

การศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของตะกอนดินประปา - ใ้ลยจีโอโพลีเมอร์



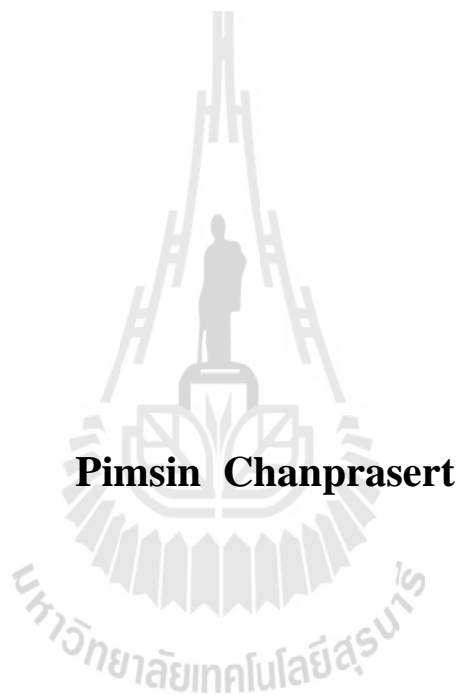
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**A STUDY ON COMPRESSIVE STENGTH BEHAVIOR
OF SLUGE-FLY ASH GEOPOLYMER**



**A Thesis Submitted in partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2013

การศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจิโอฟิลเมอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร. อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. พรพจน์ ต้นเส็ง)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปีจ่านงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พิมพ์ศิลป์ จันทร์ประเสริฐ : การศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้า
ลอยจิโอะโพลิเมอร์ (A STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTH BEHAVIOR OF
SLUDGE-FLY ASH GEOPOLYMER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์
หอพิบูลสุข, 65 หน้า.

ตะกอนดินเถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์นี้จัดเป็นวัสดุเขียว (Green material) ชนิดหนึ่ง ซึ่งไม่
จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ตะกอนดินเป็นดินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต
น้ำประปา เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สารละลายอัลคาไลน์ (Activator, L)
เป็นส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
(NaOH) งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของตะกอนดินเถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์ ปัจจัยที่มีอิทธิพล
ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คืออัตราส่วนการแทนที่ตะกอนดินประปาด้วยเถ้าลอย ปริมาณสารละลายอัล
คาไลน์ อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน และอายุบ่ม
จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เหมาะสมสำหรับตะกอนดินประปาเถ้าลอยจิ
โอะโพลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 80/20 สำหรับทุกอัตราส่วนของ L/FA กำลังอัดของตะกอนดินเถ้าลอยจิโ
โพลิเมอร์แปรผันกับอัตราส่วน L/FA กำลังอัดที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ และเงื่อนไขการบ่มค่า
หนึ่ง มีค่าสูงสุดที่ L/FA เท่ากับ 1.3 (ค่าเหมาะสม) ซึ่งให้ค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุด อุณหภูมิ และอายุ
บ่มตัวอย่างในตู้อบที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 75°C และ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ อุณหภูมิที่สูงกว่า (85°C)
จะทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณความชื้นในตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างเกิดรอยแตกร้าวระดับ
ไมโครเมตร และกำลังลดลง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PIMSIN CHANPRASERT : A STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTH
BEHAVIOR OF SLUDGE-FLY ASH GEOPOLYMER. THESIS ADVISOR :
PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., 65 PP.

COMPRESSIVE STRENGTH / SLUDGE / FLY ASH / GEOPOLYMER / LIQUID
ALKALINE ACTIVATOR

The sludge-fly ash geopolymer is classified as one of the green materials which needs not use cement as cementing material. Sludge and fly ash (FA) are both waste products from water treatment plants and Mae Moh power plants, respectively. A liquid alkaline activator, L is a mixture of sodium silicate solution (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide solution (NaOH). This research investigates the compressive strength behavior of sludge-fly ash geopolymer. The influential factors in this study are the fly ash replacement, liquid alkaline activator content, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio, heat temperature, heat duration and curing time. Test results show that the optimum $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio for the sludge-fly ash geopolymer is 80:20 for all L/FA ratios. The compressive strength of sludge-fly ash geopolymer varies with the L/FA ratio. The maximum compressive strength is at L/FA ratio of 1.3, which gives maximum unit weight value for all $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios and curing time conditions. The optimum heat temperature and duration for the optimum ingredient are 75°C and 72 hours, respectively. The higher heat temperature of 85°C causes the loss of moisture, which results in micro-cracks and strength reduction.

School of Civil Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer).....	3
2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์.....	6
2.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต.....	6
2.4 ใ้ลย.....	7
2.5 ตะกอนดินประปา.....	11
2.6 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน.....	15
2.7 โครงสร้างผลึก.....	15
2.8 X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF).....	18
2.9 Electron Microscope.....	18
2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย	26
3.1 บทนำ.....	26
3.2 การเก็บและเตรียมดินตัวอย่าง.....	28
3.3 ถ้ำลอย	29
3.4 การเตรียมตัวอย่าง	29
3.5 การบดอัดตัวอย่างดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์.....	29
3.6 การทดสอบกำลังอัด.....	30
3.7 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค.....	31
4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	32
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปา และ ถ้ำลอย.....	32
4.2 กำลังอัดของดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์.....	37
4.3 การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างจุลภาค.....	45
5 สรุปผลงานวิจัย	51
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	65

สารบัญ

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณสมบัติทางเคมีของ โซเดียมซัลไฟเกตเหลว.....6
2.2	คุณสมบัติทางเคมีของ โซเดียมซัลไฟเกตเหลวที่ใช้ในการศึกษา.....6
2.3	ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618.....8
2.4	องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533-2541.....9
2.5	ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์และแก้วลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง.....11
2.6	แสดงธาตุประกอบของตัวอย่างตะกอนดินประปา.....13
3.1	จำนวนตัวอย่างของตะกอนดินประปา-แก้วลอยจีโอโพลิเมอร์.....28
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนดินประปา และ แก้วลอย.....33

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	Polycondensation of Na-poly(sialate-disiloxo) albite framework.....5
2.2	Scanning Electron Microscope (SEM) ถัดลอยขยาย 1,000 เท่า..... 10
2.3	แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน (Makino et al.,1999)..... 15
2.4	รูปทรงสี่หน้าของ SiO ₄ (SiO ₄ tetrahedral) (Deer et al.,1971)..... 16
2.5	โครงสร้างผลึก β - ควอร์ซายลงบนระนาบ (0001)(Deer et al.,1971)..... 17
2.6	โครงสร้างผลึกของ α - ควอร์ซายลงบนระนาบ(0001) (Deer et al,1971)..... 17
3.1	แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 27
3.2	กราฟการบดอัด..... 30
3.3	เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)..... 31
4.1	การกระจายขนาดคละของตะกอนดินประปาและถั่วลอย..... 33
4.2	รูปถ่ายกำลังขยายของตะกอนดินประปา..... 34
4.3	รูปถ่ายกำลังขยายของถั่วลอย (FA)..... 34
4.4	ผลทดสอบขีดจำกัดเหลวของส่วนผสมตะกอนดินประปา-ถั่วลอย-สารกระตุ้น..... 35
4.5	กราฟการบดอัดของส่วนผสมระหว่างตะกอนดินประปา-ถั่วลอย-สารกระตุ้น..... 36
4.6	กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของดินตะกอนประปาถั่วลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.2, 1.3 และ 1.4..... 39
4.7	ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอน ประปา-ถั่วลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.2..... 40
4.8	ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอน ประปา-ถั่วลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3..... 41
4.9	ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอน ประปา-ถั่วลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.4..... 42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอน ประปาเก่าลอยจีโอโพลีเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80/20 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3.....	44
4.11 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เก่าลอย จีโอโพลีเมอร์ ที่ L/FA เท่ากับ 1.2, 1.3 และ 1.4 อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 อุณหภูมิบ่ม 75 °C ที่ระยะเวลาในตู้อบ 3 วัน.....	46
4.12 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เก่าลอยจีโอโพลีเมอร์ ที่ L/FA เท่ากับ 1.3 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 100:0, 90:10 80:20, 70:30 และ 50:50 อุณหภูมิบ่ม 75 °C ที่ระยะเวลาในตู้อบ 3 วัน.....	47
4.13 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดิน-เก่าลอยจีโอโพลีเมอร์ ที่ L/FA เท่ากับ 1.3 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 อุณหภูมิบ่ม 65 °C 75 °C และ 85 °C ที่ระยะเวลาในตู้อบ 3 วันและที่ อุณหภูมิห้อง.....	49
4.14 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดิน-เก่าลอยจีโอโพลีเมอร์ ที่ L/FA เท่ากับ 1.3 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 อุณหภูมิบ่ม 75 °C ที่ระยะเวลาในตู้อบ 1, 2, 4 และ 5 วัน.....	50



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing Material
Silt	=	ตะกอนดินประปา
FA	=	Fly Ash
NaOH	=	sodium hydroxide
Na ₂ SiO ₃	=	Sodium silicate
L	=	Liquid alkaline activator
XRF	=	X-Ray fluorescence
LOI	=	Loss on Ignition
SEM	=	Scanning Electron Microscope
°C	=	องศาเซลเซียส
L/FA	=	liquid alkaline
Silt/FA	=	Silt/Fly ash
M	=	molar

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา

การผลิตน้ำประปาจะใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งเจือปนโคลนดินตะกอน กระบวนการผลิตน้ำประปามีวิธีการทำให้ตะกอนจับตัวกันและตกลงสู่ก้นบ่อ (Clarifiers) แล้วจึงระบายตะกอนเหลวออกไปยังลานตากตะกอน (Sludge Lagoons) เพื่อรอการกำจัดต่อไป การตากตะกอนที่ลานตากตะกอนนั้นจะอาศัยสภาพแวดล้อมจากธรรมชาติ เช่น กระแสลม แสงแดด และ อุณหภูมิ เป็นปัจจัยช่วยในน้ำระเหยออกจากเนื้อดินตะกอน และใช้รถเครื่องจักรกลพลิกและกลับหน้าดินตะกอนเพื่อเร่งการระเหยของน้ำในมวลดินที่อยู่ชั้นล่าง เมื่อดินตะกอนมีสภาพที่แห้งแล้วจะมีลักษณะที่ร่วนซุยสะดวกต่อการขนย้ายออกจากพื้นที่โรงงานไปใช้ประโยชน์ในการถมที่ดินในรัศมีโดยรอบโรงงานผลิตน้ำบางช่วงมีมากถึงวันละ 300 ตันในฤดูแล้ง และ 700 ตันในฤดูฝน เนื่องจากระยะเวลาการผลิตน้ำประปายังคงมีอย่างสม่ำเสมอ ต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ปริมาณดินตะกอนประปาจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระบวนการผลิต ปัจจุบันลานตากตะกอนด้วยวิธีธรรมชาติของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีพื้นที่จำกัดสามารถรองรับ และตากตะกอนเพื่อรอการลำเลียงขนย้ายได้ประมาณ 2 เดือน ทำให้โรงงานผลิตน้ำบางเขนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องตระหนักถึงปัญหาปริมาณของตะกอนและแนวทางการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นในอนาคต

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาผลิตวัสดุก่อสร้าง (Construction material) ชนิดจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) โดยการผสมดินตะกอนกับสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) และเถ้าถ่านหิน (เถ้าลอย) และให้ความร้อนในปริมาณที่เหมาะสม วัสดุจีโอโพลิเมอร์นี้จัดเป็นวัสดุเขียว (Green material) ชนิดหนึ่ง ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก่อให้เกิด Greenhouse effect) งานวิจัยนี้จะศึกษาการพัฒนากำลังอัดของตะกอนดินเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ โดยแปรผันตัวแปรควบคุม ซึ่งได้แก่ อัตราส่วน การแทนที่ตะกอนดินประปาด้วยเถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน และอายุบ่ม ผลการศึกษาทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่อกำลังอัด และนำเสนอ

ส่วนผสมที่ให้กำลังอัดในช่วง 3 ถึง 8 เมกะปาสคาล งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการประสานครหลวงและการประสานภูมิภาค ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการบริหารจัดการตะกอนดินประปาเหลือทิ้งที่มีประสิทธิภาพในเชิงวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และ สิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ

1.2.1 เพื่อหาอัตราส่วนผสม (ระหว่างดินตะกอนประปา เถ้าลอย และสารกระตุ้น) และพลังงานความร้อน (อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่ม) ที่เหมาะสม

1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ดินตะกอนที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำบางเขน(ใช้ดินตะกอนช่วงหน้าแล้งของการผลิตน้ำประปา)

1.3.2 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

1.3.3 สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในอัตราส่วนผสม 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 50:50

1.3.4 อัตราส่วนระหว่างดินตะกอนและเถ้าลอย มีค่าเท่ากับ 70:30

1.3.5 อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 65, 75 และ 85°C ในระยะเวลา 24 48 72 96 และ 120 ชั่วโมง

1.3.6 อายุการทดสอบตัวอย่าง 7 14 28 60 และ 90 วัน

1.3.7 ตัวอย่างตะกอนดินประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5.00 เซนติเมตร สูง 10.00 เซนติเมตร

1.3.8 ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C69 – 09 และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์โดยใช้เครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (Na_2SiO_3 , NaOH เถ้าลอย อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนและอายุบ่ม) ต่อการพัฒนา กำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการศึกษาและพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมาและเกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้

2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

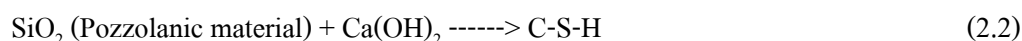
จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต หลังจากนั้นต่อมาไม่นานในปี ค.ศ. 1970 นิยามของจีโอโพลิเมอร์ ถูกกำหนดขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้

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

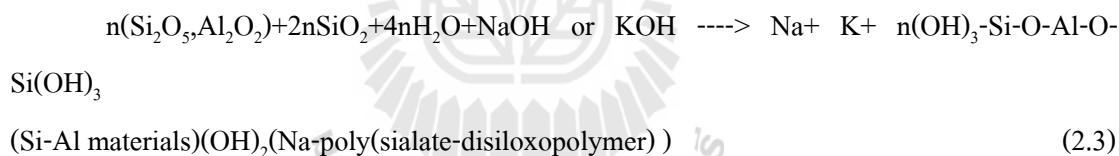
2.1.1 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมโรเซชันของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Portland cement Hydration VS Geopolymerization)

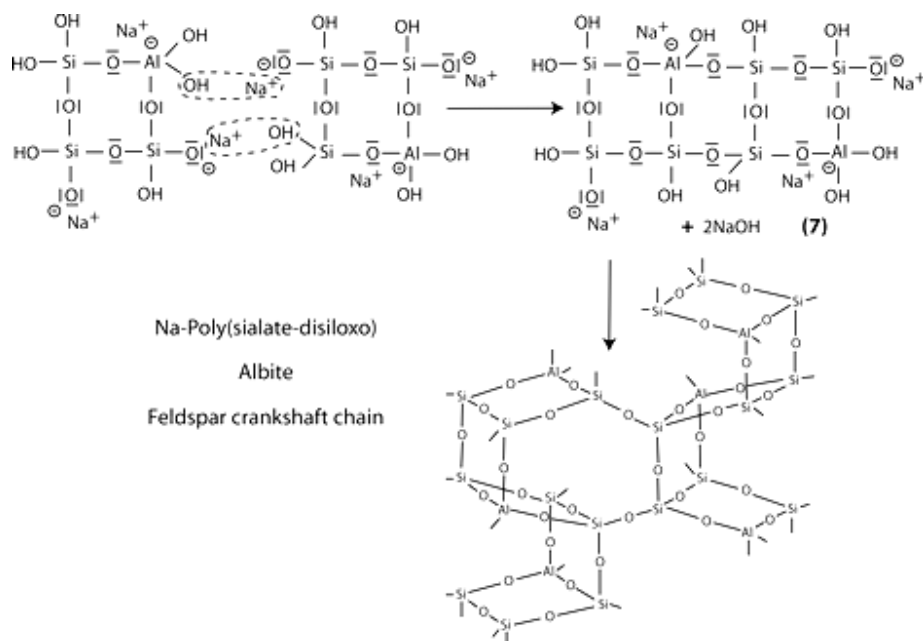
ลักษณะโครงสร้างของ Hydration ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ Geopolymer นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงกล่าวคือ โครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Portland Cement Hydration) ดังสมการที่ 2.1 ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีตซีเมนต์เพสหรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้วโดยเมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่สองเกิดขึ้น

ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ดังสมการที่ 2.2 ซึ่งจากปฏิกิริยานี้เองจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสานเกิดมากขึ้น (CSH) จึงส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสมีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น



จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของซิลิกา (Si) อะลูมิเนียม (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer Chain เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วยดังสมการที่ 2.3





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

จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเต้าถ่านหินมีส่วนประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักหากนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลจะสามารถทำให้เกิดสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เหมือนคอนกรีตสารจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินารวมตัวกันและเมื่อรวมกับสารประกอบอื่นที่เชื่อมต่อกันปฏิกิริยาที่จะก่อตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(C-S-H) ในกระบวนการและการแข็งตัวของซีเมนต์เฟสตกติสารจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอโพลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมากดังกรณีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์จึงทำให้ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายมากกว่า

2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นด่างที่ผลิตจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลายของเกลือคลอไรด์ที่มีคุณสมบัติในการละลายไขมันจึงมักใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการล้างไขมัน เช่น อุตสาหกรรมทาสี อุตสาหกรรมกระดาษตามบ้าน มีใช้ในรูปของยาล้างท่อหรืออ่างน้ำที่อุดตัน โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อนไม่ติดไฟ อาจทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดความร้อนแต่ไม่รุนแรงนัก โซเดียมไฮดรอกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

2.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) เป็นสารละลายของโซเดียมซิลิเกตในน้ำ จัดเป็นด่าง ลักษณะทั่วไปไม่มีสีหรือมีสีเทาอ่อน โซเดียมซิลิเกตเหลวสำหรับอุตสาหกรรมแบ่งตามอัตราส่วนโดยโมลของ ไดโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิคอนไดออกไซด์ ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$) จากน้อยไปหามาก

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว

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

โดยชนิดที่เลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือชนิดที่ 2 ตาม ม.อ.ก. 433-2539 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลวที่ใช้ในการศึกษา

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

2.4 เถ้าลอย

เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (fly ash หรือ pulverized fuel ash) ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้า ถ่านหินเถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล มีสีเทา เทาดำ หรือน้ำตาล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (pozzolan) สังกะหรณ์ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและ อลูมินาเมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่นไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำ ภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร Ca(OH)_2 และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (cementitious substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาของการเผาดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผ่าถ่าน

