

หน่วยนำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถาถอย
จีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**UNIT WEIGHT AND STRENGTH OF LIGHTWEIGHT
CELLULAR WATER TREATMENT SLUDGE-FLY ASH
GEOPOLYMER**



Sermsak Tiyasangthong

**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 2014

หน่วยนำหลักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.พรพจน์ ดันเส็ง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจ้านงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง : หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอ
โพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ (UNIT WEIGHT AND STRENGTH OF LIGHTWEIGHT
CELLULAR WATER TREATMENT SLUDGE-FLY ASH GEOPOLYMER)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข, 75 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ ตะกอนดินประปาได้จากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน เถ้าลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สารกระตุ้นเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการศึกษาครั้งนี้คือ อัตราส่วนระหว่างตะกอนดินประปาต่อเถ้าลอย ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณโฟม อุณหภูมิ และระยะเวลาบ่มด้วยความร้อน ผลการทดสอบพบว่าหน่วยน้ำหนักตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารกระตุ้น ปริมาณโฟม และอุณหภูมิและระยะเวลาบ่มด้วยความร้อน ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้กำลังอัดสูงสุดแก่ตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเท่ากับ 0.95LL สำหรับทุกอุณหภูมิ เมื่อ LL คือปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ขีดจำกัดเหลว ระยะเวลาบ่มด้วยความร้อนที่ทำให้กำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 96, 72 และ 48 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 45, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารกระตุ้นที่น้อยกว่า 0.95LL ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันซึ่งเห็นได้จากเถ้าลอยถูกทำปฏิกิริยาบางส่วน ปริมาณสารกระตุ้นที่เกิน 0.95LL ทำให้ปริมาณสารละลายในตัวอย่างเกิดการระเหย เมื่อบ่มตัวอย่างด้วยความร้อน และส่งผลให้เกิดโพรงระหว่างโครงสร้างของตะกอนดินประปากับเม็ดเถ้าลอย และการหดตัวและรอยแตกร้าวระดับไมโครในตัวอย่าง ด้วยเหตุนี้ กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ L เมื่อ L มีค่าน้อยกว่า LL และมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ L เมื่อ L มีค่ามากกว่า LL นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการเติมโฟมเพื่อลดหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์มีผลดีในแง่กำลังอัดมากกว่าการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากการวิเคราะห์ผลทดสอบด้านหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ ผู้วิจัยได้พัฒนาแผนภูมิออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาชนิด C14 และ C16 แบบไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการบล็อคอนกรีตมวลเบาเพื่อให้ได้ต้นทุนที่เหมาะสม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

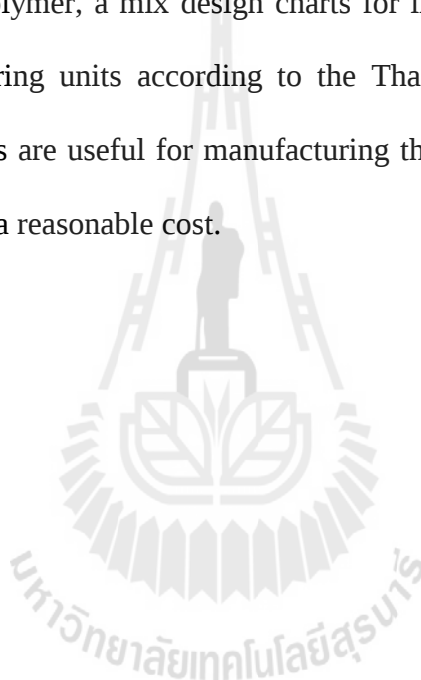
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SERMSAK TIYASANGTHONG : UNIT WEIGHT AND STRENGTH OF
LIGHTWEIGHT CELLULAR WATER TREATMENT SLUDGE-FLY ASH
GEOPOLYMER. THESIS ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK,
Ph.D., 75 PP.

SLUDGE/FLY ASH/LIQUID ALKALINE ACTIVATOR

This paper investigates unit weight and strength of the lightweight cellular water treatment sludge - fly ash geopolymer. The sludge was obtained from the Bang Khen water treatment plant of the Metropolitan Water Work Authority of Thailand (MWA) and the fly ash was obtained from the Mae Moh power plant of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). Liquid alkaline activator is sodium hydroxide (NaOH) with a concentration of 10 molar. The influential factors studied are fly ash replacement, liquid alkaline activator (NaOH) content, air content, heat temperature and heat duration. Test results show that the unit weight of lightweight cellular sludge-fly ash geopolymer decreases with increasing the liquid alkaline activator content (L), air content, heat temperature and heat duration. The optimum liquid alkaline activator providing the maximum compressive strength of lightweight cellular sludge-fly ash geopolymer is 0.95LL for all heat temperatures where LL is sodium hydroxide content at the limit liquid state. The heat duration providing the maximum compressive strength is 96, 72 and 48 hours for temperatures of 45, 65 and 85 °C, respectively. Microstructural images show that the L lower than 0.95LL is not enough to react geopolymerization as seen by very few reacted fly ash particles. The L greater than 0.95 LL leads to the evaporation of liquid in the test

samples when being heated and hence the large amount of pores and the shrinkage and micro-cracks in the samples. Consequently, with increasing L , the strength of lightweight cellular sludge - fly ash geopolymer increases when $L < LL$ and decreases when $L > LL$. It is also evident from this research that the foam addition to reduce unit weight is more advantage than the L addition in term of strength. Based on an analysis of the test results on the unit weight and strength of the lightweight cellular sludge - fly ash geopolymer, a mix design charts for lightweight concrete types C14 and C16 for non-bearing units according to the Thailand Industrial Standards are proposed. These charts are useful for manufacturing the lightweight cellular sludge - fly ash geopolymer at a reasonable cost.



School of Civil Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบคุณ กลุ่มบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่กรุณาแนะนำ ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นบุคคลสำคัญอย่างยิ่งที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นแสง อาจารย์ผู้สอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่คอยอบรมและสั่งสอนกับผู้วิจัย

อาจารย์ ดร.เชดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ ที่คอยแนะนำ ให้คำปรึกษาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนเรื่องทุนการศึกษาประจำปีการศึกษา 2555 และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

นอกจากนั้นผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนร่วมหลายๆ ท่านที่มีได้เอ่ยนามที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอบคุณ คุณณัฏฐา ดิยะแสงทอง ภรรยาที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

ท้ายนี้คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ นางวราภรณ์ ดิยะแสงทอง มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาและบุคคลต่างๆ ที่อาจกล่าวถึงไม่หมด ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์อันมีค่าให้แก่ผู้วิจัย จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 บริบทรศนั้วรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ประวัติความเป็นมาของจีโอโพลิเมอร์	4
2.3 ปฏิกริยาจีโอโพลิเมอร์	5
2.4 โครงสร้างจุลภาค	6
2.5 คุณสมบัติของสารจีโอโพลิเมอร์	7
2.6 เถ้าลอย	11
2.7 ตะกอนดินประปา	16
2.8 ประเภทของคอนกรีตมวลเบา	19
2.9 วัสดุปอชโซลาน	22

สารบัญ (ต่อ)

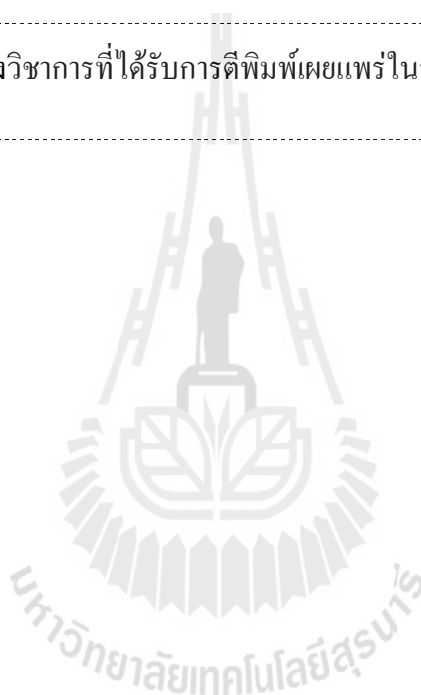
หน้า

2.10	ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน	22
2.11	การทบทวนวรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	25
3	แนวทางและวิธีการวิจัย	34
3.1	บทนำ	34
3.2	วิธีการทดสอบ	36
3.2.1	แหล่งที่มาตะกอนดินประปาและเถ้าลอย	36
3.2.2	ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น	36
3.2.3	การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	36
3.2.4	ปริมาณสารกระตุ้น	37
3.2.5	การเตรียมก้อนตัวอย่าง	37
3.3	การทดสอบโครงสร้างจุลภาค	37
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	39
4.1	บทนำ	39
4.2	คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปา และเถ้าลอย	39
4.3	หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์	42
4.4	กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์	46
4.5	อิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา	50
4.6	กำลังอัดและระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์	54
4.7	กำลังอัดและอายุบ่มตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์	58
4.8	การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างจุลภาค	60
4.9	หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และต้นทุนการผลิตตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์	63

สารบัญ (ต่อ)

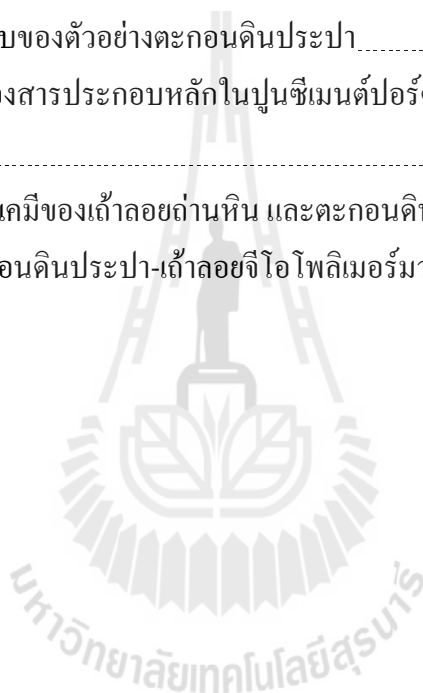
หน้า

5	บทสรุป.....	69
5.1	สรุปผลวิจัย.....	69
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	70
	รายการอ้างอิง.....	71
	ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	75
	ประวัติผู้เขียน.....	82



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	12
2.2	ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618.....	14
2.3	แสดงธาตุประกอบของตัวอย่างตะกอนดินประปา.....	17
2.4	สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	22
3.1	จำนวนตัวอย่าง.....	36
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน และตะกอนดินประปา.....	40
4.2	สัดส่วนผสมตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส.....	68



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต..... 6
2.2	ภาพถ่ายจีโอโพลิเมอร์แก้าลอยเพสต์ 7
2.3	อัตราส่วนของสารละลายไซเดียมซิลิเกตต่อไซเดียมไฮดรอกไซด์กับกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยแม่เมาะ 8
2.4	อุณหภูมิในการบ่มกับกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์ 9
2.5	ช่วงเวลาในการบ่มร้อนกับกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยแม่เมาะ 10
2.6	ช่วงเวลาก่อนในการบ่มร้อนกับกำลังรับแรงอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอยแม่เมาะ 11
2.7	ภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) ของแก้าลอย 15
2.8	Polycondensation of Na-poly(sialate-disiloxo) albite framework 16
2.9	กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ 20
2.10	ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวที่ขัดเรียบของ CLC 21
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นแห้ง 32
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตเซลลูลาร์ทำจากตะกอนน้ำเสีย 33
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย 35
4.1	การกระจายขนาดของดินตะกอนประปา และแก้าลอยถ่านหิน 40
4.2	รูปถ่ายกำลังขยายของตะกอนดินประปาและแก้าลอย 41
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตะกอนดินประปา-แก้าลอยและปริมาณสารกระตุ้นที่พิกัดเหลว..... 41
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณสารกระตุ้นของตะกอนดินประปา-แก้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ที่ อุณหภูมิ 45°C 43
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณสารกระตุ้นของตะกอนดินประปา-แก้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ ที่ อุณหภูมิ 65°C 44
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณสารกระตุ้นของตะกอนดินประปา-แก้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ ที่ อุณหภูมิ 85°C 45

สารบัญรูป (ต่อ)

[illegible]

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส อุณหภูมิ 65 °C ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน 24 ชั่วโมง ปริมาณฟองอากาศเท่ากับ 0%	61
4.20 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส ที่อุณหภูมิ 45, 65 และ 85°C ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน 120 ชั่วโมง	62
4.21 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส ปริมาณโฟมร้อยละ 0, 3, 5 และ 7% ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน 120 ชั่วโมง	62
4.22 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง	63
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนัก กำลังอัดและราคาของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลสที่ อุณหภูมิ 45°C	64
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนัก กำลังอัดและราคาของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลสที่ อุณหภูมิ 65°C	65
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนัก กำลังอัดและราคาของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลสที่ อุณหภูมิ 85°C	66

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing Material
BS	=	British Standard
Sludge	=	ตะกอนดินประปา
NaOH	=	sodium hydroxide
L	=	Liquid alkaline activator
°C	=	องศาเซลเซียส
M	=	molar
SEM	=	Scanning Electron Microscope
LL	=	พิกัดเหลว (Liquid Limit)
FA	=	Fly Ash
LOI	=	Loss on ignition
NTU	=	Nephelometric Turbidity Unit

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนเป็นโรงงานผลิตน้ำแห่งที่ 3 ของการประปานครหลวง ซึ่งสามารถผลิตน้ำประปาได้วันละประมาณ 3.6 ล้านลูกบาศก์เมตร แหล่งน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำประปามาจากแม่น้ำเจ้าพระยา ระยะห่างระหว่างคลองส่งน้ำดิบทางทิศตะวันออกถึงโรงงานผลิตน้ำประปามีระยะทางประมาณ 18 กิโลเมตร ตะกอนดินประปาเกิดจากการชะล้างหน้าดินจากพื้นที่ดินน้ำและพื้นที่ลุ่มน้ำของแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำแม่กลอง ตะกอนดินเหล่านี้จะปะปนมากับน้ำดิบในคลองส่งน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำ ตะกอนดินประปาเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปาเฉลี่ย 247 ตันต่อวัน โดยบางช่วงเวลามีมากถึงวันละ 300 ตันในฤดูแล้ง และ 700 ตันในฤดูฝน กรมกริข เวชศาสตร์และคณะ (2553) ตะกอนดินประปาทั้งหมดนำไปใช้ในการถมที่ดิน ซึ่งการประปานครหลวงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนดินประปา การประปานครหลวงจึงได้พยายามนำแนวคิด Zero Waste หรือ “ของเสียเหลือศูนย์” ในกระบวนการผลิตน้ำประปามาประยุกต์ใช้ในการกำจัดตะกอนดินประปาและสร้างมูลค่าเพิ่ม ซึ่งถือว่าเป็นโจทย์ที่ท้าทายของทุกภาคการผลิต

อิฐมวลเบา ถือได้ว่าเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในปัจจุบันเป็นอย่างมาก วัสดุดิบที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตอิฐมวลเบาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว ยิปซัม สารกระจายฟองอากาศ กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้พลังงานในกระบวนการผลิตมาก เพื่อเป็นการลดปัญหาโลกร้อนและเป็นการใช้ประโยชน์ของวัสดุเหลือทิ้ง งานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินประปามาผลิตอิฐมวลเบา จีโอโพลิเมอร์ สารจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ที่ใช้วัสดุปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นวัสดุหลัก เมื่อวัสดุปอซโซลานผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน วัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์จะก่อตัวและสามารถรับกำลังได้สูง งานวิจัยนี้ศึกษาหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ปัจจัยอิทธิพลในการศึกษาครั้งนี้คืออัตราส่วนระหว่างการแทนที่ตะกอนดินประปาด้วยเถ้าลอย (FA) ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ (L) อุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน และปริมาณโฟม การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดกับปัจจัยอิทธิพลจะอธิบายด้วยโครงสร้างทางจุลภาค (SEM) ท้ายสุด ผู้วิจัยจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักกับปริมาณโฟม ที่

ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ (L) อุณหภูมิ และระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการกำหนดส่วนผสมให้ได้กำลังอัดและหน่วยน้ำหนักที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารกระตุ้น อุณหภูมิ ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน และปริมาณโฟม ต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

1.2.2 เพื่ออธิบายอิทธิพลของปริมาณสารกระตุ้น อุณหภูมิ ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน และปริมาณโฟม ต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ด้วยโครงสร้างจุลภาค

1.2.3 เพื่อพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักกับปริมาณโฟม ที่ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ (L) อุณหภูมิ และระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนต่างๆ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ตะกอนดินประปาที่ใช้ในการศึกษานำมาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน

1.3.2 อัตราส่วนระหว่างตะกอนดินประปาต่อเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 50:50

1.3.3 สารกระตุ้นเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมล

1.3.4 อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 45, 65 และ 85°C ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนเท่ากับ 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง

1.3.5 ปริมาณโฟมมีค่าเท่ากับร้อยละ 0, 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนักตะกอนดินประปาและเถ้าลอย

1.3.6 ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง (ก่อนทดสอบกำลังอัด) จะทดสอบที่ 7 วัน สำหรับทุกสัดส่วนผสม

1.3.7 ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง (ก่อนทดสอบกำลังอัด) จะทดสอบที่ 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ที่ปริมาณสารกระตุ้น 0.95LL ปริมาณโฟมเท่ากับร้อยละ 0 และ 5 โดยน้ำหนักตะกอนดินประปาและเถ้าลอย ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 24, 72 และ 120 ชั่วโมง

1.3.8 ก้อนตัวอย่างทดสอบขนาด 5×5×5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

1.3.9 การทดสอบกำลังอัด ทำตามมาตรฐาน ASTM C109

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอิทธิพลของปริมาณสารกระตุ้น อุณหภูมิ ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน และปริมาณโฟม ต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

1.4.2 สามารถอธิบายอิทธิพลของปริมาณสารกระตุ้น อุณหภูมิ ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนและปริมาณโฟม ต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ด้วยโครงสร้างจุลภาค

1.4.3 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักกับปริมาณโฟม ที่ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ (L) อุณหภูมิ และระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนต่างๆ



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

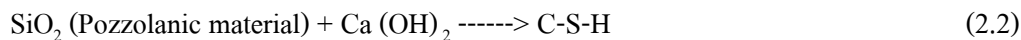
2.1 บทนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นโมเลกุลลูกโซ่ของซิลิกาและ อลูมินาที่มีความแข็งแรงและสามารถรับกำลังได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ เมื่อเพิ่มปริมาณโพลีเมอร์จะทำให้ได้จีโอโพลิเมอร์มวลเบา ในบทนี้จะทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารจีโอโพลิเมอร์ สารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ และวิธีการผลิตอิฐมวลเบา

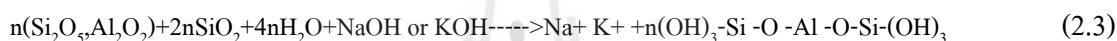
2.2 ประวัติความเป็นมาของจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอครุโมโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบ-อสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1970 Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นหลัก โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นส่วนใหญ่ และถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 หรือ KOH เมื่อให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการก่อตัวแข็งแรงและให้กำลังอัด

ลักษณะโครงสร้างของไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอโพลิเมอร์นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Portland cement hydration) ดังสมการที่ 2.1 ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต ซีเมนต์เพสต์ หรือมอร์ตาร์ที่แข็งแรงแล้ว เมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ดังสมการที่ 2.2 ปฏิกิริยานี้เองจะเพิ่มผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (C-S-H) ส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น



จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน จีโอโพลิเมอร์เกิดจากวัตถุดิบที่มีซิลิกอน (Si) อลูมิเนียม (Al) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงจะทำให้องค์ประกอบหลักเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีและเกิดเป็น Polymer chain ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา สมการที่ 2.3 แสดงสมการทางเคมีของปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)



2.3 ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์

สารจีโอโพลิเมอร์เป็นสารจำพวกอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ที่มีรูปพรณลักษณะแน่นอนเป็นส่วนประกอบของสารลักษณะอสัณฐาน (amorphous) และสารกึ่งผลึก (semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีอลูมินาและซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายของอัลคาไลน์สามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่าและก่อตัวและให้กำลังรับแรงได้ดีปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ Palomo et al. (1999) ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชั้น Fernandez-Jimenez et al. (2005)

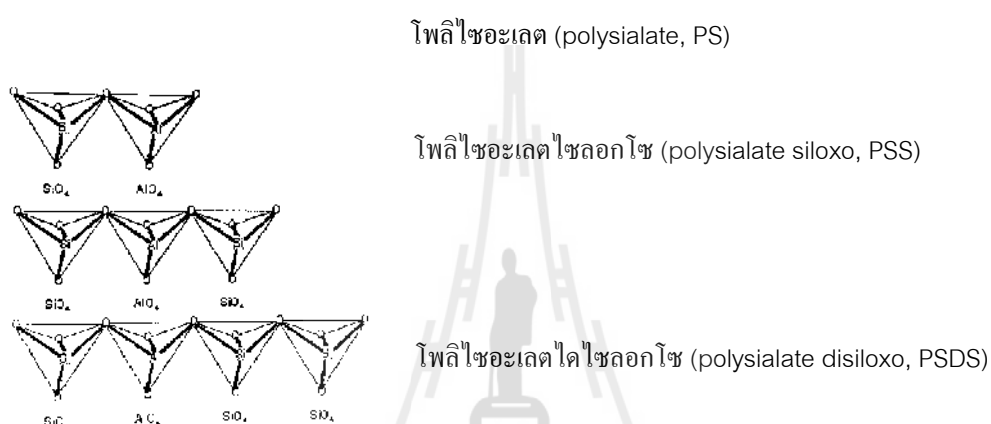
1. การชะละลาย (dissolution)

ถ้าลอยเมื่อผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูงเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ โดยอลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมาเนื่องจากเป็นสารหลัก เมื่อเกิดการชะละลายมากขึ้นส่วนหนึ่งของถ้าลอยจะถูกทำลายที่ผิว ทำให้เกิดเป็นช่องที่ผิวและสารละลายจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาง่ายขึ้น

2. การทำปฏิกิริยาอุกโช (polymerization)

ผลผลิตของปฏิกิริยาเบื้องต้นเป็นหน่วยปริมาตรสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si^{4+} และ Al^{3+} ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบ 4 แขนกับออกซิเจน หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (meta-stable) ซึ่งจะมีปริมาณ Al สูง เมื่อ

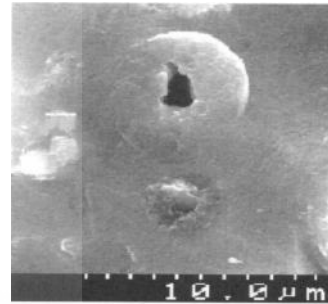
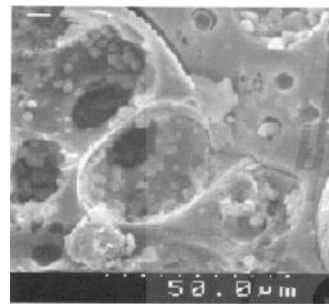
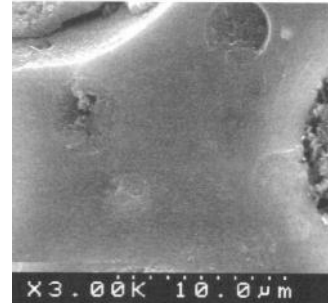
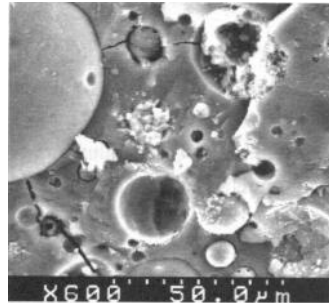
เกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วยหน่วยปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วย ได้แก่ โพลีไซอะเลต (polysialate, PS) โพลีไซอะเลตไซลอกโซ (polysialate siloxo, PSS) และโพลีไซอะเลตไดไซลอกโซ (polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.1 Davidovits (1994) ปริมาณของ SiO_4 เพิ่มขึ้นจากหนึ่งเป็นสามหน่วย เมื่อปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นการเชื่อมโยงของโพลิเมอร์ที่เชื่อมโยงขวางกันก็จะเกิดมากขึ้นและหนาแน่นขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นและสามารถรับแรงได้

