

การพัฒนากำลังอัดของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

นายสุรเชษฐ์ บุญกระสาน

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

การพัฒนากำลังอัดของดินตะกอนประปาจิโพลิเมอร์มวลเบา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)

(ผศ. ดร.ปรีชาพร โกษา)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุรเชษฐ์ บุญกระสาน : การพัฒนากำลังอัดของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา
(THE STRENGTH DEVELOPMENT IN LIGHTWEIGHT-SLUDGE GEOPOLYMER)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุกสันต์ หอพิบูลสุข

ตะกอนดินจีโอโพลิเมอร์มวลเบานี้จัดเป็นวัสดุเขียว (Green material) ชนิดหนึ่ง ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ตะกอนดินเป็นดินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปา สารละลายอัลคาไลน์ (Activator, L) เป็นส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NaOH) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3) งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินตะกอนจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ปัจจัยที่มีอิทธิพลในการศึกษาครั้งนี้คืออัตราส่วนการแทนที่ตะกอนดินประปาด้วยเถ้าลอย ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ สารเพิ่มฟอง และอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 80 : 20 ให้กำลังอัดสูงสุดมีค่าประมาณ 20, 10 และ 12.5 MPa สำหรับอุณหภูมิ 65°C, 75°C และ 85°C ตามลำดับ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 65°C อุณหภูมิที่สูงกว่า 65°C ทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณความชื้นในตัวอย่างทดสอบ ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวและเกิดรอยแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SURACHET BOONGRASAN : THE STRENGTH DEVELOPMENT IN
 LIGHTWEIGHT-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 (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, Na_2SiO_3 :NaOH ratio, foaming agent, heat temperature and heat duration. Test results show that the Na_2SiO_3 :NaOH ratio of 80:20 gives the maximum compressive strength, which is approximately 20, 10 and 12.5 MPa for the heat temperatures of 65, 75 and 85°C, respectively. The influence of heat temperature conditions on strength development is divided into two groups: the optimum heat temperature of 65°C and higher than 65°C. The heat temperature higher than 65°C may cause the immediate decrease of liquid in the sample and induce structural cracks on the sample.

School of Civil Engineering
 Academic Year 2013

Student's Signature _____
 Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจอย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัยดังนี้

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาของโครงการจนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านวิชาการ ปฏิบัติการ แนะนำ และตรวจทานเนื้อหาโครงการจนเสร็จสมบูรณ์

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา หลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณสุขปภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการนี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศุรเชษฐ์ บุญกระสาน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของการวิจัย.....	3
2.1 ประวัติความเป็นมาของจีโอ โพลีเมอร์(Geopolymer).....	3
2.2 ใ้ลลย.....	4
2.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีของใ้ลลย.....	4
2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของใ้ลลย.....	6
2.3 ประเภทของคอนกรีตมวลเบา.....	9
2.4 วัสดุปอซโซลาน.....	13
2.5 เครชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน.....	13
2.6 วรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	17
3 วิธีดำเนินการโครงการวิจัย.....	24
3.1 บทนำ.....	24
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน.....	26
3.3 การเตรียมตัวอย่าง.....	26
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินและสารละลาย.....	26

3.4	การเตรียมตัวอย่างดินตะกอนประปาจิโอโพลีเมอร์มวลเบา	27
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	28
4.1	บทนำ	28
4.2	คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปาและถ้ำลอย	28
4.3	หน่วยน้ำหนักของดินตะกอนประปาจิโอโพลีเมอร์มวลเบา	30
4.4	กำลังอัดของดินตะกอนประปาจิโอโพลีเมอร์มวลเบา	35
4.5	การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปาจิโอโพลีเมอร์มวลเบา กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	35
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	40
5.1	สรุปผลงานโครงการวิจัย	40
5.2	ข้อเสนอแนะในการทำโครงการวิจัยต่อไป	40
	เอกสารอ้างอิง	41
	ภาคผนวก	47
	ประวัติผู้เขียน	58

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	5
2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	6
2.3 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง.....	8
2.4 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	14
2.5 รายการประมาณต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า.....	16
3.1 จำนวนตัวอย่างทดสอบของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา.....	26
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย.....	29
4.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา จำแนกตาม มอก.2601-2556.....	36

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) ของแก้วลอย (ขยาย 3000 เท่า).....	7
2.2 Polycondensation of Na-poly(sialate-disiloxo) albite framework.....	9
2.3 กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส่า (Just and Middendorf, 2009).....	11
2.4 ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวที่จัดเรียงของ CLC (Just and Middendorf, 2009).....	12
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นแห้ง (Nambiar and Ramamurthy, 2006).....	22
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีต เซลลูโลส่าทำจากตะกอนน้ำเสีย (Wang et al., 2005).....	23
3.1 แผนผังวิธีการทดสอบดินตะกอนประปาจีไอโพลีเมอร์มวลเบา.....	25
4.1 การกระจายขนาดของดินตะกอนประปา และแก้วลอยถ่านหิน.....	29
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง L/FA และ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$	30
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและอายุการบ่มจีไอโพลีเมอร์มวลเบา ที่อุณหภูมิ 65°C.....	32
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและอายุการบ่มจีไอโพลีเมอร์มวลเบา ที่อุณหภูมิ 75°C.....	33
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและอายุการบ่มจีไอโพลีเมอร์มวลเบา ที่อุณหภูมิ 85°C.....	34
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มจีไอโพลีเมอร์มวลเบา ที่อุณหภูมิ 65°C.....	37
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มจีไอโพลีเมอร์มวลเบา ที่อุณหภูมิ 75°C.....	38
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มจีไอโพลีเมอร์มวลเบา ที่อุณหภูมิ 85°C.....	39

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing Material
FA	=	Fly ash
LL	=	ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit)
LOI	=	Loss on Ignition
Na ₂ SiO ₃	=	โซเดียมซิลิเกต
NaOH	=	โซเดียมไฮดรอกไซด์
PL	=	ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit)
SEM	=	Scanning Electron Microscope

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา

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

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนดินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำประปามาผลิตวัสดุก่อสร้าง (Construction material) ชนิดดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์มวลเบา โดยการนำตะกอนดินไปผสมเข้ากับสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง (Foaming agent) คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมแพร่หลายอย่างมากในการก่อสร้างบ้านพักอาศัยรวมไปถึงอาคารสูง เนื่องจากน้ำหนักที่เบาสามารถช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้าง อันนำมาซึ่งการลดต้นทุนค่าก่อสร้าง นอกจากข้อดีด้านน้ำหนักแล้ว คอนกรีตมวลเบายังมีข้อดีในด้านของความต้านทานความร้อน เนื่องจากช่องว่างในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีความไม่ต่อเนื่องทำให้มีคุณสมบัติเป็นฉนวน การผลิตดินตะกอนประปาจีโอโพลีเมอร์มวลเบาจากตะกอนดินประปา นอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าและคุณประโยชน์ของตะกอนดินประปา (วัสดุเหลือใช้) แล้ว ยังเป็นการสนับสนุนแนวทางการดำเนินงานด้าน Zero Waste และการอนุรักษ์พลังงาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกอนที่เหลือจากการผลิตน้ำประปามาผลิตดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเพื่อประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมโยธา โดยตัวแปรต้น ตัวแปรควบคุม ดังนี้ อัตราส่วนการแทนที่ตะกอนดินประปากับเถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการให้ความร้อนและปริมาณสารเพิ่มฟอง ผลการศึกษาทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา (Manufacturing design method) ที่มีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 หาอัตราส่วนผสม (ตะกอนดินประปา เถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสม เพื่อผลิตดินตะกอนประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่มีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นระหว่าง 800 ถึง 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ดินตะกอนประปาที่ใช้ในการศึกษานำมาจากโรงผลิตน้ำบางเขน
- 1.3.2 อัตราส่วนระหว่างดินตะกอนประปาต่อเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 70:30
- 1.3.3 สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ NaOH มีค่าเท่ากับ 50:50, 70:30, 80:20, 90:10, และ 100:0 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10 โมล
- 1.3.4 อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 65, 75 และ 85°C ในระยะเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง
- 1.3.5 ปริมาณฟองอากาศมีค่าเท่ากับร้อยละ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 ของปริมาตรมวลรวม (ดินตะกอนประปาและเถ้าลอย)
- 1.3.6 ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง (ก่อนทดสอบกำลังอัด) จะทดสอบที่ 7 วัน
- 1.3.7 ก้อนตัวอย่างทดสอบขนาด 50x50x50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
- 1.3.8 การทดสอบกำลังอัด ทำตามมาตรฐาน ASTM

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับดินตะกอนประปาที่เหลือทิ้งและลดของเสียที่จะระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม
- 1.4.2 ได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อผลิตดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่มีกำลังอัดมากกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Manufacturing design method)

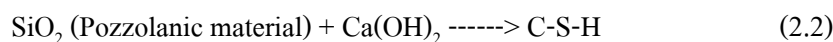
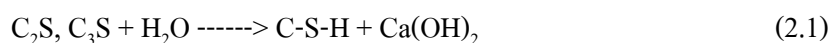
บทที่ 2

ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวคิดของการวิจัย

2.1 ประวัติความเป็นมาของจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

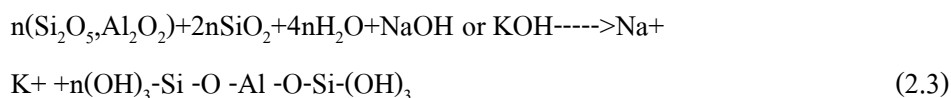
จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1970 Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้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

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



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

Polymer chain ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา สมการที่ 2.3 แสดงสมการทางเคมีของปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization)



2.2 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash) เป็นเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะลอยไปกับอากาศจึงเรียกว่าเถ้าลอย ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหิน มีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล มีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (Cementitious) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและช่วงเวลาการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

หน่วยงานวิจัยสองหน่วยงานกำหนดถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงถึงของเถ้าลอยคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for testing and material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C-618 และ ASTM C-593 เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้ในการทำงาน แต่จากการศึกษาของ ชัย จตุรพิทักษ์กุล สุรเชษฐ์ จึงเกษมโชคชัย และ วราภรณ์ คุณาวานากิจ (2542) พบว่าคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นได้ทั้ง Class F และ Class C ดังนั้นการจำแนกประเภทของเถ้าลอยโดยอาศัยหลักเกณฑ์ดังกล่าวอาจเกิดข้อโต้แย้งได้ คณะอนุกรรมการสาขาคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ จึงริเริ่มที่จะดำเนินการร่างมาตรฐานเพื่อใช้กับเถ้าลอยและการออกแบบคอนกรีตสำหรับประเทศไทยขึ้น

2.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีของเถ้าลอย

1.) ส่วนประกอบทางเคมีเถ้าลอย

American Society for testing and material (1995) แนะนำให้ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence เถ้าลอยทั่วไปประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO)

ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกแถลลยเป็น Class F และ Class C ซึ่งมีส่วนประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

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

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของแถลลยตามมาตรฐาน ASTM C-618

องค์ประกอบทางเคมี	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3) Min%	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) Max%	5.0	5.0
ประมาณความชื้น Max%	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) Max%	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) Max%	1.5	1.5

ความชื้นของแถลลยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับแถลลย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในแถลลย หากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน Air Entrainment ของคอนกรีตสดจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่ม ในคอนกรีตสดขยทั่วไปแล้วแถลลยจากตรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 มาก ปริมาณอัลคาไลน์ (Alkali) ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O Equivalent) มากที่สุดไม่เกิน ร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะแถลลยที่มีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการแถลลยที่มี

ปริมาณอัลคาไลน์ มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

2.) ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (Mineralogical composition)

ชัย จตุรพิทักษ์กุล สุรเชษฐ์ จึงเกษม โขชัย และ วราภรณ์ คุณาวานากิจ (2542) เมื่อถ่านหินถูกเผา และมีการเย็นตัวของเถ้าลอย การเผาจะทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (Crystalline) แตกต่างกัน สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีความเป็น Noncrystalline (glass) มากกว่าร้อยละ 90 อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังมีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ซึ่งเกี่ยวข้องต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction จะพบว่าเถ้าลอยจากถ่านลิกไนต์จะมีองค์ประกอบของ Crystalline น้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซต์

2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

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

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยมาตรฐาน ASTM C-618

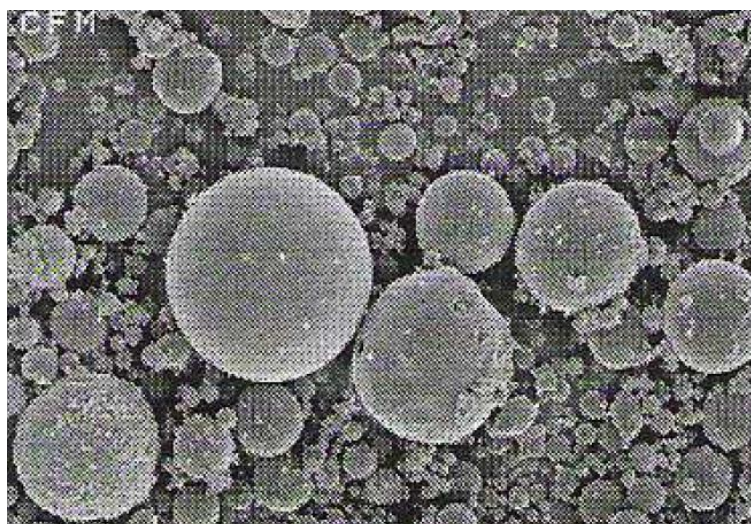
ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนข้างตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก Max%	34	34
หาดัชนีกำลัง : โยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 7 วัน Min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน Min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ : Max% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว : การขยายตัวหรือหดตัวด้วยวิธี Autoclave Max%	0.8	0.8
การกำหนดความสม่ำเสมอ (Uniformity requirement)		
- ความหนาแน่น Max จากค่าเฉลี่ย %	5	5
- ส่วนที่ข้างตะแกรงเบอร์ 325 Max จากค่าเฉลี่ย%	5	5

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
Multiple Factor (ผลคูณระหว่าง %LOI กับ % ของปริมาณความชื้นที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325)	205	-
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน Max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03	0.03

1. รูปร่างของเถ้าลอย

อนุภาคเถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม บางครั้งอาจพบลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจมีรูปร่างไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผาถ่านหินซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งและเหลี่ยม เมื่อถ่ายภาพอนุภาคของเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) จะเห็นรูปร่างกลม ดังรูปที่ 2.1 เมื่อเถ้าลอยทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบและทำให้คอนกรีตลื่นไหลง่ายต่อการเทซึ่งคอนกรีตบางชนิดต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอนหรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้ มีผลทำให้กำลังอัดของส่วนผสมต่ำลงได้



รูปที่ 2.1 ภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) ของเถ้าลอย (ขยาย 3000 เท่า)

2. ความละเอียด (Fineness)

ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ล้างตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 มิลลิเมตร) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีของเบลน (Blaine specific surface-area technique) ตามมาตรฐาน ASTM C-204 หรือวิธี Particle size analysis หรือวิธี Brunauer Emmett Teller (BET) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม การทดสอบเทอร์บิดิเมเตอร์ (Turbidimeter test) ASTM C-115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์ โดยการทดสอบทั้งสี่วิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบ โดยผลการทดสอบขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมาก แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจาก อ้าเภอแม่เมาะ การบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอย อ้าเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

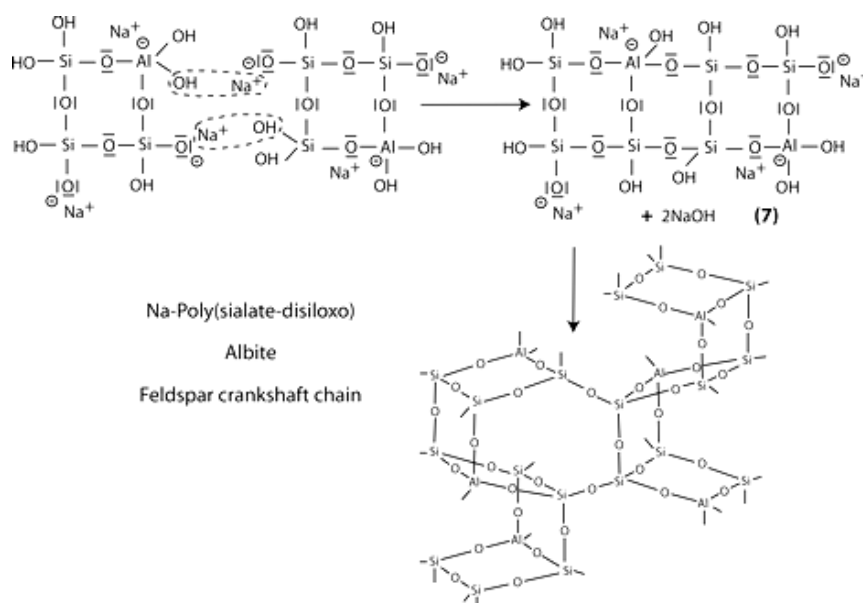
ชนิดตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ	ส่วนที่ล้างบน ตะแกรงเบอร์ 325 (%)	สภาพให้อากาศ ซึมได้ (cm ² /g)	ขนาดเฉลี่ย (mm)
ปูนซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.02	37.4	2370	28.5

จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ล้างบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมรวมกับซีเมนต์

3. การหาดัชนีกำลัง

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลาน โดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้ามาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน

เก้าถ่านหินซึ่งมีส่วนประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักเมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลจะเกิดสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งตัวได้เช่นเดียวกับคอนกรีต สารจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินารวมตัวกัน และเมื่อรวมกับสารประกอบอื่นที่เอื้อต่อปฏิกิริยาก็จะก่อตัวทำให้เกิดความแข็งแรงคล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ในกระบวนการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ สารจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างแบบบล็อก (Block) ที่เป็นหน่วยทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ดังแสดงในรูปที่ 1 สารประกอบที่ใช้ทำจีโอโพลิเมอร์ไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมาก (ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์) จึงทำให้ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย



รูปที่ 2.2 Polycondensation of Na-poly (sialate-disiloxo) albite framework

2.3 ประเภทของคอนกรีตมวลเบา

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

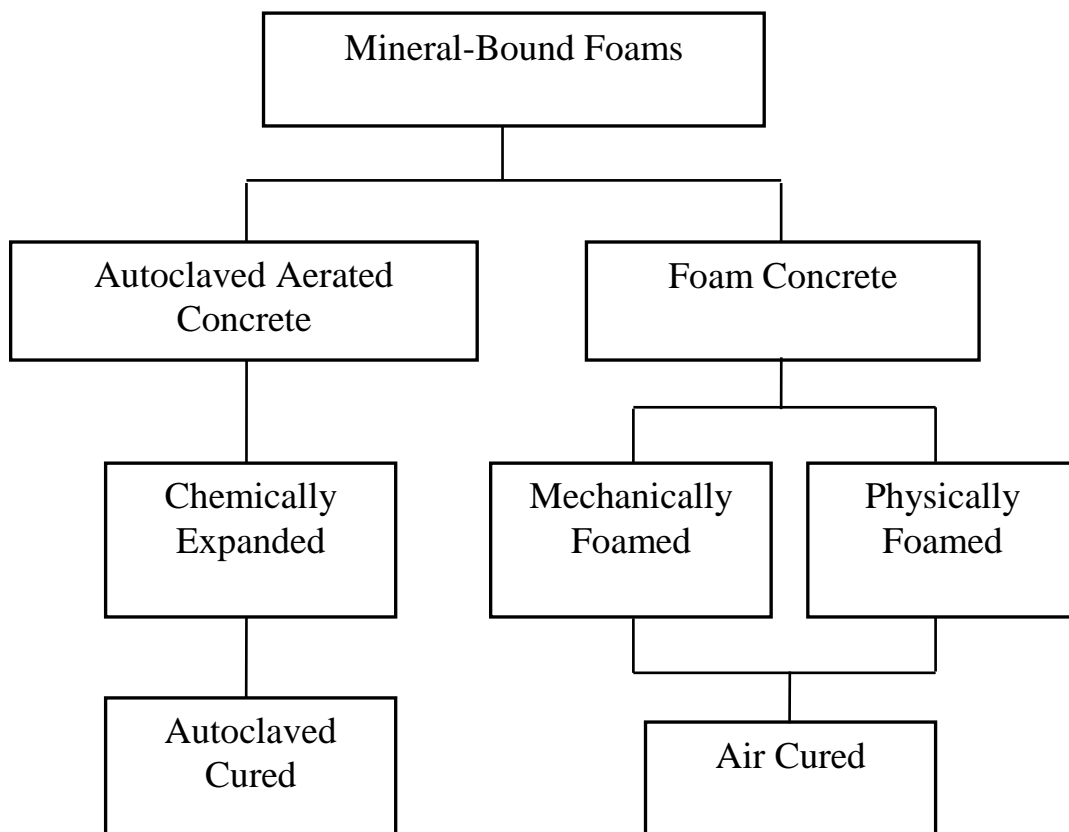
- 1) การไม่ใช้มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) เป็นส่วนผสมในคอนกรีต มีแต่มวลรวมหยาบที่มีขนาดใกล้เคียงกันหรือขนาดเดียว (Single size) คอนกรีตชนิดนี้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำที่ต่ำ ดังนั้น ช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ระหว่างมวลรวมหยาบจึงมีจำนวน

มาก คอนกรีตประเภทนี้เรียกว่าคอนกรีตพรุน (Porous concrete) หรือคอนกรีตไม่มีมวลรวมละเอียด (No-fines concrete)

- 2) การใช้มวลรวมพรุนที่มีน้ำหนักเบาเป็นวัสดุผสม มวลรวมพรุนต้องมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมมาก คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้เรียกว่าคอนกรีตมวลเบาน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete)
- 3) การทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่าง (Void) ขนาดใหญ่ภายในเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ต้า โดยการกักกระจายของอากาศ (Air entrainment) โพรงเหล่านี้จะมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้มีชื่อเรียกต่างๆ กัน เช่น คอนกรีตอัดอากาศ (Aerated concrete) หรือคอนกรีตเซลลูล่า (Cellular concrete) หรือโฟมคอนกรีต (Foamed concrete) หรือก๊าซคอนกรีต (Gas concrete) เป็นต้น

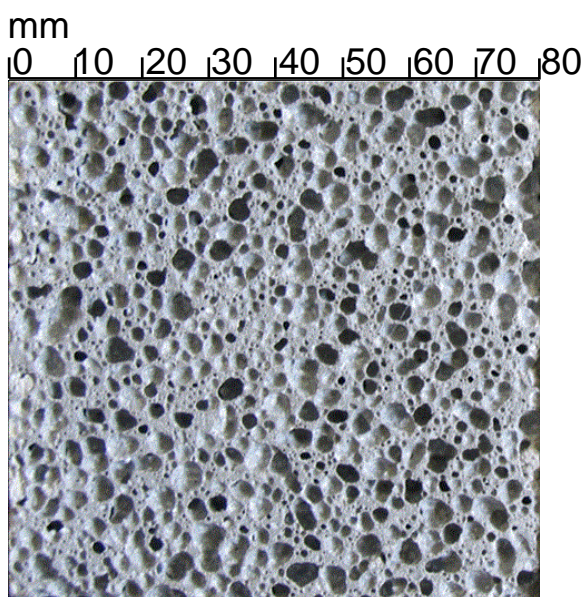
2.3

ความหนาแน่นของคอนกรีตเซลลูล่าขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยอากาศ มวลรวมหยาบ (Normal-weight coarse aggregate) มักจะไม่ได้ใช้ในการผลิตคอนกรีตเซลลูล่า กระบวนการสร้างฟองอากาศในการผลิตคอนกรีตมวลเบามี 2 วิธี คือวิธีทางกลและวิธีทางเคมี



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (Just and Middendorf, 2009)

- 1) วิธีการสร้างฟองอากาศทางกล อาจดำเนินการได้ 2 วิธีหลัก ตามกระบวนการผลิต
 - a) วิธีการสร้างฟองอากาศโดยการทำให้เกิดโฟมก่อนผสม ด้วยการใส่สารเพิ่มฟองเจือจางกับน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสม แล้วนำไปผ่านเครื่องสร้างฟองเพื่อให้ได้โฟมเหลว จากนั้นโฟมเหลวที่ได้จะนำไปผสมโดยตรงกับซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าสดในเครื่องผสม วิธีการเช่นนี้เรียกว่าวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD ซึ่งโฟมดังกล่าวมีความเสถียรอยู่ในเนื้อคอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนกระทั่งคอนกรีตมีสภาพเป็นของแข็ง ทำให้คอนกรีตเซลลูล่าเป็นโพรงปิด (close pore) ที่เต็มไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก ดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวที่จัดเรียงของ CLC (Just and Middendorf, 2009)

- b) วิธีการสร้างฟองอากาศโดยการใส่สารเพิ่มฟองหรือสารกักกระจายฟองอากาศ (Air entraining) ผสมกับซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้า จากนั้นผ่านการตีหรือกวน ส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสารเพิ่มฟองดังกล่าวจะมีความมั่นคง (Stabilizes) เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากขึ้นในขณะที่ผสมด้วยความเร็วสูง วิธีนี้เหมาะกับการทำคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง แต่วิธี PRE-FORMED FOAM METHOD เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำมาก
- 2) วิธีการสร้างฟองอากาศโดยวิธีทางเคมี ส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนทราย ปูนขาว และสารเพิ่มขยายตัว (Expansion agent) ปฏิกริยาเคมีที่เกิดจากส่วนผสมจะเกิดเป็นโฟมเคมีในขั้นตอนการเทเข้าแบบ ส่วนผสมจะเกิดการบวมขึ้นหลายเท่าเมื่อเทียบกับปริมาตรเดิม คล้ายกับขั้นตอนหนึ่งของการทำขนมเค้ก หลังสิ้นสุดการก่อตัว คอนกรีตจะถูกนำเข้าหม้อนิ่งหรือห้องอบไอน้ำภายใต้แรงดันและอุณหภูมิสูง คอนกรีตประเภทนี้จึงเรียกว่าคอนกรีตมวลเบาชนิดอบไอน้ำ (autoclave aerated concrete หรือ AAC)

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

เบาเซลลูล่าสำหรับงานก่อและกันความร้อน โดยการใช้โฟม (Foaming agent) เป็นตสารเพิ่มฟอง และบ่มตัวอย่างในอากาศ

2.4 วัสดุปอซโซลาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า โดยใช้ตะกอนดินประปาเป็น วัสดุคิบ ตะกอนดินประปาจะถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 450 ถึง 600 องศาเซลเซียส เพื่อลด ความสามารถในการดูดน้ำและแสดงคุณสมบัติปอซโซลาน วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan material) สามารถใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตได้ โดยใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ บางส่วน เพื่อจุดประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้นหรือลดต้นทุน ของคอนกรีตลง วัสดุปอซโซลานเมื่อนำไปผสมกับคอนกรีตจะช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสด ให้มีความสามารถเท่าได้สูง มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงอายุปลาย และมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีคุณสมบัติทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนจากสารซัลเฟต

มาตรฐาน ASTM C 618-2001 ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานว่า “วัสดุปอซโซลาน เป็นวัสดุที่มีสารซิลิกาอย่างเดี่ยว หรือทั้งซิลิกาและอลูมิน่าเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ว วัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน หากแต่เมื่อมีน้ำหรือความชื้นในปริมาณที่ เหมาะสมก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้เกิด สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” วัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (Metha, Smith et al., 1995) คือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural pozzolan) และวัสดุปอซโซลาน สังเคราะห์ (Artificial pozzolan) วัสดุปอซโซลานธรรมชาติเป็นวัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขา ไฟ เช่น หินพัมมิช (Pumicite) และหินซีโอไลต์ธรรมชาติ เป็นต้น วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์เป็น วัสดุที่ได้จากการนำวัสดุไปผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัสดุคิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ดินขาวเกาลิน (Kaolin) และไดอะตอมไมท์ เป็นต้น หรือได้จากผลพลอยได้ของการผลิตของ โรงไฟฟ้าความร้อน เช่น เถ้าลอย และเถ้าก้นเตา เป็นต้น

2.5 เกรซันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

สารประกอบหลักในเม็ดปูน ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, C_3S) ได แคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate, C_2S) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate, C_3A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite, C_4AF) คุณสมบัติของ สารประกอบทั้ง 4 ชนิดนี้แสดงดังตารางที่ 2.4 (เริงศักดิ์และอภิศักดิ์, 2549)

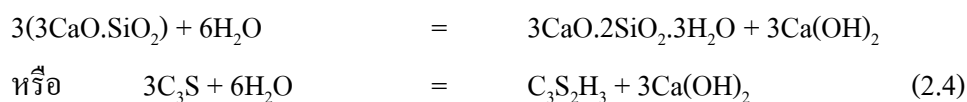
ตารางที่ 2.4 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เร็กซ์คัลด์และอภิศักดิ์, 2549)

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

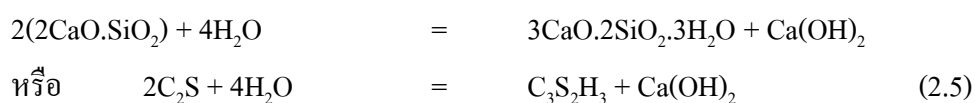
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์แสดงได้ดังนี้
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต (C₃S และ C₂S)

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

สมการของ C₃S



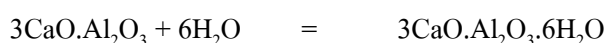
สมการของ C₂S



ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ จะได้ Gel ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ และมีรูพรุน (CSH) โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH จะขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างมาก (pH ประมาณ 12.5)

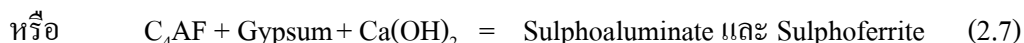
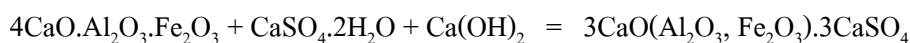
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A เกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้

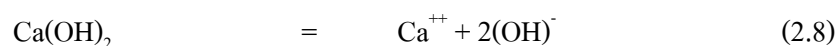


ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

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

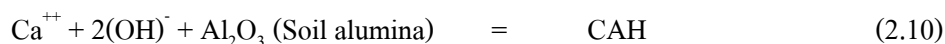


สมการที่ (2.4) ถึง (2.7) แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ ผลิตภัณฑ์เชื่อมประสาน (Cementitious products) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกแข็ง แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ pH ของน้ำในโพรงคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น (มีความเป็นด่างสูง) และทำปฏิกิริยาหลอมละลายกับซิลิกาและอลูมินาในวัสดุปอซโซลาน ปฏิกิริยานี้มีลักษณะเช่นเดียวกับปฏิกิริยาระหว่างกรดอ่อนกับด่างเข้มข้น ซิลิกาและอลูมินาที่หลอมละลายจะทำปฏิกิริยาอย่างช้ากับอออนของแคลเซียมอิสระ (Free lime) ทำให้เกิดการแข็งตัวเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) และแสดงได้ดังสมการทางเคมี ดังนี้





(Secondary cementitious product)



(Secondary cementitious product)

การประมาณราคาค่าต้นทุนต่อหน่วย

การประมาณราคาต่อหน่วยเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งในการตัดสินใจการลงทุนผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสจากตะกอนดินประปา 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 2.5 แสดงให้เห็นได้ว่าราคาในการผลิตต่อหน่วยเท่ากับ 15.9 บาท ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาของบริษัท QCON มีราคาขายที่สูงกว่าเกือบสองเท่า (ราคา 27 บาทต่อหน่วย)

ตารางที่ 2.5 รายการประมาณต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคา (บาท)
มวลรวม (ตะกอนดินประปา + ทราย)	3438	กรัม	3.5
น้ำ	650	กรัม	0.65
ปูนซีเมนต์	1250	กรัม	3.75
สารเพิ่มฟอง	100	กรัม	2.00
ค่าแรง	-	-	3.75
ค่าไฟฟ้า	-	-	2.00
ค่าดำเนินการ	-	-	0.25
ราคาค่าต้นทุนรวม	-	-	15.9

2.6 วรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลิเมอร์ และพบว่าการประสานกันของวัสดุโพลิเมอร์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลิเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ประมาณ 0.20 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 3.50-4.50 น้ำ (H_2O) ต่อไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 15-17.5 และไดโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ต่ออะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 0.80-1.20 ในเวลาต่อมาได้ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ และพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) มีโครงสร้างแบบซีโอลิติก (Zeolitic) การพัฒนาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ดีขึ้นหรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์ ดังจะเห็นได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน และอุตสาหกรรมพลาสติกต่างๆ จีโอโพลิเมอร์จะแข็งตัวได้ในอุณหภูมิปกติและมีกำลังอัด 70-100 เมกกะปาสกาล มีคุณสมบัติคล้ายสารพวกซีโอไลท์ จีโอโพลิเมอร์จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สมบูรณ์แบบ (มีความแข็งแรง หดตัวน้อย ทนความเย็น และต้านทานการสึกกร่อน) สำหรับโครงสร้างระยะยาวที่ต้องการผิวที่ทนการสึกกร่อน เมื่อคำนึงถึงต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีคุณค่าเหนือกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการกระบวนการเผาด้วยอุณหภูมิสูง และเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 ในปริมาณต่ำ

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

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าลูมิโนซิลิเกตโพลิเมอร์สามารถผลิตจากวัสดุขี้เถ้าที่มีซิลิกอนและอลูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถาถ่านหิน องค์กรประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิ

เมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์

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

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

Chindaprasirt et al. (2006) ได้ทดลองใช้เถ้านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเพื่อทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยควบคุมการไหลผ่าน (Flow) ให้เท่ากับร้อยละ 110±5 ถึง 135±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 การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมล เป็น 20 โมล ไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน การเติมน้ำประมาณร้อยละ 2-8 และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) จะช่วยให้ความชื้นเหลือดีขึ้นได้ และช่วยให้เทแบบได้ดี แต่กำลังอัดก็จะมีค่าลดลง

Bakharev (2004) ศึกษาความคงทนของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer paste) ที่ใช้เถ้านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และ

แมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิติลิกเตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-linked aluminosilicate polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับเกลือที่ใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (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 ผลการทดสอบพบว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้น การใช้กรดพิคติก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 การใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดซาลิซิลิกอย่างมาก

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับไมโคร (Microstructure) ของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ขณะเกิดปฏิกิริยากับด่างของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้านหิน และพบว่าโดยส่วนมากไมโครของเถ้านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อผสมกับด่างผิวของเถ้านหินจะถูกกัดเป็นรูและขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ เถ้านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ซึ่งจะมีปริมาณมากขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง ขนาดอนุภาคของเถ้านหิน และระยะเวลาการบ่ม การศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิติลิกเตในการผสมจีโอโพลิเมอร์และนำเข้าไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นผืนคล้ายกระดาษและมีเนื้อที่สม่ำเสมอ

พัชรพล โพธิ์ศรี และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2010) ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มวลเบาระบบเซลลูโลสสำหรับงานโครงสร้าง เมื่ออัตราส่วนของ L/A มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำหนักมีค่าสูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดที่อัตราส่วนของ L/A มีค่าเท่ากับ 0.7 แต่เมื่ออัตราส่วนของ L/A มีค่าสูงมากกว่า 0.7 ทำให้กำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำหนักลดลง

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับงานโครงสร้างนั้นจะอยู่ประมาณ 50-60°C ซึ่งถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 50°C ทำให้กำลังแรงอัดต่ำแต่หน่วยน้ำหนักจะมีค่าค่อนข้างสูง และอุณหภูมิสูงมากกว่า 60°C แล้วพบว่า กำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มที่ลดลง ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำหนักสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ปริมาณโฟมที่เหมาะสมในการทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มวลเบาระบบเซลล์ลู่วิ่ง สำหรับงานโครงสร้างมีค่าประมาณ 3% เมื่อทำการเพิ่มปริมาณโฟมสูงขึ้นกำลังรับแรงอัดและหน่วยน้ำหนักจะมีค่าลดลงมาก

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

คอนกรีต เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมในการสร้างอาคารเกือบทุกสถานที่ทั่วโลก เนื่องจากมีความได้เปรียบในการขึ้นรูปที่ง่ายกว่าวัสดุอื่น มีคุณสมบัติที่ดีทั้งทางกลและกายภาพ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตหาได้ง่ายจากธรรมชาติ ต้นทุนการผลิตต่ำ และใช้งานง่าย ความหนาแน่นของคอนกรีตจะอยู่ในช่วง 2300-2700 kg/m^3 (Nambiar and Ramamurthy, 2006) การทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำจะเป็นประโยชน์ในแง่ของการแบกรับภาระน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง (Feng and Peng, 2005) นักวิจัยหลายท่านมีเป้าหมายที่จะพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ทำจากคอนกรีตให้มีความแข็งแรง ใช้งานง่าย ความหนาแน่นต่ำ และเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี (Beben and "Zee" Manko, 2011)

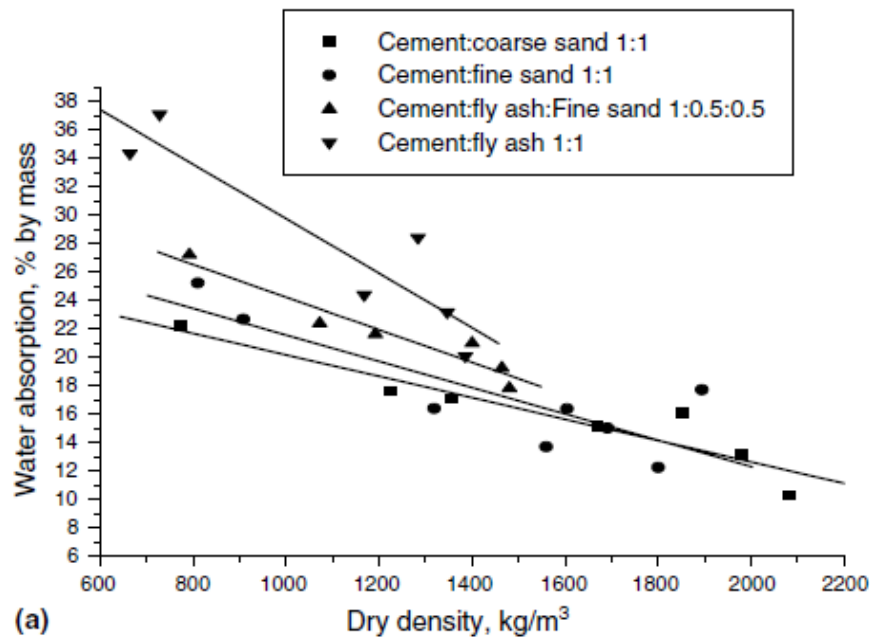
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลล์ลู่วิ่งขึ้นอยู่กับลักษณะปัจจัยพื้นฐานของส่วนผสมและสารเพิ่มฟองที่ใช้ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลล์ลู่วิ่งมีค่าลดลงตามความหนาแน่นที่ลดลง Just and Middendorf (2009) พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลล์ลู่วิ่งเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) โดยค่าอัตราส่วน w/c ของคอนกรีตมวลเบาเซลล์ลู่วิ่งที่ศึกษาระหว่าง 0.45-0.6 ผลการศึกษาที่ได้มีความสอดคล้องกับรายงานของ DeRose and Morris (1999) และ Khatib and Wild (1996) Kearsley and Wainwright (2002) พบว่าปริมาณทรายที่ใช้ในส่วนผสมไม่ได้มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลล์ลู่วิ่ง DeRose and Morris (1999) พบว่ากำลัง

รับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเถ้าลอยและซิลิกาฟูม โดยเฉพาะกับคอนกรีตเซลลูโลสที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kearsley and Wainwright (2002)

DeRose and Morris (1999) ศึกษาการใช้ผงหินปูน (Fine limestone) ที่ผ่านการบดละเอียดผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และผสมร่วมกับเถ้าลอยพบว่าสามารถเร่งอัตราการก่อตัวของคอนกรีตเซลลูโลสได้ ส่งผลให้คอนกรีตแข็งตัวเร็วในช่วงอายุต้น และมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ไม่ได้ใส่ผงหินปูน Kearsley and Wainwright (2002); Nambiar and Ramamurthy (2006) และ Nambiar and Ramamurthy (2007) พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของโฟม (Foam) และประเภทของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้

Kearsley (1996) ได้ศึกษาอิทธิพลของการบ่มต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลส ในสามกรณีคือการบ่มที่อุณหภูมิ 50°C การบ่มปิดผนึกไว้ในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ 22°C และการบ่มในน้ำ ผลการศึกษาพบการบ่มในน้ำให้กำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด เนื่องจากโพรง (Pore) ของคอนกรีตเซลลูโลสก่อให้เกิดแรงดันน้ำในโครงสร้างจุลภาค การบ่มแบบปิดผนึกในถุงพลาสติกให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด DeRose and Morris (1999) พบว่าการบ่มก้อนตัวอย่างคอนกรีตเซลลูโลสในอากาศที่อุณหภูมิ 50°C ให้กำลังสูงกว่าการบ่มในน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาโดย Wongkeo, Thongsanitgarn et al. (2012)

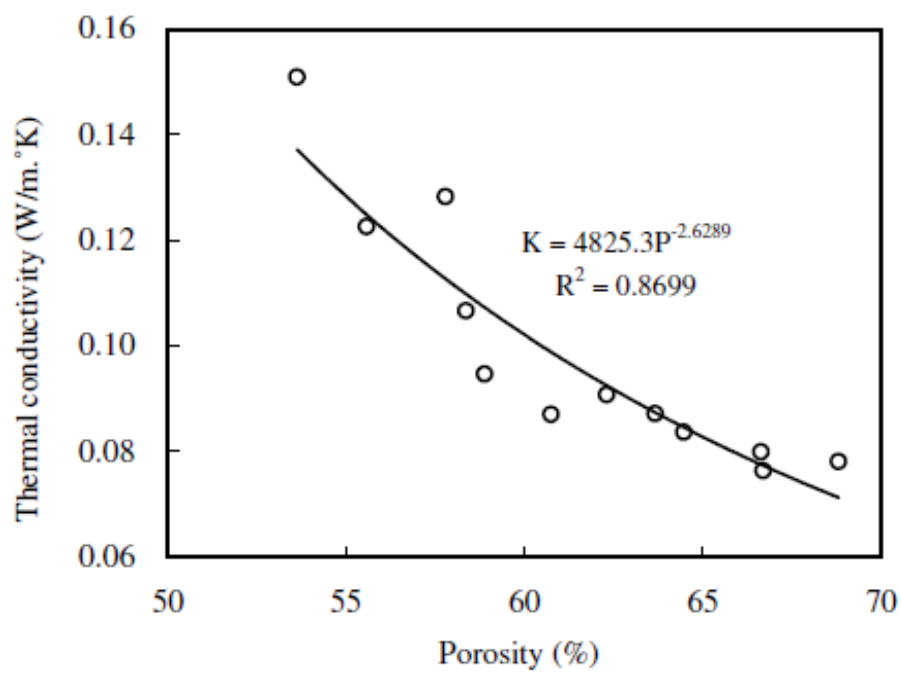
Kunhanandan Nambiar and Ramamurthy (2007) รายงานว่าดัชนี Sorptivity ของคอนกรีตเซลลูโลสที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย (ความหนาแน่นแห้ง 1400 kg/m³) มีค่าระหว่าง 0.5-0.7 mm/min^{1/2} ซึ่งสูงกว่าส่วนผสมปูนซีเมนต์และทราย (มีค่าประมาณ 0.3-0.6 mm/min^{1/2}) นอกจากนี้ ยังพบอีกว่าคอนกรีตเซลลูโลสที่ประกอบด้วยส่วนผสมของปูนซีเมนต์และทรายมีค่าดัชนี Sorptivity ต่ำสุด ซึ่งเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างเซลล์ปิด (Closed cell structure) ของคอนกรีต Nambiar and Ramamurthy (2006) พบว่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีค่าลดลงตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นแห้ง

(Nambiar and Ramamurthy, 2006)

Kearsley and Wainwright (2001) รายงานผลของการทดสอบการซึมผ่านน้ำ (Water permeability) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส และพบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีค่าการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตปกติประมาณ 100 เท่า โครงสร้างที่เป็นแบบเซลล์ (cellular structure) ทำให้คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งมีค่าระหว่างร้อยละ 5-30 ของคอนกรีตปกติ (Jones and McCarthy, 2005) ในทางปฏิบัติ ชิ้นส่วนคอนกรีตปกติต้องมีความหนามากกว่าของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสถึง 5 เท่า จึงจะมีความเป็นฉนวนกันความร้อนเทียบเท่ากันได้ DeRose and Morris (1999) พบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีค่าต่ำมากถึง 0.10 W/m²K ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ (มีค่าอยู่ระหว่าง 1.1-1.4 W/m²K) จะเห็นว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตปกติถึงประมาณ 10 เท่า Wang et al. (2005) พบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ทำจากกากตะกอนน้ำเสียมีค่าระหว่าง 0.084-0.102 W/m²K สัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลงตามปริมาณโพรงของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6



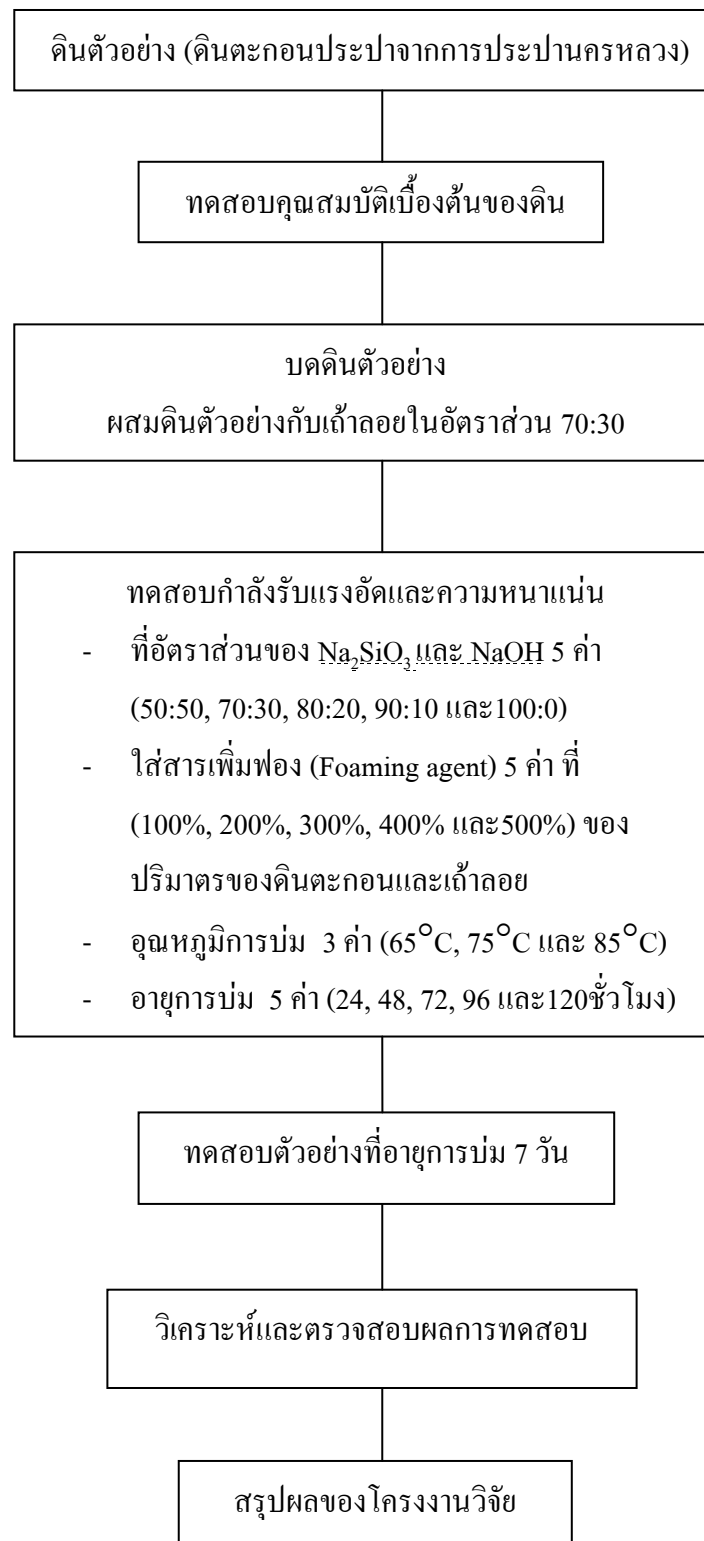
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีต
เซลล์ดำทำ จากตะกอนน้ำเสีย (Wang et al., 2005)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการโครงการวิจัย

3.1 บทนำ

โครงการนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและอธิบายถึงการพัฒนากำลังอัดและความหนาแน่นของดินตะกอนประปา ถ้ำลอย ผสมกับสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ดินตะกอนประปาถ้ำลอยจะถูกนำมาผสมเข้ากับสารกระตุ้นซึ่งเป็นส่วนผสมของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารเพิ่มฟอง (Foaming agent) เพื่อหากำลังรับอัดของดินตะกอนประปาจีโอพอลิเมอร์มวลเบาที่ต้องการมีค่าไม่ต่ำกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นมีค่าระหว่าง 800 ถึง 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แผนดำเนินโครงการแสดงดังรูปที่ 3.1 วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการทดสอบดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างทดสอบของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
อัตราส่วนผสมระหว่างดินตะกอนต่อเถ้าลอย	1	70:30
อัตราส่วนผสมระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH	5	50:50, 70:30, 80:20, 90:10 และ 100:0
สารเพิ่มฟอง (Foaming agent)	5	100%, 200%, 300%, 400% และ 500%
อุณหภูมิ	3	65°C, 75°C และ 85°C
อายุบ่มต่อ 1 อุณหภูมิ	5	24, 48, 72, 96 และ 120
จำนวนตัวอย่าง	3	ชุดละ 3 ตัวอย่าง

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างดิน ดินตัวอย่างเป็นดินตะกอนประปาที่ได้จากการประปานครหลวง เขต บางเขน

3.2.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (Basic property) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ ลักษณะทางวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานของดินจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด และชนิด ของดิน ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินดังนี้

1. ปริมาณความชื้นเริ่มต้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2216
2. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กลงว่า 4.75 มิลลิเมตร) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854
3. จีดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) และพิกัดพลาสติก (Plastic limit) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318
4. การบดอัด จะทดสอบกำลัง ตามมาตรฐาน ASTM C69-09

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินและสารละลาย

ดินตัวอย่างจะถูกตากให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบ ก่อนนำเข้าเครื่องบดละเอียด (ดินที่ผ่านการบดละเอียดจะมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 0)

สารเพิ่มฟองที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้คือ Sika Poro 40 นำสารเพิ่มฟองปริมาณ 40 CC ผสมกับน้ำที่เตรียมไว้ 2 ลิตร จากนั้นเติมลงในเครื่องฉีดโฟมแล้วเขย่าจนน้ำ และ โฟมรวมตัวกัน ลักษณะของโฟมที่ได้จะคล้ายเนื้อครีมเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก

สารละลาย NaOH ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมล ซึ่งวิธีการผสมสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 10 โมล สามารถสรุปได้ดังนี้ สารละลาย NaOH แบบเกรด 400 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 1000 มิลลิลิตรหลังจากนั้นคนให้สารละลายเข้ากับน้ำกลั่น และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีองค์ประกอบของ Na_2O ร้อยละ 9 และ SiO_2 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

3.4 การเตรียมตัวอย่างดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

ตะกอนดินประปาจะถูกผสมเข้ากับเถ้าลอย (Fly ash, FA) ในอัตราส่วนผสม 70:30 จนเป็นเนื้อเดียวกัน เติมสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ในอัตราส่วน L:FA ที่เราต้องการแล้วผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ NaOH ในอัตราส่วนผสม Na_2SiO_3 :NaOH เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 50:50 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 10 โมล ต่อจากนั้น นำสารเพิ่มฟอง มีค่าเท่ากับร้อยละ 100, 200, 300, 400 และ 500 ของปริมาตรมวลรวม (ดินตะกอนประปาและเถ้าลอย) มาผสม ตะกอนดินประปาเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาจะถูกเทลงในแบบทรงลูกบาศก์ ที่มีขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบตัวอย่างทดสอบจะถูกนำมากระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 65, 75 และ 85°C ที่อายุการบ่ม 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง และนำมาบ่มในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ก่อนทำการทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C69 – 09

บทที่ 4

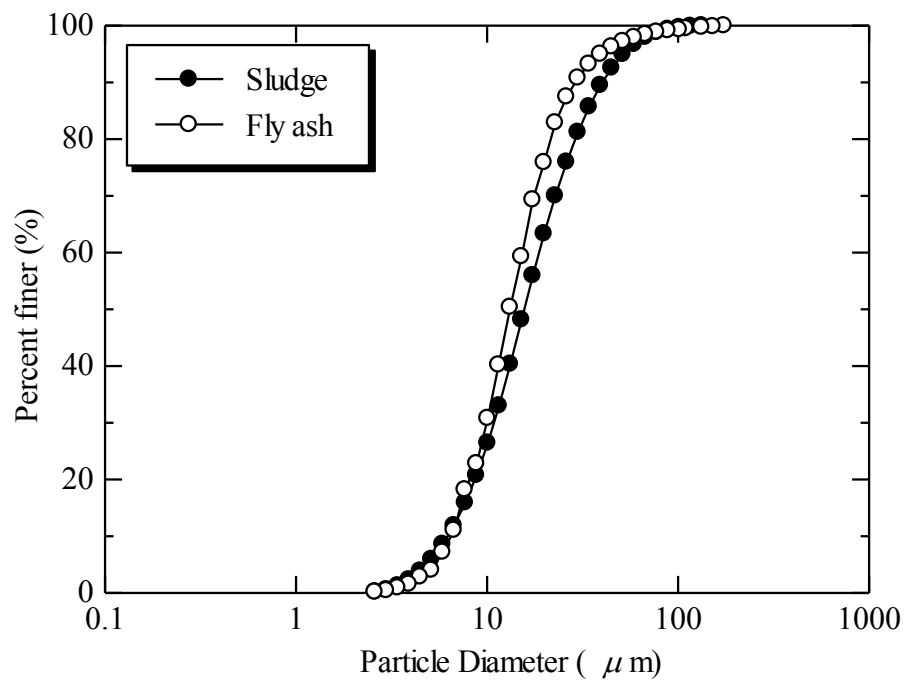
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการศึกษาน้ำหนัก กำลังอัดของดินตะกอนประปาจิโพลีเมอร์มวลเบา เพื่ออธิบายอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมน้ำหนักและกำลังอัด (ปริมาณของดินตะกอนประปาต่อเถ้าลอย อัตราส่วนผสมระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$, ปริมาณของสารเพิ่มฟอง อุณหภูมิ และอายุการบ่มตัวอย่างในอุณหภูมิต่างๆ) ที่ขยเสนออัตราส่วนของดินตะกอนประปาเถ้าลอยจิโพลีเมอร์ที่เหมาะสม

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอนประปา และเถ้าลอย

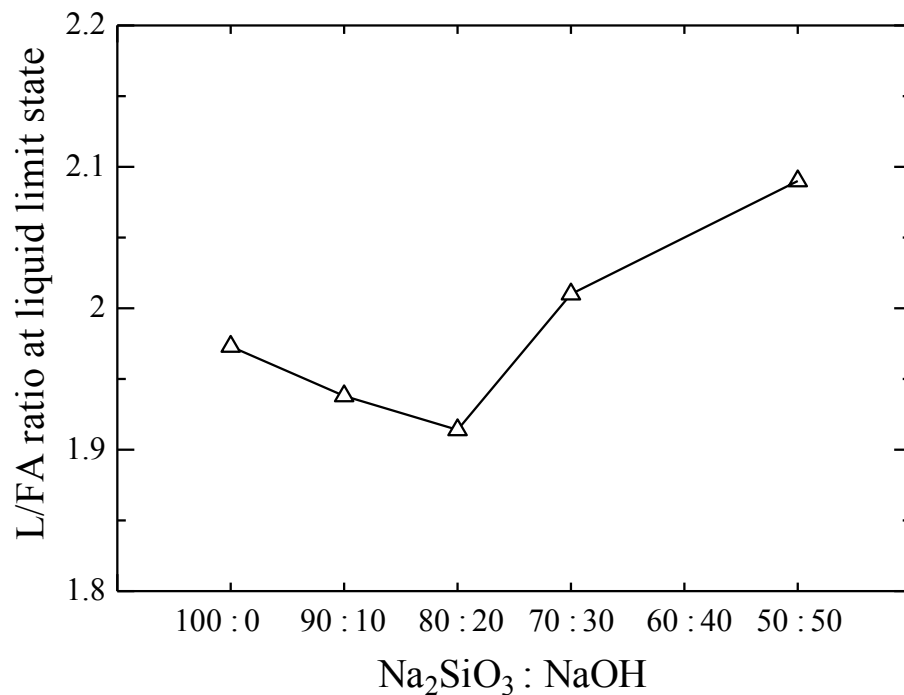
ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินตะกอนประปา เก็บมาจากโรงงานผลิตน้ำบางเขน กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นดินตะกอนเหลือทิ้งที่มีปริมาณมาก ซีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 64 และ 0 ตามลำดับ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนประกอบทางเคมีและการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง คุณสมบัติทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ผลรวมของปริมาณธาตุ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 75.57 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50}) ของเถ้าลอยเท่ากับ 16 ไมครอน การกระจายขนาดของอนุภาคของเถ้าลอยแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analysis ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยเท่ากับ 2.53 ตามลำดับ จากกราฟการกระจายขนาดของอนุภาคและภาพถ่ายกำลังขยาย จะเห็นได้ว่าอนุภาคของตะกอนดินมีขนาดเท่ากับอนุภาคของเถ้าลอย



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของดินตะกอนประปา และเถ้าลอยถ่านหิน

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินตะกอนประปาและเถ้าลอย

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



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง L/FA และ Na₂SiO₃ : NaOH

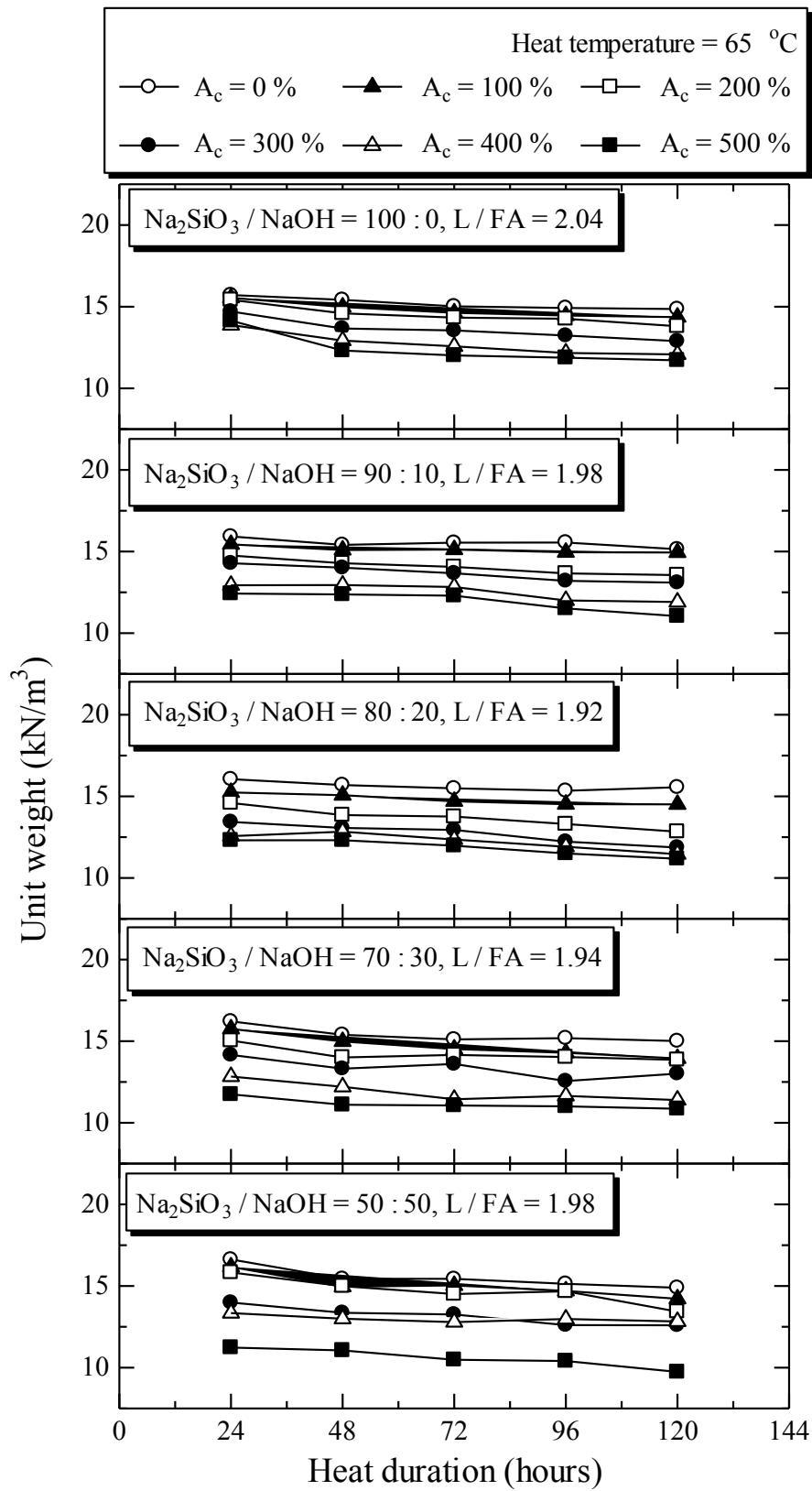
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารกระตุ้น (Na₂SiO₃ : NaOH) และอัตราส่วน Liquid Alkaline Activator ต่อเถ้าลอย (L/FA) ที่ขีดจำกัดเหลวซึ่งเป็นพื้นฐานในการเตรียมตัวอย่างดินตะกอนจีโอโพลิเมอร์มวลเบา จะเห็นว่าอัตราส่วนของสารกระตุ้น (Na₂SiO₃ : NaOH) ที่ 80:20 ให้ค่าขีดจำกัดเหลวที่เหมาะสมที่ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.92

4.3 หน่วยน้ำหนักของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

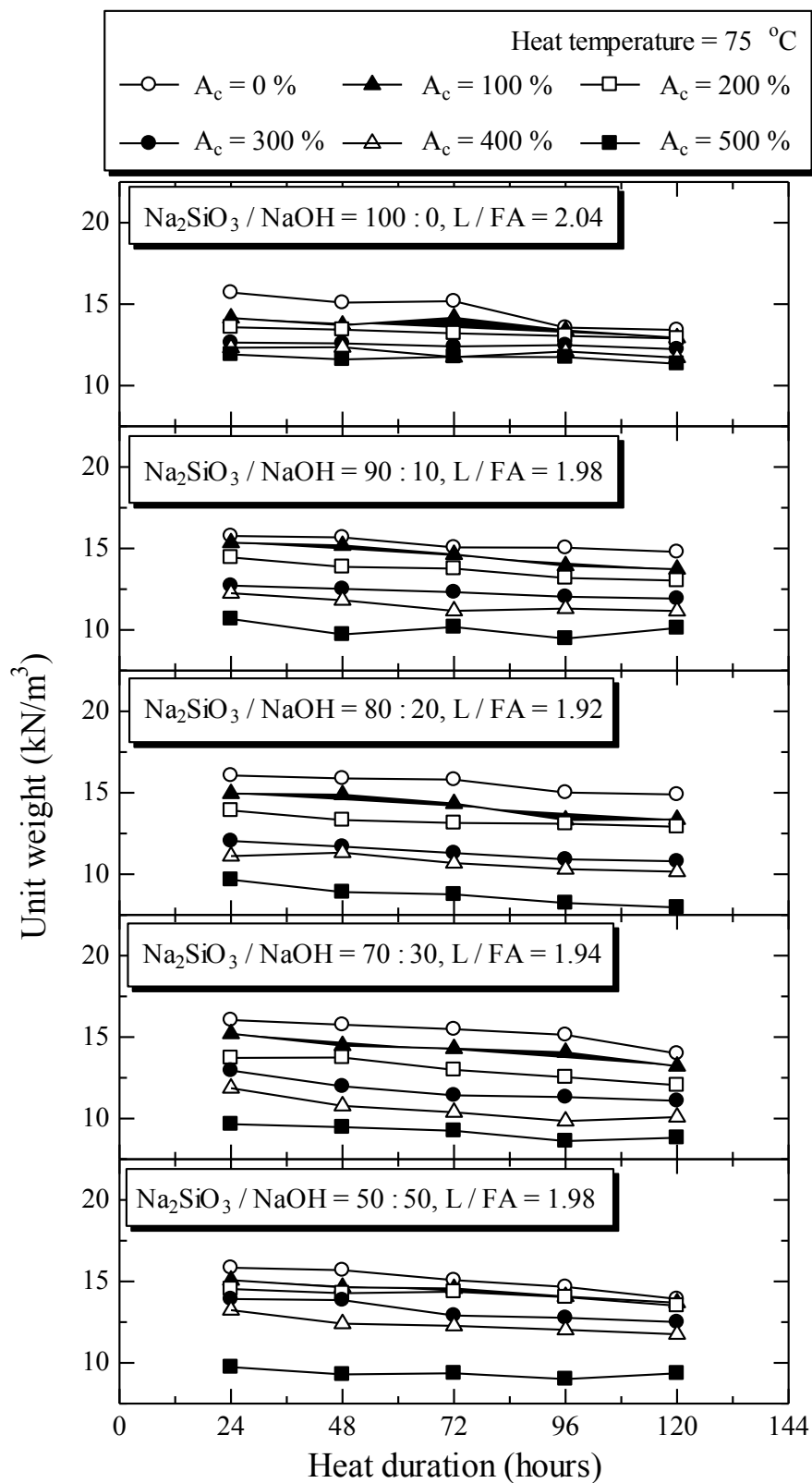
จากรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 แสดงหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่การทดสอบ 7 วัน ตัวอย่างถูกอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 65°C, 75°C และ 85°C และระยะเวลาการบ่มในตู้อบเท่ากับ 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง โดยตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน Na₂SiO₃ : NaOH เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 50:50 และปริมาณของสารเพิ่มฟองเท่ากับร้อยละ 100, 200, 300, 400 และ 500 ของปริมาตรดินและเถ้าลอย จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการบ่มเดียวกัน หน่วยน้ำหนักของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่มีค่าลดลงเล็กน้อยในขณะที่

ระยะเวลาบ่มในตู้อบเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่า ระยะเวลาบ่มในตู้อบมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของหน่วยน้ำหนักของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบาน้อยมาก

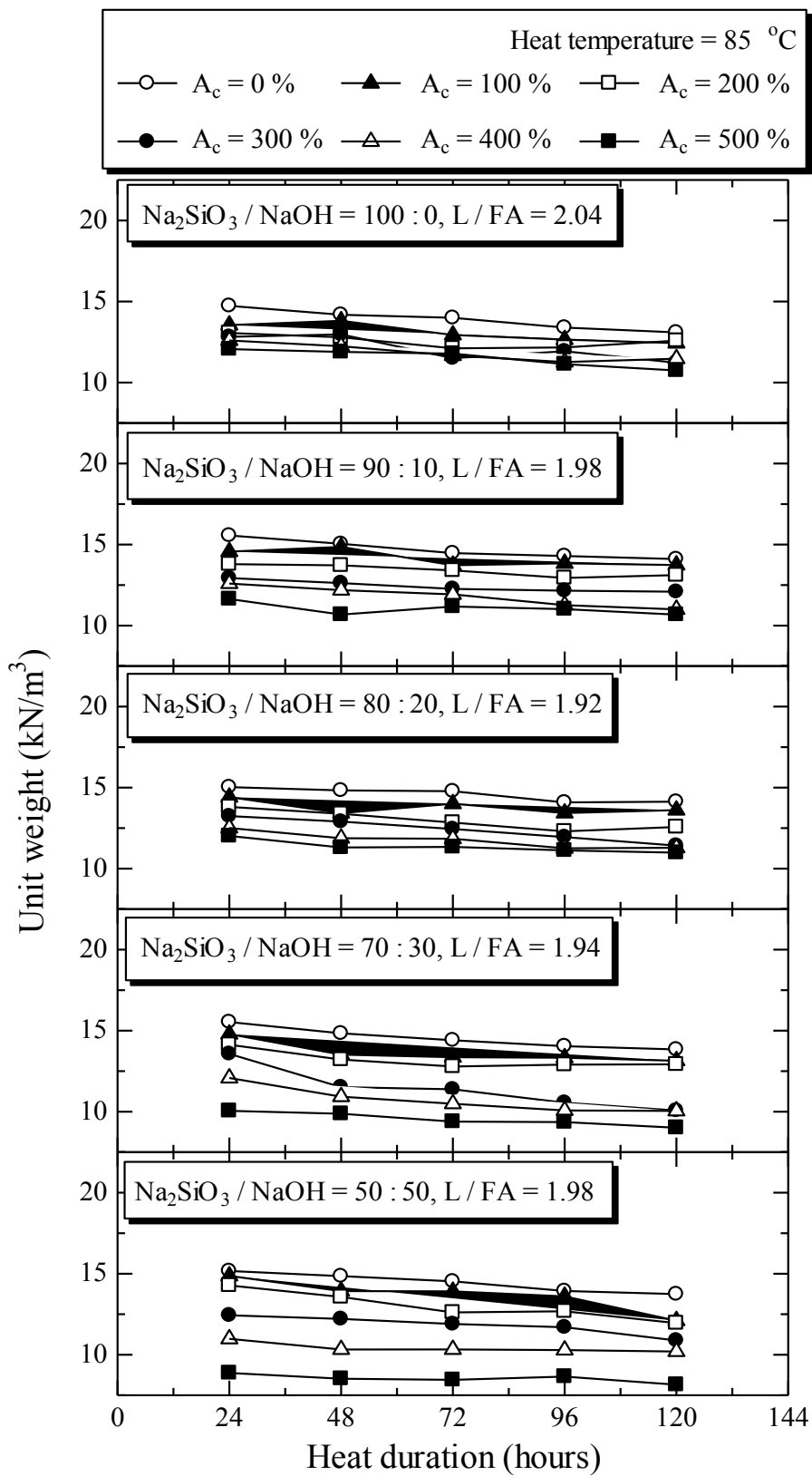
เมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารเพิ่มฟองต่างๆสำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ และอุณหภูมิ จะพบว่าหน่วยน้ำหนักของดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาลดลงอย่างเห็นได้ชัดกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณของสารเพิ่มฟอง หน่วยน้ำหนักของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 และปริมาณของสารเพิ่มฟองเท่ากับร้อยละ 500 ที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับหน่วยน้ำหนักของน้ำ (9.81 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและอายุการบ่มจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่อุณหภูมิ 65°C



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและอายุการบ่มจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่อุณหภูมิ 75°C



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและอายุการบ่มจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่อุณหภูมิ 85

4.4 กำลังอัดของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

รูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่อายุบ่ม 7 วัน ตัวอย่างทดสอบถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65°C, 75°C และ 85°C และระยะเวลาบ่มในตู้อบที่เวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง) โดยตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 50:50 และปริมาณของโฟมเท่ากับร้อยละ 100, 200, 300, 400 และ 500 ของปริมาตรมวลรวม

จากรูปที่ 4.6 พบว่า กำลังอัดของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบาในช่วงแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอายุบ่มในตู้อบ จนกระทั่งอายุบ่มในตู้อบเท่ากับ 72 ชั่วโมง (อายุบ่มที่เหมาะสม) หลังจากนั้นกำลังอัดจะมีค่าลดลงกับการเพิ่มขึ้นของอายุบ่มในตู้อบ กำลังอัดของดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่อุณหภูมิในตู้อบ 65°C และอายุบ่มในตู้อบ 72 ชั่วโมง (อายุบ่มที่เหมาะสม) ให้กำลังอัดสูงสุดสำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ และปริมาณโฟม

จากรูปที่ 4.7 กำลังอัดของดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่อุณหภูมิเท่ากับ 75°C และอายุบ่มในตู้อบเท่ากับ 48 ชั่วโมง ให้กำลังอัดสูงสุดสำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ และปริมาณโฟม กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มในตู้อบที่เพิ่มขึ้น เมื่ออายุบ่มในตู้อบมากกว่า 48 ชั่วโมง กำลังอัดของตัวอย่างลดลงอย่างเห็นได้ชัด กับการเพิ่มขึ้นของอายุบ่มในตู้อบ

จากรูปที่ 4.8 กำลังอัดของดินตะกอนประปาถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่อุณหภูมิเท่ากับ 85°C อายุบ่มในตู้อบเท่ากับ 24 ชั่วโมง ให้กำลังอัดสูงสุดสำหรับทุกอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ และปริมาณโฟม เมื่ออายุบ่มในตู้อบมากกว่า 24 ชั่วโมง กำลังอัดของตัวอย่างทดสอบลดลง

4.5 การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

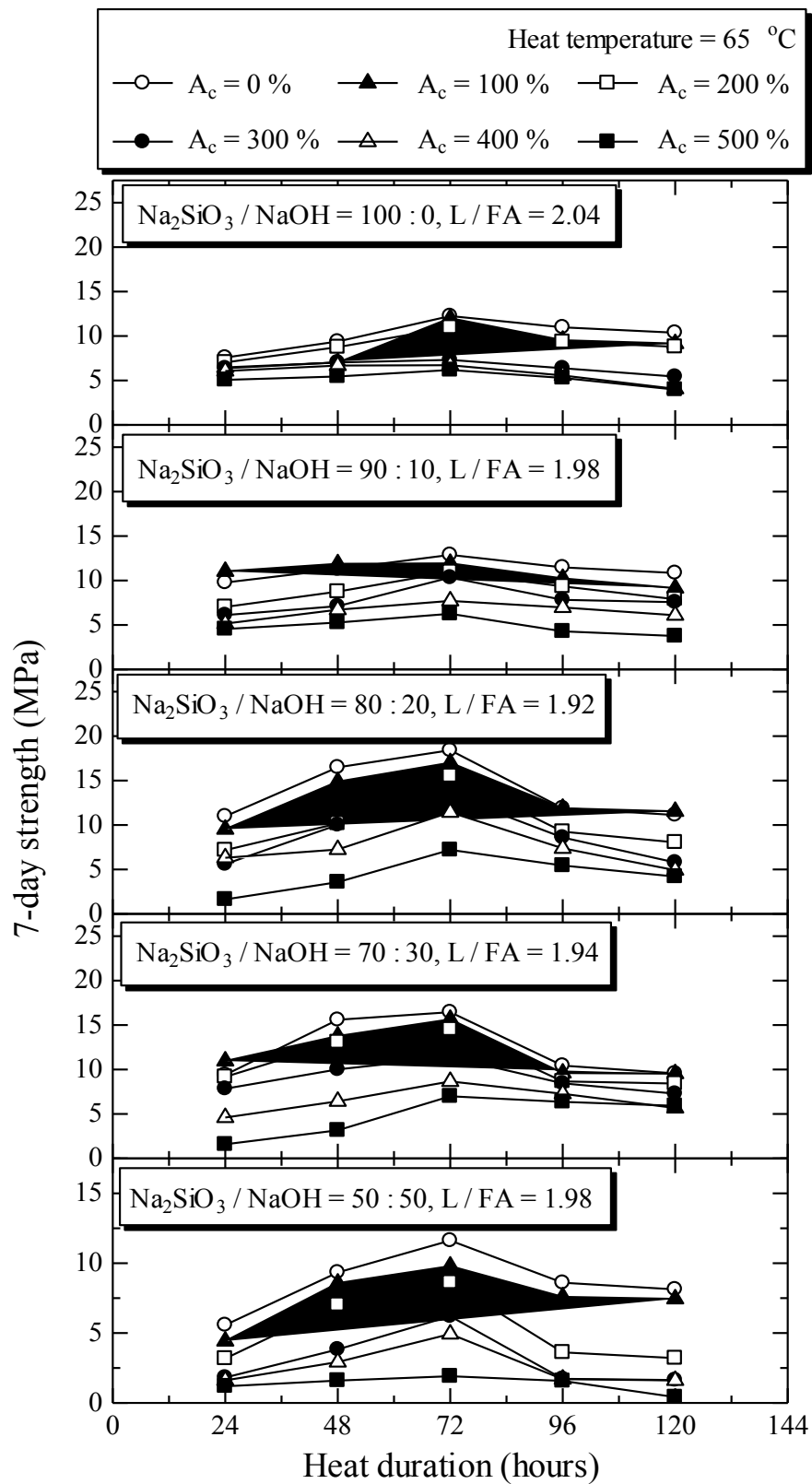
การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตะกอนดินประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศ มอก.2601-2556 (C8-12) ที่ระบุเกณฑ์กำลังต้านทานแรงอัดตามมาตรฐานไว้ไม่น้อยกว่า 25.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าระหว่าง 800-1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรแสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วน (ตะกอนดินประปา ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศชนิด C10 คือ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ มีค่าเท่ากับ 70:30 อุณหภูมิในการบ่มเท่ากับ 75°C สำหรับระยะเวลาบ่มในตู้อบมากกว่า 48 ชั่วโมง และปริมาณโฟมมีค่าเท่ากับร้อยละ

500 และอัตราส่วน (ตะกอนดินประปา ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 คือ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ มีค่าเท่ากับ 70:30 อุณหภูมิในการบ่มเท่ากับ 65°C สำหรับระยะเวลาบ่มในตู้อบมากกว่า 48 ชั่วโมง และปริมาณโฟมมากกว่าร้อยละ 500

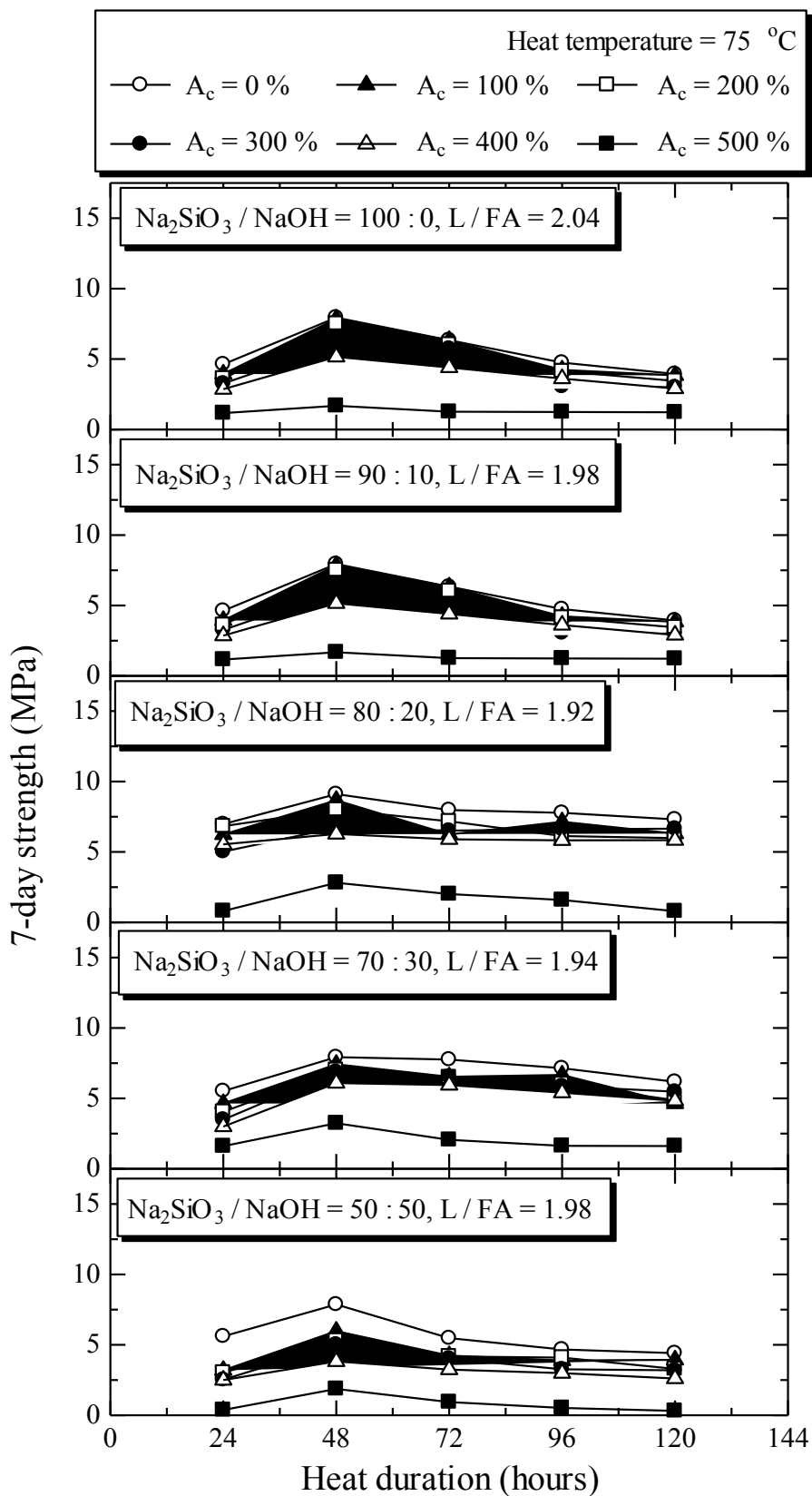
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมของดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบาจำแนกตาม

มอก.2601-2556

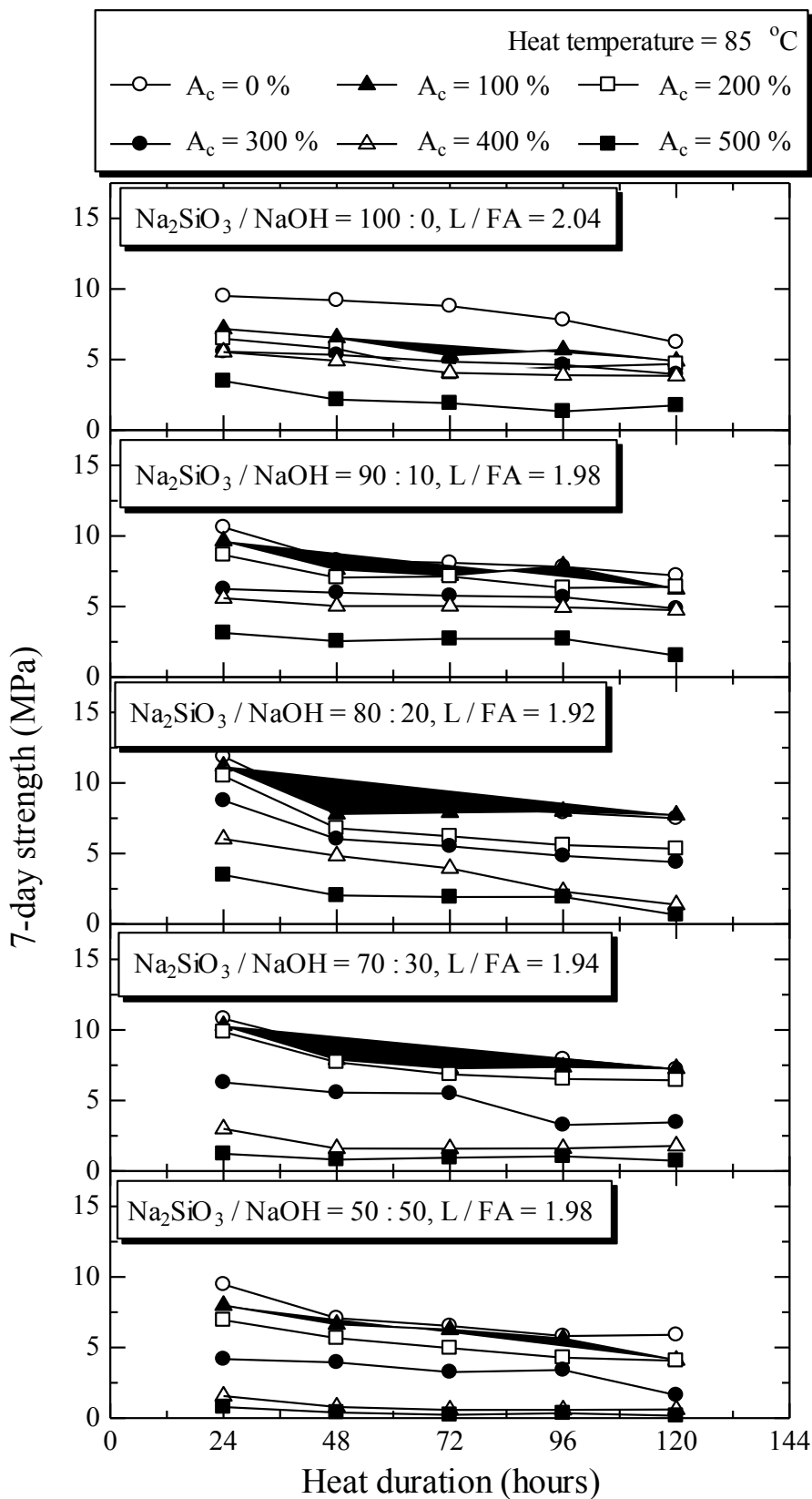
ชนิด	ความหนาแน่นแห้ง (kg/m ³)	ความต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า MPa (kg/cm ²)	ตัวอย่างทดสอบที่ผ่านมาตรฐาน มอก.2601-2556				
			อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3:$ NaOH	อายุบ่ม (hr)	ปริมาตรโฟม (ร้อยละ)	L/FA
C8	701-800	2.0 (20.4)	-	-	-	-	-
C9	801-900	2.5 (25.5)	-	-	-	-	-
C10	901-1000	2.5 (25.5)	75	70:30	48	500	1.94
C12	1001-1200	2.5 (25.5)	65	70:30	48-120	500	1.94



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่อุณหภูมิ 65°C



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่อุณหภูมิ 75°C



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่ อุณหภูมิ 85°C

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของดินตะกอนจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ห้อตราส่วนผสม (ตะกอนดินประปา ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมเพื่อผลิตดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่มีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (2.5MPa) และความหนาแน่นระหว่าง 800 ถึง 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พร้อมทั้งนำเสนอวิธีการออกแบบการผลิตดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา เพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นที่ต้องการ ผลการทดสอบสรุปได้ดังนี้

1. อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 80:20 ให้กำลังอัดสูงสุดมีค่าประมาณ 20, 10 และ 12.5 MPa สำหรับอุณหภูมิ 65°C , 75°C และ 85°C ตามลำดับ
2. อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 65°C ส่วนอุณหภูมิที่สูงกว่า 65°C ทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณความชื้นในตัวอย่างทดสอบ ซึ่งส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการหดตัวและเกิดรอยแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบ
3. อัตราส่วน (ตะกอนดินประปา ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C10 คือ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ มีค่าเท่ากับ 70:30 อุณหภูมิในการบ่มเท่ากับ 75°C สำหรับระยะเวลาบ่มในตู้อบมากกว่า 48 ชั่วโมง และปริมาณโฟมมีค่าเท่ากับร้อยละ 500
4. อัตราส่วน (ตะกอนดินประปา ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 คือ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ มีค่าเท่ากับ 70:30 อุณหภูมิในการบ่มเท่ากับ 65°C สำหรับระยะเวลาบ่มในตู้อบมากกว่า 48 ชั่วโมง และปริมาณโฟมมากกว่าร้อยละ 500

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการวิจัยต่อไป

- 5.2.1 การวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ ดินตะกอนประปาจีโอโพลิเมอร์มวลเบา มาผลิต โดยใช้อัตราส่วนดินตะกอนต่อเถ้าลอยเท่ากับ 70:30 ดังนั้นควรศึกษาที่อัตราส่วนของดินตะกอนต่อเถ้าลอยต่างๆเพิ่มเติม เพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการทำดินตะกอนจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

เอกสารอ้างอิง

- คมกริช เวชสิทธิ์, สุทธิรักษ์ บูชากุล, ปาริฉัตร ปั่นทอง และสุรเดช เหม้มพกุล. (2553). การออกแบบและก่อสร้างระบบกำจัดตะกอนโดยใช้วิธีรีดกรอง โรงงานผลิตน้ำบางเขน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, ประเทศไทย.
- เริงศักดิ์ นนทิเมธากุล และอภิศักดิ์ จุฑาทิรังศ์. (2549). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ. (2548). อิทธิพลของอุณหภูมิต่อกำลังอัดของมอร์ต้าจีโอโพลีเมอร์. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2548, ระยอง, หน้า CON30-CON34.
- Beben, D. and Z. "Zee" Manko. (2011). **"Influence of selected hydrophobic agents on some properties of autoclaving cellular concrete (ACC)."** Construction and Building Materials 25(1): 282-287.
- Billong, N., U. C. Melo, et al. (2011). **"Improving hydraulic properties of lime-rice husk ash (RHA) binders with metakaolin (MK)."** Construction and Building Materials 25(4): 2157-2161.
- BS 1881-116. (1983). **"Method of determination of compressive strength of concrete cubes."** British Standards Institute.
- Cebeci, Ö. Z. (1981). **"Pore structure of air-entrained hardened cement paste."** Cement and Concrete Research 11(2): 257-265.
- Chindapasirt, P., C. Chotetanorm, et al. (2011). **"Use of palm oil fuel ash to improve chloride and corrosion resistance of high-strength and high-workability concrete."** Journal of Materials in Civil Engineering 23(4): 499-503.
- Chindapasirt, P., C. Jaturapitakkul, et al. (2005). **"Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste."** Cement and Concrete Composites 27(4): 425-428.
- Chindapasirt, P., C. Jaturapitakkul, et al. (2007). **"Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste."** Construction and Building Materials 21(7): 1534-1541.

- Chindaprasirt, P. and U. Rattanasak. (2011). "**Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash.**" *Materials and Design* 32(2): 723-727.
- Cyr, M., P. Lawrence, et al. (2006). "**Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength.**" *Cement and Concrete Research* 36(2): 264-277.
- Davidovits, J. (2008). "**Geopolymer Chemistry and Application.**", Institut Géopolymère.
- DeRose and Morris (1999). "**The influence of the mix design on the properties of micro-cellular concrete.**" Thomas Telford Publishing. R. K. D. a. N. A. Henderson.
- Feng, N.-Q. and G.-F. Peng. (2005). "**Applications of natural zeolite to construction and building materials in China.**" *Construction and Building Materials* 19(8): 579-584.
- Goldman, A. and A. Bentur. (1993). "**The influence of microfillers on enhancement of concrete strength.**" *Cement and Concrete Research* 23(4): 962-972.
- Gopalan, M. K. (1993). "**Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class F fly ash concrete.**" *ACI Materials Journal* 90(2): 117-121.
- Hoff, G. C. (1972). "**Porosity-strength considerations for cellular concrete.**" *Cement and Concrete Research* 2(1): 91-100.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2003). "**Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis.**" *Geotechnique* 53(4): 439-444.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2005). "**Clay-water/cement ratio identity of cement admixed soft clay.**" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 131(2): 187-192.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Suddeepong, A. (2011). "**Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay.**" *Construction and Building Materials* 25(4): 1521-1531.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Suddeepong, A., and Chinkulkijniwat, A. (2011). "**Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations.**" *Soils and Foundations* 51(2): 239-251.

- Horpibulsuk, S., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A., and Liu, M.D. (2012). **“Strength and compressibility of lightweight cemented clays.”** Applied Clay Science 69: 11-21.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R. Suddeepong, A., Liu, M.D. and Du, Y.J. (2013). **“Compressibility of lightweight cemented clays.”** Engineering Geology 159: 59-66.
- Horpibulsuk, S., Wijitchot, A., Neramitkornburee, A., Shen, S.L. (2013). **“Factors influencing unit weight and strength of lightweight cemented clay.”** Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology (Tentatively accepted for publication).
- Hull, F. Y. D. J. B. J. J. (1996). 5494513 **“Zeolite-based lightweight concrete products.”** Journal of Cleaner Production. 4: 82.
- Isaia, G. C., A. L. G. Gastaldini, et al. (2003). **“Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete.”** Cement and Concrete Composites 25(1): 69-76.
- Jaturapitakkul, C., J. Tangpagasit, et al. (2011). **“Filler effect and pozzolanic reaction of ground palm oil fuel ash.”** Construction and Building Materials In Press, Corrected Proof.
- Jitchaiyaphum, K., T. Sinsiri, et al. (2011). **“Cellular Lightweight Concrete Containing Pozzolan Materials.”** Procedia Engineering 14(0): 1157-1164.
- Jones, M. R. and A. McCarthy. (2005). **“Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications.”** Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications. N. M. Dhir RK, McCarthy A. London, Thomas Telford: 61–88.
- Jones, M. R. and A. McCarthy. (2005). **“Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete.”** Fuel 84(11): 1398-1409.
- Just, A. and B. Middendorf. (2009). **“Microstructure of high-strength foam concrete.”** Materials Characterization 60(7): 741-748.
- Karakurt, C., H. Kurama, et al. (2010). **“Utilization of natural zeolite in aerated concrete production.”** Cement and Concrete Composites 32(1): 1-8.
- Kearsley, E. P. (1996). **“The use of foamcrete for affordable development in third world countries.”** Appropriate Concrete Technology. R. K. Dhir and M. J. McCarthy. London, E & FN: 233-243.

- Kearsley, E. P. and P. J. Wainwright. (2001). "**The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete.**" *Cement and Concrete Research* 31(1): 105-112.
- Kearsley, E. P. and P. J. Wainwright. (2001). "**Porosity and permeability of foamed concrete.**" *Cement and Concrete Research* 31(5): 805-812.
- Kearsley, E. P. and P. J. Wainwright. (2002). "**Ash content for optimum strength of foamed concrete.**" *Cement and Concrete Research* 32(2): 241-246.
- Kearsley, E. P. and P. J. Wainwright. (2002). "**The effect of porosity on the strength of foamed concrete.**" *Cement and Concrete Research* 32(2): 233-239.
- Khatib, J. M. and S. Wild. (1996). "**Pore size distribution of metakaolin paste.**" *Cement and Concrete Research* 26(10): 1545-1553.
- Kiattikomol, K., C. Jaturapitakkul, et al. (2000). "**Effect of insoluble residue on properties of Portland cement.**" *Cement and Concrete Research* 30(8): 1209-1214.
- Kunhanandan Nambiar, E. K. and K. Ramamurthy. (2007). "**Air-void characterisation of foam concrete.**" *Cement and Concrete Research* 37(2): 221-230.
- Kunhanandan Nambiar, E. K. and K. Ramamurthy. (2007). "**Sorption characteristics of foam concrete.**" *Cement and Concrete Research* 37(9): 1341-1347.
- Laukaitis, A. and B. Fiks. (2006). "**Acoustical properties of aerated autoclaved concrete.**" *Applied Acoustics* 67(3): 284-296.
- Lee, H. K., H. K. Kim, et al. (2010). "**Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber-reinforced cellular concrete.**" *Waste Management* 30(2): 274-284.
- Mamun, M. and V. Bindiganavile. (2011). "**Sulphate resistance of fibre reinforced cement-based foams.**" *Construction and Building Materials* 25(8): 3427-3442.
- Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. (2001). "**Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content.**" *Soils and Foundations* 41(5): 33-45.
- Metha, J. L., L. A. Smith, et al. (1995). "**The application of solidification/stabilization to waste materials.**" London, Lewis Publishers.
- Mindress and J. Young, F. (1981). "**Concrete.**" (Prentice-Hall, Engle Cliffs): .

- Mydin, M. A. O. and Y. C. Wang. (2012). "**Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures.**" *Construction and Building Materials* 26(1): 638-654.
- Nambiar, E. K. K. and K. Ramamurthy. (2006). "Influence of filler type on the properties of foam concrete." *Cement and Concrete Composites* 28(5): 475-480.
- Nambiar, E. K. K. and K. Ramamurthy. (2006). "**Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology.**" *Cement and Concrete Composites* 28(9): 752-760.
- Nambiar, E. K. K. and K. Ramamurthy. (2007). "**Air-void characterisation of foam concrete.**" *Cement and Concrete Research* 37(2): 221-230.
- Nambiar, E. K. K. and K. Ramamurthy. (2008). "**Models for strength prediction of foam concrete.**" *Materials and Structures* 41(2): 247-254.
- Napia, C., T. Sinsiri, et al. (2012). "**Leaching of heavy metals from solidified waste using Portland cement and zeolite as a binder.**" *Waste Management* 32(7): 1459-1467.
- Narayanan, N. and K. Ramamurthy. (2000). "**Structure and properties of aerated concrete: a review.**" *Cement and Concrete Composites* 22(5): 321-329.
- Neville, A. M. and J. J. Brooks. (1990). "**Concrete technology,**", Longman singapore publishers.
- Olorunsogo, F. T. (1998). "**Particle size distribution of GGBS and bleeding characteristics of slag cement mortars.**" *Cement and Concrete Research* 28(6): 907-919.
- Pleau, R., M. Pigeon, et al. (2001). "**Some findings on the usefulness of image analysis for determining the characteristics of the air-void system on hardened concrete.**" *Cement and Concrete Composites* 23(2-3): 237-246.
- Poon, C. S., L. Lam, et al. (2001). "**Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes.**" *Cement and Concrete Research* 31(9): 1301-1306.
- Powers, T. C. and a. R. A. Helmuth. (1953). "**Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing.**" *Research and Developments Laboratories of the Portland Cement Association, Research Department Bulletin 46, Proceedings of the Highway Research Board.*
- Rieger, M. M. (1996). "**Surfactant Encyclopedia.**", Allured Publishing Corporation.

- Rößler, M. and I. Odler. (1985). **"Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes I. Effect of porosity."** Cement and Concrete Research 15(2): 320-330.
- Sanchez, F. and K. Sobolev. (2010). **"Nanotechnology in concrete – A review."** Construction and Building Materials 24(11): 2060-2071.
- Sata, V., C. Jaturapitakkul, et al. (2010). **"Compressive Strength and Heat Evolution of Concretes Containing Palm Oil Fuel Ash."** Journal of Materials in Civil Engineering 22(March).
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S. and Shen, S.L. (2013). **"Strength development in clay-fly ash geopolymer."** Construction and Building Materials 40: 566-574.
- Tangpagasit, J., R. Cheerarot, et al. (2005). **"Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar."** Cement and Concrete Research 35(6): 1145-1151.

ภาคผนวก

เล่ม ๑๓๐ ตอนพิเศษ ๑๒๓ ง หน้า ๔
ราชกิจจานุเบกษา ๒๕ กันยายน ๒๕๕๖

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ ๔๕๖๒ (พ.ศ. ๒๕๕๖)

ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

พ.ศ. ๒๕๑๑

เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๑๕ แห่งพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. ๒๕๑๑ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมออกประกาศกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก. 2601 - 2556 ไว้ ดังมีรายการละเอียดต่อท้ายประกาศนี้

ทั้งนี้ ให้มีผลตั้งแต่วันที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ ๒๖ กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๕๖

ประเสริฐ บุญชัยสุข

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

มอก.2601-2556

ภาคผนวก ก.

การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

(ข้อ 9.)

- ก.1 รุ่น ในที่นี้หมายถึง คอนกรีตล่อกลมมวลเบาชนิดเดียวกัน ส่วนผสมเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขาย
ในระยะเวลาเดียวกัน
- ก.2 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการ
ชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากันทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้
- ก.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบขนาดและลักษณะทั่วไป
- ก.2.1.1 ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 ก้อน
- ก.2.1.2 ตัวอย่างทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4 และข้อ 6.1 จึงจะถือว่าคอนกรีตล่อกลมเบารุ่นนั้น
เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด
- ก.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร
- ก.2.2.1 ให้ชักตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทำคอนกรีตล่อกลมเบาจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 แห่ง
- ก.2.2.2 ชั้นทดสอบทุกชั้นต้องเป็นไปตามข้อ 6.2 จึงจะถือว่าคอนกรีตล่อกลมเบารุ่นนั้นเป็นไปตาม
เกณฑ์ที่กำหนด
- ก.2.3 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบความต้านแรงอัด
- ก.2.3.1 ให้ชักตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทำคอนกรีตล่อกลมเบาจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 แห่ง
- ก.2.3.2 ชั้นทดสอบทุกชั้นต้องเป็นไปตามข้อ 6.3 จึงจะถือว่าคอนกรีตล่อกลมเบารุ่นนั้นเป็นไปตาม
เกณฑ์ที่กำหนด
- ก.2.4 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ
- ก.2.4.1 ให้ชักตัวอย่างตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทำคอนกรีตล่อกลมเบาจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 แห่ง
- ก.2.4.2 ชั้นทดสอบทุกชั้นต้องเป็นไปตามข้อ 6.4 จึงจะถือว่าคอนกรีตล่อกลมเบารุ่นนั้นเป็นไปตาม
เกณฑ์ที่กำหนด
- ก.3 เกณฑ์ตัดสิน
- ตัวอย่างคอนกรีตล่อกลมเบาต้องเป็นไปตามข้อ ก.2.1.2 ข้อ ก.2.2.2 ข้อ ก.2.3.2 และข้อ ก.2.4.2 ทุกข้อ
จึงจะถือว่าคอนกรีตล่อกลมเบารุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

มอก.2601-2556

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ สำหรับผนังที่ออกแบบไม่รับน้ำหนัก

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ ดังต่อไปนี้

- 2.1 คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า "คอนกรีตบล็อกมวลเบา" หมายถึง คอนกรีตบล็อกที่มีมวลเบากว่าคอนกรีตบล็อกที่มีขนาดเดียวกัน มีฟองอากาศเล็กๆแทรกกระจายในเนื้อคอนกรีตอย่างสม่ำเสมอ ฟองอากาศเกิดจากการใช้สารก่อฟอง ที่ขอบด้านข้างอาจทำเป็นร่อง ผิวหน้าอาจทำเป็นผิวรอยหวี หรือผิวร่อง เหมาะสำหรับใช้ก่อผนัง
- 2.2 ผิวรอยหวี (combed finish) หมายถึง ผิวหน้าของคอนกรีตมวลเบาซึ่งทำเป็นรอยขูดหรือแนวที่ค่อนข้างขนานกัน
- 2.3 ผิวร่อง (scored finish) หมายถึง ผิวหน้าของคอนกรีตมวลเบาซึ่งทำเป็นร่อง

มอก.2601-2556

3. ชนิด

3.1 คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบ่งตามความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งออกเป็น 8 ชนิด ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

(ข้อ 3.1)

ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งเฉลี่ย (kg/m ³)
C6	501 ถึง 600
C7	601 ถึง 700
C8	701 ถึง 800
C9	801 ถึง 900
C10	901 ถึง 1 000
C12	1 001 ถึง 1 200
C14	1 201 ถึง 1 400
C16	1 401 ถึง 1 600

4. ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

4.1 ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ขนาดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาให้เป็นไปตามตารางที่ 2 โดยความสูงคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 4 mm ความยาวคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 5 mm และความหนาคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 3 mm การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 10.1

ตารางที่ 2 ขนาดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

(ข้อ 4.1)

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

ความสูง	ความยาว	ความหนา
200	300	ให้เป็นไปตามที่ผู้ทำระบุไว้ที่ฉลาก
	400	
	500	
	600	

มอก.2601-2556

5. วัสดุและการทำ

5.1 วัสดุ

- 5.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตาม มอก.15 เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ
- 5.1.2 มวลผสมต้องเป็นวัสดุซิลิกา หรือทรายควอตซ์ หรือตะกั่วจากเตาดสูงแบบพ่นลม หรือเถ้าถ่านหิน หรือวัสดุอื่นใดที่ไม่มีสาร เช่น โคลน ฟูน สารอินทรีย์ ในปริมาณที่อาจเป็นผลเสียต่อคุณภาพของ คอนกรีตบล็อกมวลเบา
- 5.1.3 สารก่อฟอง ต้องเป็นวัสดุทำให้เกิดฟองอากาศที่มีความเสถียร และควบคุมเวลาแข็งตัว โดยไม่ ก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีตบล็อกมวลเบา
- 5.1.4 สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต(ถ้ามี)
ต้องเป็นสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต ตาม มอก.733

5.2 การทำ

คอนกรีตบล็อกมวลเบาต้องทำโดยผสมส่วนผสมตามที่ระบุในข้อ 5.1.1 และข้อ 5.1.2 เข้าด้วยกันอย่าง สม่ำเสมอ จากนั้นเติมน้ำจำนวนที่เหมาะสม สารก่อฟอง และสารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต (ถ้ามี) ให้มีฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอ แล้วเทลงในแบบ

6. คุณสมบัติที่ต้องการ

6.1 ลักษณะทั่วไป

ต้องไม่แตก ไม่ร้าว ไม่บิดเบี้ยว ไม่แอ่นค้ำ และไม่มีตำหนิที่เป็นผลเสียต่อการใช้งาน การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ

6.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

เมื่อทดสอบตามข้อ 10.2 แล้ว คอนกรีตบล็อกมวลเบาต้องมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรเฉลี่ยตามตารางที่ 1 โดยคอนกรีตบล็อกมวลเบาแต่ละก้อนจะมีค่าแตกต่างจากที่กำหนดไม่เกิน $\pm 50 \text{ kg/m}^3$

6.3 ความต้านแรงอัด

เมื่อทดสอบตามข้อ 10.3 แล้ว คอนกรีตบล็อกมวลเบาต้องมีความต้านแรงอัดที่อายุ 28 ส เป็นไปตาม ตาราง ที่ 3

มอก.2601-2556

ตารางที่ 3 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบดอีกมวลเบา
(ข้อ 6.3)

ชนิด	ความต้านแรงอัด ไม่น้อยกว่า MPa (kg/cm ²)
C6	2.0 (20.4)
C7	
C8	
C9	2.5 (25.5)
C10	
C12	
C14	5.0 (51.0)
C16	

6.4 อัตราการดูดซึมน้ำ

เมื่อทดสอบตามข้อ 10.4 แล้ว อัตราการดูดซึมน้ำต้องเป็นไปตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบดอีกมวลเบา
(ข้อ 6.4)

ชนิด	อัตราการดูดซึมน้ำ ไม่มากกว่า % (เศษส่วน โดยมวล)
C6	25
C7	
C8	
C9	23
C10	
C12	
C14	20
C16	

มอก.2601-2556

7. การบรรจุ

- 7.1 เมื่อจะนำคอนกรีตบล็อกมวลเบาออกจำหน่าย ผู้ทำต้องจัดเรียงคอนกรีตบล็อกมวลเบาบนแผงรองรับที่เหมาะสม มีการป้องกันขอบไม่ให้แตกบิ่นเสียหายต่อการใช้งานทั้งในการเก็บรักษาและขนส่ง

8. เครื่องหมายและฉลาก

- 8.1 ที่คอนกรีตบล็อกมวลเบาทุกๆ 50 ก้อนอย่างน้อยต้องมี เลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย และชัดเจน
- (1) ชนิด
 - (2) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
- 8.2 ที่ภาชนะบรรจุคอนกรีตบล็อกมวลเบาอย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย และชัดเจน
- (1) ชนิด
 - (2) ความยาว ความกว้าง ความหนา เป็นมิลลิเมตร
 - (3) เดือน ปีที่ทำ
 - (4) จำนวนที่บรรจุในหีบห่อ
 - (5) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน
- 8.3 ในกรณีที่ใช้ภาษาคำประเทศด้วย ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

9. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

- 9.1 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสินให้เป็นไปตามภาคผนวก ก

10. การทดสอบ

10.1 ขนาด

10.1.1 เครื่องมือ

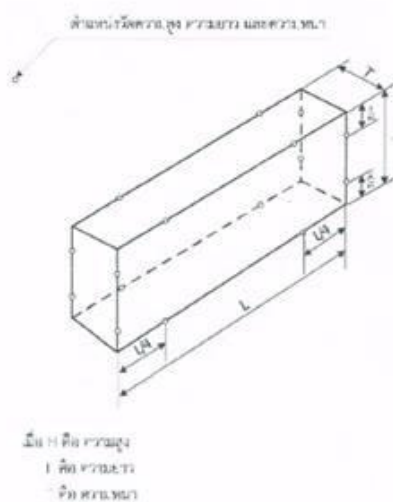
- 10.1.1.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 mm
- 10.1.1.2 เวอร์เนียร์ที่วัดได้ถึง 200 mm

มอก.2601-2556

10.1.2 วิธีทดสอบ

10.1.2.1 ความกว้างและความยาว

ใช้เครื่องวัดตามข้อ 10.1.1.1 วัดความกว้างและความยาวของตัวอย่าง โดยวัดที่ตำแหน่งห่างขอบเป็นระยะหนึ่งในสี่ของด้านนั้น ๆ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตำแหน่งวัดความกว้าง ความยาว และความหนา

(ข้อ 10.1.2.1 และข้อ 10.1.2.2)

10.1.2.2 ความหนา

ใช้เวอร์เนียร์วัดความหนาของตัวอย่างที่ตำแหน่งห่างจากขอบด้านยาวของตัวอย่างเป็นระยะหนึ่งในสี่ของความยาว ดังรูปที่ 1

10.1.3 การรายงานผล

ให้รายงาน ค่าความสูง ความยาว และความหนาของตัวอย่างแต่ละก้อน

10.2 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

10.2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

หล่อชิ้นทดสอบให้มีขนาด 150 mm x 150 mm x 150 mm โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 mm

มอก.2601-2556

10.2.2 เครื่องมือ

10.2.2.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 mm

10.2.2.2 เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 g

10.2.2.3 ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$

10.2.3 วิธีทดสอบ

ให้วัดปริมาตรและชั่งน้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบที่อุณหภูมิ $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 h

10.2.4 การรายงานผล

ให้รายงานค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของชิ้นทดสอบแต่ละค่าและค่าเฉลี่ยจากสูตร

$$\rho = \frac{m}{v}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง เป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร m คือ มวลของชิ้นทดสอบหลังอบในตู้อบ เป็นกิโลกรัม v คือ ปริมาตรของชิ้นทดสอบ เป็นลูกบาศก์เมตร

10.3 ความต้านแรงอัด

10.3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

หล่อชิ้นทดสอบให้มีขนาด 150 mm x 150 mm x 150 mm โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 mm

10.3.2 เครื่องมือ

10.3.2.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 mm

10.3.2.2 เครื่องกดที่อ่านได้ละเอียดถึง 100 N และสามารถควบคุมอัตราเพิ่มแรงอัดได้ระหว่าง 0.05 ถึง 0.20 N/mm²/s

10.3.3 วิธีทดสอบ

10.3.3.1 ให้กดชิ้นทดสอบด้วยวิธีสามที่ระบุใน มอก.109 จนได้ค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อชิ้นทดสอบแตกเสียหาย

10.3.4 การรายงานผล

ให้รายงานค่าความต้านแรงอัดของชิ้นทดสอบแต่ละค่า

มอก.2601-2556

10.4 อัตราการดูดซึมน้ำ

10.4.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

หล่อชิ้นทดสอบให้มีขนาด 150 mm x 150 mm x 150 mm โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 1 mm

10.4.2 เครื่องมือ

10.4.2.1 เครื่องวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 1 mm

10.4.2.2 เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดถึง 1 g

10.4.2.3 ตู้อบ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$

10.4.3 วิธีทดสอบ

10.4.3.1 อบชิ้นทดสอบในตู้อบให้แห้งจนได้มวลคงที่ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 h ที่อุณหภูมิ $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ปลดอบให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 h จากนั้นชั่งมวลแต่ละก้อนเป็นมวลชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง

10.4.3.2 แช่ชิ้นทดสอบตามข้อ 10.4.3.1 ในน้ำสะอาดให้ท่วมเป็นเวลา 24 h แล้วยกออก ใช้ผ้าชุมน้ำเช็ดที่ผิวที่ละก้อนแล้วชั่งใหม่ให้เสร็จภายใน 3 min มวลที่ชั่งได้นี้ถือเป็นมวลชิ้นทดสอบเมื่อเปียก กรณีชิ้นทดสอบไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดในตารางที่ 4 ให้ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 10.4.3.1 โดยใช้ชิ้นทดสอบเดิมกับน้ำกลั่นอีก 1 ครั้ง

10.4.4 วิธีคำนวณและการรายงานผล

10.4.4.1 การคำนวณหาอัตราการดูดซึมน้ำ

$$A = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100$$

เมื่อ A คือ อัตราการดูดซึมน้ำ เป็นร้อยละ (เศษส่วน โดยมวล)

m_1 คือ มวลของชิ้นทดสอบเมื่อแห้ง เป็นกรัม

m_2 คือ มวลของชิ้นทดสอบเมื่อเปียก เป็นกรัม

10.4.4.2 การรายงานผล

ให้รายงานค่าอัตราการดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบทุกก้อน

ประวัติผู้เขียน

นายสุรเชษฐ์ บุญกระสาน เกิดวันที่ 11 มีนาคม 2531 ที่จังหวัดมุกดาหาร บิดาชื่อนายอนน บุญกระสาน มารดาชื่อนางสมหวัง บุญกระสาน สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน มุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร ในปีการศึกษา 2548 หลังจากสำเร็จการศึกษามีความตั้งใจ อยากรเป็นวิศวกรโยธา จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา สำนัก วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปี การศึกษา 2553 พอสำเร็จการศึกษาจึงได้ทำงานเป็นวิศวกรโยธา 2 ปี จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาโท สาขาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2555