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

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตามมาตรฐาน ASTM C-618 แยกเถ้าลอยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อลูมินาและเหล็กในเถ้าลอยโดยที่ Class F และ Class C ต้องมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อย 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) กำหนดไม่ให้เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดระยะเวลาก่อนตัวได้และยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย

นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟตไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจาก การเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอยหากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน air entrainment ของคอนกรีตสดจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยมีปริมาณ CaO สูง จะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ alkali-aggregate ขึ้นได้ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์มากกว่า ร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยา จะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัว จนเกิดความเสียหายได้

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดทางด้านเคมีตามมาตรฐาน ASTM C-618 ความชื้นของเถ้าลอย

Chemical Composition	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์อลูมินาออกไซด์ 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
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition (LOI)), max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของเถ้าลอยลิกไนต์แม่มาะ พ.ศ. 2433 - 2541 คุณสมบัตินี้โดยทั่วไปมีปริมาณ ออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ปริมาณ CaO จะสูงกว่าร้อยละ 10 ปริมาณ LOI ต่ำมาก คือน้อยกว่าร้อยละ 1 นอกจากนี้ข้อที่น่าสังเกตคือ ปริมาณ

Fe_2O_3 จะสูงกว่าถ้ำลอยแหล่งอื่นที่มีอยู่ใน ประเทศไทย ส่วนมากจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ.2533 – 2541

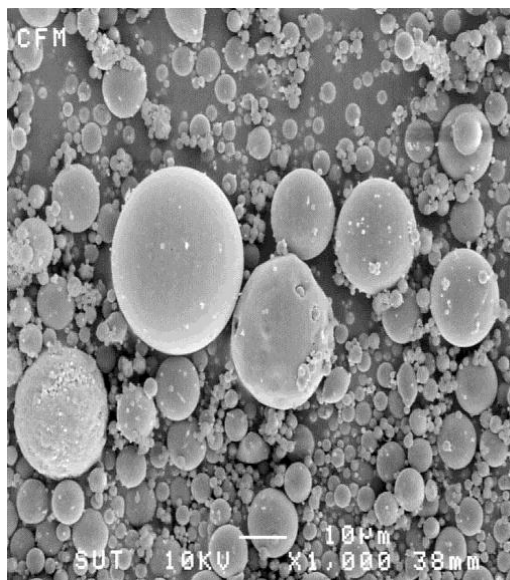
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ.2533 - 2541

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	0.9	2.1	3.9	0.8
2534	42.8	23.3	14.0	10.5	2.4	0.8	2.3	3.9	0.7
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	1.0	2.6	3.1	0.5
2536	43.1	20.0	13.2	13.0	2.7	1.3	2.4	2.6	0.6
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	1.4	0.9	2.0	2.8	0.3
2.5	40.6	22.8	12.8	14.4	2.5	0.7	2.0	2.8	0.9
2539	40.6	23.6	13.0	13.0	2.5	1.2	3.0	2.4	0.7
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	0.6	3.3	2.0	0.8
2541	37.3	22.1	14.4	11.4	2.7	1.1	2.7	2.5	0.1

2.4.1 รูปร่างของถ้ำลอย

อนุภาคถ้ำลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมบางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน มีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ้ำ หินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของถ้ำลอยจากถ้ำหินลิกไนต์อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม

ดังรูปที่ 2.2 เมื่อถ้ำลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบ และทำให้คอนกรีตขึ้นไหล่ง่ายต่อการเท คอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้



รูปที่ 2.2 Scanning Electron Microscope (SEM) เถ้าลอย (ขยาย1,000 เท่า)

2.4.2 ความละเอียด (Fineness)

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมโครเมตร) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาค หยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำ ปฏิกิริยา ได้มีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีของเบลน (Blaine specific surface - area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี particle size-analysis หรือวิธี Brunauer – Emmett -Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม การทดสอบเทอร์บิดิมิเตอร์ (turbid meter test) ตาม ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์โดยการทดสอบทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบโดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความพรุนของเถ้า ลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมากแต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง การบอกขนาดของ อนุภาคโดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้างบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าส่งผล ให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมร่วมกับซีเมนต์

ตารางที่ 2.5 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และ
 เถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

Sample Type	Specific Gravity	Retained on Sieve 325 (%)	Air Permeability (cm ² /g)	Mean Particle Size (micron)
ซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.02	37.4	2370	28.5

2.4.3 การหาดัชนีกำลัง (Strength Activity Index)

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลานโดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของ มอร์ต้ามาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน เพื่อแสดงถึงอัตราการเกิดหรือความไวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอย

2.5 ตะกอนดินประปา

ตะกอนดินประปาได้มาจากการผลิตน้ำประปา ซึ่งตะกอนดินจะถูกทำให้ตกตะกอนในขั้นตอนการผลิตน้ำประปา ตะกอนดินที่ได้จะมีสี เทาดำ โดยจากการผลิตน้ำประปานั้นมีตะกอนดินที่ต้องการกำจัดทิ้ง ปริมาณ 350 ตัน/วัน โดยเฉลี่ย ซึ่งขั้นตอนการผลิตน้ำประปา และขั้นตอนการกำจัดตะกอนของการประปา สามารถบอกได้ดังนี้

2.5.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

1. Raw Material น้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำ ของการประปานครหลวงมาจากแม่น้ำเจ้าพระยา ที่สถานีสูบน้ำ สำแลจังหวัดปทุมธานี ห่างจากโรงผลิตน้ำ บางเขนประมาณ 18 กิโลเมตร ไปทางทิศเหนือประกอบด้วยอาคารปั๊ม 3 หลัง กำลังสูบสูงสุด 4.3 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันสู่คลองประปา น้ำดิบที่สูบจากคลองประปาจะถูกปั๊มโดยสถานีสูบน้ำ บางเขนเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำ ประปาบางเขน

2. Clarification ขณะที่น้ำดิบถูกส่งผ่านคลองส่งสู่ส่วน Clarification จะมีการใส่ปูนขาวปริมาณระหว่าง 5-15 ppm. เพื่อช่วยในการตกตะกอน จากนั้นน้ำจะถูกปล่อยสู่ถังรูปกรวยแบบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 58 เมตร ซึ่งออกแบบมาเพื่อการตกตะกอนในอัตรา 70 มิลลิเมตรต่อนาที และ 200,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ถึงเหล่านี้จะแบ่งเป็น 2 เขต คือ เขตถังทำปฏิกิริยา กับถัง

ตกตะกอน เขตดังกล่าว ปฏิกรีธาจะอยู่ตรงกลาง มีการเติมสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) และสารส้ม เขตที่เหลือเป็นถังตะกอน

3. Filtration น้ำที่ได้จากกระบวนการ Clarification จะถูกนำ มาผ่านเครื่องกรองแบบ Rapid Sand Anthracite ซึ่งออกแบบสำหรับกรองน้ำเริ่มต้น 75,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน อย่างไรก็ตามสามารถที่จะกรองได้สูงสุดถึง 120,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ผ่านชั้นถ่าน Anthracite หนา 80 เซนติเมตร และชั้นทรายคัลขนาด 40 เซนติเมตร

4. Water Storage น้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกเก็บไว้ในถังเก็บน้ำที่เรียกว่า Reservoir ปูนขาว และคลอรีนที่เหลืออยู่จะถูกควบคุมให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำ ดื่มของการประปานครหลวง

5. Transmission and Distribution โรงงานผลิตน้ำประปาวางเขนเป็นโรงผลิตน้ำ และจ่ายน้ำหลักของการประปานครหลวงโดยการจ่ายน้ำ และกระจายไปตามสถานีปั้มน้ำต่างๆ ซึ่งเชื่อมต่อกับ Reservoir พื้นที่การใช้งานจะแบ่งเป็น 2 ระดับคือ ชั้น Basement และชั้น Over ground ชั้น Basement อยู่ลึกกลงไปในใต้ดิน 3 เมตร ประกอบด้วยปั้ม 5 ตัว ปั้ม ส่วนชั้น Over ground อยู่สูงจากชั้น ไป 9 เมตร มีการติดตั้งส่วนควบคุมปั้มอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องมือปั้ม

6. Sludge Lagoon Sludge เป็นส่วนของน้ำตะกอนดินที่ตกตะกอนจากกระบวนการ Clarification และน้ำที่ใช้ล้าง Filter ซึ่งจะถูกปั้มสู่ Sludge Lagoon จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการตากตะกอน เพื่อให้ตะกอนแห้ง พอที่จะขนย้ายต่อไป โดยน้ำมีปริมาณประมาณ 30,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน จะถูกนำไป Recycle

ตารางที่ 2.6 แสดงธาตุประกอบของตัวอย่างตะกอนดินประปา

ธาตุองค์ประกอบ	องค์ประกอบร้อยละ					ค่าเฉลี่ย
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	ตัวอย่างที่ 4	ตัวอย่างที่ 5	
Si	25.10	26.41	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	5.6	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
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

2.5.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงานกำจัดตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน

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

2. ใช้น้ำตะกอนความเข้มข้นประมาณ 3-10% (W/W) ส่งผ่านท่อระบายตะกอนเข้าสู่บ่อกักตะกอน ทาง Inlet Valve

3. ใช้น้ำตะกอนในบ่อกักตะกอนเกิดการตกตะกอนโดยธรรมชาติน้ำใสความขุ่นไม่เกิน 50 NTU จะลอยตัวอยู่บนผิวน้ำไหลออกทาง Outlet Valve ลงคลองระบายน้ำวนกลับ (Recycle) ส่วนตะกอนเหลวความเข้มข้น ประมาณ 10-15% (W/W) จะตกลงสู่ชั้นล่าง สะสมจนถึงระดับเต็มบ่อความลึกประมาณ 3.5 เมตร ก็จะปิดบ่อเปลี่ยนไปใช้บ่ออื่น (บ่อเต็มใช้เวลาประมาณ 1-2 เดือน)

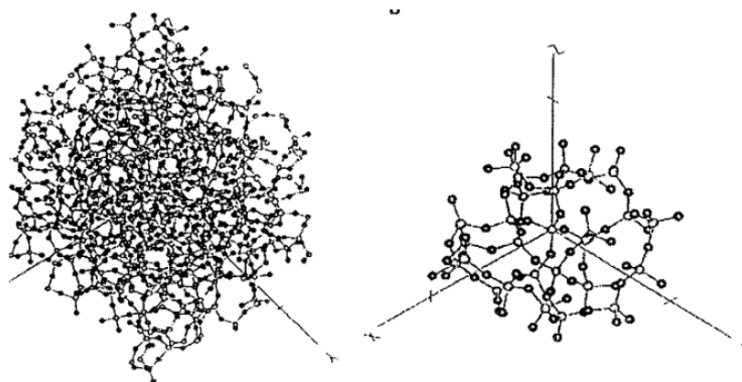
4. ใช้เรือสูบน้ำตะกอนเหลวที่มีความเข้มข้นประมาณ 10-15% (W/W) ออกจากบ่อกักตะกอน ไปยังบ่อดักตะกอน (Polder)

5. รวบรวมตะกอนเหลวจากบ่อกักตะกอน มารวมกันในบ่อดักตะกอน

6. แยกน้ำ ออกจากตะกอนเหลวในบ่อตากตะกอน โดยระบายน้ำใสความขุ่นไม่เกิน 50 NTU ออกจากบ่อตากตะกอนและปล่อยให้ตกตะกอนโดยธรรมชาติหรือใช้เครื่องจักรกลช่วยให้ตกตะกอน
7. ขนย้ายดินตะกอนเหลวความเข้มข้น 25-40% (W/W) จากบ่อตกตะกอน ไปยังลานตกตะกอน โดยใช้รถ Back Hoe ตักใส่รถบรรทุกหรือใช้สกรูบีบสูบผ่านท่อ
8. ตากและพลิกกลับตะกอนเหลวในลานตกตะกอน จนได้ความเข้มข้นตะกอนตั้งแต่ 45% (W/W) ขึ้นไปโดยใช้ระยะเวลาในการตากประมาณ 1.5-2 เดือน (ขึ้นอยู่กับธรรมชาติ)
9. ใช้รถ Back Hoe ตักดินตะกอนความเข้มข้นตั้งแต่ 45% (W/W) ขึ้นไปใส่รถบรรทุกขนย้ายออกจากโรงงานผลิตน้ำบางเขนต่อไป
10. รับน้ำตะกอนล้างบ่อกรองจากบ่อกรองน้ำ (filter) ซึ่งมีความเข้มข้น 0.1%(W/W) เข้าสู่ท่อระบายน้ำ ล้างบ่อกรอง (Filter Drain)
11. ส่งน้ำตะกอนล้างบ่อกรอง ซึ่งมีความเข้มข้น 0.1% (W/W) ทางท่อระบายน้ำล้างบ่อกรอง (Filter Drain) เข้าสู่บ่อกักตะกอน ทาง Inlet Valve
12. น้ำตะกอนในบ่อกักตะกอนเกิดการตกตะกอนโดยธรรมชาติ น้ำใสความขุ่นไม่เกิน 50NTU จะลอยตัวอยู่บนน้ำไหลออกจาก Outlet Valve ลงคลองระบายน้ำนำกลับ (Recycle) ส่วนตะกอนเหลวความเข้มข้น ประมาณ 10-15% (W/W) จะตกลงสู่ชั้นล่าง สะสมจนถึงระดับเต็มบ่อ ก็จะปิดบ่อเปลี่ยนไปใช้บ่ออื่น (บ่อเต็มใช้เวลาประมาณ 6-8 เดือน)
13. ใช้เรือสูบตะกอนเหลวที่มีความเข้มข้นประมาณ 10-15% (W/W) ออกจากบ่อกักตะกอนไปยังบ่อตากตะกอน (Polder)
14. น้ำ ใสที่ไหลออกจาก Outlet Valve ของบ่อกักตะกอน ควบคุมความขุ่นไม่เกิน 50 NTU จะไหลมารวมกันที่คลองระบายน้ำนำกลับ (Recycle)
15. น้ำ ใสจากคลองระบายน้ำนำกลับ (Recycle) จะไหลโดย Gravity Flow เข้าสู่คลองน้ำ ดิบเพื่อนำ ไปผลิตเป็นน้ำประปาต่อไปในช่วง นี้ก่อนที่จะเข้าสู่คลองน้ำดิบ จะมีการตรวจวัดความขุ่นของน้ำโดยมีการกำหนดไว้ว่าจะต้องมีความขุ่นไม่เกิน 50 NTU

2.6 โครงสร้างผลึกอสัณฐาน

โครงสร้างผลึกซิลิกาอสัณฐานจะมีการเรียงตัวกันของอะตอมหรืออนุภาคยังไม่เป็นระเบียบดังแสดงใน ภาพที่ 3.3 และเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ซิลิกาอสัณฐานจะเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่อย่างเป็น ระเบียบและเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกซิลิกาซึ่งผลึกซิลิกา ดังกล่าวมีโครงสร้างผลึกต่างๆ คือ ควออร์ซ ไทรคิเมท์และ คริสโทรบอลไลท์โดยที่แต่ละ โครงสร้างจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



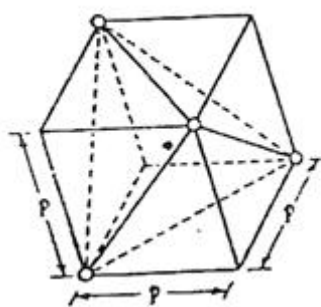
รูปที่ 2.3 แบบจำลองโครงสร้างของซิลิกาอสัณฐาน (Makino et al.,1999)

- (ก) แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดใหญ่ของซิลิกาอสัณฐาน ($\text{Si}_{400}\text{O}_{800}$ cluster)
 (ข) แบบจำลองกลุ่มอะตอมขนาดเล็กของซิลิกาอสัณฐาน ($\text{Si}_{27}\text{O}_{72}$ cluster) (o คือ อะตอมของ ออกซิเจน, o คืออะตอมของซิลิกอน)

2.7 โครงสร้างผลึก

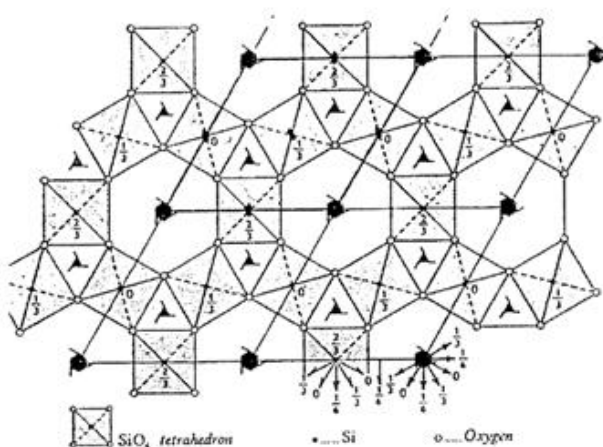
โครงสร้างผลึกซิลิกามีอยู่ 3 โครงสร้าง คือ ควออร์ซ ไทรคิเมท์ และ คริสโทรบอลไลท์ โดยแต่ละโครงสร้างผลึกจะเสถียรในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจะเป็นไปอย่างช้าๆ จากโครงสร้างผลึกรูปหนึ่งไปยังอีกรูปหนึ่ง ดังนั้น โครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิสูงจะยังคงมีอยู่ ณ ที่อุณหภูมิห้องหรือต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างและแต่ละโครงสร้างผลึกจะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 2 โครงสร้าง คือ α - จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและ β -จะเกิดที่อุณหภูมิสูง(Deer et al.,1971)

โครงสร้างผลึกซิลิกาแต่ละโครงสร้างประกอบด้วยโมเลกุล SiO_4 ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนเกาะอยู่ที่มุมและอะตอมของซิลิกอนอยู่ตรงกลางประกอบกันอยู่เป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้าของ SiO_4 (SiO_4 tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในแต่ละโครงสร้างผลึกซิลิกา อะตอมออกซิเจนจะเกาะกะบะอะตอมซิลิกอน 2 อะตอม ที่อยู่ใกล้เคียงในการเปลี่ยนโครงสร้างระหว่าง α - กับ β - เช่น α -ควออร์ซ ไปเป็น β -ควออร์ซ การเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของอะตอมเพียงเล็กน้อยในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกระหว่างโครงสร้างที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกับที่อุณหภูมิสูง เช่น โครงสร้างผลึกแบบควออร์ซเปลี่ยนไปเป็น ไทรดิเมอร์หรือคริสโทบอไลต์ การเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดเนื่องจากการสลายของพันธะและการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอ (Deer et al., 1971)



