing at 75°C for 24 hours. After the heat curing,

the specimens were put in the laboratory to cool down. They were demoulded the next day and kept in the control room. The compressive strengths of mortars were the average of three samples and were determined in accordance with ASTM C 109 (2003).

3. Results and discussions

3.1 Workability of geopolymer mortar

Fig. 2 shows the relationship between flow of geopolymer mortar and LB ratios at various replacement levels of DE. At low LB ratio, the geopolymer mortars were very stiff with low flow values between 2-16% for the LB ratio of 0.40 mortars. The workability of the mixes also increased with the increase the LB ratio. For example, the workable mortars with flow value of 85-126% were obtained with the LB ratio of 0.70. This result conforms to the previous research (Sathonsaowaphak *et al.* 2009) which explained that an increase in fluid medium content resulted in less particle interaction and increased the workability of the mixture. At the same LB ratio, the replacement FA with DE also increased the workability of mortar. At the LB ratio of 0.60, the flow of FA100, FADE60, FADE80 and FADE100 were 53, 82, 108 and 96%, respectively. The increasing of workability in mortar containing DE may be due to the low bulk density of DE as comparing with FA. The result also conformed to Torres and Garcia-Ruiz (2009) report that the use of lightweight pozzolan in cement mortar could be improved workability of mortar.

The empirical equations could be expressed for the workable geopolymer mortar with flow value (F) in terms of LB ratio with DE content of 0, 60, 80 and 100% as follows

$$\text{For DE}=0\%, F = 267.47(\text{LB}) - 103.35, (R^2 = 0.99) \quad (1)$$

$$\text{DE}=60\%, F = 334.65(\text{LB}) - 120.05, (R^2 = 0.95) \quad (2)$$

$$\text{DE}=80\%, F = 353.59(\text{LB}) - 116.26, (R^2 = 0.95) \quad (3)$$

$$\text{DE}=100\%, F = 345.72(\text{LB}) - 110.21, (R^2 = 0.83) \quad (4)$$

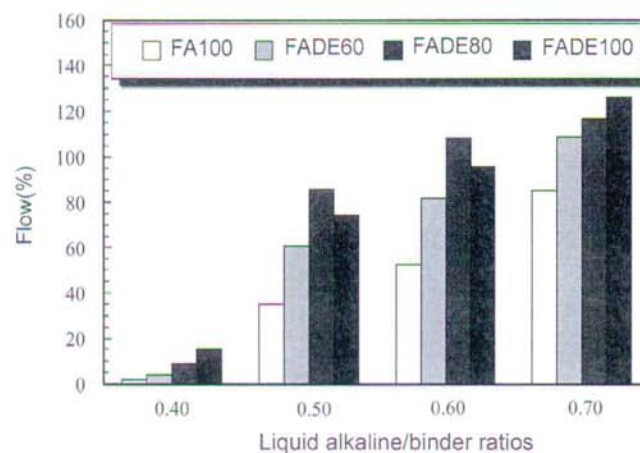
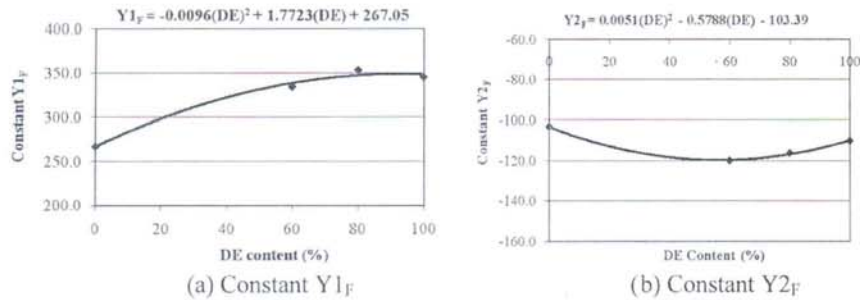


Fig. 2 Flows of geopolymer mortar with various LB ratios

Fig. 3 Relationship between constants $Y1_F$, $Y2_F$ and DE contents

The relationships of the flow value (F) and liquid alkaline/binder ratio (LB) in Eqs. (1)-(3) and (4) could be written as Eq. (5)

$$F = Y1_F(LB) + Y2_F \quad (5)$$

Where

$$Y1_F = -0.0096(DE)^2 + 1.7723(DE) + 267.05, \quad (R^2 = 0.99)$$

$$Y2_F = 0.0051(DE)^2 - 0.5788(DE) - 103.39, \quad (R^2 = 0.99)$$

F = flow value of geopolymer mortar (%)

DE = amount of DE between 0 to 100%

LB = liquid alkaline/binder ratio between 0.40 to 0.70

The constants $Y1_F$ and $Y2_F$ were obtained by curve fitting of the results from Fig. 3 for DE content of 0, 60, 80 and 100%. The results of workability in term of flow from this equation were compared to the actual test results as shown in Fig. 4. The relationship in Eq. 5 is, therefore, useful to predict the flow of geopolymer mortar at various LB ratio and amount of replacement FA with DE. The non-linear behavior of flow of FADE80 and FADE100 mixes were due to the large

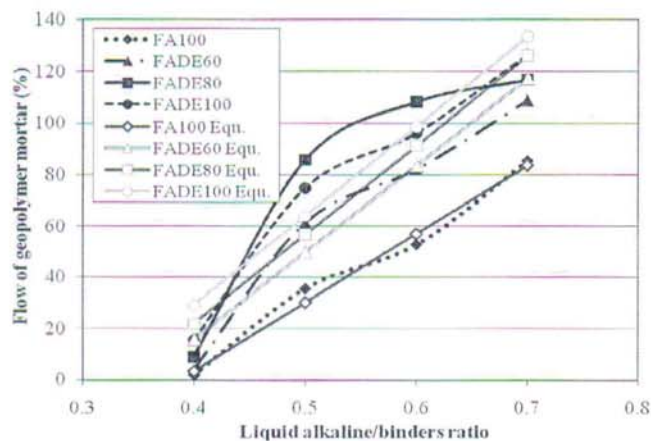


Fig. 4 Comparison of the flows of geopolymer mortar obtained from Eq. 5 and from experiment

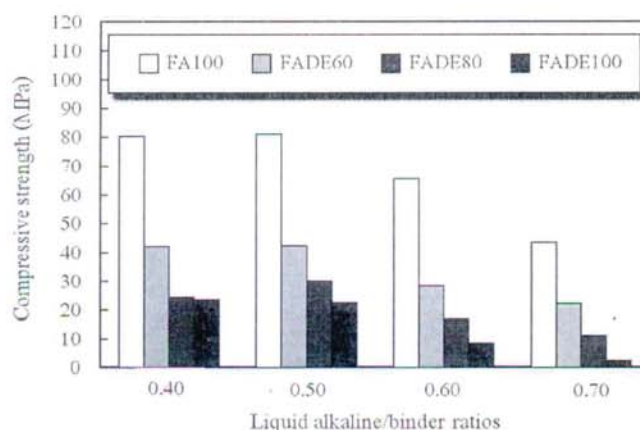


Fig. 5 Compressive strength of geopolymer mortar with various LB ratios

improvement of flow with high contents of DE of 80 and 100%. At 0.5 LB ratio, the large improvements of flow were obtained as a result of the large content of DE and an increase in the LB ratio. For higher LB ratios of 0.6 and 0.7, the small increases in the flow were obtained as they were approaching the obtainable maximum slump values.

3.2 The compressive strength of geopolymer mortar

The effect of LB ratios on 7 days compressive strength of geopolymer mortar at various DE contents is shown in Fig. 5. At the LB ratios of 0.40 and 0.50, the compressive strengths of the two series were almost the same. When the LB ratio was increased to 0.6 and 0.70, the compressive strengths of mortar decreased. For example, the 7 days compressive strength of FADE60 mortar at LB ratios of 0.40, 0.50, 0.60 and 0.70 were 42, 42, 28 and 22 MPa, respectively. Since, at high LB ratios may be due to excess of OH^- concentration in the mixture which decreased mortar compressive strength (Hardjito *et al.* 2008). In addition, Barbosa *et al.* (1999) indicated that the excess liquid solution could disrupt the polymerization process. The result also conformed to Sathonsaowaphak *et al.* (2009) report that the compressive strength of bottom ash geopolymer mortar seemed to decrease at high LB ratio (0.45-0.71).

The replacements of FA with DE in geopolymer mortar exhibited to decrease the compressive strength. At the LB ratio of 0.50, the 7 days compressive strengths of FA100, FADE60, FADE80 and FADE100 mortars were 81, 42, 30 and 22 MPa, respectively. This was due to the replacements of FA with DE caused to higher the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios in the mixtures. From the chemical composition of FA and DE in this study, FA100, FADE60, FADE80 and FADE100 mortars had the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio of 1.7, 4.2, 5.0 and 5.9, respectively. The suitable $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio for relatively high compressive strength geopolymer was around 1.9 (Duxson *et al.* 2005). In addition, many researchers (Duxson *et al.* 2005, Wongpa *et al.* 2010, Nazari *et al.* 2011) found that the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio is the major parameter to control geopolymer matrix properties and at higher $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio resulted in low compressive strength.

