

อิทธิพลของถ้ำลอยต่อกำลัังอืดของดินตะกอนประปาจีไอโพลีเมอร์

นายวัชระ โข่ค้ำพล

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

# อิทธิพลของเถ้าลอยต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

---

(รศ. ดร. นิตยา ชัย โขทัยชูช่างูร)

ประธานกรรมการ

---

(ศ. ดร. สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

---

(ผศ. ดร. ปรีชาพร โภษา)

กรรมการ

---

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วัชระ โชค้ำงพลุ : อิทธิพลของเ้าลอยต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาจีโพลิเมอร์  
(EFFECT OF FLYASH ON COMPRESSIVE STRENGTH OF SLUDGE  
GEOPOLYMER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

ตะกอนดินเ้าลอยจีโพลิเมอร์นี้จัดเป็นวัสดุเขียว (Green material) ชนิดหนึ่ง ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ตะกอนดินเป็นดินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปา เ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สารละลายอัลคาไลน์ (Activator, L) เป็นส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของเ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาจีโพลิเมอร์ จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของดินตะกอนประปาเ้าลอยจีโพลิเมอร์ คืออัตราส่วนผสมของดินตะกอนประปาและเ้าลอย เท่ากับ 50:50 อัตราส่วนผสมของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ NaOH เท่ากับ 90:10 อุณหภูมิในการให้พลังงานความร้อนที่ 85 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาในการให้พลังงานความร้อน 4 วัน อายุในการบ่ม 7 วัน ซึ่งให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สามารถชะซิลิกาและอลูมินาของดินตะกอนประปา (ไม่ใช่เ้าลอย) เพื่อทำปฏิกิริยาจีโพลิเมอร์ไรเซชันกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งให้กำลังอัดเท่ากับ 10 MPa

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

WATCHARA KHOKANGPLU : EFFECT OF FLYASH ON COMPRESSIVE  
STRENGTH OF SLUDGE GEOPOLYMER. ADVISOR : PROF SUKSUN  
HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

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 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and sodium hydroxide solution (NaOH). This research studies effect of fly ash on compressive strength of sludge geopolymer. Test results show that the optimum mixing ratio of sludge-fly ash geopolymer is sludge:fly ash ratio of 50:50,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ :NaOH ratio of 90:10, the heat temperature of  $85^\circ\text{C}$  and heat duration of 4 days, which gives maximum compressive strength. The sodium hydroxide solution (NaOH) can leach silica and alumina oxide from sludge in order to make the geopolymerization reaction with sodium silicate solution ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), which gives maximum compressive strength of 10 MPa.

School of Civil Engineering  
Academic Year 2013

Student's Signature \_\_\_\_\_  
Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการศึกษานี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ที่ปรึกษา ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำในการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ แนะนำแนวทางการทำงานเพิ่มเติม และให้ความเอาใจใส่ ความเมตตากรุณาถ่ายทอดความรู้แก่ศิษย์เป็นอย่างดี ทั้งยังปลุกฝังให้ผู้ศึกษามีความอดทน มีวินัย หมั่นค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติม ผู้ศึกษาจึงขอขอบพระคุณท่าน ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ให้แก่ผู้ศึกษา ซึ่งเป็นความรู้และประสบการณ์ที่มีค่าและมีประโยชน์ในการทำงานของผู้ศึกษาต่อไป ผู้ศึกษาขอระลึกถึงพระคุณบิดาและมารดา ที่ได้อบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี รักการศึกษา และหมั่นหาความรู้เพิ่มเติม และไม่ย่อท้อต่อปัญหาและอุปสรรคต่างๆ และท้ายสุดขอขอบคุณเพื่อนๆ และนักศึกษาทุกคนที่คอยช่วยเหลือในเรื่องการทดลองและให้กำลังใจตลอดการทำงานศึกษาครั้งนี้เป็นอย่างดี

วัชระ โข่ค้างพลู

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของงานวิจัย.....	4
2.1 ทฤษฎี สมมติฐาน.....	4
2.2 แก่ลอย.....	5
2.3 วัสดุพอลิไซลน.....	6
2.4 ปฏิกริยาไฮเดรชันและปฏิกริยาพอลิไซลน.....	6
2.5 ทบทวนวรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	10
3 วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล.....	14
3.1 บทนำ.....	14
3.2 จัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	16
3.3 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปา และแก๊ล่านหิน.....	17
3.4 ทดสอบกำลังอัดในแกนเดี่ยวของก้อนตัวอย่างดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์.....	17
4 ผลทดสอบและการวิเคราะห์.....	19
4.1 บทนำ.....	19
4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปาและแก๊ลอย.....	10
4.3 กำลังอัดแกนเดี่ยวของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์.....	22

5	บทสรุป.....	28
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	28
5.2	ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป.....	28
	เอกสารอ้างอิง.....	29
	ประวัติผู้เขียน.....	32

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	7
2.2	9
3.1	16
4.1	21



## สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 Polycondensation of Na-poly(sialate-disiloxo) albite framework.....	5
3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงาน.....	15
3.2 ลักษณะก้อนตัวอย่าง.....	17
3.3 การทดสอบกำลังอัดในแกนเดียวของก้อนตัวอย่างดินตะกอนประปาจิโอโพลิเมอร์.....	19
4.1 การกระจายขนาดของอนุภาคดินตะกอนและเถ้าลอย.....	20
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนระหว่างส่วนผสมของ Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> และ NaOH ต่อ ส่วนผสมของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย(L/B).....	23
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วัน ต่อระยะเวลาในการให้พลังงาน ความร้อนที่อุณหภูมิ 65,75,85 และ 95 องศาเซลเซียส ของอัตราส่วนผสมดินตะกอน ประปาต่อเถ้าลอย เท่ากับ 50:50.....	25
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วัน ต่อระยะเวลาในการให้พลังงาน ความร้อนที่อุณหภูมิ 65,75,85 และ 95 องศาเซลเซียส ของอัตราส่วนผสมดินตะกอน ประปาต่อเถ้าลอย เท่ากับ 70:30.....	27
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วัน ต่อระยะเวลาในการให้ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ 65,75,85 และ 95 องศาเซลเซียส ของอัตรา ส่วนผสมดินตะกอนประปาต่อเถ้าลอย เท่ากับ 100:0.....	28

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุส่วนประกอบที่สำคัญของคอนกรีตและมอร์ตาร์ ซึ่งได้มาจากกระบวนการเผา สารซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ แคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก ( $\text{CaO}$ ) โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1400 – 1600 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดให้ละเอียดตามความต้องการ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานสูงมากในกระบวนการผลิต เริ่มตั้งแต่การระเบิดวัสดุต้นแหล่ง การย่อย การลำเลียง การเผา ตลอดจนการบดให้ละเอียด อนึ่งผลกระทบจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงมีการนำวัสดุทดแทนมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งได้แก่ วัสดุปอชโซลาน ที่เป็นผลพลอยได้ (By product) จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและมอร์ตาร์ให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามวัสดุปอชโซลานต่าง ๆ นั้นไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานด้วยตัวมันเองจึงนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้แค่เพียงบางส่วนเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่าจีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบออสซิลาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่า สารประกอบจีโอโพลิเมอร์ิกอนินทรีย์ Glukhovsky (1950) จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบ เกิด ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสซิลาน (Amorphous) ซึ่งมีองค์ประกอบของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นหลัก โดยจะถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  หรือ  $\text{KOH}$  แล้วใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัดได้ โดยโครงสร้างของ จีโอโพลิเมอร์นี้จะแตกต่างจากโครงสร้างของการเกิดการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์อย่างสิ้นเชิง Davidovits (1970)

Geopolymer Technology สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การนำไปใช้ในงานก่อสร้างหรืองานคอนกรีตและมอร์ตาร์ งานตกแต่ง ตลอดจนงานอุตสาหกรรมไฟฟ้า เครื่องบิน ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านนี้เริ่มนำมาใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศแล้ว เช่น งานคอนกรีตและมอร์ตาร์สำหรับซ่อมผิวทางหรือซ่อมโครงสร้างต่าง ๆ เนื่องจากวัสดุ Geopolymer บางตัวสามารถให้กำลังอัดได้ในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งสามารถใช้งานได้

ภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมง การนำไปใช้ในงานอื่นๆ เช่น การทำอิฐทนไฟ การทำวัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงาม การนำไปใช้กับอุตสาหกรรมเครื่องปั้น และอุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นต้น

การผลิตน้ำประปาจะใช้น้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งเจือปนโคลนดินตะกอน กระบวนการผลิตน้ำประปามีวิธีการทำให้ตะกอนจับตัวกันและตกลงสู่ก้นบ่อ (Clarifiers) แล้วจึงทำการระบายตะกอนเหลวออกไปยังลานตากตะกอน (Sludge Lagoons) ในพื้นที่ประมาณ 252 ไร่ เพื่อรอการกำจัดต่อไป การตากตะกอนที่ลานตากตะกอนนั้นจะอาศัยสภาพแวดล้อมจากธรรมชาติ เช่น กระแสลม แสงแดด และอุณหภูมิ เป็นปัจจัยช่วยให้น้ำระเหยออกจากเนื้อดินตะกอน และใช้รถเครื่องจักรกลพลิกและกลับหน้าดินตะกอนเพื่อเร่งการระเหยของน้ำในมวลดินที่อยู่ชั้นล่าง เมื่อดินตะกอนมีสภาพที่แห้งแล้วจะมีลักษณะที่ร่วนซุยสะดวกต่อการขนย้ายออกจากพื้นที่โรงงานไปใช้ประโยชน์ในการถมที่ดินในรัศมีโดยรอบโรงงานผลิตน้ำบางเขนและเขตปริมณฑล ตะกอนแห้งเหลือทิ้งเฉลี่ยมีจำนวน 247 ตันต่อวัน และในบางช่วงมีมากถึงวันละ 300 ตันในฤดูแล้ง และ 700 ตันในฤดูฝน (กรมกริข และคณะ, 2553) เนื่องจากปริมาณการผลิตน้ำประปายังคงมีอย่างสม่ำเสมอต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ปริมาณดินตะกอนประปาจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระบวนการผลิต ปัจจุบันลานตากตะกอนด้วยวิธีธรรมชาติของโรงงานผลิตน้ำบางเขนมีพื้นที่จำกัดสามารถรองรับและตากตะกอนเพื่อรอการลำเลียงขนย้ายได้ประมาณ 2 เดือน ทำให้โรงงานผลิตน้ำบางเขนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องตระหนักถึงปัญหาปริมาณของตะกอนและแนวทางการกำจัดตะกอนที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาผลิตวัสดุก่อสร้าง (Construction material) ชนิดจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) โดยการผสมดินตะกอนกับสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) และเถ้าถ่านหิน (เถ้าลอย) และให้ความร้อนในปริมาณที่เหมาะสม วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติรับกำลังอัดและมีความคงทนสูง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 หาอัตราส่วนผสม (ระหว่างดินตะกอนประปา เถ้าถ่านหิน และสารกระตุ้น) และพลังงานความร้อน (อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่ม) ที่เหมาะสม เพื่อผลิตบล็อกอิฐโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อใช้เป็นโครงสร้างรับแรงอัด

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ดินตะกอนที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินตะกอนประปาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน
- 1.3.2 ใ้ถ้ำ่านหินที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 1.3.3 สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ  $\text{NaOH}$  ในอัตราส่วนผสม 50:50, 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 และความเข้มข้นของ  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 10 โมล
- 1.3.4 อัตราส่วนระหว่างส่วนผสมดินตะกอนประปาต่อใ้ถ้ำ่านหินมีค่าเท่ากับ 50:50 , 70:30 และ 100:0
- 1.3.5 อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างจะมีค่าเท่ากับ 65, 75, 85, 95 องศา ในระยะเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง
- 1.3.6 ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง (ก่อนทดสอบกำลังอัด ) จะทดสอบที่ 7 วัน
- 1.3.7 ก้อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์รูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร
- 1.3.8 การทดสอบกำลังอัด ทำตามมาตรฐาน ASTM

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 อัตราส่วนผสม (ระหว่างดินตะกอนประปา ใ้ถ้ำ่านหิน และสารกระตุ้น) และ พลังงานความร้อน (อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่ม) ที่เหมาะสมเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบการผลิตบล็อกจีโอโพลิเมอร์ (Manufacturing design method) ที่มีประสิทธิภาพ

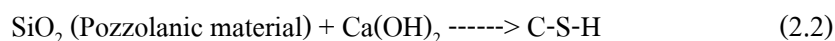
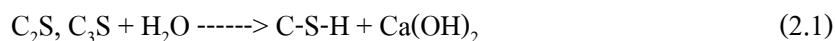
## บทที่ 2

### ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของการวิจัย

#### 2.1 ทฤษฎี สมมติฐาน

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1970 Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นหลัก โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นส่วนใหญ่ และถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  หรือ  $\text{KOH}$  เมื่อให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการก่อตัวแข็งตัวและให้กำลังอัด

ลักษณะโครงสร้างของไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอโพลิเมอร์นั้นแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวคือโครงสร้างไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารเชื่อมประสานหลักที่เรียกว่า คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลผลิตหลักจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Portland cement hydration) ดังสมการที่ 2.1 ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต ซีเมนต์เพสต์ หรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว เมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ  $\text{SiO}_2$ ) มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ดังสมการที่ 2.2 ปฏิกิริยานี้เองจะเพิ่มผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (C-S-H) ส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น



จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน จีโอโพลิเมอร์เกิดจากวัตถุดิบที่มีซิลิเกต (Si) อลูมิเนียม (Al) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก สารละลายที่มี



## 2.3 วัสดุปอซโซลาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า โดยใช้ตะกอนดินประปาเป็นวัสดุดิบ ตะกอนดินประปาจะถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 450 ถึง 600 องศาเซลเซียส เพื่อลดความสามารถในการดูดน้ำและแสดงคุณสมบัติปอซโซลาน วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan material) สามารถใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตได้ โดยใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อจุดประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้นหรือลดต้นทุนของคอนกรีตลง วัสดุปอซโซลานเมื่อนำไปผสมกับคอนกรีตจะช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสดให้มีความสามารถเทได้สูง มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงอายุปลาย และมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีคุณสมบัติทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนจากสารซัลเฟต

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

## 2.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

สารประกอบหลักในเม็ดปูน ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate,  $C_3S$ ) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate,  $C_2S$ ) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate,  $C_3A$ ) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite,  $C_4AF$ ) คุณสมบัติของสารประกอบทั้ง 4 ชนิดนี้แสดงดังตารางที่ 1 (เริงศักดิ์และอภิศักดิ์, 2549)

ตารางที่ 2.1 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เร็กซ์คัลด์และอ็อกคัลด์, 2549)

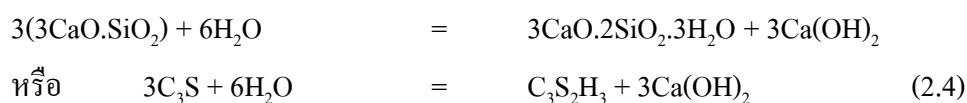
คุณสมบัติ	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน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

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์แสดงได้ดังนี้

#### ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S และ C<sub>2</sub>S)

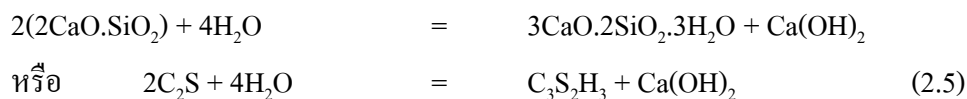
คัลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด “คัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>)” ประมาณร้อยละ 15 ถึง 25 และสารประกอบ “คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ 3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O หรือ C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub> หรือ CSH)” ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรง ดังสมการต่อไปนี้

