

การพัฒนากำลังอัดของเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

นางสาวปัทรินทร์ ธรรมรัตน์พัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

การพัฒนากำลังอัดของเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำโครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบโครงการ



(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

ประธานกรรมการ



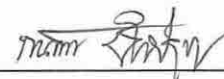
(ศ. ดร.สุขสันต์ ห่อพิบูลสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ)



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติชฐยางกูร)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปัทสนินทร์ ธรรมรัตน์พัฒนา : การพัฒนากำลังอัดของเศษแก้วบดละเอียดจีโอ โพลีเมอร์
มวลเบา (THE STRENGTH DEVELOPMENT IN LIGHTWEIGHT-RECYCLED
GLASSES GEOPOLYMER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข

เศษแก้วบดละเอียดจีโอ โพลีเมอร์นี้จัดเป็นวัสดุเขียว (Green material) ชนิดหนึ่ง ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เศษแก้วถูกนำมาบดละเอียดแล้วใช้เป็นมวลรวมแทนทรายในการผลิตคอนกรีต โดยมุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ และลดผลกระทบต่อแหล่งน้ำทั้งแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดินเนื่องจากการประกอบกิจการอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา หออัตราส่วนผสม (ตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียด เถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) เพื่อผลิตเศษแก้วบดละเอียดจีโอ โพลีเมอร์มวลเบาที่มีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (2.5 MPa) และความหนาแน่นระหว่าง 800 ถึง 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พร้อมทั้งนำเสนอวิธีการออกแบบการผลิตตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา เพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นที่ต้องการ ผลการศึกษาสรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา แต่กำลังอัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เมื่อเพิ่มปริมาณ โฟม ความหนาแน่นของตัวอย่างมีค่าลดลง เช่นเดียวกับกำลังอัด ขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่าสารกระตุ้นต่อเถ้าลอย (L/FA) ระหว่าง 0.6 ถึง 0.8 ไม่ส่งผลต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ และปริมาณฟองอากาศเท่ากัน อัตราส่วน (เศษแก้วบดละเอียด ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ชนิด C10 มีจำนวน 6 ส่วนผสม และชนิด C12 จำนวน 9 ส่วนผสม โดยจะเห็นได้ว่ามีเพียงตัวอย่างที่มีปริมาณฟองอากาศที่ร้อยละ 3 เท่านั้นที่ผ่านตามาตรฐาน และอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 มีจำนวนส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานมากที่สุดโดยแบ่งเป็นชนิด C10 จำนวน 5 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 6 ตัวอย่าง และชนิด C12 จำนวน 7 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 9 ตัวอย่าง โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 1 ถึง 7 โมล และอัตราส่วน L/FA ในช่วง 0.6 ถึง 0.8

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____



PRAPATSARINN THAMMARATTPATTANA : THE STRENGTH
DEVELOPMENT IN LIGHTWEIGHT-RECYCLED GLASSES
GEOPOLYMER. ADVISOR : PROF. SUKSUN HORPIBULSUK, Ph.D., P.E.

The recycled glasses geopolymer is a green material which does not require Portland cement as a cementing agent. Recycled glasses were used as aggregates to develop the lightweight-recycled glasses-fly ash (FA) lightweight geopolymer block according to the Thailand Industrial Standard (TIS). The strength requirement is 2.5 MPa. The dry unit weight requirement is between 800 and 1200 kg/m³. This research aims to study unconfined compressive strength and dry unit weight of recycled-glasses-FA geopolymer to ascertain its performance as a lightweight geopolymer block. The development of mix design method is also suggested. Test results indicate that dry unit weight of lightweight-recycled glasses-FA geopolymer sample is not governed by the concentration of NaOH solution. Unlike the unit weight, the strength of lightweight-recycled glasses-FA geopolymer increases as the concentration of NaOH solution increases. Dry unit weight and compressive strength of recycled glasses-FA geopolymer decrease as air content increases. For a particular Na₂SiO₃:NaOH ratio and air content, dry unit weight of lightweight-recycled glasses-FA geopolymer sample is essentially the same for the ratio of liquid alkaline activator (L) and FA (L/FA) ranging between 0.6 and 0.8. In comparison with TIS 2601-2556, the lightweight recycled glasses-FA geopolymer meets the standard class C10 and C12 for 6 and 9 mixtures, respectively. Only samples with air content of 3% Na₂SiO₃:NaOH ratio of 50:50 meet the standard class C10 and C12 for 5 and 7 mixtures, respectively. Using the concentration of NaOH solutions ranging from 1 to 7 mol and L/FA ratios ranging from 0.6 to 0.8, samples can meet the standard class C10 and C12.

School of Civil Engineering
Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____



กิตติกรรมประกาศ

โครงการศึกษานี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ความกรุณาอย่างยิ่งจาก 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 และทำยสุดขอขอบคุณเพื่อนๆ และนักศึกษาทุกคนที่คอยช่วยเหลือในเรื่องการทดลองและให้กำลังใจตลอดการทำงานศึกษาครั้งนี้เป็นอย่างดี

ปภัสรินทร์ ธรรมรัตน์พัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีสมมติฐานและกรอบแนวความคิดของการวิจัย.....	3
2.1 ประวัติความเป็นมาของจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer).....	3
2.2 แก้วลอย.....	4
2.2.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีของแก้วลอย.....	4
2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของแก้วลอย.....	6
2.3 ประเภทของคอนกรีตมวลเบา.....	9
2.4 วัสดุปอซโซลาน.....	13
2.5 ปฏิกริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน.....	13
2.6 ทบทวนวรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	16
3 วิธีดำเนินการโครงการวิจัย.....	23
3.1 บทนำ.....	23
3.2 การเก็บและเตรียมเศษแก้วบดละเอียดตัวอย่าง.....	24
3.3 การเตรียมตัวอย่าง.....	24
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างเศษแก้ว.....	24
3.3.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH).....	25

3.4	การบดอัดตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดเจ้าลอยจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา	25
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	26
4.1	บทนำ	26
4.2	คุณสมบัติพื้นฐานของเศษแก้วและเจ้าลอย	26
4.3	หน่วยน้ำหนักแห้งของเศษแก้วบดละเอียดจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา	27
4.4	กำลังอัดของเศษแก้วบดละเอียดจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา	31
4.5	การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียด จีโอ โพลีเมอร์มวลเบา กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	34
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	36
5.1	สรุปผลงาน โครงงานวิจัย	36
5.2	ข้อเสนอแนะในการทำโครงงานวิจัยต่อไป	36
	เอกสารอ้างอิง	38
	ประวัติผู้เขียน	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-618.....	5
2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยมาตรฐาน ASTM C-618.....	6
2.3 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	8
และเถ้าลอยอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	
2.4 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	14
(เร็กซ์คี้และอภิสักคี้, 2549)	
2.5 รายการประมาณต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส.....	16
3.1 จำนวนตัวอย่างทดสอบของเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลีเมอร์มวลเบา.....	24
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน และเศษแก้วบดละเอียด.....	26
4.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมของเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลีเมอร์มวลเบา.....	35
จำแนกตาม มอก.2601-2556	

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	ภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) ของแก้วลอย (ขยาย 3,000 เท่า).....7
2.2	Polycondensation of Na-poly (Sialate-disiloxo) Albite Framework.....9
2.3	กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส (Just and Middendorf, 2009).....11
2.4	ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวที่ขัดเรียบของ CLC (Just and Middendorf, 2009).....12
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นแห้ง.....21 (Nambiar and Ramamurthy, 2006)
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตเซลลูโลสทำจากตะกอนน้ำเสีย (Wang et al., 2005).....22
3.1	แผนผังขั้นตอนการทำงาน.....23
4.1	ความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างเศษแก้วคละเฮียคจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา.....28 ที่ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 30:70
4.2	ความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างเศษแก้วคละเฮียคจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา.....29 ที่ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50
4.3	ความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างเศษแก้วคละเฮียคจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา.....30 ที่ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 70:30
4.4	กำลังอัดของตัวอย่างเศษแก้วคละเฮียคจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา.....32 ที่ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 30:70
4.5	กำลังอัดของตัวอย่างเศษแก้วคละเฮียคจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา.....33 ที่ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50
4.6	กำลังอัดของตัวอย่างเศษแก้วคละเฮียคจีโอ โพลีเมอร์มวลเบา.....34 ที่ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 70:30

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมกรรมการก่อสร้างในปัจจุบัน มีการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากกระบวนการเผา สารประกอบซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มาใช้เป็นวัสดุ ส่วนประกอบที่สำคัญของคอนกรีตและมอร์ตาร์อย่างแพร่หลาย ส่งผลให้มีการพัฒนาสิ่งก่อสร้าง ต่างๆ อย่างรวดเร็ว แต่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานสูงมาก เริ่มตั้งแต่การ ระเบิดวัสดุต้นแหล่ง การย่อย การลำเลียง การเผาที่อุณหภูมิ 1400-1600 องศาเซลเซียส ตลอดจนการ บดให้ละเอียด ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือน กระจก (Greenhouse effect)

เพื่อลดผลกระทบจากการเกิดมลภาวะของการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อุตสาหกรรม คอนกรีตในประเทศไทยจึงได้มีการนำวัสดุพอชโซลานที่เป็นผลพลอยได้ (By product) จาก อุตสาหกรรมต่างๆ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น ในประเทศไทยได้มีการนำ เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบที่มีอยู่มากมาใช้เป็นวัสดุพอชโซลาน โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุน ของคอนกรีต หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น แต่เนื่องจากวัสดุพอช โซลานต่าง ๆ นั้น ไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานด้วยตัวมันเอง จึงนำมาแทนปูนซีเมนต์ได้เพียง บางส่วนเท่านั้น