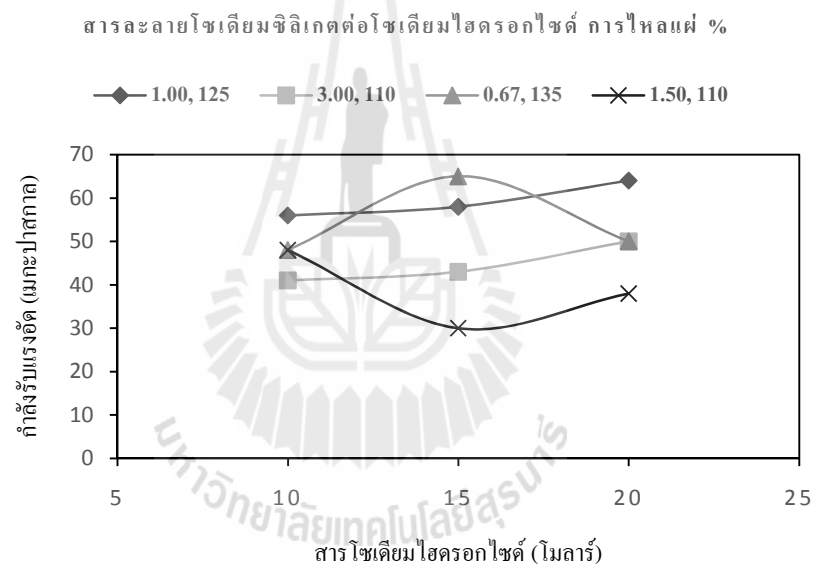


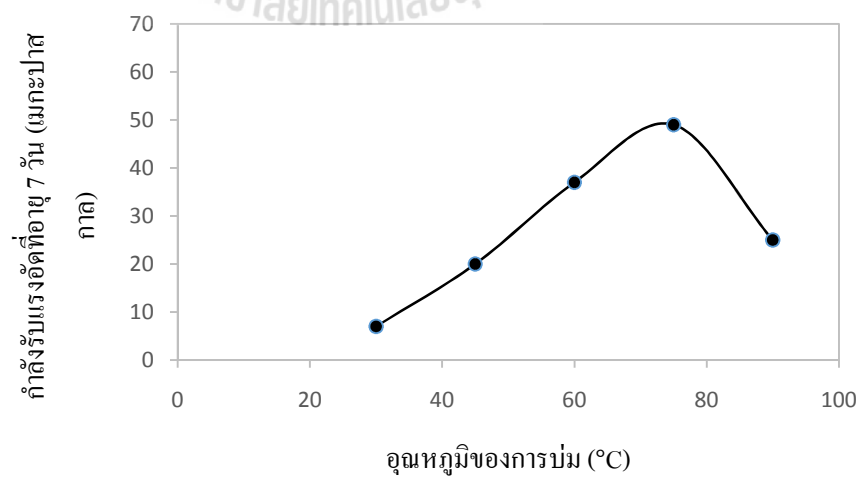
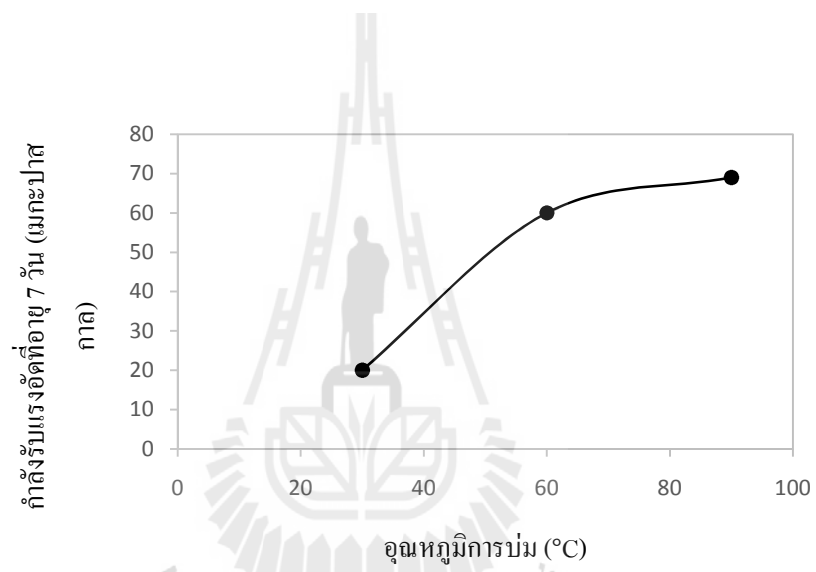
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลีไซอะเลต

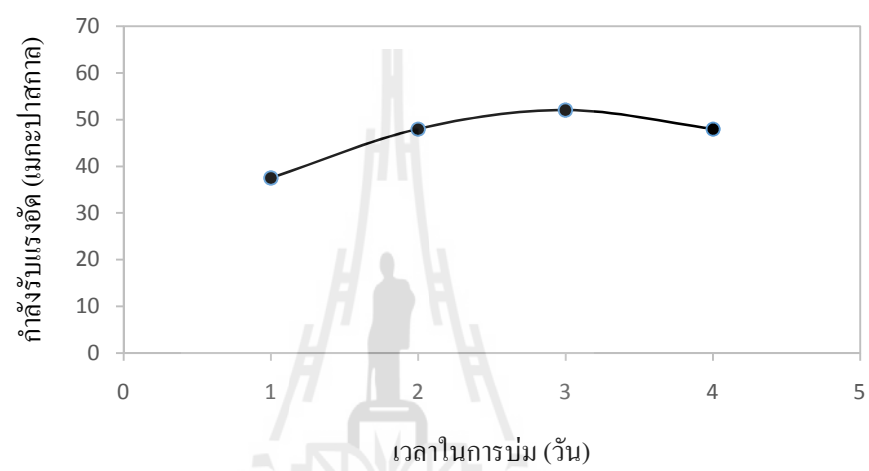
2.4 โครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 2.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยเพสต์ รูปที่ 2.2ก. แสดงเนื้อเพสต์ที่แน่น โพรงอากาศ รอยแตก และเถ้าลอยที่เหลืออยู่จากการทำปฏิกิริยาในขั้นที่ต่างกัน รูปที่ 2.2 ข. แสดงภาพขยายใหญ่ขึ้น และสามารถมองเห็นเถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยาเกือบสมบูรณ์เกือบจะเป็นเนื้อเดียวกันหมด แต่ยังมีร่องรอยของความกลมของเถ้าลอยหลงเหลือให้เห็นอยู่ในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตามเถ้าลอยบางส่วนจะทำปฏิกิริยาไม่หมด และบางส่วนยังคงไม่ทำปฏิกิริยา สาเหตุหลักมาจากปริมาณของสารละลายไม่เพียงพอหรือไม่ทั่วถึง และเมื่อปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเถ้าลอยส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาไม่หมดจะถูกผนวกและกลายเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อจีโอโพลิเมอร์ เถ้าลอยกลวงเมื่อทำปฏิกิริยาจะมีโพรงเหลืออยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.2ค. และ ง. โพรงส่วนหนึ่งจึงมาจากฟองอากาศที่หลงเหลืออยู่ อีกส่วนหนึ่งมาจากโพรงภายในเถ้าลอยที่เป็นซิลิโคนเฟียร์และฟริโรสเฟียร์

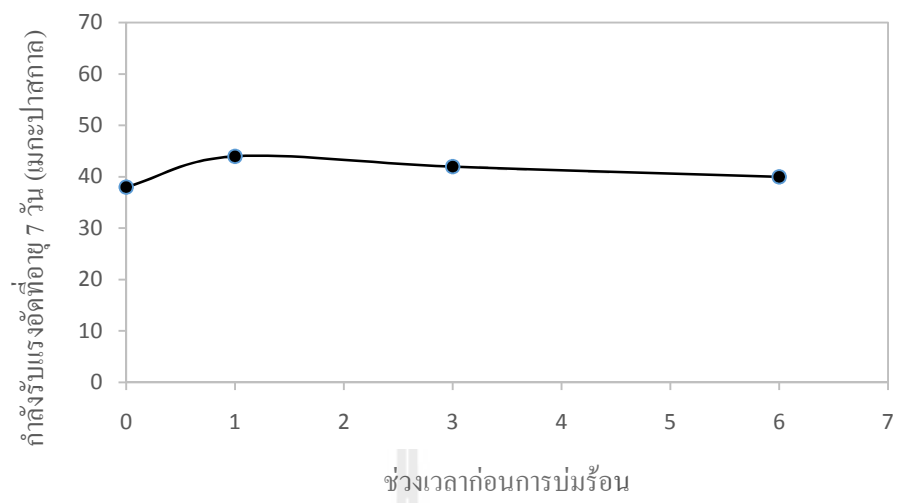








มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



สถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงริเริ่มที่จะดำเนินการร่างมาตรฐานเพื่อใช้กับเถ้าลอยและการออกแบบคอนกรีตสำหรับประเทศไทยขึ้น

2.6.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีของเถ้าลอย

1.) ส่วนประกอบทางเคมีเถ้าลอย

American Society for Testing and Material (1995) แนะนำให้ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กในการจำแนก Class โดยที่ Class F และ Class C ผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่ให้เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์ มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาก่อตัวได้ และยังมีผลเสียต่อวัสดุที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Sulfate Attack)

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618

องค์ประกอบทางเคมี	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3) Min%	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) Max%	5.0	5.0
ประมาณความชื้น 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 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอย หากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน Air Entrainment ของคอนกรีตสดจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 มาก ปริมาณอัลคาไลน์ (Alkali) ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์ มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

2.) ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (Mineralogical composition)

ชัย จตุรพิทักษ์กุล สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย และ วราภรณ์ คุณาวานากิจ (2542) เมื่อถ่านหิน ถูกเผา และมีการเย็นตัวลงของเถ้าลอย การเผาจะทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (Crystalline) แตกต่างกันไป สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีความเป็น Monocrystalline (glass) มากกว่าร้อยละ 90 อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังมีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ซึ่งเกี่ยวข้องการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction จะพบว่าเถ้าลอยจากถ่านลิกไนต์จะมีองค์ประกอบของ Crystalline น้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซต์

2.6.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

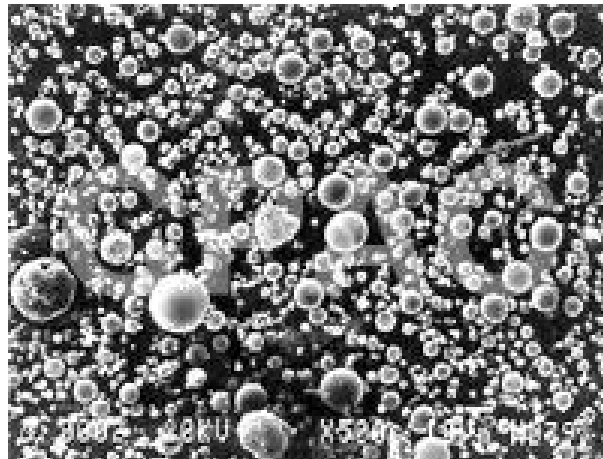
คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของเถ้าลอย สามารถเห็นได้จากพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม (Fly ash concrete) แต่คุณสมบัติของเถ้าลอยอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ เช่นมีการเผาน้ำมันเตาร่วมกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของเถ้าลอยเพื่อนำไปใช้งานอาศัยข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C-618 ดังตารางที่ 2.2

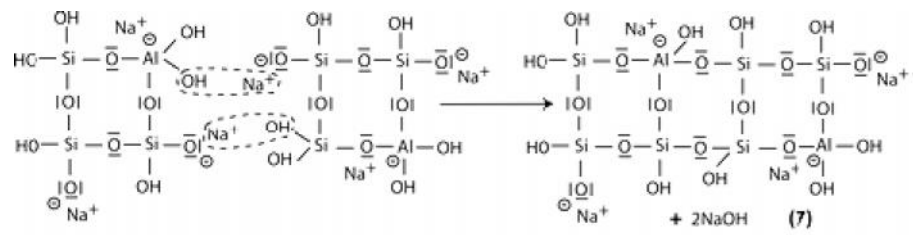
ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพมาตรฐาน ASTM C-618

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก Max%	34	34
หาคะณิกาล้าง : โยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		
7 วัน Min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน Min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ : Max% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวด้วยวิธี Autoclave Max%	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)		
- ความหนาแน่น Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
- ส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 Max จากค่าเฉลี่ย%	5	5
Multiple Factor (ผลคูณระหว่าง %LOI กับ % ของปริมาณความชื้นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325)	255	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน Max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

1.) รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผา ถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งและเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจาก ถ่านหินลิกไนต์ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.7 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเทซึ่งคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ มีผลทำให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้

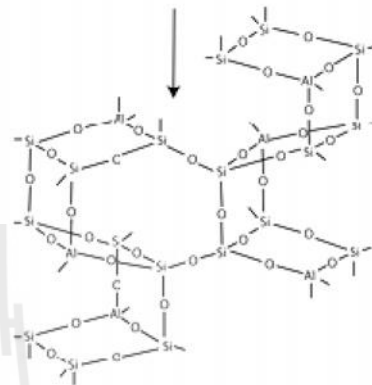




Na-Poly(sialate-disiloxo)

Albite

Feldspar crankshaft chain



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตกตะกอน เขตถังทำปฏิกิริยาจะอยู่ตรงกลาง มีการเติมสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) และสารส้ม เขตที่เหลือเป็นถังตะกอน

3) Filtration น้ำที่ได้จากกระบวนการ Clarification จะถูกนำมาผ่านเครื่องกรองแบบ Rapid Sand Anthracite ซึ่งออกแบบสำหรับกรองน้ำเริ่มต้น 75,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน อย่างไรก็ตามสามารถที่จะกรองได้สูงสุดถึง 120,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ผ่านชั้นถ่าน Anthracite หนา 80 เซนติเมตร และชั้นทรายคัดขนาด 40 เซนติเมตร

4) Water Storage น้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกเก็บไว้ในถังเก็บน้ำที่เรียกว่า Reservoir ปูนขาวและคลอรีนที่เหลืออยู่จะถูกควบคุมให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำดื่มของการประปา นครหลวง

5) Transmission and Distribution โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนเป็นโรงผลิตน้ำและจ่ายน้ำหลักของการประปานครหลวงโดยการจ่ายน้ำและกระจายไปตามสถานีปั๊มน้ำต่างๆ ซึ่งเชื่อมต่อกับ Reservoir พื้นที่การใช้งานจะแบ่งเป็น 2 ระดับคือ ชั้น Basement และชั้น Over ground ชั้น Basement อยู่ลึกลงไปใต้ดิน 3 เมตร ประกอบด้วยปั๊ม 5 ตัว ส่วนชั้น Over ground อยู่สูงขึ้นไป 9 เมตร มีการติดตั้งส่วนควบคุมปั๊มอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องมือปั๊ม

6) Sludge Lagoon Sludge เป็นส่วนของน้ำตะกอนดินที่ตกตะกอนจากกระบวนการ Clarification และน้ำที่ใช้ล้าง Filter ซึ่งจะถูกปั๊มสู่ Sludge Lagoon จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการตากตะกอน เพื่อให้ตะกอนแห้งพอที่จะขนย้ายต่อไป โดยน้ำมีปริมาณประมาณ 30,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะถูกนำไป Recycle

ตารางที่ 2.3 แสดงธาตุประกอบของตัวอย่างตะกอนดินประปา

ธาตุประกอบ	องค์ประกอบร้อยละ					
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Si	25.10	26.40	25.71	26.13	26.50	25.97
Al	15.30	14.55	14.82	14.92	15.03	14.92
Fe	5.67	5.67	5.60	5.68	5.53	5.63
K	2.57	1.58	1.99	1.66	1.58	1.88
Na	1.41	1.34	1.34	1.30	0.74	1.23
Mg	0.96	1.06	1.03	1.03	1.00	1.02
Ca	0.64	0.79	0.71	0.71	0.68	0.71

ตารางที่ 2.3 แสดงธาตุประกอบของตัวอย่างตะกอนดินประปา (ต่อ)

ธาตุประกอบ	องค์ประกอบร้อยละ					
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	ค่าเฉลี่ย
Ti	0.72	0.49	0.59	0.60	0.60	0.59
Zn	0.52	0.03	0.44	0.04	0.03	0.21
Mn	0.14	0.08	0.11	0.13	0.12	0.12
Cu	0.10	0.11	0.08	0.09	0.08	0.09
S	N.D	0.08	0.08	N.D	0.06	0.07

2.7.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงานกำจัดตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

1) รับน้ำตะกอน ความเข้มข้นประมาณ 3-10% น้ำหนัก/น้ำหนัก (W/W) จากถังตกตะกอนเข้าสู่ท่อระบายตะกอน

2) น้ำตะกอนความเข้มข้นประมาณ 3-10% (W/W) ส่งผ่านท่อระบายตะกอนเข้าสู่บ่อกักตะกอนทาง Inlet Value

3) น้ำตะกอนในบ่อกักตะกอนเกิดการตกตะกอนโดยธรรมชาติ น้ำใสความขุ่นไม่เกิน 50 NTU จะลอยตัวอยู่ชั้นบนไหลออกทาง Outlet Value ลงคลองระบายน้ำวนกลับ (Recycle) ส่วนตะกอนเหลวความเข้มข้น ประมาณ 10-15% (W/W) จะตกลงสู่ชั้นล่าง สะสมจนถึงระดับเต็ม บ่อความลึกประมาณ 3.5 เมตร ก็จะปิดบ่อเปลี่ยนไปใช้บ่ออื่น (บ่อเต็มใช้เวลาประมาณ 1-2 เดือน)

4) ใช้เรือสูบน้ำตะกอนเหลวที่มีความเข้มข้นประมาณ 10-15% (W/W) ออกจากบ่อกักตะกอนไปยังบ่อดักตะกอน (Polder)

5) รวบรวมตะกอนเหลวจากบ่อกักตะกอนมารวมกันในบ่อดักตะกอน

6) แยกน้ำออกจากตะกอนเหลวในบ่อดักตะกอน โดยระบายน้ำใสความขุ่นไม่เกิน 50 NTU ออกจากบ่อดักตะกอนและปล่อยให้ตกตะกอนโดยธรรมชาติหรือใช้เครื่องจักรกลช่วยให้ตกตะกอน

7) ขนย้ายดินตะกอนเหลวความเข้มข้น 25-40% (W/W) จากบ่อดักตะกอน ไปยังลานตกตะกอน โดยใช้รถ Back Hoe ดักใส่รถบรรทุกหรือใช้สกรูปป์สูบผ่านท่อ

8) ดักและพลิกกลับตะกอนเหลวในลานตกตะกอน จนได้ความเข้มข้นตะกอนตั้งแต่ 45% (W/W) ขึ้นไป โดยใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนประมาณ 1.5-2 เดือน (ขึ้นอยู่กับธรรมชาติ)

9) ใช้รถ Back Hoe ตักดินตะกอนความเข้มข้นตั้งแต่ 45% (W/W) ขึ้นไปใส่รถบรรทุกขนย้ายออกจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนต่อไป

10) รับน้ำตะกอนล่างบ่อกรองจากบ่อกรองน้ำ (Filter) ซึ่งมีความเข้มข้น 0.1% (W/W) เข้าสู่ท่อระบายน้ำล่างบ่อกรอง (Filter Drain)

11) ส่งน้ำตะกอนล่างบ่อกรอง ซึ่งมีความเข้มข้น 0.1% (W/W) ทางท่อระบายน้ำล่างบ่อกรอง (Filter Drain) เข้าสู่บ่อกักตะกอนทาง Inlet Value

12) น้ำตะกอนในบ่อกักตะกอนเกิดการตกตะกอนโดยธรรมชาติ น้ำใสความขุ่นไม่เกิน 50 NTU จะลอยตัวอยู่ชั้นบนไหลออกจาก Outlet Value ลงคลองระบายน้ำกลับ (Recycle) ส่วนตะกอนเหลวความเข้มข้นประมาณ 10-15% (W/W) จะตกลงสู่ชั้นล่าง สะสมจนถึงระดับเต็มบ่อ ก็จะปิดบ่อเปลี่ยนไปใช้บ่ออื่น (บ่อเต็มใช้เวลาประมาณ 6-8 เดือน)

13) ใช้เรือสูบน้ำตะกอนเหลวที่มีความเข้มข้นประมาณ 10-15% (W/W) ออกจากบ่อกักตะกอนไปยังบ่อตากตะกอน (Polder)

14) น้ำใสที่ไหลออกจาก Outlet Value ของบ่อกักตะกอน ควบคุมความขุ่นไม่เกิน 50 NTU จะไหลรวมกันที่คลองระบายน้ำกลับ (Recycle)

15) น้ำใสจากคลองระบายน้ำกลับ (Recycle) จะไหลโดย Gravity Flow เข้าสู่คลองน้ำดิบเพื่อนำไปผลิตเป็นน้ำประปาต่อไป ในช่วงนี้ก่อนที่จะเข้าสู่คลองน้ำดิบจะมีการตรวจวัดความขุ่นของน้ำโดยมีการกำหนดไว้ว่าจะต้องมีความขุ่นไม่เกิน 50 NTU

2.8 ประเภทของคอนกรีตมวลเบา

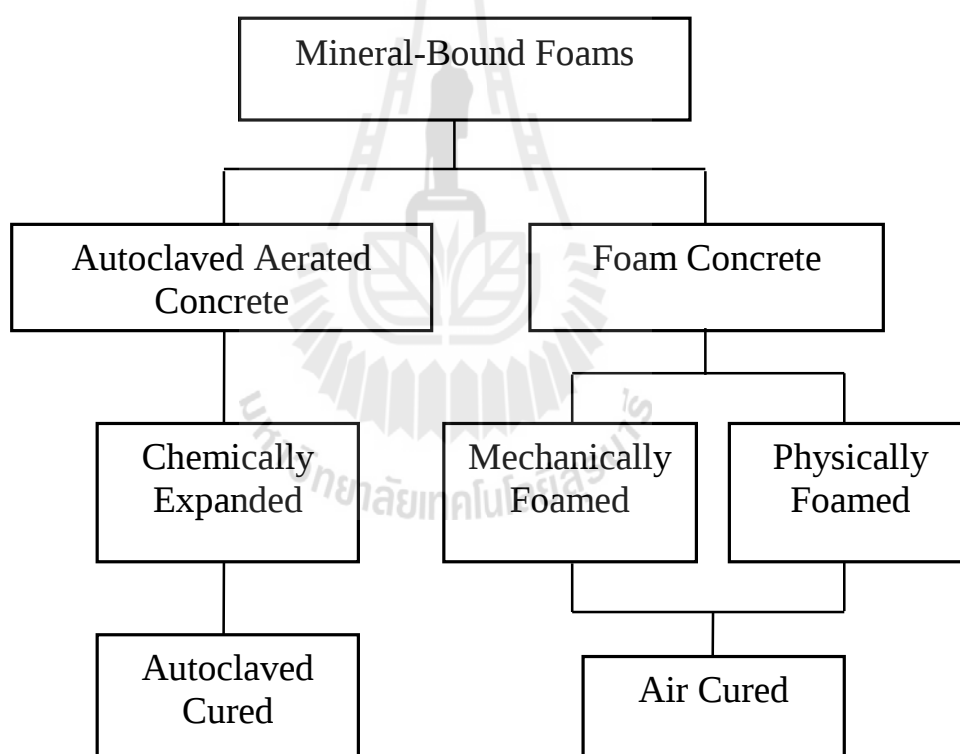
คอนกรีตมวลเบา (Lightweight concrete) คือคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตปกติทั่วไป คอนกรีตมวลเบามีความหนาแน่นระหว่าง $400 - 1800 \text{ kg/m}^3$ ในขณะที่คอนกรีตปกติมีความหนาแน่นประมาณ $2,400 \text{ kg/m}^3$ Neville and Brooks (1990) คอนกรีตมวลเบาสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามวิธีการผลิตดังต่อไปนี้

2.8.1 การใช้มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) เป็นส่วนผสมในคอนกรีต มีแต่มวลรวมหยาบที่มีขนาดใกล้เคียงกันหรือขนาดเดียว (Single size) คอนกรีตชนิดนี้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำที่ต่ำ ดังนั้น ช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ระหว่างมวลรวมหยาบจึงมีจำนวนมาก คอนกรีตประเภทนี้เรียกว่าคอนกรีตพรุน (Porous concrete) หรือคอนกรีตไม่มีมวลรวมละเอียด (No-fines concrete)

2.8.2 การใช้มวลรวมพรุนที่มีน้ำหนักเบาเป็นวัสดุผสม มวลรวมพรุนต้องมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมมาก คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้เรียกว่าคอนกรีตมวลร่วนน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete)

2.8.3 การทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่าง (Void) ขนาดใหญ่ภายในเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ต้า โดยการกักกระจายของอากาศ (Air entrainment) โพรงเหล่านี้จะมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้มีชื่อเรียกต่างๆ กัน เช่น คอนกรีตอัดอากาศ (Aerated concrete) หรือคอนกรีตเซลลูลาร์ (Cellular concrete) หรือโฟมคอนกรีต (Foamed concrete) หรือก๊าซคอนกรีต (Gas concrete) เป็นต้น กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาประเภทนี้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

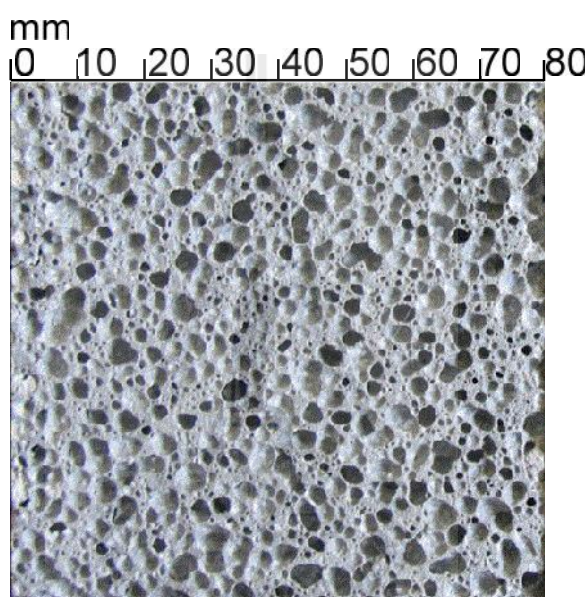
ความหนาแน่นของคอนกรีตเซลลูลาร์ขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยอากาศ มวลรวมหยาบ (Normal-weight coarse aggregate) มักจะไม่ได้ใช้ในการผลิตคอนกรีตเซลลูลาร์ กระบวนการสร้างฟองอากาศในการผลิตคอนกรีตมวลเบามี 2 วิธี คือวิธีทางกลและวิธีทางเคมี



รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ (Just and Middendorf, 2009)

- 1) วิธีการสร้างฟองอากาศทางกล อาจดำเนินการได้ 2 วิธีหลัก ตามกระบวนการผลิต

a) วิธีการสร้างฟองอากาศโดยการทำให้เกิดโฟมก่อนผสม ด้วยการใส่สารเพิ่มฟองเจือจางกับน้ำในส่วนที่เหมาะสม แล้วนำไปผ่านเครื่องสร้างฟองเพื่อให้ได้โฟมเหลว จากนั้นโฟมเหลวที่ได้จะนำไปผสมโดยตรงกับซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าสดในเครื่องผสม วิธีการเช่นนี้เรียกว่าวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD ซึ่งโฟมดังกล่าวมีความเสถียรอยู่ในเนื้อคอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนกระทั่งคอนกรีตมีสภาพเป็นของแข็ง ทำให้คอนกรีตเซลล์ดูลักษณะเป็นโพรงปิด (close pore) ที่เต็มไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก ดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวที่ขัดเรียบของ CLC (Just and Middendorf, 2009)

b) วิธีการสร้างฟองอากาศโดยการใส่สารเพิ่มฟองหรือสารกักกระจายฟองอากาศ (Air entraining) ผสมกับซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้า จากนั้นผ่านการตีหรือกวนส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสารเพิ่มฟองดังกล่าวจะมีความมันคง (Stabilizes) เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากขึ้นในขณะผสมด้วยความเร็วสูง วิธีนี้เหมาะกับการทำคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง แต่วิธี PRE-FORMED FOAM METHOD เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำมาก

2) วิธีการสร้างฟองอากาศโดยวิธีทางเคมี ส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนทราย ปูนขาว และสารเพิ่มขยายตัว (Expansion agent) ปฏิกริยาเคมีที่เกิดจากส่วนผสมจะเกิดเป็นโฟมเคมีในขั้นตอนการเทเข้าแบบ ส่วนผสมจะเกิดการบวมขึ้นหลายเท่าเมื่อเทียบกับปริมาตรเดิม คล้ายกับขั้นตอนหนึ่งของการทำขนมเค้ก หลังสิ้นสุดการก่อตัว คอนกรีตจะถูกนำเข้าไป

หม้อนึ่งหรือห้องอบไอน้ำภายใต้แรงดันและอุณหภูมิสูง คอนกรีตประเภทนี้จึงเรียกว่าคอนกรีตมวลเบาชนิดอบไอน้ำ (Autoclave Aerated Concrete หรือ AAC)

คอนกรีตมวลเบาอาจจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน อันได้แก่ คอนกรีตมวลเบาโครงสร้าง (structural lightweight concrete) คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อ (masonry) และคอนกรีตมวลเบากันความร้อน (insulating)

2.9 วัสดุปอซโซลาน

มาตรฐาน ASTM C 618-2001 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีสารซิลิกาอย่างเดียว หรือทั้งซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน หากแต่เมื่อนำหรือความชื้นในปริมาณที่เหมาะสมก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้เกิดสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” วัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (Metha, Smith et al., 1995) คือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan) และวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial pozzolan) วัสดุปอซโซลานธรรมชาติเป็นวัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ เช่น หินพัมมิช (Pumicite) และหินซีโอไลต์ธรรมชาติ เป็นต้น วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์เป็นวัสดุที่ได้จากการนำวัสดุไปผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ดินขาวเกาลิน (Kaolin) และไดอะตอมไมท์ เป็นต้น หรือได้จากผลพลอยได้ของการผลิตของโรงไฟฟ้าความร้อน เช่น เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา เป็นต้น

2.10 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

สารประกอบหลักในเม็ดปูน ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate, C_2S) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate, C_3A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite, C_4AF) คุณสมบัติของสารประกอบทั้ง 4 ชนิดนี้แสดงดังตารางที่ 2.4 (เร็กซ์คีย์และอิกคีย์, 2549)

ตารางที่ 2.4 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เร็กซ์คัลและอิกคัล, 2549)

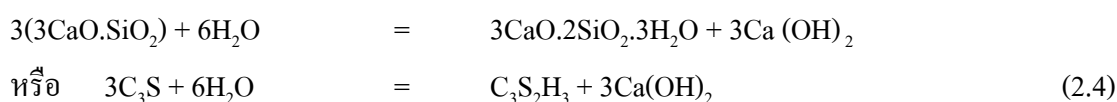
คุณสมบัติ	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 จูลต่อกรัม)	น้อย (200 จูลต่อกรัม)	สูงมาก (850 จูลต่อกรัม)	ปานกลาง (420 จูลต่อกรัม)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	-	ไม่เสถียรในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์แสดงได้ดังนี้

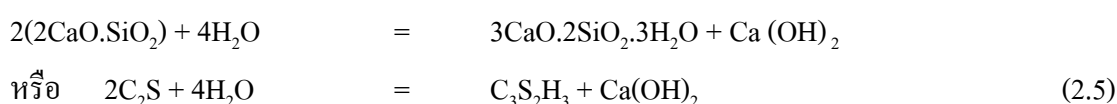
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต (C₃S และ C₂S)

คัลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด “คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂)” ประมาณร้อยละ 15 ถึง 25 และสารประกอบ “คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ 3CaO.2SiO₂.3H₂O หรือ C₃S₂H₃ หรือ CSH)” ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรง ดังสมการต่อไปนี้

สมการของ C₃S



สมการของ C₂S

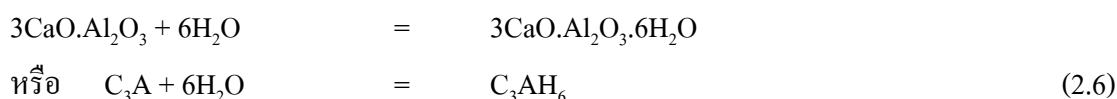


ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะได้ Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน (CSH) โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อ

ปูนซีเมนต์ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างมาก (pH ประมาณ 12.5)

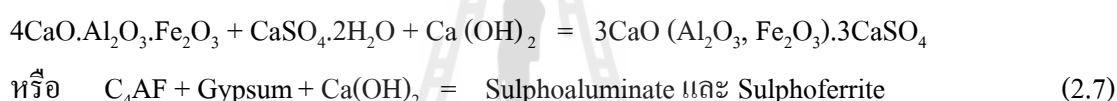
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A เกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการต่อไปนี้



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมในปูนซีเมนต์ และ Ca(OH)_2 ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการต่อไปนี้



สมการที่ (2.4) ถึง (2.7) แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน (Cementitious products) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกแข็ง แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ pH ของน้ำในโพรงคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น (มีความเป็นด่างสูง) และทำปฏิกิริยาหลอมละลายกับซิลิกาและอลูมินาในวัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยานี้มีลักษณะเช่นเดียวกับปฏิกิริยาระหว่างกรดอ่อนกับด่างเข้มข้น ซิลิกาและอลูมินาที่หลอมละลายจะทำปฏิกิริยาอย่างช้ากับไอออนของแคลเซียมอิสระ (Free lime) ทำให้เกิดการแข็งตัวเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) และแสดงได้ดังสมการทางเคมีดังนี้



(Secondary cementitious product)



(Secondary cementitious product)

2.11 การทบทวนวรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ และพบว่าการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ประมาณ 0.20 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 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ และพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) มีโครงสร้างแบบซีโอไลติก (Zeolitic) การพัฒนาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์ ดังจะเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน และอุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ จีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกะปาสกาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์ จีโอโพลิเมอร์จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบ (มีความแข็งแรง หดตัวน้อย ทนความเย็น และต้านทานการสึกกร่อน) สำหรับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน เมื่อคำนึงถึงต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีคุณค่าเหนือกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูง และเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 ในปริมาณต่ำ

Hardjito et al. (2003) ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 0.095 และ 0.120 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อโซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ กำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้น งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเถาถ่านหินชนิดแคลเซียมมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น แต่เถาถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอูมิโนซิลิเกตโพลิเมอร์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีซิลิกอนและอูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถ้าถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิ

เมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์

สมิทร ส่งพิริยะกิจ (2548) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถ้าถ่านหินและทรายเป็นวัตถุดิบ สารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) เป็นส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำ อัตราส่วนระหว่างเถ้าถ่านหินต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 25 และ 45 องศาเซลเซียส หลังจากทำการหล่อตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การทดสอบกำลังอัดทำที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและกำลังอัดยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปตามอายุบ่ม ส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้น แต่กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และในที่สุดจะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราส่วนผสมต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดี และได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายปูนซีเมนต์ เมื่อผสมดินขาวเผากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารกระตุ้นสูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสม การก่อตัวจะช้าลง การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้น อัตราส่วนระหว่างดินขาวเผาคือ Ca(OH)_2 ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์

Chindaprasirt et al. (2009) ได้ทดลองใช้เถ้าถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยควบคุมการไหลผ่าน (Flow) ให้เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ถึง 135 ± 5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลผ่านแปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 10-65 เมกกะปาสกาล อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.67-1.0 การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมล เป็น 20 โมล ไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน การเติมน้ำประมาณร้อยละ 2-8 และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) จะช่วยให้ความชื้นเหลวดีขึ้นได้ และช่วยให้เทแบบได้ดี แต่กำลังอัดก็จะมีค่าลดลง

Bakharev (2005) ศึกษาความคงทนของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer paste) ที่ใช้เถ้าถ่านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และ

แมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-linked aluminosilicate polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นสารกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นสารกระตุ้นอย่างเดียว

Barbosa et al. (1999) กล่าวว่าโพลิเมอร์จะมีคุณสมบัติที่ดีเมื่อความเข้มข้นของโซเดียม (Na) มีเพียงพอสำหรับกลไกในตำแหน่งที่มีการแทนที่ซิลิกอน (Si) ด้วยอลูมิเนียม (Al) แต่ไม่ควรมากเกินไปจนเกิดเป็นโซเดียมคาร์บอเนชัน (carbonation) ในบรรยากาศ

Phair and Van Deventer (2002) ได้เสนอกระบวนการเกิดโพลิเมอร์ของซิลิกาในสารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ว่าขึ้นอยู่กับ 2 กระบวนการคือ

- 1) กระบวนการไอออไนเซชัน (ionization) จะเกิดขึ้นเมื่ออัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์แพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาที่ผิวอัตราการเกิดกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับระดับความเป็นด่าง (basicity) ของอัลคาไลน์ โดย $K^+ > Na^+ > Li$ เนื่องจากโพแทสเซียมไอออนซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจะสามารถแตกตัวออกมาได้ง่ายกว่าโซเดียมและลิเทียมไอออนในเวลาเท่ากัน ดังนั้นในระบบที่มีการใช้ K^+ จึงมีไอออนบวกปริมาณมากกว่าเพื่อทำปฏิกิริยาต่อไปได้
- 2) กระบวนการชะละลาย (dissolution) อัตราส่วนการชะละลายของซิลิกาขึ้นอยู่กับดัชนีของแคตไอออนไฮเดรชัน (degree of cation hydration) ซึ่ง $K^+ < Na^+ < Li$ และจะมีผลอย่างมากเมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่อโลหะออกไซด์มีค่าสูง (SiO_2/M_2O)

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของโลหะอัลคาไลน์ซิลิเกต ที่มีผลต่อปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชัน โดยทำการเติมสารละลายโพแทสเซียมและโซเดียมซิลิเกต จากผลการวิเคราะห์ด้วย Si NMR พบว่าการเติมสารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในส่วนผสมมีแนวโน้มที่จะเพิ่มระดับของการควบแน่นแบบลูกโซ่ (degree of polycondensation) ในสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกต เนื่องจากมีสัดส่วนของ Q^2 และ Q^3 มากกว่าสารละลายชนิดอื่น (Q คือ จำนวนพันธะไฮดรอกซิลที่เชื่อมต่อกัน; Si-O-Si โดย Q^0 หมายถึง ซิลิกอนอะตอมที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับอะตอมอื่น, Q^2

หมายถึง ซิลิกอนอะตอมที่เชื่อมต่อกับซิลิกอนอีก 2 อะตอม) ในขณะที่การเติมสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มปริมาณของซิลิเกตมอนอเมอร์ (monomeric silicate : Q^0 , Q^1) เท่านั้นและยังพบว่า ขนาดของไอออนบวกมีอิทธิพลต่อโครงสร้าง และส่วนประกอบของผลึกที่เกิดขึ้น กล่าวคือ โซเดียมไอออน (Na^+) จะมีขนาดเล็กกว่าโพแทสเซียม ไอออน (K^+) ซึ่งแสดงถึงการรวมตัวเป็นคู่ที่แข็งแรง (strong pair formation) กับซิลิเกตโอลิโกเมอร์ (silicate oligomers) ที่มีขนาดเล็กกว่า เช่น มอนอเมอร์ ในขณะที่โพแทสเซียมไอออนชอบที่จะ รวมตัวกับซิลิเกตโอลิโกเมอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าพร้อมหน่วยของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_4$)

ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมจะมีการก่อตัวที่ เร็วกว่าและให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นกว่าทำให้ได้กำลังรับแรงอัดสูงกว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Wang et al. (2005) ได้ทำการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์จากดิน ขาวเผา โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 4-10 โมลาร์) เป็นตัวกระตุ้น จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ขึ้นงาน หลังการบ่มร้อนจะถูกวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงต่อการดัด (flexural strength), ความแข็งแรงต่อการ กดอัด (compressive strength), ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density), องค์ประกอบทางแร่โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Scanning electron microscope : SEM) และติดตามการเกิดสารจีโอ โพลิเมอร์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (infrared spectrometer : IR) จากการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงต่อการ ดัด, ความแข็งแรงต่อการกดอัด และความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ด้วย XRD, IR บ่งชี้ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะอยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) กึ่งผลึก (semi-crystalline) และม ีบางส่วนของดินขาวเผาที่ไม่ทำปฏิกิริยา โดยเฟสอสัณฐานของจีโอโพลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นตามความ เข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการ ละลายอนุภาคของดินขาวเผาและกระตุ้นให้เกิดการควบแน่นแบบเร่ง (accelerated condensation) ของมอนอเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยา

Bakharev (2004) ได้ศึกษากระบวนการใช้ตัวกระตุ้นที่ต่างกัน 3 กลุ่มคือ 1) สารละลาย โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2) สารละลายโซเดียมซิลิเกตและโพแทสเซียมไฮดรอก ไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อความทนทานต่อเกลือและกำลังรับแรงอัดของจีโอ โพลิเมอร์พสต์จากเถ้าถ่านหินชนิดเอฟ (Class F) โดยการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 5 เดือน จากผลการทดลองพบว่ากำลังรับ แรงอัดของจีโอโพลิเมอร์พสต์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียม

ซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้นและกำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นเพียงอย่างเดียวทำให้เกิดโครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (cross-link alumino silicate polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ที่มีความแน่นตัวจึงไม่ละลายในเกลือต่างๆ ดังนั้นความคงทนของจีโอโพลิเมอร์ต่อสภาพที่เป็นเกลือขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดการแข็งตัว นอกจากนี้ยังพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นร่วมกันมีค่าน้อยกว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว

Swanepoel and Strydom (2002) ได้สังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผาโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเป็นตัวกระตุ้น และทำการศึกษาผลของอุณหภูมิการบ่มที่ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาต่างกันคือ 6, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของชิ้นงาน จากการศึกษาพบว่า สภาพการบ่มที่เหมาะสมคือใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่น (density) ของชิ้นงานลดลงสืบเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างในระหว่างการบ่มร้อน

Ayuso et al. (2008) เห็นว่าการบ่มเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ กล่าวคืออุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มพลังงานให้แก่ระบบการชะละลายซึ่งจัดเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic process) ทำให้ระบบมีความสามารถในการชะละลายสารประกอบของซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ออกจากวัตถุดิบเพื่อทำปฏิกิริยามากขึ้น จนกระทั่งเกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างมอนอเมอร์เป็นสายโซ่โพลิเมอร์ที่ซับซ้อน จีโอโพลิเมอร์จึงสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้น

Chindaprasirt et al. (2007) ได้ศึกษาสภาพการบ่มที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยชนิดแคลเซียมสูง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.67 ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ระยะเวลาที่ทิ้งชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนการบ่มร้อน (delayed time), อุณหภูมิการบ่มร้อน (temperature of curing) และระยะเวลาการบ่มร้อน (duration of curing) ผลการศึกษาพบว่า การเก็บชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนการบ่มด้วยความร้อนจะเป็นผลดีต่อการพัฒนาความแข็งแรงของชิ้นงาน อุณหภูมิการบ่มที่เหมาะสมคือ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2-3 วัน จะให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส (ในการทดลองคือ 90 องศาเซลเซียส) จะทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เริ่มลดลงเนื่องจากโครงสร้างภายในเกิดการสูญเสียความชื้นส่งผลต่อการแตกร้าวภายในโครงสร้างของวัสดุ

ไอโพลีเมอร์ ดังนั้น การทำให้แห้งอย่างรวดเร็วในระหว่างการบ่มเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยงเช่นเดียวกับงานวิจัยในปี ค.ศ. 2002 Van Jaarsveld et al. ที่พิสูจน์ว่าการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานจะทำให้โครงสร้างของวัสดุอีโพลีเมอร์อ่อนแอลง ดังนั้นการหลงเหลือไว้ในโครงสร้างของอีโพลีเมอร์เพียงเล็กน้อย จึงจำเป็นต่อการป้องกันการแตกร้าวของชิ้นงาน การเพิ่มระยะเวลาการบ่มที่อุณหภูมิสูงออกไป จะส่งผลให้การพัฒนาโครงสร้างเจลของอีโพลีเมอร์หยุดลง และเกิดการสูญเสียในปฏิกิริยา (dehydration) ในทางตรงข้ามการเพิ่มระยะเวลาการบ่มชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนากำลังอัดมากกว่า งานวิจัยในปี ค.ศ. 2002 Teixeira-Pinto et al. กล่าวว่า การทิ้งช่วงเวลาไว้ให้อีโพลีเมอร์เกิดการก่อตัวมีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานในภาคปฏิบัติ เนื่องจากเป็นเวลาที่ใช้ในการขนส่ง การเท และการทำให้แน่น ดังนั้น การจะทำให้วัสดุอีโพลีเมอร์เป็นที่ยอมรับในวงอุตสาหกรรม ควรจะมีกรรมวิธีการบ่มที่เหมาะสมเหมือนกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป

Ohsawa et al. (1985) ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้านหินในไฮเดรตซีเมนต์โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรด เช่น กรดไฮดรอกลอลิก (HCl), กรดพิคติก (Picric acid) และกรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ผลการทดสอบพบว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้น การใช้กรดพิคติก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 การใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดซาลิไซลิกอย่างมาก

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับไมโคร (Microstructure) ของเพสต์อีโพลีเมอร์ขณะเกิดปฏิกิริยากับต่างของอีโพลีเมอร์ที่ทำจากเถ้านหิน และพบว่าโดยส่วนมากไมโครของเถ้านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อผสมกับต่างผิวของเถ้านหินจะถูกกัดเป็นรูและขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ เถ้านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของอีโพลีเมอร์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ซึ่งจะมีปริมาณมากขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของต่าง ขนาดอนุภาคของเถ้านหิน และระยะเวลาการบ่ม การศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมอีโพลีเมอร์และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดอีโพลีเมอร์ที่มีเนื้อเป็นฟองคล้ายกระเจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

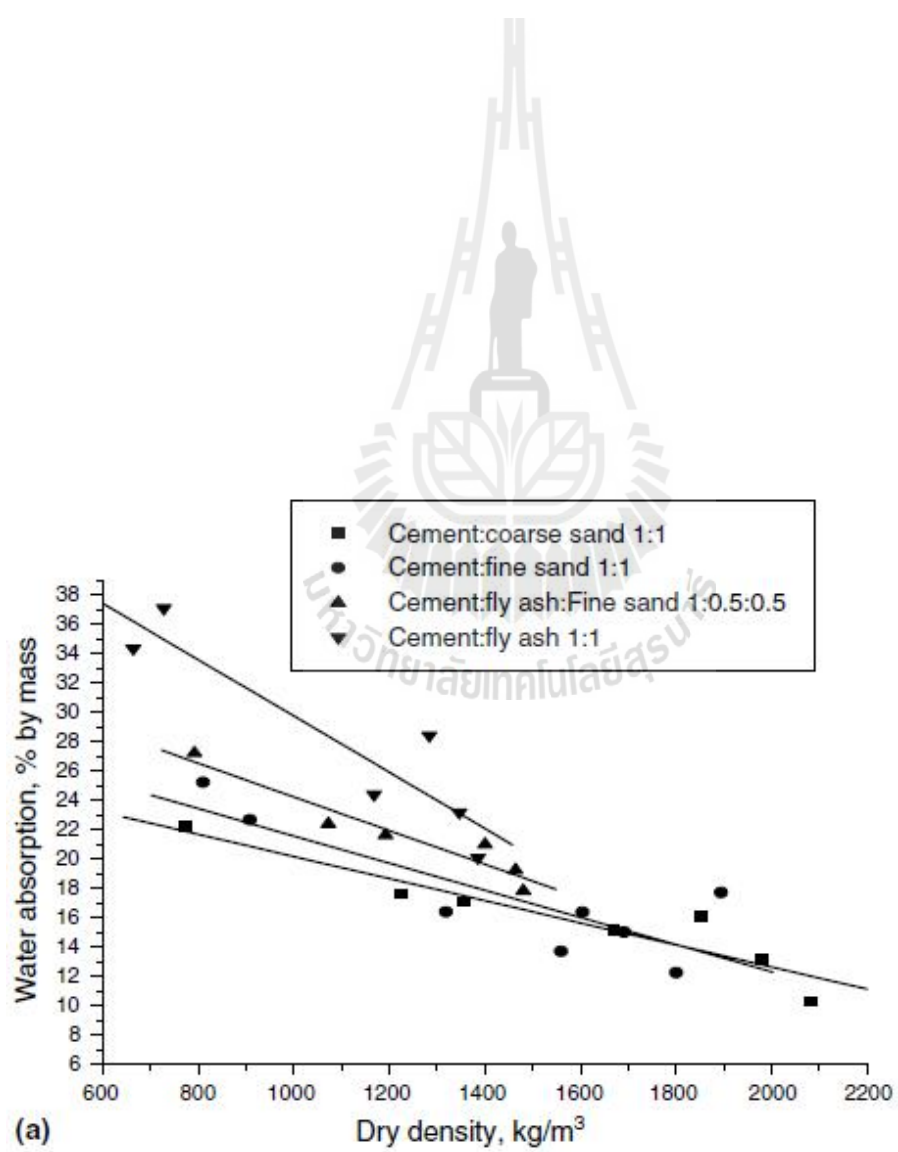
งานวิจัยล่าสุดในการทำอีโพลีเมอร์จากดินตะกอน (Sukmak and Horpibulsuk, 2013) แสดงให้เห็นว่าดินตะกอนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับเถ้านหินในการผลิตวัสดุอีโพลีเมอร์ที่มีกำลังอัดและความคงทนสูง (กำลังอัดมีค่าสูงถึง 12 ถึง

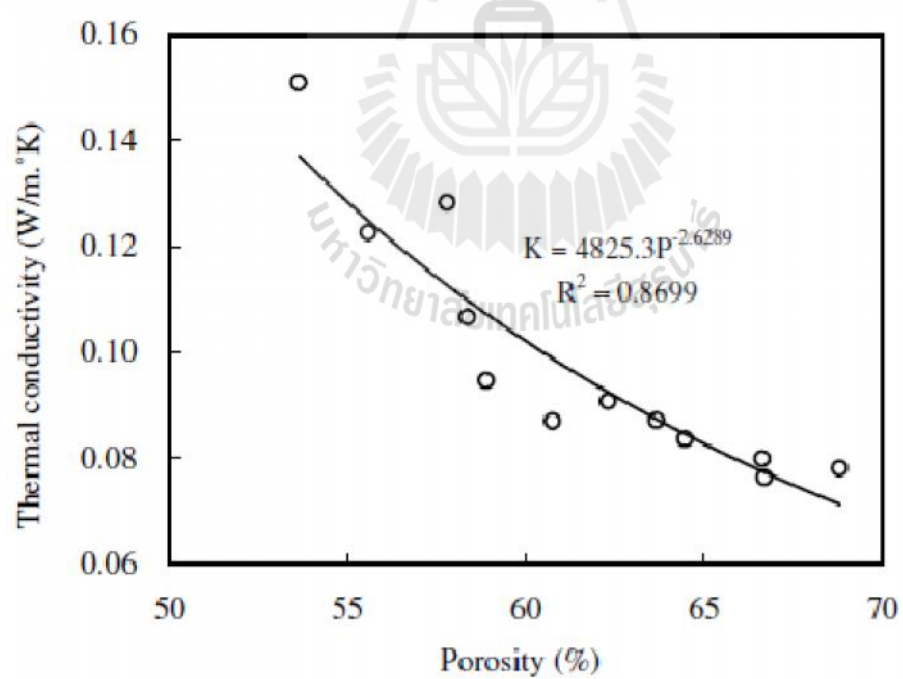
14 MPa) ผลการศึกษาแสดงว่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum water content) ในการผลิตบล็อกอิโพลิเมอร์ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเถ้าถ่านหิน และปริมาณและความเข้มข้นของสารกระตุ้น ส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำดินตะกอนอิโพลิเมอร์คือ อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 0.7 และอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

คอนกรีต เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมในการสร้างอาคารเกือบทุกสถานที่ทั่วโลก เนื่องจากมีความได้เปรียบในการขึ้นรูปที่ง่ายกว่าวัสดุอื่น มีคุณสมบัติที่ดีทั้งทางกลและกายภาพ วัสดุที่ใช้ในการผลิตหาได้ง่ายจากธรรมชาติ ต้นทุนการผลิตต่ำ และใช้งานง่าย ความหนาแน่นของคอนกรีตจะอยู่ในช่วง $2300\text{--}2700 \text{ kg/m}^3$ (Nambiar and Ramamurthy, 2006) การทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำจะเป็นประโยชน์ในแง่ของการแบกรับภาระน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง (Feng and Peng, 2005) นักวิจัยหลายท่านมีเป้าหมายที่จะพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ทำจากคอนกรีตให้มีความแข็งแรง ใช้งานง่าย ความหนาแน่นต่ำ และเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี (Beben and “Zee” Manko, 2011)

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ขึ้นอยู่กับลักษณะปัจจัยพื้นฐานของส่วนผสมและสารเพิ่มฟองที่ใช้ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลสาร์มีค่าลดลงตามความหนาแน่นที่ลดลง Just and Middendorf (2009) พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลสาร์เพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) โดยค่าอัตราส่วน w/c ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ที่ศึกษาระหว่าง 0.45-0.6 ผลการศึกษาที่ได้มีความสอดคล้องกับรายงานของ DeRose and Morris (1999) และ Khatib and Wild (1996) Kearsley and Wainwright (2002) พบว่าปริมาณทรายที่ใช้ในส่วนผสมไม่ได้มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลสาร์ DeRose and Morris (1999) พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลสาร์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเถ้าลอยและซิลิกาฟูม โดยเฉพาะกับคอนกรีตเซลลูโลสาร์ที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kearsley and Wainwright (2002)