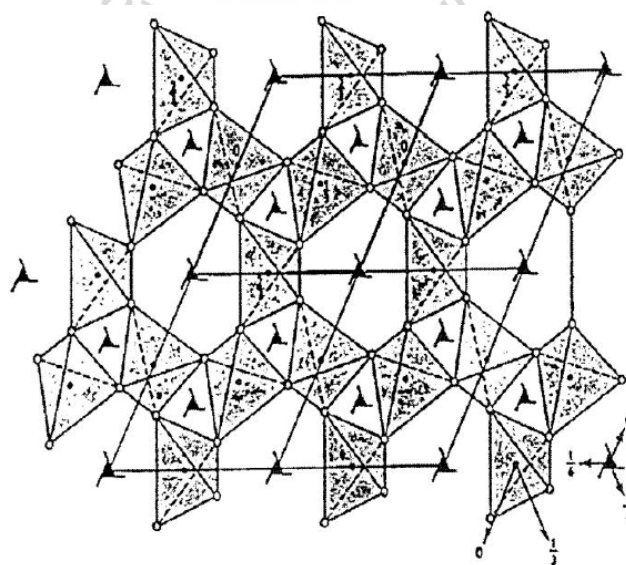
รูปที่ 2.4 รูปทรงสี่หน้าของ SiO_4 (SiO_4 tetrahedral) (Deer et al., 1971)

β -ควออร์ซ มีความสมมาตรแบบเฮกซะกอนอล (hexagonal symmetry) มีกลุ่มปริภูมิ P6222 หรือ P6466 และหน่วยเซลล์ (unit cell) หนึ่งหน่วยประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2)₃ โมเลกุลซึ่งประกอบกันเป็นหน่วยรูปทรงสี่หน้าดังแสดงในภาพที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึก β -ควอartz ภายลงบนระนาบ (0001) (Deer et al., 1971)

จะเห็นได้ว่าหน่วยรูปทรงสี่หน้าเกาะกลุ่มเป็นวงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ค่าความยาวของแต่ละด้านของหน่วยเซลล์ คือ a 5.01 Å และ c 5.47 Å α -ควอartz มีสมมาตรแบบไตรกอนอล (trigonal symmetry) มีกลุ่มปริภูมิ P3121 หรือ P3221 ในหน่วยเซลล์หนึ่งเซลล์ประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) โมเลกุล โครงสร้างผลึกของ α -ควอartz มีลักษณะคล้ายๆ β - คือมีการเกาะตัวกันของรูปทรงสี่หน้าของ SiO_4 เป็นวงหกเหลี่ยมและสามเหลี่ยม แต่จะมีการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึกดังแสดงในภาพที่ 2.6 ค่าความยาวของแต่ละด้านของหน่วยเซลล์คือ a 4.913 Å และ c 5.405 Å (Deer et al., 1971)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของ α -ควอartz ภายลงบนระนาบ(0001) (Deer et al,1971)

2.8 X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

X-ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy เป็น เทคนิคที่นิยมใช้แพร่หลายในการวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ไม่ว่าจะเป็นงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การวิเคราะห์ธาตุที่มีความเป็นพิษที่อยู่ในอากาศ ด้านธรณีวิทยา เช่น การวิเคราะห์แร่ ดิน หิน โดยไม่ทำลายตัวอย่าง มีการเตรียมตัวอย่างเพียงเล็กน้อย และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ด้านชีววิทยา/ด้าน การแพทย์ เช่น การวิเคราะห์สารที่อยู่ในเส้นผมและเล็บ ด้านอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการควบคุมกระบวนการและควบคุมคุณภาพ การตรวจวัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นพิษในน้ำมันดิบ และอื่นๆ อีกมากมาย โดยทั่วไปแล้วเครื่อง X-ray Spectrometerจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี (X-ray Tube) และเครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นเมื่อ X-ray Tube เร่ง อิเล็กตรอนให้มีศักย์สูงพุ่งเข้าชนกับเป้าโลหะแล้วให้รังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มสูงออกมา ทั้งนี้การเลือกชนิดของเป้าขึ้นกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งโดยทั่วไปจะ ใช้ทั้งสแตน โรเดียม โมลิบดีนัม หรือโครม ส่วนไอโซโทปกำเนิดรังสีที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55, Co-57, Cd-109 และ Am-241 เครื่องตรวจวัดแบบสถานะของแข็ง (Solid-State) เหมาะสำหรับการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น Si(Li) และ HPGe ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว

2.9 Electron Microscope

คือกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนแทนแสงในการสร้างภาพขยายของวัตถุ มีกำลังขยายมากกว่ากล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงมาก จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายภาพที่ต้องการรายละเอียดและกำลังขยายสูง ในช่วงปีทศวรรษที่ 1870 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ Ernst Abbe ได้ทำนายและพิสูจน์ว่าจะไม่มีกล้องจุลทรรศน์ที่จะให้รายละเอียดที่เล็กกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสงได้ (หรือประมาณ 250 นาโนเมตร) และไม่มีวัสดุใดที่ดีพอที่จะใช้ทำเลนส์สำหรับกล้องที่มีกำลังขยายสูงขนาดนั้น ที่ E. Abbe กล่าวเช่นนั้นเพราะในยุคก่อนกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการถ่ายภาพขยายของวัตถุทำงานโดยใช้แสงสว่างในช่วงที่ตาเห็นและใช้วัสดุโปร่งใสในการทำเลนส์ซึ่งทั้งตัวคลื่นแสงและเลนส์ล้วนมีข้อจำกัดเป็นไปตามที่เขากล่าว แต่ E. Abbe นั้นไม่รู้ว่าในภายหลังจะมีคนค้นพบมีคลื่นบางอย่างที่มีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าความยาวคลื่นแสงและนำมาใช้ประโยชน์ในทางกล้องจุลทรรศน์และมีการประดิษฐ์เลนส์สำหรับคลื่นนี้ออกมา คลื่นนั้นไม่ใช่คลื่นแสงแต่คืออิเล็กตรอน

2.9.1 Scanning Electron Microscope

Scanning Electron Microscope เรียกโดยย่อว่า SEM หรือในภาษาไทยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้อิเล็กตรอนในการสร้างภาพขยายเช่นเดียวกับTEM แต่มีความแตกต่างในรายละเอียดของกระบวนการในการสร้างภาพอย่างมาก SEMเครื่องแรกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 1960 จากนั้นSEMก็ค่อยๆกลายเป็นเครื่องมือที่นำไปประยุกต์ใช้แพร่หลายทั่วไป ทั้งในด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี การแพทย์ อุตสาหกรรม นิติวิทยาศาสตร์ โบราณคดี และอื่นๆอีกหลายด้าน

2.9.2 หลักการทำงานของScanning Electron microscope

SEM มีหลักการสร้างภาพต่างจาก LM และ TEM เป็นอย่างมาก ซึ่งพอจะอธิบายได้ดังนี้ อิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้Electron Gun จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสให้เข้มข้นและเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงโดย Condenser Lens จากนั้นจะถูกโฟกัสให้ตกลงบนผิวตัวอย่าง โดย Objective Lens ซึ่ง ณ ตอนนี้ อิเล็กตรอนที่ตกลงบนผิวตัวอย่างจะเป็นเพียงจุดที่เล็กมาก Scan Coil จะควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนให้กวาดจากซ้ายไปขวา เมื่อสุดก็เลื่อนลงอีกชั้นและกวาดจากซ้ายไปขวาอีกครั้ง เป็นเช่นนี้จนครบFrame การกวาดลำอิเล็กตรอนเช่นนี้เรียกว่า raster scan และเมื่อครบframeแล้วก็จะไปเริ่มแสกนที่จุดแรกใหม่ ในการกวาดลำอิเล็กตรอนในแต่ละframeจะถูกกำหนดจำนวนจุดและแถวไว้อย่างแน่นอน โดยในภาพตัวอย่าง 1 เฟรม ตามเส้นตามแนวนอนจะประกอบด้วยจุด 1000 จุด และมีทั้งหมด 1000 เส้น ที่ผิวตัวอย่างที่อิเล็กตรอนตกใส่ จะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนขึ้นหลายรูปแบบซึ่งคล้ายกับการที่แสงตกกระทบวัตถุและสะท้อนออกจากผิววัตถุ ในที่นี้ถ้ากล่าวอย่างง่าย ๆ ว่าถ้าผิวตัวอย่างเรียบก็จะให้สัญญาณสะท้อนอิเล็กตรอนได้ดี แต่ถ้าผิวตัวอย่างเป็นหลุมลึกก็จะไม่ให้สัญญาณหรือให้ได้น้อย ซึ่งเราสามารถรับสัญญาณได้โดยใช้Detector ที่เหมาะสมกับชนิดของสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะนำมาขยายให้มีความแรงที่เหมาะสมแล้วนำมาสร้างเป็นภาพ ถ้าเราใช้จอหลอดรังสีแคโทด(Cathod ray tube, CRT) เพื่อแสดงภาพ ในหลอดรังสีแคโทดจะมีการสร้างลำอิเล็กตรอนและถูกบีบให้เป็นลำเล็กๆ แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าในกล้อง SEMมาก กล่าวคือในSEM ลำอิเล็กตรอนมีขนาดศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร คืออาจทำได้ถึง 5 นาโนเมตรหรือต่ำกว่า แต่ในจอ CRT มีขนาดศูนย์กลางประมาณ 0.1 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของลำอิเล็กตรอนของSEMต่อCRTจะพบว่าห่างกันถึง 20000 เท่า ทำให้เกิดเป็นอัตราส่วนของกำลังขยายที่จะให้ภาพที่มีรายละเอียดได้ดี ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป การแสกนในCRT จะถูกควบคุมให้มีการสแกนแบบRaster scan พร้อม ๆ กับการแสกนของลำอิเล็กตรอนในกล้อง ขณะเดียวกันความสว่างของจุดอิเล็กตรอนในCRTจะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณจากAmplifier ที่ขยายสัญญาณจากDetector รับสัญญาณอิเล็กตรอนในกล้อง ถ้าสัญญาณแรงก็จะให้ความสว่างของ

ถ้าอิเล็กตรอนมาก เมื่อส่งลงบนจอของCRTก็จะปรากฏเป็นจุดสว่าง ในทางกลับกันถ้าสัญญาณเบา ก็จะได้จุดที่มีความสว่างน้อย บนจอก็จะปรากฏเป็นจุดสว่างน้อยด้วย บนจอCRTจะทำการเรียงจุดของสัญญาณที่ได้นี้เป็นแถวจนครบแฟรมก็จะได้เป็นภาพออกมา ถ้าบนจอCRTมีขนาดกว้างและยาวเป็น 20 เซนติเมตร และเรากำหนดการกวาดลำอิเล็กตรอนในกล้อง ให้ 1 แฟรมมีพื้นที่ขนาดกว้างยาวเป็น 20 เซนติเมตรด้วย อัตราส่วนการขยายของภาพก็จะ เป็น 1 เท่า แต่ถ้าเราให้การกวาดลำอิเล็กตรอนในกล้องเป็นพื้นที่ 1 x 1 เซนติเมตร ก็จะขยายภาพเป็น 20 เท่า แต่ในความเป็นจริงขนาดของการสแกน 1 แฟรมในกล้องอาจควบคุมให้เล็กมากถึงระดับไมโครเมตร โดยที่การสแกนบนหน้าจอยังเท่าเดิม ดังนั้นการขยายจึงได้ถึงระดับหมื่นเท่า

2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์โดยพบว่าจะมีการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสม โพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 0.20-0.2, ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 3.50-4.50, น้ำ (H_2O) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 0.80-1.20 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเมนด์พบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerisation) เกิดเป็นโครงสร้างแบบซีโอลิติก (Zeolitic) นอกจากนั้นคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ยังสามารถเติมสารต่างๆเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์สามารถพบเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆเช่นในโครงสร้างยานยนต์และอากาศยานอุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆจีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกะพาสกาลมีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลต์นอกจากมีความแข็งหดตัวน้อยทนความเย็นและต้านทานการสึกกร่อนทำให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบที่จะใช้กับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน ในด้านการคำนวณต้นทุน โดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมพบว่าการใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์จะดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในด้านการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงที่ต้องใช้เชื้อเพลิงมากในการเตรียมส่วนผสมและไม่เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 มากเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

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

ของกำลังอัดมากนักส่วนอัตราส่วนน้ำต่อโซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและกำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นในขณะที่การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้การรับกำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอันสั้นอย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าถ้าถ่านหินชนิดแคลเซียมค่ามีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์มากกว่าเนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้นแต่ถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

ในเวลาต่อมา Hardjito และคณะ [24] ยังศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอูมิโน-ซิลิเกตโพลิเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุที่มีซิลิกอนและอูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงานเช่นถ่านหินองค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาวจากผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคตเพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแล้วยังมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วยแต่ยังมีเรื่องต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์อีกมากต่อมา

ในปี 2005 สมิตร์ [25] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ทำจากถ่านหินโดยศึกษาถึงค่ากำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีขนาด 5x5x5 ซม. มีสารโซเดียมไฮดรอกไซด์สารละลายโซเดียมซิลิเกตและน้ำเป็นส่วนผสมมีอัตราส่วนผสมของถ่านหินต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนักกำหนดอัตราส่วนสารโซเดียมไฮดรอกไซด์สารละลายโซเดียมซิลิเกตและน้ำต่อถ่านหินเท่ากับ 0.376, 0.386, 0.396 และ 0.416 โดยน้ำหนักอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมมีค่าเท่ากับ 25 และ 45 องศาเซลเซียสหลังจากทำการหล่อตัวอย่างจะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วนนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจึงนำมาบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสการทดสอบกำลังอัดทำการทดสอบที่อายุ 1, 7 และ 28 วันผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่าให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าในช่วงต้นและยังคงพัฒนา กำลังอัดต่อไปอีกส่วนตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าในช่วงต้นแต่จะมีการพัฒนาค่ากำลังอัดไปเรื่อยๆจนในที่สุดจะมีค่ากำลังอัดมากกว่าตัวอย่างที่ผสมและบ่มที่อุณหภูมิที่สูงกว่า

Alonso และ Palomo [26] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและสัดส่วนผสมที่มีผลต่อจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดีและได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายซีเมนต์เมื่อใช้ดินขาวผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)_2 และเมื่อทำปฏิกิริยากันอย่างเข้มข้นจะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารที่ใช้กระตุ้นสูงขึ้นการก่อตัวจะช้าลงการ

บ่มด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้นสัดส่วนของMetakaolin/Ca(OH)₂ ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์แต่พบว่าปริมาณการเกาะตัวกันจะสูงขึ้นเมื่อมี Ca(OH)₂ สูงและการเติม Ca(OH)₂ ลงในผงMetakaolinเมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10M จะได้ลูมิโนซิลิกเกตเช่นกันและก่อให้เกิด CSH gel และที่น่าสนใจมากก็คือการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 10M จะหน่วงการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเป็นเพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นทำให้ออนของสารแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยาออกอุณหภูมิจะเป็นตัวเร่งให้ทำปฏิกิริยามากขึ้นการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)₂ จะทำให้ปริมาณอะลูมิโนซิลิกเกตเพิ่มสูงขึ้น

ในปี 2006 Chindaprasirt และคณะ [27] ได้ทดลองใช้เถ้านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะโดยนำมาผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิกเกตได้ทำการควบคุมการไหลผ่าน (Flow) ร้อยละ 110±5 ถึง 135±5 ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลผ่านจะดีไม่ดีขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ Na₂O/SiO₂/NaOH โดยมีค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำการศึกษายู่ระหว่าง 10-65 เมกะพาสคาลโดยสัดส่วนของ Na₂O/SiO₂/NaOH ที่เหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 0.67-1 และศึกษาพบว่าแม้ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นจาก 10M ไปเป็น 20M ก็ไม่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์และพบว่าหลังผสมจีโอโพลิเมอร์ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงในอุณหภูมิห้องก่อนให้ความร้อนด้วยการอบซึ่งอุณหภูมิที่ใช้บ่มที่เหมาะสมอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียสและควรบ่มไม่เกิน 2 วันจะให้กำลังอัดที่สูงมากและจากการศึกษาด้วยกล้องขยายอนุภาคของเถ้านหินพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้านหินเป็นทรงกลมถึงแม้ว่าขณะผสมจีโอโพลิเมอร์จะเหนียวขึ้นจนต้องอาศัยการเติมน้ำเข้าไปร้อยละ 2-8 จะช่วยให้ความชื้นเหลวดีขึ้นได้และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) ช่วยให้เทแบบได้ดีก็จริงแต่จะทำให้ค่ากำลังอัดลดต่ำกว่าการใช้จากการศึกษาครั้งนี้สรุปว่าค่าการไหลผ่านให้ผลดีถ้าใช้อัตราส่วน Na₂O/SiO₂/NaOH อยู่ที่ 0.67-1 การใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10M ถึง 20M ไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดและอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่ 60-75 องศาเซลเซียสถ้ามากกว่า 75 องศาเซลเซียสโครงสร้างภายในจะสูญเสียอนุภาคของน้ำทำให้เกิดการแตกร้าวภายในเพราะโครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์มีโมเลกุลของน้ำอยู่ภายในถ้าโดนความร้อนมากโครงสร้างจะเปลี่ยนไปแม้ว่าจะรักษาอุณหภูมิการบ่มอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียสให้นานโดยหวังว่าค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นสุดท้ายการใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยในการผสมและเข้าแบบพบว่าใช้น้ำธรรมดาจะดีกว่าเพราะการใช้สารลดน้ำจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

Bakharev [21] ศึกษาความคงทนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้เถ้านหิน Class F เป็นสารตั้งต้นเมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือนผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิลิกเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นและกำลัง

อัตราลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น และพบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 ถ้าใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นเพียงอย่างเดียว เป็นที่น่าเชื่อว่าการใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-Linked AluminoSilicate Polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือต่างๆ ดังนั้น ความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับว่าการเลือกใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแข็งตัวรวมถึงความเข้มข้นของด่างด้วยจากการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นตัวกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นตัวกระตุ้นอย่างเดียวอีกทั้งยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากการใช้สาร KOH และ NaOH เป็นตัวกระตุ้นทำให้มีสารละลาย Alkaline ละลายปนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นเกลือซัลเฟตด้วยและยังพบรอยร้าวในตัวอย่างอีกด้วยและจากการทดลองพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดียวและบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4-12 เมื่อแช่อยู่ในสารละลายเกลือซัลเฟต

ในปี 1984 Ohsawa และคณะ [10] ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้านหินในไฮดรตซีเมนต์โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรดเช่นกรดไฮดรอกลอลิก (HCl), กรดพิคลิก (Picric Acid) และกรดไซลิคเซติก (Salicylic Acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาผลการทดสอบพบว่าการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้นการใช้กรดพิคลิก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าสนใจมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 ซึ่งการใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดไซลิคเซติกอย่างมาก