นอกจากการประยุกต์ใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์แล้ว การใช้วัสดุทดแทนมวลรวมละเอียด ในการผลิตคอนกรีตก็เป็นแนวคิดในที่ช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ใน การประยุกต์ใช้ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาวัสดุทดแทน เพื่อจะนำมาใช้แทนมวลรวม โดยมี คุณสมบัติที่ดีขึ้น หรือไม่แตกต่างไปจากเดิมเพื่อช่วยลดผลกระทบจากการเกิดมลภาวะอีกทางหนึ่ง ด้วยการประยุกต์ใช้เศษขวดแก้วที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตแก้ว ซึ่งมีปริมาณ เหลือทิ้งเป็นขยะ 40,000 ตันต่อปี (จกฤษณ์ สุนทรานุรักษ์ และดนุพล ตันนโยภาส, 2557) เศษแก้ว จะโดยไม่ได้นำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตแก้วทั้งยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อม โดยนำมาบดละเอียดแล้วใช้เป็นมวลรวมแทนทรายในการผลิตคอนกรีตโดยมุ่งเน้นการ เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ และลดผลกระทบต่อแหล่งน้ำทั้งแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดิน เนื่องจากการประกอบกิจการอุตสาหกรรม และกำหนดแนวทางการออกแบบการผลิตเศษแก้วจีโอโพลี เมอร์มวลเบา (Manufacturing design method) ที่มีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 ศึกษาความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดของเศษแก้วจีโอโพลิเมอร์มวลเบาในพจน์ของปริมาณเถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง
- 1.2.2 หาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับผลิตเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบาเพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (กำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นระหว่าง 800 ถึง 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 เศษแก้วบดละเอียดที่ใช้เป็นชนิดสีชา
- 1.3.2 อัตราส่วนระหว่างเศษแก้วบดละเอียด ต่อเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 50:50
- 1.3.3 สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ NaOH มีค่าเท่ากับ 30:70, 50:50, และ 70:30 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1, 3, 5, และ 7 โมล
- 1.3.4 อุณหภูมิในการเตรียมตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง
- 1.3.5 ปริมาณฟองอากาศมีค่าเท่ากับร้อยละ 0, 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนัก
- 1.3.6 ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง (ก่อนทดสอบกำลังอัด) จะทดสอบที่ 7 วัน
- 1.3.7 ก้อนตัวอย่างทดสอบขนาด $5 \times 5 \times 5$ ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 1.3.8 การทดสอบกำลังอัด ทำตามมาตรฐาน ASTM C69-09

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศษแก้วที่เหลือทิ้งและลดของเสียที่จะระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม
- 1.4.2 ได้ส่วนผสมสำหรับการผลิตเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

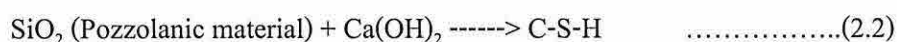
บทที่ 2

ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของการวิจัย

2.1 ประวัติความเป็นมาของจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

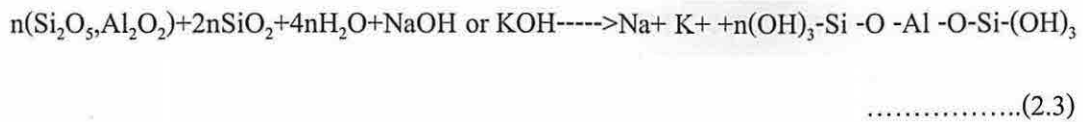
จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุผสมอลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติ แบบอสัณฐาน (Amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่าสารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินทรีย์ ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1970 Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศสได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ดังนี้ 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 1 ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังอัดกับคอนกรีต ซีเมนต์เพสต์ หรือมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว เมื่อมีการนำวัสดุปอซโซลาน (ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2) มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ดังสมการที่ 2 ปฏิกิริยานี้เองจะเพิ่มผลผลิตที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (C-S-H) ส่งผลให้คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความทนทานมากขึ้น



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

Polymer chain ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา สมการที่ 2.3 แสดงสมการทางเคมีของปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)



2.2 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash) เป็นเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก 1 ไมครอน (ไมโครเมตร) จนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะลอยไปกับอากาศจึงเรียกว่าเถ้าลอย ได้จากการเผาถ่านหินในโรงงาน โรงไฟฟ้าถ่านหิน มีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล มีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกาและอะลูมินา 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 จิงเกษม โชคชัย 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) แคลเซียม

ออกไซด์ (CaO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C-618 แยกแยะออกเป็น 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 (SO₃) กำหนดไม่เกิน 5 เพราะซัลเฟอร์ มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาที่อดตัวได้ และยังมีผลเสียต่อวัสดุที่แข็งตัวอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Sulfate attack)

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C-618

องค์ประกอบทางเคมี	Class of Fly Ash	
	F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ (SiO ₃ + Al ₂ O ₃ และ Fe ₂ O 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 ₂ O) Max%	1.5	1.5

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงาน ซึ่งสำหรับเถ้าลอย Class C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition (LOI)) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอย หากมี LOI มาก การควบคุมในด้าน Air Entrainment ของคอนกรีตสดจะทำได้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่ม ในคอนกรีตโดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 มาก ปริมาณอัลคาไลน์ (Alkali) ในรูปของโซเดียมออกไซด์ (Na₂O Equivalent) มากที่สุดไม่เกิน ร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C-618 เพราะเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการ

เถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์ มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยาต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการว่าไม่ปรากฏการขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

2) ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (Mineralogical composition)

ชัย จตุรพิทักษ์กุล สุรเชษฐ์ จึงเกษม โชคชัย และ วราภรณ์ คุณาวนาทิจ (2542) เมื่อถ่านหิน ถูกเผา และมีการเย็นตัวของเถ้าลอย การเผาจะทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (Crystalline) แตกต่างกันไป สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีความเป็น Noncrystalline (Glass) มากกว่าร้อยละ 90 อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ก็ยังมีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ซึ่งเกี่ยวข้องการเกิดปฏิกิริยา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction จะพบว่าเถ้าลอยจากถ่านลิกไนต์จะมีองค์ประกอบของ Crystalline น้อยกว่าเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสและแอนทราไซต์

2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

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

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าลอยมาตรฐาน ASTM C-618

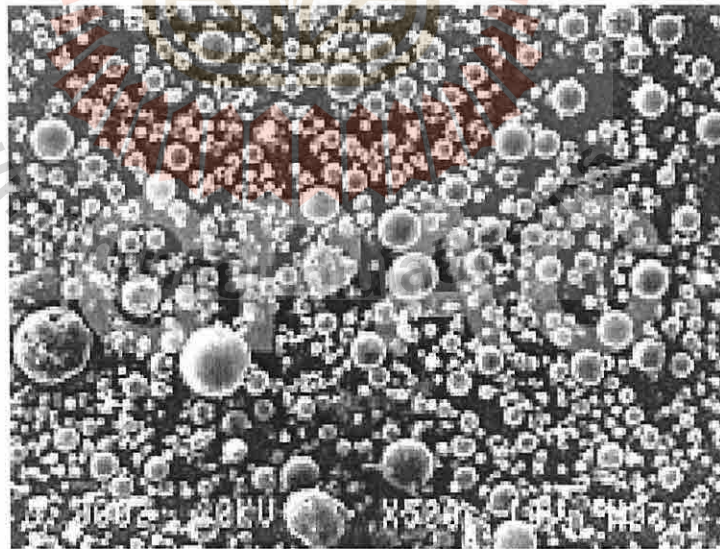
ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
ความละเอียด : ส่วนค้ำตะแกรงเบอร์ 325 หลังการร่อนแบบเปียก Max%	34	34
หาดัชนีกำลัง : โดยผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		
7 วัน Min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
28 วัน Min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75	75
ความต้องการน้ำ : Max% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105	105
ความอยู่ตัว :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

ตารางที่ 2.2 ต่อ

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	Class of Fly Ash	
	F	C
Multiple Factor (ผลคูณระหว่าง %LOI กับ % ของปริมาณความชื้นที่ค้าง ตะแกรงเบอร์ 325)	255	-
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 3,000 เท่า)

2) ความละเอียด (Fineness)

ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งจะใช้ในการทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C-430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 มิลลิเมตร) โดยวิธีร่อนเปียก (Wet Sieving) เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังจะบอกขนาดของอนุภาคจากการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน (Blane 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 แต่จากการทดสอบเถ้าลอยจากอำเภอแม่เมาะ การบอกขนาดของอนุภาคโดยวิธีดังกล่าว ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

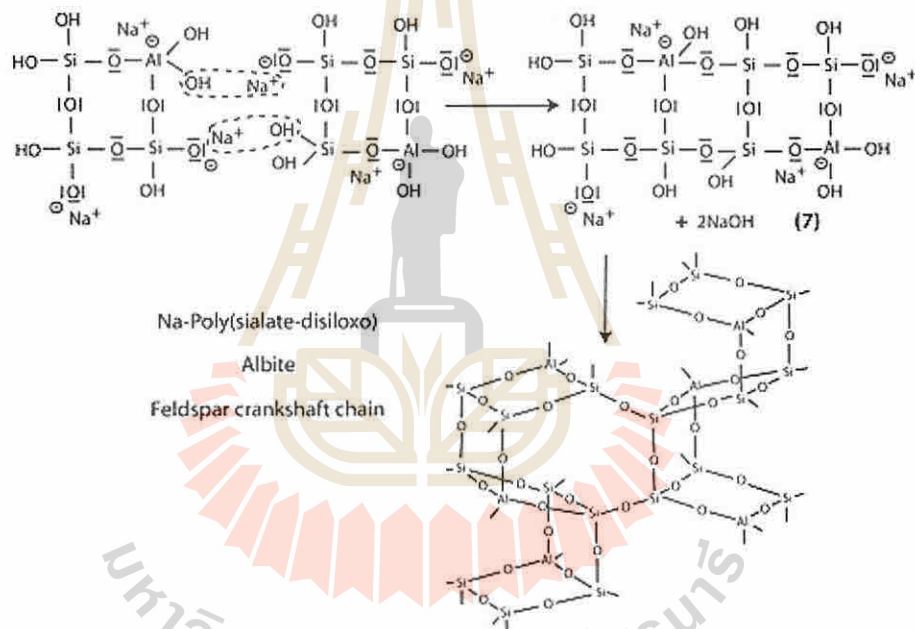
ชนิดตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ	ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 (%)	สภาพให้อากาศซึมได้ (cm ² /g)	ขนาดเฉลี่ย (mm)
ปูนซีเมนต์	3.14	4.7	3120	13.0
เถ้าลอย	2.02	37.4	2370	28.5

จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีปริมาณที่ค้ำบนตะแกรงสูงกว่าซีเมนต์ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ส่งผลให้เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารหน่วงเมื่อผสมรวมกับซีเมนต์

3) การหาดัชนีกำลัง

ค่าดัชนีกำลังจะเป็นอัตราส่วนร้อยละของกำลังอัดเฉลี่ย (Compressive Strength) ของมอร์ต้าที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C-311 เทียบกับมอร์ต้ามาตรฐานที่ไม่ผสมปอซโซลาน โดยกำหนดไว้ว่าไม่ควรต่ำกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้ามาตรฐานที่อายุ 7 วันและ 28 วัน