The empirical equations could be expressed for the compressive strengths (C) of geopolymer mortars in terms of LB ratio and DE contents as follows

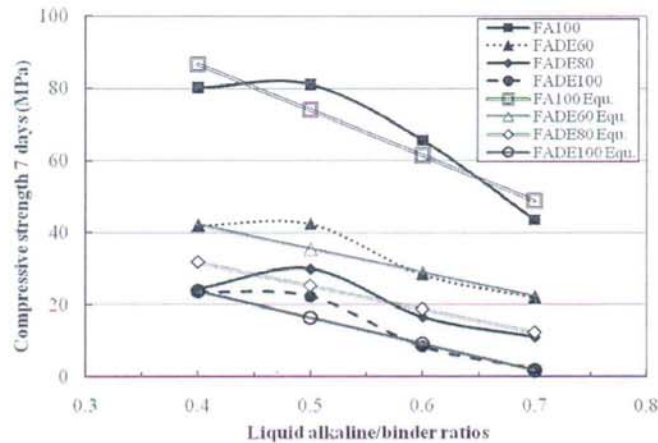


Fig. 6 Comparison of the 7 days compressive strengths of geopolymer mortars obtained from Eq. 6 and from experiment

$$C = Y1_c(LB) + Y2_c \quad (6)$$

Where

$$Y1_c = -0.0117(DE)^2 + 1.6961(DE) - 125.99, \quad (R^2 = 0.92)$$

$$Y2_c = 0.0075(DE)^2 - 1.5879(DE) + 136.93, \quad (R^2 = 0.98)$$

C = compressive strength of geopolymer mortar (MPa)

DE = amount of DE between 0 to 100%

LB = liquid alkaline/binder ratio between 0.40 to 0.70

The 7 days compressive strengths from this equation were compared to the actual test result as shown in Fig. 6. The relationship in Eq. (6) is, therefore, useful to predict the 7 days compressive strength of geopolymer mortar at various LB ratios and amounts of replacement FA with DE.

3.3 The unit weight of geopolymer mortar

The unit weight FA and DE geopolymer mortar is shown in Fig. 7. It was found that the increasing LB ratio from 0.40 to 0.70 seemed to decrease the unit weight of mortar and the incorporation DE in the mixture decreased the unit weight of mortar. The FA100 (0% DE) mortars had unit weight range from 2180 to 2280 kg/m³ and the use of 100% DE in geopolymer mortar (FADE100 mortar) reduced the unit weight to 1990 to 2100 kg/m³. The reason is the low bulk density and high porosity of DE as compare to FA. Hence, at high LB ratio and the characteristic of DE can apply for lightweight geopolymer matrix.

The empirical equations of the unit weights geopolymer mortar (W) in terms of LB ratio and DE contents could be drawn as follows

$$W = Y1_w(LB) + Y2_w \quad (7)$$

Where

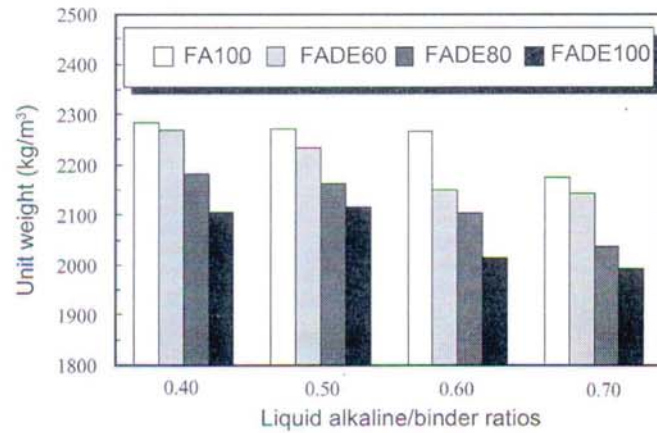


Fig. 7 Unit weights of geopolymer mortars with various of LB ratios

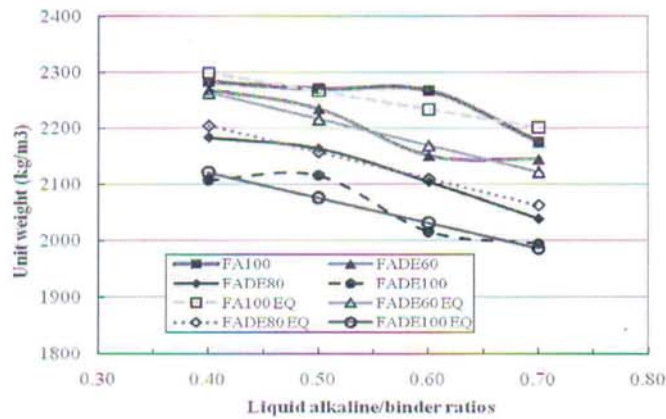


Fig. 8 Comparison the unit weight of geopolymer mortar obtained from Eq. (15) and from experiment

$$Y1_W = 0.0305(DE)^2 - 4.282(DE) - 326.73, \quad (R^2 = 0.94)$$

$$Y2_W = -0.0419(DE)^2 + 2.9034(DE) + 2429.3, \quad (R^2 = 1.00)$$

W = unit weight of geopolymer mortar (kg/m^3)

DE = amount of DE between 0 to 100%

LB = liquid alkaline/binder ratio between 0.40 to 0.70

Fig. 8 shows the unit weight of geopolymer mortar from Eq. (7) and the actual test results. It was found this equation is useful to predict the unit weight of geopolymer mortar at various LB ratios and amounts of replacement FA with DE.

3.4 The stress-strain characteristic of geopolymer mortar

The relationship between stress and strain of geopolymer mortars with the $\text{Na}_2\text{SiO}_3/15 \text{ M NaOH}$

ratio at 1.5 and the LB ratio of 0.50 at 7 days is shown in Fig. 9. The cord elasticity modulus was calculated as described in the ASTM C 469 (2003). The value of elastic modulus increased with the increase in compressive strength, which was similar to plain concrete. The replacement FA with DE reduced the compressive strength and the elastic modulus owing to an increase in the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio (Pacheco-Torgal *et al.* 2008). However, the strain at peak stress (strain capacity) seemed to increase with DE content. Hence, the FA based geopolymer mortar mixes with DE exhibited a more deformable behavior. This reason is probably due to the high porosity and low bulk density of DE. The 7 days elastic modulus of FA100, FADE60, FADE80 and FADE100 mortars were 28.3, 12.0, 7.2 and 3.2 GPa with the strain at peak stress of 0.0028, 0.0047, 0.064 and 0.015, respectively.

Fig. 10 shows the relationship between modulus of elasticity and the compressive strength of geopolymer mortar. It was observed that the modulus of elasticity tended to increase linearly to the square root of compressive strength. The equation predicting this relationship can be drawn as follows

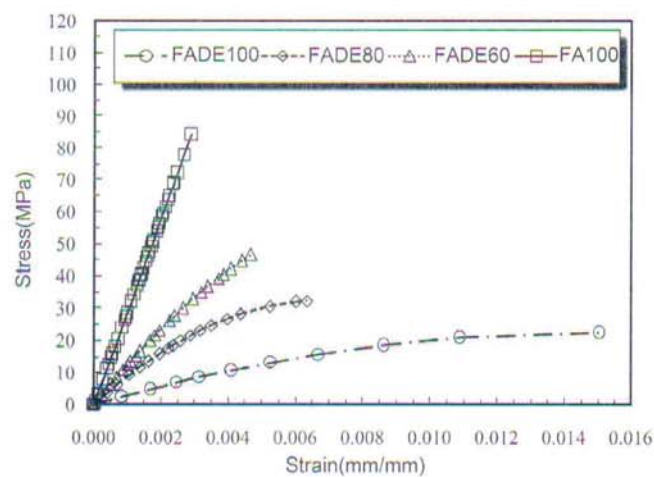


Fig. 9 Relationship between stress and strain of geopolymer mortar

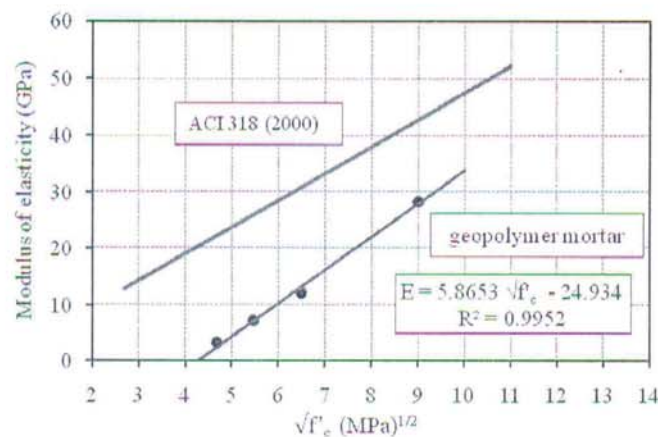


Fig. 10 Modulus of elasticity of geopolymer mortars

$$E = 5.8653\sqrt{f'_c} - 24.934 \quad (8)$$

Where

E = modulus of elasticity (GPa)

f'_c = compressive strength (MPa)

The values of modulus of elasticity in this study were lower than those predicted by ACI 318 (2000). The same trend of result was also reported by Wongpa *et al.* (2010) from the study of the compressive strength, modulus of elasticity and water permeability of inorganic polymer concrete. The increase in the strain capacity with the increase in the DE content is very useful in terms of the improvement in the cracking of this inorganic polymer matrix.