DeRose and Morris (1999) ศึกษาการใช้ผงหินปูน (Fine limestone) ที่ผ่านการบดละเอียดผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และผสมร่วมกับเถ้าลอย พบว่าสามารถเร่งอัตราการก่อตัวของคอนกรีตเซลลูโลสาร์ได้ ส่งผลให้คอนกรีตแข็งตัวเร็วในช่วงอายุต้น และมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์ที่ไม่ได้ใส่ผงหินปูน Kearsley and Wainwright (2002); Nambiar and Ramamurthy (2006) และ Nambiar and Ramamurthy (2007) พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสาร์มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของโฟม (Foam) และประเภทของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้





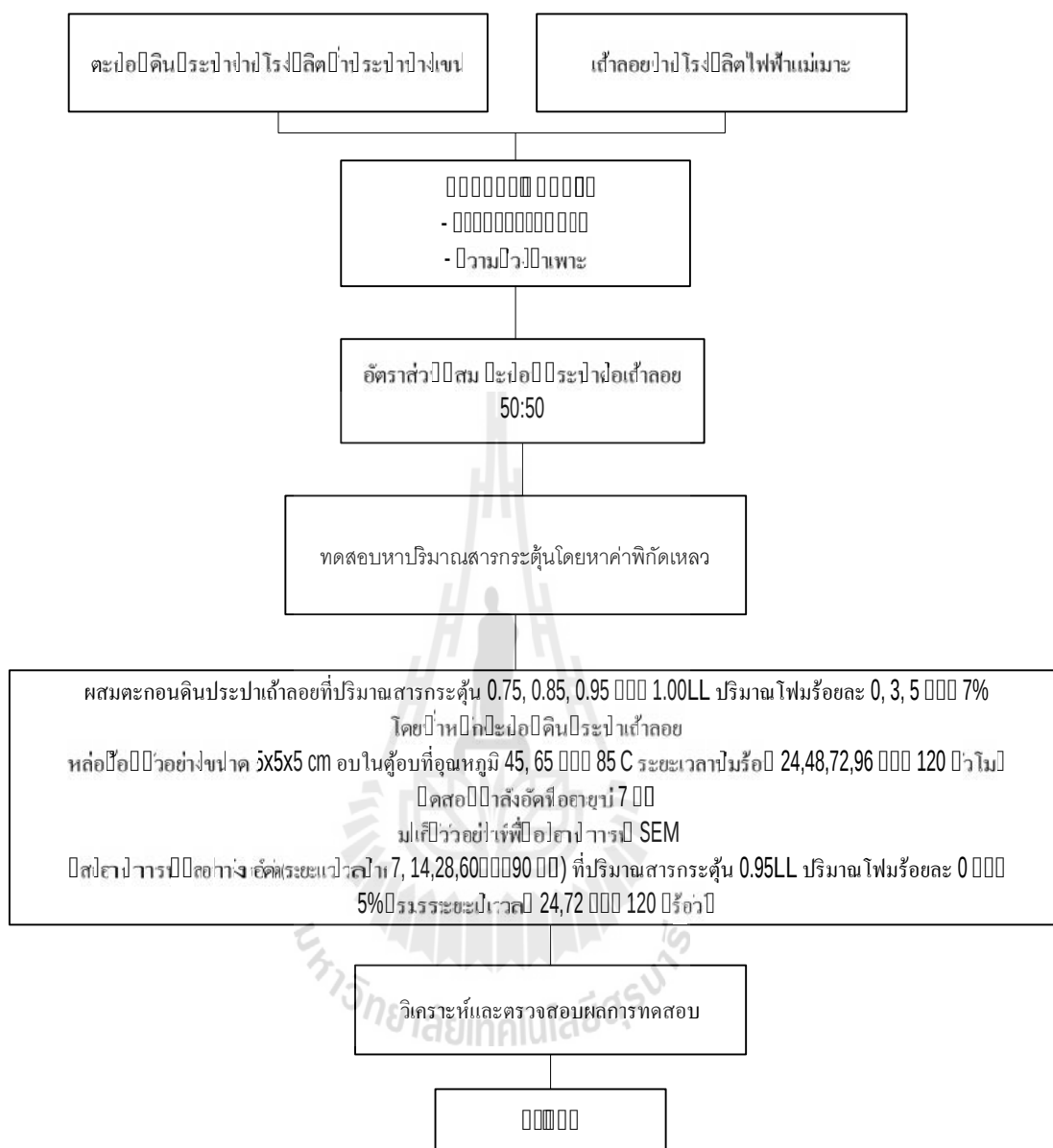
บทที่ 3

แนวทางและวิธีการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและอธิบายถึงการพัฒนากำลังอัดและหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอย ผสมกับสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจะถูกนำมาผสมเข้ากับสารกระตุ้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปริมาณโฟม (Foaming agent) เพื่อหาลำดับอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ แผนดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 และจำนวนตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3.1





รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่าง

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
อัตราส่วนผสมระหว่างตะกอนดินประปาต่อเถ้าลอย	1	50:50
สารกระตุ้นใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	4	0.75, 0.85, 0.95 และ 1.00LL (LLคือ พิกัดเหลว)
ปริมาณโฟม	4	0, 3, 5 และ 7%
อุณหภูมิ	3	45°C, 65°C, 85°C
ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนต่อ 1 อุณหภูมิ	5	24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง
การทดสอบอายุบ่ม	90	สารเพิ่มฟอง 0 และ 5% ที่อุณหภูมิ 45°C, 65°C, 85°C อายุบ่มร้อน 24, 72 และ 120 ชั่วโมง อายุบ่ม 7,14,28,30,60 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่าง	3	ชุดละ 3 ตัวอย่าง

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 เตรียมตะกอนดินประปาจากโรงผลิตน้ำประปา บางเขน เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

3.2.2 ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น

- 1) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D2216
- 2) การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยวิธี Laser particle size analysis
- 3) จีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) และพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) ตาม

มาตรฐาน ASTM D4318

3.2.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การเตรียมสารละลาย NaOH เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมล ซึ่งอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมเพื่อให้ได้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 10 โมล คือ ใช้สารละลาย NaOH 400 กรัม นำมาผสมกับน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 1000 มิลลิลิตร เทใส่ภาชนะที่ทนความร้อนได้ เขย่าหรือคนให้สารละลายเข้ากับน้ำกลั่น ทิ้งไว้รอให้อุณหภูมิลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลงแล้ว จึงนำสารละลายที่ได้ใส่ภาชนะหรือขวดปิดให้มิดชิด เขย่าอีกครั้งเพื่อให้สารละลายผสมกัน เก็บที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

3.2.4 หาปริมาณสารกระตุ้นเริ่มต้นโดยนำตะกอนดินประปาผสมเถ้าและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไปทดสอบพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) โดยวิธี liquid limit of soil using cone penetrometer ตามมาตรฐาน BS 1377

3.2.5 การเตรียมก้อนตัวอย่าง

ตะกอนดินประปาจะถูกผสมเข้ากับเถ้าลอย (Fly ash, FA) ในอัตราส่วนผสม 50:50 จนเป็นเนื้อเดียวกัน เติมสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ในปริมาณ 0.75, 0.85, 0.95 และ 1.00LL ที่เราต้องการแล้วผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้น ใส่ปริมาณโฟม มีค่าเท่ากับร้อยละ 0, 3, 5 และ 7% มาผสม ตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาจะถูกเทในแบบทรงลูกบาศก์ที่มีขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบ ตัวอย่างทดสอบจะถูกนำมากระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 45, 65 และ 85°C ตามลำดับ เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง และนำมาบ่มในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ก่อนทำการทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109

3.3 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ตัวอย่างดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดบางส่วนจะถูกนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดิน โดยการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ตัวอย่างจะถูกทำให้และตัดแต่งให้มีขนาดประมาณ 3-4 มิลลิเมตร หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกนำไปติดตั้งบนแท่งติดตั้งตัวอย่าง และสุดท้ายเป็นขั้นตอนการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 3.2



บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการศึกษาน้ำหนัก กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส เพื่ออธิบายอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมหน่วยน้ำหนักและกำลังอัด (ปริมาณ โฟม อุณหภูมิ และระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนในอุณหภูมิต่างๆ)

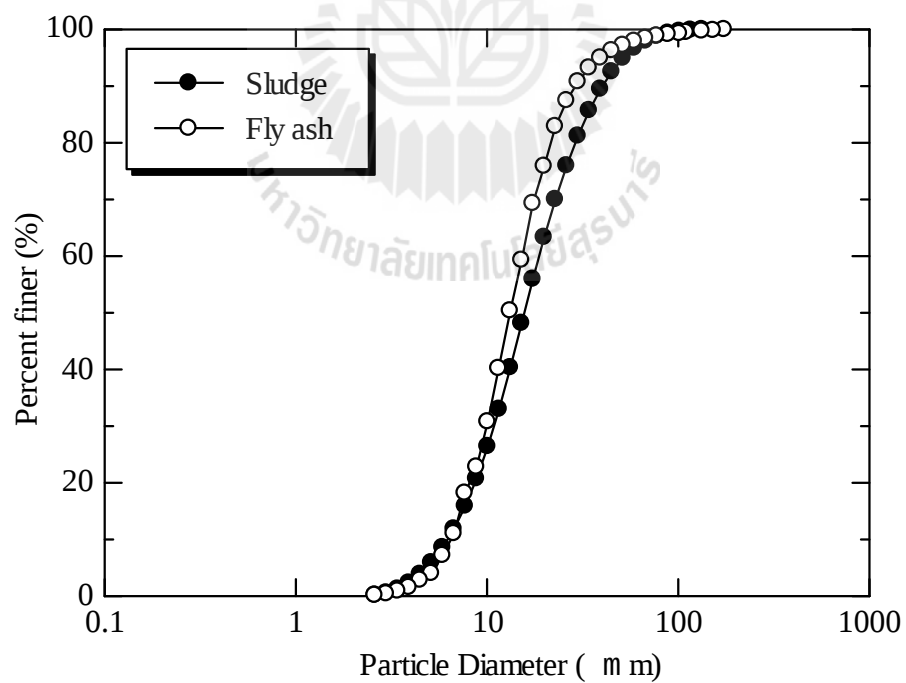
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของตะกอนดินประปา และเถ้าลอย

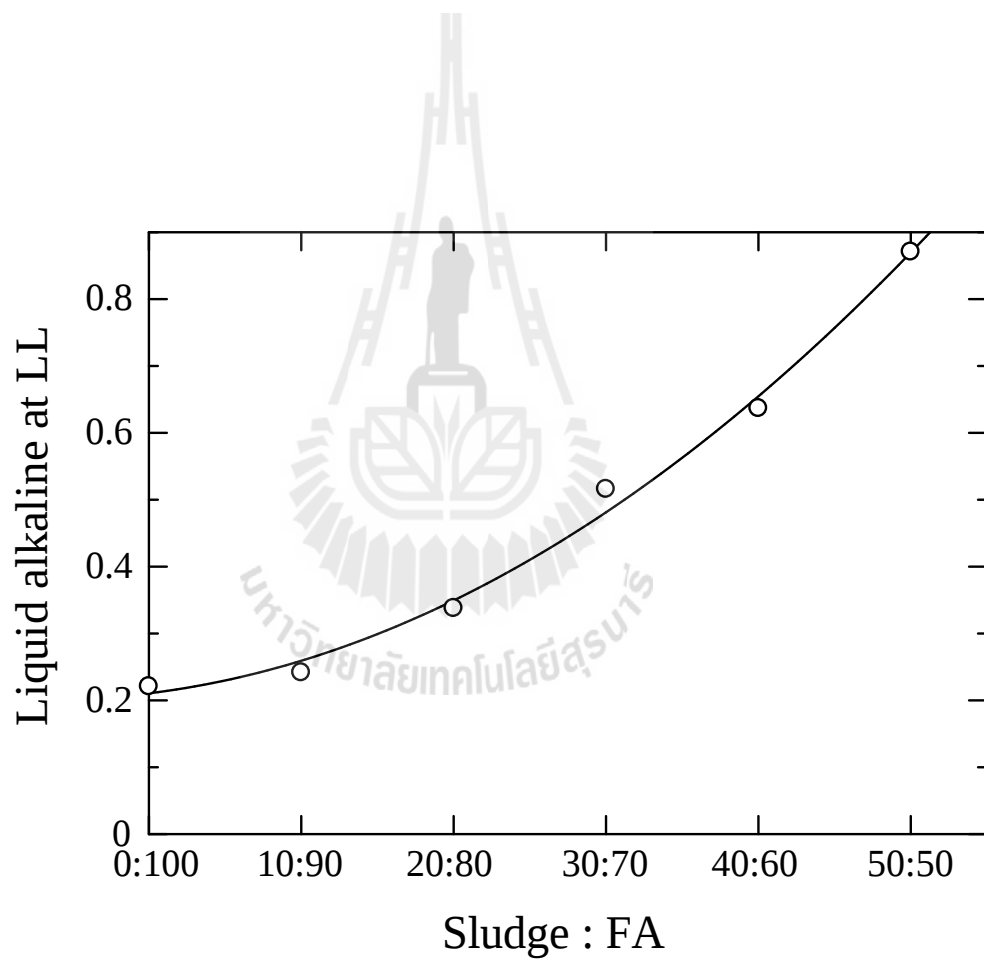
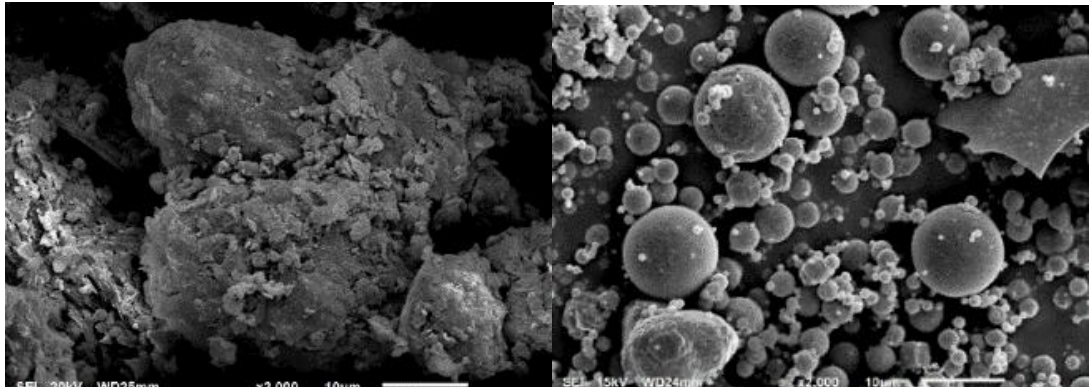
ดินตัวอย่างการทดสอบเป็นตะกอนดินประปา ที่เก็บมาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน กรุงเทพมหานคร ชีดจำกัดเหลว ชีดจำกัดพลาสติก และพิกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 58, 42 และ 16 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนประกอบทางเคมี การกระจายขนาด และภาพถ่ายกำลังขยายของเม็ดดินแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

เถ้าลอย (FA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง คุณสมบัติทางเคมีแสดงในตารางที่ 4.1 ผลรวมของปริมาณธาตุ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 75.57 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50}) ของเถ้าลอยเท่ากับ 16 ไมครอน การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าลอยแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analysis ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยเท่ากับ 2.53 ตามลำดับ ภาพถ่ายกำลังขยาย FA แสดงในรูปที่ 4.2 จากกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคและภาพถ่ายกำลังขยาย จะเห็นได้ว่าอนุภาคของตะกอนดินมีขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคของเถ้าลอย

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตะกอนดินประปา-เถ้าลอยและปริมาณสารกระตุ้นที่ชีดจำกัดเหลว จะเห็นได้ว่าการแทนที่ตะกอนดินประปาในเถ้าลอยทำให้ความต้องการปริมาณสารกระตุ้นที่ชีดจำกัดเหลวเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนตะกอนดินประปา-เถ้าลอยเท่ากับ 0:100 ปริมาณสารกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 0.22 ขณะที่ ที่อัตราส่วนตะกอนดินประปา-เถ้าลอยเท่ากับ 50:50 ปริมาณสารกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 0.871

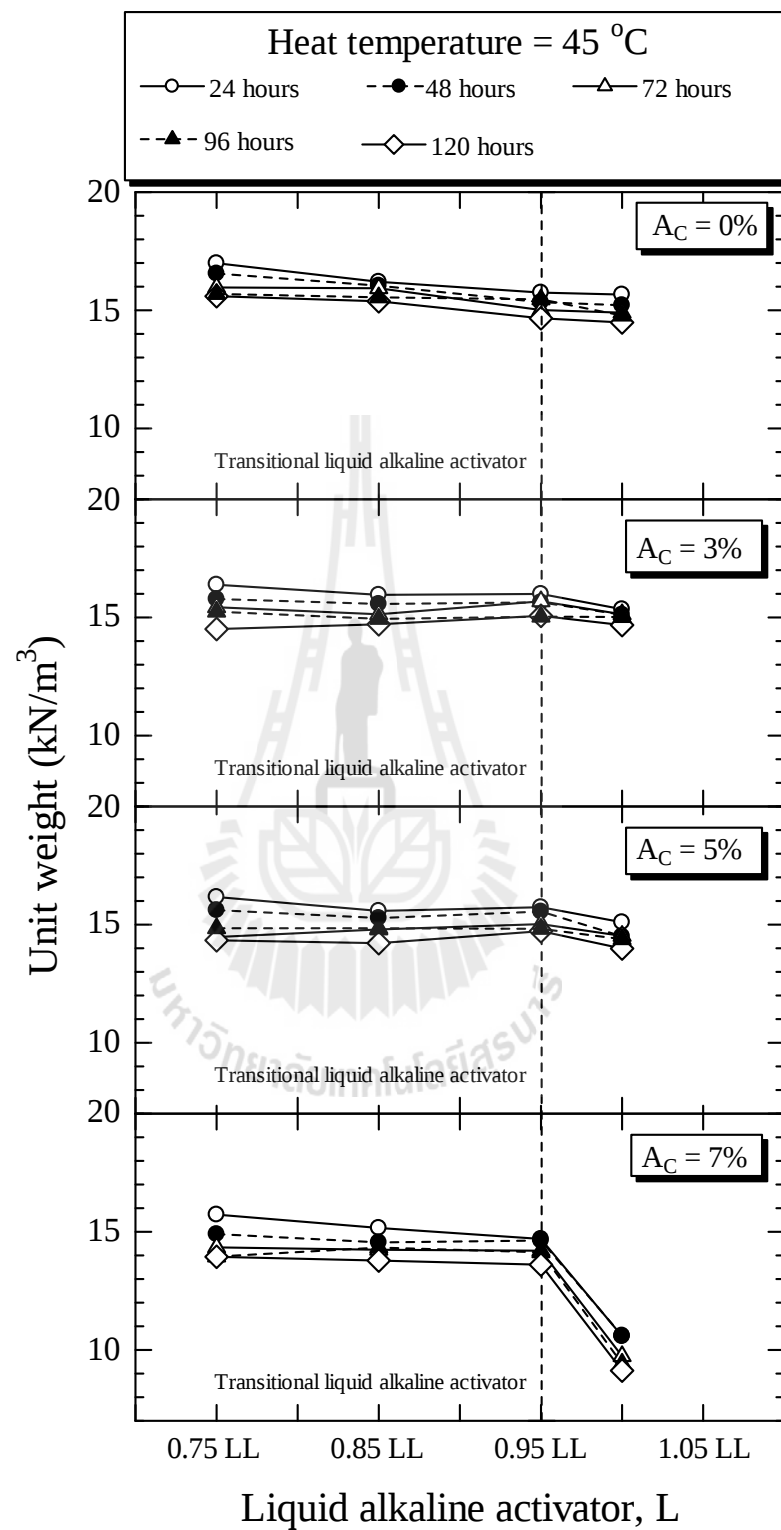
Chemical composition (%)	Sludge	Fly ash
SiO ₂	41.03	49.32
Al ₂ O ₃	14.57	12.96
Fe ₂ O ₃	18.60	15.64
CaO	0.39	5.79
MgO	17.13	2.94
SO ₃	0.59	7.29
Na ₂ O	N.D.	2.83
K ₂ O	6.85	2.83
LOI	0.84	7.29

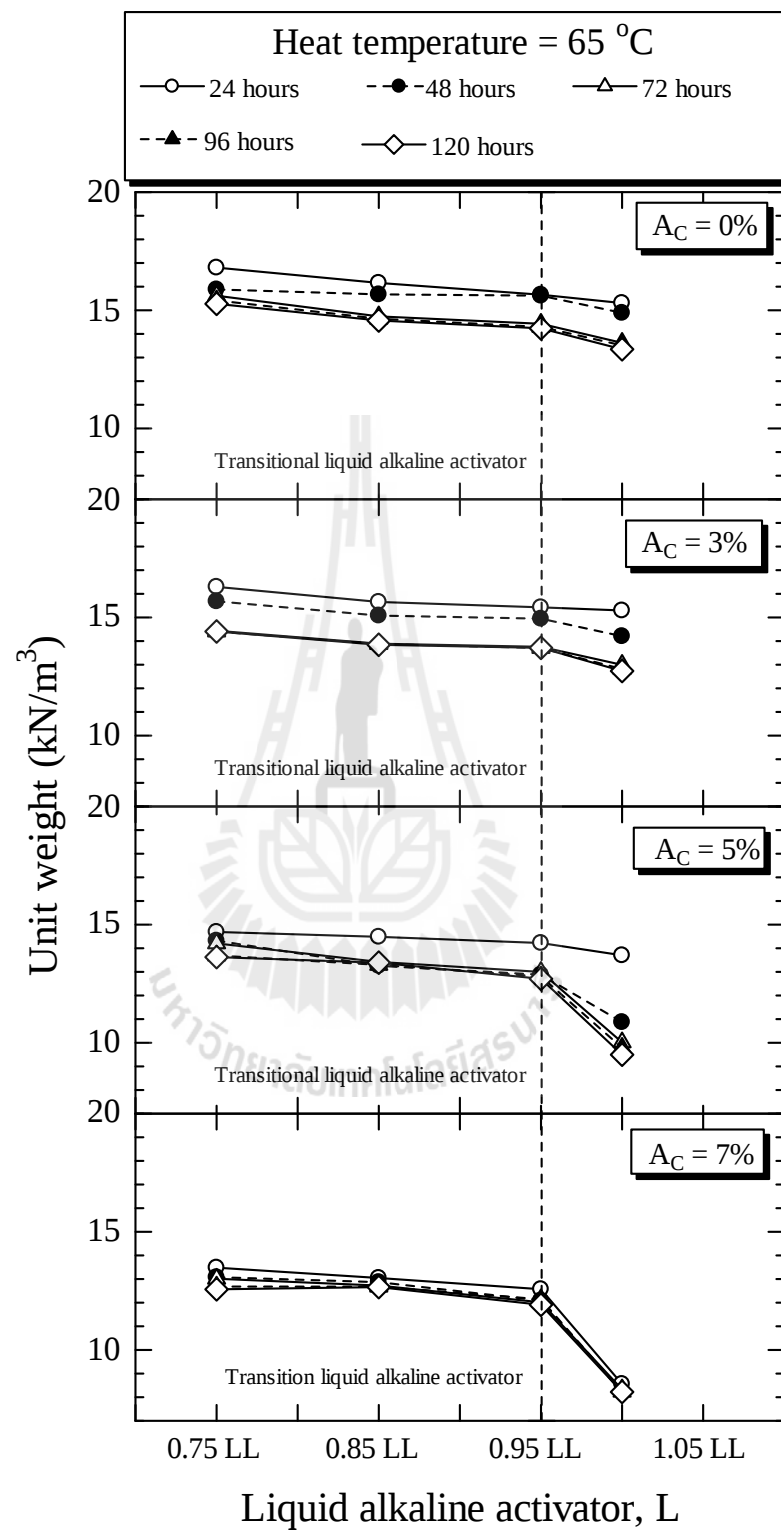


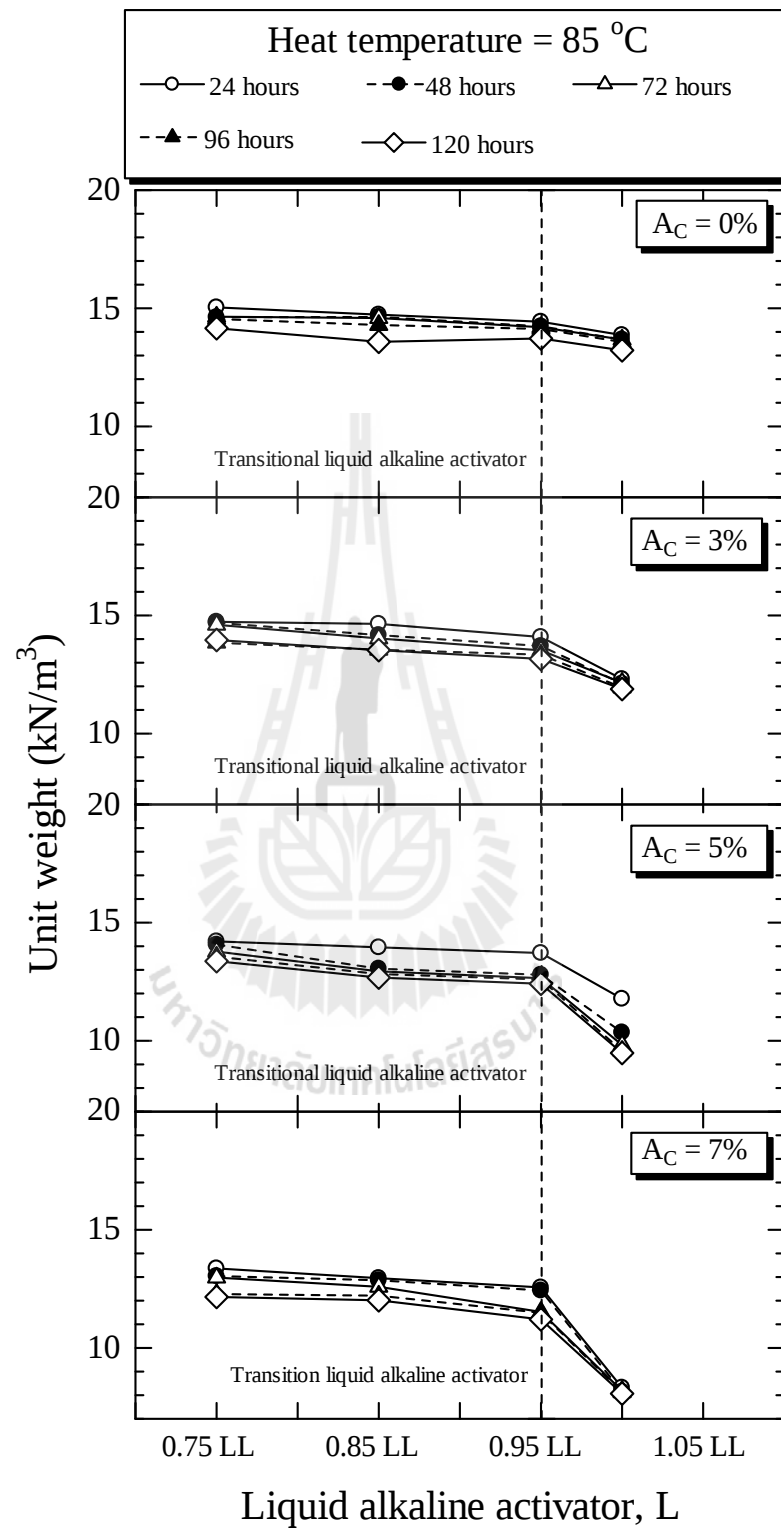


4.3 หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์

รูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณสารกระตุ้นของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณโฟมต่างๆ (ร้อยละ 0, 3, 5 และ 7) และอุณหภูมิบ่มต่างๆ (45, 65 และ 85°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณโฟมและปริมาณสารกระตุ้น อิทธิพลของสารกระตุ้นต่อหน่วยน้ำหนักแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม (กลุ่มที่ L น้อยกว่า 0.95LL และกลุ่มที่ L มากกว่า 0.95LL) สำหรับกลุ่มที่ L น้อยกว่า 0.95LL หน่วยน้ำหนักของดินตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ประมาณคงที่ แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของ L ก็ตาม สำหรับกลุ่มที่ L มากกว่า 0.95LL หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารกระตุ้นอย่างเห็นได้ชัด ค่า L ที่เท่ากับ 0.95LL เรียกว่า Transitional liquid alkaline activator ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบของ Suksiripattanapong et al. (2015) ที่ระบุค่า Transitional liquid alkaline activator เท่ากับ 1.0LL ค่า Transitional liquid alkaline activator ที่น้อยกว่านี้เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เถ้าลอยในปริมาณที่สูงกว่า และสารกระตุ้นที่ใช้ในการทดสอบไม่มีส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกต จึงทำให้การไหลของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาดีขึ้นเนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีความหนืดสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การไหลผ่าน (Chindaprasirt et al., 2007)

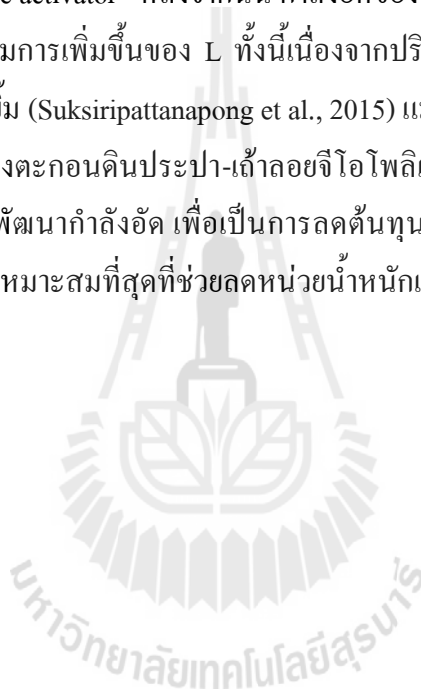


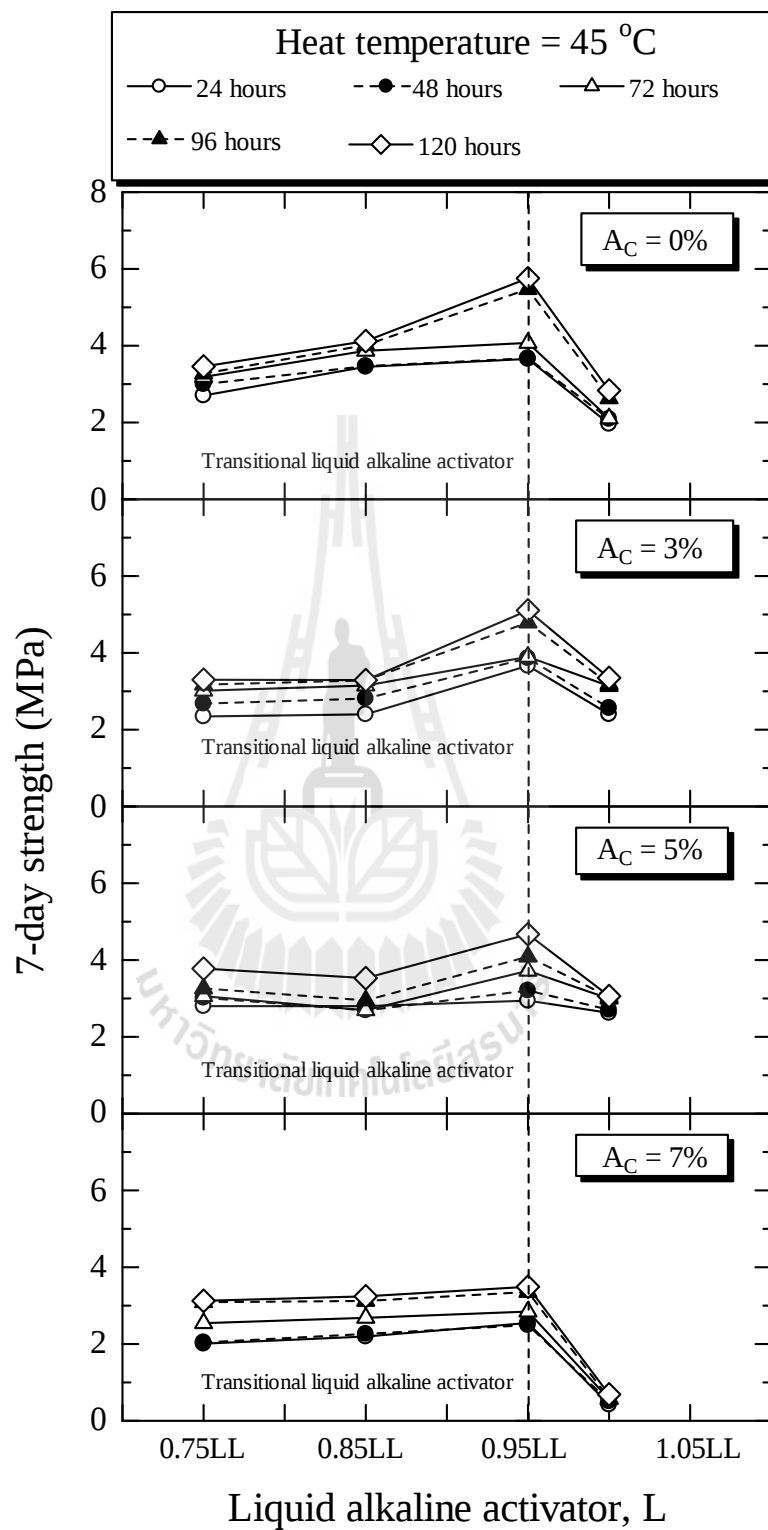


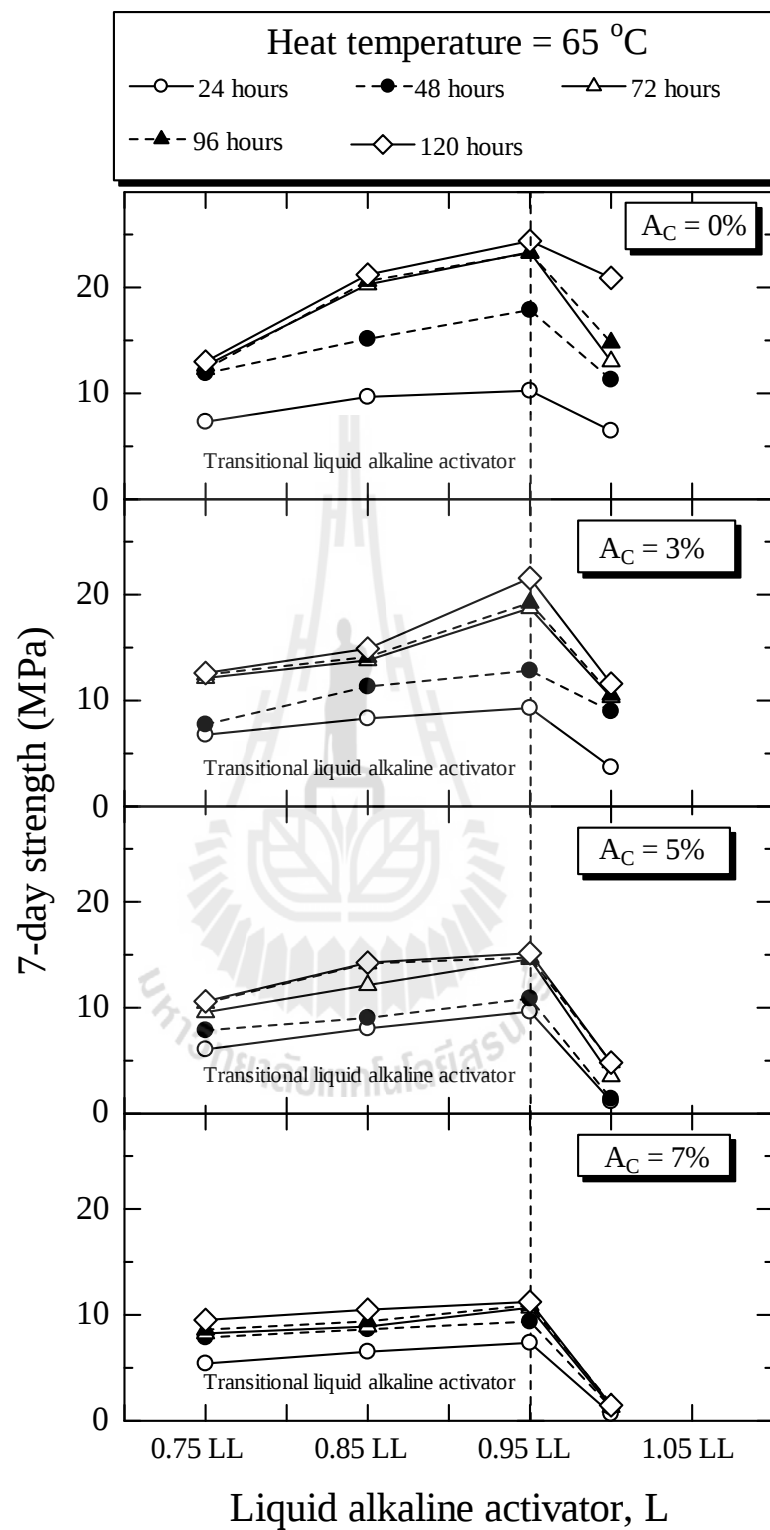


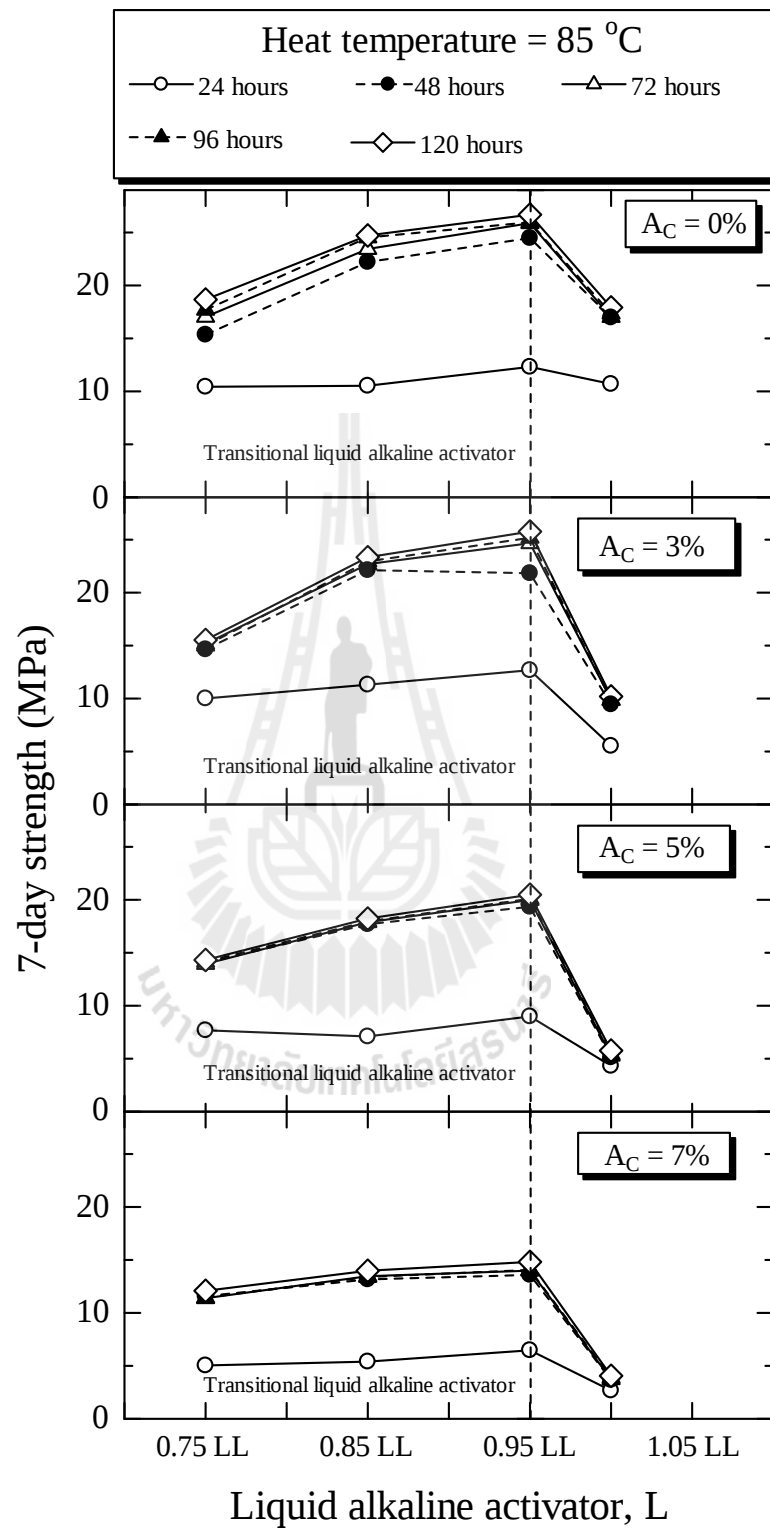
4.4 กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลส

รูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน และสารกระตุ้นของตัวอย่างตะกอนดินประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่ปริมาณโพลีเมอร์ต่างๆ (ร้อยละ 0, 3, 5 และ 7) และอุณหภูมิบ่มเท่ากับ 45, 65 และ 85°C ในระยะเวลาต่างๆ (24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง) ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าทุกระยะเวลาบ่มในตู้อบและปริมาณโพลีเมอร์ กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาแปรผันตาม L กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ L และมีค่าสูงที่สุด เมื่อ L เท่ากับ 0.95LL ซึ่งเป็นค่า Transitional liquid alkaline activator หลังจากนั้น กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ L ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารกระตุ้นมีค่ามากเกินไปซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการเยิ้ม (Suksiripattanapong et al., 2015) แม้ว่าการเพิ่ม L เกินกว่า Transitional L จะลดหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา แต่การเพิ่ม L ในช่วงดังกล่าวส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัด เพื่อเป็นการลดต้นทุน (ลดปริมาณสารกระตุ้น) การเพิ่มฟองอากาศเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดที่ช่วยลดหน่วยน้ำหนักแต่ยังคงให้กำลังอัดที่สูง





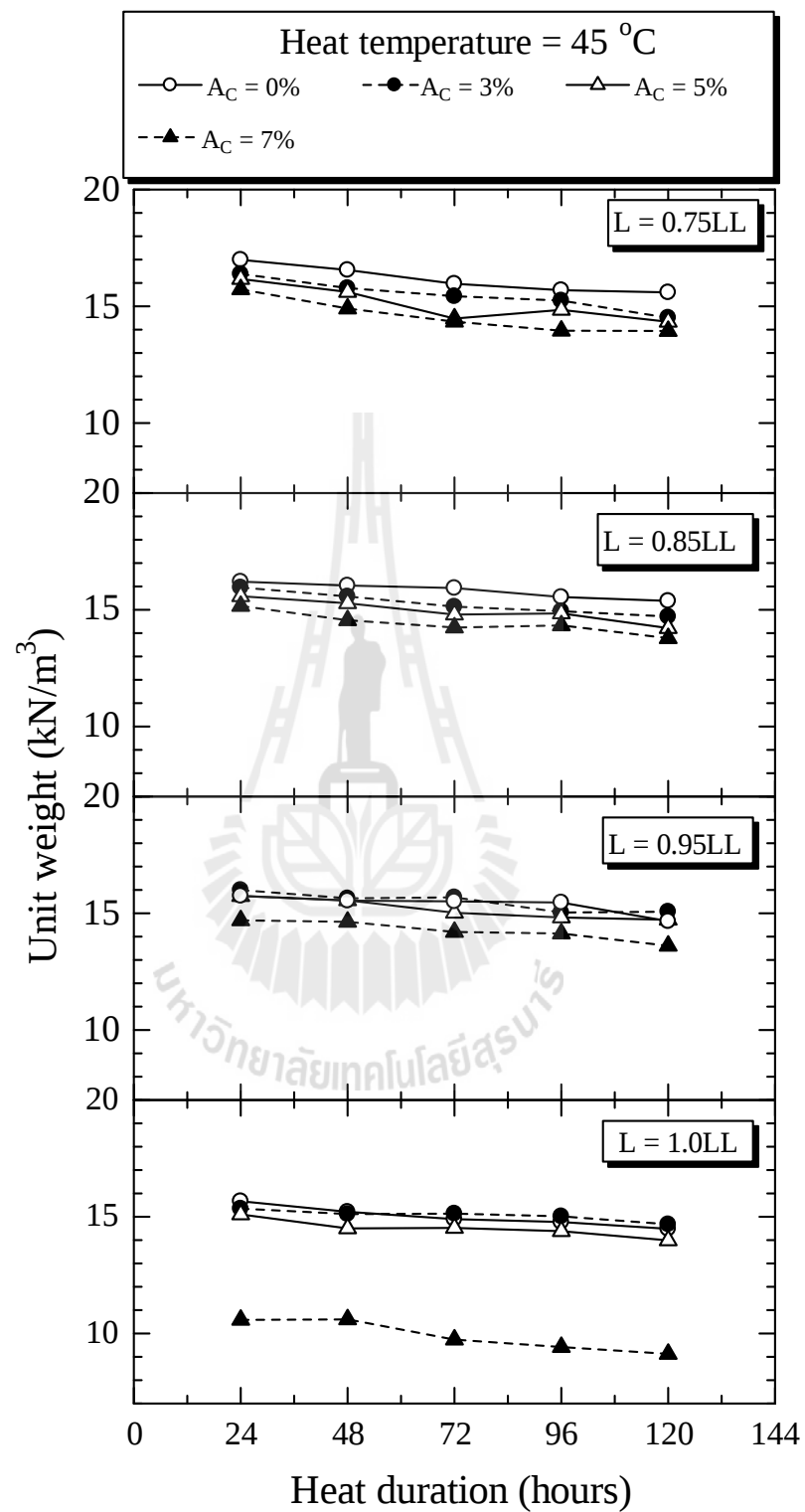


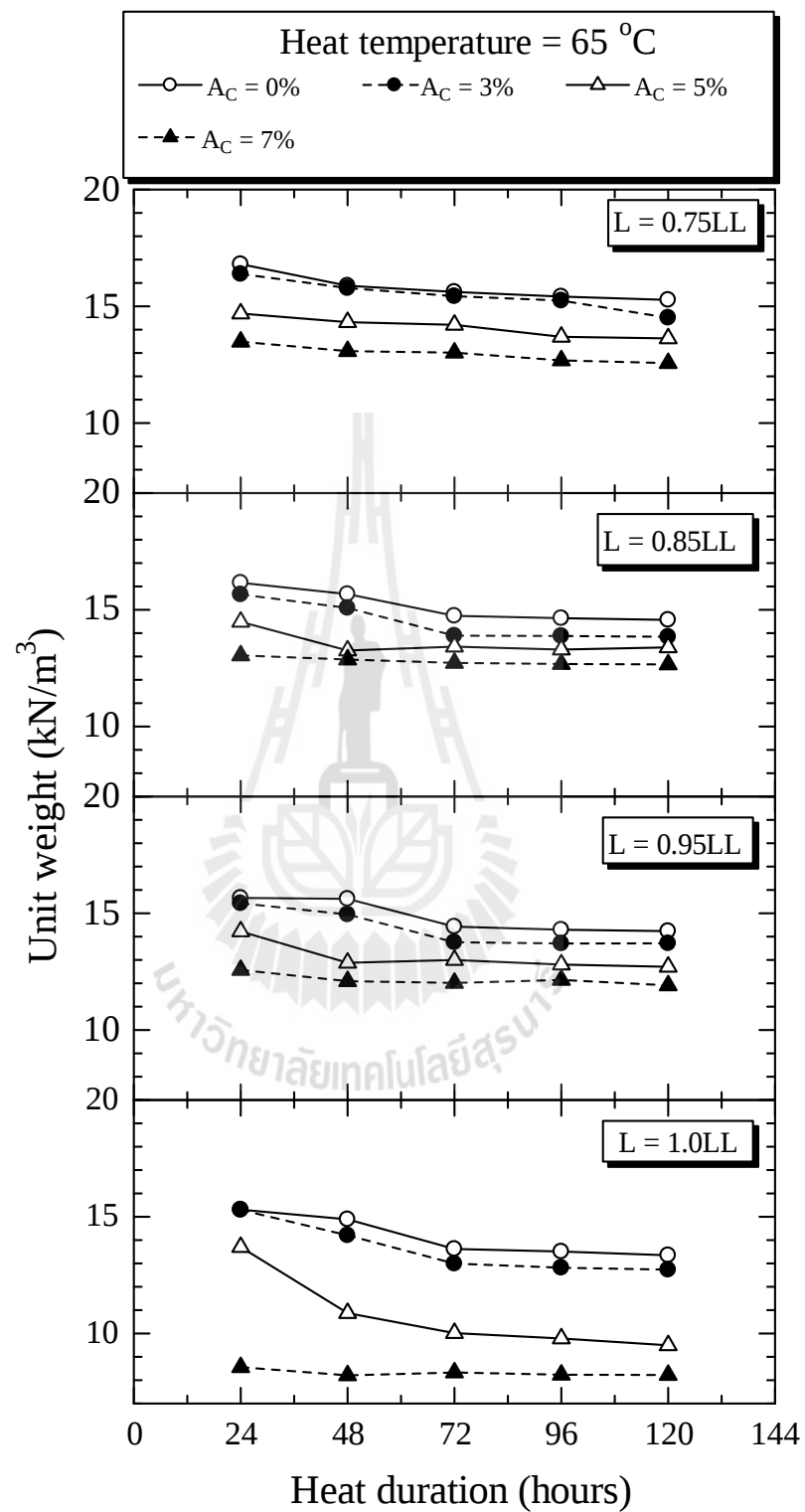


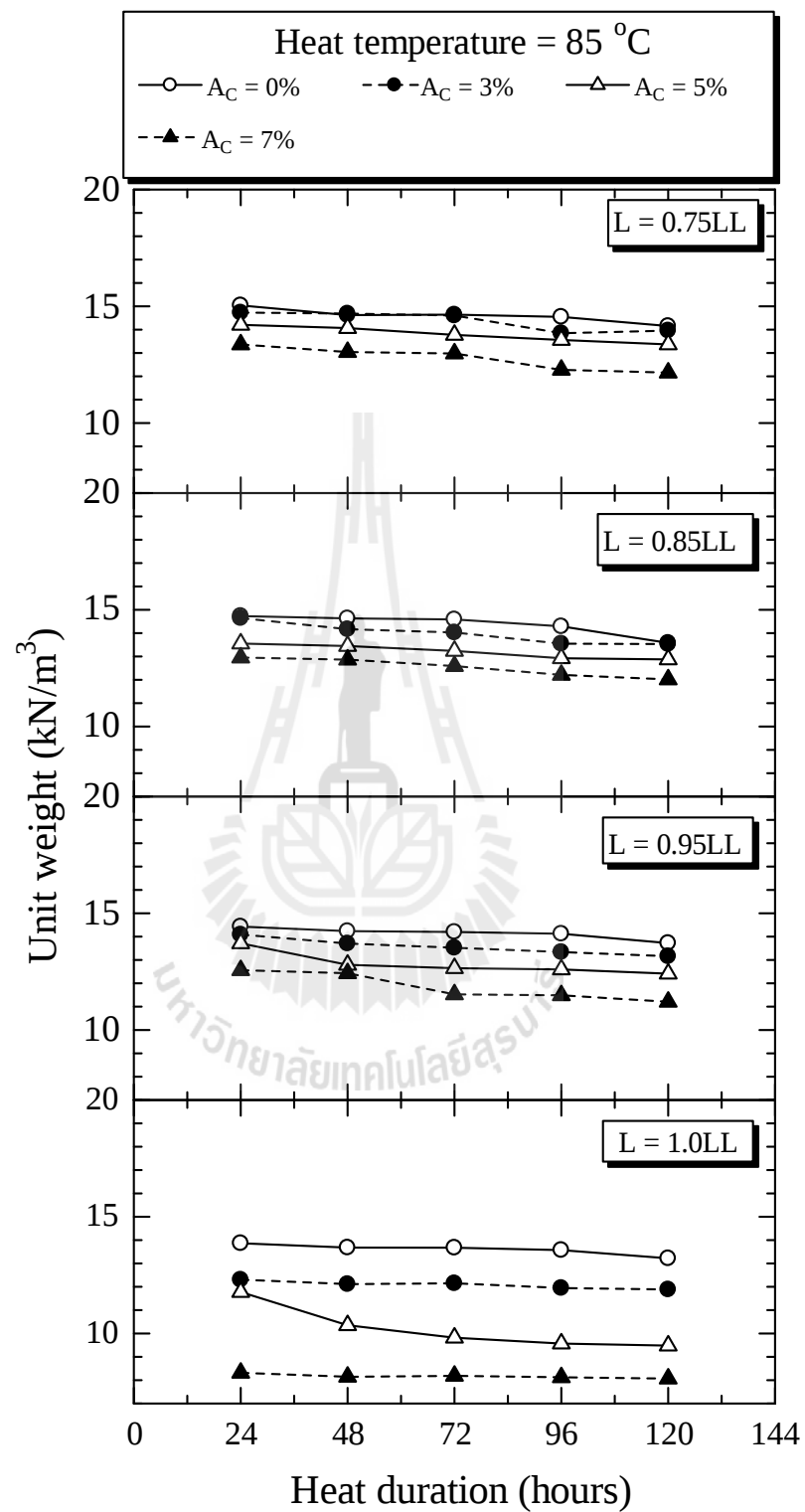
4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดิน ประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์

รูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักที่อายุบ่ม 7 วัน และระยะเวลาบ่มในตู้อบ ของตัวอย่างตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบา ที่ปริมาณโฟมต่าง ๆ (ร้อยละ 0, 3, 5 และ 7) อุณหภูมิบ่มต่าง ๆ (45°C , 65°C และ 85°C) ผลทดสอบแสดงให้เห็นได้ว่า หน่วยหนักของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบา มีค่าลดลงตามอุณหภูมิและระยะเวลาบ่มในตู้อบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาบ่มทำให้ปริมาณความชื้นในตัวอย่างลดลง อย่างไรก็ตาม สภาวะการบ่มในตู้อบมีอิทธิพลต่อการลดลงของหน่วยน้ำหนักไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มปริมาณโฟม ปริมาณโฟมมีอิทธิพลอย่างมากต่อหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 85°C ปริมาณ $L=1.0\text{LL}$ และปริมาณโฟมร้อยละ 7 เป็นส่วนผสมที่ให้ค่าหน่วยน้ำหนักต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าประมาณ 8 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับทุกระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน





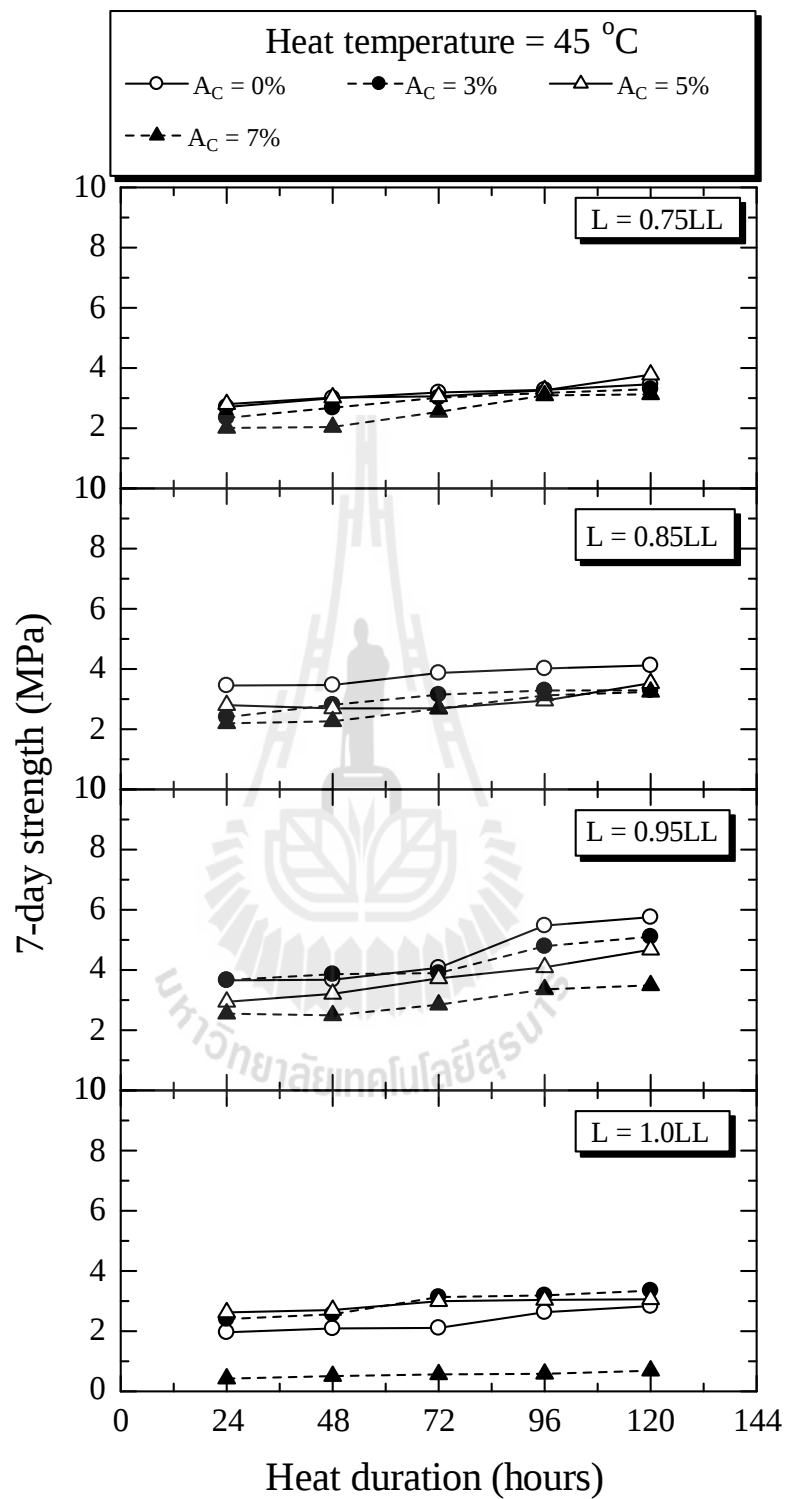


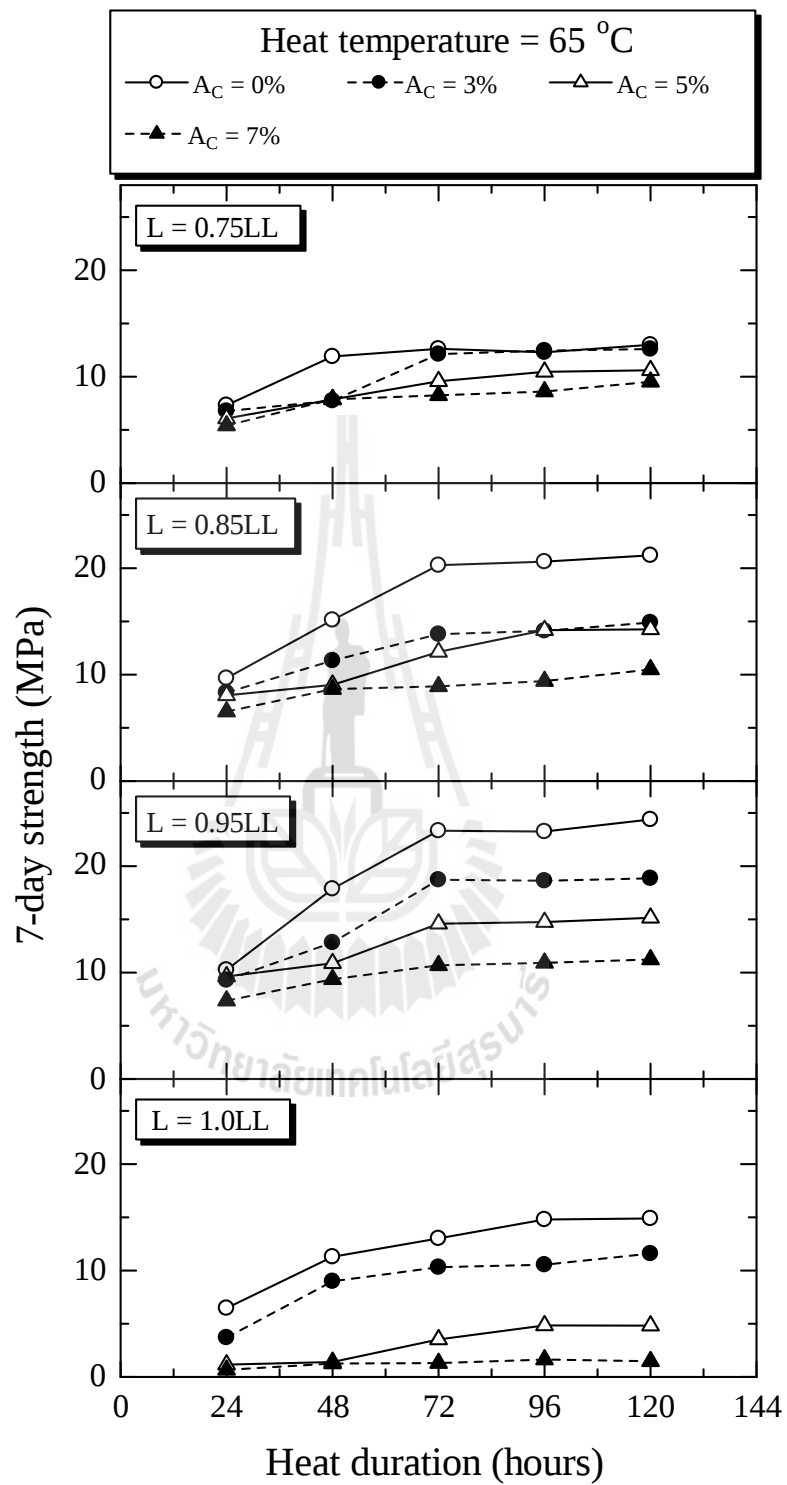


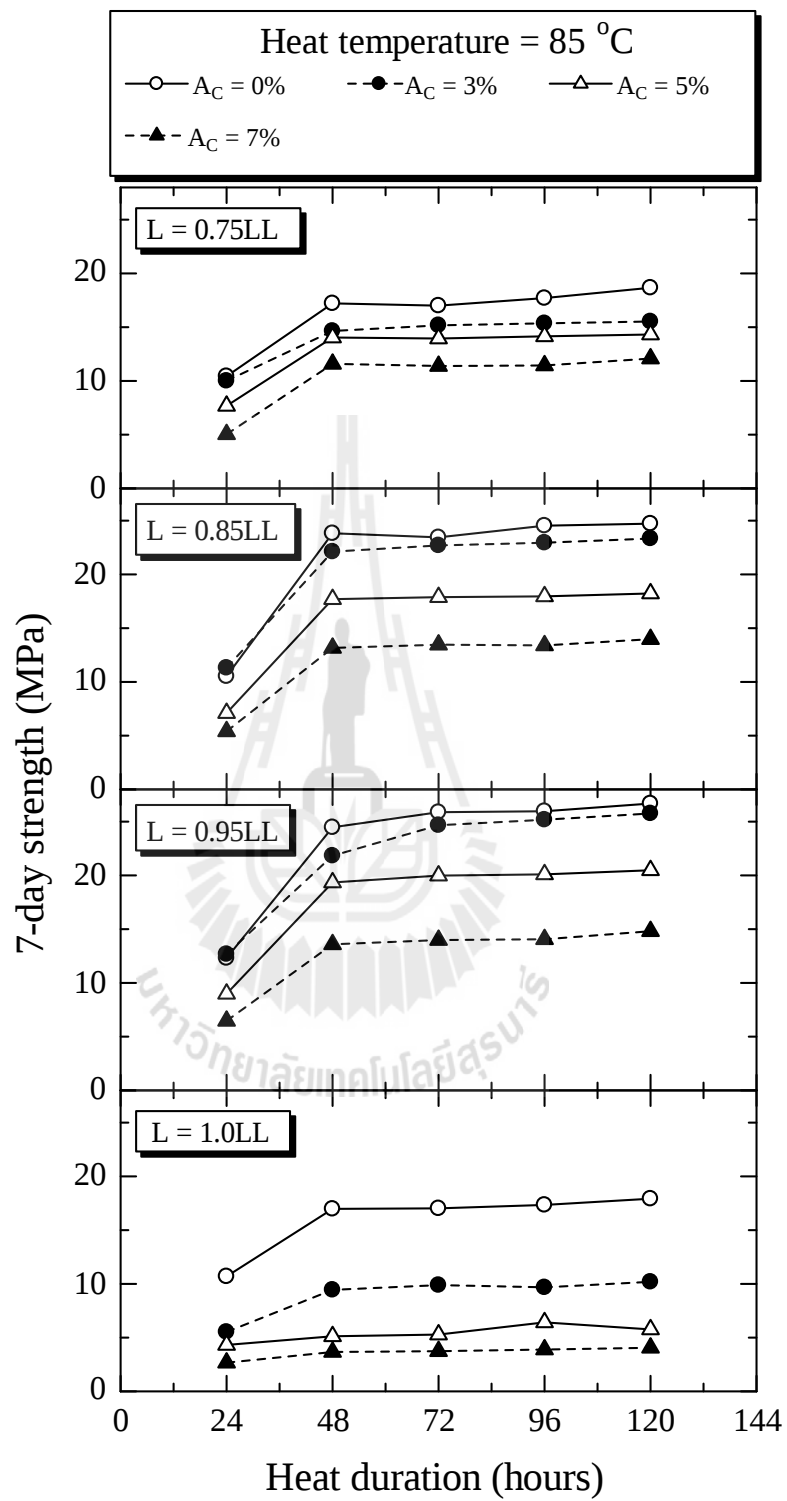
4.6 กำลังอัดและระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์

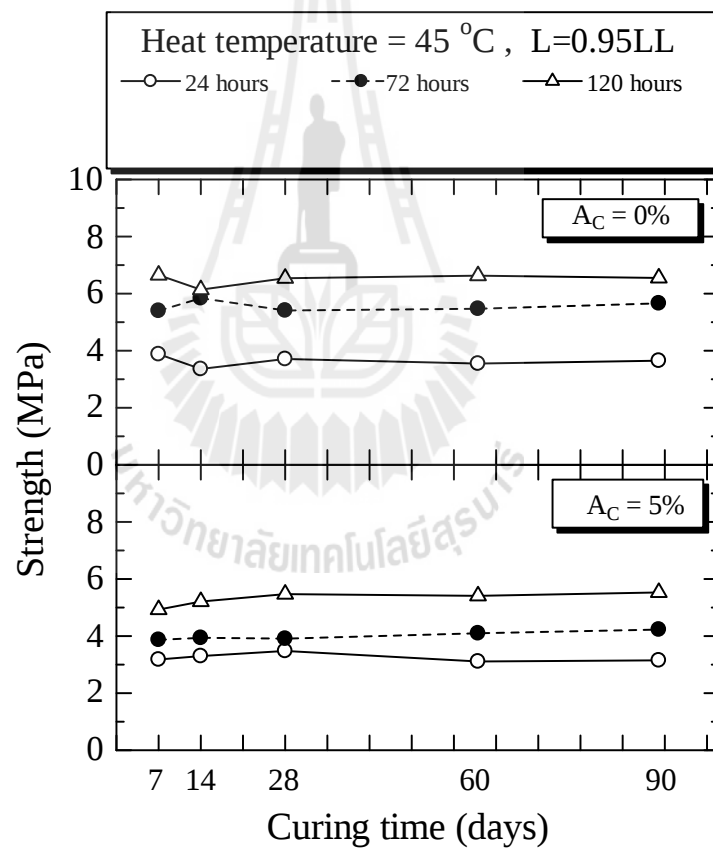
รูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน และระยะเวลาบ่มด้วยความร้อนของตัวอย่างดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 45°C, 65°C และ 85°C ปริมาณสารกระตุ้นเท่ากับ 0.75LL, 0.85LL, 0.95LL และ 1.0LL และปริมาณของสารเพิ่มฟองเท่ากับร้อยละ 0, 3, 5 และ 7 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาำลังอัดของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารกระตุ้น อุณหภูมิ และระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการพัฒนาำลังอัดของจิโอะโพลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาของ Si และ Al โดยใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กำลังอัดของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาทุกปริมาณโฟมมีค่าเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอายุบ่มในคู่อบจนกระทั่งถึงระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนในคู่อบเหมาะสม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 96 ชั่วโมง 72 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 45, 65 และ 85°C ตามลำดับ หลังจากระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนเหมาะสมกำลังอัดของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์มีค่าคงที่ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบ่ม

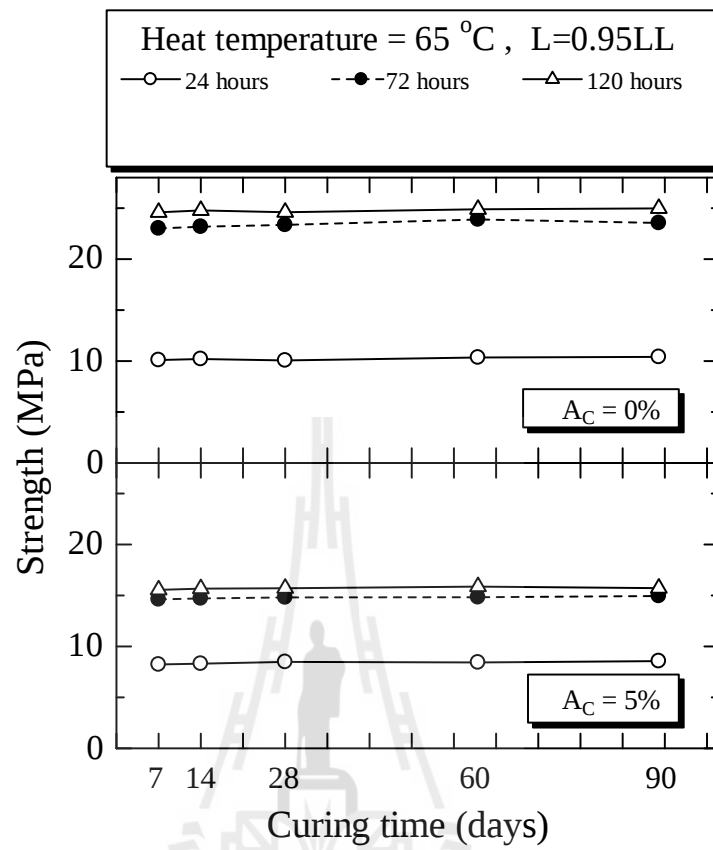


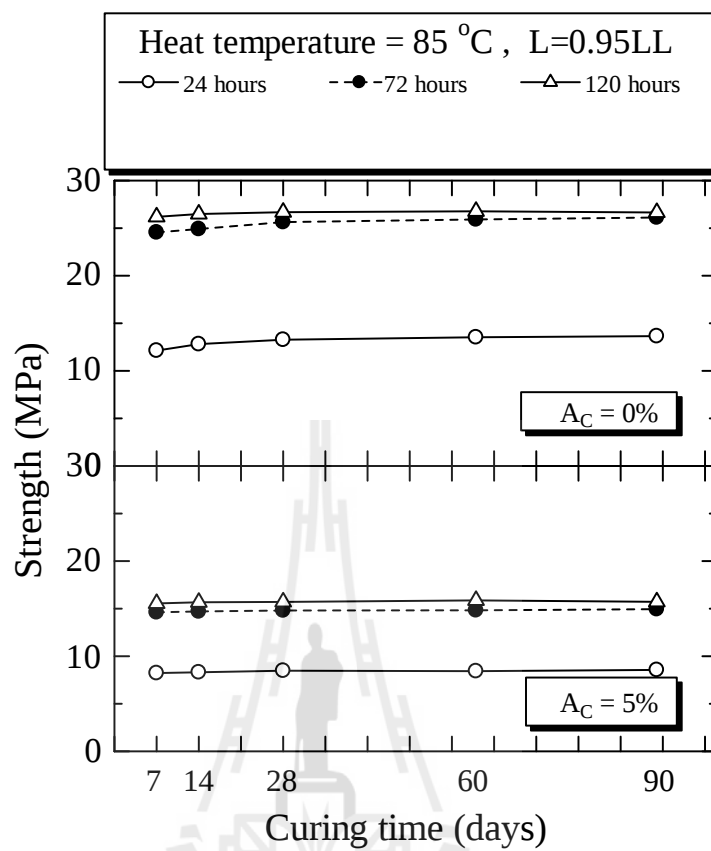








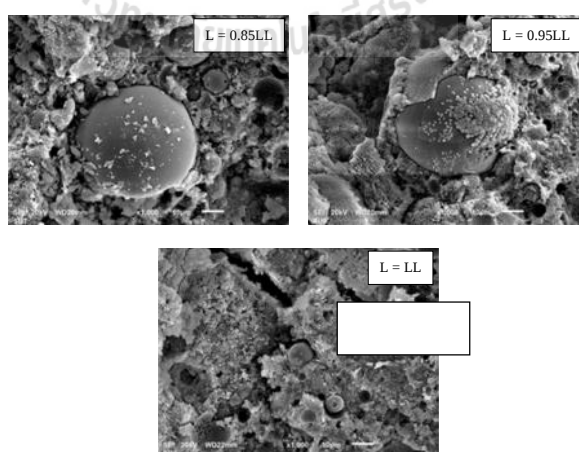




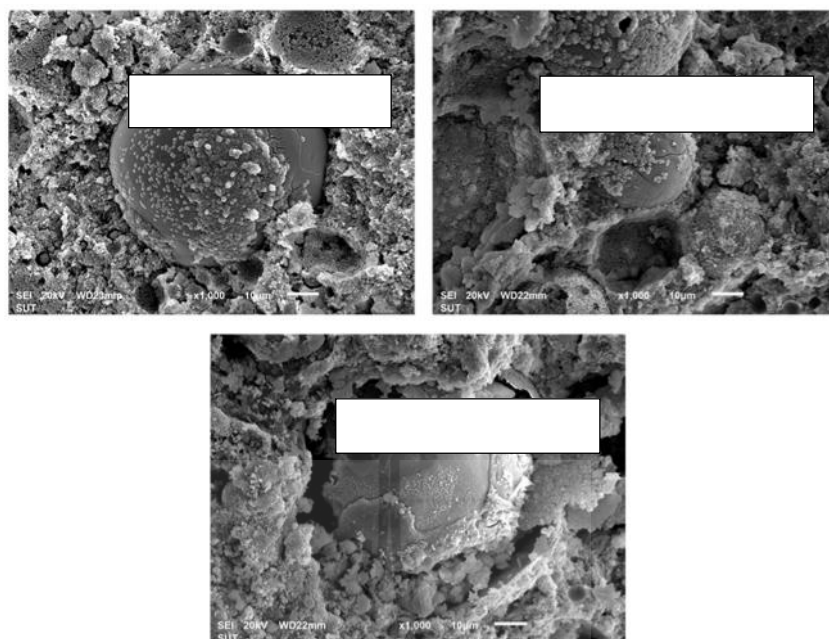
รูปที่ 4.20 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลีเมอร์มวลเบาเซลลูโลสที่ L เท่ากับ 0.95LL ที่อุณหภูมิ 45, 65 และ 85°C และระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน 120 ชั่วโมง รูปถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มพลังงานให้แก่กระบวนการชะละลาย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนทำให้เพิ่มความสามารถในการชะละลายสารประกอบของซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) และทำปฏิกิริยาได้ดีมากขึ้น จึงทำให้กำลังอัดสูงขึ้น

รูปที่ 4.21 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลีเมอร์มวลเบาเซลลูโลสที่ L เท่ากับ 0.95LL ที่อุณหภูมิ 65°C ปริมาณโฟมร้อยละ 0, 3, 5 และ 7% ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน 120 ชั่วโมง รูปถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณโฟมมีผลทำให้ความเข้มข้นของ NaOH ลดลงส่งผลให้ความสามารถในการชะละลายสารประกอบของซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) เพื่อทำปฏิกิริยาลดลง และส่งผลให้กำลังอัดลดลงตามปริมาณโฟมที่เพิ่มขึ้น

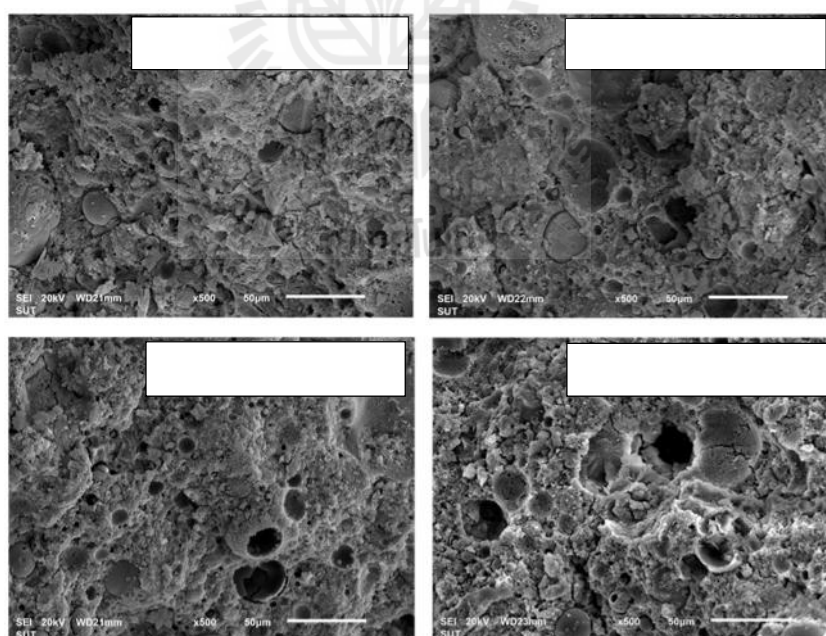
รูปที่ 4.22 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลีเมอร์มวลเบาเซลลูโลสที่ L เท่ากับ 0.95LL ที่อุณหภูมิ 65°C ระยะเวลาบ่มในตู้อบ 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง รูปถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนมีผลทำให้ความสามารถในการชะละลายสารประกอบของซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) เพื่อทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน 72 ชั่วโมงขึ้นไป การทำปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก



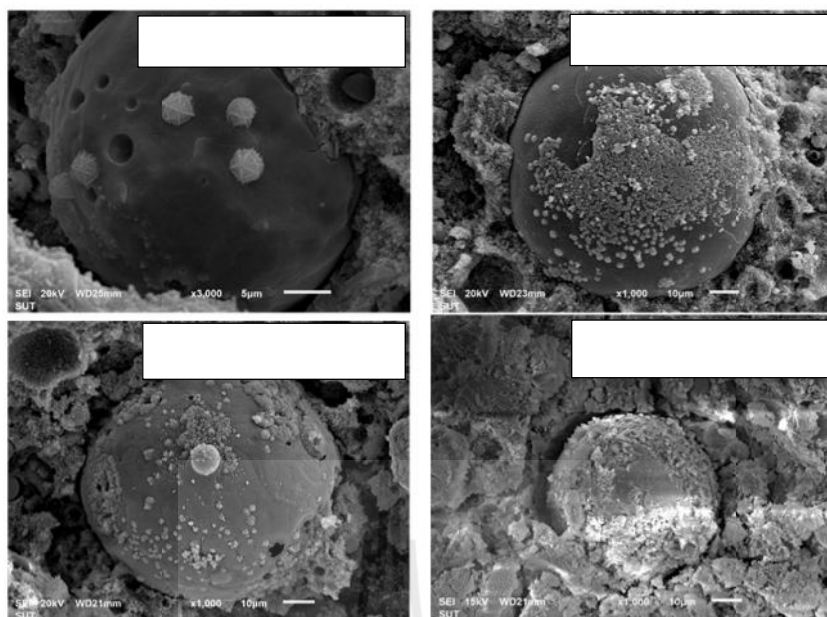
รูปที่ 4.19 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลีเมอร์มวลเบาเซลลูโลส อุณหภูมิ 65 °C ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน 24 ชั่วโมง ปริมาณโฟมเท่ากับ 0%



รูปที่ 4.20 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อัดขึ้นรูป 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์
มวลเบาเซลล์ูลาร์ ที่อุณหภูมิ 45, 65 และ 85°C ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน 120 ชั่วโมง



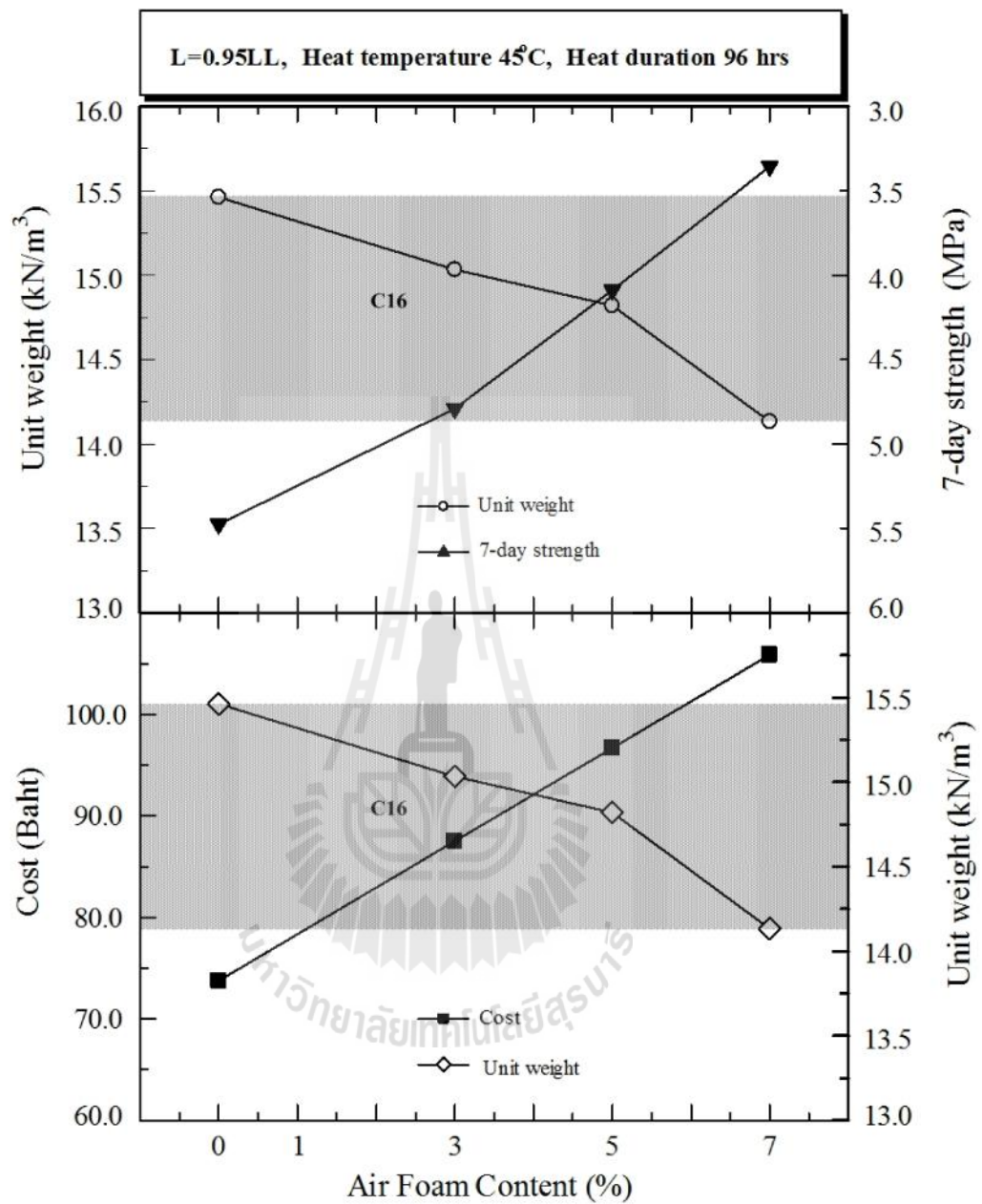
รูปที่ 4.21 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อัดขึ้นรูป 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์
มวลเบาเซลล์ูลาร์ ปริมาณโฟมร้อยละ 0, 3, 5 และ 7% ระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อน
120 ชั่วโมง

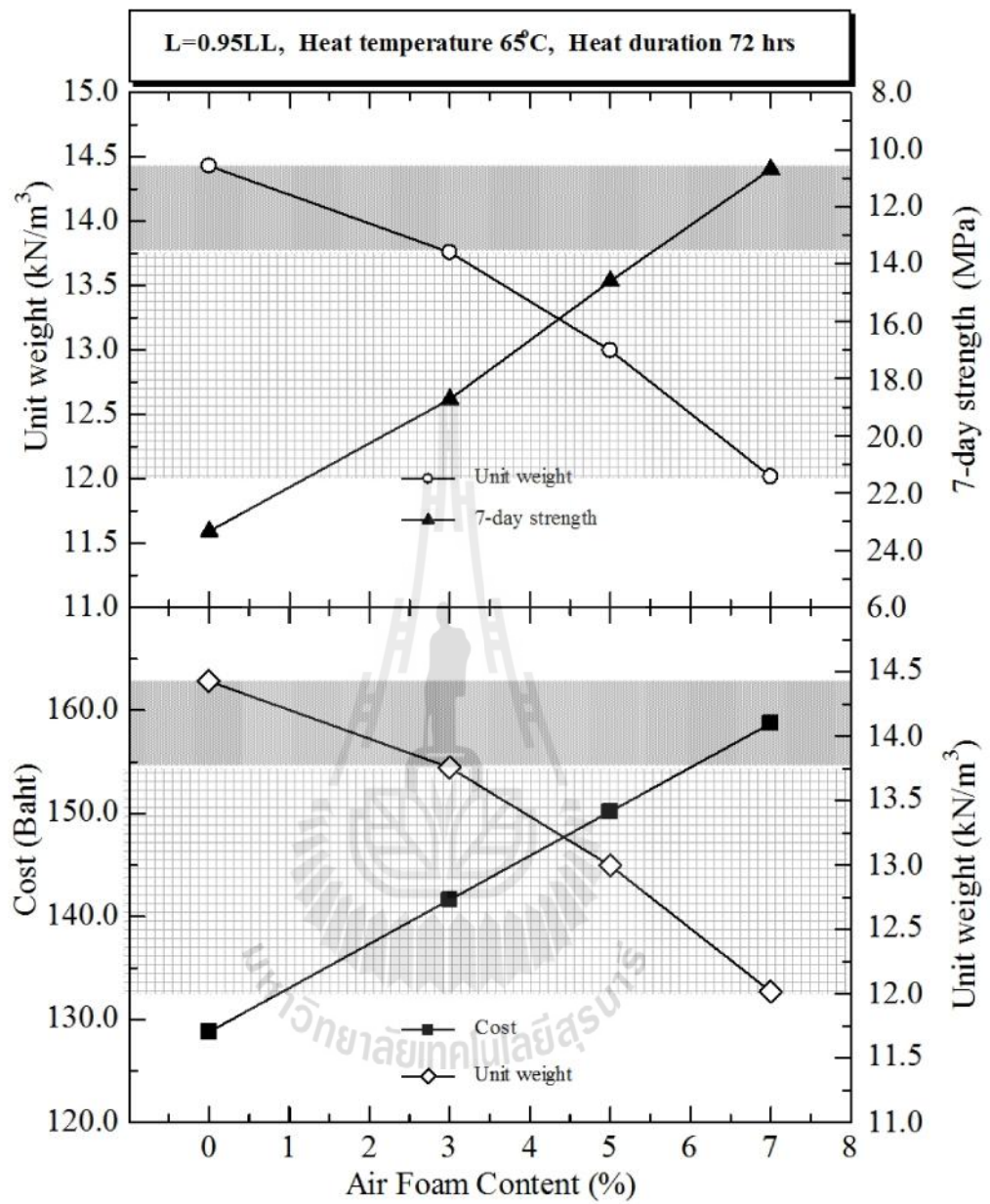


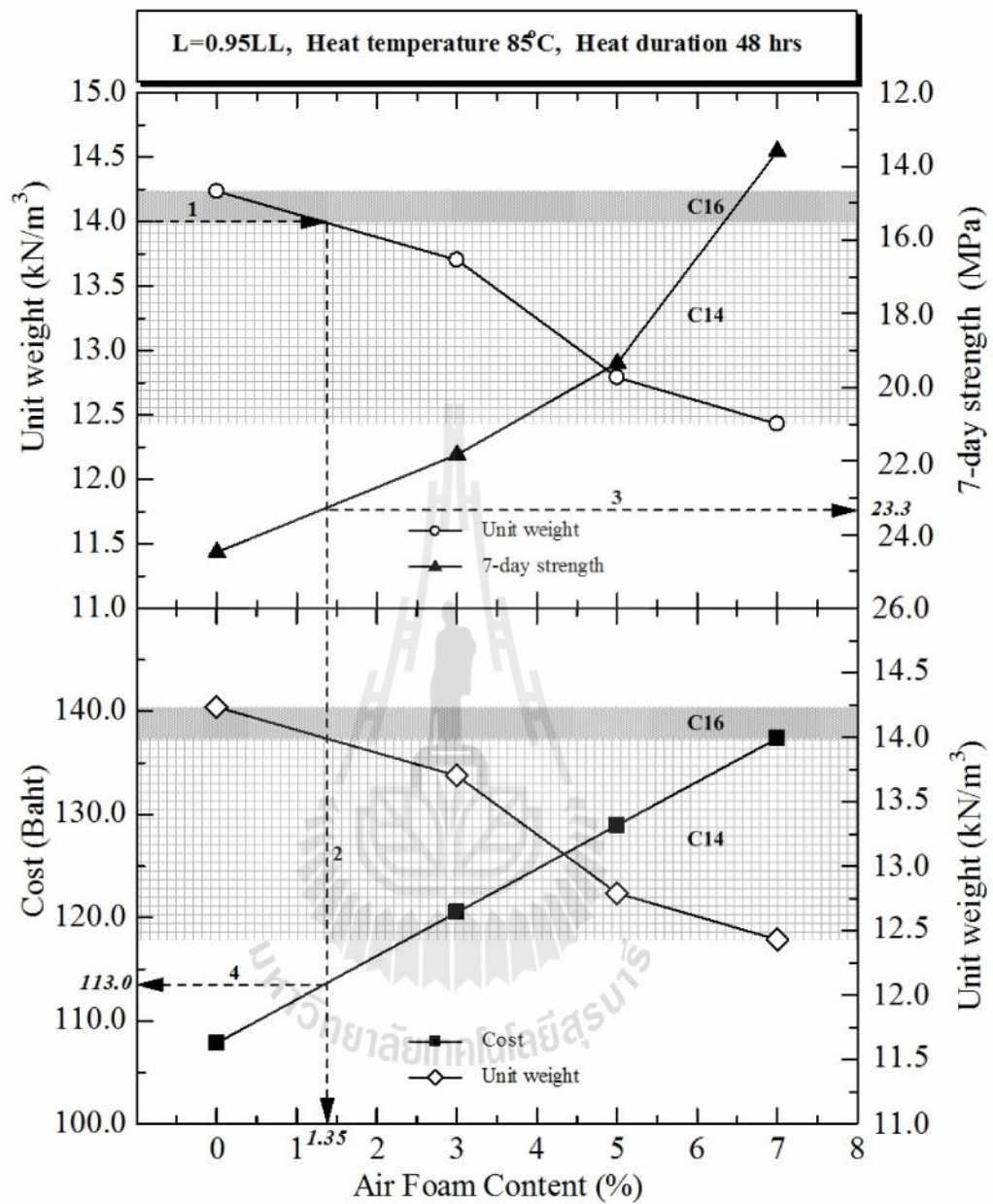
รูปที่ 4.22 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เกล็ดอยจีโอโพลิเมอร์
มวลเบาเซลลูโลสาร์ ระยะเวลากการบ่มด้วยความร้อน 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง

4.9 หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และต้นทุนการผลิตตะกอนดินประปา-เกล็ดอยจีโอโพลิ เมอร์มวลเบาเซลลูโลสาร์

รูปที่ 4.23, 4.24 และ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และราคาก่อนตัวอย่างดินตะกอนประปา-เกล็ดอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูโลสาร์ ขนาด $20 \times 60 \times 7.5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ อุณหภูมิเท่ากับ 45°C , 65°C และ 85°C ระยะเวลากการบ่มด้วยความร้อนเท่ากับ 96, 72 และ 48 ชั่วโมง ปริมาณสารกระตุ้นเท่ากับ 0.95LL ปริมาณโฟมเท่ากับร้อยละ 0, 3, 5 และ 7 และอายุบ่มเท่ากับ 7 วัน ต้นทุนการผลิตประกอบไปด้วย ราคาเกล็ดอย จีโกรัมละ 1 บาท ตะกอนดินประปาไม่มีมูลค่า สารกระตุ้น NaOH ลิตรละ 19.2 บาท สารเพิ่มฟอง 10.6 บาทต่อปริมาณโฟม 40 ซีซี เมื่อผสมน้ำ 1 ลิตรฉีดฟองออกมา มีน้ำหนัก 327.8 กรัม ค่าไฟฟ้า หน่วยละ 4 บาท ตู้อบขนาด 110 ลิตร กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 2,400 วัตต์ อดได้ครั้งละ 12 ก้อน ค่าไฟฟ้าวันละ 20 บาท โดยที่อุณหภูมิ 45°C ไม่คิดค่าไฟฟ้า ให้ความร้อนโดยใช้แสงแดด







2. ลากเส้นแนวตั้งจากเส้นกราฟ Unit weight มาที่เส้น Air Foam Content จะทำให้ทราบปริมาณโฟม 1.35%
3. ลากเส้นแนวนอนมาที่แกน 7-day strength จะได้ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันเท่ากับ 23.3 MPa
4. ลากเส้นแนวนอนมาที่แกน Cost จะได้ราคาเท่ากับ 113.0 บาท

ตารางที่ 4.2 แสดงสัดส่วนผสมในการผลิตตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบา เซลลูลาร์ ที่ปริมาณสารกระตุ้นเท่ากับ 0.95LL สำหรับอุณหภูมิ 45 °C มีสัดส่วนที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556 ที่ปริมาณโฟมร้อยละ 0 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 15.46 kN/m³ และกำลังอัดเท่ากับ 5.48 MPa จัดอยู่ในประเภทอิฐมวลเบาชนิด C16 มีราคาต่อก้อนเท่ากับ 73.77 บาท ส่วนอุณหภูมิ 65 °C ผ่านเกณฑ์ทุกสัดส่วน ที่ปริมาณโฟมร้อยละ 0 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 14.43 kN/m³ และกำลังอัดเท่ากับ 23.33 MPa จัดอยู่ในประเภทอิฐมวลเบาชนิด C16 มีราคาต่อก้อนเท่ากับ 128.84 บาท ที่ปริมาณโฟมร้อยละ 3, 5 และ 7 จัดอยู่ในประเภทอิฐมวลเบาชนิด C14 โดยที่ปริมาณโฟมร้อยละ 3 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 13.76 kN/m³ และกำลังอัดเท่ากับ 15.72 MPa มีราคาต่อก้อนต่ำสุดเท่ากับ 137.88 บาท และที่อุณหภูมิ 85 °C ผ่านเกณฑ์ทุกสัดส่วน ที่ปริมาณโฟมร้อยละ 0 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 14.24 kN/m³ และกำลังอัดเท่ากับ 24.48 MPa จัดอยู่ในประเภทอิฐมวลเบาชนิด C16 มีราคาต่อก้อนเท่ากับ 107.91 บาท ที่ปริมาณโฟมร้อยละ 3, 5 และ 7 จัดอยู่ในประเภทอิฐมวลเบาชนิด C14 โดยที่ปริมาณโฟมร้อยละ 3 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 13.70 kN/m³ และกำลังอัดเท่ากับ 23.83 MPa มีราคาต่อก้อนต่ำสุดเท่ากับ 117.57 บาท

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนผสมตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์

อุณหภูมิ (°C)	อายุ บ่ม (hr)	ปริมาณ โฟม (%)	หน่วย น้ำหนัก (kN/m ³)	กำลัง อัด (MPa)	ราคา ต่อก้อน (บาท)	คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเต็ม ฟองอากาศ มอก. 2601-2556	
						ชนิด	กำลังอัดไม่น้อยกว่า (MPa)
45	96	0	15.46	5.48*	73.77	C16	5.0
		3	15.03	4.79	85.10	C16	5.0
		5	14.82	4.09	92.69	C16	5.0
		7	14.13	3.36	96.78	C16	5.0
65	72	0	14.43	23.33	128.84	C16	5.0
		3	13.76	15.72*	137.88	C14	5.0
		5	13.00	14.60	141.29	C14	5.0
		7	12.02	10.68	142.29	C14	5.0
85	48	0	14.24	24.48	107.91	C16	5.0
		3	13.70	23.83*	117.57	C14	5.0
		5	12.79	19.34	120.00	C14	5.0
		7	12.43	13.59	125.12	C14	5.0

หมายเหตุ * สัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลวิจัย

หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาได้นำเสนอในบทนี้ อิทธิพลของตัวแปรหลัก (NaOH, พลังงานความร้อน และปริมาณโฟม) ต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดได้อธิบายโดยใช้ภาพถ่ายกำลังขยาย ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณโฟมและปริมาณสารกระตุ้น อิทธิพลของสารกระตุ้นต่อหน่วยน้ำหนักแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม (กลุ่มที่ L น้อยกว่า 0.95LL และกลุ่มที่ L มากกว่า 0.95LL) สำหรับกลุ่มที่ L น้อยกว่า 0.95LL หน่วยน้ำหนักของดินตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาประมาณจะคงที่แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของ L ก็ตาม สำหรับกลุ่มที่ L มากกว่า 0.95LL หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารกระตุ้นอย่างเห็นได้ชัด ค่า L ที่เท่ากับ 0.95LL เรียกว่า TRANSITIONAL LIQUID ALKALINE ACTIVATOR

2. สำหรับทุกระยะเวลาบ่มในตู้อบและปริมาณโฟม กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาแปรผันตาม L กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเพิ่มค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ L และมีค่าสูงที่สุด เมื่ออัตราส่วน L เท่ากับ 0.95LL ซึ่งเป็นค่า TRANSITIONAL L หลังจากนั้น กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบา มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ L

3. ปริมาณสารกระตุ้น (L) ที่น้อยเกินไป (อัตราส่วน L เท่ากับ 0.80LL และ 0.90LL) ไม่เพียงพอต่อการผสมตัวอย่างตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาให้เป็นเนื้อเดียวกัน (ตัวอย่างค่อนข้างแห้ง) ปริมาณ L ที่น้อยเกินไปนี้ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาจิโอะโพลิเมอร์ไรเซชัน สำหรับปริมาณสารกระตุ้นที่เกิน TRANSITIONAL L (L เท่ากับ 0.95LL) เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง ปริมาณสารละลายในตัวอย่างเกิดการระเหยออกและเกิดช่องว่างระหว่างโครงสร้างของตะกอนดินประปากับเม็ดเถ้าลอย และก่อให้เกิดการหดตัวของตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวระดับไมโครเมตร

4. กำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์มวลเบาเพิ่มค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารกระตุ้น อุณหภูมิและอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการพัฒนากำลังอัดของจิโอะโพลิเมอร์เกิด

จากการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิของ Si และ Al กับสารละลายที่เป็นด่างสูง และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาทุกปริมาณ โฟมมีค่าเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนจนกระทั่งถึงระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนเหมาะสม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 96 ชั่วโมง 72 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 45, 65 และ 85°C ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนหลังจากระยะเวลาการบ่มด้วยความร้อนเหมาะสม แทนไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

5. กำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาไม่แปรผันตามอายุบ่ม เนื่องจากการบ่มตัวอย่างในตู้อบจะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไฮเซชัน และทำให้กำลังอัดสูงสุดเกิดขึ้นที่อายุบ่มช่วงต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลล์ูลาร์ ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกำลังอัดคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมล และอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา งานวิจัยที่อาจศึกษาเพิ่มเติมคือการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 10 โมล เพื่อลดต้นทุนและลดปัญหาอาการเสกคันของผู้ทดสอบขณะเตรียมตัวอย่าง และการใช้ปูนซีเมนต์หรือสารที่มีปริมาณแคลเซียมสูงเป็นส่วนผสมแทนที่ในเถ้าลอยเพื่อลดการใช้อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา

รายการอ้างอิง

- คมกริช เวชสัตถ์, สุทธิรักษ์ ภูชากุล, ปาริฉัตร ปั่นทอง และสุรเดช เหมรัมย์กุล (2553). การออกแบบและก่อสร้างระบบบำบัดตะกอนโดยใช้วิธีรีดกรอง โรงงานผลิตน้ำบางเขน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, ประเทศไทย.
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย และ วราภรณ์ คุณวานากิจ, 2542, คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอย, เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต, กุมภาพันธ์, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 7-19
- ปริญญญา จินดาประเสริฐ, ถนัดกิจ ชาริรัตน์, โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ รายงานวิจัย ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2544, 10 หน้า
- เริงศักดิ์ นนทิมธากุล และอภิศักดิ์ จุฑาศิริวงศ์ (2549). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการอัดของมอร์ต้าจีโอโพลิเมอร์. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า CON30-CON34.
- Alonso, S., Palomo, A. (2001). Alkaline Activation of Metakaolin and Calcium Hydroxide Mixtures: Influence of Temperature Activator Concentration and Solid Ratio. **Materials Letters.**, 47(1-2):55-62
- Ayuso, E. et al. (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-)combustion fly ashes, **Journal of Hazardous Materials** 154 (2008) 175–183
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. **Cement and Concrete Research** 35(2005): 658-670.
- Barbosa, J. (1999). Electrophoretic behaviour of quinolones in capillary electrophoresis Effect of pH and evaluation of ionization constants. **Journal of Chromatography A**, 839 (1999) 183–192

- Beben, D. and Z. "Zee" Manko (2011). "Influence of selected hydrophobic agents on some properties of autoclaving cellular concrete (ACC)." **Construction and Building Materials** 25(1): 282-287.
- Chindaprasirt, P. and U. Rattanasak (2009). " Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer." **Minerals Engineering** 22(2009): 1073-1078.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. et al. (2007). "Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste." **Construction and Building Materials** 21(7): 1534-1541.
- Davidovitch, J., "Geopolymers : Inorganic polymeric new materials", **Journal of Materials Education** , Vol. 16 ,(1994), pp. 91 – 139
- DeRose and Morris (1999). The influence of the mix design on the properties of micro-cellular concrete. **Thomas Telford Publishing**. R. K. D. a. N. A. Henderson.
- Feng, N.-Q. and G.-F. Peng (2005). "Applications of natural zeolite to construction and building materials in China." **Construction and Building Materials** 19(8): 579-584.
- Fernandez-Jimenez, A., A. Palomo and M. Criado (2005), Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model, **Cement and Concrete Research**, 35 (2005) 1204 – 1209
- Goldman, A. and A. Bentur (1993). "The influence of microfillers on enhancement of concrete strength." **Cement and Concrete Research** 23(4): 962-972.
- Gopalan, M. K. (1993). "Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete." **ACI Materials Journal** 90(2): 117-121.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Influence of Mixture Composition and Curing Temperature. **Presented at the The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC)**. Bali, Indonesia: 2003.
- Hardjito, D. Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V. (2004a). Brief Review of Development of Geopolymer Concrete. George Hoff Symposium, **American Concrete Institute**, Los Vegas, USA, 25 May 2004.
- Hardjito, A., SE. Wallah, DMJ. Sumajouw, BV. Rangan, 2005, On the Development of Fly Ash – Based Geopolymer Concrete, **ACI Materials Journal**, Vol. 101, Issue 6, November 2004, pp. 467-472

- Jones, M. R. and A. McCarthy (2005). Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications. **Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications**. N. M. Dhir RK, McCarthy A. London, Thomas Telford: 61–88.
- Jones, M. R. and A. McCarthy (2005). "Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete." **Fuel** 84(11): 1398-1409.
- Just, A. and B. Middendorf (2009). "Microstructure of high-strength foam concrete." **Materials Characterization** 60(7): 741-748.
- Kearsley, E. P. (1996). The use of foamcrete for affordable development in third world countries. **Appropriate Concrete Technology**. R. K. Dhir and M. J. McCarthy. London, E & FN: 233-243.
- Kearsley, E. P. and P. J. Wainwright (2001). "Porosity and permeability of foamed concrete." **Cement and Concrete Research** 31(5): 805-812.
- Kearsley, E. P. and P. J. Wainwright (2002). "Ash content for optimum strength of foamed concrete." **Cement and Concrete Research** 32(2): 241-246.
- Kearsley, E. P. and P. J. Wainwright (2002). "The effect of porosity on the strength of foamed concrete." **Cement and Concrete Research** 32(2): 233-239.
- Khatib, J. M. and S. Wild (1996). "Pore size distribution of metakaolin paste." **Cement and Concrete Research** 26(10): 1545-1553.
- Kunhanandan Nambiar, E. K. and K. Ramamurthy (2007). "Sorption characteristics of foam concrete." **Cement and Concrete Research** 37(9): 1341-1347.
- Metha, J. L., L. A. Smith, et al. (1995). **The application of solidification/stabilization to waste materials**. London, Lewis Publishers.
- Nambiar, E. K. K. and K. Ramamurthy (2006). "Influence of filler type on the properties of foam concrete." **Cement and Concrete Composites** 28(5): 475-480.
- Nambiar, E. K. K. and K. Ramamurthy (2006). "Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology." **Cement and Concrete Composites** 28(9): 752-760.
- Nambiar, E. K. K. and K. Ramamurthy (2007). "Air-void characterisation of foam concrete." **Cement and Concrete Research** 37(2): 221-230.

- Neville, A. M. and J. J. Brooks (1990). **Concrete Technology**, Longman singapore publishers.
- Ohsawa, S., K. Asaga, S. Goto, M. Daimon, Quantitative determination of fly ash in the hydrated fly ash - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ system, **Cem Concr Res** **15** (1985) 357 - 366.
- Palamo, A., MW Grulzeck, MT. Blanco-Varela, (1999), Alkali activated fly ashes: cement for the future, **Cement and Concrete Research**, 29, 1323-1329
- Phair, J.W., Van Deventer, J.S.J., (2002), Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers, **International Journal of Mineral Processing**, 66 (2002) 121 – 143
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S. and Shen, S.L. (2013). "Strength development in clay-fly ash geopolymer." **Construction and Building Materials** 40: 566-574.
- Swanepoel, J.C. and Strydom, C.A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material, **Applied Geochemistry** 17 (2002) 1143–1148
- Wang, H, et al. (2005). Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects** 268 (2005)1–6
- Wang, K. S., I.-J. Chiou, et al. (2005). "Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash." **Construction and Building Materials** 19(8): 627-633.
- Wongkeo, W., P. Thongsanitgarn, et al. (2012). "Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials." **Materials and Design** 35(0): 434-439.

ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ และสุขสันต์ หอพิบูลสุข (2558) หน่วยนำหนัก
และกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์. การประชุม
วิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20





หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอย
จีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์
Unit weight and strength of lightweight cellular
water treatment sludge-fly ash geopolymer

เสริมศักดิ์ ตียะแสงทอง^{1*} เชิดศักดิ์ สุขศิริวัฒนพงศ์² และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี

³ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเซลลูลาร์ ตะกอนดินประปาได้จากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน และเถ้าลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สารกระตุ้นเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการศึกษาครั้งนี้คือ อัตราส่วนตะกอนดินประปาต่อเถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ปริมาณสารเพิ่มฟองและอุณหภูมิและระยะเวลาบ่มในตู้อบ จากผลการทดสอบพบว่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาแปรผันกับปริมาณสารกระตุ้น ปริมาณฟอง อุณหภูมิและระยะเวลาบ่มในตู้อบ หน่วยน้ำหนักตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารกระตุ้น ปริมาณฟอง และอุณหภูมิและระยะเวลาบ่มในตู้อบ กำลังอัดสูงสุดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาอยู่ที่ปริมาณสารกระตุ้นที่เหมาะสมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.95LL สำหรับทุกอุณหภูมิ

คำสำคัญ: ตะกอนดินประปา, เถ้าลอย, ปริมาณสารกระตุ้น

Abstract

This paper studies unit weight and strength of the lightweight cellular sludge - fly ash geopolymer. Sludge was obtained from the Bang Khen water treatment plant of the Metropolitan Water Work Authority of Thailand (MWA) and fly ash was obtained from the Mae Moh power plant of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). Liquid alkaline activator is sodium hydroxide (NaOH) with a concentration of 10 molar. The influential factors studied are fly ash replacement, liquid alkaline activator (NaOH) content, air content, heat temperature and heat duration. Test results show that unit weight of lightweight cellular water

treatment sludge-fly ash geopolymer varies with the amount of liquid alkaline activator, air content, heat temperature and heat duration. The unit weight of lightweight cellular water treatment sludge-fly ash geopolymer decreases with increasing the amount of liquid alkaline activator, air content, heat temperature and heat duration. The maximum compressive strength of lightweight cellular water treatment sludge-fly ash geopolymer is at optimum liquid alkaline activator which is 0.95LL for all heat temperature.

1. คำนำ

โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนเป็นโรงงานผลิตน้ำแห่งที่ 3 ของการประปานครหลวง ซึ่งสามารถผลิตน้ำประปาได้วันละประมาณ 3.6 ล้านลูกบาศก์เมตร แหล่งน้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำประปามาจากแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งระยะทางระหว่างคลองส่งน้ำดิบทางทิศตะวันออกจนถึงโรงงานผลิตน้ำประปามีระยะทางประมาณ 18 กิโลเมตร ตะกอนดินประปาเกิดจากการชะล้างน้ำดินจากพื้นที่ดินน้ำและพื้นที่ลุ่มน้ำของแม่น้ำเจ้าพระยาและแม่น้ำแม่กลอง ซึ่งตะกอนดินเหล่านี้จะปะปนมากับน้ำดิบในคลองส่งน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำ ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าว จะมีตะกอนดินเหลือทิ้งเฉลี่ย 247 ตันต่อวัน โดยบางช่วงเวลามีมากถึงวันละ 300 ตันในฤดูแล้ง และ 700 ตันในฤดูฝน [1] ตะกอนดินประปาทั้งหมดนำไปใช้ในการถมที่ดิน ซึ่งการประปานครหลวงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนดิน แนวคิด Zero Waste หรือ “ของเสียเหลือศูนย์” ในกระบวนการผลิตน้ำประปา ถือว่าเป็นโจทย์ที่ท้าทายของทุกภาคการผลิต เพราะเป็นการนำเอาของเหลือทิ้งมาเพิ่มมูลค่า หรือใช้ประโยชน์ เพื่อลดมลภาวะที่ส่งผลกระทบต่อโลก

อิฐมวลเบา ถือได้ว่าเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่มีความนิยมในปัจจุบันเป็นอย่างมาก วัสดุที่ที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตอิฐมวลเบาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หยาบ ปูนขาว อีปซิม สารกระจายฟองอากาศ กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้พลังงานในกระบวนการผลิตมาก เพื่อเป็นการลดปัญหาโลกร้อนและเป็นการใช้ประโยชน์ของวัสดุเหลือทิ้ง งานวิจัยนี้จึง

*นักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

²อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ศาสตราจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

E-mail address: sermsak.ti@gmail.com

ศึกษาความเป็นได้ในการนำตะกอนดินประปามาผลิตอิฐมวลเบาซีโอโพลีเมอร์ สารซีโอโพลีเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ทำจากวัสดุซิลิกาที่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับต่างอัตราไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและรับกำลังได้สูง งานวิจัยนี้ศึกษาหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอโพลีเมอร์มวลเบา ปัจจัยอิทธิพลในการศึกษาครั้งนี้คืออัตราส่วนการแทนที่ตะกอนดินประปาด้วยเถ้าลอย (FA) ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ (L) อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน และปริมาณโฟม การเปลี่ยนแปลงกำลังอัดกับปัจจัยอิทธิพลอธิบายด้วยโครงสร้างทางจุลภาค (SEM)

2. ตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

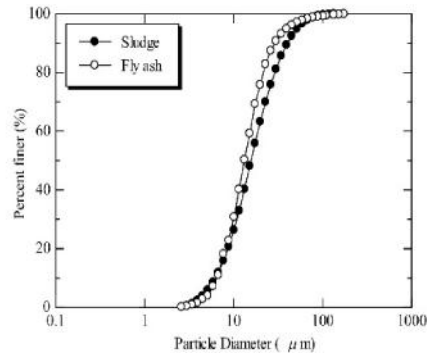
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของตะกอนดินประปาและเถ้าลอย

ตะกอนดินประปาที่ใช้ในการทดสอบเก็บจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง ตัวอย่างตะกอนดินประกอบด้วยทรายร้อยละ 0.15 ดินตะกอนร้อยละ 99.65 และดินเหนียวร้อยละ 0.20 ซีดจำกัดเหลวมีค่าเท่ากับร้อยละ 66 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 ตะกอนดินประปาจัดเป็นดินไม่มีพลาสติก ส่วนประกอบทางเคมี การกระจายขนาด และภาพถ่ายกำลังขยายของเม็ดดินแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

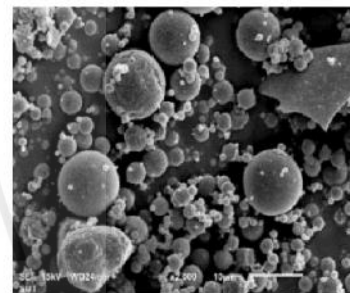
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนดิน และเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี	ตะกอนดิน	เถ้าลอย
SiO ₂	61.84	47.51
Al ₂ O ₃	24.8	13.14
Fe ₂ O ₃	9.52	6.66
CaO	0.6	30.24
MgO	N.D.	N.D.
SO ₃	0.59	N.D.
Na ₂ O	N.D.	0.41
K ₂ O	1.9	1.63
LOI	0.55	0.42

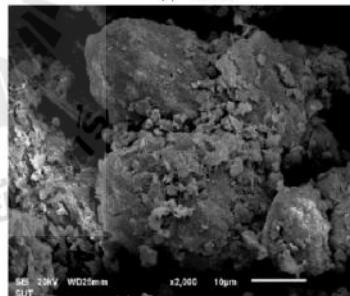
เถ้าลอย (FA) ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย ผลรวมของปริมาณธาตุ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 67.31 และ CaO มีปริมาณร้อยละ 30.24 ดังนั้น FA จำแนกเป็น Class C ตามมาตรฐาน ASTM C-618 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D₅₀) ของเถ้าลอยเท่ากับ 13.25 ไมครอน การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าลอยแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งได้จากการทดสอบ Laser particle size analysis ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยเท่ากับ 2.35 ภาพถ่ายกำลังขยาย FA แสดงในรูปที่ 2 จากการถ่ายภาพกระจายขนาดของอนุภาคและภาพถ่ายกำลังขยาย จะเห็นว่าอนุภาคของตะกอนดินมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับอนุภาคของเถ้าลอย



รูปที่ 1 การกระจายขนาดของตะกอนดินประปาและเถ้าลอย



(a) เถ้าลอย



(b) ตะกอนดินประปา

รูปที่ 2 ภาพถ่ายกำลังขยายของเถ้าลอยและตะกอนดินประปา

2.2 การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

ตะกอนดินประปาดูให้นำมาตากให้แห้ง (ปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 0) หลังจากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดทราย ก่อนนำเข้าเครื่องบดละเอียด โฟมได้จากการผสมสารเพิ่มฟอง (ยี่ห้อ Sika) กับน้ำ ในอัตราส่วนสารเพิ่มฟอง 50 ซีซี ต่อ น้ำ 1 ลิตร และเติมลงในเครื่องฉีดโฟมแล้วเขย่าจนน้ำและสารเพิ่มฟองรวมตัวกัน ลักษณะของโฟมที่ได้จะคล้ายเนื้อครีมเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก

สารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) เป็นสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมล ซึ่งเตรียมโดยการผสม NaOH แบบเกรด 400 กรัม กับน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร และคนให้เข้ากันและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

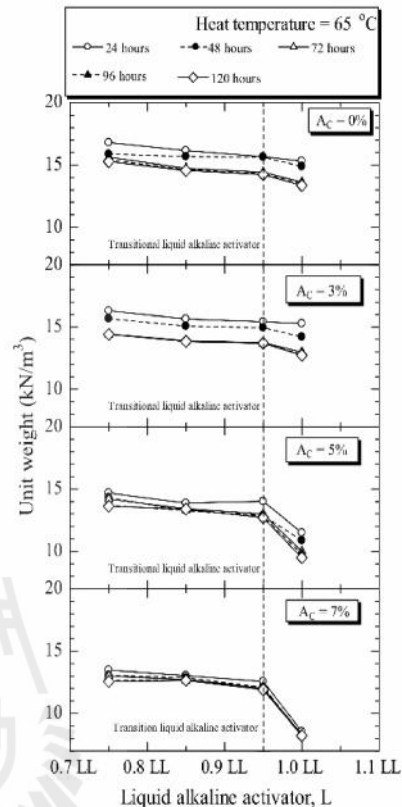
ตะกอนดินประปาจะนำมาผสมเข้ากับเถ้าลอยในอัตราส่วนผสม 50:50 และผสมเข้ากับสารกระตุ้น ส่วนผสมดังกล่าวจะถูกนำมาทดสอบขีดจำกัดเหลว (LL) [2,3,4] การทดสอบขีดจำกัดเหลวทำตามวิธี cone penetration test ปริมาณสารกระตุ้นที่ขีดจำกัดเหลวนิยามเป็นปริมาณสารกระตุ้นที่กรวยจมในสารกระตุ้นเท่ากับ 20 มิลลิเมตร

เมื่อผสมตะกอนดินประปา เถ้าลอย (Fly ash, FA) และสารกระตุ้น (0.75LL, 0.85LL, 0.95LL และ 1.0LL เมื่อ LL คือปริมาณสารกระตุ้นที่ขีดจำกัดเหลว) สารผสมดังกล่าวจะถูกผสมเข้ากับโพลีเมอร์มวลเบา 0, 3, 5, และ 7 ของน้ำหนักมวลรวม (ตะกอนดินประปาและเถ้าลอย) ตะกอนดินประปาเถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบาจะถูกเทลงในแบบทรงลูกบาศก์ ที่มีขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร และถูกนำมาระดมด้วยอุณหภูมิ 45, 65 และ 85°C ที่อายุการบ่มในตู้อบ 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง และนำมาบ่มต่อในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้องจนได้เวลาบ่มรวม 7 วัน เมื่อครบอายุบ่มที่กำหนด ด้วยอย่างจะนำมาทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C138 และ ASTM C69 – 09 ตามลำดับ

3. ผลการทดสอบ

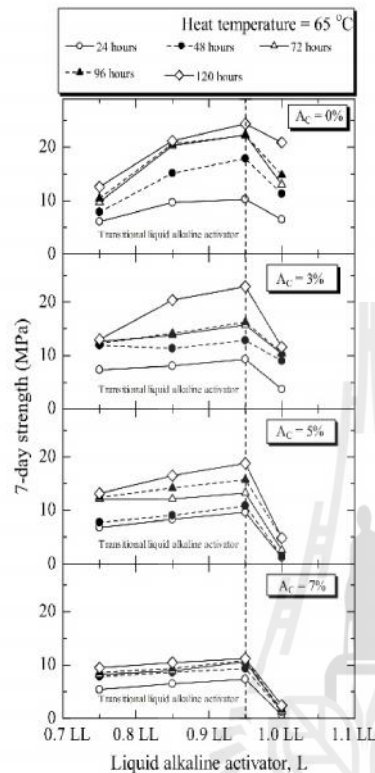
3.1 หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบา

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณสารกระตุ้นของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบา ที่อายุบ่ม 7 วัน ปริมาณโพลีเมอร์ (ร้อยละ 0, 3, 5 และ 7) และอุณหภูมิบ่มต่างๆ (45, 65 และ 85°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบาลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพลีเมอร์และปริมาณสารกระตุ้น อิทธิพลของสารกระตุ้นต่อหน่วยน้ำหนักแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม (กลุ่มที่ L น้อยกว่า 0.95LL และกลุ่มที่ L มากกว่า 0.95LL) สำหรับกลุ่มที่ L น้อยกว่า 0.95LL หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบาประมาณคงที่ แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของ L ก็ตาม สำหรับกลุ่มที่ L มากกว่า 0.95LL หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบาลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารกระตุ้นอย่างเห็นได้ชัด ค่า L ที่เท่ากับ 0.95LL เรียกว่า Transitional liquid alkaline activator ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบของ Suksiripattana et al. [5] ซึ่งค่า Transitional liquid alkaline activator มีค่าเท่ากับ 1.0LL ค่า Transitional liquid alkaline activator ที่น้อยกว่านี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยและการใช้สารกระตุ้นที่ไม่มีไฮเดรชันซิลิกเกต การใช้สารกระตุ้นที่ไม่มีไฮเดรชันซิลิกเกตนี้ส่งผลให้การไหลของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบาดีขึ้น เนื่องจากสารละลายไฮเดรชันซิลิกเกตมีความหนืดสูงซึ่งส่งผลกระทบต่อ การไหลแม่ [6]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณสารกระตุ้นของตะกอนดินประปา-เถ้าลอย ซีโอไฟลไมเออร์มวลเบา ที่ปริมาณฟองอากาศต่างๆ

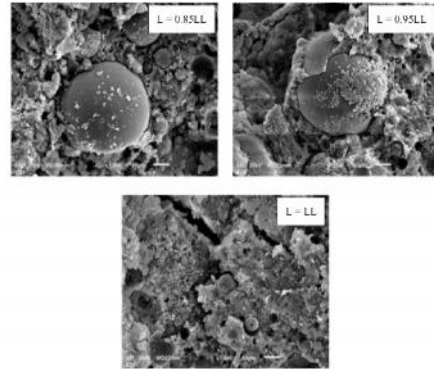
3.2 กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบา อิทธิพลของสารกระตุ้น (L) ต่อกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบาแสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของตัวอย่างตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์ ที่ L เท่ากับ 0.75LL, 0.85LL, 0.95LL และ 1.0LL ที่ปริมาณโพลีเมอร์ (ร้อยละ 0, 3, 5 และ 7) และอุณหภูมิบ่มเท่ากับ 45, 65 และ 85°C ในระยะเวลาต่างๆ (24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง) ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าทุกระยะเวลาบ่มในตู้อบ และปริมาณโพลีเมอร์ กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบาแปรผันตาม L กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบาเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ L และมีค่าสูงสุดเมื่อ L เท่ากับ 0.95LL ซึ่งเป็นค่า Transitional liquid alkaline activator หลังจากนั้น กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบามีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ L ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารกระตุ้นมีค่ามากเกินไปซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการยุบ [5] แม้ว่าการเพิ่ม L เกินกว่า Transitional L จะลดหน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยซีโอไฟลไมเออร์มวลเบา แต่การเพิ่ม L ในช่วงดังกล่าวส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัด เพื่อเป็นการลดต้นทุน (ลดปริมาณสารกระตุ้น) การเพิ่มฟองอากาศเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดที่ช่วยลดหน่วยน้ำหนักแต่ยังคงให้กำลังอัดที่สูง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณสารกระตุ้นของตะกอนดินประปา-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่ปริมาณฟองอากาศต่าง ๆ

3.3 การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 5 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่ L เท่ากับ 0.85LL, 0.95LL และ 1.0LL ที่อุณหภูมิ 65°C รูปถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารกระตุ้น (L) ที่น้อยเกินไป (อัตราส่วน L เท่ากับ 0.85LL) ไม่เพียงพอต่อการผสมตัวอย่างตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาให้เป็นเนื้อเดียวกัน (ตัวอย่างค่อนข้างแห้ง) ปริมาณ L ที่น้อยเกินไปนี้ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน สำหรับปริมาณสารกระตุ้นที่เกิน Transitional L (L เท่ากับ 0.95LL) เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง ปริมาณสารละลายในตัวอย่งเกิดการระเหยออกและเกิดช่องว่างระหว่างโครงสร้างของตะกอนดินประปากับเถ้าลอย และก่อให้เกิดการหดตัวของตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกกว้างระดับไมโครเมตร [7,8,9] ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบามีค่าลดลง (รูปที่ 3.5) ดังนั้น L เท่ากับ 0.95LL จึงให้กำลังอัดที่สูงที่สุด



รูปที่ 5 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา อุณหภูมิ 65 °C ที่ระยะเวลาบ่มในตู้อบ 1 วัน ปริมาณฟองอากาศเท่ากับ 0%

4. บทสรุป

หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาได้นำเสนอในบทนี้ อิทธิพลของตัวแปรหลัก (NaOH, หลังงานความร้อน และปริมาณฟอง) ต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดได้อธิบายโดยใช้ภาพถ่ายกำลังขยาย ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟองและปริมาณสารกระตุ้น อิทธิพลของสารกระตุ้นต่อหน่วยน้ำหนักแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม (กลุ่มที่ L น้อยกว่า 0.95LL และกลุ่มที่ L มากกว่า 0.95LL) สำหรับกลุ่มที่ L น้อยกว่า 0.95LL หน่วยน้ำหนักของดินตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาประมาณจะคงที่ แม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของ L ก็ตามค่า L ที่เท่ากับ 0.95LL เรียกว่า Transitional liquid alkaline activator สำหรับกลุ่มที่ L มากกว่า 0.95LL หน่วยน้ำหนักของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารกระตุ้นอย่างเห็นได้ชัด

2. สำหรับทุกระยะเวลาบ่มในตู้อบ และปริมาณฟอง กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาแปรผันตาม L กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบามีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ L และมีค่าสูงสุด เมื่ออัตราส่วน L เท่ากับ 0.95LL ซึ่งเป็นค่า Transitional L หลังจากนั้น กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบามีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ L

3. ปริมาณสารกระตุ้น (L) ที่น้อยเกินไป (อัตราส่วน L เท่ากับ 0.80LL และ 0.90LL) ไม่เพียงพอต่อการผสมตัวอย่างตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาให้เป็นเนื้อเดียวกัน (ตัวอย่างค่อนข้างแห้ง) ปริมาณ L ที่น้อยเกินไปนี้ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน สำหรับปริมาณสารกระตุ้นที่เกิน Transitional L (L เท่ากับ 0.95LL) เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง ปริมาณสารละลายในตัวอย่งเกิดการระเหยออกและเกิดช่องว่างระหว่างโครงสร้างของตะกอนดินประปากับเถ้าลอย และก่อให้เกิดการหดตัวของตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกกว้างระดับไมโครเมตร

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากการประปานครหลวงประจำปีงบประมาณ 2556 และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับเครื่องมือการทดสอบและสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] คมกริช เวชสัณต์, สุทธิรักษ์ บุชากุล, ปาริณต ปั่นทอง และสุรเดช เหมมพิกุล (2553). การออกแบบและก่อสร้างระบบกำจัดตะกอนโดยใช้อัตราการกรอง โรงงานผลิตน้ำบางเขน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, ประเทศไทย.
- [2] Horpibulsuk, S., Suddeepong, A., Chinkuljiniwat, A., and Liu, M.D. (2012). "Strength and compressibility of lightweight cemented clays." *Applied Clay Science* 69: 11-21.
- [3] Horpibulsuk, S., Rachan, R. Suddeepong, A., Liu, M.D. and Du, Y.J. (2013). "Compressibility of lightweight cemented clays." *Engineering Geology* 159: 59-66.
- [4] Horpibulsuk, S., Wijitchot, A., Neramitkomburee, A., Shen, S.L. (2013). "Factors influencing unit weight and strength of lightweight cemented clay." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* (Tentatively accepted for publication).
- [5] Suksiripattanapong C., Horpibulsuk S., and Arulrajah A. (2015). "Effect of liquid alkaline activator on unit weight and strength of lightweight water treatment sludge-fly ash geopolymer". *Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment*, Osaka, Japan, Nov. 16-18, 2015.
- [6] P. Chindaprasit, T. Chareerat and V. Sirivivatnanon, (2007), "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer". *Cement and Concrete Composites* 29:224-229.
- [7] P. Sukmak, S. Horpibulsuk and S.L. Shen, "Strength development in clay-fly ash geopolymer". *Construction and Building Materials*, 40, pp. 566-574, 2013a.
- [8] P. Sukmak, S. Horpibulsuk, S.L. Shen, P. Chindaprasit and C. Suksiripattanapong. "Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer". *Construction and Building Materials*, 47, pp. 1125-1136, 2013b.
- [9] Suksiripattanapong C., Horpibulsuk S., Chanprasert P., Sukmak P. & Arulrajah A. (2015). "Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge". *Construction and Building Materials* 82: 20-30.

ประวัติผู้เขียน

นายเสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2513 จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ช่างก่อสร้าง) จากวิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษาวิทยาเขตเทคนิคภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา จบการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ช่างโยธา) จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา และในปี พ.ศ.2533 เข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาตรี ในสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2535 หลังจากจบการศึกษาได้บรรจุเป็นข้าราชการในตำแหน่งอาจารย์ 1 ระดับ 3 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา ระหว่างปฏิบัติงาน ได้รับมอบหมายให้สอนวิชาปฐพีกลศาสตร์ ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้และความสามารถให้ตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในการปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2555 มีผลงานทางวิชาการ ดังปรากฏในรายละเอียดภาคผนวก ก