Alonso และ Palomo [26] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุล (Microstructure) ของจีโอโพลิเมอร์เพศ์ขณะเกิดปฏิกิริยากับด่างของจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์ที่ทำจากเถ้านหินพบว่าโดยส่วนมากโมเลกุลของเถ้านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ขนาดต่างๆกันเมื่อถูกกัดโดยด่างจะเริ่มที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวของทรงกลมและขยายออกเป็นรูใหญ่จากนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปภายในและทำปฏิกิริยาทั้งภายนอกและภายในทรงกลมจากนั้นเกิดการจับตัวกันจนแข็งจากการดูภาพขยายจะเห็นว่าอนุภาคทรงกลมมีรูทะลุอยู่ทั่วไปในเนื้อจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งแล้วและมีการจับตัวเชื่อมโยงกันนอกจากนั้นสังเกตเห็นว่ายังมีเถ้านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ซึ่งเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณมากขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง, ขนาดอนุภาคของเถ้านหิน, ระยะเวลาการบ่มและการผสมและจากการศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมจีโอโพลิเมอร์และนำเข้า

ไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นพริกกล้วยๆ กระจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

ในปี 2543 จิตรกร วงศ์เซาวลิต ได้ศึกษาการนำตะกอนสลัดจ์ที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนและโรงงานผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์ มาใช้เป็นวัสดุปลูกพืชแล่นในงานด้านคอนกรีต โดยทำการเผาตะกอนสลัดจ์ที่อุณหภูมิ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผา 15, 30 และ 60 นาที แล้วทำการทดสอบหาค่าดัชนี การรับกำลังอัด จากผลการวิจัยพบว่าค่าดัชนีกำลังแรงอัดของมอร์ต้าผสมตะกอนสลัดจ์ จากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนทุกตัวอย่าง

มีค่ามากกว่าร้อยละ 75 ผ่านตามมาตรฐาน ASTM C618 ส่วนค่าดัชนีการรับกำลังของมอร์ต้าผสมเถ้าตะกอนสลัดจ์จากโรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการเผา 15 นาที โดยมีค่าดัชนีการรับกำลังร้อยละ 74

ในปี 2540 กฤษดา นุ่มนวล ได้ศึกษาการนำตะกอนที่ได้จากระบบการผลิตน้ำประปามาใช้แทนดินเหนียว โดยการผลิตอิฐมอญได้แบ่งอัตราส่วนผสมออกเป็น 6 สูตร มีอัตราส่วนผสมของดินเหนียว : ตะกอน : ขี้เถ้าแกลบ : น้ำ โดยน้ำหนักดังนี้ สูตรที่ 1 10:0:3:1 สูตรที่ 2 8:2:3:1 สูตรที่ 3 6:4:3:1 สูตรที่ 4 4:6:3:1 สูตรที่ 5 2:8:3:1 สูตรที่ 6 0:10:3:1 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของตะกอนในสูตรที่ 1 ถึง 6 นั้น มีการเพิ่มปริมาณตะกอนตามลำดับดังนี้ คือร้อยละ 0, 20, 40, 80 และ 100 ของน้ำหนักดิน จากการศึกษาคุณสมบัติของอิฐ ในแต่ละสูตร โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 77-2531 ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบดังนี้คือ การทดสอบการดูดซึมน้ำ การรับกำลังอัด และความคลาดเคลื่อนตามยาว กว้าง และหนา พบว่าอิฐที่มีการผสมตะกอนไม่เกินร้อยละ 40 คือสูตรที่ 1-3 สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนดทุกการทดสอบ แต่ในสูตรที่มีปริมาณตะกอนมากกว่าร้อยละ 40 สูตรที่ 4-6 นั้นไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด เนื่องจากผลการทดสอบ การดูดซึมน้ำ การรับกำลังอัด และความคลาดเคลื่อนตามความยาว กว้าง และหนา ไม่ผ่านค่ามาตรฐานตามที่ มอก. 77-2531 กำหนด และเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐจากดินเหนียว จะมีน้ำหนักลดลงร้อยละ 33 ของน้ำหนัก

ในปี 2541 สมเกียรติ รอดดียัง ได้ศึกษาพบว่า การเพิ่มคุณภาพของอิฐมอญ ที่ผลิตจากตะกอนน้ำประปาโดยใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ได้แก่ เถ้าลอย หินภูเขาไฟเนื้อแก้ว และปูนขาว จากการทดลองพบว่า เถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มที่สามารถทำให้ลูกดินสามารถรับกำลังอัดได้สูงที่สุดจึงพิจารณานำ เถ้าลอยมาเป็นสารผสมเพิ่มในการผลิตอิฐมอญ โดยแบ่งอัตราส่วนผสมออกเป็น 2 สูตร ซึ่งประกอบด้วยวัตถุดิบเป็นดินเหนียว ตะกอน เถ้าลอย ใช้อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักดังนี้ สูตรที่ 1 (27.5:70:10) ผสมขี้เถ้าแกลบร้อยละ 10 ของอัตราส่วนผสมทั้งหมด ได้ทำการทดสอบและเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 77-2531 ได้ผลดังนี้ปริมาณเถ้าลอยที่ร้อยละ 2.5 และร้อยละ 10 ทำ

ให้อิฐสามารถรับกำลังแรงอัดได้สูงกว่าที่ มอก.77-2531 กำหนดไว้ โดยอิฐที่ผลิตได้จากการผสม
เถ้าลอยที่ร้อยละ 2.5 และ ร้อยละ 10 มีน้ำหนักเบากว่าอิฐที่ผลิตได้ทั่วไปร้อยละ 16-20 และสามารถ
ใช้ปริมาณตะกอนน้ำประปาได้สูงถึงร้อยละ 70 ทำให้อิฐสามารถผ่าน มอก.77-2531 ซึ่งสามารถทำ
ให้ปริมาณตะกอนที่มีอยู่มากให้มีปริมาณลดน้อยลงได้



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและอธิบายการพัฒนากำลังอัดของตะกอนดินเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ (ตะกอนดินประปาผสมกับเถ้าลอยและสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L)) ตะกอนดินประปาเถ้าลอยจะถูกนำมาผสมเข้ากับสารกระตุ้น ซึ่งเป็นส่วนผสมของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ และหากำลังอัดแกนเดียว เพื่อสร้างสมการทำนายกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ แผนดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3.1





รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการ

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างของตะกอนดินเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
พลังงานการบดอัด	1	แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor)
อุณหภูมิ	3	65°C 75°C และ 85°C
อายุบ่มต่อ 1 อุณหภูมิ	5	0 24 48 72 96 และ 120 ชั่วโมง
อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	5	50:50, 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0
อัตราส่วนระหว่าง Silt/FA	1	70:30
อัตราส่วนระหว่าง L/FA	3	1.2 1.3 และ 1.4
จำนวนตัวอย่าง	3	ชุดละ 3 ตัวอย่าง

3.2 การเก็บและเตรียมดินตัวอย่าง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน ดินตัวอย่างเป็นตะกอนดินประปาที่ได้จากการประปานครหลวง เขตบางเขน ซึ่งนำมาตากในพื้นที่โล่งจนแห้ง

3.2.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (Basic properties) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานของดินจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด และชนิดของดิน ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน ดังนี้

3.2.2.1) ปริมาณความชื้นเริ่มต้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2216

3.2.2.2) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กลงกว่า 4.75 มิลลิเมตร) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854

3.2.2.3) ชีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และพิกัดพลาสติก (Plastic limit) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.2.2.4) การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 422-63

3.2.2.5) ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมี

จุดประสงค์เพื่อทราบองค์ประกอบเคมีของดินตะกอนประปาที่ได้จากการประปานครหลวง เขตบางเขนและเถ้าลอย เพื่อสามารถนำมาวิเคราะห์ถึงการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีใช้เครื่อง X-ray fluorescence

3.2.2.6) ถ่ายภาพขยายกำลังสูง

จุดประสงค์เพื่อทราบลักษณะ โครงสร้างระดับจุลภาคของดินตะกอนประปา เถ้าลอย ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

3.3 เถ้าลอย

เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

3.4 การเตรียมตัวอย่าง

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างดิน

ดินตัวอย่างจะถูกตากให้แห้ง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบ ก่อนนำเข้าเครื่องบดละเอียด จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (ดินที่ผ่านการตากให้แห้งจะมีความชื้นเริ่มต้นที่น้อยมาก ประมาณร้อยละ 0) นำดินที่ผ่านตะแกรงเก็บใส่ภาชนะที่ปิดมิดชิด

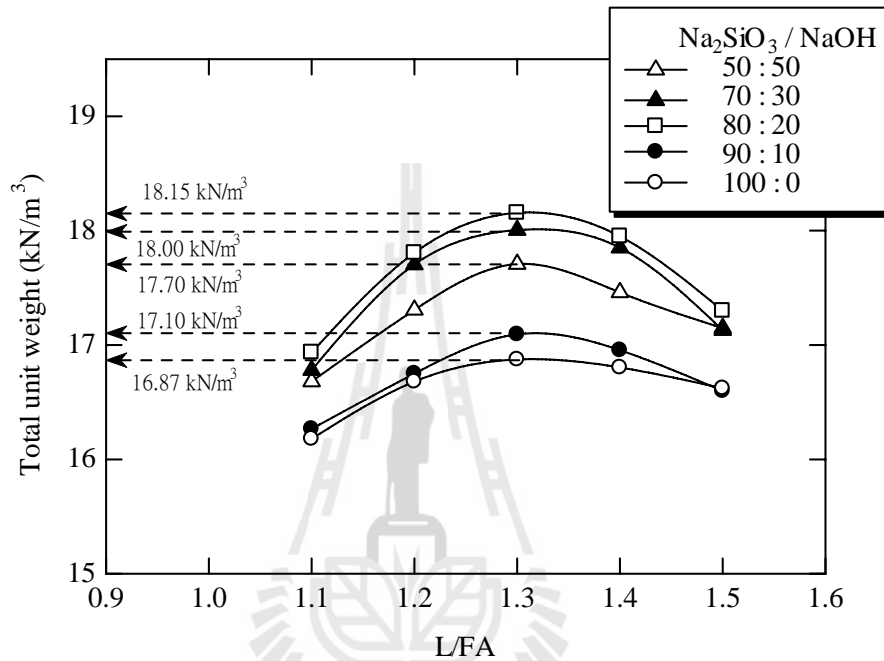
3.4.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การเตรียมสารละลาย NaOH เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมล เริ่มต้นจากการชั่งสาร NaOH น้ำหนัก 400 กรัม ละลายสารกับน้ำกลั่นในบีกเกอร์ เทสารที่ละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นแล้วเทลงในขวดวัดปริมาตร เขย่าขวดวัดปริมาตรเพื่อให้สารละลายผสมกัน ตั้งขวดปริมาตรเพื่อให้อุณหภูมิของสารละลายลดลง แล้วจึงเติมน้ำกลั่นที่ละน้อยให้ถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าอีกครั้งเพื่อให้สารละลายผสมกัน ถ่ายลงภาชนะมีฝาปิดที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

3.5 การบดอัดตัวอย่างดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

ตะกอนดินประปาจะถูกผสมเข้ากับเถ้าลอย (Fly ash, FA) ในอัตราส่วนผสม 70:30 จนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเติมสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ในอัตราส่วน L:FA ที่กำหนดและผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ NaOH (ที่ความเข้มข้น 10 โมล) ในอัตราส่วนผสม Na_2SiO_3 :NaOH เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 50:50 ส่วนผสมระหว่างตะกอนดินประปา เถ้าลอย และสารกระตุ้นที่อัตราส่วนระหว่าง L/FA ต่างๆ จะถูกบดอัดในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และสูง 100 มิลลิเมตร ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและ

อัตราส่วนระหว่าง Liquid Alkaline Activator ต่อเถ้าลอย (L/FA) ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเตรียมตัวอย่างตะกอนดินเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ จะเห็นว่าหน่วยน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ในขณะที่ อัตราส่วน L/FA เหมาะสมมีค่าไม่แปรผันตาม อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ และมีค่าเท่ากับ 1.3



รูปที่ 3.2 กราฟการบดอัด

3.6 การทดสอบกำลังอัด

ตะกอนดินประปาจะนำมาผสมเข้ากับเถ้าลอยในอัตราส่วนผสม 70:30 และผสมเข้ากับสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ในอัตราส่วน L:FA เท่ากับ 1.2, 1.3 และ 1.4 สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ NaOH ในอัตราส่วนผสม 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 50:50 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10 โมล ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ถูกนำมากระตุ้นด้วยความร้อนระหว่าง 65, 75 และ 85°C เป็นเวลา 0, 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง และนำมาบ่มในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 28°C จนได้อายุบ่มรวมเท่ากับ 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ก่อนทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C69 – 09

3.7 การทดสอบโครงสร้างจุลภาค

ตัวอย่างดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว บางส่วนจะถูกนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคของดินโดยการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ดินตัวอย่างซึ่งผ่านการทำให้แห้งจะถูกทำให้แตกจนมีขนาดประมาณ 3-4 มิลลิเมตร หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกนำไปติดตั้งบนแท่งติดตั้งตัวอย่าง และสุดท้ายเป็นขั้นตอนการถ่ายภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

บทที่ 4

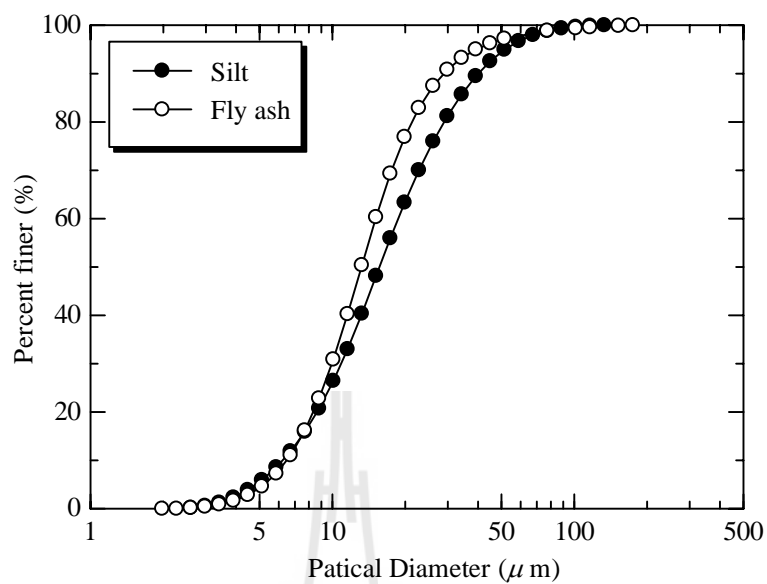
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ผลการศึกษากำลั้งอัด และผลการศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ของบล็อกประสานจีโอโพลิเมอร์จาก ดินตะกอนประปาและเถ้าลอย

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย

ตะกอนดินเก็บจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน ตัวอย่างดินประกอบด้วยทรายร้อยละ 0.2 ดินตะกอนร้อยละ 58.6 และดินเหนียวร้อยละ 41.4 และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ซึ่ดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดินเท่ากับร้อยละ 64 และ 0 ตามลำดับ ดังนั้น ส่วนประกอบทางเคมีและการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ภาพถ่ายกำลังขยายของตะกอนดินแสดงดังรูปที่ 4.2

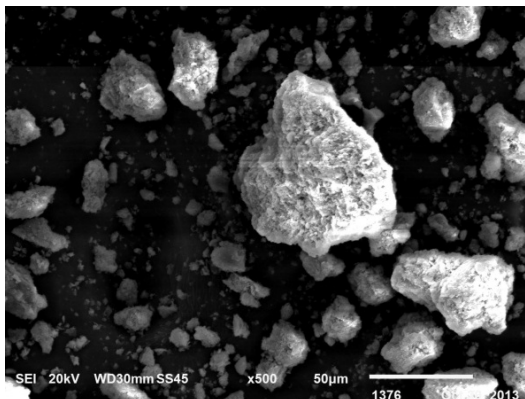
เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีคุณสมบัติทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.1 เถ้าลอยถูกนำมาผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เพื่อคัดขนาดอนุภาคใหญ่่ออก ผลรวมของปริมาณธาตุ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 67.31 ซึ่งจำแนกเป็น Class C ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50}) ของเถ้าลอยเท่ากับ 15.17 ไมครอน การกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าชีวมวลแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งได้จากการทดสอบด้วย Laser particle size analysis ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย 2.53 ตามลำดับ ภาพถ่ายกำลังขยาย FA แสดงในรูปที่ 4.3 จากกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคและภาพถ่ายกำลังขยาย จะเห็นได้ว่าอนุภาคของตะกอนดินมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของเถ้าลอย



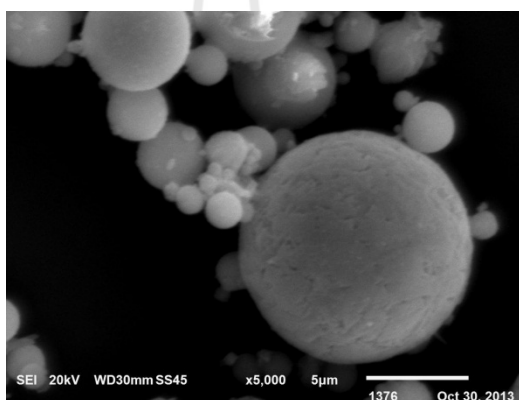
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดคละของตะกอนดินประปาและเถ้าลอย

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนดินประปา และ เถ้าลอย

Chemical composition (%)	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	0.60	30.24
MgO	N.D.	N.D.
SO ₃	0.59	N.D.
Na ₂ O	N.D.	0.41
K ₂ O	1.90	1.63
LOI	0.55	0.42



รูปที่ 4.2 รูปถ่ายกำลังขยายของตะกอนดินประปา

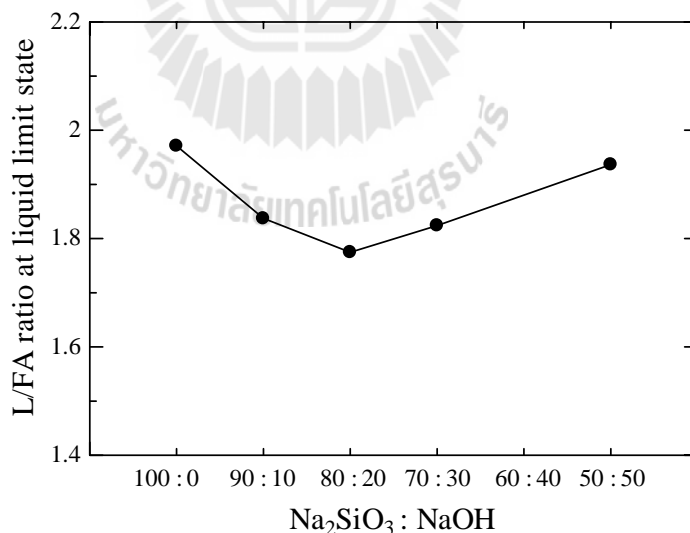


รูปที่ 4.3 รูปถ่ายกำลังขยายของเถ้าลอย (FA)