#### สมการของ C<sub>3</sub>S





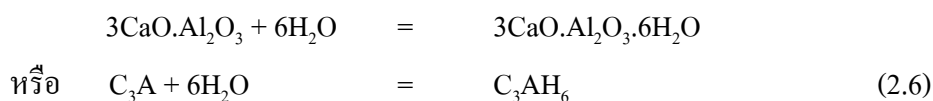
### สมการของ $C_2S$



ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะได้ Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ และมีรูพรุน (CSH) โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์  $Ca(OH)_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นด่างมาก (pH ประมาณ 12.5)

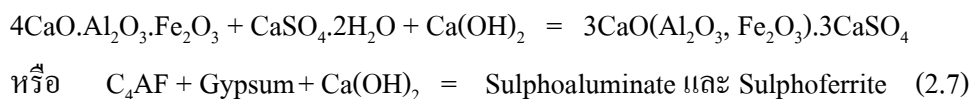
### ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ )

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  เกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้



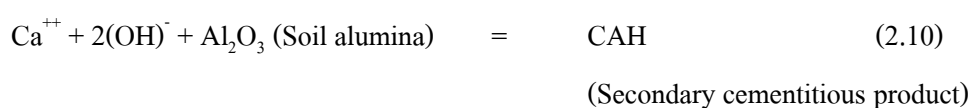
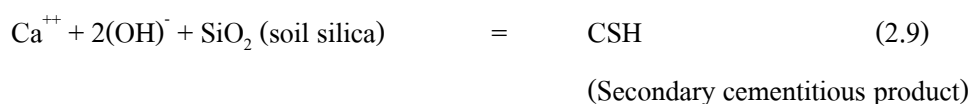
### ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ )

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



สมการที่ (2.4) ถึง (2.7) แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน (Cementitious products) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกแข็ง แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ pH ของน้ำในโพรงคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น (มีความเป็นด่างสูง) และทำปฏิกิริยาหลอมละลายกับซิลิกาและอลูมินาในวัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยานี้มีลักษณะเช่นเดียวกับปฏิกิริยาระหว่างกรดอ่อนกับด่างเข้มข้น ซิลิกาและอลูมินาที่หลอมละลายจะทำปฏิกิริยาอย่างช้ากับอ็อกไซด์ของแคลเซียมอิสระ (Free lime) ทำให้เกิดการแข็งตัวเพิ่มขึ้น

ตามอายุบ่ม ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) และแสดงได้ดังสมการทางเคมี ดังนี้



#### การประมาณราคาค่าต้นทุนต่อหน่วย

การประมาณราคาค่าต่อหน่วยเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งในการตัดสินใจการลงทุนผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสจากตะกอนดินประปา วัตถุประสงค์ที่จำเป็นในการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสประกอบด้วยตะกอนดินประปา (ไม่มีราคา) น้ำ ปูนซีเมนต์ และสารเพิ่มฟอง ตารางที่ 2 แสดงรายการประมาณต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตคอนกรีตมวลเบาขนาด 20x60x7.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมเท่ากับ 1:2.75 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และคนงาน 1 คน สามารถผลิตคอนกรีตมวลเบาได้ประมาณ 80 ก้อน (ธุรกิจรายย่อย) ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นได้ว่าราคาในการผลิตต่อหน่วยเท่ากับ 15.9 บาท ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาของบริษัท QCON มีราคาขายที่สูงกว่าเกือบสองเท่า (ราคา 27 บาทต่อหน่วย)

ตารางที่ 2.2 รายการประมาณต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคา (บาท)
มวลรวม (ตะกอนดินประปา + ทราย)	3438	กรัม	3.5
น้ำ	650	กรัม	0.65
ปูนซีเมนต์	1250	กรัม	3.75

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคา (บาท)
สารเพิ่มฟอง	100	กรัม	2.00
ค่าแรง	-	-	3.75
ค่าไฟฟ้า	-	-	2.00
ค่าดำเนินการ	-	-	0.25
ราคาค่าต้นทุนรวม	-	-	15.9

## 2.5 ทบทวนวรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ และพบว่าการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ประมาณ 0.20 ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ต่ออะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 3.50-4.50 น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ต่ออะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เท่ากับ 0.80-1.20 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ และพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) มีโครงสร้างแบบซีโอลิติก (Zeolitic) การพัฒนาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์ ดังจะเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน และอุตสาหกรรมพลาสติกต่าง ๆ จีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกกะปาสกาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์ จีโอโพลิเมอร์จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบ (มีความแข็งแรง หดตัวน้อย ทนความเย็น และต้านทานการสึกกร่อน) สำหรับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนทานการสึกกร่อน เมื่อคำนึงถึงต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีคุณค่าเหนือกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูงและเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  $\text{CO}_2$  ในปริมาณต่ำ

Hardjite et al. (2003) ศึกษาผลกระทบของส่วนผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Concrete) ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 0.095 และ 0.120 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อโซเดียมออกไซด์และน้ำต่อจีโอโพลิเมอร์มีอิทธิพลต่อกำลังอัดของคอนกรีตจีโอโพลิเมอร์ กำลังอัดจะลดลงเมื่อน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังอัดสูงขึ้นในระยะเวลาอัน

สั้น งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเถาถ่านหินชนิดแคลเซียมมีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น แต่เถาถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอลูมิเนียมซิลิเกตโพลิเมอร์ สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถาถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลต์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์

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

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและอัตราส่วนผสมต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากดินขาวเผา (Metakaolin) ซึ่งเป็นดินที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับสารละลายที่มีความเป็นด่างได้ดี และได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายปูนซีเมนต์ เมื่อผสมดินขาวเผากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca(OH)}_2$  จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล ผลการศึกษาพบว่าถ้าความเข้มข้นของสารกระตุ้นสูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสม การก่อตัวจะช้าลง การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ก่อตัวได้เร็วขึ้น อัตราส่วนระหว่างดินขาวเผาต่อ  $\text{Ca(OH)}_2$  ไม่มีผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์

Chindaprasirt et al. (2006) ได้ทดลองใช้เถาถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยควบคุมการไหลผ่าน (Flow) ให้เท่ากับร้อยละ  $110 \pm 5$  ถึง  $135 \pm 5$  ผลการศึกษาพบว่าค่าการไหลผ่านแปรผันตามอัตราส่วน

$\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$  กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 10-65 เมกกะปาสคาล อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$  ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.67-1.0 การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ จาก 10 โมล เป็น 20 โมล ไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน การเติมน้ำประมาณร้อยละ 2-8 และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) จะช่วยให้ความชื้นเหลือคืบขึ้นได้ และช่วยให้เทแบบได้ดี แต่กำลังอัดก็จะมีค่าลดลง

Bakharev (2004) ศึกษาความคงทนของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer paste) ที่ใช้เถ้านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-linked aluminosilicate polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นสารกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นสารกระตุ้นอย่างเดียว

Ohsawa et al. (1984) ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้านหินในไฮเดรตซีเมนต์โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรด เช่น กรดไฮดรอกลอลิก (HCl), กรดพิคติก (Picric acid) และกรดซาลิซิลิก (Salicylic acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ผลการทดสอบพบว่าการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้น การใช้กรดพิคติก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 การใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดซาลิซิลิกอย่างมาก

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับไมโคร (Microstructure) ของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ขณะเกิดปฏิกิริยากับต่างของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้านหิน และพบว่าโดยส่วนมากไมโครของเถ้านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อผสมกับต่าง ผิวของเถ้านหินจะถูกกัดเป็นรูและขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ เถ้านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา

ในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ซึ่งจะมีปริมาณมากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหิน และระยะเวลาการบ่ม การศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมจีโอโพลิเมอร์และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นผืนกคล้ายกระจกและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