4. Conclusions

Based on the obtained data, it can be concluded that the DE could be used in conjunction with FA to produce good geopolymer mortars with improved workability, strain capacity and reduced unit weight of mortar. The use of DE to replace part of FA as source material in making geopolymer mortars resulted in an improvement in the workability of mortar. The compressive strength and modulus of elasticity of geopolymer mortar decreased with an increase in the DE content as a result of the increase in the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio. The mixes with 15M NaOH, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ of 1.5, LB ratio of 0.50 and using 75°C curing temperature showed 7 days compressive strengths of 22.0-81.0 MPa. The strain capacity of the mortar, however, increased from 0.0028 to 0.0150 with the increase in the DE replacement. In addition, the incorporation DE in the mixture decreased the unit weight of mortar. The improvement in the workability, strain capacity and unit weight with the incorporation of DE can be used to advantageous in designing the geopolymer mortars using these based materials.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the financial support by the Higher Education Research Promotion and National Research University Project of Thailand, Office of the Higher Education Commission, through the Advanced Functional Materials Cluster of Khon Kaen University. Thanks are also extended to the Thailand Research Fund (TRF) under the TRF New Researcher Scholar, and grant No. MRG5280178, the National Research Council of Thailand.

References

- ACI 318 (2000), *Building code requirement for structure concrete practice*, ACI 318M-95. American Concrete Institute Part 3.
- ASTM C 109 (2003), *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortar*, ASTM C 109/C 109M-2, Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM C 150 (2003), *Standard specification for portland*, ASTM C 150-02a, Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM C 469 (2003), *Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression*, ASTM C 469-02, Annual Book of ASTM Standard.

- ASTM C 1437 (2003), *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*, ASTM C 1437-01, Annual Book of ASTM Standard.
- Antonides, L.E. (1999), Diatomite: U.S. Geological Survey Mineral commodity summaries 1, 60-61.
- Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D. and Thaumaturgo, C. (1999), "Synthesis and characterization of sodium polysialate inorganic polymer based on alumina and silica", Davidovits J, Davidovits R, James C. (Eds.), *Proceeding of the Second International Conference on Geopolymer-GEOPOLYMER '99*, France.
- Chindapasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivananon, V. (2007), "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer", *Cement Concrete Comp.*, **29**(3), 224-229.
- Davidovits, J. (1991), "Geopolymer: inorganic polymeric new materials", *J. Therm. Anal.*, **37**(8), 1633-1656.
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M. and Van Deventer, J.S.J. (2005), "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties", *Colloid. Surface. A.*, **269**(1-3), 47-58.
- Elden, H., Morsy, G. and Bakr, M. (2010), "Diatomite: it characterization, modifications and applications", *Asian J. Mater. Sci.*, **2**(3), 121-136.
- Hardjito, D., Cheak, C.C. and Ing, C.H.L. (2008), "Strength and setting time of low calcium fly ash-based geopolymer mortar", *Mod. Appl. Sci.*, **2**(4), 3-11.
- Hardjito, H. and Rangan, R.V. (2005), *Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete*, Research report GC1. Perth, Australia: Faculty of Engineering, Curtin University of Technology.
- Jumrat, S., Chatveera, B. and Rattanadecho, P. (2011), "Dielectric properties and temperature profile of fly ashbased geopolymer mortar", *Int. Commun. Heat Mass*, **38**(2), 242-248.
- Nazari, A., Bagheri, A. and Riahi, S. (2011), "Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash", *Mater. Sci. Eng. A.*, **528**(24), 7395-7401.
- Owen, R.B. and Utha-aroon, C. (1999), "Diatomaceous sedimentation in the tertiary lampang basin, northern Thailand", *J. Paleolimnol.*, **22**(1), 81-95.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S. (2008), "Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder", *Constr. Build. Mater.*, **22**(6), 1201-1211.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T. (1999), "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future", *Cement Concrete Res.*, **29**(8), 1329-1329.
- Pimraksa, K. and Chindapasirt, P. (2009), "Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime, and gypsum", *Ceram. Int.*, **35**(1), 471-478.
- Rukzon, S. and Chindapasirt, P. (2008), "Mathematical model of strength and porosity of ternary blend Portland rice husk ash and fly ash cement mortar", *Comput. Concrete*, **5**(1), 75-88.
- Sathonsaowaphak, A., Chindapasirt, P. and Pimraksa, K. (2009), "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar", *J. Hazard Mater.*, **168**(1), 44-50.
- Sierra, E.J., Miller, S.A., Sakulich, A.R., MacKenzie, K. and Barsoum, M.W. (2010), "Pozzolanic activity of diatomaceous earth", *J. Am. Ceram. Soc.*, **93**(10), 3406-3410.
- Torres, M.L. and Garcia-Ruiz, P.A. (2009), "Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption", *Cement Concrete Comp.*, **31**(2), 114-119.
- Wong, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C. and Chindapasirt, P. (2010), "Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete", *Mater. Design.*, **31**(10), 4748-4754.
- Yeh, I.C. (2008), "Modeling slump of concrete with fly ash and superplasticizer", *Comput. Concrete*, **5**(6), 559-572.
- Yilmaz, B. and Ediz, N. (2008), "The use of raw and calcined diatomite in cement production", *Cement Concrete Comp.*, **30**(3), 202-211.
- Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z. and Yue, C. (2009), "Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer", *Appl. Clay Sci.*, **43**(2), 218-223.

4. Sinsiri, T.*, Kroehong, W, Jaturapitakkul, C., Chindaprasirt, P., 2012, Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on compressive strength of blended cement paste, *Materials and Design*, Vol. 42, pp. 424-433. (IF= 2.200)



Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on the compressive strength of blended cement paste

Theerawat Sinsiri^{a,*}, Wunchock Kroehong^a, Chai Jaturapitakkul^b, Prinya Chindaprasirt^c

^a School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakorn Ratchasima 30000, Thailand

^b Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

^c Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 March 2012

Accepted 16 June 2012

Available online xxxx

Keywords:

Rice husk ash

Palm oil fuel ash

Amorphous

Hydration reaction

Filler effect

Pozzolanic reaction

ABSTRACT

This study assesses the effect of biomass ashes with different finenesses on the compressive strength of blended cement paste. rice husk ash (RHA), palm oil fuel ash (POFA) and river sand (RS) were ground to obtain two finenesses: one was the same size as the cement, and the other was smaller than the cement. Type I Portland cement was replaced by RHA, POFA and RS at 0%, 10%, 20%, 30% and 40% by weight of binder. A water to binder ratio (W/B) of 0.35 was used for all blended cement paste mixes. The percentages of amorphous materials and the compressive strength of the pastes due to the hydration reaction, filler effect and pozzolanic reaction were investigated. The results showed that ground rice husk ash and ground palm oil fuel ash were composed of amorphous silica material. The compressive strength of the pastes due to the hydration reaction decreased with decreasing cement content. The compressive strength of the pastes due to the filler effect increased with increasing cement replacement. The compressive strengths of the pastes due to the pozzolanic reaction were nonlinear and were fit with nonlinear isotherms that increased with increasing fineness of RHA and POFA, cement replacement rate and age of the paste. In addition, the model that was proposed to predict the percentage compressive strength of the blended cement pastes on the basis of the age of the paste and the percentage replacement with biomass ash was in good agreement with the experimental results. The optimum replacement level of rice husk ash and palm oil fuel ash in pastes was 30% by weight of binder; this replacement percentage resulted in good compressive strengths.

© 2012 Published by Elsevier Ltd.

1. Introduction

In the manufacture of cement, the clinker production process requires a great amount of energy and emits a large amount of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the production of cement in 2005 accounted for approximately 7% of the CO₂ emissions worldwide [1]. Global cement production will increase by an average of 2.1% every year between 2005 and 2030, reaching a level that is 1.7 times greater than that in 2005 because of the growth of countries [2]. The increase in CO₂ emissions has led to the greenhouse effect and an increase in the earth's temperature. The environmental impact of cement production must be reduced by reducing the production of ordinary Portland cement. To reduce the environmental problems, pozzolanic materials, such as fly ash, silica fume and agro-waste ashes, are used as mineral admixtures to reduce the production of cement, thus reducing the emission of CO₂ and the use of energy. This solution has been reported to

be environmentally friendly. In addition, the incorporation of mineral admixtures in concrete can also improve the mechanical properties and durability of the concrete [3–5].

Rice husk ash (RHA) is a by-product of electricity generation biomass power plants. In Thailand, the annual production of RHA has been approximated at 1.6 million tons [6]. Several researchers have shown that the main chemical composition of rice husk is silicon dioxide (SiO₂), and the highest amount of amorphous silica was achieved when rice husk ash was burned between 500 and 700 °C [7,8]. Thus, RHA is a pozzolanic material and can be used as a supplementary cementitious material to replace Type I Portland cement by up to 30% [9,10]. Rukzon et al. [11] found that rice husk ash with high fineness can improve the compressive strength and produce a mortar with low porosity. For durability, the results showed that the use of RHA to partially replace Type I Portland cement improves the concrete water permeability [12], chloride penetration [10,13], and resistance to deterioration due to sulfate [3,4].

Palm oil fuel ash (POFA) is a by-product of palm oil factories, where palm shells, empty fruit bunches and palm fiber are burnt as fuel at temperatures of 800–900 °C. It has been estimated that more than 100,000 tons of palm oil fuel ash are produced in

* Corresponding author. Tel.: +66 4422 4420; fax: +66 4422 4607.
E-mail address: sinsiri@sut.ac.th (T. Sinsiri).