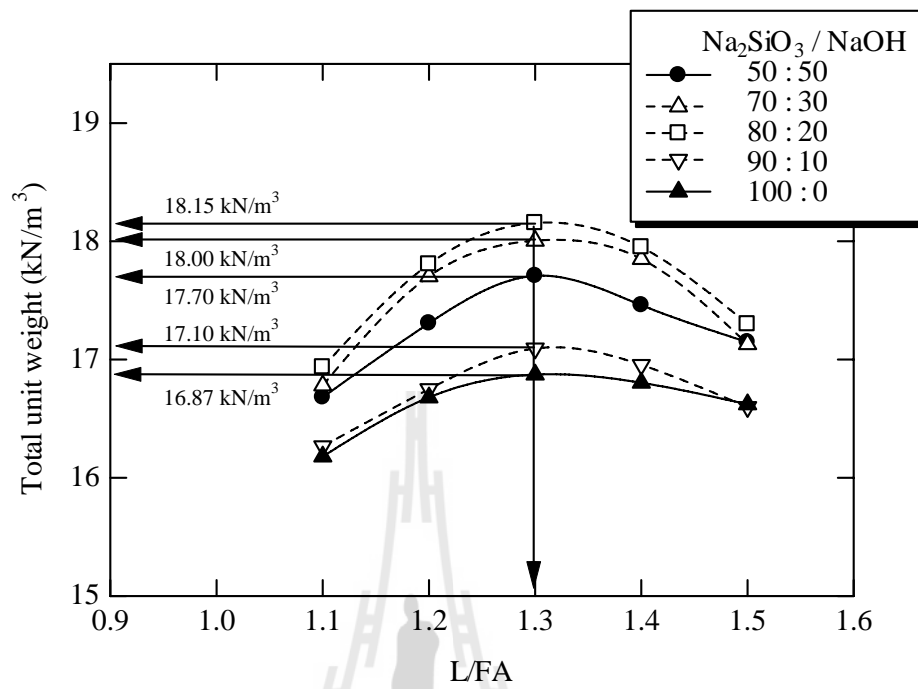
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน L/FA ที่ขีดจำกัดเหลวและอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ จะเห็นได้ว่าอัตราส่วน L/FA ที่ขีดจำกัดเหลวแปรผันตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ในช่วงประมาณ 1.78 ถึง 1.96 ของปริมาณเถ้าลอย ขีดจำกัดเหลวมีค่าลดลงตามการลดลงของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (การเพิ่มขึ้นของ NaOH) และมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 1.78 เมื่ออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 หลังจากนั้น อัตราส่วน L/FA ที่ขีดจำกัดเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ การลดลงของอัตราส่วน L/FA ที่ขีดจำกัดเหลวตามการลดลงของ Na_2SiO_3 ในช่วงแรก เป็นสาเหตุมาจากอิทธิพลของการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation exchange) NaOH ทำให้ที่ชะละลายซิลิกาและอลูมิน่าจากเถ้าลอย และทำปฏิกิริยากับ Na_2SiO_3 เพื่อสร้างโซลีโอโพลิเมอร์ ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Flocculation) และส่งผลให้

ความสามารถในการดูดซึมสารกระตุ้นลดลง ดังนั้น L/FA จึงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ NaOH แต่เมื่ออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ มีค่าต่ำเกินค่าเหมาะสม (80:20) แม้ว่า NaOH จะสามารถชะละลายซิลิกาและอลูมินาได้มากก็ตาม แต่ปริมาณ Na_2SiO_3 กลับมีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วน L/FA ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่างๆ ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเตรียมตัวอย่างตะกอนดินประปา-แก้วลอยจีโอโพลิเมอร์ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ โดยที่อัตราส่วน L/FA เหมาะสมมีค่าประมาณคงที่เท่ากับ 1.3 สำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ โดยทั่วไป หน่วยน้ำหนักสูงสุดและปริมาณความชื้นเหมาะสมของดินบดแปรผันตามปริมาณน้ำที่ฉีดจำกัดเหลว (Horpibulsuk et al., 2008 และ 2009) โดยที่หน่วยน้ำหนักสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่ฉีดจำกัดเหลวที่ลดลง ผลทดสอบการบดอัดส่วนผสมระหว่างตะกอนดินประปา-แก้วลอย-สารกระตุ้น มีความสอดคล้องกับผลทดสอบดินบดอัด ดังจะเห็นได้ว่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดแปรผันตามปริมาณสารกระตุ้น เนื่องจาก $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เท่ากับ 80:20 ให้ค่าปริมาณสารกระตุ้น (อัตราส่วน L/FA) ต่ำที่สุด หน่วยน้ำหนักสูงสุดจึงเกิดที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20



รูปที่ 4.4 ผลทดสอบฉีดจำกัดเหลวของส่วนผสมตะกอนดินประปา-แก้วลอย-สารกระตุ้น



รูปที่ 4.5 กราฟการบดอัดของส่วนผสมระหว่างตะกอนดินประปา-เถ้าลอย-สารกระตุ้น

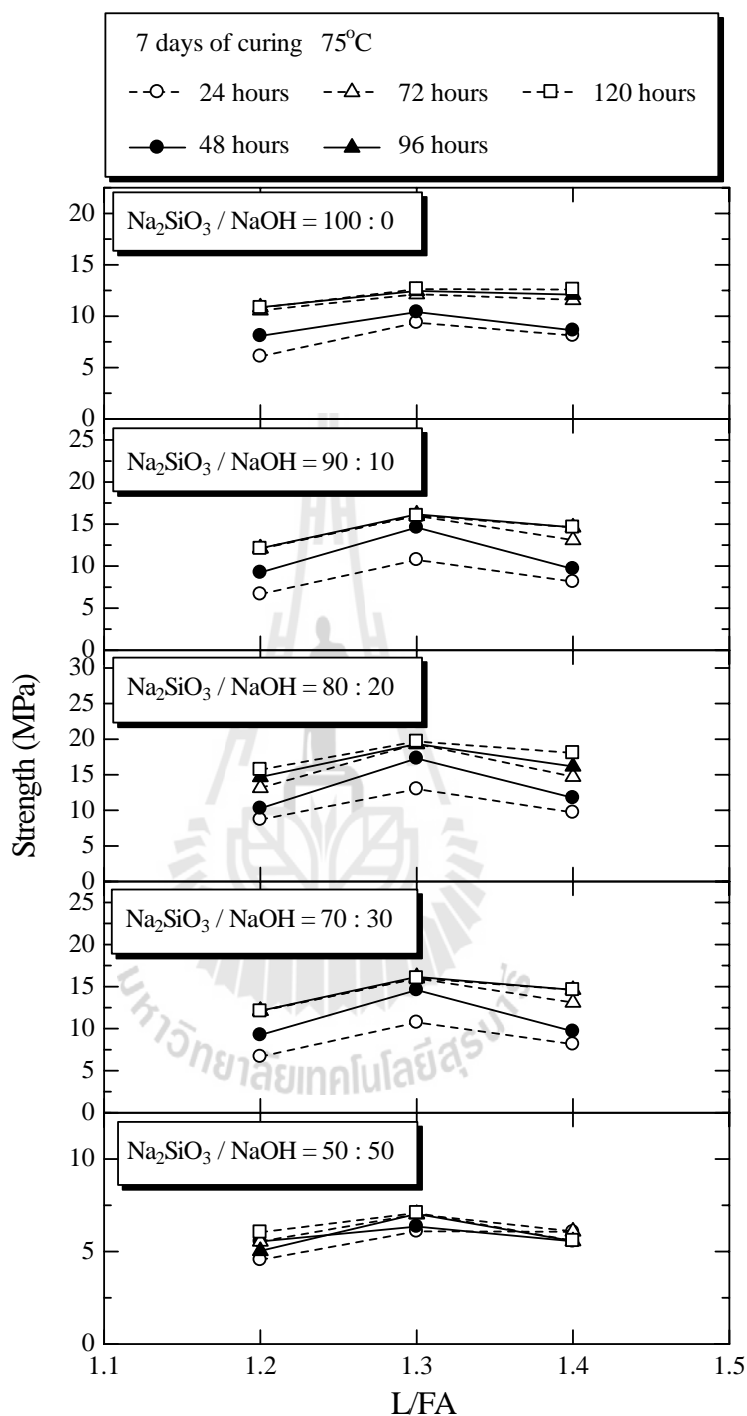
4.2 กำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

อิทธิพลของ L/FA ต่อกำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของตัวอย่างตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.2, 1.3 (หน่วยน้ำหนักสูงสุด สำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) และ 1.4 ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 100:0 90:10 80:20, 70:30 และ 50:50 ที่อุณหภูมิบ่มเท่ากับ 75°C เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า ทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าสูงที่สุดที่อัตราส่วน L/FA เหมาะสม (เท่ากับ 1.3) กำลังอัดทางด้านแฉ่งและด้านเป็ยกของอัตราส่วน L/FA เหมาะสม มีค่าใกล้เคียงกัน อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 เป็นส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงสุดสำหรับทุกอัตราส่วนของ L/FA

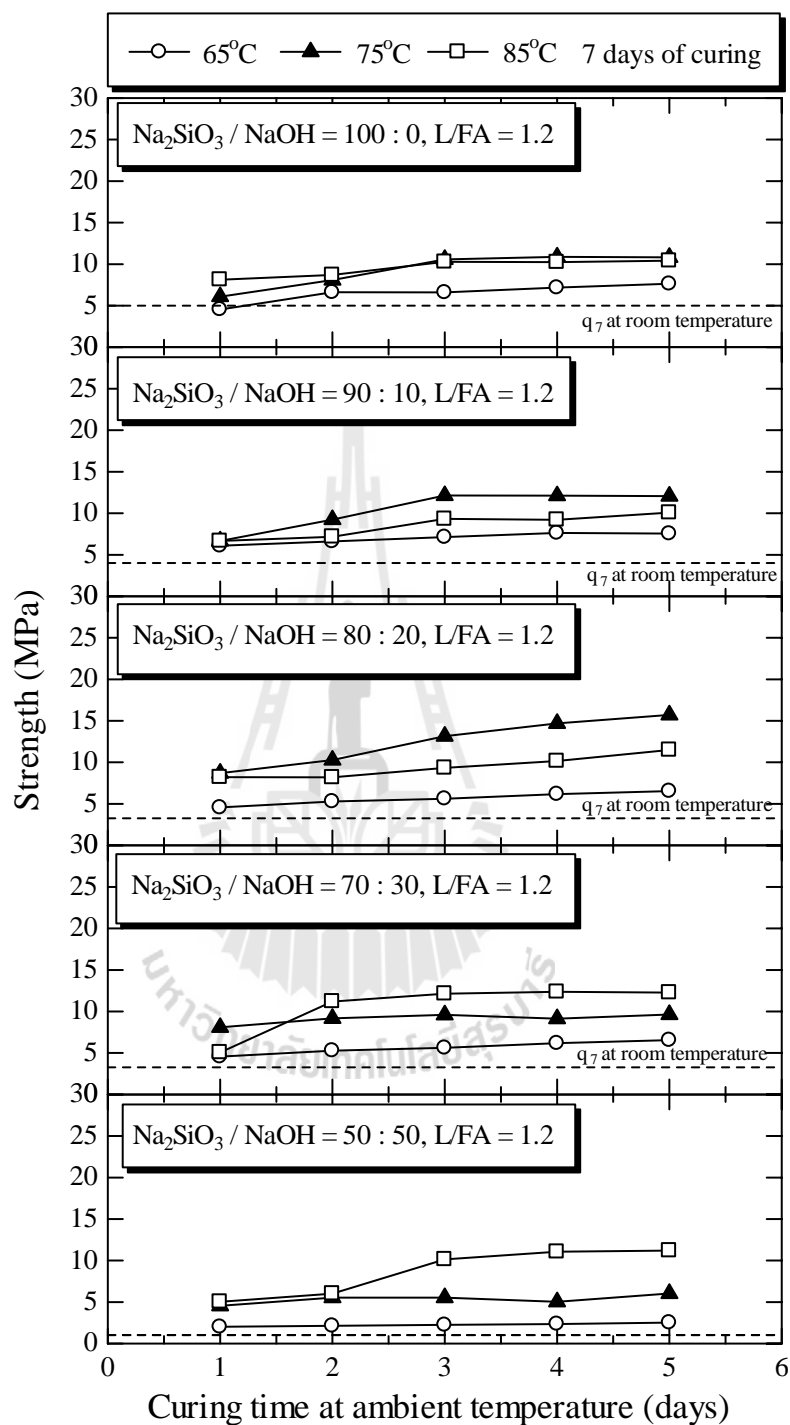
รูปที่ 4.7 ถึง 4.9 แสดงผลทดสอบกำลังที่อายุบ่ม 7 วัน ของตัวอย่างตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.2, 1.3 (หน่วยน้ำหนักสูงสุด สำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) และ 1.4 ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 100:0 90:10 80:20, 70:30 และ 50:50 อุณหภูมิบ่มเท่ากับ 65, 75 และ 85°C และระยะเวลาบ่มเท่ากับ 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่มในตู้อบที่เพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลาที่บ่มในตู้อบเท่ากับ 3 วัน เมื่อระยะเวลาที่บ่มในตู้อบนานกว่า 3 วัน กำลังอัดมีค่าเกือบจะคงที่สำหรับทุกอัตราส่วน L/FA ผลการพัฒนา กำลังอัดมีความแตกต่างจากงานวิจัยของ Sukmak et al. (2013a และ b) ซึ่งกำลังอัดจะมีค่าลดลงเมื่อบ่มตัวอย่างในตู้อบนานเกินไป ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีความคงทนต่อความร้อนมากกว่าดินเหนียวปนดินตะกอนเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ศึกษาโดย Sukmak et al. (2013a และ b) นอกจากนี้ยังพบอีกว่า อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดของ ตะกอนดินประปา-จีโอโพลิเมอร์มากกว่าระยะเวลาในการบ่ม กล่าวคือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเหมาะสม (65°C) แม้ว่าจะอบตัวอย่างในตู้อบนาน กำลังอัดก็ยังคงต่ำกว่ากำลังอัดที่อุณหภูมิเหมาะสม ซึ่งแตกต่างจากการพัฒนากำลังอัดของดินตะกอนเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ศึกษาโดย Sukmak et al. (2013a และ b)

กำลังอัดภายใต้เงื่อนไขการบ่มต่างๆ ได้นำเปรียบเทียบกับกำลังอัดภายใต้สภาวะที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง (ไม่ได้บ่มในตู้อบ) ดังแสดงด้วยเส้นประ จะเห็นได้ว่ากำลังอัดที่บ่มในตู้อบมีค่าสูงกว่ากำลังอัดในสภาวะที่บ่มที่อุณหภูมิห้องอย่างเห็นได้ชัด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การบ่มในตู้อบช่วยกระตุ้นปฏิกิริยา Geopolymerization

การพัฒนากำลังอัดที่อุณหภูมิและระยะเวลาบ่มในตู้อบต่างๆ แปรผันอย่างมากตามอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ สารละลาย NaOH ทำหน้าที่ชะละลายซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ออกจากแก้วลอย เพื่อทำปฏิกิริยา Geopolymerization กับสารละลาย Na_2SiO_3 ปริมาณ NaOH ที่ต่ำเกินไปจะไม่เพียงพอต่อการชะละลายซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ แต่หากสูงเกินไปจะทำให้เกิดแก้วแตก (Sukmak et al., 2013a และ 2013b) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 ให้กำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้อัตราส่วน L/FA ที่ขีดจำกัดเหลวต่ำที่สุด อิทธิพลของเงื่อนไขการบ่มต่อการพัฒนากำลังอัดแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม (กลุ่มที่ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ สูงกว่า 80:20 และกลุ่มที่ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ น้อยกว่า 80:20) สำหรับกลุ่มที่ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ สูงกว่า 80:20 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างคือ 75°C อุณหภูมิที่ต่ำเกินไป (65°C) ไม่เพียงพอต่อการกระตุ้นปฏิกิริยา Geopolymerization อุณหภูมิที่สูงเกินไป (85°C) อาจทำให้เกิดการลดลงของของเหลวในตัวอย่างจับปัด และส่งผลให้เกิดการแตกร้าวของโครงสร้างตัวอย่าง (Sukmak et al., 2013a และ b) สำหรับกลุ่มที่ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่ำกว่า 80:20 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างคือ 85°C

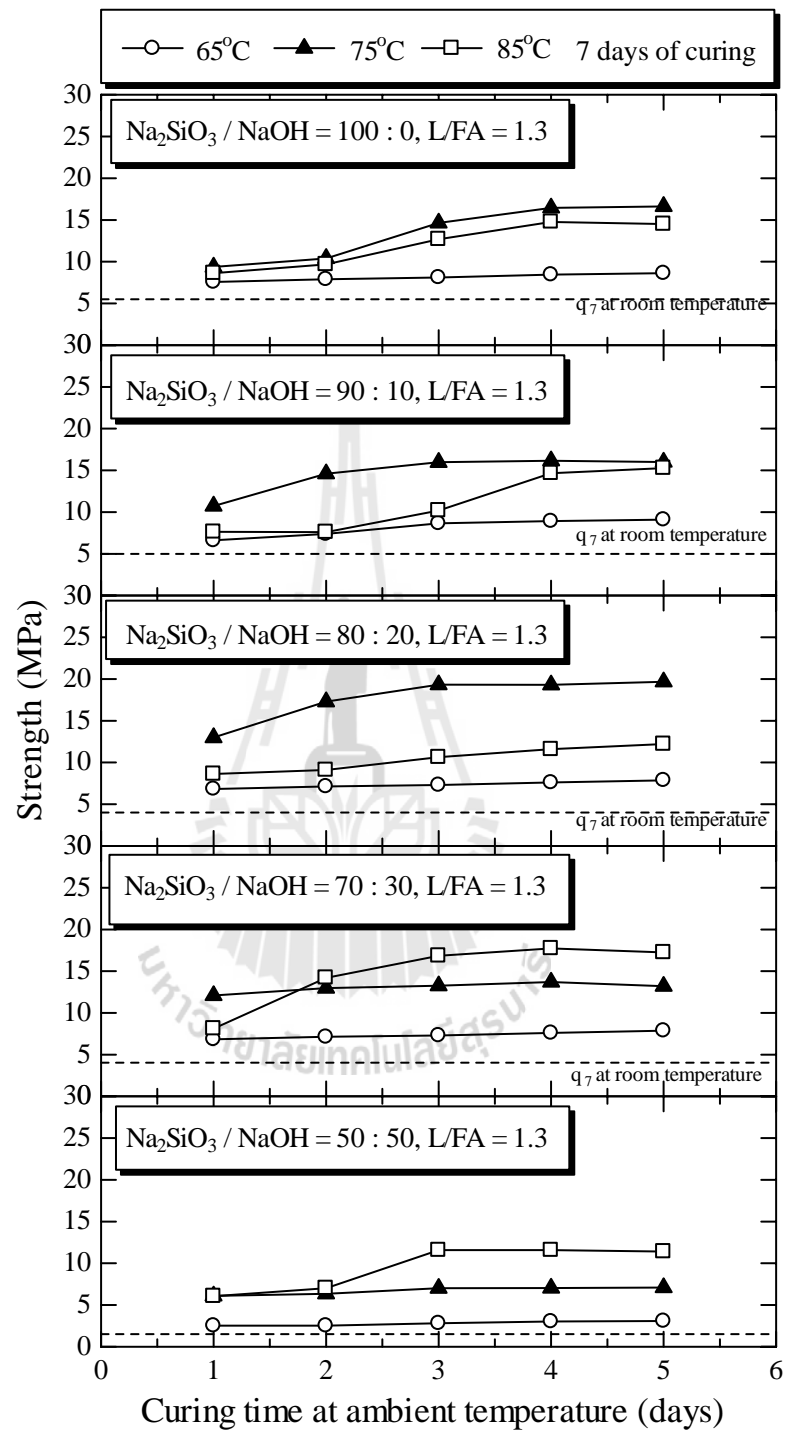


รูปที่ 4.6 กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของดินตะกอนประปาแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์
ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.2 1.3 และ 1.4

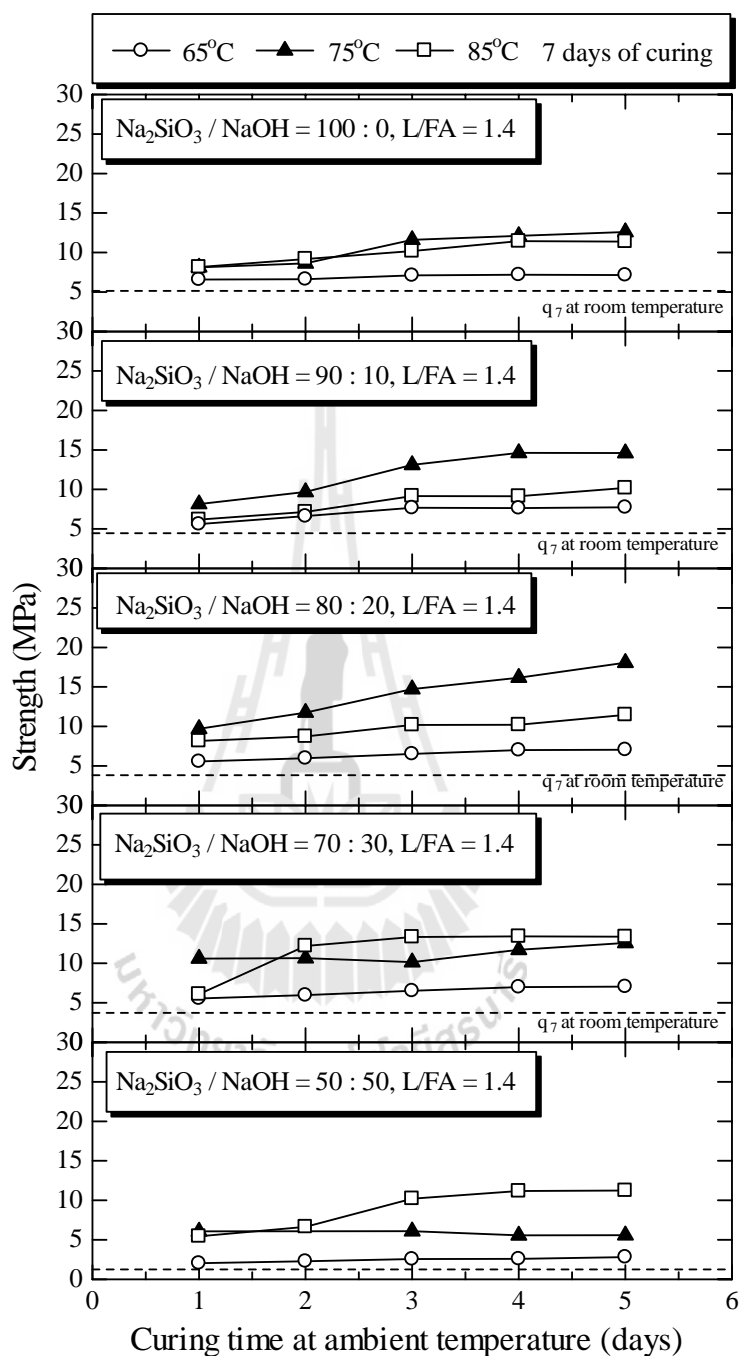


รูปที่ 4.7 ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอน

ประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.2



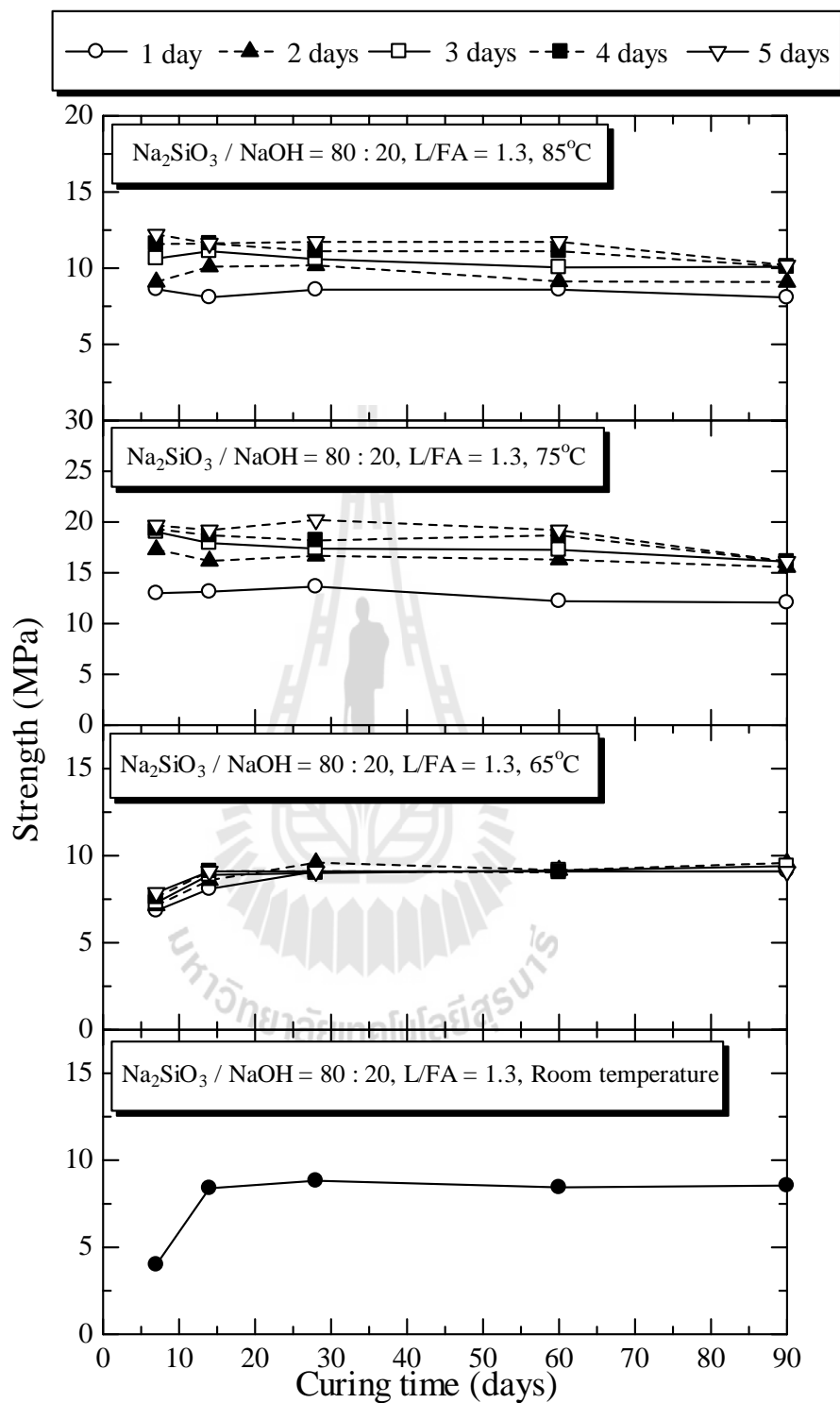
รูปที่ 4.8 ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอน
ประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอน
ประปา-แก้วลอยีโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.4

รูปที่ 4.10 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3 การพัฒนากำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอย-จีโอโพลิเมอร์แบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มที่อุณหภูมิสูงกว่า 75°C และกลุ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า 75°C ในกลุ่มแรก กำลังอัดของตะกอนดิน-จีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มคงที่ หลังจากอายุบ่มเกิน 7 วัน ในขณะที่ ในกลุ่มที่สอง กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงอายุบ่ม 28 วัน แล้วจึงมีแนวโน้มคงที่ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีส่วนช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไซเซชัน และทำให้กำลังอัดสูงสุดเกิดขึ้นที่อายุบ่มช่วงต้น อิทธิพลของอุณหภูมิเห็นได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของตะกอนดินประปาเถ้าลอย-จีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องกับกำลังอัดของตะกอนดินประปาเถ้าลอย-จีโอโพลิเมอร์ในตู้อบ กำลังอัดช่วงต้น (7 วัน) ของตะกอนดินประปาเถ้าลอย-จีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องมีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของของตะกอนดินประปาเถ้าลอย-จีโอโพลิเมอร์ในตู้อบอย่างเห็นได้ชัด ความแตกต่างของกำลังอัดมีค่าลดลงตามอายุบ่มที่มากขึ้น และกำลังอัดสูงสุดของของตะกอนดินประปาเถ้าลอย-จีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องเกิดในช่วงอายุบ่ม 28 วัน กำลังอัดสูงสุดนี้มีค่าต่ำกว่ากำลังอัดที่อุณหภูมิเหมาะสม (75°C) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานความร้อนไม่เพียงแต่ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาในช่วงต้น แต่ยังช่วยเพิ่มกำลังอัดด้วย

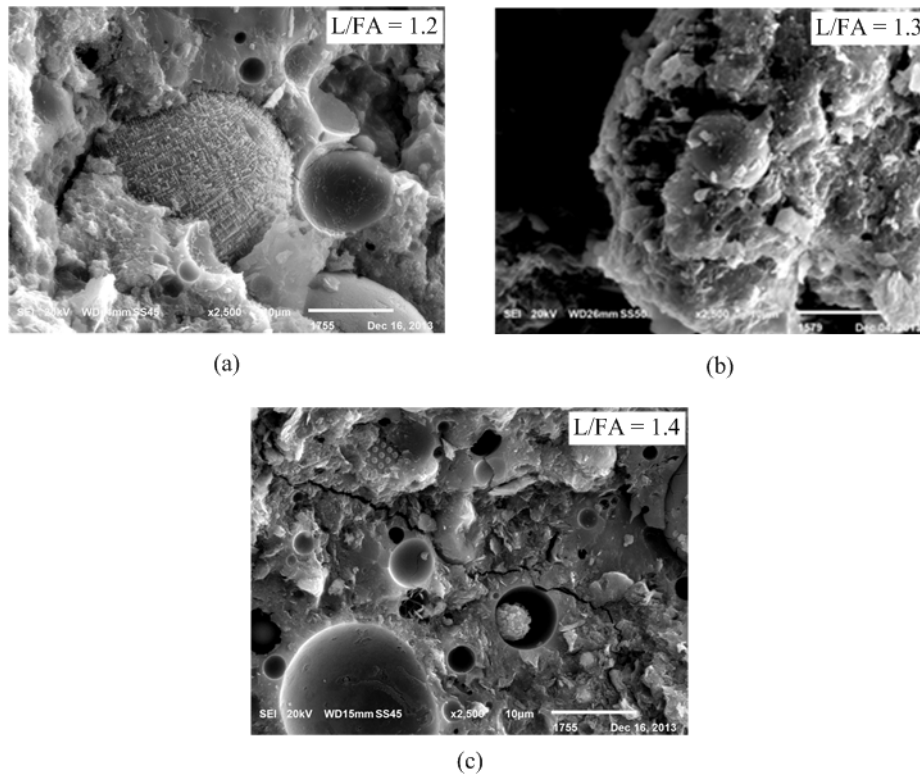




รูปที่ 4.10 ผลกระทบของอุณหภูมิความร้อนในการบ่มต่อกำลังอัดของดินตะกอน
ประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน Na₂SiO₃/NaOH เท่ากับ
80/20และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3

4.3 การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างจุลภาค

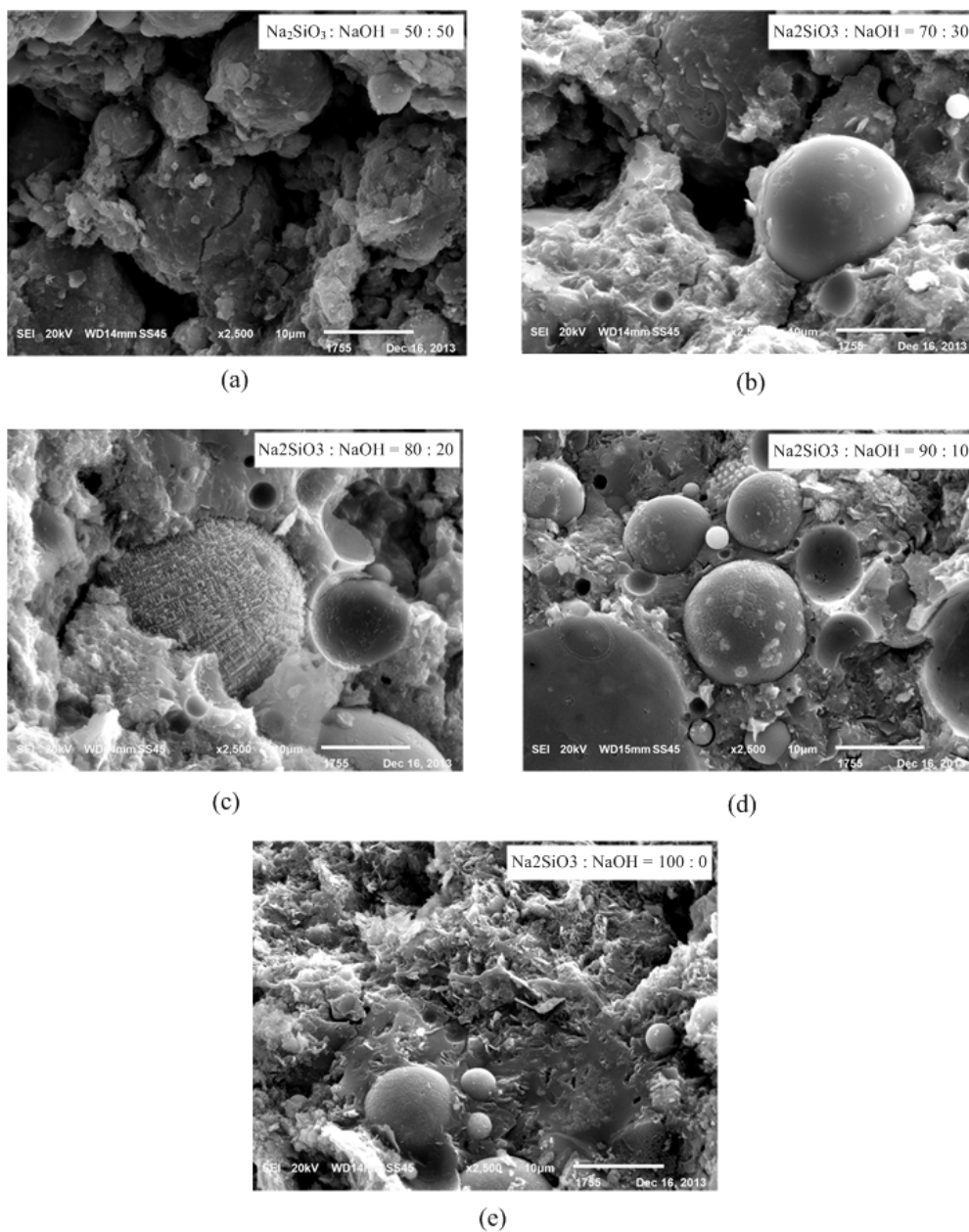
รูปที่ 4.11 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 อุณหภูมิ 75°C ที่ระยะเวลาในตู้อบ 3 วัน สำหรับอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.2, 1.3 และ 1.4 จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นบนเม็ดถ้ำลอยอย่างเห็นได้ชัดสำหรับทุกอัตราส่วน L/FA เนื่องจากพลังงานความร้อน (อุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม) ที่ให้แก่ตัวอย่างเป็นค่าเหมาะสม สำหรับอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.2 ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้นบนถ้ำลอยมีน้อยที่สุด เนื่องจากสารละลายอัลคาไลน์บางส่วนต้องถูกนำไปใช้ในการจัดเรียงโครงสร้างของเม็ดดินจึงส่งผลให้สารละลายอัลคาไลน์ไม่สามารถทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้อย่างสมบูรณ์ สำหรับอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.4 ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์มีค่ามากเกินไป ดังนั้น เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ ปริมาณสารละลายในตัวอย่างจึงเกิดการระเหยออกและเกิดช่องว่างระหว่างโครงสร้างของตะกอนดินประกบกับเม็ดถ้ำลอย และก่อให้เกิดการหดตัวของตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกกว้างระดับไมโครเมตร (รูปที่ 4.11c) สำหรับอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3 (รูปที่ 4.11b) ซึ่งเป็นสภาวะที่ตัวอย่างมีความหนาแน่นแห่งสูงสุด ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ไรเซชันปรากฏให้เห็นได้อย่างชัดเจน และมีปริมาณมากกว่าตัวอย่างที่ L/FA เท่ากับ 1.2 ดังนั้น อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3 จึงให้กำลังอัดที่สูงที่สุด



รูปที่ 4.11 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ ที่ L/FA เท่ากับ 1.2, 1.3 และ 1.4 อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 อุณหภูมิบ่ม 75°C ที่ระยะเวลาในตู้อบ 3 วัน

อิทธิพลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่ L/FA ค่าหนึ่ง ต่อการเกิดจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชัน แบ่งออกเป็นสามกลุ่ม (กลุ่มที่ 1 ปริมาณ NaOH ที่สูงเกินไป กลุ่มที่ 2 ปริมาณ NaOH เหมาะสม และกลุ่มที่ 3 ปริมาณ NaOH ที่ต่ำเกินไป) สำหรับกลุ่มที่ 1 ปริมาณ NaOH ที่สูงเกินไป (อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 และ 70:30) ทำให้เม็ดเถ้าลอยเกิดการแตก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sukmak et al. (2013a และ b) ดังแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 4.12a และ b สำหรับกลุ่มที่ 2 ปริมาณ NaOH ที่เหมาะสม (อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นบนเถ้าลอยในปริมาณมากและเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.12 c) สำหรับกลุ่มที่ 3 ปริมาณ NaOH ที่ต่ำเกินไป (อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 90:10 และ 100:0) (รูปที่ 4.12 d และ e) ไม่เพียงพอต่อการชะละลายซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ออกจากเถ้าลอย เพื่อทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันกับ Na_2SiO_3 ดังนั้น แม้ว่าโครงสร้างของเถ้าลอยจะไม่เกิดการแตกร้าว แต่ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันที่เกิดขึ้นในกลุ่มที่สามมีปริมาณน้อยกว่าผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ที่

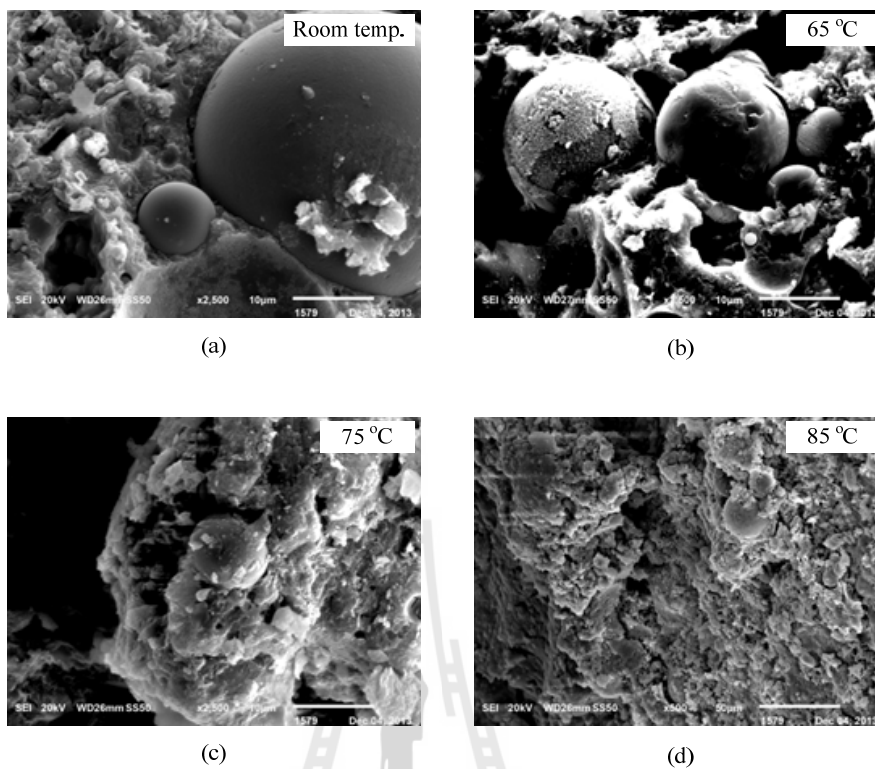
เกิดขึ้นในกลุ่มที่สอง (ปริมาณ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เหมาะสม) ด้วยเหตุนี้เอง อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เท่ากับ 80:20 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด



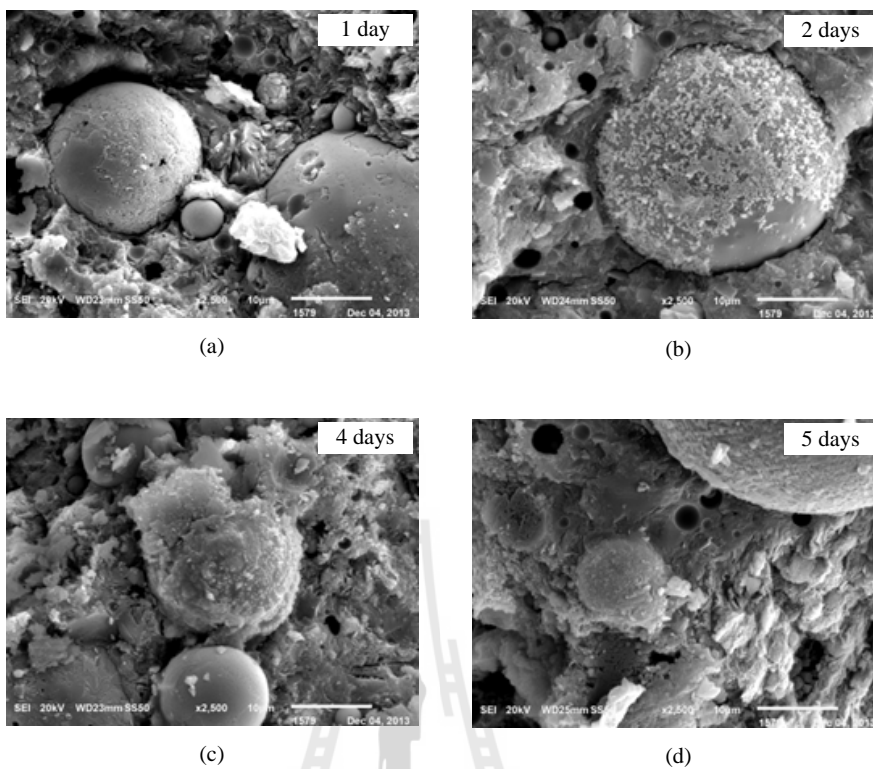
รูปที่ 4.12 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีไอโพลิเมอร์ ที่ L/FA เท่ากับ 1.3 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 50:50 อุณหภูมิบ่ม 75°C ที่ระยะเวลาในตู้อบ 3 วัน

อิทธิพลของสภาวะการบ่มต่อการพัฒนากำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ แสดงให้เห็นด้วยรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 และอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3 สำหรับอุณหภูมิห้อง 65°C , 75°C และ 85°C การบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูง (85°C) จะทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณความชื้นในตัวอย่าง ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวและเกิดรอยแตกกว้างระดับไมโครเมตร (Sukmak et al., 2013a และ b) รอยแตกเนื่องจากการหดตัวของตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.13d สำหรับการบ่มด้วยอุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิห้อง และ 65°C) ดังแสดงในรูปที่ 4.13a และ b ผลึกภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อย ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดที่ต่ำที่สุด ผลึกภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นในปริมาณมากและเห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับการบ่มด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม (75°C) ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดที่สูงที่สุด

รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอายุบ่มในคู่อบต่อการพัฒนาผลึกภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ที่อุณหภูมิบ่มค่าหนึ่ง ซึ่งแสดงโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 1.3 และอุณหภูมิ 75°C ที่ระยะเวลาในคู่อบ 1, 2, 4 และ 5 จะพบว่าผลึกภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น จนถึงระยะเวลาบ่มที่เท่ากับ 3 วัน เมื่อระยะเวลาบ่มมากกว่า 3 วัน ผลึกภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันค่อนข้างคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (กำลังอัดมีค่าประมาณคงที่ แม้ว่าจะมีการบ่มตัวอย่างตะกอนดินประปา-จีโอโพลิเมอร์เกินกว่า 3 วัน) ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า อายุบ่ม 3 วัน เป็นอายุบ่มที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมตัวอย่างตะกอนดินประปา-จีโอโพลิเมอร์



รูปที่ 4.13 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดิน-เถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์ ที่ L/FA เท่ากับ 1.3 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 อุณหภูมิบ่ม 65 °C 75 °C และ 85 °C ที่ระยะเวลาในตู้อบ 3 วันและที่ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.14 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่อายุบ่ม 7 วัน ของตะกอนดิน-เถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์ ที่ L/FA เท่ากับ 1.3 อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 อุณหภูมิบ่ม 75°C ที่ระยะเวลาในตู้อบ 1, 2, 4 และ 5 วัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษการพัฒนากำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ โดยแปรผันตัวแปรควบคุม (อัตราส่วน L/FA, อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, พลังงานความร้อน และอายุบ่ม) เพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสม ประเด็นสำคัญของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราส่วน L/FA ที่ขีดจำกัดเหลวมีค่าลดลงตามการลดลงของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ จนกระทั่งถึงค่า $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เหมาะสม ซึ่งเท่ากับ 80:20 และหลังจากนั้นอัตราส่วน L/FA จะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ในช่วงเริ่มต้น การลดลงของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (การเพิ่มขึ้นของ NaOH) ช่วยชะลายซิลิกาและอลูมินาออกจากเถ้าลอยเพื่อทำปฏิกิริยากับ Na_2SiO_3 ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มอนุภาค ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึม L ลดลง (อัตราส่วน L/FA ที่ขีดจำกัดเหลวจึงลดลง) แต่เมื่ออัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ มีค่าต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม แม้ว่า NaOH จะมีปริมาณมากพอ แต่ปริมาณ Na_2SiO_3 มีไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน

2. การทดสอบหาอัตราส่วน L/FA ที่ขีดจำกัดเหลวมีประโยชน์อย่างมากในการประมาณค่า $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากการทดสอบที่ทำได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เหมาะสม (ให้กำลังอัดสูงสุด) สำหรับตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 80:20 สำหรับทุกอัตราส่วนของ L/FA และเงื่อนไขการบ่ม ภาพถ่ายกำลังขยายสูงแสดงให้เห็นว่าปริมาณ NaOH ที่สูงเกินไป (อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม) จะทำให้เกิดการแตกของเถ้าลอยเนื่องจากความเป็นด่างที่รุนแรง และส่งผลให้กำลังอัดของตะกอนดินประปา-เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีค่าลดลง

3. อัตราส่วน L/FA มีผลต่อกราฟการบดอัด สารกระตุ้น (L) ทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นอนุภาคของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอย ดังนั้น การเพิ่มอัตราส่วน L/FA ทำให้อนุภาคของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยสามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ดีขึ้น (หน่วยน้ำหนักสูงขึ้น) แต่เมื่ออัตราส่วน L/FA สูงเกินกว่าค่าเหมาะสม ปริมาณสารกระตุ้นจะเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอย ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักลดลง อัตราส่วน L/FA ที่ให้หน่วยน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 1.3

4. อัตราส่วน L/FA ไม่เพียงแต่มีอิทธิพลต่อกราฟการบดอัด แต่ยังมีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดของตะกอนดินประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ อัตราส่วน L/FA ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1.3 อัตราส่วน L/FA ที่ต่ำกว่าค่าเหมาะสมจะเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ไรเซชันน้อยกว่า อัตราส่วน L/FA ที่สูงเกินกว่าค่าเหมาะสม จะก่อให้เกิดโพรงและรอยแตกในตัวอย่าง เมื่อให้พลังงานกระตุ้นต่อตัวอย่าง

อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 75°C อุณหภูมิที่ต่ำกว่าค่าเหมาะสมกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้น้อยกว่า ในขณะที่อุณหภูมิสูงเกินไปทำให้เกิดการแตกร้าวระดับไมโครเมตร การอบตัวอย่างในตู้อบนานเกิน 3 วัน ไม่เกิดความคืบหน้าทางเศรษฐศาสตร์ เพราะผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เกิดการพัฒนาน้อยมาก หลังจากการบ่ม 3 วัน ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าประมาณคงที่

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดของตะกอนดินประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งใช้ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10 โมล งานวิจัยในอนาคตควรศึกษากำลังอัดของตะกอนดินประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของ NaOH น้อยกว่า 10 โมล เพื่อลดต้นทุนการผลิตบล็อกประสานจีโอเพอร์ลิเมอร์



เอกสารอ้างอิง

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

#

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

#

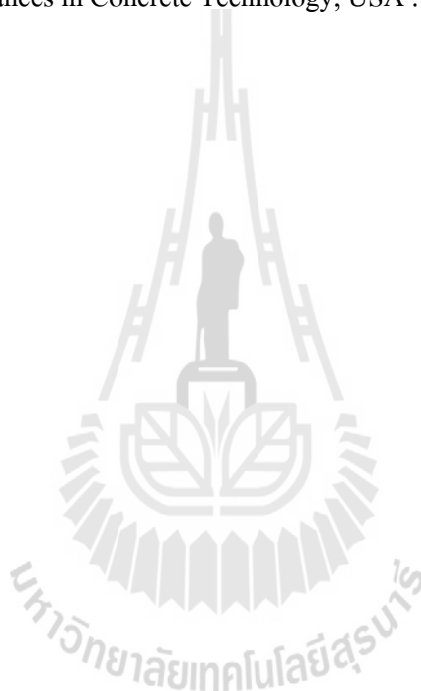
- Hardjito, D., Wallah, S.E. and Rangan, B.V., 2002, “**Study on Engineering Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete**”, Journal of the Australasian Ceramic Society, Vol. 38, No. 1, pp. 44-47.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., and Rangan, B.V. , 2003, “**The Effect of Mixture Composition and Curing Temperature on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete.**”, The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction , Bali, Indonesia, CMT 14-CMT 18.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V., “**Brief Review of Development of Geopolymer Concrete**”, American Concrete Institute, USA : Los Vegas, 25 May 2004, pp. 1-10.
- Hua, X. and Van Deventer, J.S.J., 1999, “**The Geopolymerization of Natural Alumino - Silicates**”, Proceedings: 2nd International conference on geopolymer, France : Paris, pp. 43-59.
- Lam, L., Wong, Y.L. and Poon, C.S., 2000, “**Degree of Hydration and Gel/Space Ratio of High- Volume Fly Ash/Cement Systems**”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 5, pp. 747-756.
- Maholtra, V.M., 2002, “**Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology**”, ACI Concrete International, Vol. 24, No.7, p. 22.
- Ohsawa, S., Asaga, K., Goto, S. and Daimon, M., 1985, “**Quantitative Determination of Fly Ash in the Hydrated Fly Ash – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ System.**” Cement and Concrete Research, Vol. 15, No.2, pp. 357-366.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T., 1999, “**Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future**”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 8, pp. 1323-1329.
- Patimapon Sukmak, Suksun Horpibulsuk, Shui-Long Shen, 2013, “**Strength Development in Clay-Fly Ash Geopolymer**”, Construction and Building Materials, p 566-574.
- Roy, D.M., 1999, “**Alkali-Activated Cements Opportunities and Challenges**”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 2, pp. 249-254.
- Songpiriyakij, S., 2548, “**Effect of Temperature on Compressive Strength of Fly Ash- Based Geopolymer Mortar**”, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548,ระยอง, หน้า CON30-CON34.

#

Swanepoel, J.C. and Strydom, C.A., 2002, “**Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material**”, Applied Geochemistry, Vol. 17, No. 8, pp. 1143-1148.

Van, J., Van, D. and Lukey, G.C., 2002, “**The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash and Kaolinite-Based Geopolymers**”, Chemical Engineering Journal, Vol. 89, No. 1-3, pp. 63-73.

Wallah, S.E., Hardjito, D., Sumajouw, D.M.J. and Rangan, B.V., 2004, “**Creep Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete**”, Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, USA : Las Vegas, pp. 49-60.



ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Chanprasert, P., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A. (2014). Strength and Microstructure of Water Treatment Sludge-Fly Ash Geopolymer. **First International Conference on Advance in Civil Engineering for Sustainable Development 2014**. Nakhon-Ratchasima, Thailand: Suranaree University of Technology



Strength and Microstructure of Water Treatment Sludge-Fly Ash Geopolymer

P. Chanprasert, S. Horpibulsuk & C. Suksiripattapong
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

P. Sukmak
Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

A. Arulrajah
Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia

ABSTRACT: A novel water treatment sludge-fly ash geopolymer is investigated in this research with the intention to develop an alternative green construction and building material, without the usage of Portland cement as a cementing agent. Two waste by-products namely water treatment sludge from the Bang Khen water treatment plant of the Metropolitan Water Work Authority of Thailand (MWA) and fly ash (FA) from the Mae Moh power plant of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) were used in this research. The liquid alkaline activator, L used was a mixture of sodium silicate solution (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide solution (NaOH). This article investigates strength microstructure of sludge-fly ash geopolymer. The various influential factors studied are; mixing ingredient (L content and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) and heat condition (temperature and duration). The scanning electron microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) analysis are undertaken to understand the role of influential factors on strength development. Test results show that the optimum heat temperature and duration for the optimum ingredient are 75°C and 72 hours, respectively. The higher heat temperature of 85°C causes the loss of moisture, which results in micro-cracks and strength reduction. The water sludge traditionally destined for landfill can be used in a sustainable manner as alternative aggregate to develop geopolymer masonry unit with compressive strengths met the specification of the Thailand Industrial Standards.

1 INTRODUCTION

Water production requires the extraction of water from natural sources. The water treatment process results in a muddy sludge by-product. The clarifier system employed in water treatment plants results in the sludge flocculating and falling in the bottom of the treatment tank. The liquid sludge is subsequently drained to sludge lagoons for disposal. The increasing demand of treated water produced by the Metropolitan Waterworks Authority of Thailand (MWA) and in similar water treatment plants worldwide, has resulted in increasing quantities of sludge by-products generated annually. For MWA, the water treatment sludge is generated with the maximum capacity of $300 \times 10^3 \text{ m}^3$ per day in the dry season and about $700 \times 10^3 \text{ m}^3$ per day in the wet season. With the continuous increase in water demand due to growing population in many developed and developing countries including Thailand, the quantity of water treatment sludge is subsequently increasing at ever increasing rate and hence the urgent need to find a sustainable reuse option for the growing stockpiles of sludge, which in the past have been disposed to landfills.

Alkali-activated alumino-silicate cement, known as 'geopolymers' has become increasingly popular in recent years as an environmental friendly alternative to ordinary Portland cement (Davidovits et al., 1991). Geopolymers are furthermore touted for their high performance (high strength and durability), low CO_2 emission and low energy consumption. Silica rich materials such as clay or kaolin (Buchwald and Kaps, 2001), fly ash, and bottom ash (Davidovits et al., 1999) can be used as a precursor to react with the liquid alkaline activator.

Sukmak et al. (2013a and b) previously investigated the possibility of using FA as a precursor and silty clay as aggregates to develop the clay-FA geopolymer brick. The 7-day strength of the clay-FA geopolymer is greater than 10 MPa, suitable as bearing masonry unit according to the Thailand Industrial Standard. The strength requirement is 2.5 MPa for non-bearing and 7.0 MPa bearing masonry units. It has been illustrated that the durability against sulfate attack of clay-FA geopolymer is better than that of clay-cement; i.e., there is no major change in the microstructure and pH of clay-FA geopolymer when exposed to sulfate solutions (Sukmak et al. 2014).

This research investigates strength characteristics of sludge-FA geopolymer to ascertain its perfor-

mance as a masonry unit. The sludge is used as aggregates without any additional sand, FA is used as a precursor and a mixture of NaOH and Na₂SiO₃ is used as a liquid alkaline activation. The influential factors include mixing ingredient (L content, Na₂SiO₃/NaOH ratio) and heat condition (temperature and duration). The microstructural observation of sludge-FA geopolymer is undertaken using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) techniques to understand the role of influential factors controlling the strength development. This research will enable sludge traditionally destined for landfill to be used in a sustainable manner as an aggregate in geopolymer masonry units, which is significant in term of engineering, economic and environmental perspectives.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Materials

The sludge was collected from the Bang Khen water treatment plant of the Metropolitan Waterworks Authority of Thailand. The sludge consists of 0.15, 99.65 and 0.2 percent of sand, silt and clay, respectively. The grain size distribution, mineral and chemical compositions of the sludge were obtained by X-ray Diffraction (XRD) and X-ray Fluorescence (XRF) analysis as shown in Table 1 and Figures 1 and 2, respectively. The main mineral components in the sludge are quartz, illite, hematite, calcite, calcium sulfate and mullite. The sludge is composed mainly of SiO₂ and Al₂O₃ in crystal form. The specific gravity is 2.61. The liquid and plastic limits are 64 and 0 percent, respectively and the sludge is thus classified as a non-plastic material. The compaction characteristics under modified Proctor energy (ASTM D 1557) are optimum moisture content (OMC) of 31.6%, and maximum dry unit weight (γ_{dmax}) of 12.5 kN/m³.

FA was obtained from the Mae Moh power plant of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) in the northern region of Thailand. Table 1 summarizes the chemical composition of FA using X-ray fluorescence (XRF). Total amount of the major components (SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃) are 67.31% and while the CaO content is 30.24% and 7.29%; therefore, it is classified as Class C fly ash. FA consists of mainly amorphous humps between 9.5 and 30.5°2 θ with some crystalline inclusions of mullite, hematite, calcite, calcium sulfate and quartz in region of 17-35° 2 θ (Figure 2). The peaks of calcite and calcium sulfate are determined, which are consistent with XRF results. Figure 1 shows the grain size distribution curve of FA, which was tested by laser particle size analysis. It is shown that the sludge particles are smaller than the FA ones. The average grain size of FA is 15.17 micron. The spe-

cific gravity of FA is 2.53. The morphology of the sludge and the FA is shown in Figure 3. The FA particles are fine and spherical whereas the sludge particles are irregular in shape. The liquid alkaline activator (L) is a mixture of Na₂SiO₃, which consists of 9% Na₂O and 30% SiO₂ by weight, and NaOH with a concentration of 10 molar.

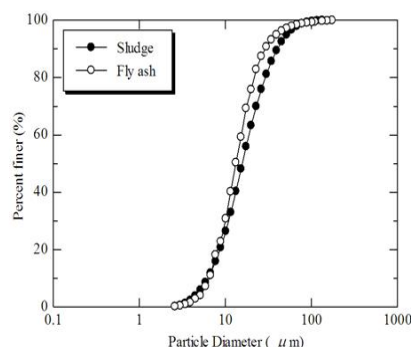


Figure 1. Grain size distribution of FA and sludge.

Table 1. Chemical composition of sludge and FA.

Chemical Composition	Sludge	FA
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

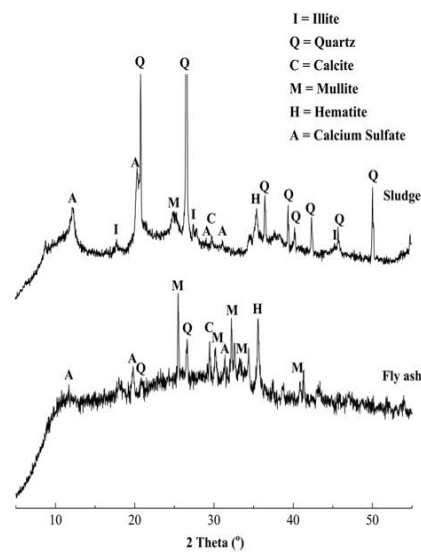
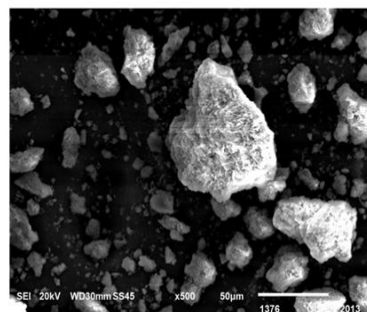
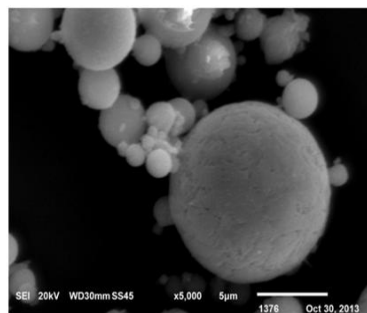


Figure 2. X-ray diffraction (XRD) pattern of sludge and FA



(a) Sludge



(b) Fly ash (FA)

Figure 3. Scanning electron microscopy (SEM) images of sludge and FA.

2.2 Sample preparation

The sludge-FA geopolymer sample is a combination of sludge, FA and liquid alkaline activator (Na_2SiO_3 and NaOH). The sludge/FA ratio was fixed at 70:30. The $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios were 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 and 50:50. The air-dried sludge and FA were mixed for 5 minutes in a mixer to ensure homogeneity of the mixture. The mixer was stopped and the mixture was activated by the liquid alkaline activator and mixed for additional 5 minutes. The mixture was then compacted under the modified Proctor energy. Once the compaction curves were obtained, the sludge-FA-L mixture at the various L/FA contents was statically compressed in a cylindrical mold with 50 mm in diameter and 100 mm in height. The compression was performed by a manual hydraulic jack. The samples were dismantled, wrapped within vinyl sheet and then heated at 65, 75 and 85°C respectively for durations of 24, 48, 72, 96 and 120 hours. After heating, the samples were subsequently cured at room temperature (27-30°C) until lapse of different curing times as planned. Compressive strengths of sludge-FA geopolymer samples were measured after 7 days of curing in accordance with ASTM D 1633.

The growth of the geopolymerization structures on the samples was illustrated using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). The XRD traces were used to provide fundamental information on geopolymerization structures. The sludge-FA geopolymer samples were carefully broken and small fragments were taken from the center for microstructure test. The scanning electron microscope (SEM) samples were frozen at -195°C by immersion in liquid nitrogen for 5 minutes and evacuated at a pressure of 0.5 Pa at -40°C for 5 days (Sukmak et al. 2013a and 2013b and Horpibulsuk et al. 2010). All specimens were coated with gold before SEM (JOEL JSM-6400) analysis. The XRD analysis using Cu X-ray tube was done on powdered samples and patterns were obtained by scanning at $0.1^\circ(2\theta)$ per min and at steps of $0.05^\circ(2\theta)$.

3 STRENGTH AND MICROSTRUCTURE

Figure 4 shows the relationships between unit weight and L/FA with different $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios. For a particular $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio, the compaction curve of sludge-FA-L mixture is typical of compacted soil. The unit weight of sludge-FA-L mixture increases with increasing L/FA until the maximum unit weight is attained at an optimum L/FA value. Beyond this optimum value, the unit weight decreases as L/FA increases. The optimum L/FA providing the maximum unit weight is found to be the same for all $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios tested and is approximately equal to 1.3. For a particular L/FA, the maximum unit weight increases with increasing $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ and then decreases after a certain $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$. The $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ of 80:20 exhibits the highest maximum unit weight.

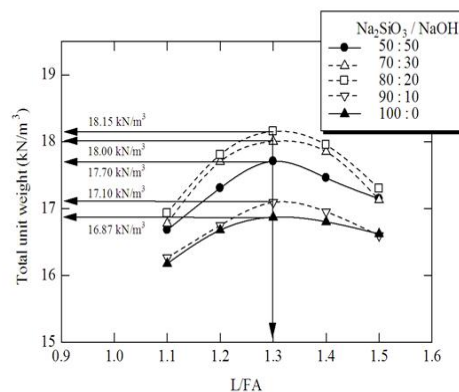


Figure 4. Compaction curves of the sludge-FA-L mixture.

Figure 5 shows the relationship between 7-day compressive strength and heat duration of sludge-FA geopolymer samples for different heat temperatures and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios at L/FA of 1.3. The compressive strength of sludge-FA geopolymer samples increases as heat duration increases until a threshold heat duration of 72 hours, after which the compressive strength remains almost constant for all L/FA ratios. This strength development is noted to be different from the study of Sukmak et al. (2013a and 2013b) clay-FA geopolymer, whereby the compressive strength increases to a peak value and subsequently decreases as the heat duration increases. The 7-day strengths of control sludge-FA geopolymer samples cured at room temperature are shown in figure as dash lines for comparison purpose. The 7-day strengths of samples cured at higher temperature are significantly higher than those cured at room temperature, which indicates that heating of sludge-FA geopolymer samples stimulates the geopolymerization reaction.

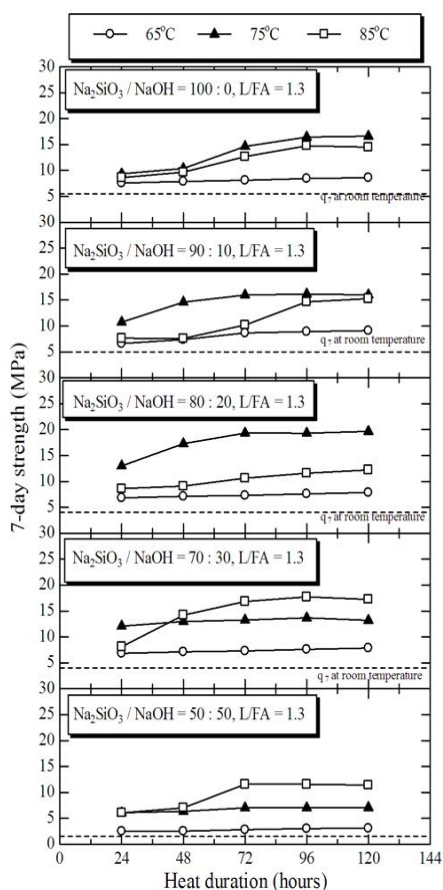


Figure 5. Effect of heat condition on 7-day strength of the sludge-FA geopolymer samples at L/FA ratio of 1.3.

The strength development in the sludge-FA geopolymer cured at different temperatures and curing times is significantly governed by the $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio. The sodium hydroxide solution (NaOH) dissolves silica and alumina oxide from FA and enhances the geopolymerization reaction with sodium silicate solution (Na_2SiO_3). The low amount of NaOH was not enough to dissolve silica and alumina oxide but the high amount of NaOH causes the micro-cracks on the FA particles due to strong base concentration (Sukmak et al. 2013a and 2013b). The test result shows that the highest compressive strength is found at the $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 80:20. For $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ greater than 80:20, the optimum heat temperature for sample preparation is 75°C. The lower temperature (65°C) is insufficient to stimulate the geopolymerization reaction whereas the higher temperature (85°C) may cause the immediate decrease of liquid in the sample and induce structural cracks on the sample (Sukmak et al. 2013a and 2013b). For $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ lower than 80:20, the optimum temperature for sample preparation is 85°C. This is implied that more heat energy is required for accelerating the geopolymerization reaction when lower alkaline activator is used.

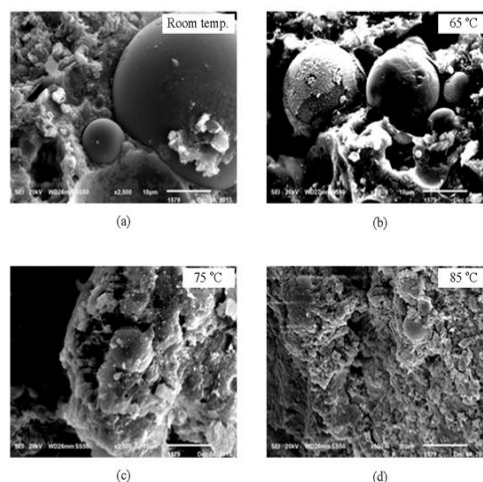


Figure 6. SEM images of the sludge-FA geopolymer samples at $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 80:20 and L/FA ratio of 1.3, cured for 7 days, and heated for 72 hours at different heat temperatures (room temperature, 65, 75 and 85 °C).

The effect of heat temperature on strength development in sludge-FA geopolymer is illustrated by SEM images and XRD pattern in Figures 6 and 7, respectively for 7-day cured geopolymer samples. The samples prepared at the optimum ingredient ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio = 80:20 and L/FA ratio = 1.3) and heated for 72 hours are compared at different heat temperatures (at room temperature, 65°C, 75°C and 85°C) in Figure 6. The chemical attack on the

FA surface for room temperature is insignificant (Figure 6a) while the etching on FA surface due to alkaline dissolution with some geopolymerization products is clearly seen for higher temperature of 65°C (Figure 6b). The significant geopolymerization products are clearly shown for 75°C, connecting sludge and FA particles and filling the pore spaces, resulting in a dense matrix (Figure 6c). Similarly, the broad and amorphous humps between 9.5 and 30.5°2θ, which indicate the alumino-silicate gel (geopolymerization products) including chabazite muscovite and gismondine (zeolites), are clearly observed for 75°C and 85°C while only chabazite and muscovite are detected for 65°C (Figure 7). Even though the geopolymerization products are significantly detected by XRD analysis, the overheating causes the micro-cracks due to the loss of the pore fluid (Zekkos et al. 2006 and Arulrajah et al. 2011) (Figure 6d). As such, the lowest and highest 7-day strengths of the sludge-FA geopolymer are found at room temperature and 75°C, respectively.

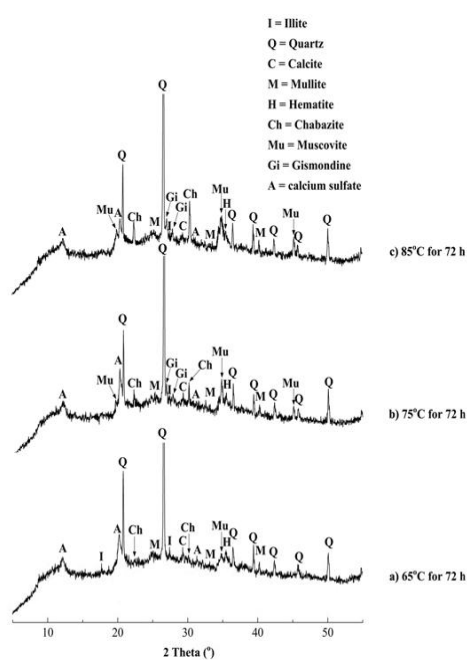


Figure 7. XRD peak intensities of sludge-FA geopolymer samples at $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 80:20 and L/FA ratio of 1.3, cured for 7 days, and heated for 72 hours at a) 65°C, b) 75°C and c) 85°C

4 CONCLUSIONS

The strength and microstructure of sludge-FA geopolymer is researched in this study. The influences of mixing ingredient (L/FA ratio and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio) and heat condition (heat temperature and duration) on strength development are

described by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) analysis. The key findings of the research are summarized as follows:

1. For a particular $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio, the compaction behavior of sludge-FA mixture is typical of compacted soil. The unit weight of sludge-FA geopolymer increases with increasing L/FA until the maximum unit weight is attained at an optimum L/FA. Beyond this optimum value, the unit weight decrease as L/FA increases. The maximum unit weight is attained at L/FA ratio of approximately 1.3 for all $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios.

2. At the optimum ingredient, the geopolymerization products increase with increasing heat temperature. The SEM image and XRD analysis show that the amount of geopolymerization products is more or less the same for heat temperatures of 75°C and 85°C. However, the loss of moisture in the sample heated at 85°C results in micro-cracks and hence strength reduction.

3. The geopolymerization process is primarily dependent upon the heat duration. Only the etching on the FA surface is found due to alkaline dissolution at early heat duration. The geopolymerization products increase with heat duration and subsequently weld clay and FA particles and fill up the pore space. The optimum heat temperature and duration for the optimum ingredient are 75°C and 72 hours.

5 ACKNOWLEDGEMENTS

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

6 REFERENCES

- Buchwald, A. and Kaps Ch. 2001. Property controlling influences on the generation of geopolymeric binders based on clay, Geopolymer (Melbourn Australia).
- Davidovits, J., Buzzi, L., Rocher, R., Gimeno, D., Marini, C. and Tocco, S. 1999. Geopolymeric cement based on low cost geologic material, results from the European Research project GEOCIS-TEM. Proceedings of the second international conference geopolymer: 83-96.
- Davidovits, J. 1991. Geopolymers. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 37:1633-1656.
- Sukmak, P., Horppibulsuk, S. and Shen, S.L. 2013a. Strength development in clay-fly ash geopolymer, Construction and building Materials, 40: 566-574.
- Sukmak, P., Horppibulsuk, S., Shen, S.L., Chindaprasirt, P. and Suksiripattqanapong C. 2013b. Factors influencing strength development

- in clay-fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials*, 40: 1125-1136.
- Sukmak, P., Silva, P.D., Horpibulsuk, S. and Chindapasirt, P. 2014. Sulfate resistance of clay-Portland cement and clay high-calcium fly ash geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001112.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y. and Suddeepong, A. 2010. Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay based on microstructural considerations, *Construction and Building Materials*, 24:2011-2021.
- Zekkos, D.P., Bray, J.D., Kavazanjian, Jr.E., Matasovic, N., Rathje, E.M. and Riemer, M.F. 2006. Unit weight of municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(10):1250-1261.
- Arulrajah, A., Disfani, M.M., Suthagaran, V. and Imteaz M. 2011. Select chemical and engineering properties of wastewater biosolids. *Waste management*, 31(12):2522-2526.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพิมพ์ศิลป์ จันทร์ประเสริฐ เกิดเมื่อวันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2532 เริ่มศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนอนุบาลเชียงใหม่ ชั้นประถมศึกษา 1-6 จังหวัดเชียงใหม่และเข้าศึกษาต่อที่โรงเรียนกวิละวิทยาลัย ระดับมัธยมศึกษา 1-6 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2555 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา วิชาปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ซึ่งได้นำความรู้ที่ใส่สอนมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี และในระหว่างศึกษาได้มีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติตามภาคผนวก ก