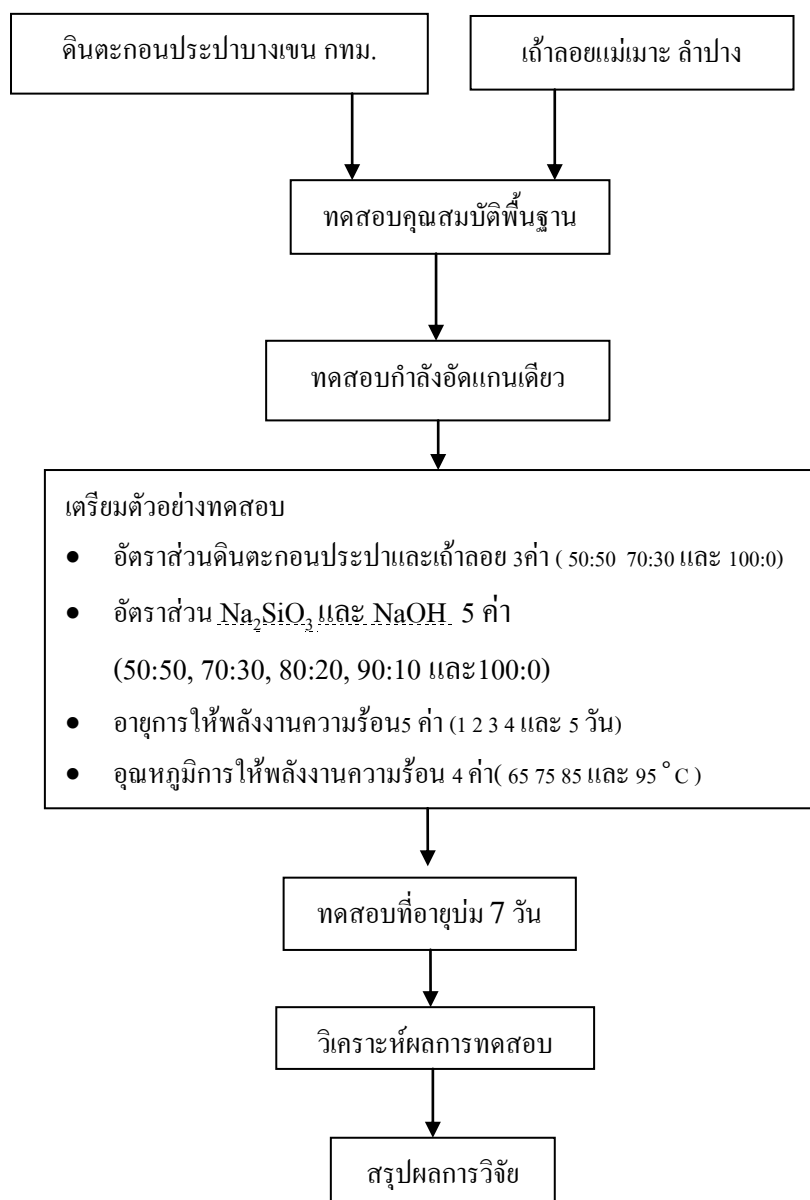
งานวิจัยล่าสุดในการทำจีโอโพลิเมอร์จากดินตะกอน (Sukmak and Horpibulsuk, 2012) แสดงให้เห็นว่าดินตะกอนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับเถ้าถ่านหินในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังอัดและความคงทนสูง (กำลังอัดมีค่าสูงถึง 12 ถึง 14 MPa) ผลการศึกษาแสดงว่าปริมาณน้ำเหมาะสม (Optimum water content) ในการผลิตบล็อกจีโอโพลิเมอร์ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเถ้าถ่านหิน และปริมาณและความเข้มข้นของสารกระตุ้น ส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำดินตะกอนจีโอโพลิเมอร์คือ อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$  เท่ากับ 0.7 และอัตราส่วนระหว่างสารกระตุ้นต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 0.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัยและสถานที่ทำการทดลอง / เก็บข้อมูล

##### 3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและอธิบายกลไกควบคุมกำลังอัดของดินตะกอนประปาที่ได้จากโรงงานผลิตน้ำบางเขน กรุงเทพมหานคร ถ้าวัดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางนำดินตะกอนประปามาผสมกับถ้าวัดด้วยอัตราส่วนผสม 50:50 70:30 และ 100:0 และนำมาผสมกับอัตราส่วนผสมของ NaOH และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ด้วยอัตราส่วนผสมต่าง ๆ เพื่อหาค่ากำลังอัดแกนเดียว คณะผู้วิจัยทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง (บางส่วนได้สรุปมาในข้อเสนอโครงการนี้แล้ว) ซึ่งจะรวมไปถึงทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่ใช้ในการกำหนดส่วนผสมระหว่างดินตะกอนประปา ถ้าว่านหิน และสารกระตุ้น รวมทั้งพลังงานความร้อนที่ให้กับบล็อกจีโอโพลิเมอร์ และใช้ในการทดสอบกำลังอัดและความคงทน ผลการทบทวนวรรณกรรมวิจัยทั้งหมด (ทั้งในและต่างประเทศ) รวมทั้งรายการเอกสารอ้างอิงจะถูกสรุปไว้ในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ แผนงานวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงแผนภูมิได้ดังรูปที่ 3.1 วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3.1 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงาน

ตารางที่ 3.1 การทดสอบและจำนวนตัวอย่าง

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
อัตราส่วนผสมระหว่างดินตะกอนต่อเถ้าลอย	3	50:50 70:30 และ 100:0
อัตราส่วนผสมระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ : $\text{NaOH}$	5	50:50, 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0
อุณหภูมิ	4	65°C, 75°C, 85°C, 95°C
อายุบ่มต่อ 1 อุณหภูมิ	5	24, 48, 72, 96 และ 120
จำนวนตัวอย่าง	3	ชุดละ 3 ตัวอย่าง



### 3.2 จัดเตรียมวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างดิน ดินตัวอย่างเป็นดินตะกอนประปาที่ได้จากการประปานครหลวง เขตบางเขน

คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (Basic property) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานของดินจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด และชนิด ของดิน ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินดังนี้

- 1) ปริมาณความชื้นเริ่มต้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2216
- 2) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กลงกว่า 4.75 มิลลิเมตร) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854
- 3) จีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และ พิกัดพลาสติก (Plastic limit) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318
- 4) การเตรียมตัวอย่างดิน

ดินตัวอย่างจะถูกตากให้แห้ง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบ ก่อนนำเข้าเครื่องบดละเอียด (ดินที่ผ่านการตากให้แห้งจะมีความชื้นเริ่มต้นที่น้อยมาก ประมาณร้อยละ 0) นำดินตัวอย่างที่ได้เก็บใส่ภาชนะที่ปิดมิดชิด

#### 5) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การเตรียมสารละลาย NaOH เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมล เริ่มต้นจากการชั่งสาร NaOH น้ำหนัก 400 กรัม ละลายสารกับน้ำกลั่นในบีกเกอร์ เทสารที่ละลายลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 ml ล้างบีกเกอร์ด้วยน้ำกลั่นแล้วเทลงในขวดวัดปริมาตร เขย่าขวดวัดปริมาตรเพื่อให้สารละลายผสมกัน ตั้งขวดปริมาตรเพื่อให้อุณหภูมิของสารละลายลดลง แล้วจึงเติมน้ำกลั่นที่ละน้อยให้ถึงขีดบอกปริมาตร เขย่าอีกครั้งเพื่อให้สารละลายผสมกัน ถ่ายลงภาชนะมีฝาปิด ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

ในงานวิจัยนี้ กำลังอัดของบล็อกจีโอโพลิเมอร์ที่ต้องการต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานสำหรับบล็อกรับน้ำหนักในงานโครงสร้างอาคาร สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ NaOH ในอัตราส่วนผสม 50:50, 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10 โมล

อัตราส่วนระหว่างส่วนผสมดินตะกอนประปาต่อเถ้าลอยคาดว่าจะมีค่าเท่ากับ 50:50, 70:30, 100:0 อุณหภูมิในการบ่มตัวอย่างคาดว่าจะมีค่าเท่ากับ 65, 75, 85, 95 °C ในระยะเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง (ก่อนทดสอบกำลังอัด) จะทดสอบที่ 7 วัน