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



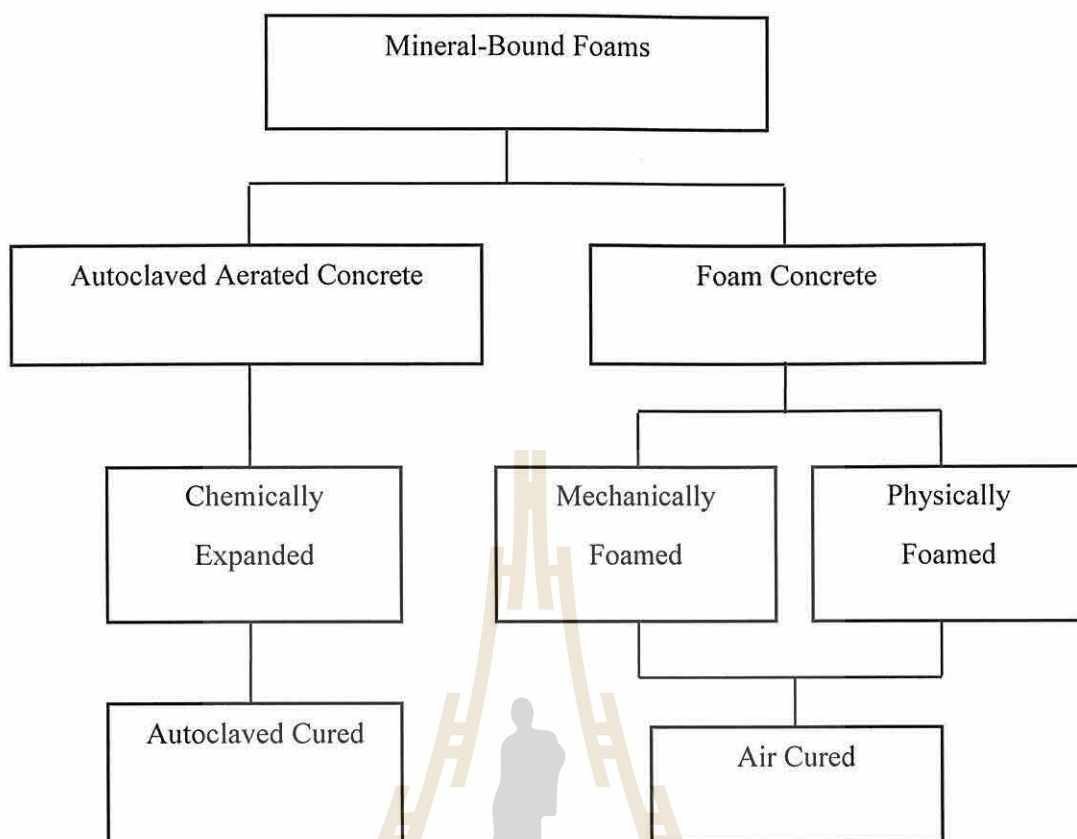
รูปที่ 2.2 Polycondensation of Na-poly(Sialate-disiloxo) Albite Framework

2.3 ประเภทของคอนกรีตมวลเบา

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

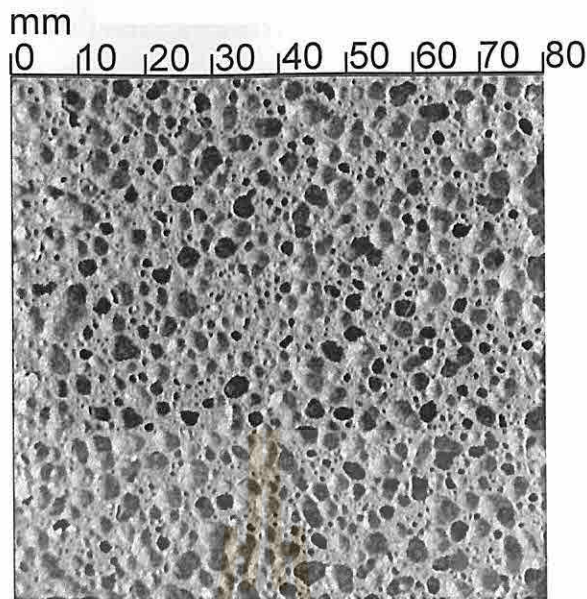
- 1) การไม่ใช้มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) เป็นส่วนผสมในคอนกรีต มีแต่มวลรวมหยาบที่มีขนาดใกล้เคียงกันหรือขนาดเดียว (Single size) คอนกรีตชนิดนี้ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และน้ำที่ต่ำ ดังนั้น ช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ระหว่างมวลรวมหยาบจึงมีจำนวนมาก คอนกรีตประเภทนี้เรียกว่าคอนกรีตพรุน (Porous concrete) หรือคอนกรีตไม่มีมวลรวมละเอียด (No-fines concrete)
- 2) การใช้มวลรวมพรุนที่มีน้ำหนักเบาเป็นวัสดุผสม มวลรวมพรุนต้องมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมมาก คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้เรียกว่าคอนกรีตมวลเบาน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete)
- 3) การทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่าง (Void) ขนาดใหญ่ภายในเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ โดยการกักกระจายของอากาศ (Air entrainment) โพรงเหล่านี้จะมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้มีชื่อเรียกต่างๆ กัน เช่น คอนกรีตอัดอากาศ (Aerated concrete) หรือคอนกรีตเซลลูล่า (Cellular concrete) หรือโฟมคอนกรีต (Foamed concrete) หรือก๊าซคอนกรีต (Gas concrete) เป็นต้น กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาประเภทนี้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 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 จากนั้น โฟมเหลวที่ได้จะนำไปผสมโดยตรงกับซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าสดในเครื่องผสม วิธีการเช่นนี้เรียกว่าวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD ซึ่งโฟมดังกล่าวมีความเสถียรอยู่ในเนื้อคอนกรีตตั้งแต่เริ่มก่อตัวจนกระทั่งคอนกรีตมีสภาพเป็นของแข็ง ทำให้คอนกรีตเซลลูล่าเป็นโพรงปิด (close pore) ที่เต็มไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก ดังในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวที่ขัดเรียบของ CLC (Just and Middendorf, 2009)

- b) วิธีการสร้างฟองอากาศโดยการใส่สารเพิ่มฟองหรือสารกักกระจายฟองอากาศ (Air entraining) ผสมกับซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้า จากนั้นผ่านการตีหรือกวน ส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสารเพิ่มฟองดังกล่าวจะมีความมันคง (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) งานวิจัยนี้จะเป็นการผลิตคอนกรีต

มวลเบาเซลลูโลสสำหรับงานก่อและกันความร้อน โดยการใช้โฟม (Foaming agent) เป็นสารเพิ่มฟอง และบ่มตัวอย่างในอากาศ

2.4 วัสดุปอซโซลาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส โดยใช้ตะกอนดินประปาเป็นวัตถุดิบ ตะกอนดินประปาจะถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 450 ถึง 600 องศาเซลเซียส เพื่อลดความสามารถในการดูดน้ำและแสดงคุณสมบัติปอซโซลาน วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan material) สามารถใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตได้ โดยใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อจุดประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้นหรือลดต้นทุนของคอนกรีตลง วัสดุปอซโซลานเมื่อนำไปผสมกับคอนกรีตจะช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสดให้มีความสามารถได้ดีสูง มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงอายุปลาย และมีความทนน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีคุณสมบัติทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนจากสารซัลเฟต

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

2.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

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

ตารางที่ 2.4 สรุปลักษณะสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เรจิสต์และอภิสกดิ์, 2549)

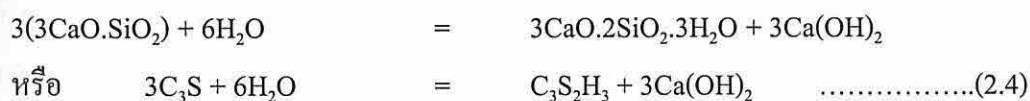
คุณสมบัติ	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 จูลต่อกรัม)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

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์แสดงได้ดังนี้

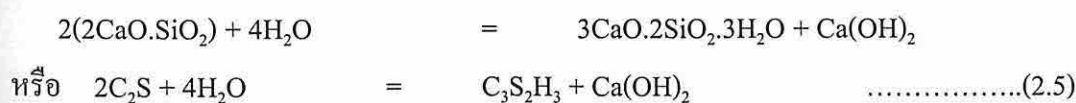
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต (C₃S และ C₂S)

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

สมการของ C₃S



สมการของ C₂S



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

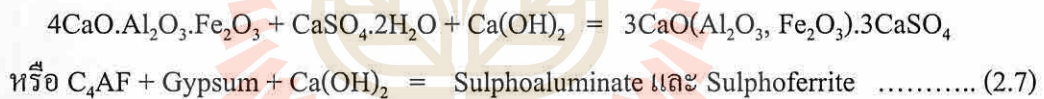
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A เกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้

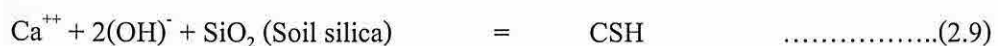


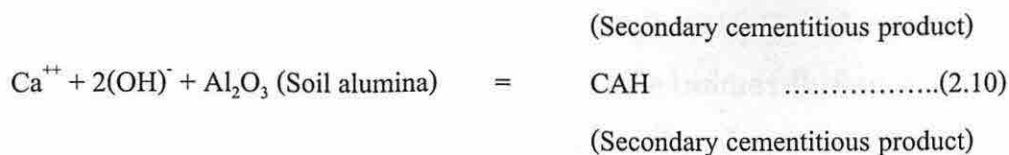
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

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 ซิลิกาและอลูมินาที่หลอมละลายจะทำปฏิกิริยาอย่างช้ากับไอออนของแคลเซียมอิสระ (Free lime) ทำให้เกิดการแข็งตัวเพิ่มขึ้นตามอายุปอม ปฏิกิริยานี้เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) และแสดงได้ดังสมการทางเคมี ดังนี้





การประมาณราคาต้นทุนต่อหน่วย

การประมาณราคาต่อหน่วยเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งในการตัดสินใจการลงทุนผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียด วัตถุประสงค์ที่จำเป็นในการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสประกอบด้วยเศษแก้วบดละเอียด น้ำ เถ้าลอย 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 (เศษแก้วบดละเอียด)	3438	กรัม	3.5
น้ำ	650	กรัม	0.65
เถ้าลอย	1250	กรัม	3.75
สารเพิ่มฟอง	100	กรัม	2.00
ค่าแรง	-	-	3.75
ค่าไฟฟ้า	-	-	2.00
ค่าดำเนินการ	-	-	0.25
ราคาต้นทุนรวม	-	-	15.9

2.6 การทบทวนวรรณกรรมหรือสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

Prof. Joseph Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุโพลีเมอร์ และพบว่าการประสานกันของวัสดุโพลีเมอร์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเคมีที่ใช้ผสมโพลีเมอร์ระหว่างไดโซเดียมออกไซด์ (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 เมกะปาสกาล 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 งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเถาถ่านหินชนิดแคลเซียมค่ามีความเหมาะสมต่อการผลิตจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากจะทำให้จีโอโพลิเมอร์มีระยะเวลาในการก่อตัวที่นานขึ้น แต่เถาถ่านหินชนิดนี้มีปริมาณไม่มากในประเทศไทย

Hardjito et al. (2004) พบว่าจีโอโพลิเมอร์หรือเรียกว่าอูมิโนซิลิเกตโพลิเมอร์สามารถผลิตจากวัสดุขี้เถ้าที่มีซิลิกอนและอูมิเนียมในปริมาณมากไม่ว่าจากธรรมชาติหรือจากกากของเสียจากโรงงาน เช่น เถาถ่านหิน องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับซีโอไลท์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ในระดับโมเลกุลจะเชื่อมกันทั้งแบบสั้นและยาว ผลการศึกษาพบว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่จะใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต เพราะจีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อสร้างมาตรฐานการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์

สมิตร ส่งพิริยะกิจ (2548) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบ่มต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถาถ่านหินและทรายเป็นวัสดุขี้เถ้า สารกระตุ้น (Liquid alkaline activator) เป็นส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และน้ำ อัตราส่วน

ระหว่างเถ้านหินต่อทรายเท่ากับ 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 เมกกะปาสกาล อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{OSiO}_2 : \text{NaOH}$ ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.67-1.0 การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 10 โมล เป็น 20 โมล ไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ อุณหภูมิบ่มที่เหมาะสมเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน การเติมน้ำประมาณร้อยละ 2-8 และการใช้สารลดน้ำ (Superplasticizer) จะช่วยให้ความชื้นเหลวดีขึ้นได้ และช่วยให้เทแบบได้ดี แต่กำลังอัดก็จะมีค่าลดลง

Bakharev (2004) ศึกษาความคงทนของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer paste) ที่ใช้เถ้านหิน Class F เป็นสารตั้งต้น เมื่อแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulfate) และแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulfate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลานาน 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ลดลงร้อยละ 18 เมื่อใช้สารโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น กำลังอัดลดลงร้อยละ 65 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้น และกำลังอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เมื่อใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นเพียงอย่างเดียว การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวทำให้

โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (Cross-linked aluminosilicate polymer) ของจีโอโพลิเมอร์ไม่ค่อยละลายในเกลือ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคงทนต่อสภาพที่เป็นเกลือของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับเกลือที่ใช้สารละลายที่มีความเป็นด่าง (KOH, NaOH) เป็นสารกระตุ้น ผลการทดลองพบว่าถ้าใช้สาร KOH และ NaOH เป็นสารกระตุ้นร่วมกันจะได้จีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สาร NaOH เป็นสารกระตุ้นอย่างเดียว

Ohsawa et al. (1984) ได้นำเสนอวิธีการหาปริมาณการทำปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินในไฮเดรตซีเมนต์โดยการใช้สารละลายที่มีความเป็นกรด เช่น กรดไฮดรอกลอลิก (HCl), กรดพิคติก (Picric acid) และกรดไซลิกเซลิก (Salicylic acid) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าอนุภาคเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วจะละลายในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ง่ายกว่าเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา ผลการทดสอบพบว่าการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าถ่านหินที่ทำปฏิกิริยาไปแล้วนั้น การใช้กรดพิคติก + เมทานอล + น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลเป็นที่น่าพอใจ และมีความเบี่ยงเบนของผลการทดลองน้อยเพียงร้อยละ 0.23-0.55 การใช้กรดดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าใช้กรดเกลือ (HCl) และกรดไซลิกเซลิกอย่างมาก

Alonso และ Palomo (2001) ได้ศึกษาโครงสร้างระดับ โมเลกุล (Microstructure) ของเพสต์จีโอโพลิเมอร์ขณะเกิดปฏิกิริยากับด่างของจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหิน และพบว่าโดยส่วนมากโมเลกุลของเถ้าถ่านหินเป็นทรงกลม (Spherical) ที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อผสมกับด่างผิวของเถ้าถ่านหินจะถูกกัดเป็นรูและขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ เถ้าถ่านหินบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ซึ่งจะมีปริมาณมากขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหิน และระยะเวลาการบ่ม การศึกษาพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมจีโอโพลิเมอร์และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เกิดจีโอโพลิเมอร์ที่มีเนื้อเป็นฝักร่วนและมีความแข็งแรง

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 วัสดุดิบที่ใช้ในการผลิตหาได้ง่ายจากธรรมชาติ ต้นทุนการผลิตต่ำ และใช้งานง่าย ความหนาแน่นของคอนกรีตจะอยู่ในช่วง 2300-2700 kg/m³ (Nambiar and Ramamurthy, 2006) การทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำจะเป็นประโยชน์ในแง่ของการแบกรับภาระน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง (Feng and Peng, 2005) นักวิจัยหลายท่านมีเป้าหมายที่จะพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ทำจากคอนกรีตให้มีความแข็งแรง ใช้งานง่าย ความหนาแน่นต่ำ และเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี (Beben and “Zee” Manko, 2011)

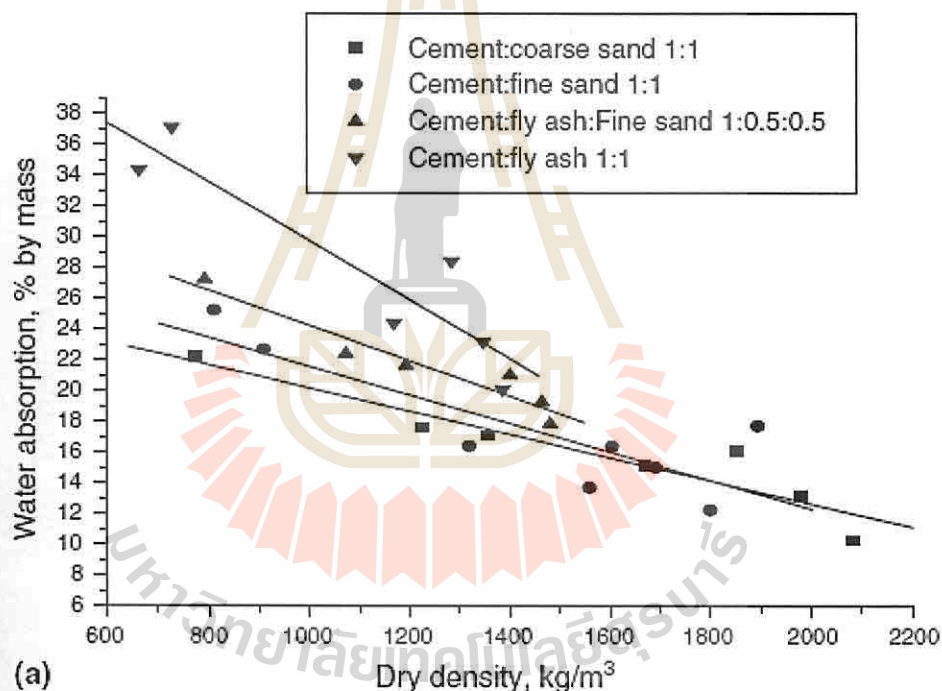
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสขึ้นอยู่กับลักษณะปัจจัยพื้นฐานของส่วนผสมและสารเพิ่มฟองที่ใช้ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลสมีค่าลดลงตามความหนาแน่นที่ลดลง Just and Middendorf (2009) พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) โดยค่าอัตราส่วน w/c ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ศึกษาจะระหว่าง 0.45-0.6 ผลการศึกษาที่ได้มีความสอดคล้องกับรายงานของ DeRose and Morris (1999) และ Khatib and Wild (1996) Kearsley and Wainwright (2002) พบว่าปริมาณทรายที่ใช้ในส่วนผสมไม่ได้มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลส DeRose and Morris (1999) พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของเถ้าลอยและซิลิกาฟูม โดยเฉพาะกับคอนกรีตเซลลูโลสที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kearsley and Wainwright (2002)

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

Kearsley (1996) ได้ศึกษาอิทธิพลของการบ่มต่อการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเซลลูโลส ในสามกรณีคือการบ่มที่อุณหภูมิ 50°C การบ่มปิดผนึกไว้ในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิคงที่ 22°C และการบ่มในน้ำ ผลการศึกษาพบการบ่มในน้ำให้กำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด เนื่องจากโพรง (Pore) ของคอนกรีตเซลลูโลสก่อให้เกิดแรงดันน้ำในโครงสร้างจุลภาค การบ่มแบบปิดผนึกในถุงพลาสติกให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด DeRose and Morris (1999) พบว่าการบ่มก้อนตัวอย่าง

คอนกรีตเซลลูล่าในอากาศที่อุณหภูมิ 50°C ให้กำลังสูงกว่าการบ่มในน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษา โดย Wongkeo, Thongsanitgarn et al. (2012)

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

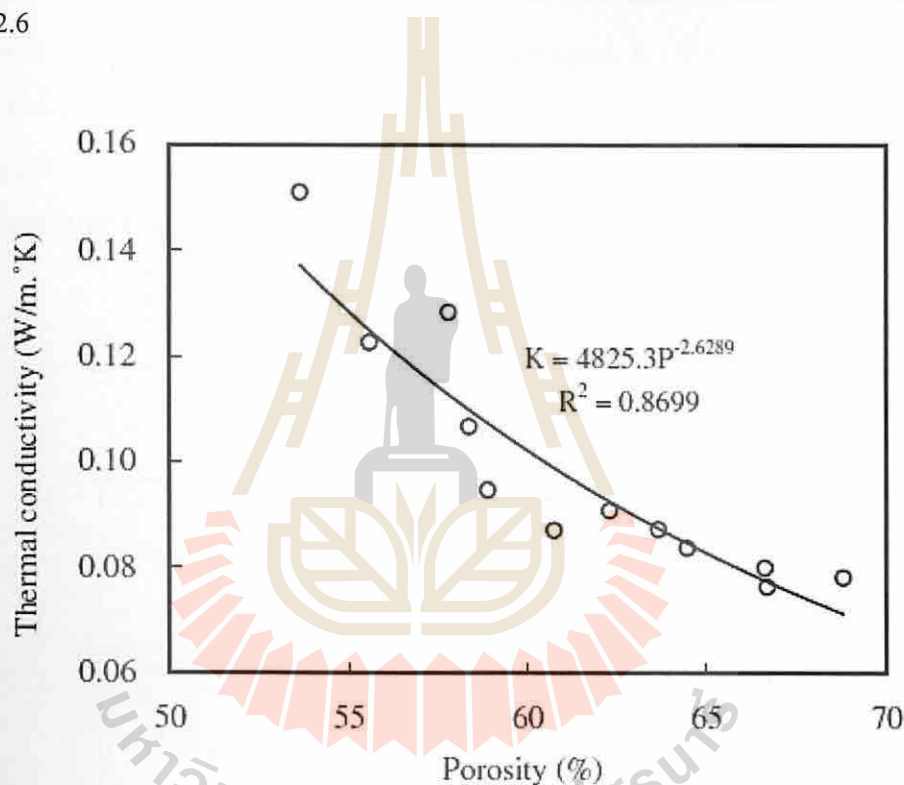


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นแห้ง

(Nambiar and Ramamurthy, 2006)

Kearsley and Wainwright (2001) รายงานผลของการทดสอบการซึมผ่านน้ำ (Water permeability) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า และพบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่ามีค่าการซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตปกติประมาณ 100 เท่า โครงสร้างที่เป็นแบบเซลล์ (Cellular structure) ทำให้คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่ามีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งมีค่าระหว่างร้อยละ 5-30 ของคอนกรีตปกติ (Jones and McCarthy, 2005) ในทางปฏิบัติ ชิ้นส่วนคอนกรีตปกติต้องมีความหนา

มากกว่าของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสถึง 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 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลงตามปริมาตรโพรงของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6



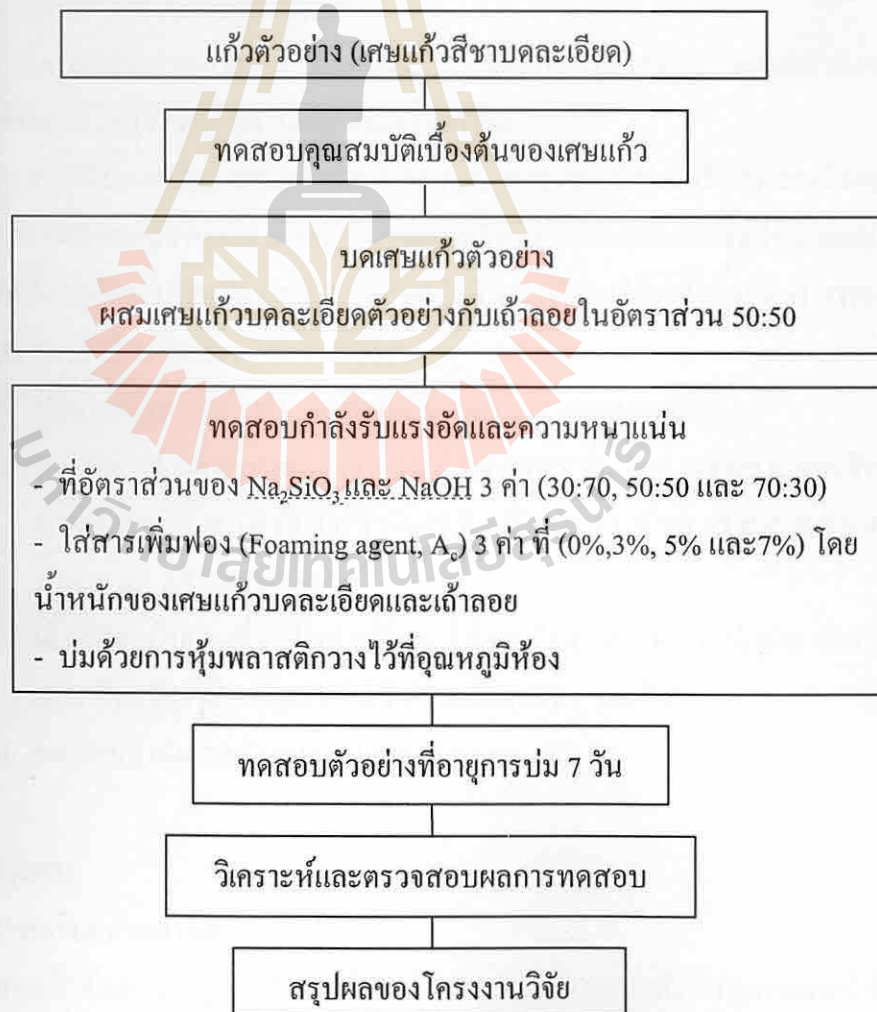
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตเซลลูโลสทำจากตะกอนน้ำเสีย (Wang et al., 2005)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการโครงการวิจัย

3.1 บทนำ

โครงการนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและอธิบายถึงการพัฒนากำลังอัดและความหนาแน่นของเศษแก้วบดละเอียด เถ้าลอย ผสมกับสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) เศษแก้วบดละเอียดและเถ้าลอยจะถูกนำมาผสมเข้ากับสารกระตุ้น ซึ่งเป็นส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารเพิ่มฟอง (Foaming agent, A_2) เพื่อหาลำลังอัดของเศษแก้วบดละเอียดจีโอพอลิเมอร์มวลเบาที่มีค่าไม่ต่ำกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และความหนาแน่นระหว่าง 800 ถึง 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แผนดำเนินโครงการแสดงดังรูปที่ 3.1 วิธีการทดสอบและจำนวนตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการทดลองเศษแก้วบดละเอียดจีโอพอลิเมอร์มวลเบา

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างทดสอบของเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

ตัวแปร	จำนวน	หมายเหตุ
อัตราส่วนผสมระหว่างเศษแก้วบดละเอียดต่อเถ้าลอย	1	50:50
อัตราส่วนผสมระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} \rightarrow (\text{L})$	3	30:70, 50:50 และ 70:30
สารเพิ่มฟอง (Foaming agent)	4	0%, 3%, 5% และ 7%
อุณหภูมิการบ่ม	1	อุณหภูมิห้อง
อายุบ่ม	1	7 วัน
จำนวนตัวอย่าง	3	ชุดละ 3 ตัวอย่าง
ความเข้มข้นของ NaOH	3	1, 5, 7 โมล
L/FA (Fly Ash เทียบกับปริมาณ L)	3	0.6, 0.7, 0.8

3.2 การเก็บและเตรียมเศษแก้วบดละเอียดตัวอย่าง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดเป็นเศษแก้วสีขาที่ได้จากการเศษแก้วสีขา จากบริษัท แก้ว กรุงไทย จำกัด เป็นแก้วชนิดโซดาไลม์

3.2.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของเศษแก้วตัวอย่าง (Basic property) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรม ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานของเศษแก้วจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งชนิด และสีของเศษแก้ว ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเศษแก้วดังนี้

- 1) ปริมาณความชื้นเริ่มต้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2216
- 2) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดินเม็ดละเอียด (ขนาดเล็กลงกว่า 4.75 มิลลิเมตร) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854
- 3) เถ้าลอย เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาได้จากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- 4) ทดสอบกำลังตามมาตรฐาน ASTM C69-09

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างเศษแก้ว

เศษแก้วตัวอย่างจะถูกนำไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด (เศษแก้วที่ผ่านการตากให้แห้ง จะมีความชื้นเริ่มต้นที่น้อยมาก ประมาณร้อยละ 0) นำดินตัวอย่างที่ได้เก็บใส่ภาชนะที่ปิดมิดชิด

3.3.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การเตรียมสารละลาย NaOH เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 1 โมล ซึ่งอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมเพื่อให้ได้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 1 โมล คือ ใช้สารละลาย NaOH 40 กรัม นำมาผสมกับน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรเท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร เทใส่ภาชนะที่ทนความร้อนได้ เขย่าหรือคนให้สารละลายเข้ากับน้ำกลั่น ทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลงแล้ว จึงนำสารละลายที่ได้ใส่ภาชนะหรือขวดปิดให้มิดชิด เขย่าอีกครั้งเพื่อให้สารละลายผสมกัน เก็บที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

3.4 การบดอัดตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดแล้วลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

เศษแก้วบดละเอียดจะถูกผสมเข้ากับเถ้าลอย (Fly ash, FA) ในอัตราส่วนผสม 50:50 จนเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ในอัตราส่วน L:FA ที่ต้องการแล้วผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ NaOH ในอัตราส่วนผสม Na_2SiO_3 :NaOH เท่ากับ 30:70, 50:50 และ 70:30 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 โมล หลังจากนั้น นำสารเพิ่มฟอง มีค่าเท่ากับร้อยละ 3, 5 และ 7 มาผสม เศษแก้วบดละเอียด เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มวลเบาจะถูกเทในแบบทรงลูกบาศก์ ที่มีขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร หลังจากนั้นห่อด้วยพลาสติกให้มิดชิด และนำมาบ่มในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ก่อนทำการทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C69 – 09

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการศึกษาหน่วยน้ำหนัก กำลังอัดของเศษแก้วจีโอพอลิเมอร์มวลเบา เพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ควบคุมหน่วยน้ำหนักและกำลังอัด (ปริมาณของเศษแก้วต่อเถ้าลอย, อัตราส่วนผสมระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$, ปริมาณของสารเพิ่มฟอง) ที่ที่สุดจะวิเคราะห์ผลจากผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์มวลเบา

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานของเศษแก้ว และเถ้าลอย

เศษแก้วตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นเศษแก้วสีชา จากบริษัทแก้วกรุงไทยจำกัด เป็นแก้วชนิดโซดาไลม์เหลือทิ้งที่มีปริมาณมาก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ส่วนประกอบทางเคมีและการกระจายขนาดของเม็ดดินแสดงในตารางที่ 4.1 ผลรวมของปริมาณธาตุ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 75.57 ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (D_{50}) ของเถ้าลอยเท่ากับ 16 ไมครอน

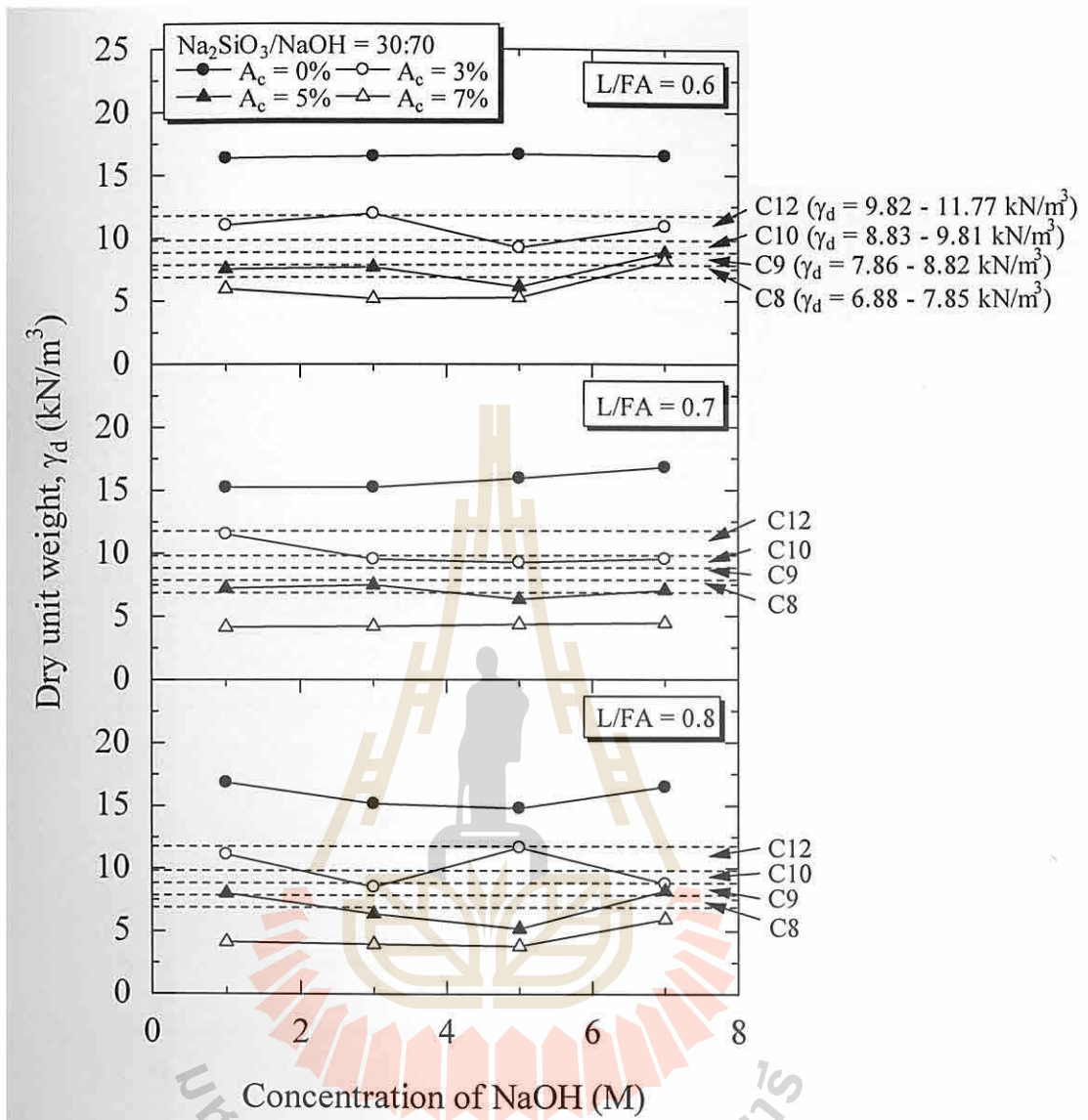
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน และเศษแก้วบดละเอียด

Chemical composition (%)	Recycled Glass	Fly ash
SiO_2	70.6	49.32
Al_2O_3	2.1	12.96
Fe_2O_3	0.3	15.64
CaO	11.5	5.79
MgO	1.9	2.94
SO_3	0.59	7.29
Na_2O	13.4	2.83
K_2O	0.1	2.83
LOI	-	7.29

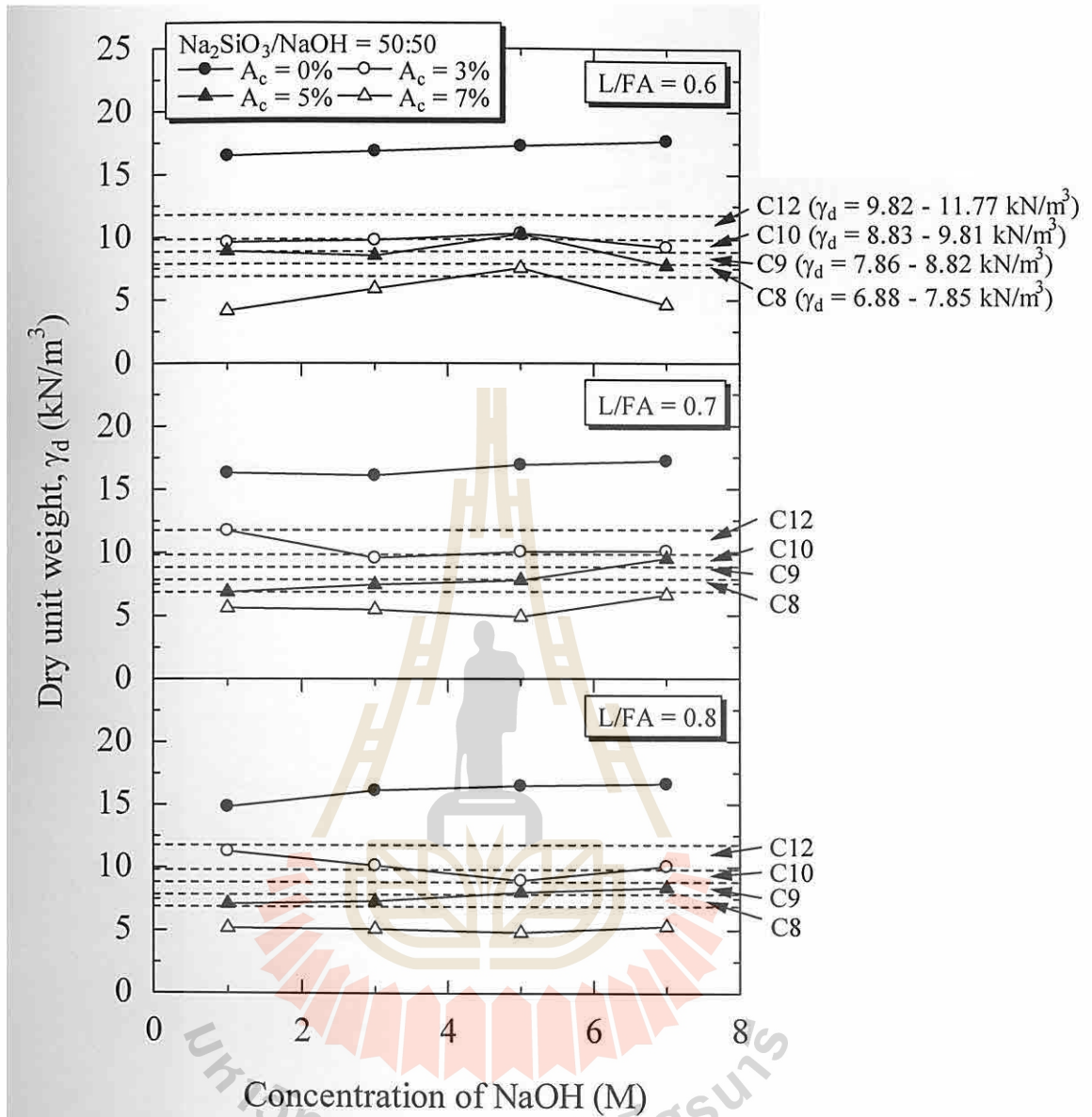
4.3 หน่วยน้ำหนักแห้งของเศษแก้วดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบา

รูปที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างเศษแก้วดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 1, 3, 5, และ 7 โมล ที่ปริมาณสารกระตุ้นต่อเถ้าลอย (L/FA) เท่ากับ 0.6, 0.7 และ 0.8 ปริมาณสารเพิ่มฟอง (A_0) เท่ากับร้อยละ 0, 3, 5, และ 7 ที่อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 30:70, 50:50 และ 70:30 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างทดสอบที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 30:70 มีค่าความหนาแน่นแห้งระหว่าง 3.97 ถึง 16.62 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตัวอย่างทดสอบที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 มีค่าความหนาแน่นแห้งระหว่าง 4.14 ถึง 17.68 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่ ตัวอย่างทดสอบที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 70:30 มีค่าความหนาแน่นแห้งระหว่าง 3.91 ถึง 18.4 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร

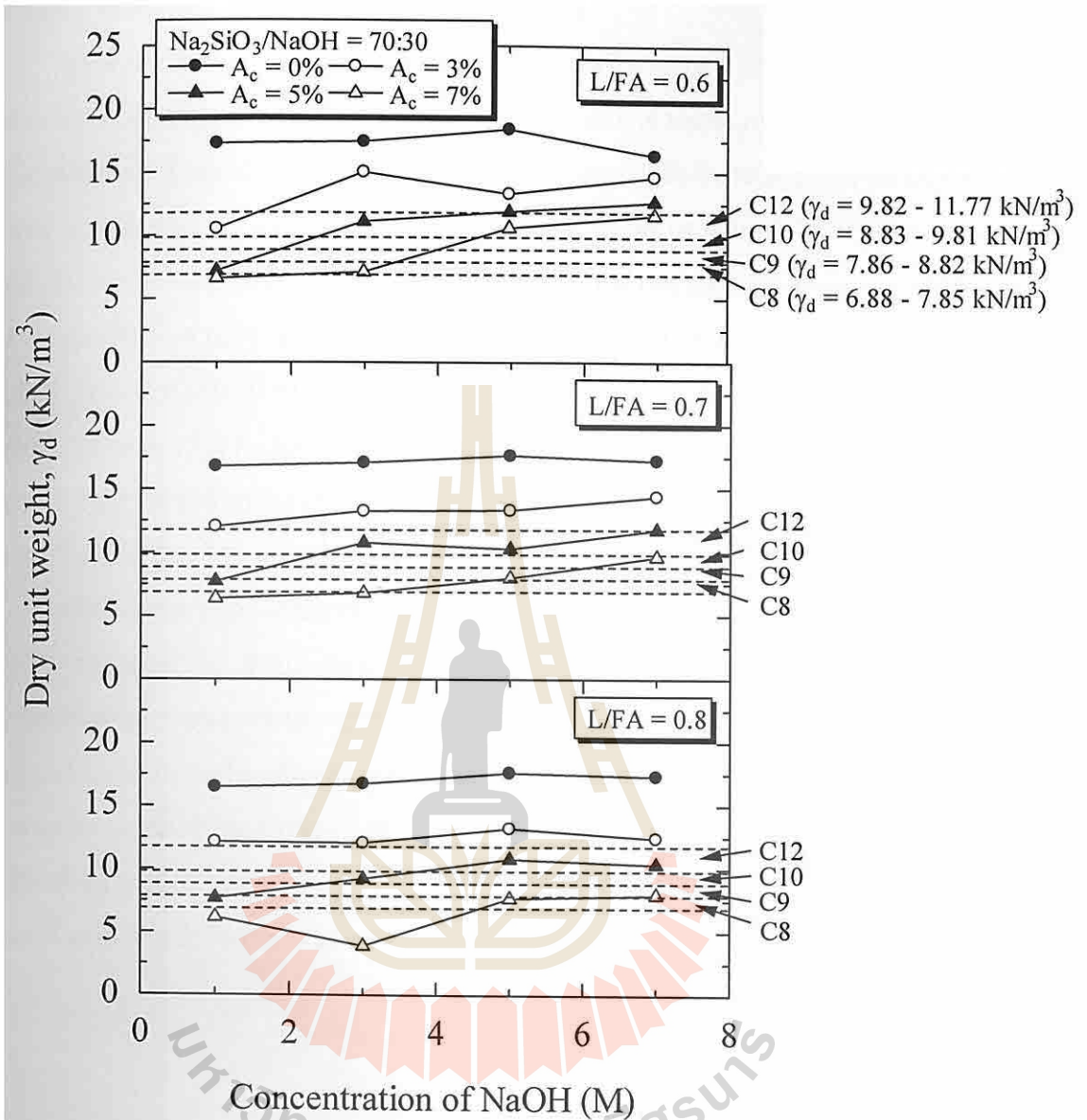
พิจารณาที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH, L/FA และอัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากัน เมื่อปริมาณสารเพิ่มฟองเพิ่มขึ้นหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH, L/FA และปริมาณสารเพิ่มฟองเท่ากัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 30:70 ให้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำสุด และหน่วยน้ำหนักแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 และ 70:30 ตามลำดับ ขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่า L/FA (ระหว่าง 0.6 ถึง 0.8) ไม่ส่งผลต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH และปริมาณฟองอากาศเท่ากัน นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นอีกว่า หน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างเศษแก้วดละเอียดจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 30:70, 50:50 และปริมาณของสารเพิ่มฟองเท่ากับร้อยละ 5 และ 7 จะมีค่าใกล้เคียงหรือมีค่าน้อยกว่าหน่วยน้ำหนักของน้ำ (9.81 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างเศษแก้วเคลือบอะซิติกโพลิเมอร์มวลเบาที่ ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 30:70



รูปที่ 4.2 ความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างเศษแก้วเคลือบอะครีลาตไอโพลีเมอร์มวลเบาที่
ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50

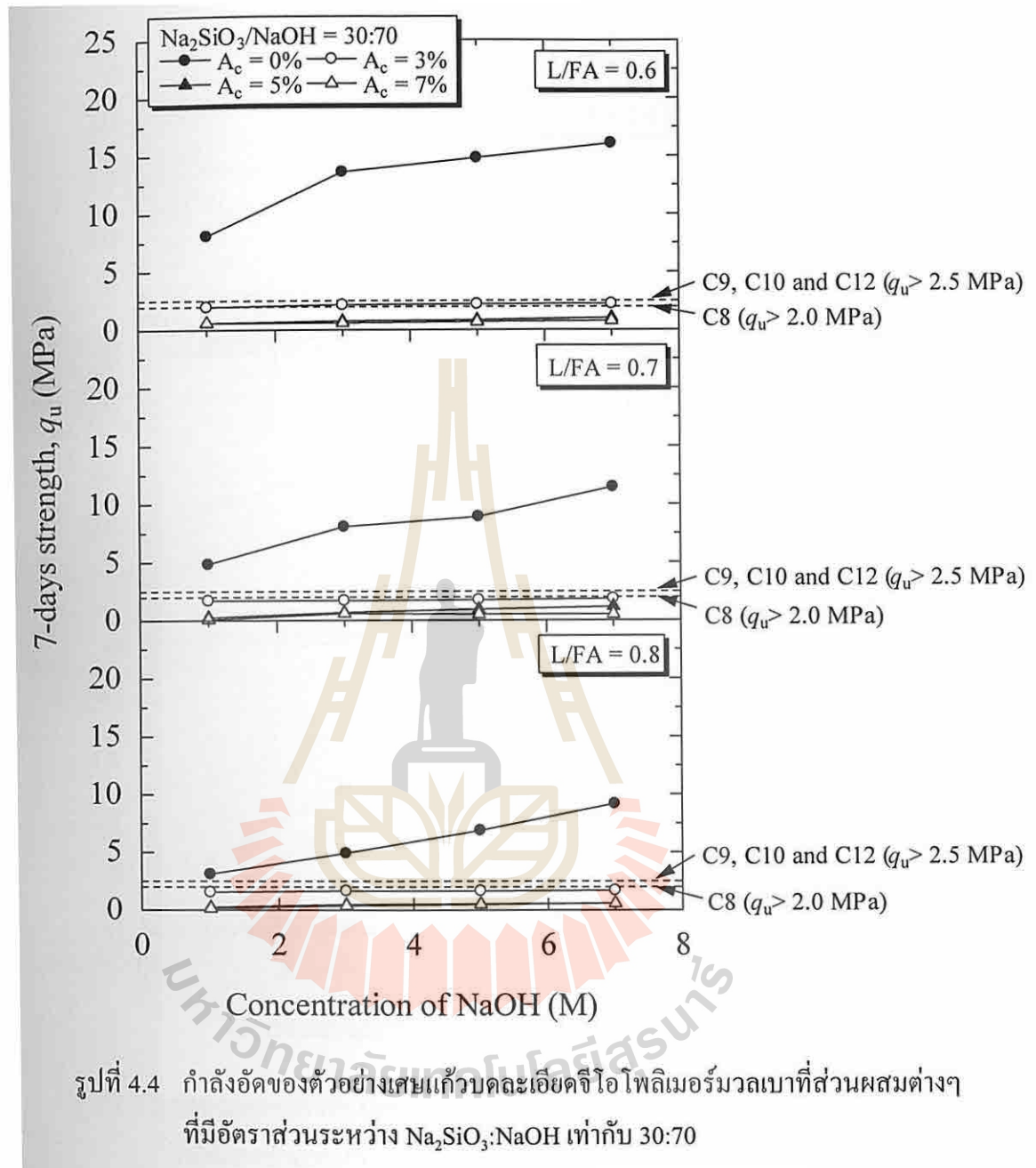


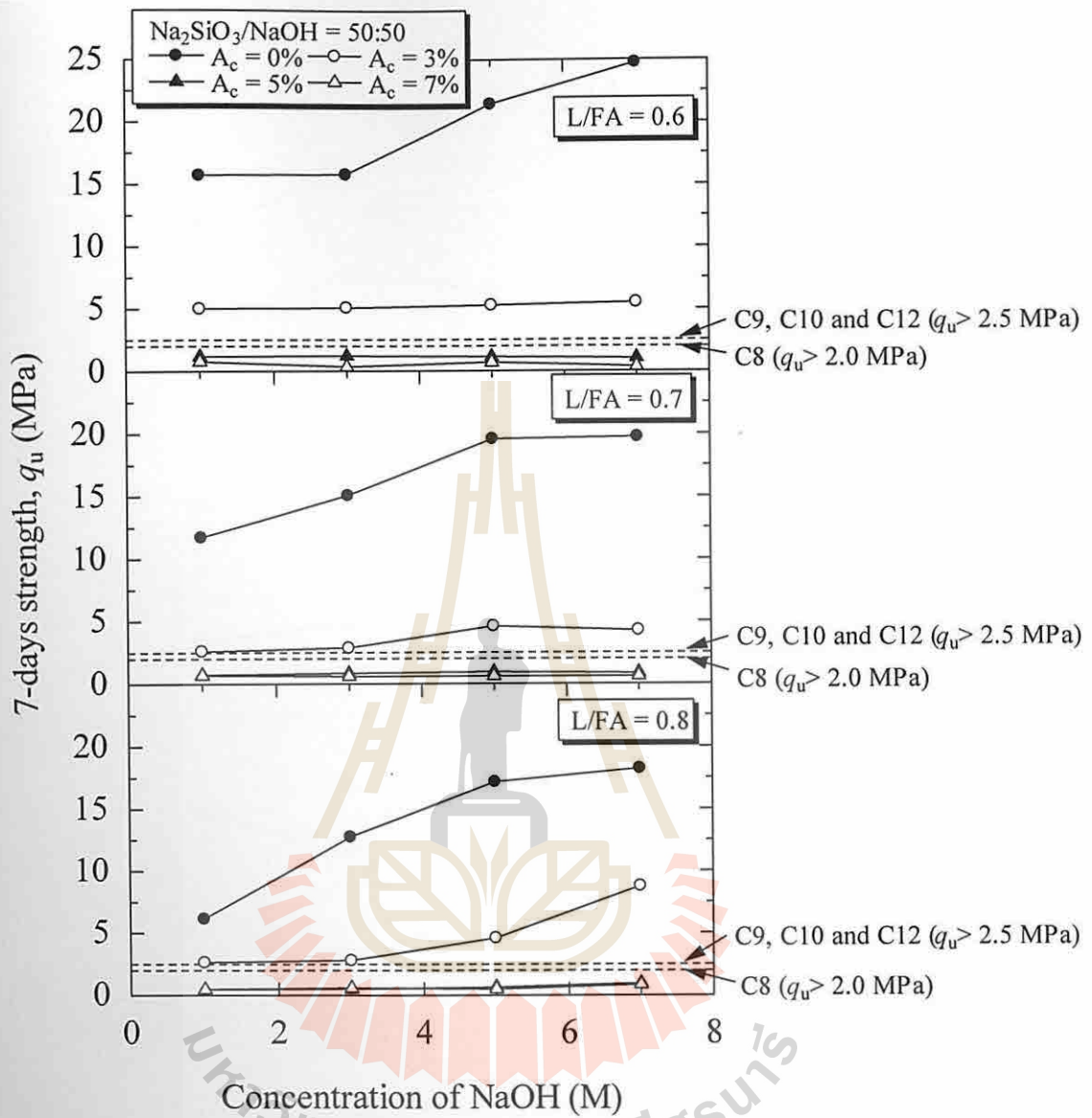
รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างเสาแก้วเคลือบเลเยอร์ซิลิโคนโพลีเมอร์มวลเบาที่
ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง Na₂SiO₃:NaOH เท่ากับ 70:30

4.4 กำลังอัดของเศษแก้วบดละเอียดอีโพลิเมอร์มวลเบา

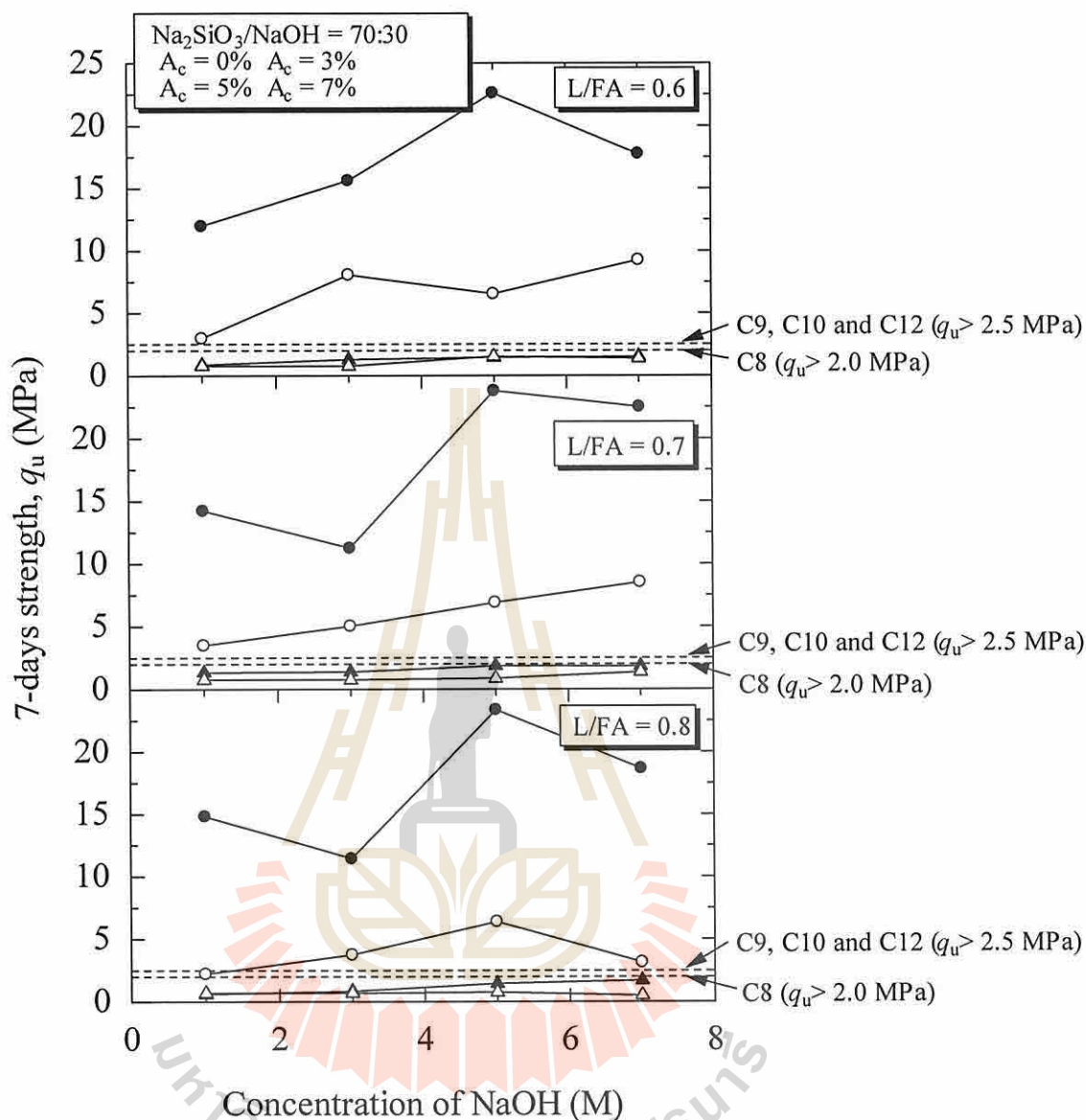
รูปที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดอีโพลิเมอร์มวลเบา ที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 1, 3, 5, และ 7 โมล ที่ปริมาณสารกระตุ้นต่อเนื้อ (L/FA) เท่ากับ 0.6, 0.7 และ 0.8 ที่ปริมาณสารเพิ่มฟอง (A_2) เท่ากับ ร้อยละ 0, 3, 5, และ 7 ที่อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 30:70, 50:50 และ 70:30 ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดอีโพลิเมอร์มวลเบา มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ตัวอย่างทดสอบที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 30:70 มีค่ากำลังอัดระหว่าง 0.15 ถึง 16.06 เมกะปาสคาล ตัวอย่างทดสอบที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 มีค่ากำลังอัดระหว่าง 0.51 ถึง 24.73 เมกะปาสคาล ขณะที่ ตัวอย่างทดสอบที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 70:30 มีค่ากำลังอัดระหว่าง 0.51 ถึง 23.77 เมกะปาสคาล

พิจารณาที่ความเข้มข้นสารละลาย NaOH เท่ากัน ค่า L/FA เท่ากัน และอัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากัน เมื่อปริมาณสารเพิ่มฟองเพิ่มขึ้น กำลังอัดของตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับการลดลงของความหนาแน่นแห้ง ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องดินตะกอนประปาอีโพลิเมอร์มวลเบาซึ่งถูกศึกษาโดย Suksiripattanapong et al. (2015) ขณะที่เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากัน ค่า L/FA เท่ากัน และปริมาณสารเพิ่มฟองเท่ากัน ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 30:70 กำลังอัดมีค่าต่ำสุดและกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 : NaOH เท่ากับ 50:50 และ 70:30 ตามลำดับ





รูปที่ 4.5 กำลังอัดของตัวอย่างเสาแก้วเคลือบเย็ดจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50



รูปที่ 4.6 กำลังอัดของตัวอย่างเสาแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่ส่วนผสมต่างๆ ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 70:30

4.5 การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของตัวอย่างเสาแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบา กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

การเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของเสาแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบา กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก.2601-2556 (C8-12) ที่ระบุเกณฑ์กำลังต้านทานแรงอัดตามมาตรฐานไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะปาสคาล และหน่วยน้ำหนักแห้งระหว่าง 7.85-11.77 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร แสดงในตารางที่ 4.2

อัตราส่วน (เศษแก้วบดละเอียด ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ชนิด C10 มีจำนวน 6 ส่วนผสม และ ชนิด C12 จำนวน 9 ส่วนผสม โดยจะเห็นได้ว่ามีเพียงตัวอย่างที่มีปริมาณฟองอากาศที่ร้อยละ 3 เท่านั้นที่ผ่านตามาตรฐาน และอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 มีจำนวนส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานมากที่สุด โดยแบ่งเป็น ชนิด C10 จำนวน 5 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 6 ตัวอย่าง และชนิด C12 จำนวน 7 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 9 ตัวอย่าง โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 1 ถึง 7 โมล และอัตราส่วนระหว่าง L/FA สามารถใช้ได้ในช่วง 0.6 ถึง 0.8

ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมของเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลีเมอร์มวลเบาจำแนกตาม มอก.2601-2556

ชนิด	ความหนาแน่นแห้ง (kN/m^3)	ความต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า MPa (kg/cm^2)	ตัวอย่างทดสอบที่ผ่านมาตรฐาน มอก.2601-2556			
			ความเข้มข้นของ NaOH	$\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$	ปริมาณโฟมโดยน้ำหนัก (%)	L/FA
C8	6.88-7.85	2.0 (20.4)	-	-	-	-
C9	7.86-8.82	2.5 (25.5)	-	-	-	-
C10	8.83-9.81	2.5 (25.5)	1	50:50	3	0.6
			3	50:50	3	0.7
			3	50:50	3	0.6
			5	50:50	3	0.8
			5	30:70	3	0.6
			7	50:50	3	0.6
C12	9.82-11.77	2.5 (25.5)	1	70:30	3	0.6
			1	50:50	3	0.8
			1	50:50	3	0.7
			3	50:50	3	0.8
			5	50:50	3	0.7
			5	50:50	3	0.6
			7	50:50	3	0.8
			7	50:50	3	0.7
			7	30:70	3	0.6

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบา อัตราส่วนผสม (ตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียด etailoy ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) เพื่อผลิตเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบาที่มีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (2.5 MPa) และความหนาแน่นระหว่าง 800 ถึง 1200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พร้อมทั้งนำเสนอวิธีการออกแบบการผลิตตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบา เพื่อให้ได้กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นที่ต้องการ สรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

- 5.1.1 ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของตัวอย่างเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบา แต่กำลังอัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เมื่อเพิ่มปริมาณโฟม ความหนาแน่นของตัวอย่างมีค่าลดลง เช่นเดียวกับกำลังอัด ขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่า L/FA (ระหว่าง 0.6 ถึง 0.8) ไม่ส่งผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากัน และปริมาณฟองอากาศเท่ากัน
- 5.1.2 อัตราส่วน (เศษแก้วบดละเอียด ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ชนิด C10 มีจำนวน 6 ส่วนผสม และ ชนิด C12 จำนวน 9 ส่วนผสม โดยจะเห็นได้ว่ามีเพียงตัวอย่างที่มีปริมาณฟองอากาศที่ร้อยละ 3 เท่านั้นที่ผ่านตามาตรฐาน และอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 มีจำนวนส่วนผสมที่ผ่านมาตรฐานมากที่สุด โดยแบ่งเป็นชนิด C10 จำนวน 5 ส่วนผสม จากทั้งหมด 6 ส่วนผสม และชนิด C12 จำนวน 7 ส่วนผสม จากทั้งหมด 9 ส่วนผสม โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ในช่วง 1 ถึง 7 โมล และอัตราส่วนระหว่าง L/FA สามารถใช้ได้ในช่วง 0.6 ถึง 0.8

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำโครงการวิจัยต่อไป

- 5.2.1 การวิจัยนี้เป็นการศึกษาหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลิเมอร์มวลเบา ที่อัตราส่วนเศษแก้วต่อetailoyเท่ากับ 50:50 ควรทำวิจัยเพิ่มเติมใน

อัตราส่วนของเศษแก้วต่อแก้วลอยค่าอื่น เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตจีโอโพลีเมอร์มวลเบา

- 5.2.2 งานวิจัยนี้ศึกษากำลั้งอัดของเศษแก้วบดละเอียดจีโอโพลีเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน ดังนั้นควรมีการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการบ่ม เช่น 14, 28, 60 และ 90 วัน ต่อกำลั้งอัด



เอกสารอ้างอิง

- คมกริช เวชสิทธิ์, สุทธิรักษ์ บูชากุล, ปาริฉัตร ปิ่นทอง และสุรเดช เหม่มพกุล. (2553). การออกแบบและก่อสร้างระบบกำจัดตะกอนโดยใช้วิธีรีดกรอง โรงงานผลิตน้ำบางเขน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, 12-14 พฤษภาคม 2553, อุบลราชธานี, ประเทศไทย.
- เริงศักดิ์ นนทิมธากุล และอภิศักดิ์ จุฑาศิริวงศ์. (2549). ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด
- สมิตร ส่งพิริยะกิจ. (2548). อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการอัดของมอร์ต้าจีโอโพลิเมอร์. 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 **Method of determination of compressive strength of concrete cubes.** British Standards Institute. 1983.
- Cebeci, Ö. Z. (1981). **Pore structure of air-entrained hardened cement paste.** Cement and Concrete Research , 11(2): 257-265.
- Chindaprasirt, 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.
- Chindaprasirt, 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.
- Chindaprasirt, 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 Suddepong, A. (2011). **Assessment of strength development in blended cement admixed Bangkok clay.** *Construction and Building Materials* 25(4): 1521-1531.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Suddepong, 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.
- Tikalsky, P. J., J. Pospisil, et al. (2004). **A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete.** Cement and Concrete Research 34(5): 889-893.
- Wang, K. S., I.-J. Chiou, et al. (2005). **Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash.** Construction and Building Materials 19(8): 627-633.
- Wongkeo, W., P. Thongsanitgarn, et al. (2012). **Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials.** Materials and Design 35(0): 434-439.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปัทสนิทร ธรรมรัตน์พัฒนา เกิดวันที่ 9 กันยายน 2513 ที่อยู่ปัจจุบัน 111/1 ซอย
มิตรภาพ 15 ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาเอก การรับรู้
ระยะไกล สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาชีพปัจจุบัน เจ้าของกิจการ
รับเหมาก่อสร้าง บริษัท ปัทสนิทร จำกัด โทร. 061-7893695 Email: prapatsarinn@gmail.com

