

อิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัด
ของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์



นายวิษณุกร สมิทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**INFLUENCE OF WETTING-DRYING CYCLES ON
COMPRESSIVE STRENGTH OF SLUDGE-FLY ASH
GEOPOLYMER**

Wisankhorn Samingthong

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2013**

อิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอย
จีโอโพลิเมอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ติมปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิทยุกร สมิงทอง : อิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของตะกอนดินประปา-
เถ้าลอยจีโอ โพลีเมอร์ (INFLUENCE OF WETTING-DRYING CYCLES ON
COMPRESSIVE STRENGTH OF SLUDGE-FLY ASH GEOPOLYMER) อาจารย์ที่
ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 50 หน้า.

ตะกอนดินเถ้าลอยจีโอ โพลีเมอร์เป็นส่วนผสมระหว่างตะกอนดินประปา (Sludge) กับ
เถ้าลอย (Fly ash) และสารละลายอัลคาไลน์ (activator) ซึ่งจัดเป็นวัสดุก่อสร้างเขียว (Green
material) ตะกอนดินประปาได้จากโรงงานผลิตน้ำบางเขน เถ้าถ่านหินได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
จังหวัดลำปาง สารละลายอัลคาไลน์เป็นส่วนผสมของ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) งานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของ
ดินตะกอน-เถ้าลอยจีโอ โพลีเมอร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญในการออกแบบความ
คงทนของวัสดุก่อสร้าง อัตราส่วนระหว่างสารละลายอัลคาไลน์ต่อเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ
1.6 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 70:30 80:20 90:10 และ 100:0 ความร้อนในการ
กระตุ้นตัวอย่างเท่ากับ 65 75 85 และ 95°C และระยะเวลาบ่มเท่ากับ 24 48 72 96 และ 120 ชั่วโมง
การเตรียมตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์สำหรับการทดสอบเปียกสลับแห้งกระทำตามมาตรฐาน ASTM D
559 – 03 จำนวนรอบของสภาวะเปียกสลับแห้งเท่ากับ 1 3 6 9 และ 12 รอบ ผลการศึกษาพบว่า
อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เหมาะสมที่ให้กำลังอัดสูงของตัวอย่างสูงสุดคือ 90:10 ซึ่งให้กำลังอัดสูง
กว่า 2.5 เมกกะปาสกาล (ค่ายอมให้สำหรับบล็อกไม่รับแรงอัด ตามมาตรฐาน
ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ร้อยละของการดูดซึมน้ำของตะกอนดิน-เถ้าลอยจีโอ โพลีเมอร์ที่
สัดส่วนเหมาะสมและบ่มด้วยความร้อนต่ำกว่า 95°C มีค่าต่ำกว่า 14.3 (ค่ายอมให้ สำหรับบล็อกรับ
และไม่รับน้ำหนัก) อุณหภูมิและระยะเวลาบ่มที่เหมาะสม (ให้กำลังอัดสูงสุด) คือ 85°C และ 72 ชั่วโมง
ซึ่งให้กำลังอัดของตะกอนดิน-เถ้าลอยจีโอ โพลีเมอร์สูงกว่า 7.0 เมกกะปาสกาล (ค่ายอมให้สำหรับ
บล็อกรับแรงอัด ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ที่รอบเปียกสลับแห้งจำนวน 12 รอบ
งานวิจัยนี้ได้สร้างสมการทำนายกำลังอัดที่รอบเปียกสลับแห้งต่างๆ ในพจน์ของกำลังอัดแบบแช่น้ำ
และจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบสัดส่วน เพื่อให้ได้
ผลิตภัณฑ์ที่มีกำลังอัดตามต้องการที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งที่กำหนด

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2556

ลงชื่อนักศึกษา _____

ลงชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

WISANUKHORN SAMINGTHONG : INFLUENCE OF WETTING-DRYING
CYCLES ON COMPRESSIVE STRENGTH OF SLUDGE-FLY ASH
GEOPOLYMER. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK,
Ph.D., 50 PP.

GEOPOLYMER/SLUDGE/FLY ASH

Sludge-Fly Ash Geopolymer, which is a mixture of sludge, fly ash (FA) and liquid alkaline activator, is green construction material. Sludge was obtained from the Bang Khen water treatment plant of the Metropolitan Water Work Authority of Thailand (MWA). FA was obtained from the Mae Moh power plants of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). A liquid alkaline activator, L is a mixture of sodium silicate solution (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide solution (NaOH). This research studies influences of wetting-drying (w-d) cycles on compressive strength of sludge-fly ash geopolymer, which is an important parameter for service life design. The $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio used was 50:50, 70:30, 80:20, 90:10 and 100:0. Heat temperatures were 65, 75, 85 and 95°C and heat durations were 24, 48, 72, 96 and 120 hours. The samples w-d cycle test were prepared according to the American Standard for Testing and Materials (ASTM D 559 – 03). Number of cycles were 1, 3, 6, 9 and 12 cycles. Results show that the optimal $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, providing the highest strength, is found at 90:10 in which the strength is greater than 2.5 MPa (allowable strength for non-bearing masonry units specified by Thailand Industrial Standard). The water absorption of the samples at this optimal $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ with heat temperature lower than 95°C is lower than 14.3% (allowable value for both bearing and non-bearing masonry units). The optimal heat temperature and duration,

providing highest strength, is 85°C and 72 hours. The 12 w-d cycle strength of samples prepared at optimal $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ and heat temperature and heat duration is greater than 7.0 MPa, which is the allowable value for bearing masonry unit. Finally, a predictive w-d cycle strength equation is proposed in terms of initial soaked strength and number of w-d cycle. The proposed equation facilitates mix design to attain the required strength at a target w-d cycle.



School of Civil Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ กลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ให้ความช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำตรวจแก้วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ดันเส็ง กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำตรวจแก้วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางมอบความรู้ในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

การประปานครหลวง ผู้ให้สนับสนุนทุนในการทำการศึกษาวิจัย

ศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำการศึกษาวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษาให้กับผู้วิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

วิษณุกร สมิงทอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)	4
2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	6
2.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต	7
2.4 เถ้าลอย.....	8
2.5 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน	13
2.6 โครงสร้างผลึก	13
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
3. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 บทนำ.....	21
3.2 การเก็บดินและการเตรียมตัวอย่างดิน	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	เก้าอี้ลอย.....	23
3.4	การเตรียมตัวอย่างดินตะกอนประปาเก้าอี้ลอยจีโอโพลิเมอร์.....	24
3.5	การทดสอบกำลังอัด.....	25
3.6	การทดสอบความคงทน	25
3.7	ทดสอบโครงสร้างจุลภาค	26
4.	ผลการดำเนินงานวิจัย	27
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปา เก้าอี้ลอย และจีโอโพลิเมอร์	27
4.2	ผลการทดสอบการบดอัด.....	30
4.3	ผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน.....	31
4.4	ผลการทดสอบกระบวนการเปียกสลับแห้ง	34
5.	สรุปและวิเคราะห์.....	40
	รายการอ้างอิง	41
	ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	45
	ประวัติผู้เขียน	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซัลไฟด์เกิดผลว 7
2.2	ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 9
2.3	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ.2533 – 2541 10
2.4	ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ เถ้าลอย 12
3.1	การทดสอบและจำนวนตัวอย่างทดสอบ 22
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย 29



สารบัญรูป

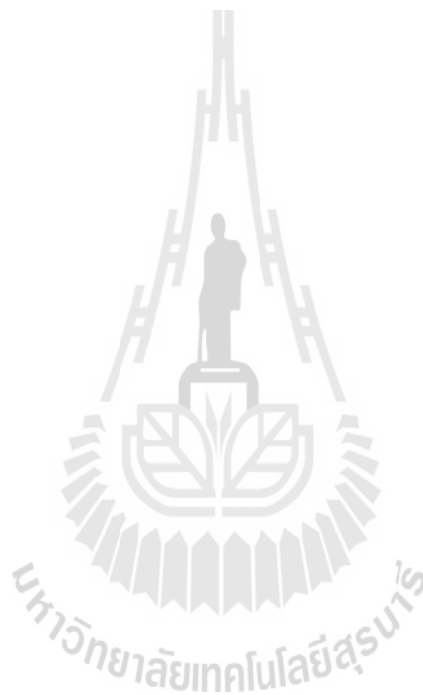
รูปที่	หน้า
2.1	polycondensation of Na-poly(sialate-disiloxo) albite framework 6
2.2	Scanning Electron Microscope (SEM) ถ่ายขยาย (1,000 เท่า)..... 11
2.3	แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน 13
2.4	รูปทรงสี่หน้าของ SiO ₄ (SiO ₄ tetrahedral)..... 14
2.5	โครงสร้างผลึก β -ควอร์ซายลงบนระนาบ..... 14
2.6	โครงสร้างผลึก α -ควอร์ซายลงบนระนาบ..... 15
3.1	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคระบบเลเซอร์ (Laser Particle Size Analyzer) 24
4.1	การกระจายขนาดของเม็ดดินและเถ้าลอย 28
4.2	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของดินตะกอนประปา..... 29
4.3	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเถ้าลอย..... 30
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักและค่าอัตราส่วน L/FA 31
4.5	ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6..... 33
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับจำนวนรอบการทดสอบสถานะเปียกสลับแห้งของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน Na ₂ SiO ₃ /NaOH เท่ากับ 90/10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 36
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_{u(w-d)}/q_{u0}$ กับจำนวนรอบการทดสอบสถานะเปียกสลับแห้งของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน Na ₂ SiO ₃ /NaOH เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 37
4.8	ความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียน้ำกับจำนวนรอบการทดสอบของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน Na ₂ SiO ₃ /NaOH เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.9 ความสัมพันธ์ร้อยละการดูดซึมน้ำกับระยะเวลาแช่น้ำของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจีไอโพ
ลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ90:10 และอัตราส่วนL/FA เท่ากับ1.6..... 39



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

NaOH	= Sodium Hydroxide
Na ₂ SiO ₃	= Sodium Silicate
L	= Liquid Activator
FA	= Fly Ash
ASTM	= American Society for Testing Materials
SiO ₂	= Silicon dioxide
Al ₂ O ₃	= Aluminium oxide
KOH	= Potassium Hydroxide
CSH	= Calcium silicate hydrate
Ca(OH) ₂	= Calcium Hydroxide
ACI	= American Concrete Institute
Fe ₂ O ₃	= Ferric oxide
CaO	= Calcium oxide
MgO	= Magnesium oxide
SO ₃	= Sulfate
LOI	= Loss on ignition
SEM	= Scanning Electron Microscope
LL	= Liquid Limits
PL	= Plastic Limits

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การผลิตน้ำประปาจะใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งเจือปนโคลนดินตะกอน กระบวนการผลิตน้ำประปามีวิธีการทำให้ตะกอนจับตัวกันและตกลงสู่ก้นบ่อ (Clarifiers) แล้วจึงระบายตะกอนเหลวออกไปยังลานตากตะกอน (Sludge Lagoons) เพื่อรอการกำจัดต่อไป การตากตะกอนที่ลานตากตะกอนนั้นจะอาศัยสภาพแวดล้อมจากธรรมชาติ เช่น กระแสลม แสงแดด และ อุณหภูมิ เป็นปัจจัยช่วยให้น้ำระเหยออกจากเนื้อดินตะกอน และใช้รถเครื่องจักรกลพลิกและกลับหน้าดินตะกอนเพื่อเร่งการระเหยของน้ำในมวลดินที่อยู่ชั้นล่าง เมื่อดินตะกอนมีสภาพที่แห้งแล้วจะมีลักษณะที่ร่วนซุยสะดวกต่อการขนย้ายออกจากพื้นที่โรงงานไปใช้ประโยชน์ในการถมที่ดินในรัศมีโดยรอบโรงงานผลิตน้ำบางเขนและเขตปริมณฑล ตะกอนแห้งเหลือทิ้งเฉลี่ยมีจำนวน 247 ตันต่อวัน และในบางช่วงมีมากถึงวันละ 300 ตันในฤดูแล้ง และ 700 ตันในฤดูฝน (คมกริช และคณะ, 2553) เนื่องจากปริมาณการผลิตน้ำประปายังคงมีอย่างสม่ำเสมอ ต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ปริมาณดินตะกอนประปาก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระบวนการผลิต ปัจจุบันลานตากตะกอนด้วยวิธีธรรมชาติของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีพื้นที่จำกัดสามารถรองรับและตากตะกอนเพื่อรอการลำเลียงขนย้ายได้ประมาณ 2 เดือน ทำให้โรงงานผลิตน้ำบางเขนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องตระหนักถึงปัญหาปริมาณของตะกอนและแนวทางการกำจัดตะกอนที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาผลิตวัสดุก่อสร้าง (Construction material) ชนิดจีโอโพลีเมอร์ (Geopolymer) โดยการผสมดินตะกอนกับสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) และเถ้าถ่านหิน (เถ้าลอย) และให้ความร้อนในปริมาณที่เหมาะสม วัสดุจีโอโพลีเมอร์นี้จัดเป็นวัสดุเขียว (Green material) ชนิดหนึ่ง ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

(ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก่อให้เกิด Greenhouse effect) งานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของสภาวะเปียกสลับแห้งต่อกำลังอัดของตะกอนดินเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่สำคัญในการออกแบบความคงทนของวัสดุก่อสร้าง โดยแปรผันตัวแปรควบคุม ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนการแทนที่ตะกอนดินประปาด้วยเถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน อายุบ่ม และจำนวนรอบของสภาวะเปียกสลับแห้ง ผลการศึกษาสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดของดินตะกอนดินประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อายุการใช้งานต่างๆ งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการประสานครหลวงและการประสานภูมิภาค ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในด้านการบริหารจัดการตะกอนดินประปาเหลือทิ้งที่มีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และ สิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ

1.2.1 เพื่อหาอัตราส่วนผสม (ระหว่างดินตะกอนประปา เถ้าลอย และสารกระตุ้น) และพลังงานความร้อน (อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่ม อายุการใช้งาน) ที่เหมาะสมต่อความต้านทานสภาวะเปียกสลับแห้ง

1.2.2 เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดของตะกอนดินประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่จำนวนรอบของการทดสอบเปียกสลับแห้ง

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ตะกอนดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นตะกอนดินประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน

1.3.2 เถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

1.3.3 สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ NaOH และ Na_2SiO_3 ในอัตราส่วนผสม 50:50, 30:70, 20:80, 10:90 และ 100:0 NaOH เท่ากับ 10 โมล

1.3.4 อัตราส่วนผสมระหว่างตะกอนดินประปาต่อเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 70:30

1.3.5 อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 65, 75, 85 และ 95 °C ในระยะเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง

1.3.6 ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง (ก่อนทดสอบกำลังอัด การดูดซึมน้ำ และความคงทน) จะทดสอบที่ 7 และ 28 วัน

1.3.7 ตัวอย่างตะกอนดินประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร

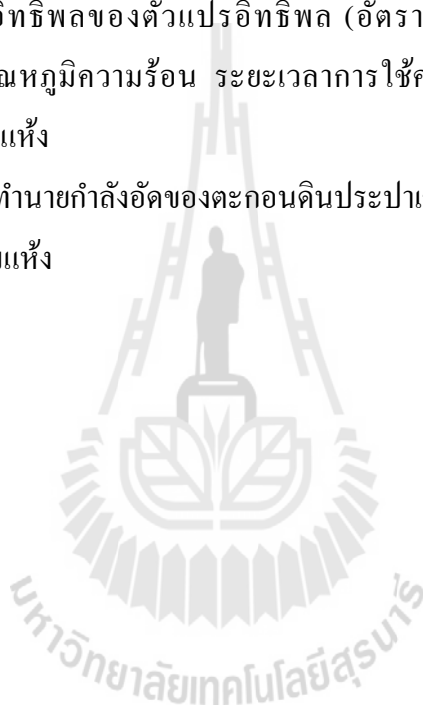
1.3.8 จำนวนรอบในการทดสอบสถานะเป็ยกสลับแห้ง มีค่าเท่ากับ 0, 1, 3, 6, 9 และ 12 รอบ

1.3.9 การทดสอบกำลังอัด การดูดซึมน้ำ และความคงทน ทำตามมาตรฐาน ASTM

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรอิทธิพล (อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ อุณหภูมิความร้อน ระยะเวลาการใช้ความร้อน และอายุบ่ม) ต่อความต้านทานสถานะเป็ยกสลับแห้ง

1.4.2 ได้สมการทำนายกำลังอัดของตะกอนดินประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่จำนวนรอบของการทดสอบเป็ยกสลับแห้ง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการศึกษาและพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมาและเกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้

2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

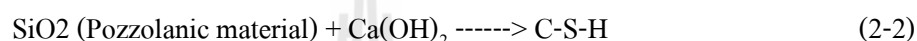
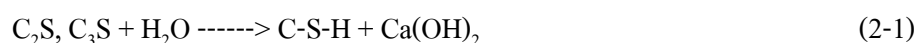
จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบ บอ สัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อนินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1950 โดย Dr. Glukhosky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นานในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุองค์ของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก ส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นส่วนใหญ่โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง

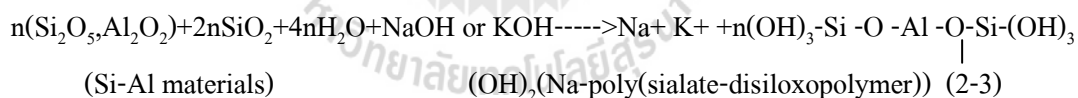
2.1.1. การเปรียบเทียบปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Portland cement Hydration VS Geopolymerization)

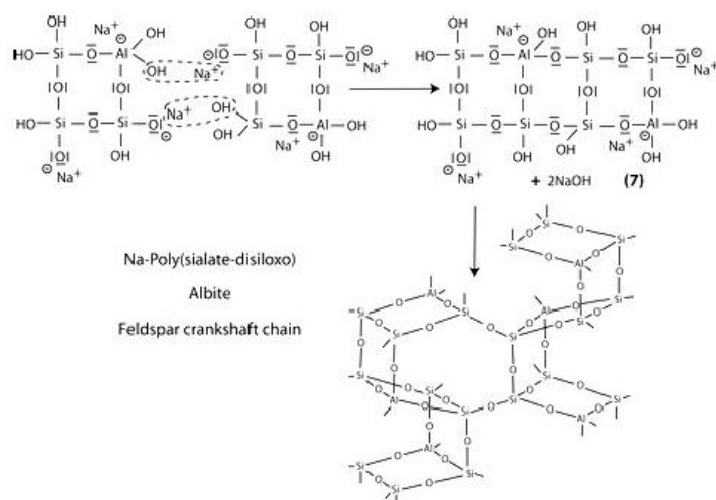
ลักษณะโครงสร้างของ Hydration ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ Geopolymer นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงกล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการ

เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Portland Cement Hydration) ดังสมการที่ 1 ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และให้กำลังอัดกับคอนกรีตซีเมนต์เพสหรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว โดยเมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่สองเกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ดังสมการที่ 2 ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น (CSH) จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสมีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น



จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุ และการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของซิลิเกต (Si) อะลูมิเนียม (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้อะลูมิเนียม แยกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain เกิดขึ้นซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วยดังสมการที่ 3 และ 4





รูปที่ 2.1 polycondensation of Na-poly(sialate-disiloxo) albite framework

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแก้วานหินมีส่วนประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักหากนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์จะสามารถทำให้เกิดสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เหมือนคอนกรีต สารจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินารวมตัวกันและเมื่อรวมกับสารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกันก็จะก่อตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในกระบวนการและการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปกติ สารจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอโพลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จึงทำให้ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายมากกว่า

2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลายของเกลือคลอไรด์ที่มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการล้างไขมันออก เช่น อุตสาหกรรมทำสบู่ อุตสาหกรรมกระดาษตามบ้าน มีใช้ในรูปของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟอาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

2.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำจัดเป็นด่าง ลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) จากน้อยไปหามาก

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		
	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3
อัตราส่วนโดยโมลไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)	1:1.97 ถึง 1:2.17	1:2.34 ถึง 1:2.58	1:3.18 ถึง 1:3.59
เหล็ก ร้อยละ ไม่เกิน	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟต ร้อยละ ไม่เกิน	0.21	0.21	0.21

โดยชนิดที่เลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือชนิดที่ 2 ตามม.อ.ก. 433-2539 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

Property	Percent by weight
Na_2O	15.36 %
SiO_2	33.28 %
H_2O	51.36 %

2.3 เถ้าลอย

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ได้จากการเผ่าถ่านหินในโรงงานโรงไฟฟ้าถ่านหินเถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโลมีสีเทาเทาดำหรือน้ำตาลเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (pozzolan) สังกะหรณ์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอลูมินาเมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาคแต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร Ca(OH)_2 และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหินอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาของการเผาดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

ก่อนที่จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยควรทราบกฎเกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีตมีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิงถึงจะมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้งาน

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้นส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินขบวนการเผาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตามมาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 2.1

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาอลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ต้องมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับเพื่อให้มั่นใจว่าเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วยสำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดระยะเวลาก่อนตัวได้และยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

Chemical composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์อะลูมินาออกไซด์และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3), min %	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition (LOI), max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงานซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่ายนอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มากการควบคุมในด้าน air entrainment ของคอนกรีตจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ alkali-aggregate ขึ้นได้ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาจะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

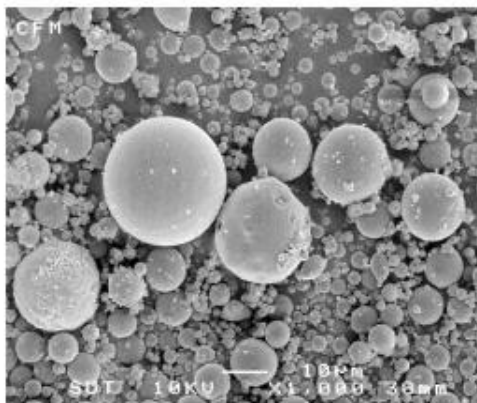
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เกาะพ.ศ.2433 - 2541 คุณสมบัติโดยทั่วไปมีปริมาณออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงกว่าร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมากคือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือปริมาณ Fe_2O_3 จะสูงกว่าเถ้าลอยแหล่งอื่นที่มีอยู่ในประเทศไทยส่วนมากจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เกาะระหว่างปีพ.ศ.2533 – 2541

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปีพ.ศ.2533 – 2541

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2534	42.8	23.3	14.0	10.5	2.4	0.8	2.3	3.9	0.7
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2536	43.1	20.0	13.2	13.0	2.7	1.3	2.4	2.6	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	1.4	0.9	2.0	2.8	0.3
2538	40.6	22.8	12.8	14.4	2.5	0.7	2.0	2.8	0.9
2539	40.6	23.6	23.0	13.0	2.5	1.2	3.0	2.4	0.7
2540	41.5	28.1	10.0	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2541	37.3	22.1	11.4	11.4	2.7	1.1	2.7	2.5	0.1

2.4.1 รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมบางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุนมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยมเมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์อำเภอแม่เมาะจังหวัดลำปางโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลมดังรูปที่ 2.2 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตแข็งแรงต่อการแตกหักของคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้



รูปที่ 2.2 Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอยขยาย(1,000 เท่า)

2.4.2 ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมโครเมตร) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่านั้นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่านอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blaine specific surface-area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี particle size-analysis หรือวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัมการทดสอบเทอร์บิดิเมเตอร์ (turbidimeter test) ตาม ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์โดยการทดสอบทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มากทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบโดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมากแต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางการบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าวดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความถ่วงจำเพาะความละเอียดและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ
 เถ้าลอยอำเภอแม่เมาะจังหวัดลาปาง

Simple Type	Specific Gravity	Retained on Sieve 325 %	Air Permeability (cm ³ /mg)	Mean Particle Size (micron)
ซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.02	37.4	2370	28.5

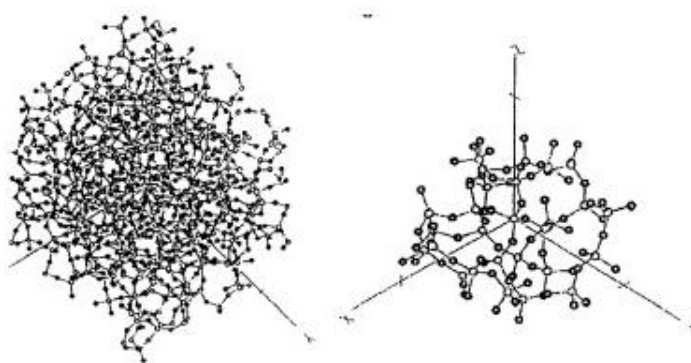
จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

2.4.3 การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลาน โดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 7 วันและ 28 วันเพื่อแสดงถึงอัตราการเกิดหรือความไวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอย

2.5 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน

โครงสร้างผลึกซิลิกาอสัณฐานจะมีการเรียงตัวกันของอะตอมหรืออนุภาคยังไม่เป็นระเบียบดังแสดงในภาพที่ 3.3 และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆซิลิกาอสัณฐานจะเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกซิลิกาซึ่งผลึกซิลิกาดังกล่าวมีโครงสร้างผลึกต่างๆคือควออร์ซ ไทรดิไมท์และคริสโทรบอลไลท์โดยที่แต่ละโครงสร้างจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน (Makino et al., 1999)

(ก)แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดใหญ่ของซิลิกาอสัณฐาน ($\text{Si}_{400}\text{O}_{800}$ cluster)

(ข)แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดเล็กของซิลิกาอสัณฐาน ($\text{Si}_{27}\text{O}_{72}$ cluster)

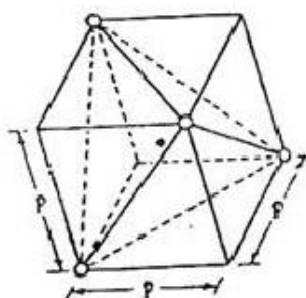
(o คืออะตอมของออกซิเจน, o คืออะตอมของซิลิกอน)

2.6 โครงสร้างผลึก

โครงสร้างผลึกซิลิกามีอยู่ 3 โครงสร้างคือควออร์ซ ไทรดิไมท์และคริสโทรบอลไลท์โดยแต่ละโครงสร้างผลึกจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจะเป็นไปอย่างช้าๆ จากโครงสร้างผลึกหนึ่งไปยังอีกกลุ่มหนึ่งดังนั้น โครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิสูงจะยังคงมีอยู่ถึงอุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างและแต่ละโครงสร้างผลึกจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 2 โครงสร้างคือ α - จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและ β -จะเกิดที่อุณหภูมิสูง (Deer et al., 1971)

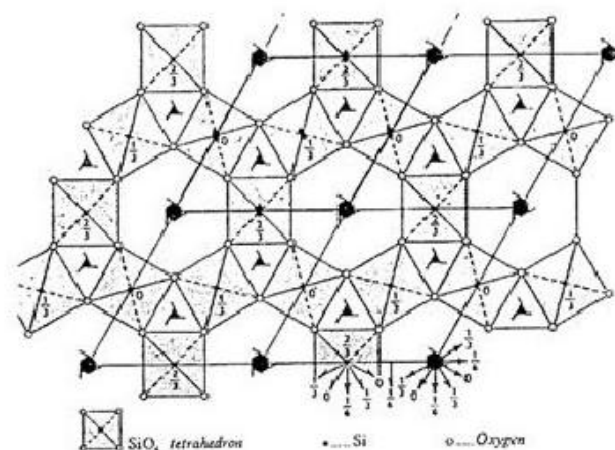
โครงสร้างผลึกซิลิกาแต่ละโครงสร้างประกอบด้วยโมเลกุล SiO_4 ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนเกาะอยู่ที่มุมและอะตอมของซิลิกอนอยู่ตรงกลางประกอบกันอยู่เป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้าของ SiO_4 (SiO_4 tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ในแต่ละโครงสร้างผลึกซิลิกาอะตอมออกซิเจนจะเกาะกับอะตอมซิลิกอน 2 อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงในการเปลี่ยนโครงสร้างระหว่าง α -กับ β - เช่น α - ควออร์ซ

ไปเป็น β -ควอซการเปลี่ยน โครงสร้างดังกล่าวจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอมเพียงเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกระหว่างโครงสร้างที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกับที่ อุณหภูมิสูงเช่น โครงสร้างผลึกแบบควอซเปลี่ยนไปเป็นไตรคิมเมอร์หรือคริสโทบอลไลท์การเปลี่ยน โครงสร้างดังกล่าวจะเกิดเนื่องจากการสลายของพันธะและการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอม (Deer et al., 1971)



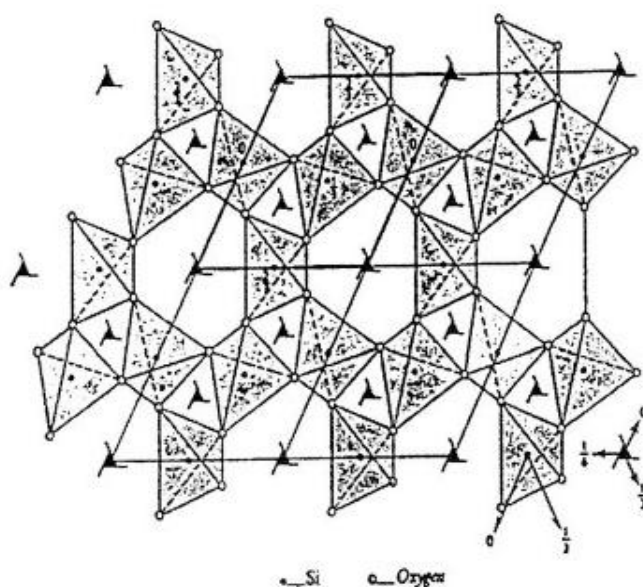
ภาพที่ 3.5 รูปทรงสี่หน้าของ SiO_4 (SiO_4 tetrahedral) (Deer et al., 1971)

β -ควอซมีความสมมาตรแบบเฮกซะกอนอล (hexagonal symmetry) มีกลุ่มปริภูมิ $P6_3/22$ หรือ $P6_3$ และหน่วยเซลล์ (unit cell) หนึ่งหน่วยประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) 3 โมเลกุลซึ่งประกอบกันเป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้าดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 โครงสร้างผลึก β -ควอซของบรอนนาม (0001) (Deer et al., 1971)

จะเห็นได้ว่าหน่วยรูปทรงสี่หน้าเกาะกลุ่มเป็นวงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 3.7 ค่าความยาวของแต่ละด้านของหน่วยเซลล์คือ a 5.01 Å และ c 5.47 Å α -ควอ์ซมีสมมาตรแบบไตรกอนอล (trigonal symmetry) มีกลุ่มปริภูมิ $P3_121$ หรือ $P3_221$ ในหน่วยเซลล์หนึ่งเซลล์ประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) 3 โมเลกุล โครงสร้างผลึกของ α -ควอ์ซมีลักษณะคล้าย β - คือมีการเกาะตัวกันของรูปทรงสี่หน้าของ SiO_4 เป็นวงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยมแต่จะมีการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึกดังแสดงในภาพที่ 3.7 ค่าความยาวของแต่ละด้านของหน่วยเซลล์คือ a 4.913 Å และ c 5.405 Å (Deer et al., 1971)



ภาพที่ 3.7 โครงสร้างผลึกของ α -ควอ์ซ โครงสร้างผลึกของ α -ควอ์ซ ฉายลงบน(0001)
(Deer et al., 1971)

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์โดยพบว่าจะมีการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 0.20-0.2, ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 3.50-4.50, น้ำ (H_2O) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 0.80-1.20 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเม้นต์พบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation) เกิดเป็นโครงสร้างแบบซีโอลิติก (Zeolitic) นอกจากนั้นคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ยังสามารถเติมสารต่างๆเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์สามารถพบเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆเช่นใน โครงสร้างยานยนต์และอากาศยานอุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆจีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกะพาสกาลมีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์นอกจากมีความแข็งแรงทดแทนความเย็น และต้านทานการสึกกร่อนทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบที่จะใช้กับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อนในด้านการคำนวณต้นทุนโดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมพบว่าการใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์จะดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในด้านการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงที่ต้องใช้เชื้อเพลิงมากในการเตรียมส่วนประกอบและไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 มากเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

นอกจากนี้ Hardjito และคณะ [23] ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมต่างๆและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ระหว่าง 0.095 ถึง 0.120 ของอัตราส่วนไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังอัดมากนักส่วนอัตราส่วนน้ำต่อโซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและกำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นในขณะที่การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้การรับกำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้นอย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมต่ำมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์มากกว่าเนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้นแต่ถ้าถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

ในเวลาต่อมา Hardjito และคณะ [24] ยังศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอูมิโน-ซิลิเกตโพลิเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงานเช่นถ่านหินองค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์

โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาวจากผลการศึกษาพบว่า จีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคตเพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแล้วยังมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วยแต่ยังมีเรื่องต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์อีกมาก ต่อมาในปี 2005 สมิตร์ [25] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินโดยศึกษาถึงค่ากำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. มีสารโซเดียมไฮดรอกไซด์สารละลายโซเดียมซิลิเกตและน้ำเป็นส่วนผสมมีอัตราส่วนผสมของเถ้าถ่านหินต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนักกำหนดอัตราส่วนสารโซเดียมไฮดรอกไซด์สารละลายโซเดียมซิลิเกตและน้ำต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 0.376, 0.386, 0.396 และ 0.416 โดยน้ำหนักอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมมีค่าเท่ากับ 25 และ 45 องศาเซลเซียสหลังจากทำการหล่อตัวอย่างแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วนนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจึงนำมาบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสการทดสอบกำลังอัดทำการทดสอบที่อายุ 1, 7 และ 28 วันผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและยังคงพัฒนากำลังอัดต่อไปอีกส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้นแต่จะมีการพัฒนาค่ากำลังอัดไปเรื่อยๆจนในที่สุดจะมีค่ากำลังอัดมากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

Alonso และ Palomo [26] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและสัดส่วนผสมที่มีผลต่อจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดีและได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายซีเมนต์เมื่อใช้ดินขาวผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 และเมื่อทำปฏิกิริยากันอย่างเข้มข้นจะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารที่ใช้กระตุ้นสูงขึ้นการก่อตัวจะช้าลงการบ่มด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้นสัดส่วนของ Metakaolin/ Ca(OH)_2 ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์แต่พบว่าปริมาณการเกาะตัวกันจะสูงขึ้นเมื่อมี Ca(OH)_2 สูงและการเติม Ca(OH)_2 ลงในผง Metakaolin เมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10M จะได้อลูมิโนซิลิเกตเช่นกันและก่อให้เกิด CSH gel และที่น่าสนใจมากก็คือการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 10M จะหน่วงการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเป็นเพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นทำให้ออนของสารแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับอุณหภูมิจะเป็นตัวเร่งให้ทำปฏิกิริยามากขึ้นการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 จะทำให้ปริมาณอะลูมิโนซิลิเกตเพิ่มสูงขึ้น

ในปี 2006 Chindaprasirt และคณะ [27] ได้ทดลองใช้เถ้าถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะโดยนำมาผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตได้ทำการควบคุมการไหลผ่าน (Flow) ร้อยละ 110 ± 5 ถึง 135 ± 5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลผ่านจะดีไม่ดีขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$

โดยมีค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำการศึกษาอยู่ระหว่าง 10-65 เมกะพาสคาลโดยสัดส่วนของ $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ ที่เหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 0.67-1 และศึกษาพบว่าแม้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นจาก 10M ไปเป็น 20M ก็ไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์และพบว่าหลังผสมจีโอโพลิเมอร์ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงในอุณหภูมิห้องก่อนให้ความร้อนด้วยการอบซึ่งอุณหภูมิที่ใช้บ่มที่เหมาะสมอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียสและควรรบมไม่เกิน 2 วันจะให้ความกำลังอัดที่สูงมากและจากการศึกษาด้วยกล้องขยายอนุภาคของเถ้านหินพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้านหินเป็นทรงกลมถึงแม้ว่าขณะผสมจีโอโพลิเมอร์จะเหนียวข้นจนต้องอาศัยการเติมน้ำเข้าไปร้อยละ 2-8 จะช่วยให้ความข้นเหลวดีขึ้นได้และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) ช่วยให้เห็นแบบได้ดีก็จริงแต่จะทำให้ค่ากำลังอัดลดต่ำกว่าการใช้น้ำจากการศึกษาครั้งนี้สรุปว่าค่าการไหลแผ่ให้ผลดีถ้าใช้อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2/\text{NaOH}$ อยู่ที่ 0.67-1 การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10M ถึง 20M ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่ 60-75 องศาเซลเซียสถ้ามากกว่า 75 องศาเซลเซียสโครงสร้างภายในจะสูญเสียอนุภาคของน้ำทำให้เกิดการแตกร้าวภายในเพราะโครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์มีโมเลกุลของน้ำอยู่ภายในถ้าโดนความร้อนมากโครงสร้างจะเปลี่ยนไปแม้ว่าจะรักษาอุณหภูมิการบ่มคงที่ที่ 60 องศาเซลเซียสให้นาน โดยหวังว่าค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นสุดท้ายการใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยในการผสมและเข้าแบบพบว่าใช้น้ำธรรมดาจะดีกว่าเพราะการใช้สารลดน้ำจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

Bakharev [21] ศึกษาความคงทนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้านหิน Class F เป็นสารตั้งต้นเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือนผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นและกำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นและพบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ถ้าใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นเพียงอย่างเดียวเป็นที่น่าเชื่อว่าการใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-Linked AluminoSilicate Polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือต่างๆ ดังนั้นความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับว่าการเลือกใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแข็งตัวรวมถึงความเข้มข้นของด่างด้วยจากการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นตัวกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นตัวกระตุ้นอย่างเดียวอีกทั้งยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากการใช้สาร KOH และ NaOH เป็นตัวกระตุ้นทำให้มีสารละลาย Alkaline ละลายปนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นเกลือซัลเฟตด้วยและยังพบรอยร้าวในตัวอย่างอีกด้วยและจากการทดลอง

พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเคียวและบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4-12 เมื่อแช่อยู่ในสารละลายเกลือซัลเฟต

ในปี 1984 Ohsawa และคณะ [10] ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้านหินในไฮดรตซีเมนต์โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรดเช่นกรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดพิคลิก (Picric Acid) และกรดซาลิซิลิก (Salicylic Acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาผลการทดสอบพบว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้นการใช้กรดพิคลิก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 ซึ่งการใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดซาลิซิลิกอย่างมา

Alonso และ Palomo [26] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุล (Microstructure) ของจีโอโพลิเมอร์เพศขณะเกิดปฏิกิริยากับต่างของจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ที่ทำจากเถ้านหินพบว่าโดยส่วนมากโมเลกุลของเถ้านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ขนาดต่างๆกันเมื่อถูกกัดโดยต่างจะเริ่มที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวของทรงกลมและขยายออกเป็นรูใหญ่จากนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปภายใน และทำปฏิกิริยาทั้งภายนอกและภายในทรงกลมจากนั้นเกิดการจับตัวกันจนแข็งจากการดูภาพขยายจะเห็นว่าอนุภาคทรงกลมมีรูทะลุอยู่ทั่วไปในเนื้อจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งแล้วและมีการจับตัวเชื่อมโยกันนอกจากนั้นสังเกตเห็นว่ายังมีเถ้านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ซึ่งเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณมากขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของต่าง, ขนาดอนุภาคของเถ้านหิน, ระยะเวลาการบ่มและการผสมและจากการศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟต์เกิดในการผสมจีโอโพลิเมอร์และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมงเกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นฝนิกคล้ายๆ กระเจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

อภิชาติ คำภาหส์ ได้ศึกษาอิทธิพลของกำลังรับแรงอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยด้วยวิธีแห้งสลับเปียก พบว่าอายุการใช้งานของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยจะมีค่าต่ำสุดคล้อยกับที่ ACI (1990) และ U.S. Army Corps of Engineers (2004) แนะนำว่ากำลังอัดของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบของการแห้งสลับเปียกการเพิ่มเถ้าลอยเพื่อช่วยให้ความหนาแน่นและการเกิดปฏิกิริยา pozzolanic ในดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และปริมาณที่เหมาะสมของดินเหนียวผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 7 และร้อยละ 20 ตามลำดับ

ปริมาณเถ้าลอยที่มากเกินไปจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด

งานวิจัยล่าสุดในการทำอิฐโพลิเมอร์จากดินตะกอน(Sukmak and Horpibulsuk, 2012) แสดงให้เห็นว่าดินตะกอนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับเถ้าถ่านหินในการผลิตวัสดุอิฐโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดและความคงทนสูง (กำลังอัดมีค่าสูงถึง 12 ถึง 14 MPa) ผลการศึกษาแสดงว่าปริมาณน้ำเหมาะสม(Optimum water content) ในการผลิตบล็อกอิฐโพลิเมอร์มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเถ้าถ่านหินและปริมาณและความเข้มข้นของสารกระตุ้น ส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำดินตะกอนอิฐโพลิเมอร์คืออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.7 และอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตเท่ากับ 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

จากรายงานของการประสานครหลวง ตะกอนดินประปาสามารถแบ่งออกเป็นช่วง 3 ฤดู โดยแต่ละฤดูมีอัตราส่วนของ %sand:%silt:%clay ต่างกัน ในช่วงฤดูฝน %sand:%silt:%clay เท่ากับ 21.49:44.46:34.05 มีลักษณะของเนื้อดินปานกลางค่อนข้างเหนียว เป็นดินร่วนผสมดินเหนียว ปริมาณอินทรีย์วัตถุค่อนข้างสูง ในช่วงฤดูหนาว %sand:%silt:%clay เท่ากับ 66.05:29.20:4.75 มีลักษณะของเนื้อดินหยาบ เป็นดินร่วนปนทราย ปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง และในช่วงฤดูแล้ง %sand:%silt:%clay เท่ากับ 65.64:24.09:9.47 มีลักษณะของเนื้อดินปานกลางค่อนข้างหยาบ เป็นดินทรายผสมดินร่วน ปริมาณอินทรีย์วัตถุปานกลาง-สูง ในทุกฤดูปริมาณมีซิลิกาในช่วง 49-58% และอะลูมินาในช่วง 29-35% จากรายงานจะเห็นว่าความแตกต่างของตะกอนดินในแต่ละฤดูอย่างเห็นได้ชัด

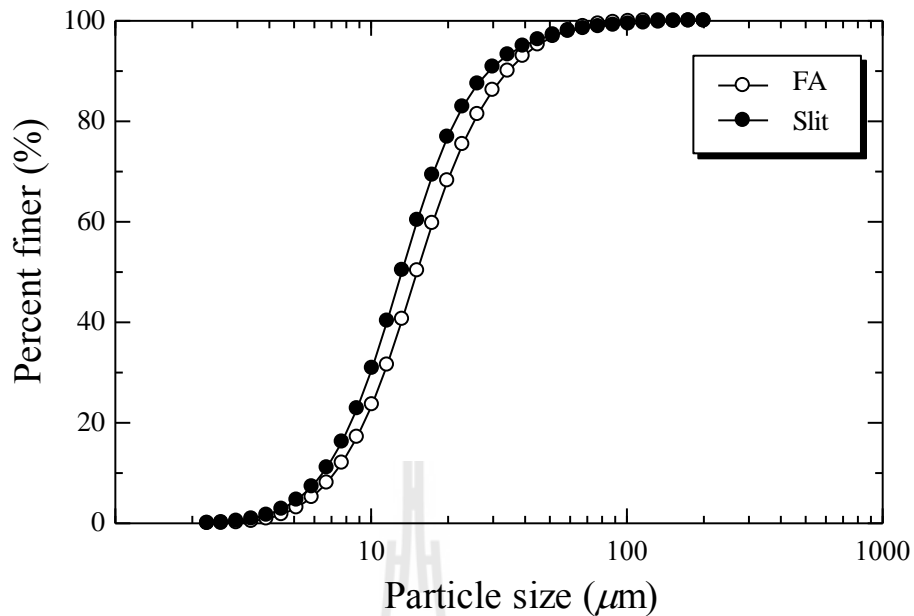
บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

บทนี้จะนำเสนอผลการศึกษา คุณสมบัติเบื้องต้น คุณสมบัติทางเคมีของดินตะกอน
ประปาและถ้ำลอย จากนั้นแสดงผลการศึกษาการบดอัดดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีไอโพลีเมอร์
สุดท้ายนำเสนอผลการศึกษาความคงทนของดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีไอโพลีเมอร์และ
เปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปาและถ้ำลอย

ตะกอนดินเก็บจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน เป็นดินที่เก็บมาจากช่วงฤดูฝน ตัวอย่างดิน
ประกอบด้วยทรายร้อยละ 0.12 ดินตะกอนร้อยละ 99.72 และดินเหนียวร้อยละ 0.16 และมีค่า
ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ชีดจำกัดเหลวร้อยละ 69 และไม่มีความเป็นพลาสติก ตามลำดับ
ส่วนประกอบทางเคมีและการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ภาพถ่าย
กำลังขยายของตะกอนดินแสดงดังรูปที่ 4.2

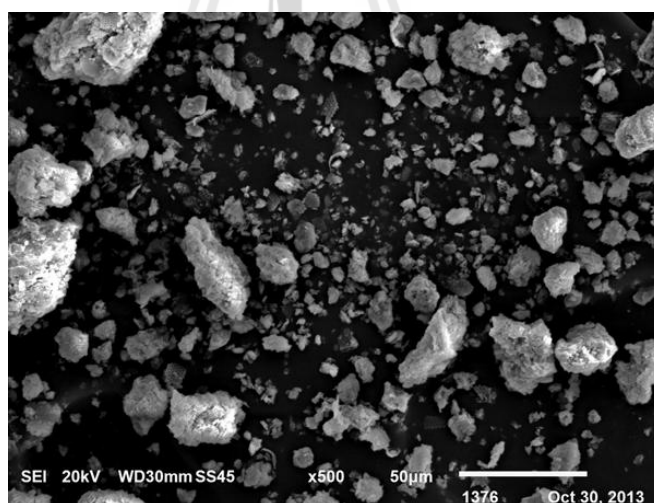


รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายขนาดของเม็ดดินและเถ้าลอย

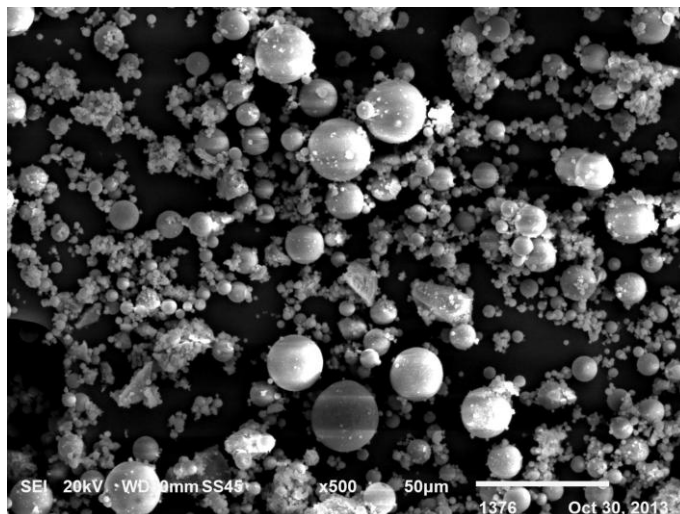
เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีคุณสมบัติทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 ผลรวมของปริมาณธาตุ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 67.31 ซึ่ง จำแนกเป็น Class C ตามมาตรฐาน ASTM C-618 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50}) ของเถ้าลอยเท่ากับ 15.17 ไมครอน การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าลอยแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งได้จากการทดสอบด้วย Laser particle size analysis ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยเท่ากับ 2.53 ภาพถ่ายกำลังขยาย FA แสดงในรูปที่ 4.3 จากกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคและภาพถ่ายกำลังขยาย จะเห็นได้ว่า อนุภาคของตะกอนดินมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของเถ้าลอย

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนดิน และเถ้าลอย

Chemical composition (%)	ตะกอนดิน	เถ้าลอย
SiO ₂	67.33	47.51
Al ₂ O ₃	22.47	13.14
Fe ₂ O ₃	6.15	6.66
CaO	0.68	30.24
MgO	N.D.	N.D.
SO ₃	1.04	N.D.
Na ₂ O	N.D.	0.41
K ₂ O	1.26	1.63
LOI	0.78	0.42



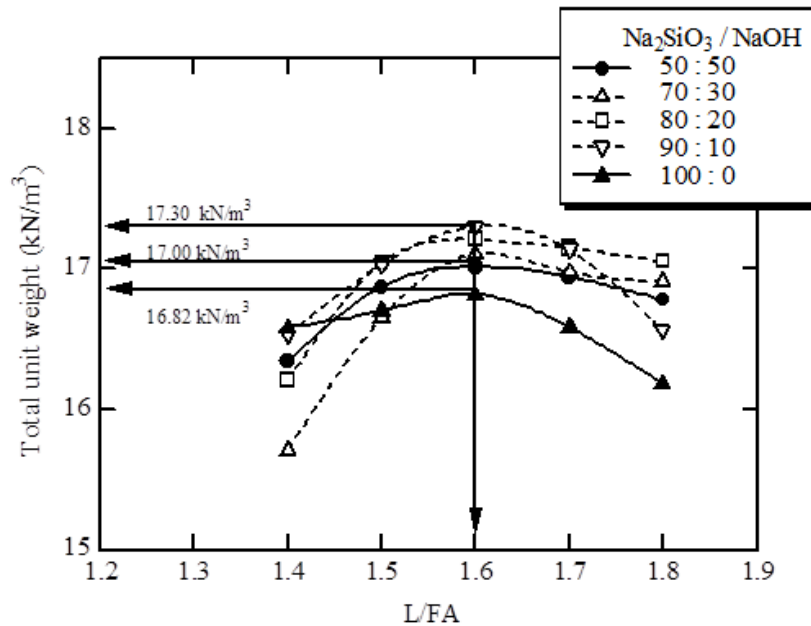
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของดินตะกอนประปา



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของแก้วลอย

4.2 ผลการทดสอบการบดอัด

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วน L/FA ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่างๆ ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเตรียมตัวอย่างตะกอนดินประปา-แก้วลอยจีโอโพลิเมอร์ อัตราส่วน L/FA เหมาะสมมีค่าประมาณคงที่เท่ากับ 1.6 สำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ หน่วยน้ำหนักสูงสุดแปรผันตามปริมาณสารกระตุ้นและมีค่าสูงที่สุดที่ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6

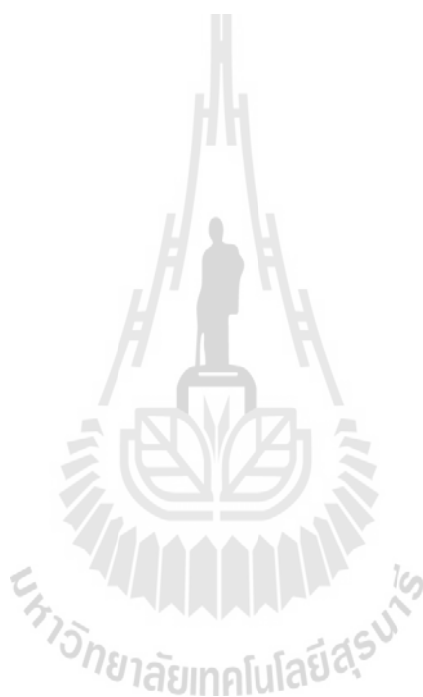


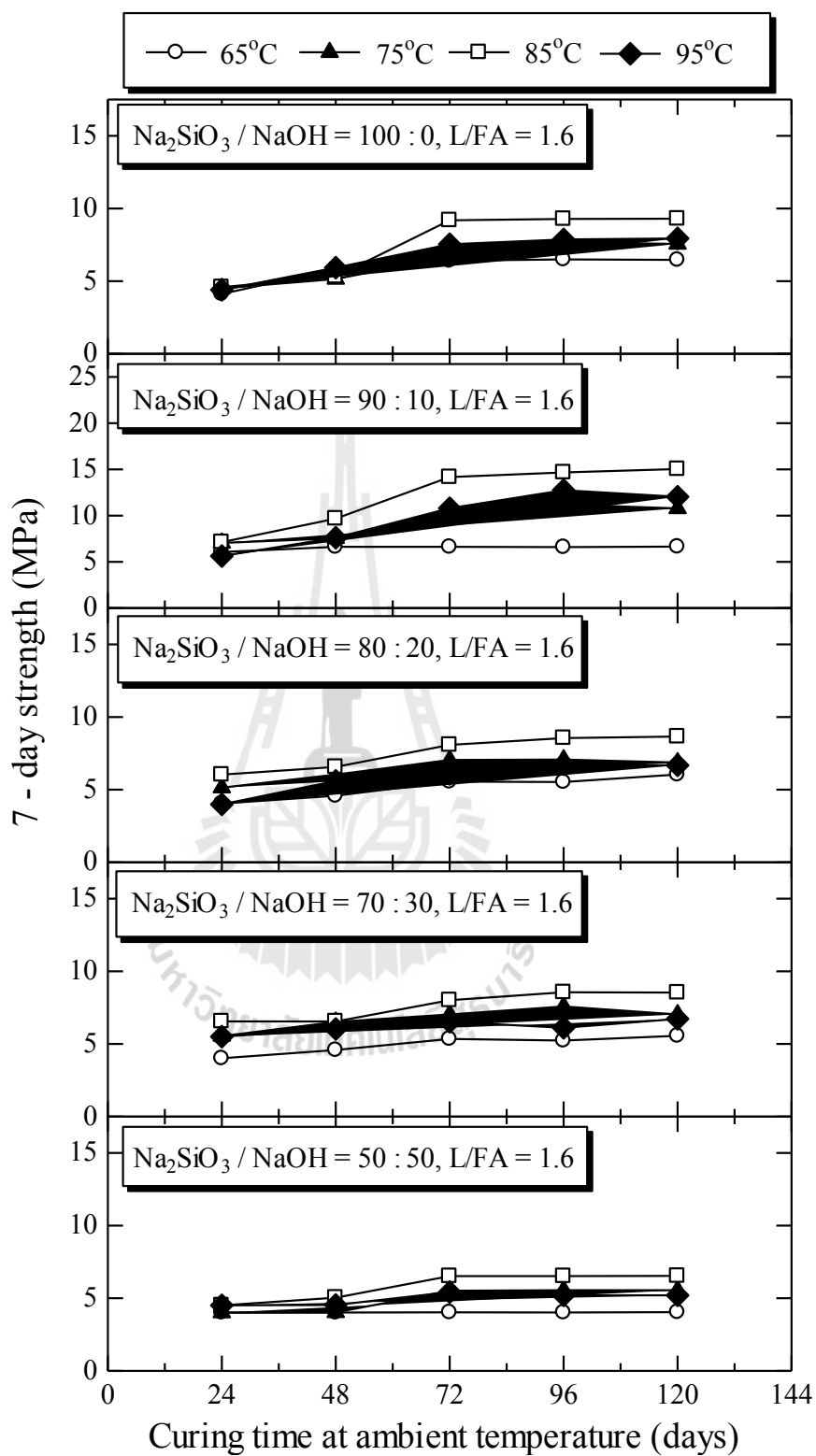
รูปที่ 4.4 กราฟการบดอัดของส่วนผสมระหว่างตะกอนดินประปา-เถ้าลอยสารกระตุ้น

4.3 การทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน

รูปที่ 4.5 แสดงผลกระทบบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 (หน่วยน้ำหนักสูงสุดสำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) สำหรับอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 100:0 90:10 80:20, 70:30 และ 50:50 อุณหภูมิบ่มเท่ากับ 65, 75, 85 และ 95°C และระยะเวลาบ่มเท่ากับ 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมงผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่มในตู้อบที่เพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลาบ่มในตู้อบเท่ากับ 3 วัน เมื่อระยะเวลาบ่มในตู้อบนานกว่า 3 วันกำลังอัดมีค่าเกือบจะคงที่สำหรับทุกอัตราส่วน L/FA การพัฒนากำลังอัดที่อุณหภูมิและระยะเวลาบ่มในตู้อบต่างๆ แปรผันอย่างมากตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ สารละลาย NaOH ทำหน้าที่ชะละลายซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ออกจากเถ้าลอยเพื่อทำปฏิกิริยา Geopolymerization กับสารละลาย Na_2SiO_3 ปริมาณ NaOH ที่ต่ำเกินไปจะไม่เพียงพอต่อการชะละลายซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ แต่หากสูงเกินไปจะทำเม็ดเถ้าลอยเกิดการแตก (Sukmak et al., 2013a และ 2013b) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 ให้กำลังอัดสูงสุด ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้อัตราส่วน L/FA ที่ขีดจำกัดเหลวต่ำที่สุด อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อการพัฒนากำลังอัดของดินตะกอนเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์สรุปได้ดังนี้ กำลังอัดของดินตะกอนเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จนกระทั่ง

อุณหภูมิเท่ากับ 85°C กำลังอัดของดินตะกอน-เถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 85°C อุณหภูมิที่ต่ำเกินไป (65 และ 75°C) ไม่เพียงพอต่อการกระตุ้นปฏิกิริยา Geopolymerization อุณหภูมิที่สูงเกินไป (95°C) อาจทำให้เกิดการลดลงของของเหลวในตัวอย่างจับปัด และส่งผลให้เกิดการแตกร้าวของโครงสร้างตัวอย่าง(Sukmak et al., 2013a และ b) ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างคือ 85°C





รูปที่ 4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอย
 จีโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6

4.4 ความคงทนของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลีเมอร์

การทดสอบความคงทนตามวิธีการทดลองของASTM D599 เมื่อสิ้นสุดการเตรียมตัวอย่างเปียกสลับแห้งในแต่ละรอบ ผู้วิจัยหาค่ากำลังอัดและค่าสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง ผลการทดสอบนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักมอก.57-2530 (ชั้นคุณภาพก.) และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก.58-2530 ซึ่งระบุให้กำลังอัดมีค่าไม่น้อยกว่า 7.0 และ 2.5 เมกกะปาสคาล สำหรับคอนกรีตรับน้ำหนักและไม่รับน้ำหนัก ตามลำดับ และการดูดซึมน้ำที่ขอมให้หมีค่าเท่ากับไม่เกินร้อยละ 14.29 รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับจำนวนรอบสภาวะเปียกสลับแห้งของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลีเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 อุณหภูมิบ่มเท่ากับ 65, 75, 85 และ 95°C และระยะเวลาบ่มเท่ากับ 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลีเมอร์ลดลงตามจำนวนรอบการทดสอบสภาวะเปียกสลับแห้งที่เพิ่มขึ้น จนถึงสภาวะเปียกสลับแห้งที่เท่ากับ 6 รอบ เมื่อจำนวนรอบการทดสอบสภาวะเปียกสลับแห้งมากกว่า 6 รอบ กำลังอัดมีค่าเกือบจะคงที่ สำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม ตัวอย่างที่อุณหภูมิบ่มเท่ากับ 85°C และระยะเวลาบ่มมากกว่า 72 ชั่วโมงให้กำลังอัดสูงสุดในทุกจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง

กำลังอัดของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลีเมอร์ที่สภาวะเปียกสลับแห้งเท่ากับ 12 รอบ มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานสำหรับคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (2.5 เมกกะปาสคาล) ทุกสัดส่วนผสม ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าบล็อกตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลีเมอร์สามารถใช้เป็นคอนกรีตบล็อกที่ไม่รับน้ำหนัก ซึ่งมีความทนทานต่อสภาวะเปียกสลับแห้งมากถึง 12 รอบ สัดส่วนของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลีเมอร์ที่ให้กำลังอัดสูงกว่าค่ามาตรฐานสำหรับคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (7.0 เมกกะปาสคาล) คืออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 ภายใต้อุณหภูมิบ่ม 85°C ในตู้อบเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 3 วัน

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความคงทนของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลีเมอร์แปรผันตามกำลังอัดในสภาวะแช่น้ำเริ่มต้น (Initial soaked strength, q_{i0}) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าตัวอย่างที่ทำขึ้นจากส่วนผสมที่ให้กำลังอัดเริ่มต้นเท่ากันจะมีความคงทนเท่ากัน ผลทดสอบที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการศึกษาคงทนของดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Kampala et al., 2014) ด้วยเหตุนี้เอง $q_{u(w-d)}$ ของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลีเมอร์ที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งต่างๆ จึงประมาณได้จากค่า q_{i0} และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $q_{u(w-d)}/q_{i0}$ กับจำนวนรอบเปียกสลับแห้ง (c) จึงเป็นความสัมพันธ์เดียวกันสำหรับทุกอุณหภูมิและระยะบ่มดังแสดงในรูปที่ 4.7

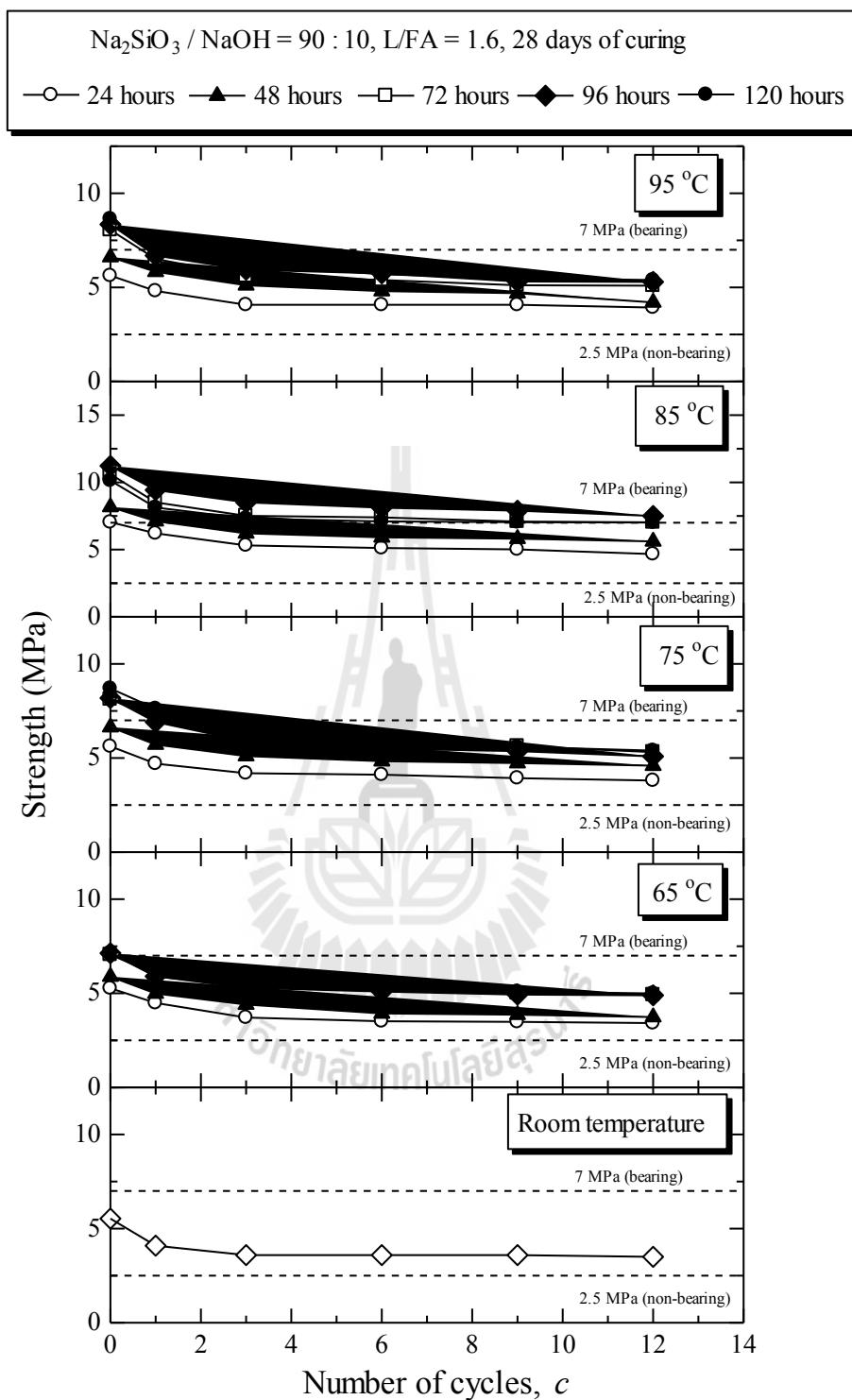
ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_{u(w-d)}/q_{u0}$ และ c สามารถประมาณได้ด้วยฟังก์ชันลอการิทึมดังสมการที่ (4.1)

$$q_{u(w-d)}/q_{u0} = 0.834 - 0.0717 \ln c \quad (4-1)$$

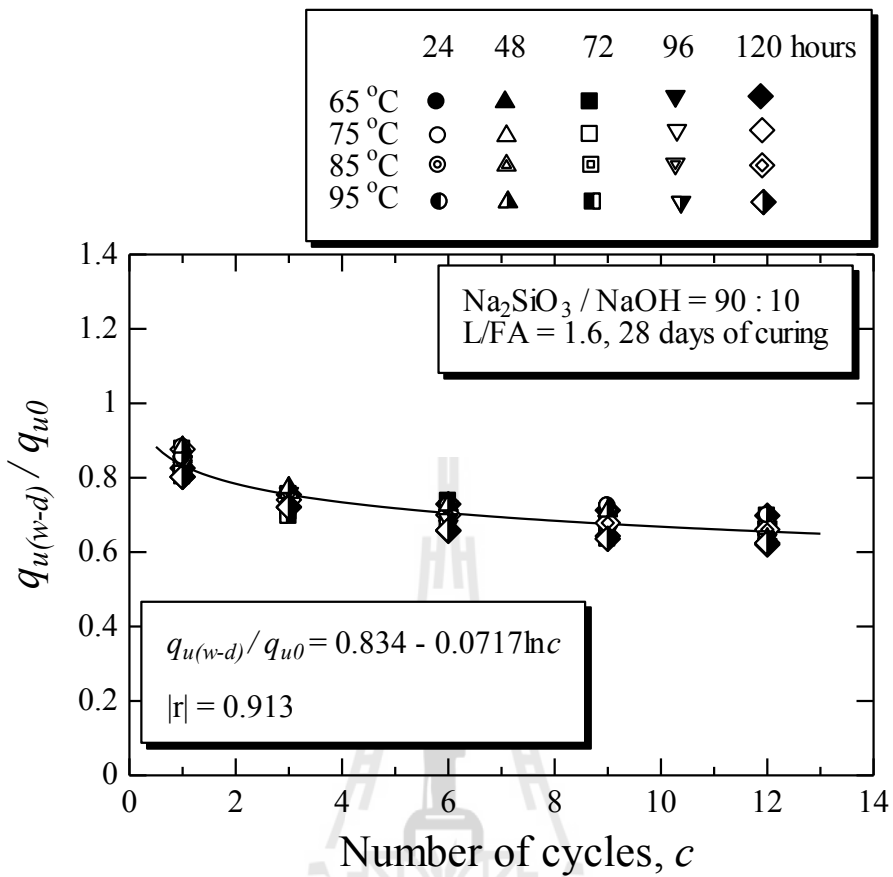
เมื่อสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation) มีค่ามากกว่า 0.90 สมการที่ (4.1) มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณกำลังอัดของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งค่าหนึ่งเมื่อทราบกำลังอัดในสภาวะเปียกเริ่มต้น

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักกับจำนวนรอบเปียกสลับแห้งของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 การสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบเปียกสลับแห้งในช่วง 6 รอบแรก เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเกินกว่า 6 รอบ การสูญเสียน้ำหนักมีค่าเกือบจะคงที่สำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของกำลังอัดของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ ตัวอย่างที่อุณหภูมิบ่มเท่ากับ 85°C และระยะเวลาบ่มมากกว่า 72 ชั่วโมง เกิดการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด (ประมาณร้อยละ 2.5) ซึ่งเป็นเป็นอุณหภูมิและระยะเวลาบ่มที่ให้กำลังอัดที่สูงสุดเช่นกัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิและระยะเวลาบ่มดังกล่าว

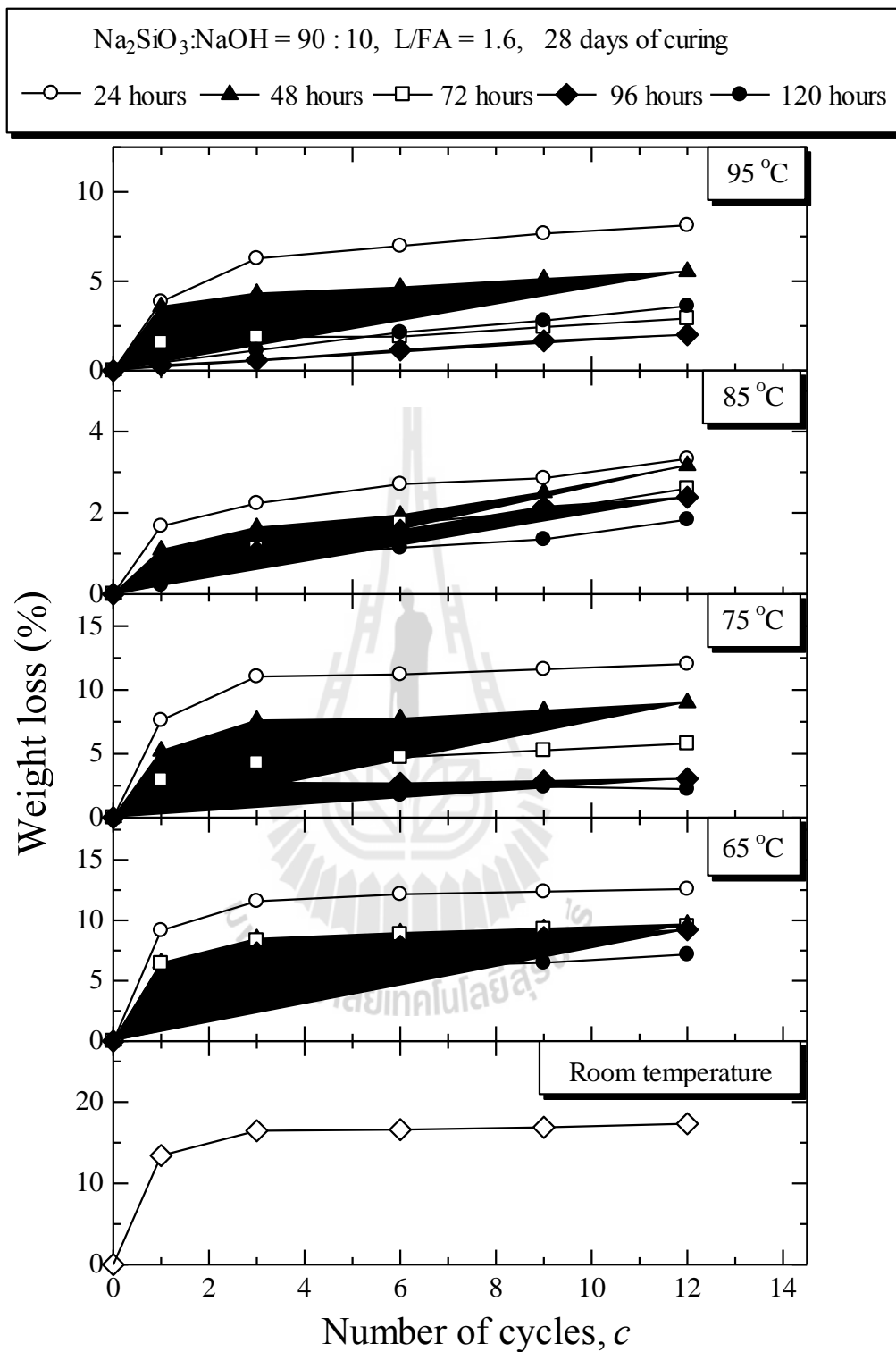
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซึมน้ำกับระยะเวลาแช่น้ำของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 ที่อายุการบ่มที่ 28 วัน มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักมอก. 57-2530 ระบุร้อยละการดูดซึมน้ำตามความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง ผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างมีค่าเฉลี่ยประมาณ 16 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (น้อยกว่า 16.48 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งตรงกับชั้นคุณภาพ ก ที่ระบุว่าคอนกรีตบล็อกที่มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่า 16.2 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ต้องมีการดูดกลืนน้ำไม่เกิน 240 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ร้อยละ 14.3) รูปที่ 3.9 แสดงร้อยละการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาที่แช่น้ำสำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม ร้อยละการดูดซึมน้ำของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดสำหรับอุณหภูมิบ่มที่ต่ำกว่า 95°C ตัวอย่างที่บ่มด้วยอุณหภูมิสูงและนาน (อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลานานเกิน 72 ชั่วโมง) ร้อยละการดูดซึมน้ำของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าสูงเพราะการบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงและนานเกินไปทำให้ตัวอย่างหดตัวและเกิดการแตกร้าวระดับไมโครมิเตอร์ เนื่องจากการสูญเสียปริมาณความชื้นในตัวอย่างดิบ



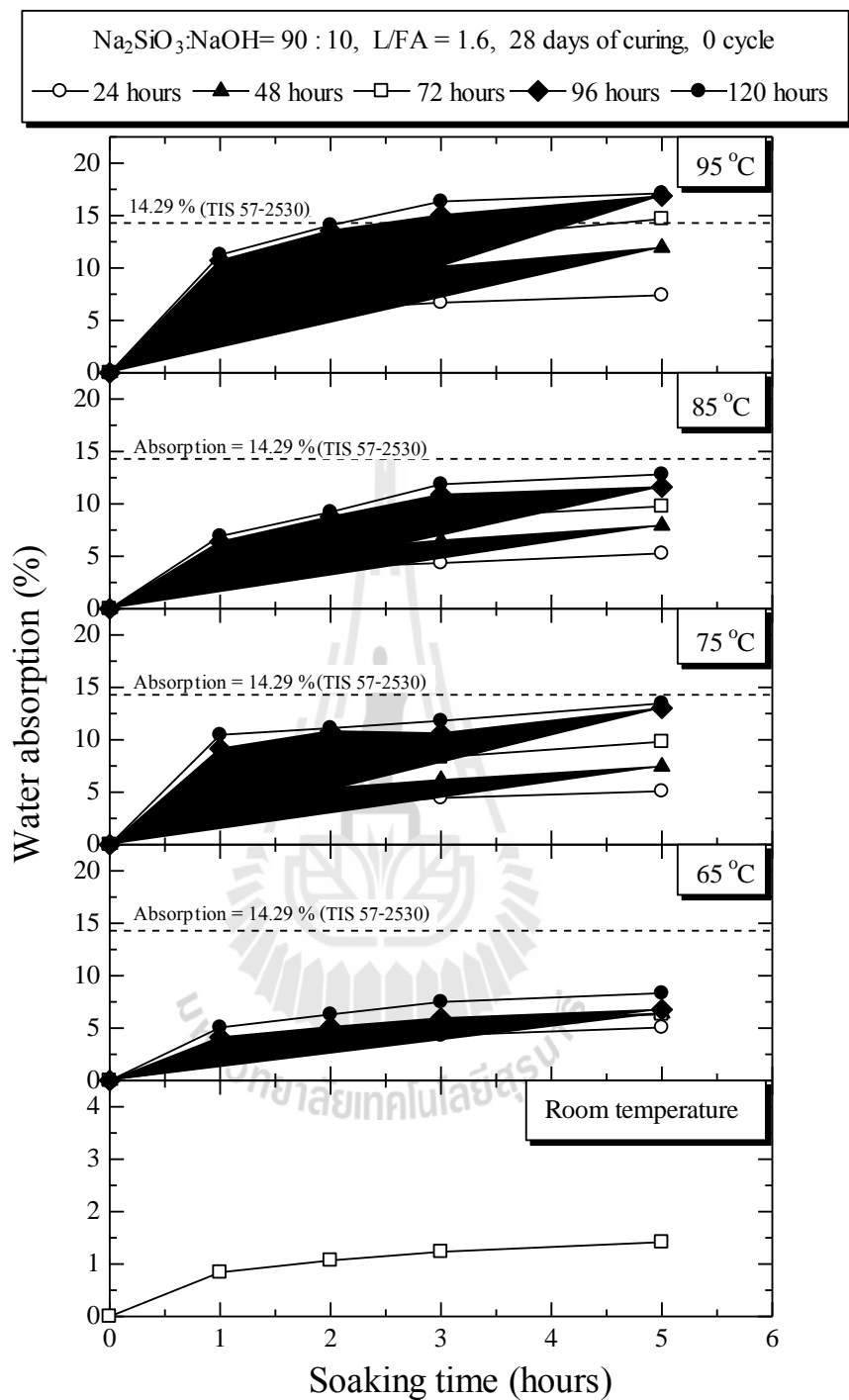
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับจำนวนรอบการทดสอบสถานะเป็ยกสลับแห่งของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90/10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $q_{u(w-d)}/q_{u0}$ กับจำนวนรอบการทดสอบสถานะเปียกสลับแห้งของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักกับจำนวนรอบการทดสอบของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอย
 จีโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ร้อยละการดูดซึมน้ำกับระยะเวลาแช่น้ำของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจิโฮ โพลีเมอร์ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

อิทธิพลของสถานะแห้งสลับเปียกต่อกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ให้ค่าสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ให้ค่าสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)คืออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.6 ที่อุณหภูมิ 85°C ระยะเวลาบ่มไม่น้อยกว่า 3 วัน
2. กำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งแปรผันตามกำลังอัดในสถานะแช่น้ำเริ่มต้น การทดสอบความคงทนด้านสถานะเปียกสลับแห้งใช้เวลานานมาก งานวิจัยนี้จึงได้สร้างสมการทำนายกำลังอัดที่รอบเปียกสลับแห้งต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์ในฟังก์ชันบล็อกกักริซึม ดังนั้น กำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่จำนวนรอบเปียกสลับแห้งค่าหนึ่งสามารถประมาณได้ เมื่อทราบเพียงกำลังอัดในสถานะแช่น้ำเริ่มต้น
3. การสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบเปียกสลับแห้งในช่วง 6 รอบแรก เมื่อจำนวนรอบเปียกสลับแห้งเกินกว่า 6 รอบ การสูญเสียน้ำหนักมีค่าน้อยลงและเกือบจะคงที่ สำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของกำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์
4. ร้อยละการดูดซึมน้ำของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่บ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 85°C มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 14.3 ซึ่งเป็นค่ายอมให้ สำหรับคอนกรีตบล็อก การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงและนานเกินไป (สูงกว่า 95°C และนานเกิน 72 ชั่วโมง) ก่อให้เกิดการหดตัวและรอยแตกระดับไมโครเมตร เนื่องจากการสูญเสียของเหลวในตัวอย่างอย่างฉับพลัน ส่งผลให้ร้อยละของการดูดซึมน้ำมีเกินกว่าข้อกำหนด

รายการอ้างอิง

- ปริญญา จินดาประเสริฐ, ถนัดกิจ ชารีรัตน์, วราภรณ์ คุณาวานากิจ และ อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ, 2548, “การศึกษาเบื้องต้นการผลิตจีโอโพลิเมอร์ จากเถ้าลอยแม่เมาะ”, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า INV13-INV18.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ และ ถนัดกิจ ชารีรัตน์, 2549, “กำลังและโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ จากเถ้าลอยและดินขาวเผา”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11, เมษายน 2549, ภูเก็ต, หน้า MAT 043- MAT 050.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมไฮดรอกไซด์ มอก.150-2518**, กรุงเทพฯ : 2518
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมซิลิเกตเหลว มอก.433-2539**, กรุงเทพฯ : 2539.
- อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2549, “วัสดุจีโอโพลิเมอร์”, โยธาสาร, ปีที่ 18, ฉบับที่ 4, กันยายน-ตุลาคม, หน้า 55-60.
- Abrams, D.A., 1918, “**Design of Concrete Mixtures Bulletin 1**”, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, Revised Edition, 20 pp.
- Alonso, S. and Palomo, A., 2001, “**Alkaline Activation of Metakaolin and Calcium Hydroxide Mixtures: Influence of Temperature Activator Concentration and Solids Ratio**”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 1-2, pp. 55-62.
- Apichit Kampala, SuksunHorpibulsuk, NutthachaiProngmanee, Avirut Chinkulkijniwat, “**Influence of Wet-Dry Cycles on Compressive Strength of Calcium Carbide Residue-Fly Ash Stabilized Clay**”,
- Bakharev, T., 2004, “**Durability of Geopolymer Material in Sodium and Magnesium Sulfate Solution**”, Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 6, pp. 1233-1246.
- Chareerat, T., Lee-Anansaksiri, A. and Chindaprasirt, P., 2006, “**Synthesis of High Calcium Fly Ash and Calcined Kaolin Geopolymer Mortar**”, International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer, 24-25 May2006, Thailand, pp. 327-335.

- Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V., 2006, "**Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer**", Cement and Concrete Composites, Vol. 29, No. 3, pp. 224-229.
- Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U., 2006, "**A Comparative Study of Preparations and Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer**", International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer, 24-25 May2006, Thailand, pp. 63-712..
- Chindaprasirt, P., Rattanasak, U. and Kendall, K., 2006, "**Microstructure and Strength of Portland Cement Composite Containing Fly Ash and Metakaolin**", International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer, 24-25 May2006, Thailand, pp. 262-270.
- Davidovits, J., 1984, "**Mineral Polymers and Methods of Making Them**", USA, US Patent No. 43493863.
- Davidovits, J., , 1991, "**Geopolymer: Inorganic Polymeric New Materials**", Journal of Thermal analysis, Vol. 37, pp. 1633-1656.
- Davidovits J., 1994, "**Properties of Geopolymer Cements**", Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev State Technical University, Vol. 1, pp. 131-149.
- Davidovits, J., 1999, "**Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology**", Proceedings: 2nd International conference on geopolymer, France : Paris, pp. 9-40.
- Geopolymer'99, **International Conference and Publisher in the Proceeding of Geopolymer'99**, <http://www.geopolymer.org>, [2006 October 5].
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Criado, M., 2004, "**Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: a Descriptive Model**", Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 1204-1209.
- Fernandez-Jimenez, A., de la Torre, A.G., Palomo, A., Lopez-Olmo, G., Alonso, M.M. and Aranda, M.A.G., 2006, "**Quantitative Determination of Phases in the Alkaline Activation of Fly Ash. Part II: Degree of Reaction**", FUEL, Vol. 85, October 2006, pp. 1960-1969.

- Hardjito, D., Wallah, S.E. and Rangan, B.V., 2002, “**Study on Engineering Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete**”, Journal of the Australasian Ceramic Society, Vol. 38, No. 1, pp. 44-47.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. , 2003, “**The Effect of Mixture Composition and Curing Temperature on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete.**”, The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction , Bali, Indonesia, CMT 14-CMT 18.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V., “**Brief Review of Development of Geopolymer Concrete**”, American Concrete Institute, USA : Los Vegas, 25 May 2004, pp. 1-10.
- Hua, X. and Van Deventer, J.S.J., 1999, “**The Geopolymerization of Natural Alumino - Silicates**”, Proceedings: 2nd International conference on geopolymer, France : Paris, pp. 43-59.
- Lam, L., Wong, Y.L. and Poon, C.S., 2000, “**Degree of Hydration and Gel/Space Ratio of High- Volume Fly Ash/Cement Systems**”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 5, pp. 747-756.
- Maholtra, V.M., 2002, “**Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology**”, ACI Concrete International, Vol. 24, No.7, p. 22.
- Ohsawa, S., Asaga, K., Goto, S. and Daimon, M., 1985, “**Quantitative Determination of Fly Ash in the Hydrated Fly Ash – CaSO₄ · 2H₂O – Ca (OH)₂ System.**” Cement and Concrete Research, Vol. 15, No.2, pp. 357-366.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T., 1999, “**Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future**”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 8, pp. 1323-1329.
- PatimaponSukmak, SuksunHorpibulsuk, Shui-Long Shen, 2013, “**Strength Development in Clay-Fly Ash Geopolymer**”, Construction and Building Materials, p 566-574.
- Roy, D.M., 1999, “**Alkali-Activated Cements Opportunities and Challenges**”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 2, pp. 249-254.
- Songpiriyakij, S., 2548, “**Effect of Temperature on Compressive Strength of Fly Ash- Based Geopolymer Mortar**”, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548,ระของ, หน้า CON30-CON34.

- Swanepoel, J.C. and Strydom, C.A., 2002, “**Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material**”, Applied Geochemistry, Vol. 17, No. 8, pp. 1143-1148.
- Van, J., Van, D. and Lukey, G.C., 2002, “**The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash and Kaolinite-Based Geopolymers**”, Chemical Engineering Journal, Vol. 89, No. 1-3, pp. 63-73.
- Wallah, S.E., Hardjito, D., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V., 2004, “**Creep Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete**”, Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, USA : Las Vegas, pp. 49-60.



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, it features a stylized tower or spire. Below this, a silhouette of a person stands on a path that leads upwards. The base of the emblem is a circular seal containing a book and a leaf, symbolizing knowledge and growth. The entire emblem is surrounded by a decorative border.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

- W. Samingthong, S. Horpibulsuk & C. Suksiripattapong. (2014). **Durability against Wetting and Drying of Water Treatment Sludge-Fly Ash Geopolymer**. Advances in Civil Engineering for Sustainable Development (ACESD 2014). 4 pp.



Durability against Wetting and Drying of Water Treatment Sludge-Fly Ash Geopolymer

W. Samingthong, S. Horpibulsuk & C. Suksiripattapong
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

P. Sukmak
Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

ABSTRACT: The viability of using two waste materials: waste water treatment sludge and fly ash (FA) for developing sustainable masonry units is investigated in this paper. The water treatment sludge was from the Bang Khen water treatment plants of the Metropolitan Water Work Authority of Thailand (MWA) and fly ash (FA) was from the Mae Moh power plants of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). The durability against wetting-drying (w-d) cycles is an important parameter for service life design of the masonry units; however, studies on this aspect to date are very limited. It is proved that the sludge-FA geopolymer with a suitable heat condition (85°C for 72 hours) can be used as both non-bearing and bearing masonry units. The w-d cycle strength is dependent upon the initial soaked (without w-d cycle) and the w-d cycle strength number of w-d cycle relationship is represented by logarithm function. The proposed predictive w-d strength equation facilitates mix design to attain the required strength at a target service life, which is very useful for civil engineering practitioners.

1 INTRODUCTION

The increasing demand of treated water produced by the Metropolitan Waterworks Authority of Thailand (MWA) and in similar water treatment plants worldwide, has resulted in increasing quantities of sludge by-products generated annually. For MWA, the water treatment sludge is generated with the maximum capacity of $300 \times 10^3 \text{ m}^3$ per day in the dry season and about $700 \times 10^3 \text{ m}^3$ per day in the wet season. With the continuous increase in water demand due to growing population, the quantity of water treatment sludge is subsequently increasing at ever increasing rate and hence the urgent need to find a sustainable reuse option for the growing stockpiles of sludge, which in the past have been disposed to landfills.

Alkali-activated alumino-silicate cement, known as 'geopolymers' has become increasingly popular in recent years as an environmental friendly alternative to ordinary Portland cement (Davidovits et al., 1991). Geopolymers are furthermore touted for their high performance (high strength and durability), low CO₂ emission and low energy consumption. Silica rich materials such as clay or kaolin (Buchwald and Kaps, 2002), fly ash, and bottom ash (Davidovits et al, 1999) can be used as a precursor to react with the liquid alkaline activator.

Sukmak et al. (2013a and b) previously investigated the possibility of using FA as a precursor and

silty clay as aggregates to develop the clay-FA geopolymer brick. The 7-day strength of the clay-FA geopolymer is greater than 10 MPa, suitable as bearing masonry unit according to the Thailand Industrial Standard. The strength requirement is 2.5 MPa for non-bearing and 7.0 MPa bearing masonry units. It has been illustrated that the durability against sulfate attack of clay-FA geopolymer is better than that of clay-cement; i.e., there is no major change in the microstructure and pH of clay-FA geopolymer when exposed to sulfate solutions (Sukmak et al. 2014).

This research investigates durability against wetting and drying of sludge-FA geopolymer to ascertain its performance as a masonry unit. FA is used as a precursor and a mixture of NaOH and Na₂SiO₃ is used as a liquid alkaline activation. The geopolymerization reaction is accelerated by appropriate heat temperature and duration. This research will enable sludge traditionally destined for landfill to be used in a sustainable manner as an aggregate in geopolymer masonry units, which is significant in term of engineering, economical and environmental perspectives.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Materials

The sludge was collected from the Bang Khen water treatment plant of the Metropolitan Waterworks Au-

thority of Thailand. The sludge consists of 0.12, 99.72 and 0.16 percent of sand, silt and clay, respectively. The grain size distribution, chemical compositions of the sludge were obtained from laser particle size and X-ray Fluorescence (XRF) analysis as shown in Table 1 and Figures 1, respectively. The main mineral components in the sludge are quartz, illite, hematite, calcite, calcium sulfate and mullite. The sludge is composed mainly of SiO_2 and Al_2O_3 in crystal form. The specific gravity is 2.61. The liquid and plastic limits are 69 and 0 percent, respectively and the sludge is thus classified as a non-plastic material.

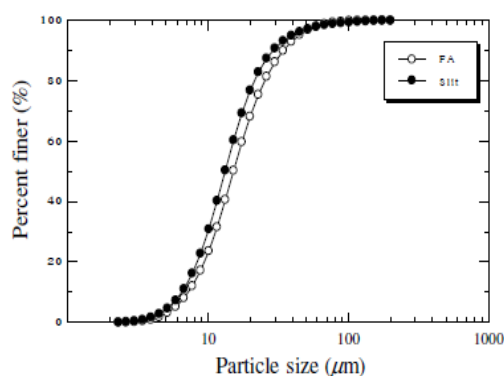


Figure 1. Grain size distribution of FA and sludge.

Table 1. Chemical composition of sludge and FA.

Chemical Composition	Sludge	FA
SiO_2	67.33	47.51
Al_2O_3	22.47	13.14
Fe_2O_3	6.15	6.66
CaO	0.68	30.24
MgO	N.D.	N.D.
SO_3	1.04	N.D.
Na_2O	N.D.	0.41
K_2O	1.26	1.63
LOI	0.78	0.42

FA was obtained from the Mae Moh power plant of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) in the northern region of Thailand. Total amount of the major components (SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3) are 67.58% while the CaO content is 30.24% (Table 1); therefore, it is classified as Class C fly ash.

2.2 Sample preparation

The sludge-FA geopolymer sample is a combination of sludge, FA and liquid alkaline activator (Na_2SiO_3 and NaOH). The sludge/FA ratio was fixed at 70:30. The $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio was 90:10 and L/FA was 1.6. The air-dried sludge and FA were mixed for 5 minutes in a mixer to ensure homogeneity of the mixture. The mixer was stopped and the mixture was

activated by the liquid alkaline activator and mixed for additional 5 minutes. The mixture was then compacted under the modified Proctor energy. Once the compaction curves were obtained, the sludge-FA-L mixture at the various L/FA contents was statically compressed in a cylindrical mold with 50 mm in diameter and 100 mm in height. The compression was performed by a manual hydraulic jack. The samples were dismantled, wrapped within vinyl sheet and then heated at 65, 75, 85 and 95°C for durations of 24, 48, 72, 96 and 120 hours. After heating, the samples were subsequently cured at room temperature (27-30°C) until 7 days of curing.

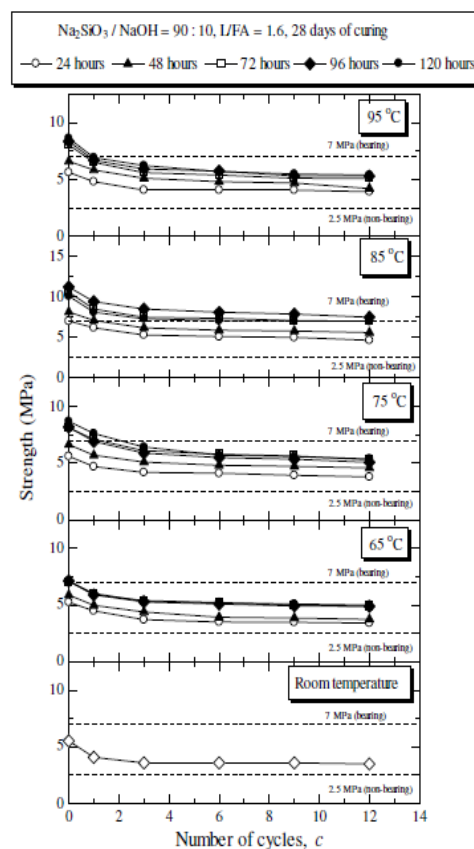


Figure 2. $q_d(w-d)$ versus c relationship for different heating conditions.

The method of cyclic wetting and drying test as per ASTM D 559 was adopted for sample preparations. The samples were submerged in deionized water at room temperature for 5 hours. They were then dried in the oven at a temperature of 70°C for 48 hours and air-dried at room temperature for at least 3 hours. This process is referred to as 1 w-d cycle. After attaining the target w-d cycles, the samples were immersed in deionized water for 2 hours at the constant temperature of $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Unconfined Compression (UC) tests were then undertaken with a rate of

vertical displacement of 1 mm/min. The 1, 3, 6, 9 and 12 w-d cycles were considered in this study.

3 TEST RESULTS

Figure 2 shows the relationship between wetting-drying (w-d) cycle strength, $q_{u(w-d)}$ and number of w-d cycles, c of sludge-FA geopolymer at temperatures of 65, 75, 85 and 95°C for 24, 48, 72 and 120 hours. For all temperatures and curing times, the $q_{u(w-d)}$ value decreases as c increases until $c = 6$. Beyond this c , the strength reduction is insignificant. The sample cured at 85°C with longer than 72 hours provides the highest strength for all c and regarding as the best heating condition.

The $q_{u(w-d)}$ values at 12 number of w-d cycles of all the samples are greater than 2.5 MPa, which is superior than the TIS standard for non-bearing unit. As such, this material can be considered as sustainable non-bearing masonry units, which high durability against wetting-drying up to 12 number of w-d cycles. It is noted that the sludge-FA geopolymer under the optimum heating condition (cured at 85°C for longer than 72 hours) can be considered as bearing masonry units ($q_{u(w-d)}$ at 12 number of w-d cycles) > 7 MPa).

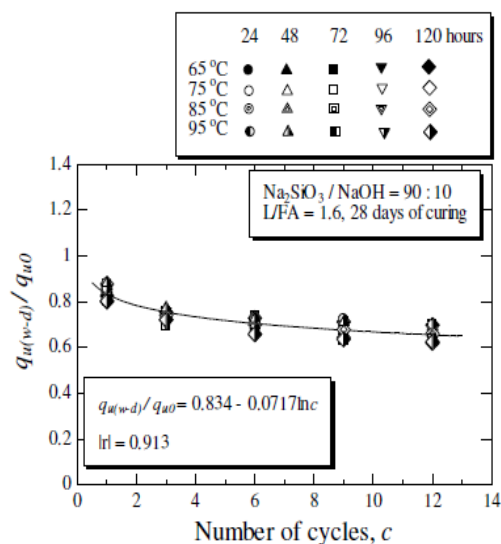


Figure 3. Normalized $q_{u(w-d)}$ versus c for sludge-FA geopolymer.

It is evident from the test results (Figure 2) that the $q_{u(w-d)}$ values at different c is dependent upon initial soaked (without w-d cycle) strength (q_{u0}) value. As such, q_{u0} is used as a variable in analyzing the relationships between $q_{u(w-d)}$ versus c . The normalized strength $q_{u(w-d)}/q_{u0}$ is plotted versus c as shown in Figure 3 as previously undertaken by Kampala et al. (2014) for Calcium Carbide Residue (CCR) stabilized clay. The $q_{u(w-d)}/q_{u0}$ for CCR stabilized clay at a

particular c is essentially the same for different CCR contents and FA contents. The same is also found for this study. The relationship between $q_{u(w-d)}/q_{u0}$ versus c is unique for different heating conditions and is represented by logarithm function in the form:

$$\frac{q_{u(w-d)}}{q_{u0}} = 0.834 + 0.072 \ln c \quad (1)$$

with a coefficient of correlation is 0.90. Using Eq. (1), the w-d cycle strengths of samples with various heating conditions at a target number of w-d cycle can be approximated once the corresponding q_{u0} is known. The q_{u0} is simply determined directly from laboratory UC test. Eq. (1) is thus useful for civil engineering practitioners since the durability test is a time-consuming.

4 CONCLUSIONS

This research investigates the viability of using waste materials (sludge and FA) for developing sustainable masonry units. Results of this study suggest that the initial soaked strength is critical for analysis of wet-dry cycle strength of sludge-FA geopolymer. The following conclusions can be drawn from this research study.

1. For all heating conditions, strength at 12 number of w-d cycles of sludge-FA geopolymer is higher than 25 MPa, which is acceptable as non-bearing construction units. The optimum heat condition (85°C for 72 hours) provides the highest strength at 12 number of w-d cycles of greater than 70 MPa, which is acceptable for bearing construction units.

2. The w-d cycle strength and number of w-d cycle relationship is represented by logarithm function for 1-12 cycles. The proposed predictive w-d strength equation facilitates mix design to attain the required strength at a target service life, which is very useful for civil engineering practitioners since the durability test is time-consuming.

5 ACKNOWLEDGEMENTS

This work was financially supported by Metropolitan Waterworks Authority of Thailand in the fiscal year 2013, the Thailand Research Fund under the TRF Senior Research Scholar program Grant No. RTA5680002.

6 REFERENCES

Buchwald, A. and Kaps Ch. 2001. Property controlling influences on the generation of geopolymeric

- binders based on clay, Geopolymer (Melbourn Australia).
- Davidovits, J., Buzzi, L., Rocher, R., Gimeno, D., Marini, C. and Tocco, S. 1999. Geopolymeric cement based on low cost geologic material, results from the European Research project GEO-CIS-TEM. Proceedings of the second international conference geopolymer: 83-96.
- Davidovits, J. 1991. Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 37:1633-1656.
- Kampala A, Horpibulsuk S, Prongmanee N, Chinkulkijniwat A. Influence of wet-dry cycles on compressive strength of calcium carbide residue-fly ash stabilized clay. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE* 2014;24(1):633-643.
- Sukmak, P., Horppibulsuk, S. and Shen, S.L. 2013a. Strength development in clay-fly ash geopolymer, *Construction and building Materials* 40: 566-574.
- Sukmak, P., Horppibulsuk, S., Shen, S.L., Chindaprasirt, P. and Suksiripattqanapong C. 2013b. Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials* 40: 1125-1136.
- Sukmak, P., Silva, P.D., Horpibulsuk, S. and Chindaprasirt, P. 2014. Sulfate resistance of clay-Portland cement and clay high-calcium fly ash geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*: doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001112.

ประวัติผู้เขียน

นายวิษณุกร สมิงทอง เกิดเมื่อวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2528 เริ่มเรียนชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านหนองตาเซียง ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนวัดหลวงวิทยาคม จังหวัดศรีสะเกษ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2551 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา และเริ่มทำงาน ในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี พ.ศ. 2555 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

ผลงานวิจัย : ได้นำเสนอบทความเข้าร่วมประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ “ความก้าวหน้าในด้านวิศวกรรมโยธาเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน 2014” ตามภาคผนวก ก