เมื่อได้อายุบ่มที่กำหนด ก่อนตัวอย่างดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์จะถูกนำมาทดสอบกำลังอัด

### 3.3 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปา และเถ้าถ่านหิน

ก่อนที่จะทำการผลิตก้อนตัวอย่างดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ผู้วิจัยจะทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัตถุดิบทั้งหมด ซึ่งได้แก่ ดินตะกอนประปา และเถ้าถ่านหิน คุณสมบัติพื้นฐานประกอบด้วยการกระจายขนาดของเม็ดดิน ความถ่วงจำเพาะ ชีดจำกัดเหลว ชีดจำกัดพลาสติก รูปถ่ายขยายอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมี



รูปที่ 3.2 ลักษณะก้อนตัวอย่าง

### 3.4 ทดสอบกำลังอัดในแกนเดียวของก้อนตัวอย่างดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์

การทดสอบกำลังกดในแกนเดียวมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความแข็งของก้อนตัวอย่างดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์ โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ผลที่ได้จะระบุถึงผลกระทบของอัตราส่วนผสมและพลังงานความร้อนต่อค่ากำลังอัดของก้อนตัวอย่างดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์ ผลที่ได้จากขั้นตอนนี้จะช่วยในการกำหนดส่วนผสมและพลังงานความร้อนที่เหมาะสมในขั้นต่อไป



รูปที่ 3.3 การทดสอบกำลังอัดในแกนเดียวของก้อนตัวอย่างดินตะกอนประปาจิโพลิเมอร์

## บทที่ 4

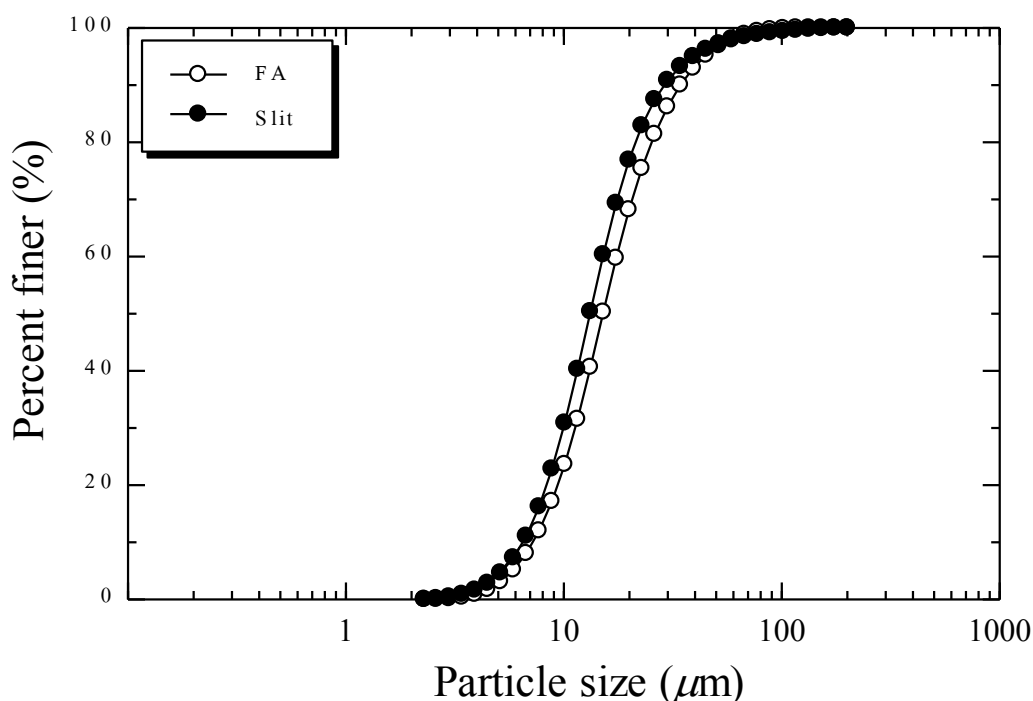
### ผลทดสอบและการวิเคราะห์

#### 4.1 บทนำ

ผลการทดสอบประกอบด้วยสองส่วนหลัก ส่วนแรกคือผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยแม่เมาะและดินตะกอนประปา การทดสอบประกอบไปด้วยการกระจายขนาดของอนุภาค พิกัด Atterberg's ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินทั้งสองชนิด และการบดอัดตัวอย่าง ส่วนที่สองจะนำเสนอผลทดสอบกำลังอัดที่ อายุบ่ม อุณหภูมิ และสัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน

#### 4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย

ดินตัวอย่างทดสอบเป็นดินตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพมหานคร และเถ้าลอยเก็บจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ดินตะกอนประปาและเถ้าลอยมีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มม.) ซึ่งมีลักษณะการกระจายขนาดเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 4.1



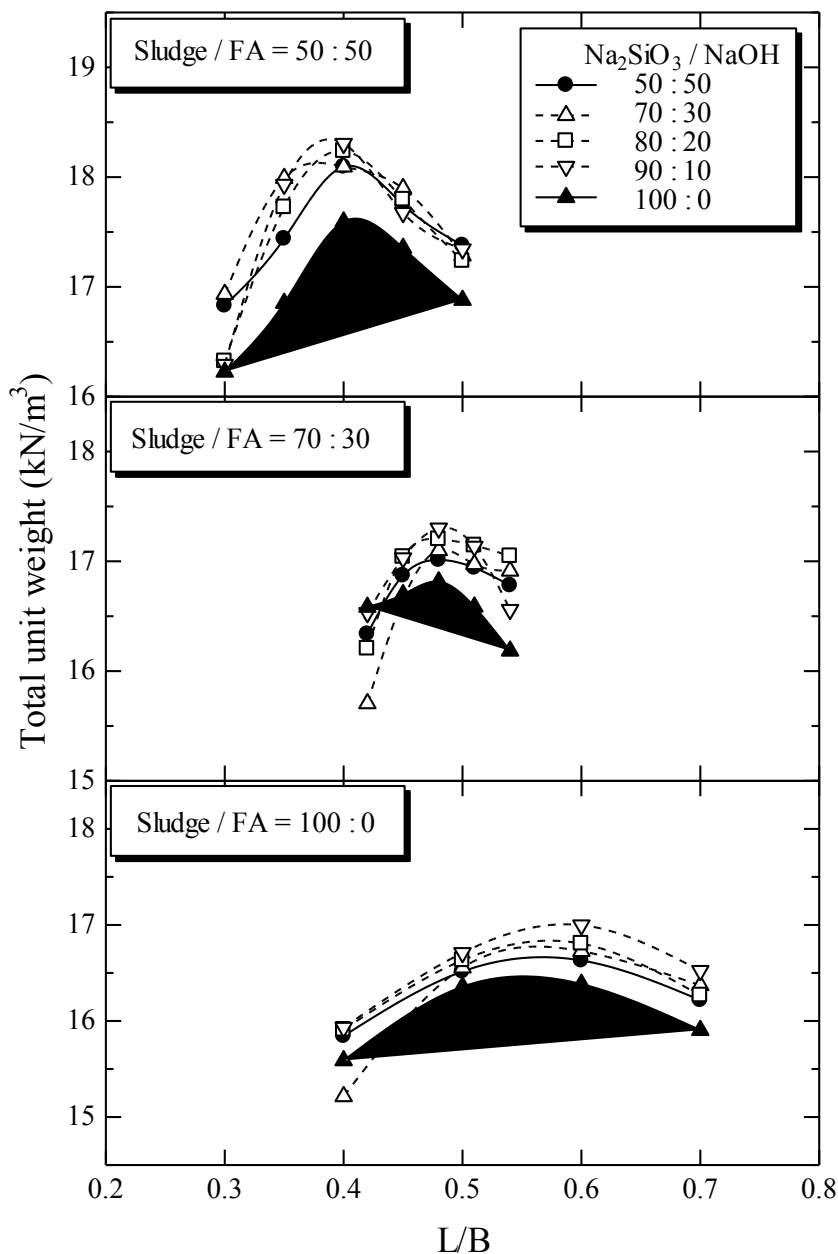
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของอนุภาคดินตะกอนและเถ้าลอย

ผลขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างดินตะกอนประปาและเถ้าลอย สามารถวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer โดยองค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินตะกอนประปาและเถ้าลอย จากตารางที่ 4.1 พบว่าเถ้าลอยมีค่า  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 49.32 และ 12.96 ตามลำดับ และ ดินตะกอนประปามีค่า  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 41.03 และ 14.57 ตามลำดับ จากผลทดสอบพบว่าดินตะกอนประปามีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ใกล้เคียงกับเถ้าลอย เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ  $2.53 \text{ KN/m}^3$  และ ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าดินตะกอนซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2.61 \text{ KN/m}^3$  ผลการทดสอบหาค่า พิกัด Atterberg's พบว่าดินตะกอนประปาและเถ้ามีค่า LL เท่ากับ 69 จากผลการทดสอบสามารถจำแนกชนิดของดินตะกอนได้เป็น

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย

Chemical composition (%)	Sludge	Fly ash
$\text{SiO}_2$	41.03	49.32
$\text{Al}_2\text{O}_3$	14.57	12.96
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	18.60	15.64
CaO	0.39	5.79
MgO	17.13	2.94
$\text{SO}_3$	0.59	7.29
$\text{Na}_2\text{O}$	N.D.	2.83
$\text{K}_2\text{O}$	6.85	2.83
LOI	0.84	7.29

จากผลการทดสอบการบดอัดของดินกับสารผสมดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินตะกอนประปากับเถ้าลอยเท่ากับ 50:50 ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด และการลดปริมาณเถ้าลอย (ร้อยละ 30 และ 0) จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของดินบดอัดมีค่าลดลง อาจกล่าวได้ว่า ตัวแปรที่มีผลต่อความหนาแน่นคือ ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ แต่อีกปัจจัยหนึ่งคืออนุภาคเถ้าลอยมีลักษณะกลมดิ่งนั้นเมื่อทำการบดอัด อนุภาคเม็ดดินสามารถเคลื่อนตัวชิดกันได้มากขึ้นกว่าปกติทำให้สามารถบดอัดได้ดีขึ้น ถึงแม้ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยจะน้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินตะกอนประปา นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ  $\text{NaOH}$  มีผลต่อความหนาแน่น ผลการทดสอบพบว่าที่สัดส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 90:10 มีค่าความหนาแน่นสูงสุดทั้ง 3 อัตราส่วนของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย แต่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ  $\text{NaOH}$  ไม่มีผลต่อค่า L/B ที่เหมาะสม ค่า L/B ที่เหมาะสมให้ค่าใกล้เคียงกันมีค่าเท่ากับ 0.4 , 0.48 และ 0.6 สำหรับ FA เท่ากับร้อยละ 50 , 30 และ 0 ตามลำดับ



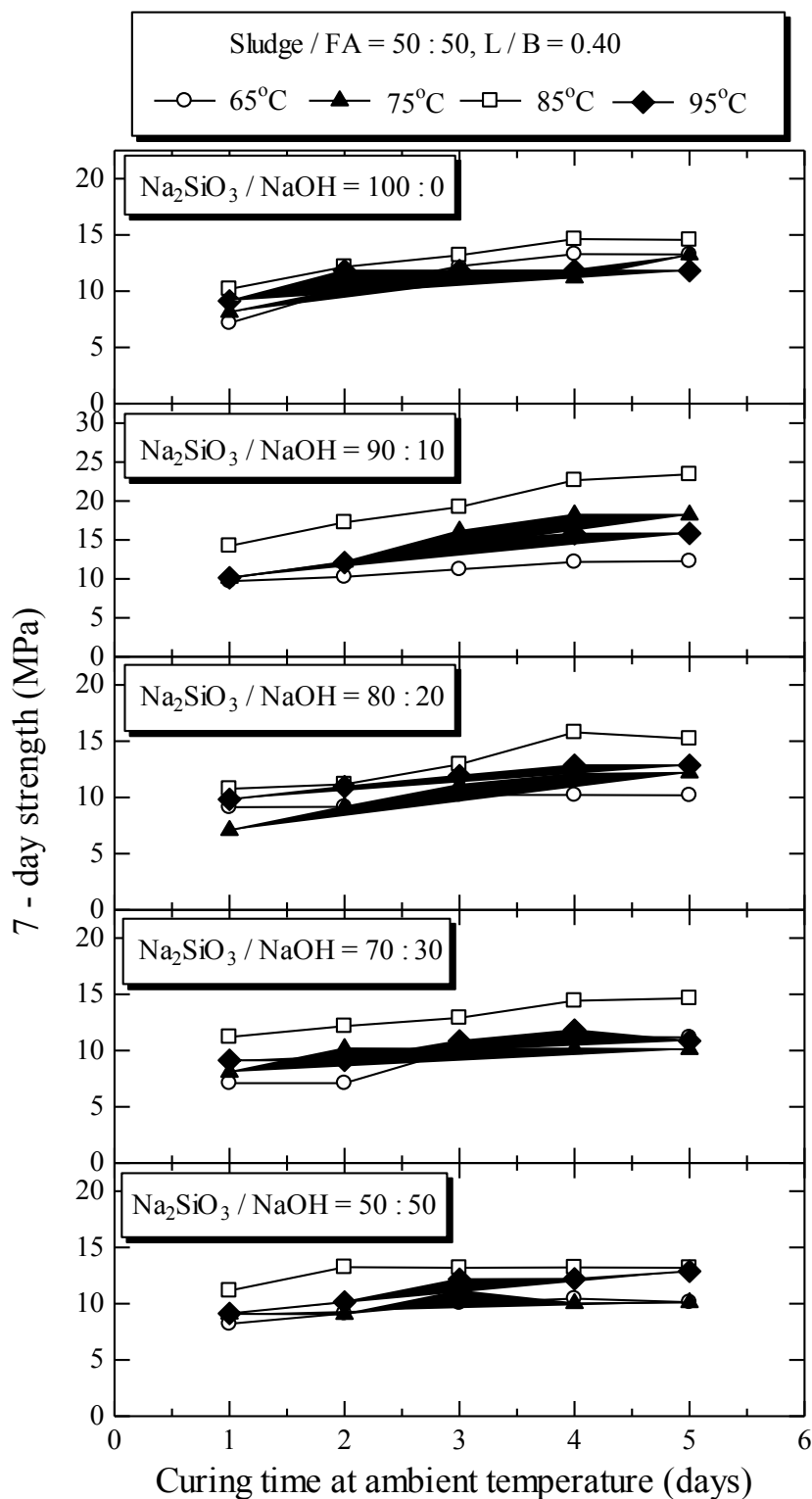
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนระหว่างส่วนผสมของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ  $\text{NaOH}$  ต่อ ส่วนผสมของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย(L/B)

#### 4.3 กำลังอัดแกนเดียวของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.3 อัตราส่วนผสมของดินตะกอนประปาและเถ้าลอยเท่ากับ 50:50 และ L/B เท่ากับ 0.4 โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 50:50, 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ตามระยะเวลาในการให้พลังงานความร้อน และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดเหมาะสม โดยพบว่า อุณหภูมิเหมาะสมอยู่ที่ 85 °C ค่าระยะเวลาที่เหมาะสมคือ 4 วัน ยกเว้นเพียงแค่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ NaOH เท่ากับ 50:50 ที่ค่าระยะเวลาเหมาะสมคือ 2 วัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก อัตราส่วนผสม  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ NaOH เท่ากับ 50:50 มีปริมาณ NaOH มากที่สุด ทำให้สามารถชะล้างซิลิกา และอลูมินา จากแก้วลอยได้หมดตั้งตาช่วงแรกๆ กำลังอัดจึงเริ่มคงที่ตั้งแต่ระยะเวลา 2 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวของดินตะกอนประปาและแก้วลอยที่อัตราส่วนผสมของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ NaOH เท่ากับ 90:10 ให้กำลังอัดสูงที่สุด