Thailand every year [14]. Palm oil fuel ash is rarely utilized, and the amount produced is increasing annually. Previous researchers have found that POFA is a pozzolanic material, and ground POFA with high fineness can be used to replace Type I Portland cement at a rate of up to 30% by weight of binder. Chindaprasit et al. [13] indicated that POFA improves the compressive strength and provides good resistance to chloride penetration. Tangchirapat and Jaturapitakkul [15] showed that POFA with high fineness can reduce the drying shrinkage and water permeability of concrete.

Cyr et al. [16] reported that the effect of mineral admixtures on the compressive strength involved three factors. First, the dilution effect is the strength proportional to the amount of cement in the mixture. Second, the physical effect is the strength that depends on the fineness and the amount of powder, which lead to the nucleation effect and filler effect. The nucleation effect accelerates the hydration production and leads to a more homogeneous paste. The filler effect is due to a suitable arrangement of small particles that fill the voids of the paste and increase its compressive strength. Third, the pozzolanic reaction occurs between $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and the SiO_2 and Al_2O_3 from pozzolanic materials, which produces an increase in calcium silicate hydrate C–S–H [17–19]. However, many researchers have studied the pozzolanic reaction, using, for example, ASTM C618, strength activity index ASTM C311, X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA) and chemical titration. Moreover, Tangpagasit et al. [20] studied the use of river sand as an inert material to replace Type I Portland cement to evaluate the packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. They found that river sand is an inert material and that the packing effect is not dependent on the age of the mortar but rather on the particle size while the pozzolanic reaction depends on the fineness and age of the mortar.

Previous studies have already reported the influence of the finenesses of RHA and POFA on the compressive strength and observed that ashes with a median particle size larger than OPC ($\sim 15 \mu\text{m}$) can be used to replace OPC at 10% [10] while smaller sizes than OPC can be used at 20% to 30% by weight of binder [15]. However, the separation of the influences of the hydration reaction, the filler effect and the pozzolanic reaction on compressive strength of blended cement pastes has not been well defined. If a by-product material from biomass plants can be used as a cement replacement in concrete, it will help reduce energy use by reducing the production of cement clinker and reducing the volume of waste disposed to landfills. Thus, the objective of this study is to quantify the effect of the hydration reaction, the filler effect and the pozzolanic reaction on compressive strength of paste. In addition, equation derived from results determine from experimental testing was derived to predict the compressive strength of a paste due to the hydration reaction, filler effect, and pozzolanic reaction. The chemical properties and percentages of amorphous materials were investigated. The effects of ground rice husk ash and ground palm oil fuel ash with two different finenesses, which influences the hydration reaction, filler effect, and pozzolanic reaction, on the compressive strength of blended cement pastes were determined.

2. Experimental details

2.1. Materials

The materials used in this study were Type I Ordinary Portland cement (OPC), rice husk ash (RHA), palm oil fuel ash (POFA), and river sand. RHA and POFA were collected from thermal power plants in Thailand, and the inert material used was ground river sand (RS). The original RHA and POFA had large particles with low pozzolanic properties [11,21]. Thus, the original RHA and POFA

were sieved through a sieve No. 16 to remove the large particles and any incompletely combusted material. The difference in compressive strength between the pozzolan paste and inert material paste can be determined as the compressive strength due to the pozzolanic reaction [20]. Then, the RHA, POFA and RS were ground to two different sizes. To eliminate the filler effect, RHA, POFA and RS were ground to have the same particle size as OPC for the first fineness of materials (CRHA, CPOFA and CRS). For the second fineness from the filler effect of materials (FRHA, FPOFA and FRS), the materials were ground to have particles that could act as fillers between the particles of cement by an attrition mill for 60 min at 1000 rpm using 2 mm diameter steel balls.

As shown in Fig. 1a, if the median particle size of a material is the same as that of OPC ($\sim 15 \mu\text{m}$), the filler should have the same particle size as OPC.

$$d = D = 15 \mu\text{m} \quad (1)$$

If the median particle size of the material is smaller than that of cement and acts as filler between the particles of cement, as shown in Fig. 1(b), the median size of the material can be calculated with Eq. (3) [22]:

$$d = \cos 30^\circ \frac{D/2}{D/2 + d/2} \quad (2)$$

$$d = 0.15D = 0.15(15) = 2.25 \mu\text{m} \quad (3)$$

The SEM photographs of the materials are shown in Fig. 2. It was found that the ground RHA and POFA consisted of irregular, crushed particles. A similar conclusion was also reported by other researchers [13]. The physical properties of the materials are presented in Table 1. The first group of materials (CRHA, CPOFA and CRS) had particle sizes equal to that of cement. The specific gravity of CRHA, CPOFA and CRS was 2.29, 2.36 and 2.59, respectively. The Blaine fineness values of CRHA, CPOFA and CRS were 7600, 6700 and 3900 cm^2/g , respectively. For the small particle group (FRHA, FPOFA and FRS), the specific gravity and Blaine fineness of FRHA, FPOFA and FRS were 2.31, 2.48, 2.61 and 18,000, 14,900 and 6300 cm^2/g , respectively. The particle size distributions of the materials are shown in Fig. 3. The median particle sizes of CRHA, CPOFA and CRS were close to the particle size of the cement, while those of FRHA, FPOFA and FRS were smaller than that of cement.

2.2. Mix proportion

Ground RHA, POFA and RS were used to partially replace Type I Portland cement at the rates of 0%, 10%, 20%, 30% and 40% by weight of binder. A water to binder (W/B) ratio of 0.35 was used for all mixtures and is shown in Table 2. To ensure homogeneity, the OPC, RHA, POFA and RS were first mixed together for 3 min in the mixer, and then the water was added. Afterwards, the mixture was mixed for another 2 min. After mixing, the cement pastes were immediately cast into cube specimens of $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$. The cast specimens were covered with plastic to prevent water loss. After casting for 24 h, the specimens were removed from the molds and cured in saturated lime water at a temperature of $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

2.3. Compressive strength

The cube specimens of $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ were prepared in accordance with ASTM C109 [23]. They were tested to determine the compressive strength at the ages of 7, 28, 60 and 90 days. Each compressive strength value reported is the average of five samples.

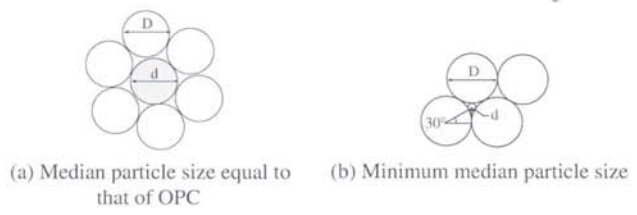


Fig. 1. Plan view illustration of the relationship between the particles of cement.

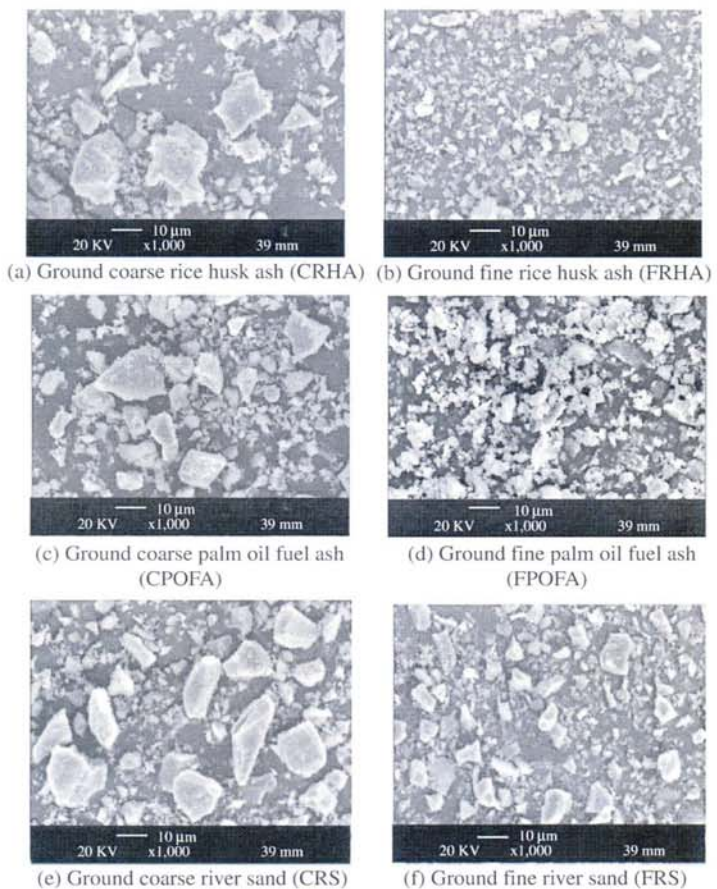


Fig. 2. Scanning electron micrographs of the materials.

Table 1
Physical properties of the materials.

Sample (cm ³ /g)	Specific gravity	Median particle size, d_{50} (μm)	Blaine fineness
OPC	3.14	14.6	3600
CRHA	2.29	14.8	7600
CPOFA	2.36	15.6	6700
CRS	2.59	15.9	3900
FRHA	2.31	1.9	18,100
FPOFA	2.48	2.1	14,900
FRS	2.61	2.2	6300

2.3.1. Evaluation of the percentage compressive strength of paste due to the hydration reaction

The percentage compressive strength of a paste due to the hydration reaction (P_H) is the ratio between the compressive strength of the paste containing inert material with the same particle size of cement and the compressive strength of the OPC paste. The percentage compressive strength of a paste due to the hydration reaction is calculated by the following equation:

$$P_H = \left(\frac{C_c}{C_{opc}} \right) \times 100 \quad (4)$$

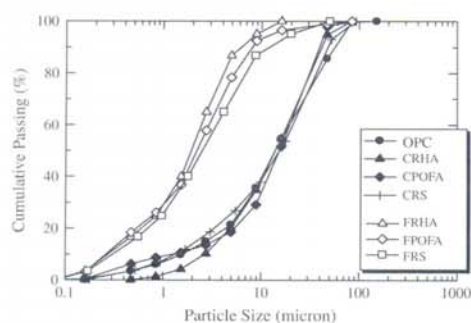


Fig. 3. Particle size distributions of the materials.

where P_H is the percentage compressive strength of the paste due to the hydration reaction (%), C_{ic} is the compressive strength of the paste containing inert material with the same particle size of cement (MPa) and C_{opc} is the compressive strength of OPC paste (MPa).

2.3.2. Evaluation of the percentage compressive strength of paste due to the filler effect

The percentage compressive strength of paste due to the filler effect (P_f) is the difference in the percentage compressive strength between the paste with inert material with high fineness and the paste with inert material with the same particle size as the cement. The percentage compressive strength of paste due to the filler effect is calculated by the following equation:

$$P_f = (P_{f(p,t)} - P_{ic(p,t)}) \quad (5)$$

where P_f is the percentage compressive strength of the paste due to the filler effect (%), $P_{f(p,t)}$ is the percentage compressive strength of the paste containing inert material with high fineness compared with OPC paste (%) and $P_{ic(p,t)}$ is the percentage compressive strength of the paste containing inert material with the same parti-

cle size as the cement compared with OPC paste (%), $P_{f(p,t)}$ and $P_{ic(p,t)}$ have the same replacement (p) and the same age (t).

2.3.3. Evaluation of the percentage compressive strength due to the pozzolanic reaction

The percentage compressive strength of paste due to the pozzolanic reaction ($P_{pz,t}$) is the difference in the percentage compressive strength between the RHA or POFA paste and the inert material paste. The percentage compressive strengths of paste due to the pozzolanic reaction were calculated by the following equation:

$$P_{pz,t} = (P_{b(p,s,t)} - P_{i(p,s,t)}) \quad (6)$$

where $P_{pz,t}$ is the percentage compressive strength of the paste due to the pozzolanic reaction (%), $P_{b(p,s,t)}$ is the percentage compressive strength of the paste containing RHA or POFA compared with OPC paste (%) and $P_{i(p,s,t)}$ is the percentage compressive strength of the paste containing inert material compared with OPC paste (%) $P_{b(p,s,t)}$ and $P_{i(p,s,t)}$ have the same replacement (p), fineness (s) and age (t).

3. Results and discussion

3.1. Chemical and mineralogical analysis

The chemical compositions of the materials are shown in Table 3. SiO_2 is the major chemical component of CRHA, FRHA, CPOFA and FPOFA and is 88.8%, 87.8%, 54.0% and 55.7%, respectively. LOI and SO_3 are within the limits of 10.0% and 4%, respectively. The total amounts of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 in CRHA and FRHA were 91.1% and 89.2%, respectively, which are higher than the 70% for Class N pozzolan specified by ASTM C 618 [24]. However, the total amounts of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 of CPOFA and FPOFA were 56.9% and 58.6%, respectively, both of which are less than 70%. A similar finding was also reported by other researchers [25]. They found that POFA had a total SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 content less than 70%. In the case of insoluble material (river sand (RS)), the main chemical component of CRS and FRS was also SiO_2 and was 92.0% and 91.2%, respectively. In addition, the X-ray diffraction patterns of the materials are shown in Fig. 4. The percentage of amorphous material was determined by the quantitative XRD analysis based

Table 2
Mixture proportions of the pastes.

Mix No	Symbol	OPC	CRS	CRHA	CPOFA	FRS	FRHA	FPOFA	W/B
1	OPC	100	–	–	–	–	–	–	0.35
2	10CRS	90	10	–	–	–	–	–	0.35
3	20CRS	80	20	–	–	–	–	–	0.35
4	30CRS	70	30	–	–	–	–	–	0.35
5	40CRS	60	40	–	–	–	–	–	0.35
6	10CRHA	90	–	10	–	–	–	–	0.35
7	20CRHA	80	–	20	–	–	–	–	0.35
8	30CRHA	70	–	30	–	–	–	–	0.35
9	40CRHA	60	–	40	–	–	–	–	0.35
10	10CPOFA	90	–	–	10	–	–	–	0.35
11	20CPOFA	80	–	–	20	–	–	–	0.35
12	30CPOFA	70	–	–	30	–	–	–	0.35
13	40CPOFA	60	–	–	40	–	–	–	0.35
14	10FRS	90	–	–	–	10	–	–	0.35
15	20FRS	80	–	–	–	20	–	–	0.35
16	30FRS	70	–	–	–	30	–	–	0.35
17	40FRS	60	–	–	–	40	–	–	0.35
18	10FRHA	90	–	–	–	–	10	–	0.35
19	20FRHA	80	–	–	–	–	20	–	0.35
20	30FRHA	70	–	–	–	–	30	–	0.35
21	40FRHA	60	–	–	–	–	40	–	0.35
22	10FPOFA	90	–	–	–	–	–	10	0.35
23	20FPOFA	80	–	–	–	–	–	20	0.35
24	30FPOFA	70	–	–	–	–	–	30	0.35
25	40FPOFA	60	–	–	–	–	–	40	0.35

Please cite this article in press as: Sinsiri T et al. Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on the compressive strength of blended cement paste. J Mater Design (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.030>

Table 3
Chemical compositions of the materials.

Chemical composition (%)	OPC	CRHA	FRHA	CPOFA	FPOFA	CRS	FRS
Silicon dioxide (SiO ₂)	20.8	88.8	87.8	54.0	55.7	92.0	91.2
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	4.7	0.6	0.5	0.9	0.9	1.6	1.8
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	3.4	1.7	0.9	2.0	2.0	0.6	0.2
Calcium oxide (CaO)	65.3	1.1	1.2	12.9	12.5	0.9	0.7
Magnesium oxide (MgO)	–	0.6	0.6	4.9	5.1	0.1	0.1
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.1	0.2	0.2	1.0	1.0	0.1	0.1
Potassium oxide (K ₂ O)	0.4	2.0	2.2	13.5	11.9	2.2	2.3
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.7	0.1	0.1	4.0	2.9	–	–
Loss on ignition (LOI)	0.9	3.6	5.2	3.7	4.7	2.1	1.8
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	–	91.1	89.2	56.9	58.6	94.2	93.2
Quantitative XRD, Rietveld method							
Amorphous (%)	–	70.1	69.6	70.2	67.2	–	–
Crystalline (%)	–	29.9	30.4	29.8	32.8	100.0	100.0
Quartz	–	59.3	56.2	65.0	73.0	100.0	100.0
Cristobalite	–	40.7	43.8	35.0	27.0	–	–

on the Rietveld method, which was calculated using Bruker's TOPAS. The amorphous contents of CRHA, FRHA, CPOFA and FPOFA were 70.1%, 69.6%, 70.2% and 67.2% (by mass), respectively. The percentages of crystalline CRS and FRS were 100% (by mass). The results confirm that river sand is an inert material, which is similar to the results of previous research [20].

3.2. Compressive strength

Table 4 shows the compressive strengths at 7, 28, 60 and 90 days for the OPC paste, which were 53.0, 75.0, 84.6 and 99.1 MPa, respectively. At 7 days, the compressive strengths of pastes containing 10–40% of CRHA with the same particle size as cement were lower than that of the OPC paste because of the low cement content, which resulted in a significant reduction in the normalized strength [15,26]. Additionally, the compressive strengths of the 10CRHA and 20CRHA pastes at 28 days were 76.5 and 74.2 MPa or about 102% and 98.9% of that of the OPC paste, respectively, while those of the 30CRHA and 40CRHA pastes at 28 and 90 days were 70.5, 64.7 and 100.0, 92.1 MPa or about 94%, 86.3% and 100.9%, 92.9% of that of the OPC paste, respectively. In the case of pastes containing FRHA (small particle size of RHA), the compressive strengths of the 10FRHA, 20FRHA and 30FRHA pastes were 55.9, 52.9 and 50.3 MPa or 105.5%, 99.8% and 94.9% of that of the OPC paste at 7 days but increased to 81.7, 78.7 and 74.9 MPa or 108.9%, 104.9% and 99.9% of that of the OPC paste at 28 days, respectively.

For the group mixed with ground palm oil fuel ash, the pastes containing 10–40% CPOFA had compressive strengths that were lower than that of OPC paste at 7 days. The 28 days compressive strengths were 74.8, 72.0, 66.7 and 61.5 MPa with a normalized strength of 99.7%, 96.0%, 88.9% and 82.0% for the 10CPOFA, 20CPOFA, 30CPOFA and 40CPOFA pastes, respectively. At 90 days, they increased to 104.5, 102.0, 97.1 and 88.1 MPa with a normalized strength of 105.4%, 102.9%, 98.0% and 88.9% of the OPC paste, respectively. For the pastes with a small particle size, the compressive strengths of the 10FPOFA and 20FPOFA pastes at 28 and 90 days were 79.3, 77.3 and 111.3, 109.6 MPa or about 105.7%, 103.1% and 112.3%, 110.6% of the strength of the OPC paste, respectively. However, at 30% and 40% FPOFA, the compressive strengths at 90 days were 104.0 and 94.1 MPa or about 104.9% and 95.0% of that of the OPC paste, respectively.

The compressive strength of blended cement paste increased with age but decreased with an increase in the replacement of ash. The increased compressive strength of blended cement paste can be explained by three factors: the hydration reaction, the filler effect and the pozzolanic reaction. The hydration reaction is the

strength proportionate to the amount of cement in the mix. The filler effect has two causes, the nucleation effect and packing effect, which depend significantly on the fineness of material. The nucleation effect arises when the small particles are dispersed in the blended cement paste and enhance the cement hydrate while the packing effect occurs when small particles fill the voids of the paste [16,18,27,28]. Therefore, the blended cement paste containing biomass ash with high fineness was more homogeneous and denser, which increased the compressive strength of the paste. Finally, the pozzolanic reaction occurs because of the SiO₂ and Al₂O₃ contained in the biomass ash, which react with Ca(OH)₂ and produce an additional calcium silicate hydrate (C–S–H).

Comparing the RHA and POFA blended cement pastes in terms of the same replacement and same fineness, the normalized strengths of RHA pastes were slightly higher than those of POFA pastes because RHA contains more SiO₂ than POFA. The results indicated that RHA was more reactive than POFA, and the results agree with [20]. In addition, the results suggest that the replacement of cement type I by RHA and POFA up to 30% by weight of binder does not impair the compressive strength of pastes. The results are nearly identical to the results obtained by other researchers [10,29], who reported that the optimum replacement level of Portland cement Type I by RHA or POFA is 30% by weight of binder.

3.3. Influence of cement content on the percentage compressive strength of paste

The percentage compressive strength of ground river sand paste with age (P_H) is shown in Fig. 5. For pastes containing CRS with the same particle size as that of cement, the percentage compressive strengths of CRS pastes at any age were almost constant. The same trend was also reported by [20,29]. In contrast, the relationship between the percentage compressive strengths of pastes due to the hydration reaction and the percentage replacement of CRS paste is shown in Fig. 6. The percentage compressive strengths decreased linearly with replacement of CRS. The results suggest that the percentage compressive strength of pastes containing inert material with the same particle size as cement does not depend on age but rather depends on the cement content.

The empirical equations can be expressed for the percentage compressive strength of paste due to the hydration reaction in terms of (R) as follows:

$$P_H = 100.4 - 0.996(R) \quad (7)$$

where P_H is percentage compressive strength due to the hydration reaction of paste (%) and R is the replacement of Portland cement by an inert material (%). The correlation value of 0.997 indicates a

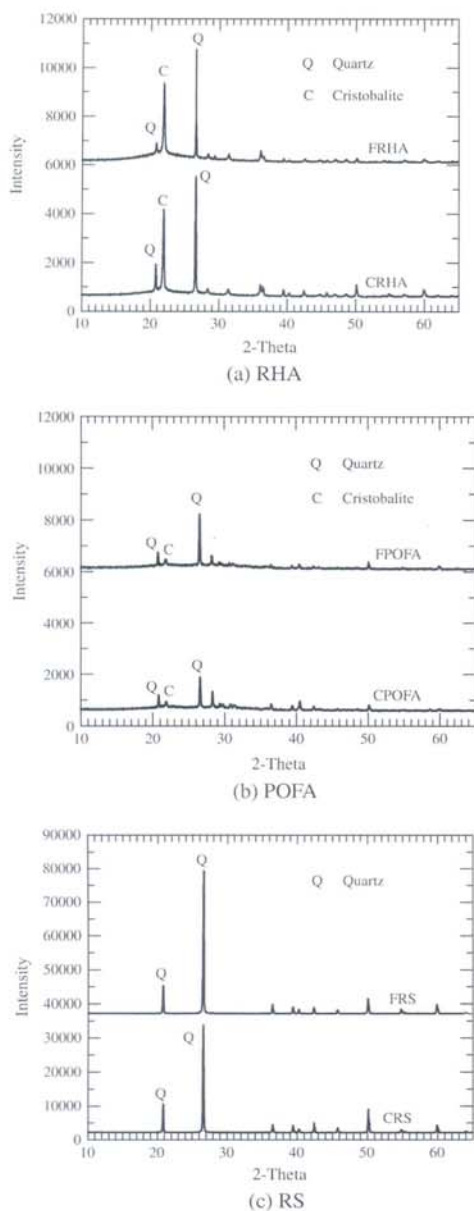


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of the materials.

strong linear relationship between the percentage compressive strength and the percentage replacement of CRS.

3.4. Influence of the filler effect on the percentage compressive strength of paste

The relationship between the percentage compressive strength of ground river sand with different finenesses of paste and age are

shown in Fig. 5. The pastes with particles smaller than OPC had a higher percentage compressive strength than the pastes with large particle size and had an almost constant value [20,29]. Fig. 7 shows the percentage compressive strengths of ground river sand with different finenesses of paste and replacements with river sand. The percentage compressive strength of paste due to the filler effect tended to increase with the amount of cement replacement and was approximately 2.2–5.1% of the strength of the OPC paste because the small particles dispersed into the blended cement paste and accelerated the hydration reaction. In addition, the packing effect occurred as the small particles filled the voids of the paste [16,18,27,28]. Therefore, the paste was more homogeneous and denser, which resulted in the increased compressive strength of the paste. These results suggest that a particle size smaller than OPC has very important role in increasing the compressive strength because of the filler effect [30]. The results of the filler effect for pastes agrees closely with the result obtained by Jaturapitakkul et al. [31], who reported that the difference in the percentage compressive strengths between mortar containing the same particle sizes of inert material and small sizes of inert material was up to 5.8% of the strength of the mortar.

The empirical equation to predict the percentage of the compressive strength of the paste due to the filler effect in terms of replacement (R) is proposed as follows:

$$P_F = 1.542 \ln(R) - 1.002 \quad (8)$$

where P_F is the percentage compressive strength of the paste due to the filler effect (%) and R is the replacement of Portland cement by inert material (%). It was found that P_F is represented by a logarithmic equation and has good correlation. The percentage compressive strength of the paste due to the filler effect of the blended cement paste increased with an increase in the replacement of inert material.

3.5. Influence of the pozzolanic reaction on the percentage compressive strength of pastes

Figs. 8 and 9 show the percentage compressive strength of paste due to the pozzolanic reaction of RHA and POFA, respectively. The pozzolanic reaction increased with age and with the replacement of RHA or POFA. In addition, the high fineness of RHA or POFA was more efficient for the pozzolanic reaction than the coarse fineness because the high fineness of the ash provided a large surface area to contribute silica and alumina compounds for the pozzolanic reaction [32,33]. These compounds reacted with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ from the hydrated cement and produced an increase in calcium silicate hydrate. In addition, the percentage compressive strength due to the pozzolanic reaction of higher replacement paste increased more than that of the lower replacement paste. The blended cement paste containing a high replacement of the ash showed a decrease of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content compared with the low replacement paste [34]. In addition, the reduction of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ affected the increase of the calcium silicate hydrate from the pozzolanic reaction [35].

Comparing the percentage compressive strength of paste due to the pozzolanic reaction in Figs. 8 and 9, the RHA pastes had a higher percentage compressive strength of paste due to the pozzolanic reaction than the POFA pastes. The maximum percentage compressive strength due to the pozzolanic reaction of RHA and POFA pastes were 33.7% and 30.5% that of the OPC paste, respectively, because RHA has a higher SiO_2 content than POFA. The results confirmed that the percentage compressive strength of paste due to the pozzolanic reaction increased with age, fineness, and the replacement rate of the ash.

Figs. 8 and 9 show that the percentage compressive strength due to the pozzolanic reaction is explicitly nonlinear and is best fit with nonlinear isotherms, which are shown in the same figure.

Table 4
Compressive strengths of the pastes.

Symbol	Compressive strength (MPa)				Normalized compressive strength (%)			
	7 days	28 days	60 days	90 days	7 days	28 days	60 days	90 days
OPC	53.0	75.0	84.6	99.1	100.0	100.0	100.0	100.0
10CRHA	52.4	76.5	88.5	107.6	98.9	102.0	104.6	108.6
20CRHA	49.8	74.2	88.3	106.0	94.0	98.9	104.4	107.0
30CRHA	46.5	70.5	83.7	100.0	87.7	94.0	98.9	100.9
40CRHA	42.4	64.7	77.4	92.1	80.0	86.3	91.5	92.9
10FRHA	55.9	81.7	94.7	116.2	105.5	108.9	111.9	117.3
20FRHA	52.9	78.7	93.1	113.2	99.8	104.9	110.0	114.2
30FRHA	50.3	74.9	89.6	107.9	94.9	99.9	105.9	108.9
40FRHA	44.5	66.9	79.5	96.1	84.0	89.2	94.0	97.0
10CPOFA	51.3	74.8	86.3	104.5	96.8	99.7	101.6	105.4
20CPOFA	48.3	72.0	84.6	102.0	91.1	96.0	99.6	102.9
30CPOFA	44.5	66.7	78.6	97.1	84.0	88.9	92.9	98.0
40CPOFA	41.0	61.5	72.8	88.1	77.4	82.0	85.7	88.9
10FPOFA	53.7	79.3	93.3	111.3	101.3	105.7	109.9	112.3
20FPOFA	51.9	77.3	92.2	109.6	97.9	103.1	108.6	110.6
30FPOFA	48.3	72.8	86.3	104.0	91.1	96.9	101.6	104.9
40FPOFA	44.0	66.5	78.6	94.1	83.0	88.7	92.6	95.0
10CRS	48.3	68.2	77.2	90.1	91.1	90.9	91.3	90.9
20CRS	42.9	60.8	67.9	78.6	80.9	81.1	80.3	79.3
30CRS	36.9	53.1	60.8	70.2	69.6	70.8	71.9	70.8
40CRS	31.5	45.6	51.5	59.6	59.4	60.8	60.9	60.1
10FRS	49.9	69.9	79.1	92.8	94.2	93.2	93.5	93.6
20FRS	45.0	63.4	70.8	82.1	84.9	84.5	83.7	82.8
30FRS	39.1	56.5	64.1	74.5	73.8	75.3	75.8	75.2
40FRS	34.2	49.2	55.4	63.9	64.5	65.6	65.5	64.5

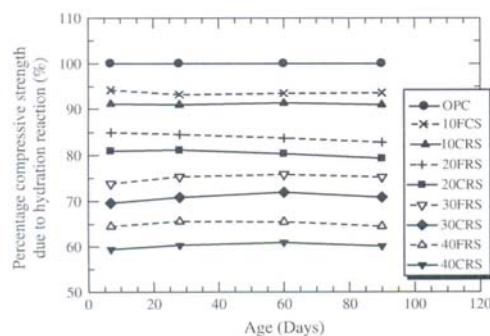


Fig. 5. Relationship between the percentage compressive strength of ground river sand paste and age.

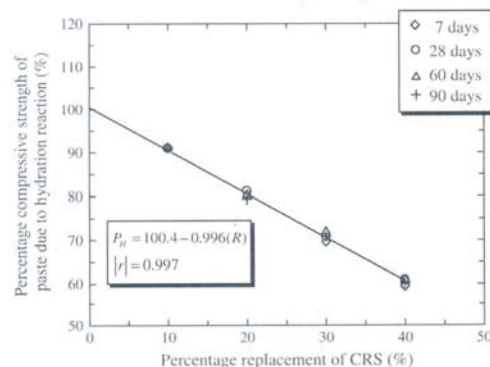


Fig. 6. Relationship between the percentage compressive strength of paste due to the hydration reaction and the percentage replacement of CRS.

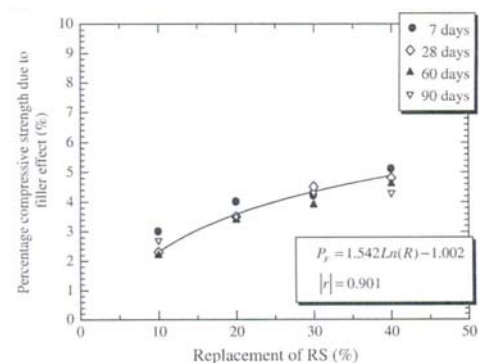


Fig. 7. Relationships between the percentage compressive strength of paste due to the filler effect and the replacement of RS.

Thus, the equation to predict the percentage compressive strength of paste due to the pozzolanic reaction is:

$$P_{PZ,t} = \alpha R^{\beta} \quad (9)$$

where $P_{PZ,t}$ is the percentage compressive strength of the paste due to the pozzolanic reaction at a specified age ($t = 7, 28, 60$ and 90 days) (%), R is the rice husk ash or palm oil fuel ash replacement (%) and α and β are the pozzolanic constants. The pozzolanic constants for the isotherm fitted from experimental results of the pastes are presented in Table 5.

3.6. Generating an empirical equation for the prediction of the percentage compressive strength of the blended cement paste

3.6.1. Role of the blended cement paste containing biomass ash on the percentage of compressive strength

The percentage compressive strength of the blended cement paste containing biomass ash with the same particle size as cement

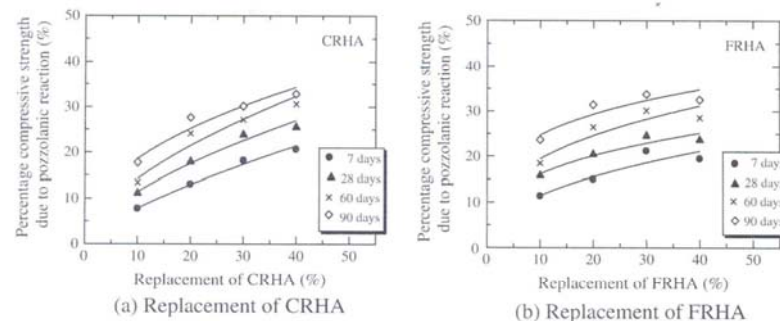


Fig. 8. Relationships between the percentage compressive strength due to the pozzolanic reaction of RHA pastes and age.

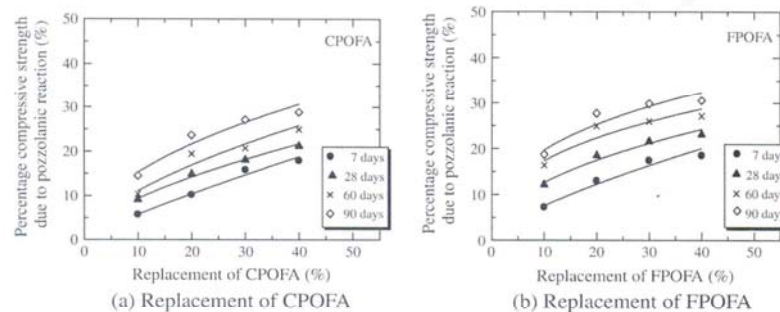


Fig. 9. Relationships between the percentage compressive strength due to the pozzolanic reaction of POFA paste and age.

Table 5
Best fit of the pozzolanic constants for the isotherms.

Binder Type	Days	Pozzolanic constants		Correlation
		α	β	
CRHA	7	1.479	0.723	0.993
	28	2.728	0.617	0.988
	60	3.593	0.595	0.948
	90	6.633	0.445	0.943
FRHA	7	4.098	0.444	0.895
	28	7.667	0.321	0.923
	60	8.817	0.341	0.865
	90	13.940	0.247	0.837
CPOFA	7	0.792	0.856	0.993
	28	2.273	0.611	0.991
	60	2.703	0.611	0.939
	90	4.798	0.502	0.949
FPOFA	7	1.462	0.709	0.972
	28	4.590	0.449	0.974
	60	7.513	0.363	0.884
	90	8.551	0.361	0.899

is related to the hydration reaction and pozzolanic reaction as follows:

$$P_{C,t} = P_H + P_{PZ,t} \quad (10)$$

Eq. (10) can be rewritten as follows:

$$P_{C,t} = 100.4 - 0.99(R) + \alpha R^\beta \quad (11)$$

where $P_{C,t}$ is the total percentage compressive strength of the paste at a specified age ($t = 7, 28, 60$ and 90 days) (%), P_H is the percentage

compressive strength of the paste due to the hydration reaction (%), $P_{PZ,t}$ is the percentage compressive strength of the paste due to the pozzolanic reaction at various curing times ($t = 7, 28, 60$ and 90 days) (%), R is the percentage replacement of RHA or POFA and α and β are the pozzolanic constants. The prediction using Eq. (11) and experimental results are shown in Fig. 10. This equation is useful to predict the percentage compressive strength of blended cement pastes containing RHA and POFA.

For the mixture of biomass ash with a particle size smaller than that of OPC, the percentage compressive strength of paste is due to the hydration reaction, filler effect and pozzolanic reaction as follows:

$$P_{C,t} = P_H + P_F + P_{PZ,t} \quad (12)$$

Eq. (12) can be rewritten as follows:

$$P_{C,t} = 99.398 - 0.996(R) + 1.542\ln(R) + \alpha R^\beta \quad (13)$$

where $P_{C,t}$ is the total percentage compressive strength of the paste at a specified age ($t = 7, 28, 60$ and 90 days) (%), P_H is the percentage compressive strength of the paste due to the hydration reaction (%), P_F is the percentage compressive strength of the paste due to the filler effect (%), $P_{PZ,t}$ is the percentage compressive strength of the paste due to the pozzolanic reaction at a specified age ($t = 7, 28, 60$ and 90 days) (%), R is the percentage replacement of RHA or POFA, and α and β are the pozzolanic constants. The percentage compressive strength of the pastes according to this equation was compared with the actual test specimens, as shown in Fig. 11. The equation suggests that the percentage compressive strength of the paste due to the pozzolanic reaction is higher than that due to the filler effect. Moreover, it is also useful to predict the percentage

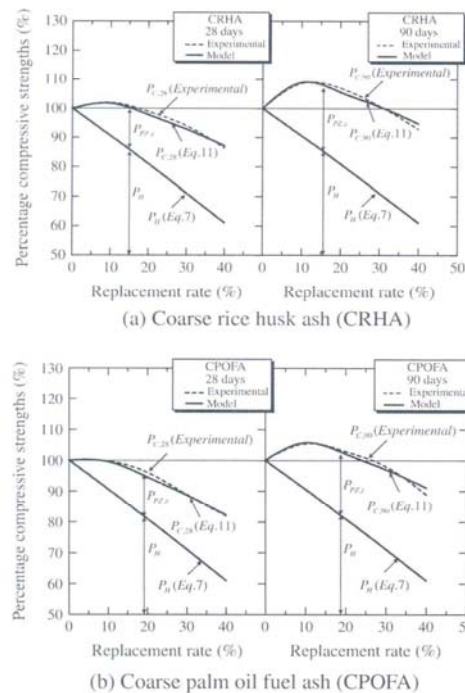


Fig. 10. Relationships between the percentage compressive strengths of blended cement pastes containing CRHA and CPOFA with the same particle size as that of OPC.

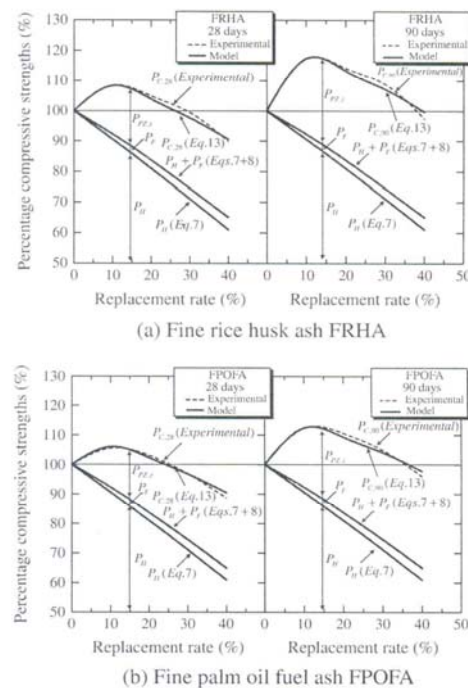


Fig. 11. Relationships between the percentage compressive strengths of the blended cement paste containing FRHA and FPOFA with particle sizes smaller than that of OPC.

compressive strength of pastes with the curing time and amounts of replacement of RHA and POFA.

3.6.2. Verification

The measured percentage compressive strengths of the pastes for $W/B = 0.35$, $R = 10\text{--}40\%$, and $d = 7, 28, 60$ and 90 days were compared with the predicted results according to Eqs. (11) and (13), which are shown in Fig. 12. The measured and predicted values are reasonably close. The error from prediction is satisfied with the mean absolute percent error, $\left(\sum \frac{|P_{\text{predicted}} - P_{\text{measured}}|}{P_{\text{measured}}} \times 100\%\right)$, which is less than 2.4%.

4. Conclusions

The results of this study provide the following conclusions.

1. The percentage compressive strength of the pastes due to the hydration reaction decreased with decreasing cement content. In addition, the percentage compressive strength of the paste due to the hydration reaction showed a linear best-fit relationship.
2. Ground inert material with particle sizes smaller than that of OPC was a very important factor affecting the percentage compressive strength due to the filler effect. In addition, the percentage compressive strength of pastes due to the filler effect increased with increasing inert matter material replacement. The percentage compressive strength of pastes due to the filler effect can be predicted with a logarithmic best-fit relationship.

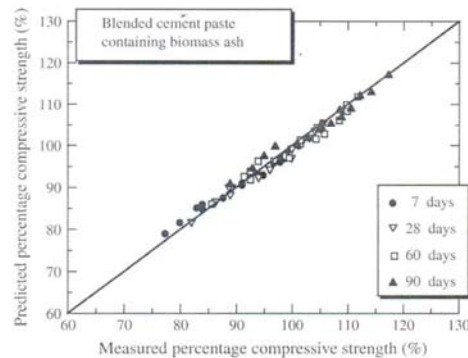


Fig. 12. Comparison between the predicted and experimental percentage compressive strength in blended cement pastes containing biomass ash.

3. The percentage compressive strength of paste due to the pozzolanic reaction increased with increasing fineness of RHA or POFA, cement replacement and age of paste. Moreover, it had a greater effect than the filler effect. The percentage compressive strength due to the pozzolanic reaction is explicitly nonlinear.
4. The use of RHA or POFA with particle sizes smaller than those of OPC to replace Portland cement Type I at the rate of 30% by weight of binder resulted in good compressive strength from filler effect and pozzolanic reaction. Moreover, the proposed

empirical model can be used to predict the percentage compressive strength of blended cement pastes in good agreement with the experimental results.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the financial support of the Commission on Higher Education of Thailand for a grant under the Strategic Scholarships for Frontier Research Network for the Joint Ph.D. Program, Thai Doctoral degree. They also thank the Thailand Research Fund (TRF) for the financial support under the TRF Senior Research Scholar, Grant No. RTA5380002 and the TRF New Researcher Scholar, Grant No. MRG5280178.

References

- [1] Metz B, Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA. Climate change 2007: Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: University Press; 2007.
- [2] Akashi O, Hanaoka T, Matsuoka Y, Kainuma M. A projection for global CO₂ emissions from the industrial sector through 2030 based on activity level and technology changes. *Energy* 2011;36(4):1855–67.
- [3] Chatveera B, Lertwattanaruk P. Durability of conventional concretes containing black rice husk ash. *J Environ Manage* 2011;92(1):59–6.
- [4] Chindaprasit P, Homwuttiwong S, Sirivivatnanon V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cem Concr Res* 2004;34(7):1087–92.
- [5] Rukzon S, Chindaprasit P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Mater Des* 2012;34:45–50.
- [6] Wansom S, Janjaturaphan S, Sinthupinyo S. Characterizing pozzolanic activity of rice husk ash by impedance spectroscopy. *Cem Concr Res* 2010;40(12):1714–22.
- [7] de Sensale GR, Ribeiro AB, Gonçalves A. Effects of RHA on autogenous shrinkage of Portland cement pastes. *Cem Concr Compos* 2008;30(10):892–7.
- [8] Nair DG, Fraaij A, Klaassen AAK, Kentgens APM. A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes. *Cem Concr Res* 2008;38(6):861–9.
- [9] Chatveera B, Lertwattanaruk P. Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash. *J Environ Manage* 2009;90(3):1435–41.
- [10] Ganesan K, Rajagopal K, Thangavel K. Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Constr Build Mater* 2008;22(8):1675–83.
- [11] Rukzon S, Chindaprasit P, Mahachai R. Effect of grinding on chemical and physical properties of rice husk ash. *Int J Miner Met Mater* 2009;16(2):242–7.
- [12] Givi AN, Rashid SA, Aziz FNA, Salleh MAM. Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete. *Constr Build Mater* 2010;24(11):2145–50.
- [13] Chindaprasit P, Rukzon S, Sirivivatnanon V. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Constr Build Mater* 2008;22(5):932–8.
- [14] Chindaprasit P, Homwuttiwong S, Jaturapitakkul C. Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash. *Constr Build Mater* 2007;21(7):1492–9.
- [15] Tangchirapat W, Jaturapitakkul C. Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash. *Cem Concr Compos* 2010;32(10):767–74.
- [16] Cyr M, Lawrence P, Ringot E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. *Cem Concr Res* 2006;36(2):264–77.
- [17] Goldman A, Bentur A. The influence of microfillers on enhancement of concrete strength. *Cem Concr Res* 1993;23(4):962–72.
- [18] Gopalan MK. Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete. *ACI Mater J* 1993;90(2):117–21.
- [19] Isaia GC, Gastaldini ALG, Moraes R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. *Cem Concr Compos* 2003;25(1):69–76.
- [20] Tangpagasit J, Cheerarat R, Jaturapitakkul C, Kiattikomol K. Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Cem Concr Res* 2005;35(6):1145–51.
- [21] Sata V, Jaturapitakkul C, Kiattikomol K. Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete. *J ASCE Mater Civil Eng* 2004;16(6):623–8.
- [22] Lu N, Likos WJ. Unsaturated soil mechanics. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.; 2004.
- [23] ASTM C109. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). Annual book of ASTM standards; 2001.
- [24] ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. Annual book of ASTM standards; 2001.
- [25] Awal ASMA, Hussin MW. The effectiveness of palm oil fuel ash in preventing expansion due to alkali-silica reaction. *Cem Concr Compos* 1997;19(4):367–72.
- [26] Megat Johari MA, Brooks JJ, Kabir S, Rivard P. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Constr Build Mater* 2011;25(5):2639–48.
- [27] Montgomery DG, Hughes DC, Williams RIT. Fly ash in concrete – a microstructure study. *Cem Concr Res* 1981;11(4):591–03.
- [28] Lee C-L, Huang R, Lin W-T, Weng T-L. Establishment of the durability indices for cement-based composite containing supplementary cementitious materials. *Mater Des* 2012;37:28–39.
- [29] Jaturapitakkul C, Tangpagasit J, Songmue S, Kiattikomol K. Filler effect and pozzolanic reaction of ground palm oil fuel ash. *Constr Build Mater* 2011;25(11):4287–93.
- [30] Chindaprasit P, Jaturapitakkul C, Sinsiri T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cem Concr Compos* 2005;27(4):425–8.
- [31] Jaturapitakkul C, Tangpagasit J, Songmue S, Kiattikomol K. Filler effect of fine particle sand on the compressive strength of mortar. *Int J Miner Metal Mater* 2011;18(2):240–6.
- [32] Cordeiro GC, Toledo Filho RD, Tavares LM, Fairbairn EMR. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cem Concr Compos* 2008;30(5):410–8.
- [33] Cordeiro GC, Toledo Filho RD, Tavares LM, Fairbairn GC, Hempel S. Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. *Cem Concr Compos* 2011;33(5):529–34.
- [34] Kroehong W, Sinsiri T, Jaturapitakkul C, Chindaprasit P. Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. *Constr Build Mater* 2011;25(11):4095–04.
- [35] Aly M, Hashmi MSJ, Olabi AG, Messeiry M, Abadir EF, Hussain AI. Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar. *Mater Des* 2012;33:127–35.