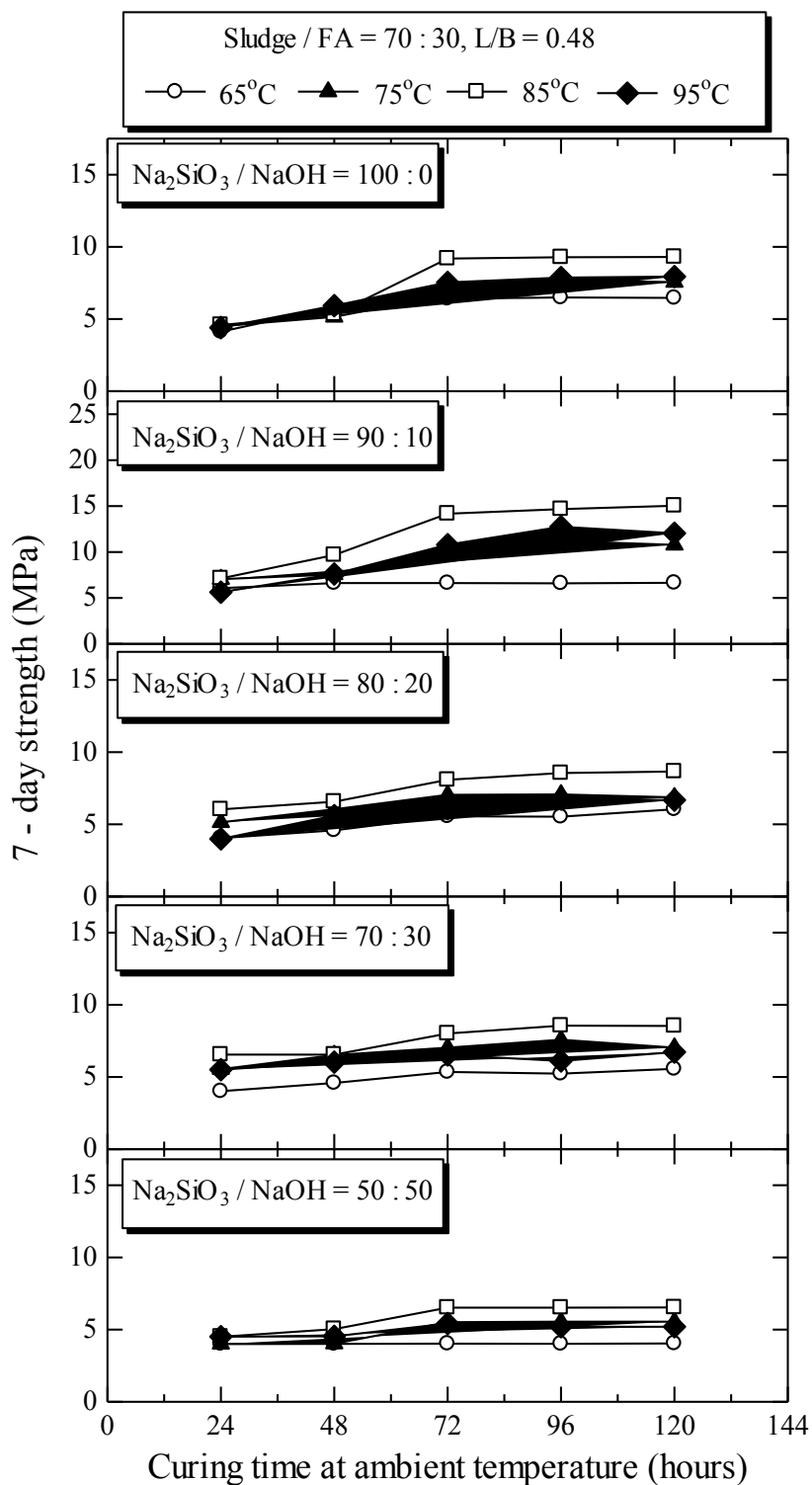




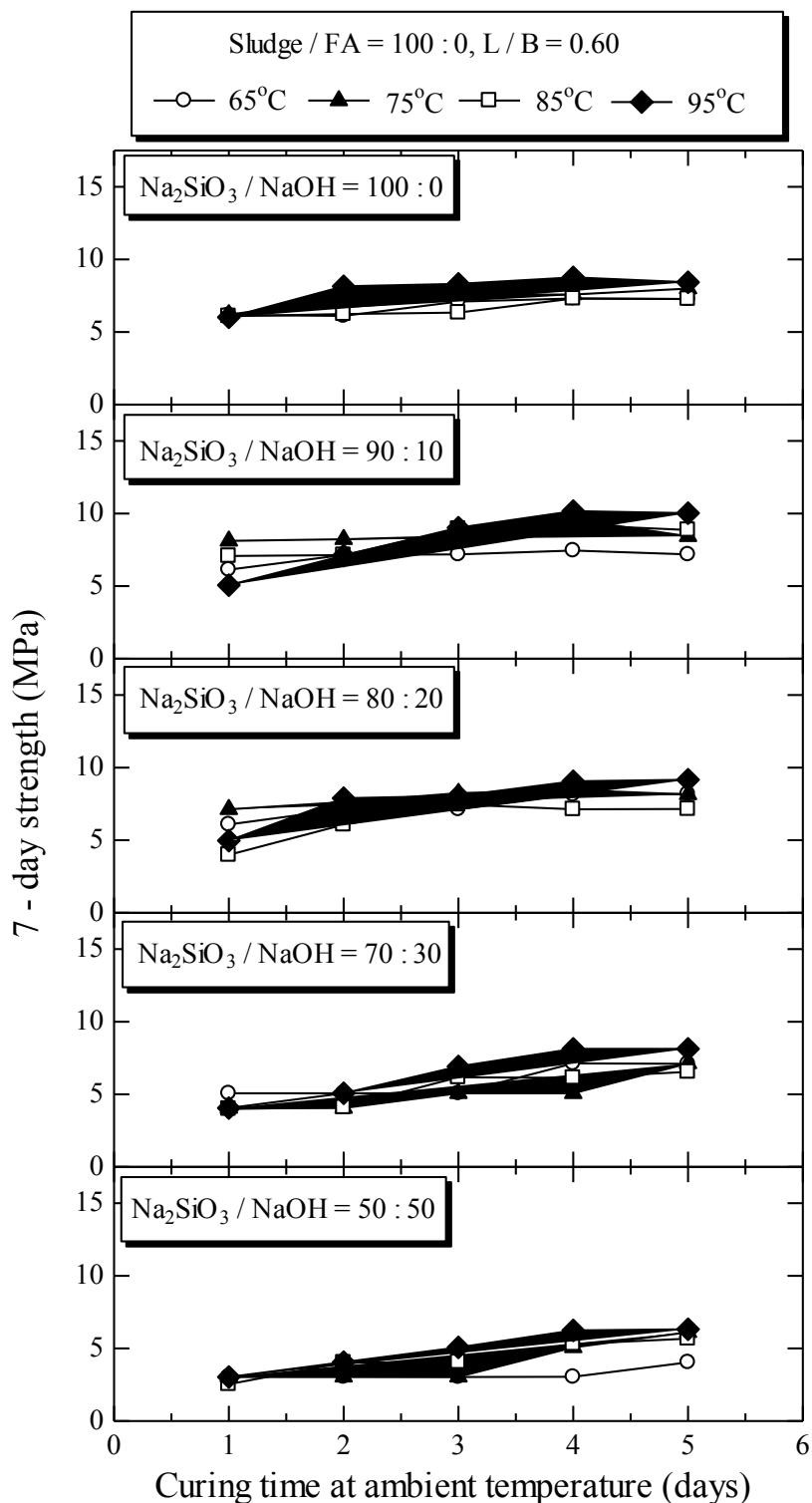
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วัน ต่อระยะเวลาในการให้พลังงาน ความร้อนที่อุณหภูมิ 65,75,85 และ 95 องศาเซลเซียส ของอัตราส่วนผสมดิน ตะกอนประปาต่อเถ้าลอย เท่ากับ 50:50

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.4 อัตราส่วนผสมของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย เท่ากับ 70:30 และ L/B เท่ากับ 0.48 โดยทำการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ NaOH เท่ากับ 50:50, 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0 จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมี่แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการให้พลังงานความร้อน และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จนถึงจุดเหมาะสมที่อัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดมากที่สุดที่อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ NaOH เท่ากับ 90:10 พิจารณาผลของอิทธิพลของอุณหภูมิจะพบว่า อิทธิพลของอุณหภูมิจะให้ผลน้อยลงตามปริมาณ NaOH ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการมี NaOH มากเกินไปจะส่งผลกระทบต่ออนุภาคเถ้าลอยเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากความเป็นด่างที่รุนแรงมากเกินไป

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.5 อัตราส่วนผสมของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย เท่ากับ 100:0 และ L/B เท่ากับ 0.6 โดยทำการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ NaOH เท่ากับ 50:50, 70:30, 80:20, 90:10, 100:0 จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวมี่แนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตามระยะเวลาในการให้พลังงานความร้อน และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และมีค่าเหมาะสมที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส โดยที่อัตราส่วนผสมของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ NaOH เท่ากับ 90:10 ให้กำลังอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 10 MPa พิจารณาอิทธิพลของ NaOH ต่อกำลังอัดของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ จะพบว่า NaOH สามารถชะซิลิกาและอลูมินาออกจากเม็ดดินเพื่อทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วัน ต่อระยะเวลาในการให้พลังงาน ความร้อนที่อุณหภูมิ 65,75,85 และ 95 องศาเซลเซียส ของอัตราส่วนผสมดิน ตะกอนประปาต่อเถ้าลอย เท่ากับ 70:30



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะเวลา 7 วัน ต่อระยะเวลาในการให้พลังงาน ความร้อนที่อุณหภูมิ 65,75,85 และ 95 องศาเซลเซียส ของอัตราส่วนผสมดิน ตะกอนประปาต่อเถ้าลอย เท่ากับ 100:0

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดแกนเดี่ยวของดินตะกอนประปาถ้ำลอยโดยแปรผันปริมาณถ้ำลอย ปริมาณความชื้น ระยะเวลาในการให้พลังงานความร้อน และอุณหภูมิ เพื่อสร้างความเข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดแกนเดี่ยวของดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ คืออัตราส่วนผสมของดินตะกอนประปาและถ้ำลอย เท่ากับ 50:50 อัตราส่วนผสมของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และ  $\text{NaOH}$  เท่ากับ 90:10 อุณหภูมิในการให้พลังงานความร้อนที่ 85 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาในการให้พลังงานความร้อน 4 วัน อายุในการบ่ม 7 วัน ซึ่งให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด
2.  $\text{NaOH}$  สามารถชะลิก้าและอลูมินาของดินตะกอนประปา (ไม่ใช่ถ้ำลอย) เพื่อทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ซึ่งสามารถให้กำลังอัดเท่ากับ 10 MPa

#### 5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป

เนื่องจากสภาพการใช้งานจริง ตัวอย่างอาจโดนสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ทำให้กำลังอัดของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์นี้มีกำลังลดลง ดังนั้นควรมีการทดสอบความคงทนของวัสดุ

## เอกสารอ้างอิง

- Alonso S, Palomo A.(2001). **Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature activator concentration and solids ratio.** Cement and Concrete Research, 29 (1-2):55-62.
- Bakharev T.(2004). **Durability of geopolymer material in sodium and magnesium sulfate solution.** Cement and Concrete Research, 35(6):1233-1246.
- Buchwald A, Kaps Ch. (2002). **Property controlling influences on the generation of geopolymeric binders based on clay.** Geopolymer. Melbourn, Australia.
- Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Chalee W, Rattanasak U. (2009). **Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers.** Waste Management, 29(2):539-43.
- Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. (2006). **Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer.** Cement and Concrete Composites, 29(3):224-229.
- Davidovits J.(1991). **Geopolymers.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8):1633-56.
- Davidovits J, Buzzi L, Rocher R, Gimeno D, Marini C, Tocco S. (1999). **Geopolymeric cement based on low cost geologic material,** Results from the European Research project GEOCIS-TEM. In: Davidovits etal. (ed.). Proceedings of the second international conference geopolymere, 99:83-96.
- Guo X, Shi H, Dick WA. (2010). **Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer.** Cement and Concrete Composites, 32(2):142-7.
- Gurtug Y, Sridharan A. (2002). **Prediction of compaction characteristics of fine-grained soils.** Geotechnique, 52(10):761-3.
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan, BV.(2003). **The effect of mixture composition and curing temperature on the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete.** The Ninth East Asia-Pasific Conference on Structural Engineering and Construction, Bali, Indonesia, CMT 14-CMT 18.

- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, Rangan BV. (2004). **Brief Review of Development of Geopolymer Concrete.** American Concrete Institute, USA : Los Vegas, 25 May 2004, pp. 1-10.
- Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y.(2009). **Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay.** Soils and Found, 49(1):85-98.
- Horpibulsuk S, Rachan R, Chinkulkijniwat A, Raksachon Y, Suddeepong A. (2010). **Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations.** Constr and Build Mater, 24(10):2011-21.
- Horpibulsuk S, Katkan W, A. Apichatvullop. (2008). **An approach for assessment of compaction curves of fine-grained soils at various energies using a one point test.** Soils and Found, 48(1):115-25.
- Horpibulsuk S, Katkan W, Naramitkornburee A. (2009). **Modified Ohio's curves: A rapid estimation of compaction curves for coarse- and fine-grained soils.** Geotechnical Testing Journal, ASTM, 32(1):64-75.
- Jiminez AMF, Lachowski EE, Palomo A, Macphee DE. (2004). **Microstructural characterisation of alkali-activated PFA matrices for waste immobilisation.** Cem Concr Compos, 26(8):1001-6.
- Miura N, Yamadera A, Hino T. (1999). **Consideration on compression properties of marine clay based on the pore size distribution measurement.** Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, 26(6):624III-47.
- Mohapatra R, Rao JR. (2001). **Some aspects of characterisation, utilisation and environmental effects of fly ash.** Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 76(1):9-26.
- Nagaraj TS, A.J. Lutenegger, Pandian NS, M. Manoj. (2006). **Rapid estimation of compaction parameters for field control.** Geotechnical Testing Journal, ASTM, 29(6):1-10.
- Ohsawa S, Asaga K, Goto S, 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 , 15(2): 357-366.
- Prakash K, Sridharan A. (2004). **Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils.** Geotech Test, 27(2):220-5.

- Rattanasak U, Chindapasirt P.(2009). **Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer.** Miner Eng, 22(12):1073-8.
- Somna K, Jaturapitakkul C, Kajitvichyanukul P, and Chindapasirt P. (2011). **NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature.** Fuel, 90(6):2118-24.
- Sukmak P, and Horpibulsuk S. (2012). **Strength development in geopolymer brick.** Construction and Building Materials, (Under review).
- Van Jaarsveld J, Van Deventer J, Lorenzen L. (1998). **Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized fly ash.** Metall Mater Trans B, 29(1):283-91.
- คมกริช เวชศาสตร์, สุทธิรักษ์ บุญากุล, ปาริฉัตร ปั่นทอง และสุรเดช เหม่มพกุล. (2553). การออกแบบและก่อสร้างระบบกำจัดตะกอนโดยใช้วิธีรีดกรองโรงงานผลิตน้ำบางเขน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, ประเทศไทย.
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ. อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของมอร์ต้าจีโอโพลิเมอร์. (2548). เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า CON30-CON34.



## ประวัติผู้เขียน

นายวัชร ไข่ค้างพลู เกิดวันที่ 3 มกราคม 2531 ที่อำเภอคำานขุนทด จังหวัดนครราชสีมา  
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 134 หมู่ 14 อำเภอคำานขุนทด จังหวัดนครราชสีมา ตำแหน่งงานปัจจุบัน วิศวกร  
โครงการ บริษัทเอกชน ด้านการศึกษา มัธยมศึกษาโรงเรียนปราสาทวิทยาคม ตำบลหินดาด อำเภอ  
คำานขุนทด จังหวัดนครราชสีมา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา