

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบา  
เซลลูโลสผสมเถ้าลอย ซีโพลีเอสเตอร์ธรรมชาติ และนาโนซิลิกา



นายคำภี จิตชัยภูมิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**A STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES AND  
MICROSTRUCTURES OF CELLULAR  
LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING  
FLY ASH, NATURAL ZEOLITE  
AND NANO-SILICA**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2013**

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส  
ผสมเถ้าลอย ซีโอไลต์ธรรมชาติ และนาโนซิลิกา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพิจารณาเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาคุยฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ศ. ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ)

กรรมการ

(รศ. ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.วันชัย สะตะ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คำทึ จิตชัยภูมิ : การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าผสมเถ้าลอย ซีโอไลต์ธรรมชาติ และนาโนซิลิกา (A STUDY OF PHYSICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURES OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING FLY ASH, NATURAL ZEOLITE AND NANO-SILICA)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, 248 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (CLC) ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) ซีโอไลต์ธรรมชาติ (NZ) และนาโนซิลิกา (NS) ด้วยวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD โดยแทนที่ OPC บางส่วนด้วย FA หรือ NZ ในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% และแทนที่ OPC บางส่วนด้วย NS ในปริมาณ 1%, 2%, และ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ความหนาแน่นแห้งประมาณ  $800 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5, 0.6, และ 0.7 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค ทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน ทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ ได้แก่ การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน ระยะเวลาการก่อตัว การหดตัวแห้ง และความทนทานเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ผลจากการวิจัยพบว่า CLC ที่ใช้ส่วนผสม NS ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสม FA หรือ NZ และส่วนผสมที่ใช้ NZ มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสม FA เล็กน้อย ซึ่งการแทนที่ OPC ด้วย NS ในปริมาณ 1wt% ที่ w/b = 0.7 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยกำลังรับแรงอัดจะลดลงตามปริมาณความพรุนรวมที่เพิ่มขึ้น และ CLC ที่มีกำลังรับแรงอัดค่อนข้างสูงมักมีขนาดโพรงเฉลี่ยที่เล็ก การแทนที่ OPC ด้วยวัสดุพอซโซลานทำให้ความพรุนรวม และขนาดช่องว่างอากาศลดลง แต่ความพรุนคาปิลลารี และ ความพรุนเจลของ CLC เพิ่มขึ้นตามระดับปริมาณการแทนที่ และ w/b ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความพรุนคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อทำให้ CLC มีการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณความพรุนรวมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ CLC ลดลงโดยคอนกรีตที่ผสม NZ มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำสุด และความพรุนเจลที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้อัตราการหดตัวแห้งของ CLC เพิ่มขึ้นตามระดับปริมาณการแทนที่ อย่างไรก็ตามการประสานร่วมกันของวัสดุพอซโซลานที่ใช้ในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ลดระยะเวลาการก่อตัว ลดปริมาณความพรุนรวม และลดขนาดช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ส่วนความทนทานของ CLC เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าอัตราการขยายตัวของแท่งตัวอย่างลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ด้วยวัสดุพอซโซลานที่เพิ่มขึ้นและ w/b ที่ลดลง โดย CLC ที่ผสม NS ในปริมาณ 3wt% ที่

$w/b = 0.6$  มีอัตราขยายตัวต่ำสุด ซึ่งผลกระทบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน ปริมาณฟองอากาศ และประเภท หรือระดับปริมาณการแทนที่ของวัสดุปอซโซลาน



สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

KHAMPHÉE JITCHAIYAPHUM : A STUDY OF PHYSICAL  
PROPERTIES AND MICROSTRUCTURES OF CELLULAR  
LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING FLY ASH, NATURAL  
ZEOLITE AND NANO-SILICA. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.  
THEERAWAT SINSIRI, Ph.D., 248 PP.

FLY ASH/ NATURAL ZEOLITE/ NANO-SILICA/ PHYSICAL PROPERTIES/  
MICROSTRUCTURE/ SULFATE RESISTANCE

This thesis presents an experimental study of the cellular lightweight concrete (CLC) with the controlled density of approximately  $800 \text{ kg/m}^3$  was made from a preformed foam, ordinary Portland cement (OPC), high-calcium fly ash (FA), natural zeolite (NZ), and nano-silica (NS) with PRE-FORMED FOAM METHOD. FA and NZ were used to partially replace OPC at 0, 10wt%, 20wt%, and 30wt% of the binder. The NS was used to partially replace OPC at 0, 1wt%, 2wt%, and 3wt% of the binder. The water-to-binder mass ratio (w/b) of 0.5, 0.6, and 0.7 were used for all mixtures and its compressive strengths of specimens at 3, 14, 28, and 60 days, water absorption, thermal conductivity, setting time, drying shrinkage, sulfate resistance, and microstructure of were tested.

The testing results indicated that CLC containing NS has the compressive strength were higher than those of NZ or FA, while CLC containing NZ has compressive strength was slightly higher than that of FA. The incorporation of 1wt% NS with w/b = 0.7 had the highest compressive strength. The compressive strength of CLCs were decreased with the increase of porosity. This suggest that the CLC with relatively high compressive strength is usually has the average pore size is small. The

replacement of OPC with pozzolan decreased the total porosity and air void size, but increased the gel and capillary porosity of the CLC as a result of adding pozzolans at all replacement levels and w/b increased. Which the water absorption increased as the capillary porosity increased, but increase of porosity affects the thermal conductivity of CLC is decreased, which CLC containing NZ had the lowest thermal conductivity. In addition, the gel and capillary pore increased as the replacement level increased, which affects the drying shrinkage rate of the cement paste. However, the incorporation of a suitable amount of pozzolans decreased the setting time, total porosity, and pore size of the cement paste. The expansion of CLC due to sulfate decreased as replacement level of pozzolan increased and lower w/b, which CLC containing 3wt% NS with  $w/b = 0.6$  had the lowest expansion rate; this effect depended on the volume of air entrained, w/b, and the type or amount of pozzolan.

School of Civil Engineering

Academic Year 2013

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

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

Co-advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบุคคลและคณะบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและช่วยเหลือเป็นอย่างดีทั้งในด้านวิชาการและด้านเทคนิคการดำเนินงานวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สั่งสอน ให้ความรู้ คำปรึกษา ตรวจสอบวิทยานิพนธ์และบทความวิจัยระดับนานาชาติจนสำเร็จ

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่ได้ให้คำชี้แนะการนำเสนอ และตรวจสอบวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ กรรมการ ที่ได้ชี้แนะแนวทางขอบเขตการวิจัย และตรวจสอบวิทยานิพนธ์

ดร.รัฐพล สมณา และ ดร.เกียรติสุดา สมณา ที่ให้ความสะดวก คำแนะนำในการเดินทางไป ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ประเทศฮ่องกง และให้คำแนะนำการเขียนบทความเพื่อตีพิมพ์ ตลอดจนการทำเอกสารการศึกษาต่อภายในประเทศ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม ที่ให้ความสะดวกใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ ห้องปฏิบัติการทดสอบการนำความร้อนคอนกรีตมวลเบา และให้คำแนะนำ คำปรึกษา การทดสอบ บ้านประหยัดพลังงานภาคสนาม ทีมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขอขอบคุณนายสุทธิพงษ์ กลายชัยภูมิ ที่ให้ยืมเครื่องมือวัดมิติเตอร์ไฟฟ้าไว้ใช้ประจำใน ระหว่างการทำงานวิจัยทดสอบการนำความร้อนคอนกรีตมวลเบาจนแล้วเสร็จ

ขอขอบคุณบุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความสะดวกใช้สถานที่ เครื่องมือห้องปฏิบัติการต่าง ๆ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้โอกาสในการศึกษาพร้อมทั้งสนับสนุนทุนการศึกษาตลอดหลักสูตร

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติ มิตร ครอบครัวยุติธรรมและผู้เขียนและบุคคลที่ไม่ได้กล่าวถึง ที่เป็นกำลังใจให้ผู้เขียนด้วยดีเสมอ ท้ายสุดนี้ผู้เขียนขอขอบคุณดีทั้งหมดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ส่งผลบุญ ให้ทุกท่านดังกล่าว จงประสบแต่ความสุข ความเจริญ ตลอดไป

คำถี จิตชัยภูมิ



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ท
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ถ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ทั่วไป.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	5
<b>2 ปรัชญ์นวัตกรรมการงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 บทนำ.....	6
2.2 วัสดุพอลิไซลัน.....	10
2.2.1 แก้วลอย.....	10
2.2.2 ซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	14
2.2.3 นาโนซิลิกา.....	15
2.3 คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส.....	16
2.4 ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส.....	17
2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	น้ำ	17
2.4.3	สารเพิ่มฟอง	18
2.4.3.1	ชนิดสังเคราะห์	19
2.4.3.2	สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีน	20
2.5	โครงสร้างจุลภาค	20
2.5.1	โครงสร้างของโพรง	20
2.5.2	คุณสมบัติของโครงสร้างจุลภาค	22
2.6	ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
2.6.1	การใช้วัสดุพอลิไซลันในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส	24
2.6.1.1	ถั่วลย	24
2.6.1.2	ซีโอไลต์ธรรมชาติ	25
2.6.2	ผลของวัสดุพอลิไซลันที่มีต่อกำลังรับแรงอัด	26
2.6.2.1	ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	26
2.6.2.2	ผลของการอัดตัวของอนุภาค	27
2.6.2.3	ผลของปฏิกิริยาพอลิไซลัน	27
2.6.3	คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส	29
2.6.3.1	กำลังรับแรงอัด	29
2.6.3.2	การหดตัวแห้ง	32
2.6.3.3	ความต้านทานจากการโจมตีของซัลเฟต	32
2.6.3.4	การดูดซึมน้ำ	34
2.6.3.5	การซึมผ่านของน้ำ	35
2.6.3.6	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	36
2.6.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัด	37
2.6.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความพรุน	37
2.6.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัด	38
2.6.7	ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายขนาดโพรงและกำลังรับแรงอัด	41
2.6.8	ผลของปริมาณถั่ว ความพรุนและอายุต่อกำลังรับแรงอัด	42
2.7	ข้อสรุปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8	กรอบแนวคิดงานวิจัย..... 43
<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินการวิจัย..... 45</b>
3.1	วัสดุ..... 45
3.1.1	ปูนซีเมนต์..... 45
3.1.2	เส้นลอย..... 45
3.1.3	ซีโอไลด์ธรรมชาติ..... 46
3.1.4	นาโนซิลิกา..... 46
3.1.5	สารเพิ่มฟอง..... 46
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์..... 46
3.2.1	เครื่องผสม..... 46
3.2.2	เครื่องกำเนิดโฟม..... 46
3.2.3	เครื่องอัดอากาศ..... 47
3.2.4	ภาชนะชั่งน้ำหนักของโฟม..... 47
3.2.5	เครื่องทดสอบการนำความร้อน..... 47
3.3	วิธีการทดสอบ..... 48
3.3.1	การออกแบบส่วนผสม..... 48
3.3.2	การเตรียมโฟม..... 50
3.3.3	การหล่อก้อนตัวอย่าง..... 50
3.3.4	การถอดแบบและการบ่ม..... 50
3.3.5	การทดสอบกำลังรับแรงอัด..... 51
3.3.6	ความหนาแน่นแห้ง..... 51
3.3.7	การดูดซึมน้ำ..... 51
3.3.8	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน..... 52
3.3.9	การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว..... 53
3.3.10	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ..... 53
3.3.11	การทดสอบหาค่าความละเอียดโดยวิธีของเบลน..... 53
3.3.12	การทดสอบการทนซัลเฟต..... 53
3.3.13	การทดสอบการหดตัวแห้ง..... 54

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การทดสอบระดับจุลภาค.....	54
3.4.1	X-ray diffraction (XRD).....	54
3.4.2	Scanning electron microscope (SEM).....	56
3.4.3	Mercury intrusion porosimeter (MIP).....	56
3.4.4	X-ray fluorescence analysis (XRF).....	57
3.4.5	Laser particle size analyzer.....	58
3.4.6	การทดสอบโครงสร้างช่องว่างอากาศโดยวิธีวิเคราะห์ภาพ.....	59
3.5	แผนการทดสอบ.....	61
<b>4</b>	<b>ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล.....</b>	<b>64</b>
4.1	บทนำ.....	64
4.2	คุณสมบัติของวัสดุยึดประสาน.....	64
4.2.1	คุณสมบัติทางกายภาพ.....	64
4.2.2	องค์ประกอบทางเคมี.....	67
4.3	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า.....	69
4.4	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า.....	75
4.5	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า.....	76
4.5.1	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ $w/b = 0.5$ .....	76
4.5.2	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ $w/b = 0.6$ .....	79
4.5.3	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ $w/b = 0.7$ .....	81
4.6	การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า.....	83
4.6.1	การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ $w/b = 0.5$ .....	83
4.6.2	การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ $w/b = 0.6$ .....	84
4.6.3	การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ $w/b = 0.7$ .....	86
4.7	โครงสร้างระดับจุลภาคของ CLC.....	87
4.7.1	ความพรุนของ CLC.....	87
4.7.2	ผลของวัสดุยึดประสานต่อการกระจายขนาดโพรงของ CLC.....	93
4.7.3	การวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM โครงสร้างจุลภาคของโพรง CLC.....	105

## สารบัญ (ต่อ)

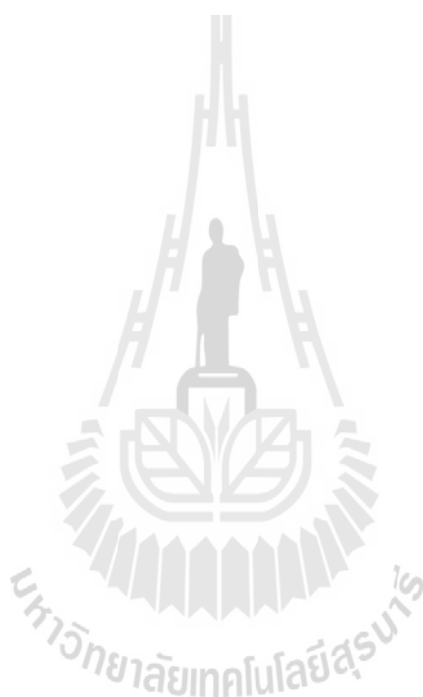
หน้า

4.7.4	การวิเคราะห์ภาพถ่ายผลึกซีเมนต์เฟสค์ของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ออปติคัล.....	111
4.8	ความทนทานต่อสารแมกนีเซียมซัลเฟตของ CLC.....	114
4.8.1	กำลังรับแรงอัดของ CLC เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต.....	114
4.8.2	การขยายตัวของแท่งคอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต.....	117
4.8.3	วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจากภาพถ่าย SEM ของ CLC เมื่อแช่ใน $MgSO_4$ .....	121
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของ CLC.....	123
4.9.1	ความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำ.....	123
4.9.2	ความพรุนเจล ความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัด.....	128
4.9.3	การจำลองสมการทำนายกำลังรับแรงอัดของ CLC.....	137
4.9.4	ขนาดโพรงเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัด.....	145
4.9.5	ความพรุนรวมและการนำความร้อน.....	148
5	สรุปผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล.....	152
5.1	สรุปผลการทดสอบในงานวิจัย.....	152
5.1.1	ระยะเวลาการก่อตัว.....	152
5.1.2	การดูดซึมน้ำ.....	153
5.1.3	กำลังรับแรงอัด.....	153
5.1.4	การหดตัวแห้ง.....	153
5.1.5	โครงสร้างระดับจุลภาค.....	153
5.1.6	ความทนทานต่อสารแมกนีเซียมซัลเฟต.....	154
5.1.7	คุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาค.....	154
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	154
	รายการอ้างอิง.....	155
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส.....	164
	ภาคผนวก ข. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล.....	167
	ภาคผนวก ค. ทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์.....	174

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง. ทรรศน์ทางปัญญา .....	200
ภาคผนวก จ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา .....	213
ประวัติผู้เขียน .....	248



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าถ่านหิน ..... 12
2.2	ข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน ..... 13
2.3	ส่วนประกอบสำหรับค่าคงที่ของ $\rho$ , $S$ , และ $\beta$ ..... 43
3.1	ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ..... 63
4.1	ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดประสาน ..... 64
4.2	ความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาค โดยเฉลี่ย และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ ..... 65
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสาน ..... 68
4.4	ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ..... 70
4.5	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ..... 77
4.6	ความพรุนของ CLC ผสม OPC, FA, NZ, และ NS ที่อายุ 28 วัน ..... 88
4.7	กำลังรับแรงอัดของ CLC เมื่อแช่ในสารละลาย $MgSO_4$ ความเข้มข้น 5% ..... 115
4.8	ความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของ CLC ที่อายุ 28 วัน ..... 124
4.9	เปรียบเทียบ Fit Curve ความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำกับผลงานวิจัยต่างประเทศ ..... 127
4.10	เปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกับงานวิจัยต่างประเทศ ..... 128
4.11	ความพรุนเจล ความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน ..... 129
4.12	เปรียบเทียบ Fit Curve ความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดกับผลงานวิจัย ต่างประเทศ ..... 136
4.13	เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ CLC จากสมการที่ 4.3 กับผลการทดสอบ ..... 143
4.14	เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ CLC จากสมการที่ 4.4 กับผลการทดสอบ ..... 144
4.15	เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ CLC จากสมการที่ 4.5 กับผลการทดสอบ ..... 145
4.16	ขนาดโพรงเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน ..... 147
4.17	ความพรุนรวมและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ CLC ที่อายุ 28 วัน ..... 149
4.18	เปรียบเทียบค่า $k$ ของคอนกรีตกับงานวิจัยต่างประเทศ ..... 151
ข.1	ตัวอย่างตารางบันทึกผลการวิเคราะห์ขนาดโพรงอากาศของ 0.5FA20 ..... 172
ข.2	ตัวอย่างตารางแจกแจงความถี่ในการกระจายขนาดโพรงอากาศของ 0.5FA20 ..... 173

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1	การคำนวณหาค่า $a$ และ $b$ เพื่อสร้างสมการถดถอยตัวอย่าง.....183
ค.2	ตารางทดสอบ Pearson's correlation coefficient.....189
ค.3	การคำนวณค่าตัวอย่างสุ่มของการดูคั้งน้ำและความพรุน.....190
ค.4	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Excel 5.0 จากการใช้ข้อมูลเพื่อสอบเทียบ กราฟของรูปที่ ค.9.....197
ค.5	ตัวอย่างการคำนวณหาขอบเขตความคลาดเคลื่อน.....198





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนผังการแบ่งประเภทของโพลีคอนกรีต..... 7
2.2	ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวที่ขัดเรียบของ CLC..... 8
2.3	ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคเถ้าลอย ..... 11
2.4	ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซีโอไลต์ธรรมชาติ..... 15
2.5	ภาพจำลองอธิบายโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์..... 21
2.6	แผนผังจำแนกผลกระทบของแร่ธาตุผสมเพิ่มต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า..... 26
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความหนาแน่นของโพลีคอนกรีต..... 31
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นแห้ง..... 35
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโพลีคอนกรีต ทำจากเถ้ากากตะกอนน้ำเสีย..... 37
2.10	แผนภาพจำลองอย่างง่ายของส่วนประกอบของโพลีคอนกรีต..... 39
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายขนาดช่องว่างอากาศและกำลังรับแรงอัดของ โพลีคอนกรีตที่อายุ 28 วัน..... 41
3.1	ชุดเครื่องมือผสมคอนกรีตมวลเบา CLC..... 47
3.2	เครื่องทดสอบการนำความร้อน..... 48
3.3	เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (XRD)..... 55
3.4	เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง (SEM)..... 56
3.5	เครื่องทดสอบ MIP..... 57
3.6	เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (XRF)..... 58
3.7	เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค..... 59
3.8	เครื่องตัดไบเพชร..... 60
3.9	เครื่องขัดชิ้นตัวอย่าง..... 60
3.10	กล้องจุลทรรศน์สำหรับทดสอบ Image Analyzer..... 61
3.11	แสดงแผนผังการทดสอบ..... 62
4.1	การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุ..... 66

## สารบัญรูป (ต่อ)

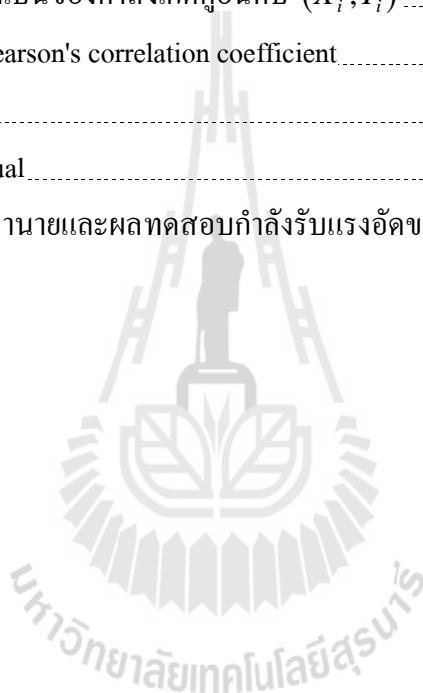
รูปที่	หน้า
4.2	ภาพถ่ายกำลังสูง SEM ของวัสดุยึดประสาน ..... 67
4.3	XRD patterns โครงสร้างผลึกของวัสดุยึดประสาน ..... 69
4.4	ผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA และ NZ ต่อระยะเวลาการก่อตัวของ CLC ที่ $w/b=0.5$ ..... 71
4.5	ผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA และ NZ ต่อระยะเวลาการก่อตัวของ CLC ที่ $w/b=0.6$ ..... 72
4.6	ผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA และ NZ ต่อระยะเวลาการก่อตัวของ CLC ที่ $w/b=0.7$ ..... 73
4.7	ผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS ต่อระยะเวลาการก่อตัวของ CLC ที่ $w/b=0.6$ และ $0.7$ ..... 74
4.8	การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน ..... 75
4.9	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.5$ ..... 79
4.10	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.6$ ..... 80
4.11	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.7$ ..... 81
4.12	การหาคัดหัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.5$ ..... 84
4.13	การหาคัดหัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.6$ ..... 85
4.14	การหาคัดหัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.7$ ..... 87
4.15	ความพรุนของ CLC ผสม FA และ NZ ที่ $w/b = 0.5$ อายุ 28 วัน ..... 90
4.16	ความพรุนของ CLC ผสม FA, NZ, และ NS ที่ $w/b = 0.6$ อายุ 28 วัน ..... 91
4.17	ความพรุนของ CLC ผสม FA, NZ, และ NS ที่ $w/b = 0.7$ อายุ 28 วัน ..... 92
4.18	ภาพถ่ายขนาดโพรงของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล ..... 94
4.19	การกระจายขนาดโพรงของ CLC ที่อายุ 28 วัน และ $w/b = 0.5$ ..... 101
4.20	การกระจายขนาดโพรงของ CLC ที่อายุ 28 วัน และ $w/b = 0.6$ ..... 103
4.21	การกระจายขนาดโพรงของ CLC ที่อายุ 28 วัน และ $w/b = 0.7$ ..... 104
4.22	ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่อายุ 28 วัน $w/b = 0.5$ ..... 106
4.23	ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่อายุ 28 วัน $w/b = 0.6$ ..... 107
4.24	ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่อายุ 28 วัน $w/b = 0.7$ ..... 109
4.25	ภาพถ่ายผิวซีเมนต์เพสต์ของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล ..... 111
4.26	การขยายตัวของแท่ง CLC ที่ $w/b = 0.5$ ในสารละลาย $MgSO_4$ ความเข้มข้น 5% ..... 118
4.27	การขยายตัวของแท่ง CLC ที่ $w/b = 0.6$ ในสารละลาย $MgSO_4$ ความเข้มข้น 5% ..... 119

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 การขยายตัวของแท่ง CLC ที่ $w/b = 0.7$ ในสารละลาย $MgSO_4$ ความเข้มข้น 5%.....	120
4.29 ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่แช่ใน $MgSO_4$ .....	122
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของ CLC ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ.....	125
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน.....	130
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนคาปีลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC ผสม FA ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ.....	132
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนคาปีลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC ผสม NZ ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ.....	133
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนคาปีลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC ผสม NS ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ.....	135
4.35 เปรียบเทียบค่าการทำนายและผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน สำหรับผสมวัสดุ FA.....	136
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุบ่มแต่ละส่วนผสมของ CLC.....	138
4.37 เปรียบเทียบค่าการทำนายและผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของ CLC.....	141
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน.....	148
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวมและการนำความร้อนของ CLC ที่อายุ 28 วัน.....	150
ข.1 แสดงลำดับขั้นตอนการตัดแท่งตัวอย่างอิพ็อกซีที่หล่อแล้ว.....	168
ข.2 แสดงการกัดผิวตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก.....	169
ข.3 แสดงการขัดแท่งตัวอย่าง.....	170
ข.4 แสดงตำแหน่งการตัดก่อนตัวอย่างไปทดสอบ.....	170
ข.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์ขนาดโพรงจากภาพถ่ายของ 0.5FA20.....	171
ข.6 ตัวอย่างกราฟแสดงความถี่ในการกระจายขนาดโพรงอากาศของ 0.5FA20.....	173
ค.1 ตัวอย่างแผนภาพแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X และ Y.....	177
ค.2 สมการถดถอยตัวอย่างและสมการถดถอยประชากร.....	179
ค.3 ค่าสังเกตจากคู่อันดับ $(X_i, Y_i)$ และเศษตกค้าง $e_i$ .....	180

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ค.4	สมการเส้นตรงของการถดถอยเมื่อ $b$ มีค่าแตกต่างกัน.....	181
ค.5	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการสร้างเส้นสมการถดถอยตัวอย่าง.....	184
ค.6	กราฟเปรียบเทียบเส้นถดถอยกับการกระจายข้อมูล.....	185
ค.7	การแยกส่วนค่าเบี่ยงเบนของค่าสังเกตคู่อันดับ $(X_i, Y_i)$ .....	186
ค.8	แผนภาพทดสอบ Pearson's correlation coefficient.....	190
ค.9	กราฟการสอบเทียบ.....	193
ค.10	การพล็อตค่า Residual.....	194
ค.11	เปรียบเทียบค่าการทำนายและผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน.....	199



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A$	=	Cross-section area
Å	=	อังสตรอม (1 อังสตรอม = $1 \times 10^{-10}$ m)
AAC	=	Autoclave aerated concrete
ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing and Material
$Al_2O_3$	=	Aluminium oxide
a.u	=	arbitrary unit คือหน่วยวัดความเข้ม (intensity) ที่รังสีเอกซ์เลี้ยวเบนไปในโครงสร้างผลึก
B	=	Boron
BET	=	Brunauer–Emmett–Teller ( $cm^2/g$ )
bar	=	หน่วยวัดความดัน (1 bar = $1 \times 10^6$ N/m <sup>2</sup> )
Ca	=	Calcium
$Ca(OH)_2$	=	Calcium hydroxide
CaO	=	Calcium oxide
$C_3A$	=	Tricalcium aluminate
C-S-H	=	Calcium silicate hydrate
$C_2ASH_8$	=	Calcium alumino silicate hydrate
$C_4AH_{13}$	=	Calcium aluminate hydrate
°C	=	Degree Celsius
CLC	=	Cellular lightweight concrete หรือคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส
CON	=	Control mix
Cu	=	Copper
$D_d$	=	Design density
dia.	=	Diameter หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง
$U_L$	=	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความยาว
$U_T$	=	ผลต่างระหว่างจุดที่วัดอุณหภูมิ

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

FA	=	Fly ash หรือ เถ้าลอย
Fe	=	Iron
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	=	Iron oxide
H <sub>2</sub>	=	Hydrogen gas
H <sub>2</sub> O	=	Dihydrogen monoxide หรือ Water
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	=	Hydrogen peroxide
Hp	=	Horse power
in	=	Inch
K	=	Potassium
<i>k</i>	=	Thermal conductivity
K <sub>2</sub> O	=	Potassium oxide
kg	=	Kilogram
kg/m <sup>3</sup>	=	Kilogram per cubic meter
$\lambda$	=	Thermal conductivity
LOI	=	Loss on ignition
<i>L</i>	=	Thickness of sample
<	=	น้อยกว่า
Mg	=	Magnesium
MgCl <sub>2</sub>	=	Magnesium chloride
MIP	=	Mercury intrusion porosimeter
m <sup>2</sup> /kg	=	Square meter per kilogram
m	=	Meter
m <sup>3</sup>	=	Cubic meter
min	=	Minute
mm	=	Millimeter
mm <sup>3</sup>	=	Cubic millimeter

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MgSO <sub>4</sub>	=	Magnesium sulfate หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต
Mn	=	Manganese
Mo	=	Molybdenum
MPa	=	mega Pascal หรือ $\times 10^6$ N/m <sup>2</sup>
>	=	มากกว่า
$\mu$ m	=	micrometer หรือ micron (1 micron = $1 \times 10^{-6}$ m)
NaCl	=	Sodium chloride
Na <sub>2</sub> O	=	Sodium oxide
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	=	Sodium sulfate หรือ โซเดียมซัลเฟต
No.	=	Number
nm	=	nanometer (1 nanometer = $1 \times 10^{-9}$ m)
NS	=	Nano-silica หรือ Nano-SiO <sub>2</sub>
NZ	=	Natural zeolite หรือ ซีโอไลต์ธรรมชาติ
OH <sup>-</sup>	=	Hydroxyl ions
OPC	=	Ordinary Portland cement หรือ type-I Portland cement
P	=	Phosphorus
%	=	Percent
pH	=	power of Hydrogen ion
Q	=	Quantity of heat flow
r	=	Round
sec.	=	Second
SEM	=	Scanning electron microscopy
SiO <sub>2</sub>	=	Silicon dioxide หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์
SO <sub>3</sub>	=	Sulfur trioxide
"	=	Theta
V <sub>a</sub>	=	Volume of air

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$V_{batch}$	=	Volume of batch
$V_f$	=	Volume of foam
W	=	Watt
$W_f$	=	Weight of foam
w/b	=	Water-to-binder ratio
w/c	=	Water-to-cement ratio
W/m.°C	=	Watt per meter–Degree Celsius
W/m.K	=	Watt per meter–Kelvin
$W_c$	=	Weight of cement
wt%	=	Percent by weight
$W_{uf}$	=	Unit weight of foam
$W_w$	=	Weight of water
XAS	=	X-ray absorption spectroscopy
XRD	=	X-ray diffraction
XRF	=	X-ray fluorescence
Zn	=	Zinc



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ททั่วไป

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการสร้างอาคารเกือบทุกสถานที่ทั่วโลก เป็นที่ยอมรับสูงในหมู่นักวางแผน โครงการและผู้ใช้ทั่วไปนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีความได้เปรียบในการขึ้นรูปง่ายกว่าวัสดุอื่น มีคุณสมบัติที่ดีทั้งทางกลและกายภาพ วัสดุดิบที่ใช้ในการผลิตหาได้ง่ายจากธรรมชาติ ต้นทุนการผลิตต่ำและใช้งานง่าย โดยปกติความหนาแน่นของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) มักจะอยู่ในช่วง  $2,300\text{--}2,700\text{ kg/m}^3$  (Nambiar and Ramamurthy, 2006) โครงสร้างคอนกรีตมีน้ำหนักบรรทุกคงที่ (dead load) มากเมื่อเทียบกับขนาดสัดส่วนของคอนกรีต ดังนั้นการทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำจะเป็นประโยชน์ในแง่ของการแบกรับภาระน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง ขณะเดียวกันก็เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันเสียง (acoustic) และกันความร้อนไปพร้อมกัน (Feng and Peng, 2005) นักวิจัยทุกคนจึงมีเป้าหมายที่จะพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ทำจากคอนกรีตให้มีทั้งความแข็งแรง การใช้งานที่ง่าย ความหนาแน่นต่ำและเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ซึ่งนั่นก็คือ คอนกรีตมวลเบา หรือ Lightweight Concrete (Beben and Manko, 2011)

### 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากคอนกรีตน้ำหนักปกติ (normal weight concrete) มีความหนาแน่นสูงและมีความเป็นฉนวนกันความร้อนไม่เพียงพอ ซึ่งอาคารที่อยู่อาศัยมีความต้องการในการใช้ฉนวนกันความร้อนจากคอนกรีตเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของคอนกรีตสามารถทำให้ลดลงได้โดยการแทนที่ปริมาณช่องว่างอากาศ (air void) หรือมวลรวมน้ำหนักเบาซึ่งมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน (Tikal'sky et al., 2004) ได้แก่วิธีไม่ใส่มวลรวมละเอียดลงในส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งมีแต่มวลรวมหยาบหรือหินขนาดเดียว และมีซีเมนต์เพสต์หรือน้ำปูนเคลือบที่ผิว ความหนาไม่เกิน 3 mm ที่เรียกว่า No-fines concrete ทำให้คอนกรีตประเภทนี้มีช่องว่างหรือโพรงจำนวนมากส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดค่อนข้างต่ำ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต No-fines concrete ขึ้นอยู่กับขนาดละเอียดของหิน ในทำนองคล้ายกันหากคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติถูกแทนที่ด้วยวัสดุอัดแทรกที่มีน้ำหนักเบาเพื่อลดความหนาแน่น จะทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักลดลงได้เช่นกัน วิธีนี้เรียกว่า Lightweight aggregate concrete หรือโดยวิธีการผสมฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 – 1 mm ที่เรียกว่า โฟมเหลว ใส่ลงบนคอนกรีตสดในระหว่างขั้นตอนการผสม ได้แก่ การผสมสารที่ก่อให้เกิดโฟม (foaming agent) ในส่วนผสม

หรืออาจทำให้เกิดเป็นโฟม (pre-formed foam) ก่อนจะผสมกับมอร์ต้าหรือซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดโพรงอากาศในคอนกรีตที่เรียกว่า Aerated concrete ได้โดยการทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากในเนื้อคอนกรีต จากการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น ผสมผงอลูมิเนียมในปริมาณ 0.2% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ซึ่งผงอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อให้เกิดฟองโฟมของก๊าซไฮโดรเจน ที่เรียกว่า Cellular หรือ Aerated หรือ Foamed concrete (Laukaitis and Fiks, 2006; Karakurt et al., 2010) ตามวิธีการต่าง ๆ เท่าที่มีอยู่เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งาน (Jitchaiyaphum et al., 2011)

โฟมคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาประกอบด้วยซีเมนต์เพสต์หรือซีเมนต์ฟิเลเลอร์เมตริกซ์ (มอร์ต้า) โดยที่มีช่องว่างเป็นเนื้อเดียวกันหรือโครงสร้างโพรงที่สร้างขึ้นโดยการนำเอาอากาศในรูปแบบของฟองอากาศขนาดเล็ก (small bubble) แทรกเข้าไป (Tikal'sky et al., 2004) การนำเข้าของโพรงสามารถทำได้ด้วยวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง ในลักษณะทางกลโดยทำให้เกิดฟองก่อนผสม ซึ่งสารเพิ่มฟองเจือจางกับน้ำส่วนหนึ่ง แล้วจึงอัดอากาศให้เป็น โฟมก่อนที่จะถูกใส่เข้าไปในเครื่องผสมคอนกรีต (Jones and Mc Carthy, 2005; Kunhanandan Nambiar and Ramamurthy, 2007) โฟมคอนกรีตสามารถออกแบบให้มีความหนาแน่นใด ๆ ก็ได้ โดยอยู่ระหว่าง  $400\text{--}1,600\text{ kg/m}^3$

คอนกรีตเซลลูล่าหรือโฟมคอนกรีตด้วยการเป็นผลิตภัณฑ์จนวนกันความร้อนที่ดี และมีความแข็งแรงขึ้น โดยกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายและพลังงานสูงที่เข้มงวด ภายใต้อุณหภูมิสูงด้วยออโตคลอป (autoclave) หรือการอบไอน้ำ (Mydin and Wang, 2012) เทคนิคการใช้สอยได้ถูกจำกัดอย่างมากเนื่องจากกำลังต่ำ (low strength) ของคอนกรีต จึงมีการค้นคว้าอย่างต่อเนื่องเพื่อนำไปสู่การพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติทางกลที่ดี (Kearsley and Wainwright, 2002) การใช้วัสดุก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบาที่มีข้อดีคือ สามารถลดน้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้าง ปรับปรุงประสิทธิภาพการเป็นจนวนกันความร้อนของอาคาร ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง การยกประกอบติดตั้งชิ้นส่วน โครงสร้างสำเร็จรูปที่หน่วยงานก่อสร้างสามารถทำได้สะดวก หรือจะผลิตที่โรงงานแล้วจึงเคลื่อนย้ายไปยังหน่วยงานก่อสร้างก็สามารถทำได้เช่นกัน (Wang et al., 2005)

ระบบของโพรงในวัสดุจำพวกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมพื้นฐานหลัก โดยทั่วไปสามารถจำแนกได้เป็น โพรงเจล (gel pore) โพรงคาพิลลารี (capillary pore) โพรงขนาดใหญ่เนื่องจากการกักอากาศ (entrained air) และโพรงขนาดใหญ่เนื่องจากการเทคอนกรีต โพรงเจลและความพรุนของ โพรงเจล ไม่มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตพรุน แม้ว่ารูโพรงเหล่านี้จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการคืบ (creep) และการหดตัว (shrinkage) โพรงคาพิลลารีและโพรงขนาดใหญ่อื่น ๆ มีผลต่อการลดกำลังและการซึมผ่านของคอนกรีต (Kunhanandan Nambiar and Ramamurthy, 2007)

ทางเลือกใหม่สำหรับการประยุกต์ใช้ของโฟมคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากการรวมกันของสารเคมีสร้างฟองและการบ่มในอากาศในกระบวนการผลิต โฟมคอนกรีตเหล่านี้เป็นสิ่งใหม่และเป็นนวัตกรรมวัสดุก่อสร้างมีคุณสมบัติที่น่าสนใจคือมีความหนาแน่นต่ำและมีกำลังสูง (Just and Middendorf, 2009) จึงมีแนวโน้มที่เป็นไปได้สำหรับคุณสมบัติเหล่านี้ เช่น ความพรุนระดับมหภาค (macro-porosity) และความพรุนระดับจุลภาค (micro-porosity) อย่างไรก็ตาม โครงสร้างจุลภาคของเมตริกซ์ซีเมนต์จะถูกกระทบโดยโพรงระดับจุลภาค (micro-pore) นอกจากนี้เมตริกซ์ของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วสามารถทำให้เกิดประสิทธิภาพได้โดยการเจาะจงใช้งานเฉพาะสำหรับคอนกรีต

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงนำมาสู่แนวความคิดในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ ซีโอไลต์ธรรมชาติ เถ้าลอย และนาโนซิลิกา มาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังเป็นการส่งเสริมการรักษาสภาพแวดล้อมอีกทางหนึ่ง ซึ่งจะนำไปสู่การใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างเหมาะสมและเป็นทางเลือกใหม่ต่อไปในอนาคต

### 1.3 วัตถุประสงค์

จุดมุ่งหมายของการวิจัยนี้เพื่อประเมินผลพฤติกรรมและความเหมาะสมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (cellular lightweight concrete หรือ CLC) ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอซโซลาน เถ้าลอยแคลเซียมสูง (high-calcium fly ash หรือ FA) ซีโอไลต์ธรรมชาติ (natural zeolite หรือ NZ) และ นาโนซิลิกา (nano-SiO<sub>2</sub> หรือ NS) โดยวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในปริมาณต่าง ๆ ผลของปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาค ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการดูดซึมน้ำ ความพรุนและกำลังรับแรงอัด ขนาดโพรงและกำลังรับแรงอัด ในระยะสั้น (short-term) ของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว วัตถุประสงค์ของการศึกษาประกอบไปด้วย

- 1) เพื่อหาปริมาณสัดส่วนผสมที่เหมาะสมในการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ซีเมนต์บางส่วน ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าด้วยวัสดุ FA, NZ, และ NS
- 2) เพื่อประเมินผลและเปรียบเทียบการพัฒนา กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วย FA, NZ, และ NS
- 3) เพื่อประเมินผลพฤติกรรมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วย FA, NZ, และ NS ในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคให้มีคุณสมบัติในด้าน

กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นและอายุปลาย การดูดซึมน้ำ การหดตัวแห้ง การนำความร้อน และการทนทานต่อสารซัลเฟต

4) เพื่อเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (water-to-binder ratio หรือ w/b) ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA, NZ, และ NS ในปริมาณต่าง ๆ

5) เพื่อศึกษาค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษานี้ครอบคลุมถึงการใช้ประโยชน์ของเถ้าลอยแคลเซียมสูง ซีโอไลด์ธรรมชาติ และนาโนซิลิกา ในการใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ที่ผลิตโดยวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD มีการควบคุมความหนาแน่นแห้งประมาณ  $800 \text{ kg/m}^3$  บ่มไว้ในถุงพลาสติกปิดผนึกที่อุณหภูมิห้อง และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (water-to-binder ratio หรือ w/b) เท่ากับ 0.5, 0.6, และ 0.7 ของทุกส่วนผสม ซึ่งเถ้าลอยที่ใช้ศึกษาได้มาจากแหล่งโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย ส่วนซีโอไลด์ธรรมชาติ และนาโนซิลิกา ได้มาจากผู้ประกอบการแห่งหนึ่งในจังหวัดปทุมธานี

เป้าหมายหลักของการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมในระยะสั้น และคุณสมบัติทางกายภาพของ CLC ได้แก่ กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างขนาด  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$  ที่อายุบ่ม 3, 14, 28, และ 60 วัน และโครงสร้างจุลภาคของ CLC นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติอื่น ๆ ได้แก่ การดูดซึมน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การหดตัวแห้ง ระยะเวลาการก่อตัวและความทนทานต่อสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก

โครงสร้างโพรงของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสประกอบด้วยโพรงเจล โพรงคาปิลลารี ช่องว่างกักอากาศ (entrained air-void) และช่องว่างอากาศจากการเท (entrapped air-void) สำหรับขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาครอบคลุมเฉพาะโครงสร้างช่องว่างกักอากาศ ที่มีการระบุเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของ CLC ส่วนอิทธิพลของโพรงเจล โพรงคาปิลลารี และช่องว่างอากาศจากการเทคอนกรีตที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของ CLC นั้น ไม่ครอบคลุมโดยงานวิจัยนี้

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยมีดังต่อไปนี้

1) ทำให้ทราบผลของปริมาณการใช้และอัตราส่วน w/b ของวัสดุปอชโซลานที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาค ในการปรับปรุงโครงสร้างและขนาดโพรงของ CLC การศึกษา

นี่จะเป็นประโยชน์ต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงอัด ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความทนทานต่อสารซัลเฟต ในระยะยาวของคอนกรีต

2) เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นของคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC

3) ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC

4) เพื่อให้เป็นผลพลอยได้ในการส่งเสริมการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา และอาจเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมในการลดปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ลง

## 1.6 แผนการดำเนินงาน

แผนการทำวิทยานิพนธ์มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

- 1) ค้นคว้าเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์และสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์
- 3) จัดหาวัสดุ อุปกรณ์และเตรียมตัวอย่างการทดสอบ
- 4) ทำการทดสอบและรวบรวมผลการทดสอบ
- 5) ทำการวิเคราะห์ เปรียบเทียบผลการทดสอบของข้อมูลที่ได้และสรุปผล
- 6) เขียนรายงานวิทยานิพนธ์และจัดทำรูปเล่ม
- 7) นำเสนอผลงาน สอบวิทยานิพนธ์และแก้ไขวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรมที่จำเป็นสำหรับวัสดุอัดประสานคุณสมบัติ และคุณลักษณะของคอนกรีตมวลเบา ผลของปริมาณการใช้วัสดุปอซโซลานที่มีต่อกำลังรับแรงอัด การต้านทานซัลเฟต การหดตัวแห้ง การดูดซึมน้ำ การนำความร้อนและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (CLC)

#### 2.1 บทนำ

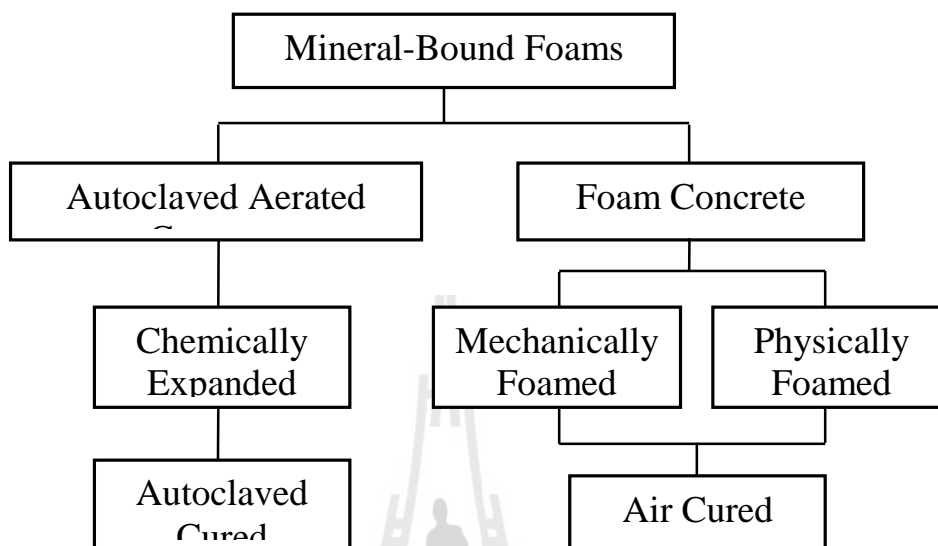
คอนกรีตมวลเบา (lightweight concrete) คือคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตปกติทั่วไป คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นระหว่าง  $400-1,800 \text{ kg/m}^3$  ในขณะที่คอนกรีตปกติมีความหนาแน่นประมาณ  $2,400 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งทำด้วยมวลรวมที่มีความหนาแน่นปกติ (Neville and Brooks, 1990) คอนกรีตมวลเบาสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามวิธีการผลิตดังต่อไปนี้

1) โดยการใช้น้ำหนักเบามากเป็นวัสดุผสม ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมเบามากมีค่าต่ำกว่ามวลรวมปกติ คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้เรียกว่าคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (lightweight aggregate concrete)

2) โดยการทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่าง (void) ขนาดใหญ่ภายในเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ต้าโพรงเหล่านี้จะมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอและแน่นเป็นพิเศษ โดยการกักกระจายของอากาศ (air entrainment) คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้มีชื่อเรียกที่ต่างกัน เช่น คอนกรีตอัดอากาศ (aerated concrete) หรือคอนกรีตเซลลูล่า (cellular concrete) หรือโฟมคอนกรีต (foamed concrete) หรือก๊าซคอนกรีต (gas concrete) เป็นต้น

3) โดยการไม่ใช้มวลรวมละเอียด (fine aggregate) เป็นส่วนผสมในคอนกรีต ซึ่งมีแต่มวลรวมหยาบน้ำหนักปกติที่มีขนาดใกล้เคียงกันหรือขนาดเดียว (single size) เท่านั้น คอนกรีตชนิดนี้มีการใช้ปริมาณซีเมนต์และน้ำที่ต่ำ ดังนั้นช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ระหว่างมวลรวมหยาบจึงมีจำนวนมาก คอนกรีตประเภทนี้เรียกว่าคอนกรีตพรุน (porous concrete) หรือคอนกรีตไม่มีมวลรวมละเอียด (No-fines concrete)

อย่างไรก็ตามโฟมคอนกรีตชนิดที่ใช้แร่ธาตุเป็นวัสดุยึดประสาน (mineral-bound foams) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบตามกระบวนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 2.1



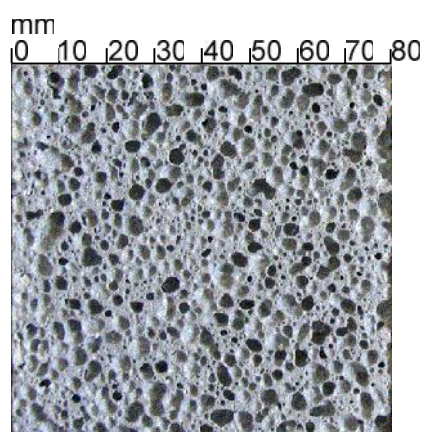
รูปที่ 2.1 แผนผังการแบ่งประเภทของโฟมคอนกรีต (Just and Middendorf, 2009)

การบ่มคอนกรีตมวลเบาด้วยไอน้ำหรือ ออโตคลอป (autoclave) มักจะอยู่ในขั้นตอนการผลิต โดยโรงงานผู้ประกอบการ ส่วนผสมของ CLC นั้นประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำและวัสดุยึดประสานอื่น ๆ เช่น ใ้ลย ใ้ลไฟ ใ้ลฟูม เป็นต้น การควบคุมความหนาแน่นจะได้รับการแทรกโดยเซลล์อากาศทั้งหมด หรือแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน ส่วนมวลรวมหยาบน้ำหนักปกติ (normal-weight coarse aggregate) มักจะไม่ได้ใช้ แต่สำหรับมวลรวมละเอียดเบาและมวลรวมหยาบเบามักจะพบใน CLC ซึ่งกระบวนการพื้นฐานสำหรับการสร้างฟองอากาศเพื่อการผลิตคอนกรีตมวลเบามี 2 วิธี คือ วิธีทางกล และ วิธีทางเคมี

1) วิธีการสร้างฟองอากาศทางกล อาจดำเนินการได้ 2 วิธีหลัก ตามกระบวนการผลิต

a) วิธีการสร้างฟองอากาศโดยการทำให้เกิดโฟมก่อนผสม ด้วยการใส่สารเพิ่มฟองเจือจางกับน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสมแล้วนำไปผ่านเครื่องสร้างฟอง (foam generator) เพื่อให้ได้โฟมเหลว จากนั้นโฟมเหลวที่ได้จะนำไปผสมโดยตรงกับซีเมนต์เพสต์ หรือ มอร์ต้าสดในเครื่องผสม วิธีการเช่นนี้เรียกว่าวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD ซึ่งโฟมดังกล่าวมีความเสถียรอยู่ในเนื้อคอนกรีตตั้งแต่คอนกรีตเริ่มก่อตัวจนกระทั่งคอนกรีตมีสภาพเป็นของแข็ง ทำให้ CLC เป็นโพรงปิด (close pore) ที่เต็มไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก ดังในรูปที่ 2.2

b) วิธีการสร้างฟองอากาศโดยการใส่สารเพิ่มฟอง หรือ สารกักกระจายฟองอากาศ (air entraining) ด้วยโปรตีนไฮโดรไลซ์ หรือ เรซินสบู่ ผสมกับซีเมนต์เพสต์ หรือ มอร์ต้า จากนั้นผ่านการตีหรือกวนส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสารเพิ่มฟองดังกล่าวจะมีความเสถียร (stabilizes) เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากขึ้น ในขณะที่ผสมด้วยความเร็วรอบสูง วิธีนี้เหมาะกับการผลิตคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง แต่วิธี PRE-FORMED FOAM METHOD เหมาะสำหรับการผลิตคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำ

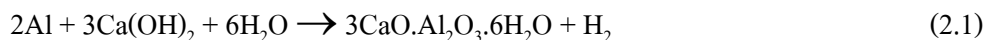


รูปที่ 2.2 ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวที่ขัดเรียบของ CLC (Just and Middendorf, 2009)

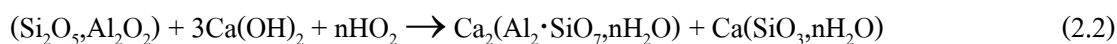
2) วิธีการสร้างฟองอากาศโดยวิธีทางเคมี ส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทราย และปูนขาว ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกลายมาเป็นโฟมเคมีได้โดยการใส่สารผสมเพิ่มขยายตัว (expansion agent) ซึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดฟองก๊าซในขั้นตอนการเทเข้าแบบหล่อ และส่วนผสมจะเกิดการบวมตัวขึ้นหลายเท่าเมื่อเทียบกับปริมาตรเดิม ซึ่งคล้ายกับขั้นตอนหนึ่งของการทำขนมเค้ก ภายหลังสิ้นสุดการก่อตัวคอนกรีตจะถูกนำเข้าหม้อหนึ่ง หรือ ห้องอบไอน้ำภายใต้แรงดันและอุณหภูมิที่สูง จึงเรียกว่าก๊าซคอนกรีต หรือ คอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ (autoclave aerated concrete หรือ AAC) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

a) โดยวิธีผงอลูมิเนียม (aluminum powder method) ฟองอากาศเกิดจากการเพิ่มผงอลูมิเนียมซึ่งทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หรือสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง (alkaline) และปล่อยก๊าซไฮโดรเจนกลายเป็นฟองออกมาดังแสดงในสมการที่ 2.1 ซึ่งเป็นที่กักเก็บฟองอากาศขนาดเล็กนับไม่ถ้วนในเนื้อคอนกรีตขึ้น (Albayrak et al., 2007) นอกจากนี้ผงอลูมิเนียมอัลลอย และ ผงสังกะสี ยังสามารถใช้ได้เช่นกัน จากนั้นคอนกรีตจะผ่านกระบวนการบ่มโดยการอบไอน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูงก่อนจะนำไปใช้





ด้วยความดัน 10–12 bar และอุณหภูมิ 180–200 °C แคลไซต์ในคอนกรีตสามารถผ่านกระบวนการเปลี่ยนเฟสเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปที่มีชื่อว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ Tobermorite หรือ  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}(\text{SiO}_3)_n\text{H}_2\text{O}$  มีอีกชื่อย่อว่า C–S–H (Wongkeo et al., 2012) ดังแสดงในสมการที่ 2.2



ด้วยอุณหภูมิที่สูงมากดังกล่าวทำให้ผลิตผลไฮเดรชันส่วนใหญ่อยู่ในรูปผลึกขนาดเล็กมาก (Microcrystalline) ส่งผลให้คุณสมบัติคอนกรีตเปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้น กล่าวคือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมง เทียบเท่ากับอายุ 28 วันที่ย้อมด้วยอากาศในอุณหภูมิห้อง คอนกรีตจึงมีความทนทานเพิ่มขึ้นโดยทนต่อสารซัลเฟต หรือ สารเคมีเพิ่มขึ้น และยังลดการเกิดรอยร้าวเกลือ (efflorescence) ลดการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) และการคืบ นอกจากนี้คอนกรีตยังมีความชื้นต่ำภายหลังการอบไอน้ำแล้ว

b) โดยวิธีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide method) ฟองอากาศเกิดจากการใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) เข้าไป ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับผงฟอก ( $\text{CaCl}(\text{OCl})$ ) โดยผ่านการผสม และกลายมาเป็นก๊าซออกซิเจน และไอน้ำ อย่างค่อยเป็นค่อยไป ดังแสดงในสมการที่ 2.3 ซึ่งเป็นที่กักเก็บฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากไม่ถ่วงในเนื้อคอนกรีตขึ้น กระบวนการเกิดฟองอากาศนี้เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นการผสมจนกระทั่งสิ้นสุดเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์



การลดลงของความหนาแน่นของคอนกรีตในแต่ละวิธี เกิดจากการทำให้คอนกรีตมีช่องว่าง (void) ทั้งในมวลรวม หรือ มอร์ต้า หรือ ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมหยาบ การเกิดขึ้นของช่องว่างเหล่านี้จะเป็นการลดกำลังของคอนกรีตมวลเบาเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ แต่สำหรับการประยุกต์ใช้งาน โดยทั่วไปคอนกรีตกำลังสูงนั้นอาจไม่จำเป็น อย่างไรก็ตามคอนกรีตมวลเบาอาจจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ตามวัตถุประสงค์การนำไปใช้ คือ คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (structural lightweight concrete) คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อ (masonry) และคอนกรีตมวลเบากันความร้อน (insulating)

## 2.2 วัสดุปอซโซลาน

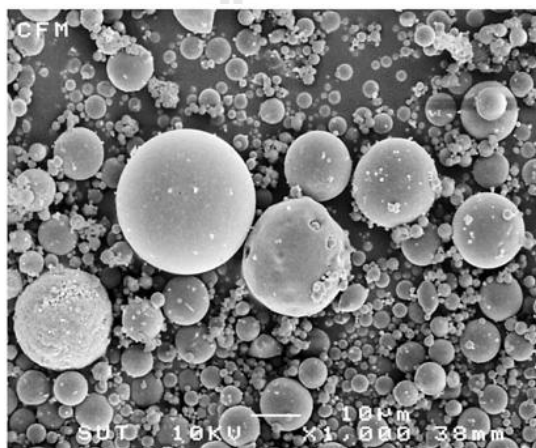
วัสดุปอซโซลาน (pozzolanic material) จัดเป็นสารผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง สามารถใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ หรือ คอนกรีตได้ โดยใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนเท่านั้น เนื่องจากเฉพาะวัสดุปอซโซลานไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน เพื่อจุดประสงค์ในการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น หรือ ลดต้นทุนของคอนกรีตลง วัสดุปอซโซลานเมื่อนำไปผสมกับคอนกรีตจะช่วยปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตสดให้มีความสามารถเทได้สูง คอนกรีตมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในช่วงอายุปลาย คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีคุณสมบัติทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนจากสารซัลเฟต วัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย ซิลิกาฟูมหรือไมโครซิลิกา เป็นต้น

ตามมาตรฐาน (ASTM C618-2001) ได้ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีสารซิลิกาเพียงอย่างเดียว หรือ มีทั้งซิลิกาและอลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน หากแต่วัสดุปอซโซลานมีความละเอียดสูง และมีน้ำหรือความชื้นอย่างเหมาะสมก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้เกิดสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน” วัสดุปอซโซลานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (Metha et al., 1995) คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (natural pozzolan) และ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (artificial pozzolan) ซึ่งวัสดุปอซโซลานธรรมชาติเป็นวัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ เช่น หินพัมมิช (pumicite) หินซีโอไลต์ธรรมชาติ เป็นต้น วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์เป็นวัสดุที่ได้จากการนำวัสดุไปผ่านกระบวนการทางความร้อน เช่น การเผาวัสดุดิบที่ได้จากธรรมชาติจำพวก ดินขาวเกาลิน (Kaolin) ไคอะตอมไมท์ หรือได้จากผลพลอยได้ของการผลิตของโรงไฟฟ้าความร้อน เช่น เถ้าลอย เถ้าก้นเตา เป็นต้น

### 2.2.1 เถ้าลอย

สถาบันคอนกรีตอเมริกัน (American Concrete Institute) หรือ ACI 116R-2000 ได้ให้คำจำกัดความของเถ้าลอยว่าเป็น "กากของเสีย หรือ ซี้เถ้าที่เป็นผลมาจากการเผาไหม้ของผงถ่านหิน และ ปลิวออกมาจากปล่องควันของส่วนเผาไหม้ไปยังระบบกำจัดอนุภาค"

เถ้าลอย (fly ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินที่ผ่านการเผาไหม้แล้วจะลอยหรือปลิว (fly) มายังปล่องควัน และ ถูกอุปกรณ์ที่เรียกว่า Electrostatic Precipitator ดักจับเอาไว้ จากนั้นจะถูกนำมารวบรวมไว้ในถังไซโลขนาดใหญ่เพื่อการนำไปใช้ต่อไป ในกรณีที่เถ้าถ่านหินหลอมเหลว และ บางส่วนจับกันเป็นก้อน หรือ เป็นเม็ด



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เถ้าถ่านหินโดยทั่วไปมีขนาดอนุภาคและความละเอียดใกล้เคียงกัน หรืออาจสูงกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1  $\mu\text{m}$  (micrometre หรือ micron) ถึง 100  $\mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เถ้าถ่านหินที่กลวงมีน้ำหนักเบาและอาจลอยน้ำได้ เรียกว่าเถ้าถ่านหินกลวง (cenospheres) และเถ้าถ่านหินที่มีรูพรุนอาจมีเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก อยู่ในเรียกว่า Plerospheres ความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินจะขึ้นอยู่กับ การบดถ่านหิน ชนิดของเครื่องบด และชนิดของเตาเผา เถ้าถ่านหินจะมีความละเอียดมากขึ้นและมีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะได้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและกลม แต่ในกรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ รูปร่างของเถ้าถ่านหินจะไม่แน่นอน สำหรับเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะพบว่าความละเอียดของเถ้าถ่านหินทดสอบโดยวิธีของเบลน (Blaine) อยู่ในช่วง 2,500–3,500  $\text{cm}^2/\text{g}$

องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าถ่านหินคือ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  สัดส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะเผา ด้วยเหตุนี้ ASTM C618-2001 จึงแยกเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท คือ Class F และ Class C โดยเถ้าถ่านหิน Class F มีปริมาณ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  รวมกันได้มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ขณะที่เถ้าถ่านหิน Class C มีปริมาณของออกไซด์  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ระหว่างร้อยละ 50–70 โดยน้ำหนัก เถ้าถ่านหินบางอย่างพบว่าทั้ง Class F และ Class C จำแนกประเภทดังที่แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าถ่านหิน (ASTM C618-2001)

Chemical requirements	Class		
	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , min, %	70	70	50
Sulfur trioxide ( $\text{SO}_3$ ), max, %	4	5	5
Moisture content, max, %	3	3	3
Loss on ignition (LOI), max, %	10	6	6

หมายเหตุ : min = minimum, max = maximum

การประยุกต์ใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตที่มีความเด่นชัดเริ่มขึ้นเป็นครั้งแรก ในปี พ.ศ. 2491 เมื่อมีการสร้างเขื่อน Hungry Horse ในรัฐมอนทานา ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อต้องการลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลง

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดทางกายภาพของเถ้าถ่านหิน (ASTM C618-2001)

Chemical requirements	Class		
	N	F	C
<b>Fineness:</b>			
Amount retained when wet-sieved on 45 $\mu\text{m}$ (No. 325) sieve, max, %	34	34	34
<b>Strength activity index:</b>			
With Portland cement, at 7 days, min, percent of control	75	75	75
With Portland cement, at 28 days, min, percent of control	75	75	75
Water requirement, max, percent of control	115	105	105
<b>Soundness:</b>			
Autoclave expansion or contraction, max, %	0.8	0.8	0.8
<b>Uniformity requirements:</b>			
Density, max variation from average, %	5	5	5
Percent retained on 45- $\mu\text{m}$ (No. 325), max variation, percentage points from average	5	5	5

หมายเหตุ : min = minimum, max = maximum

การนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์สำหรับประเทศไทยเริ่มเป็นที่รู้จักแพร่หลายในประเทศไทย โดยมีการศึกษาทางวิชาการอย่างเป็นระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อนำไปใช้ในการสร้างเขื่อนปากมูลในปี พ.ศ. 2537 ก่อสร้างด้วยระบบคอนกรีตบดอัด (roller compacted concrete หรือ RCC) โดยมีสัดส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยในอัตราส่วน 1 : 2.3 หรือปูนซีเมนต์ 58 kg และเถ้าลอย 134 kg ต่อคอนกรีต 1  $\text{m}^3$  ซึ่งมีการใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะไปทั้งสิ้น 6,450 ตัน และต่อมาในต้นปี พ.ศ. 2537 ได้มีการนำเถ้าลอยมาก่อสร้างเขื่อนขุนด่านปราการชลหรือเขื่อนคลองด่าน ตั้งอยู่บ้านท่าด่าน อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก ก่อสร้างด้วยระบบคอนกรีตบดอัด (RCC) ใช้คอนกรีตก่อสร้างประมาณ  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$  โดยมีสัดส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อเถ้าลอยในอัตราส่วน 1 : 1.11 หรือปูนซีเมนต์ 90 kg กับเถ้าลอย 100 kg ต่อคอนกรีต 1  $\text{m}^3$

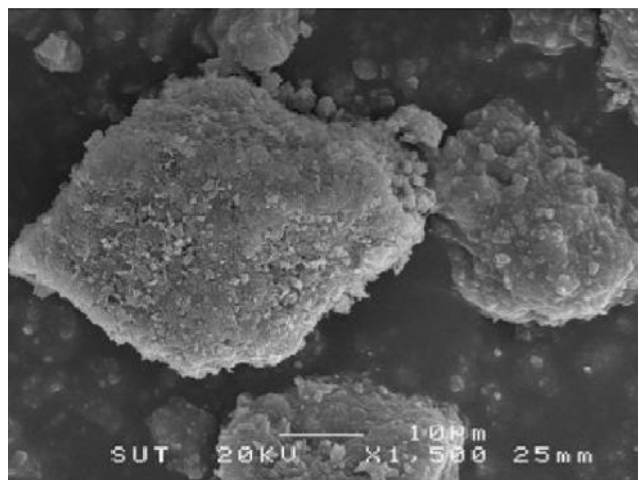
### 2.2.2 ซีโอไลต์ธรรมชาติ

ซีโอไลต์ (zeolite) เป็นแร่อะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate mineral) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอมและออกซิเจนสี่อะตอม ( $\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{AlO}_4$ ) โครงสร้างพื้นฐานเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมและมีออกซิเจนร่วมกัน ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุน ช่องว่างหรือโพรงที่เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ มีขนาดตั้งแต่ 2–10 Å (1 อังสตรอม =  $1 \times 10^{-10}$  m) นอกจากซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมและออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  เกาะอยู่อย่างหลวม ๆ และมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างของผลึก ซึ่งถ้าได้รับความร้อนโดยการต้มให้เดือด น้ำเหล่านั้นสามารถระเหยออกไปได้ การเรียกชื่อวัสดุซีโอไลต์นั้นมีที่มาคือ เซโอหรือซีโอ (zeo) มาจากภาษากรีกหมายถึง "การต้ม (boil)" และไลต์ (lite) หมายถึง "หิน (stone)"

การจำแนกชนิดของซีโอไลต์นั้นพิจารณาจาก ขนาดและรูปร่างของโพรงซีโอไลต์เป็นหลัก ซึ่งซีโอไลต์มี 2 ชนิดคือ ซีโอไลต์ธรรมชาติ (natural หรือ mineral zeolite) และซีโอไลต์สังเคราะห์ (synthetic zeolite) ซีโอไลต์แต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ที่พบตามธรรมชาติมีมากกว่า 35 ชนิด ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์มีประมาณ 100 ชนิด ซีโอไลต์ธรรมชาติประกอบด้วย Hydrated aluminosilicates ของ Alkaline และ Alkaline-earth metals ซึ่งซีโอไลต์ธรรมชาติจะมีน้ำหนักเบาและเป็นแร่ที่มีความนุ่มสื่อน้ำตาลเหลือง หรือ สีเขียวอ่อนคล้ายชอล์ก ซึ่งซีโอไลต์ธรรมชาติที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด คือ Clinoptilolite, Chabazite และ Mordenite ตัวอย่างซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด Clinoptilolite มีสูตรเคมี คือ  $\text{Na/K} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

ซีโอไลต์สังเคราะห์ (synthetic zeolite) เกิดจากการทำปฏิกิริยาพื้นฐานกับออกไซด์ต่างๆ เช่น  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ที่มีน้ำผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่มีสภาพเป็นเจล (gel) จนถึงรูปร่างที่มีรูพรุนและมีลักษณะคล้ายเม็ดทราย ได้แก่ Zeolite A, Zeolite Y, Zeolite F และ Zeolite M เป็นต้น

ปัจจุบันในต่างประเทศมีการศึกษาวิจัยและนำซีโอไลต์มาใช้ในงานคอนกรีตกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะประเทศจีนที่มีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขา มีแหล่งซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นจำนวนมาก (Feng and Peng, 2005) และยังมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับโลหะหนักจากกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย (Napia et al., 2012)



สำหรับชนิดหนึ่งนั้นจะต้องนำไปผสมกับน้ำ หรือ สารผสมเพิ่มก่อนใช้ เพื่อให้อนุภาคของนาโนซิลิกากระจายตัวที่ดี ผลจากการใช้นาโนซิลิกาเป็นวัสดุปอซโซลานผสมในคอนกรีตน้ำหนักปกติในปริมาณ 1–6 % โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมแล้วพบว่าสามารถเร่งกำลังอัดในช่วงอายุต้น (early age) ที่อายุ 7 วัน สูงถึง 88 MPa (มากกว่า 18 %) และขนาดของโพรงลดลงถึง 40 % (Said et al., 2012)

คอนกรีตน้ำหนักปกติที่ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน สามารถย่นระยะเวลาการก่อตัวระหว่าง Initial set กับ Final set ต่างกันเพียง 50 นาที คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นที่อายุ 3 วัน เท่ากับ 86.1 MPa ซึ่งสูงกว่าส่วนผสมควบคุมถึง 41% และมีกำลังรับแรงยึดเกาะที่อายุ 3 วัน สูงกว่าส่วนผสมควบคุมถึง 88% (Qing et al., 2007) นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมนาโนซิลิกายังช่วยลดการเอิ่มน้ำ (Madani et al., 2012)

### 2.3 คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า คือ ผลิตภัณฑ์ความหนาแน่นต่ำชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทรายหรือซิลิกา วัสดุปอซโซลาน และปูนขาว (lime) มีลักษณะช่องว่างเป็นเนื้อเดียวกันหรือโครงสร้างของเซลล์ (cellular structure) ด้วยช่องว่างอากาศขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.1–1 mm ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยก๊าซเคมีหรือโฟมเหลว ซึ่งโฟมได้มาจากการผลิตด้วยเครื่องกำเนิดโฟมโดยใช้สารเพิ่มฟอง ประกอบด้วยฟองอากาศซึ่งแยกออกจากกัน ทำให้ได้ช่องว่างขนาดเล็กที่ไม่ต่อเนื่องกันจำนวนมาก ส่งผลให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีน้ำหนักเบา ผิวผนังของช่องว่างหรือเซลล์สามารถทนต่อการบีบอัดหรือการทำให้แน่น และการผสมในกระบวนการผลิตคอนกรีตสด เป็นที่รู้จักกันในชื่อโฟมคอนกรีตหรือคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (CLC) ถึงแม้ว่าจะมีการพุดกันอย่างเคร่งครัดถึงความไม่เหมาะสมในปัจจุบันว่าเป็นคอนกรีตที่มักจะไม่มีมวลรวมหยาบผสมรวมด้วย การควบคุมความหนาแน่นทำได้โดยการแทนที่มวลรวมละเอียดสำหรับทั้งหมดหรือเพียงบางส่วนด้วยเซลล์อากาศ (air cell) ซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า มวลรวมหยาบน้ำหนักปกติมักจะไม่ใช่เป็นส่วนผสม แต่ทั้งมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบน้ำหนักเบา มักจะพบบ้อยในส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (ASTM C796-2004)

คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่ามีการใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกครั้งแรกเรียกว่าโฟมคอนกรีต (foam concrete) โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพเพียงพอที่จะอนุโลมให้ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับเป็นส่วนประกอบของอาคารรับแรงเบกทาน เนื่องจากสัดส่วนของช่องว่างอากาศมีปริมาณสูง การเป็นวัสดุก่อสร้างจึงมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดี โดยการควบคุมปริมาณของโฟมที่เหมาะสมหลากหลายของความหนาแน่น ( $400\text{--}1,600\text{ kg/m}^3$ ) ของเซลลูล่าคอนกรีต สามารถนำไป



ประยุกต์ใช้ทำเป็น โครงสร้างของผนังกันห้องในงานสถาปัตยกรรม ฉนวนกันความร้อนและวัสดุรองพื้นทาง ความหนาแน่นแห้ง  $1,000 \text{ kg/m}^3$  เหมาะสำหรับการใช้เป็นบล็อกผนังและความหนาแน่นแห้ง  $1,200 \text{ kg/m}^3$  เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ขึ้นส่วนสำเร็จรูปและผนังหล่อในที่ (cast in-situ) ข้อได้เปรียบของวัสดุรูพรุน คือ มีน้ำหนักบรรทุกคงที่ต่ำประมาณหนึ่งในสามของโครงสร้างเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป การปรับแต่งการกระจายช่องว่างของอากาศดังที่กล่าวมาในข้างต้นเหมือนจะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ เช่น กำลังรับแรงอัด และ ความหนาแน่นเปลี่ยนไปได้ตามวัตถุประสงค์ความต้องการของการใช้อาคาร

ถึงแม้ว่าวัสดุมวลเบาได้มีการจดสิทธิบัตรครั้งแรกในปี 1923 ซึ่งการก่อสร้างโดยใช้วัสดุถึงโครงสร้าง (semi-structural) น้ำหนักเบาที่ว่ามีเพิ่มขึ้นตามลำดับอย่างต่อเนื่องในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา และได้มีผู้นำเสนอวิจารณ์บทความเป็นครั้งแรกเกี่ยวกับองค์ความรู้ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า โดย Valore ในปี ค.ศ. 1954 สรุปลงข้อประกอบ คุณสมบัติและการใช้คอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าโดยไม่ได้กล่าวถึงวิธีการวัดขนาดของโครงสร้างเซลล์ ต่อมา Jones and Mc Carthy (2005) มีการศึกษาความเป็นมาประวัติเรื่องราวของการใช้โฟมคอนกรีตเกี่ยวกับส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ คุณสมบัติ และรวมถึงการประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างจากบาง โครงการที่กำลังได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในสมัยนั้น

## 2.4 ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

### 2.4.1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (type-I Portland cement หรือ OPC) มักใช้เป็นสารยึดประสานหลักสำหรับ CLC อย่างไรก็ตามปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทแข็งตัวเร็ว (type III) ก็สามารถใช้ได้ และปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตดูเหมือนจะยังไม่เคยมีหลักฐานปรากฏการใช้ให้เห็นว่าทำไมไม่สามารถใช้ได้ ปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมดสำหรับ CLC มักจะไม่อยู่ในระหว่าง  $300\text{--}400 \text{ kg/m}^3$  แต่อาจสูงถึง  $500 \text{ kg/m}^3$  ซึ่งมีปริมาณการใช้มากกว่าคอนกรีตกำลังสูงทั่วไป ตามที่ Jones and Mc Carthy (2005) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงอัดของ CLC พบว่าปริมาณปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ใช้สูงถึง  $500 \text{ kg/m}^3$  เป็นอย่างต่ำ

### 2.4.2 น้ำ

น้ำ (water) ที่ใช้สำหรับโฟมคอนกรีตควรเป็นน้ำสะอาด หรือน้ำประปา โดยทั่วไปมักดื่มได้เช่นเดียวกับน้ำผสมคอนกรีตปกติ นั่นเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเมื่อใช้สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีน

(protein-based foaming agent) เพราะการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในน้ำนั้นสามารถส่งผลกระทบต่อคุณภาพของโฟมคอนกรีตและคอนกรีตที่ผลิตได้

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่ต้องการสำหรับส่วนผสมพื้นฐานที่จำเป็นเพื่อให้คอนกรีตสามารถทำงานได้อย่างเพียงพอขึ้นอยู่กัประเภของวัสดุยึดประสานหรือวัสดุเชื่อมประสาน (binder) ซึ่งคอนกรีตต้องมีความแข็งแรงโดยที่ไม่ต้องใช้สารลดน้ำหรือสาร Plasticizing ช่วยแต่อย่างใด ส่วนใหญ่ค่า w/c จะอยู่ระหว่าง 0.4–0.8 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเม็ดวัสดุยึดประสาน เช่น ซีลิก้าฟูมจะมีความต้องการน้ำมากกว่าเถ้าลอย เนื่องจากซีลิก้าฟูมมีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าเถ้าลอย ดังนั้นค่า w/c ที่ใช้จะต้องสูงกว่าเถ้าลอย ขณะที่ความสามารถเทได้เท่ากันและการทำให้ค่า w/c ต่ำลงทั้งที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนั้นเป็นสิ่งที่ปรารถนา กัน โดยอาจใส่สารผสมเพิ่มจำพวก Superplasticizer ช่วยได้

การที่มีปริมาณน้ำในส่วนผสมอย่างไม่เพียงพอที่จะรับประกันว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะถูกแย่งจากโฟมและอาจนำไปสู่การล่มสลายของฟองอากาศได้ การนำโฟมคอนกรีตไปประยุกต์ใช้งานใด ๆ ก็ตาม ในขณะที่การใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงนั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อความพรุน (porosity) ของโฟมคอนกรีตแต่อย่างใด และขณะที่คอนกรีตยังอยู่ในสภาพสดอยู่นั้นก็ไม่ปรารถนาที่จะให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว (segregation) หรือมีการหดตัวแห้งมากขึ้นหลังจากคอนกรีตแข็งตัวแล้ว

### 2.4.3 สารเพิ่มฟอง

สารเพิ่มฟอง (foaming agent) จัดเป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactants) ชนิดหนึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์ (synthetic) และชนิดโปรตีน (protein-based) สามารถนำมาใช้ในการผลิตเป็นโฟม เนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการย่อยสลายโดยแบคทีเรียและสิ่งมีชีวิตอื่น สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีนในธรรมชาติ เช่น กรดไขมันของสบู่ (fatty acid soap) ซึ่งไม่ค่อยได้รับความนิยมในการผลิตเป็นโฟมคอนกรีตสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา อย่างไรก็ตามการวิจัยเกี่ยวกับการใช้สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีนเพื่อพัฒนาความแข็งแรงสูงเพื่อเป็นการยกระดับของโครงสร้างโฟมคอนกรีตให้สูงขึ้นอีก องค์ประกอบทางเคมีของสารลดแรงตึงผิวต้องมีความมั่นคงในสภาพแวดล้อมที่เป็นด่างของคอนกรีต (pH = 12.5 โดยประมาณ) เพราะว่สารลดแรงตึงผิวทั้งหมดมีความอ่อนไหวง่ายต่อการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการเก็บรักษาสารลดแรงตึงผิวดังกล่าวควรปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตโดยเคร่งครัด (Rieger, 1996) นั้นมีความหลากหลายของสารลดแรงตึงผิวที่มีอยู่และในขณะที่การเลือกสารลดแรงตึงผิวให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจาะจงประยุกต์ใช้จึงเป็นเรื่องยากที่จะพิสูจน์ความถูกต้อง ด้วยเหตุนี้ก่อนจะใช้สาร

เพิ่มฟองจึงควรมีความรอบคอบที่จะดำเนินการทดลองผสมก่อนนำไปใช้กับงานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานจริงที่มีปริมาณมาก (large scale)

### 2.4.3.1 ชนิดสังเคราะห์

สารลดแรงตึงผิวชนิดสังเคราะห์ (synthetic surfactant) สามารถจำแนกตามลักษณะของกลุ่มพวก Hydrophilic ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโมเลกุลที่สามารถละลายในน้ำได้

1) ชนิดอออนลบ (anionic) ประมาณ 70% ของสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในการผลิตโฟมคอนกรีต ซึ่งเป็นชนิดประจุลบ โดยส่วนหนึ่งของโมเลกุล Hydrophilic เหล่านี้ทำหน้าที่เป็นประจุลบ

2) ชนิดอออนบวก (cationic) น้อยกว่า 5% ของสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในการผลิตโฟมคอนกรีต ซึ่งเป็นชนิดประจุบวก โดยกลุ่ม Hydrophilic มีกำลังผลักดันทำหน้าที่เป็นประจุบวก

3) ชนิดไม่มีอออน (non-ionic หรือไม่มีขั้ว) ประมาณ 25% ของสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในการผลิตโฟมคอนกรีต ซึ่งเป็นชนิดไม่มีขั้วและมีความเป็นกลางทางอำนาจไฟฟ้า (electrically neutral) การปราศจากประจุไฟฟ้า (electric charge) นี้จะทำให้มีเสถียรภาพ (stability) มากขึ้นสำหรับเป็นประโยชน์ต่อขั้นตอนการผสมคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพ

4) ชนิดสองประจุ (amphoteric หรือ zwitterionic) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมในการผลิตโฟมคอนกรีตเท่าใดนัก เนื่องจากขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลายที่โมเลกุลนั้นสามารถรักษาไว้ทั้งประจุบวกหรือลบหรือทั้งสองประจุ กล่าวคือถ้าคอนกรีตมีความเป็นด่าง ( $\text{pH} > 7$ ) สารลดแรงตึงผิวมีแนวโน้มที่จะเป็นประจุลบ ในทางตรงกันข้ามถ้าคอนกรีตมีความเป็นกรด ( $\text{pH} < 7$ ) ประจุของสารลดแรงตึงผิวมีแนวโน้มที่จะเป็นขั้วบวกได้เช่นกัน

ลักษณะของสารเคมีดังที่ได้กล่าวมาในขั้นต้นเป็นพื้นฐานและหน้าที่ที่มีความหลากหลาย ในปัจจุบันผลกระทบของลักษณะของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อคุณสมบัติของโฟมคอนกรีตส่วนใหญ่ยังไม่รู้จัก และบางครั้งการใช้สารลดแรงตึงผิวยังอาจได้รับการคัดสรรด้วยพื้นฐานที่มาจากความมากในประสิทธิภาพก็เป็นได้ ประสิทธิภาพของการทำงานของสารลดแรงตึงผิวประเภทต่าง ๆ อาจมีความสามารถแตกต่างกันด้วยชนิดของสารยึดประสานที่ใช้ แม้ว่าอนุภาคของเม็ดซีเมนต์ซึ่งเป็นที่รู้กันว่าพื้นผิวของอนุภาคของซีเมนต์มีทั้งประจุบวกและลบ เมื่อมีการนำวัสดุต่าง ๆ มาผสมกันจึงมีแนวโน้มที่จะกลายเป็นการลบล้างประจุโดยการใส่เกลือลง ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีอออน (non-ionic) หรือ Amphoteric อาจจะมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อนำไปใช้

กับโพลีเมอร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทราย ขณะที่สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเดี่ยว (single charge) อาจมีความเหมาะสมมากสำหรับโพลีเมอร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเกลือเป็นส่วนผสม

#### 2.4.3.2 สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีน

สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิวหนึ่งส่วนต่อสัดส่วนน้ำ 5–40 เท่า อัตราส่วนที่ใช้ให้ได้รับประสิทธิภาพสูงสุดโดยทั่วไปเท่ากับ 1 : 25 แต่ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือบทบาทการทำงานของประเภทสารลดแรงตึงผิวและผลผลิตที่ได้รับ อัตราส่วนในการพิจารณาโดยคำนึงถึงความเข้มข้นของ Micelle ของโพลีเมอร์เป็นสำคัญ สารลดแรงตึงผิวคือฟองน้ำ (foam) ความขึ้นเหลวคล้ายกับของโพลีเมอร์โกนหนวด (shaving foam) และความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 20–90 kg/m<sup>3</sup>

ความหนาแน่นโพลีเมอร์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้ความหนาแน่นของโพลีเมอร์ที่ผลิตด้วยสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ชนิดโปรตีน (protein-based) มักจะประมาณ 50 kg/m<sup>3</sup> สารเพิ่มฟองชนิดโปรตีนมีขนาดฟองที่เล็กและมีความเสถียรภาพมากกว่า นอกจากนี้การเกิดการระคายน้ำออกจากโพลีเมอร์เกิดขึ้นน้อยและมีโครงสร้างรูพรุนปิด (closed pore structure) ที่แข็งแรง ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวชนิดโปรตีนจึงอาจเหมาะสมมากในการผลิตโพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูงและมีความแข็งแรงสูง (Kearsley and Wainwright, 2002)

## 2.5 โครงสร้างจุลภาค

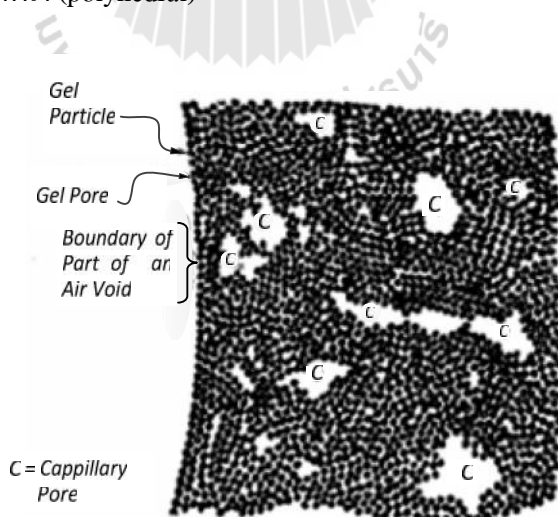
### 2.5.1 โครงสร้างของโพรง

โครงสร้างของโพรง (pore structure) ของคอนกรีตมวลเบาประกอบด้วย โพรงเจล (gel pore) โพรงคาпилลารี (capillary pore) และช่องว่างอากาศ (air-void) โดยโพรงคาпилลารีอาจแบ่งย่อยออกเป็นสองส่วนคือโพรงคาпилลารีขนาดปานกลางกับขนาดใหญ่ ซึ่งช่องว่างอากาศเหล่านี้ อาจเกิดจากการกักฟองอากาศ (air entrained) หรือเกิดจากการเทคอนกรีต (entrapped pore) รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพของโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่ขอบเขตของช่องว่างอากาศอันหนึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าช่องว่างอากาศมักจะมีระดับขนาดใหญ่กว่าโพรงคาпилลารีและโพรงเจล รูปที่ 2.5 ยังแสดงให้เห็นส่วนที่เป็นของแข็งของเม็ดซีเมนต์เจลไฮเดรต (hydrated cement gel) ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำแล้ว ซึ่งเห็นเป็นภาพทรงกลมสีดำที่ขนาดเล็ก ส่วนช่องว่างที่อยู่ระหว่างทรงกลมสีดำที่คือโพรงเจล พื้นที่ว่างของโพรงคาпилลารีเป็นส่วนหนึ่งของปริมาณทั้งหมดที่ยังไม่ได้รับการ

เติมเต็มด้วยผลิตภัณฑ์ของไฮเดรชัน ซึ่งพื้นที่ว่างเปล่าแต่เดิมนั้นเต็มไปด้วยน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของเม็ดอนุภาคซีเมนต์

โพรงเจลและโพรงคาปิลลารีขนาดปานกลางจะไม่มีอิทธิพลต่อกำลัง (strength) ของโพลีคอนกรีต แต่โพรงเหล่านี้จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการคืบ (creep) และการหดตัว (shrinkage) ส่วนโพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่และโพรงขนาดใหญ่พิเศษอื่น ๆ มีผลสำหรับการลดลงของกำลังและความยืดหยุ่น (elasticity) และการซึมผ่าน (permeability) ในลักษณะคล้ายกันกับโครงสร้างโพรงของคอนกรีตมวลเบาชนิดอบไอน้ำ (autoclaved aerated concrete) จำแนกเป็น 1) Micro-capillaries มีขนาด  $<50 \text{ nm}$  2) Macro-pores มีขนาด  $>50 \text{ nm}$  ถึง  $50 \text{ }\mu\text{m}$  เกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของก้อนคอนกรีตที่ได้จากการเติมอากาศและโพรงขนาดไมโคร (micro-pore) ซึ่งปรากฏอยู่ในผนังเซลล์ระหว่างโพรงขนาดใหญ่ (macro-pore) และ 3) Artificial air-pore มีขนาด  $>50 \text{ }\mu\text{m}$  ซึ่งถูกกักอยู่ในเนื้อคอนกรีต (inter cluster) และอยู่ระหว่างโพรงของอนุภาคหรือ Inter particle (Narayanan and Ramamurthy, 2000)

รูปร่างของโพรงเจลมักจะแสดงให้เห็นเป็นทรงกระบอกที่บางและแบน (platy) อย่างไรก็ตามรัศมีทางกลศาสตร์ยังสามารถเป็นตัวแทนของโพรงเจล รูปร่างของโพรงคาปิลลารีเป็นทรงกระบอกเช่นเดียวกันแต่มีพฤติกรรมการหดตัวและขยายใหญ่ขึ้นเล็กน้อยตามแนวความยาวของกลุ่มโพรงคาปิลลารีร่วมด้วย (Cebeci, 1981) ในขณะเดียวกันรูปทรงของช่องว่างอากาศเป็นรูปทรงกลมหรือทรงกลมหลายหน้า (polyhedral)



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองอธิบายโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เฟสส์ (Powers and Helmut, 1953)

### 2.5.2 คุณสมบัติของโครงสร้างจุลภาค

คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่นแห้ง ความพรุนและปริมาณน้ำ เช่นเดียวกับอายุการบ่มมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของโครงสร้าง แต่สิ่งสำคัญคือ โครงสร้างจุลภาคเหล่านี้มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของโพมคอนกรีตหรือไม่ ความพรุนและความหนาแน่นสามารถได้รับผลกระทบจากช่องว่างอากาศขนาดเล็กจำนวนมากหรือช่องว่างอากาศขนาดใหญ่จำนวนน้อยในส่วนผสม ดังนั้นโครงสร้างของช่องว่างอากาศอาจมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเหล่านี้

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตปกติจะปรากฏอยู่ไม่มากในองค์ประกอบทางเคมี เช่นเดียวกับโครงสร้างทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และสัดส่วนปริมาตรสัมพัทธ์ของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือการปรากฏความบกพร่อง ซึ่งไม่ต่อเนื่องและโพรงนั้นที่มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต

Olorunsogo (1998) ศึกษาโครงสร้างของโพรงของวัสดุยึดประสาน ที่ได้พิสูจน์โดยความพรุนของโพรงหมายถึงรัศมีและการกระจายขนาดโพรงเป็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคหรือไมโคร (microstructure) อย่างมีความหมายมาก เนื่องจากโพรงมีอิทธิพลต่อกำลังของวัสดุ คุณสมบัติส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับ การกระจายของโพรงภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเตรียมส่วนผสมที่แตกต่างกัน (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ การกระทุ้งหรือทำคอนกรีตให้แน่น) เช่นเดียวกับสภาวะในการบ่ม (เวลา อุณหภูมิและความชื้น) และชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ล้วนเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อโพรงเจลและโครงสร้างของโพรงคาปิลลารีของซีเมนต์เพสต์

Rö ler and Odler (1985) ได้ให้ความสัมพันธ์หรือเทียบเคียงกันระหว่างกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วกับการกระจายตัวของโพรงเจลและโพรงคาปิลลารี ดังสมการที่ 2.4

$$f_c = f_o - aP_{<10nm} - bP_{10-100nm} - cP_{>100nm} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$f_c$  = Compressive strength

$f_o$  = Strength at zero capillary porosity

$P_{<10nm}$  = Volume of pores with radii  $r < 10$  nm (%)

$P_{10-100nm}$  = Volume of pores with radii  $r = 10-100$  nm (%)

$P_{>100nm}$  = Volume of pores with radii  $r > 100$  nm (%)

ผลความสัมพันธ์ที่แสดงแม้ว่าบางส่วนของค่าคงที่นั้นมีค่าเป็นลบ ซึ่งบ่งบอกเป็นนัยถึงความหมายว่าเกิดขัดแย้งที่ความพรุนเพิ่มขึ้นแต่กำลังสูงขึ้นนั้น นี้สามารถอธิบายได้ด้วยความจริงที่ว่า เป็นเพราะปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นได้มีการพัฒนาต่อเนื่องไปเป็นจำนวนมากจนโพรงมีขนาดเล็กลง ตามผลที่ได้รับสำหรับที่มีอายุการบ่มที่แน่นอนบางช่วงขนาดเล็กปรากฏเพิ่มขึ้นและเนื่องจากมีจำนวนมากขึ้นของรูปแบบ (phase) ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งมีความแข็งแรงสูงเกินไป เป็นเพราะเหตุที่ว่า Atzeni (1987) ใช้วิธีการที่แตกต่างกันสำหรับคำนึงถึงผลกระทบของการกระจายโพรงโดยการเทียบเคียงกับกำลังด้วยพารามิเตอร์หนึ่งชื่อ รัศมีการกระจายเฉลี่ย (mean distribution radius) ที่กำหนดไว้ดังสมการที่ 2.5

$$\ln r_m = \frac{\sum V_i \ln r_i}{\sum V_i} \quad (2.5)$$

เมื่อ

$r_m$  = Mean distribution radius

$V_i$  = Volume of pore

$r_i$  = Radius of pore

การที่  $r_m$  ลดลงและกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในลักษณะค่อยเป็นค่อยไป ณ จุดแรกและแล้วทันใดข้างต้นของ 10 นาโนเมตร ลักษณะการกระจายตัวของโพรง ( $r_m$ ) ไม่ให้ความสัมพันธ์ที่เพียงพอของคุณสมบัติของกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว เพราะฉะนั้น Atzeni (1987) จึงได้รวมเอา Total porosity ( $P$ ) และ Strength at zero porosity ( $\sigma_0$ ) เข้าด้วยกัน ตามคำจำกัดความที่ว่ากำลังรับแรงอัดนั้นสัมพันธ์กับความพรุน ที่มีพารามิเตอร์การกระจายของโพรง ( $r_m$ ) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งนำไปสู่ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.6

$$\dagger = K \frac{\dagger_0(1-P)}{(r_m)^{0.5}} \quad (2.6)$$

กำลังรับแรงอัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพารามิเตอร์ซึ่งส่วนหนึ่งประกอบด้วยโพรงเจลและโพรงคาปีลลารี, รัศมีการกระจายเฉลี่ย (mean distribution radius) ของโพรงเหล่านี้และลักษณะกำลังของซีเมนต์เพสต์

Cebeci (1981) ศึกษาผลกระทบของการกักกระจายฟองอากาศต่อโครงสร้างโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว พบว่าฟองอากาศที่กักกระจาย (air-entraining) นั้น นำไปสู่ช่องว่างอากาศขนาดใหญ่และไม่เปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างโพรงขนาดละเอียดจำนวนมากของซีเมนต์

เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว Kearsley and Wainwright (2002) พบว่าที่ความพรุนสูง (ความหนาแน่นตามเป้าหมายต่ำ) ของโฟมคอนกรีตคำนวณความพรุนซีเมนต์เพสต์ได้สูงกว่าความพรุนของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีโฟม ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ว่าน้ำบางส่วนที่เพิ่มให้กับส่วนผสมเป็นส่วนหนึ่งของโฟมที่เพิ่มให้ประสิทธิภาพของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานมีการเปลี่ยนแปลงต่อโครงสร้างเจลและโพรงคาปิลลารีของเพสต์ล้อมรอบช่องว่างอากาศที่กักกระจาย สามารถสันนิษฐานได้ว่าโครงสร้างเจลและโพรงคาปิลลารีเช่นเดียวกับโครงสร้างโพรงอากาศจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของโฟมคอนกรีต

โครงสร้างโพรงอากาศของโฟมคอนกรีตสำหรับขอบเขตของการพิสูจน์นี้ระบุว่าเป็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่สำคัญมากและวิธีการวิเคราะห์ด้วยภาพ (image analysis) ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่สาม

## 2.6 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 การใช้วัสดุปอซโซลานในคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

#### 2.6.1.1 เถ้าลอย

เถ้าลอย (fly ash) มักจะใช้เป็นส่วนผสมในโฟมคอนกรีตในระดับที่สูงถึง 80% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์เพื่อเป็นการลดต้นทุน เพิ่มความสามารถเทได้และเพิ่มความแข็งแรงในระยะยาวของโฟมคอนกรีต (Kearsley and Wainwright, 2002) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อหล่อคอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำ และจะเป็นการลดอัตราผลลัพท์ของความแข็งแรงจากการเพิ่มปริมาณในส่วนผสมของเถ้าลอย เพราะเถ้าลอยมีความละเอียดที่เพิ่มขึ้นด้วยเหตุนี้จึงมีพื้นที่ผิว (surface area) มาก สำหรับความสามารถเทได้เท่ากัน (equivalent workability) ของโฟมคอนกรีตทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยจะมีความต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมทรายจำนวนหนึ่ง

Kearsley and Wainwright (2001) ได้รายงานเกี่ยวกับผลกระทบของเถ้าลอยต่อคุณสมบัติของโฟมคอนกรีตและการวิจัยเมื่อเร็ว ๆ นี้แสดงให้เห็นว่านอกจากจะเป็นการเพิ่มกำลังในช่วงอายุปลายแล้ว เถ้าลอยยังมีอิทธิพลทำให้การมีโครงสร้างของฟองที่สม่ำเสมอมากขึ้นในซีเมนต์เพสต์ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างทางวิศวกรรมของคอนกรีต

Jones and Mc Carthy (2005) ได้รายงานเกี่ยวกับการใช้ประเภทของเถ้าลอยแทนที่ทรายและวิธีการนี้ได้มีผลกระทบต่อความข้นเหลว (rheological) หรือการไหล มีการพัฒนาทางด้านกำลังรับแรงอัดและการซึมผ่านและคุณสมบัติความทนทาน (durability) นี้ไม่เพียงช่วยให้เถ้า (ash) ที่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ ยังเป็นการช่วยลดการพึ่งพาแหล่งมวลรวมหลักและช่วยในการ



พัฒนาการที่ยั่งยืนมากขึ้นกับคอนกรีต การใช้เถ้าลอยในโม่คอนกรีตยังได้ประโยชน์ในการพัฒนาทางด้านกำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังจากอายุ 28 วัน โม่คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเม็ดหยาบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นถึง 6 เท่า ซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบเท่าโม่คอนกรีตที่ผสมทราย และภายหลังจากอายุบ่ม 28 วัน ไปจนถึงอายุ 180 วัน โม่คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยบ่มโดยปิดผนึก (sealed-cured) ยังมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอีกถึง 2.5 เท่า

### 2.6.1.2 ซีโอไลต์ธรรมชาติ

Hull (1996) พบว่าผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบา นั้นมีประโยชน์ดังตัวอย่างเช่น การทำเป็นบล็อก แผ่นผนัง พื้น และหลังคา ซึ่งใช้ซีโอไลต์เป็นส่วนประกอบหลักปริมาณของซีโอไลต์ในวัสดุยึดประสานของผลิตภัณฑ์มีเกินกว่า 50% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องผ่านการบำบัด (non-treated) หรือการเผา (calcined) ณ อุณหภูมิหนึ่งที่จะช่วยให้กระตุ้นพื้นผิวของซีโอไลต์และส่งผลต่อพลังงานพื้นผิวสูง (high surface energy) ด้วยเหตุนี้ซีโอไลต์ที่ได้รับการบำบัดจะสามารถทำงานได้ทั้งวัสดุที่มีความเป็นปอซโซลาน (pozzolanic material) และสารเพิ่มฟองหรือสารสร้างฟอง (bubble-generating agent) สารผสมเพิ่มกำลังหรือความแข็งแรงมักจะใช้ในการปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของผลิตภัณฑ์ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังเป็นวัสดุยึดประสานที่มีประโยชน์สำหรับการรักษาเสถียรภาพของเสี้ยนที่เป็นอันตรายได้

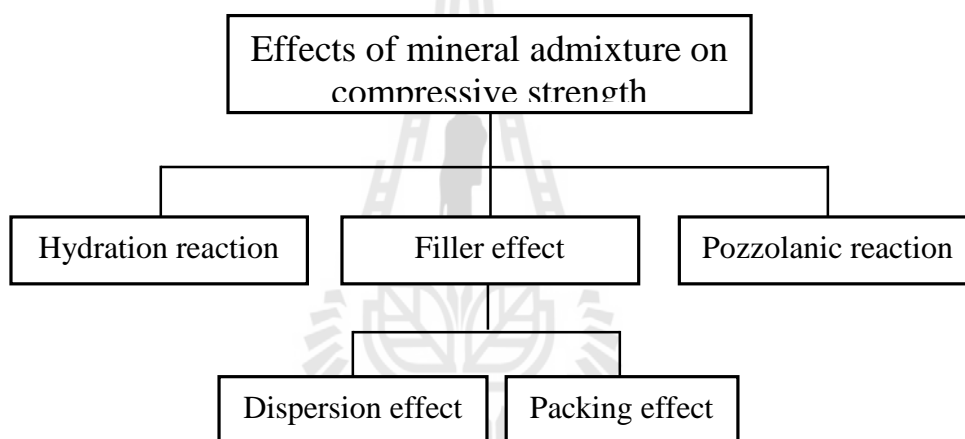
Albayrak et al. (2007) ได้รายงานเกี่ยวกับผลกระทบของการใช้ซีโอไลต์เป็นวัสดุซิลิกาแทนที่ทรายในคอนกรีตมวลเบาชนิดอบไอน้ำ XRD patterns ของตัวอย่างที่ผ่านการบำบัดหรือเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 100–800 °C พบว่าความเข้มสูงสุดของ Clinoptilolite มีค่าลดลงเนื่องจากการหดตัวของโครงสร้างและการยุบลงด้วยความร้อน (thermal collapse) ของโครงสร้างที่ 800 °C ซีโอไลต์สามารถใช้เป็นส่วนผสมแทนที่ทราย Quartzite บางส่วนของคอนกรีตมวลเบาชนิด AAC และพบว่าให้กำลังคล้ายกับ AAC ทั่วไป ด้วยการที่ความหนาแน่นรวมมีค่าเพิ่มขึ้นของคอนกรีตมวลเบาชนิด AAC กำลังรับแรงอัดของวัสดุเหล่านี้จึงเพิ่มขึ้นตามเป็นสัดส่วนกัน

Karakurt et al. (2010) ได้ศึกษาการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติในการผลิตคอนกรีตมวลเบาชนิดอบไอน้ำ ใช้เป็นมวลรวมแทนที่ทรายซิลิกาและเป็นสารสร้างฟอง (bubble-generating agent) ผลการวิจัยพบว่า การแทนที่ของทรายซิลิกาด้วยซีโอไลต์นั้นทำให้สามารถลดหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาลง อย่างไรก็ตามการใช้ซีโอไลต์ละเอียดเปรียบเทียบกับตัวอย่างซีโอไลต์หยาบทำให้มีความต้องการในการใช้น้ำของส่วนผสมเพิ่มขึ้นเนื่องจากซีโอไลต์ละเอียดมีพื้นที่ผิวสูง คอนกรีตมวลเบา AAC ที่ผลิตด้วยซีโอไลต์เม็ดหยาบแสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ดีกว่าตัวอย่างควบคุม ถึงแม้จะพบว่าปริมาณแทนที่ที่เหมาะสมคือใช้ซีโอไลต์ชนิดเม็ด

หยาบ 50% ถูกเพิ่มเข้าไปในสูตรคอนกรีต นอกจากนี้ปริมาณซีโอไลต์หยาบต่ำสุด 25% และสูงสุดถึง 75% ก็ยังเป็นที่ยอมรับว่าสามารถใช้ได้ดีเช่นกัน

### 2.6.2 ผลของวัสดุปอซโซลานที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

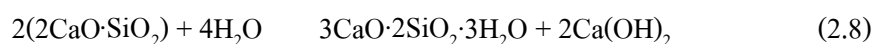
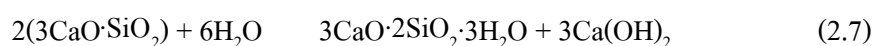
เมื่อวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอยหรือเถ้าเชื้อเพลิง (pulverized fuel ash) ซีโอไลต์ธรรมชาติ ใช้ในการแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ คุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงอัด ช่องว่างขนาดเล็ก และความสามารถเทได้ของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าถูกปรับปรุงด้วยเหตุปัจจัยสามประการด้วยกันคือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดแทรกและปฏิกิริยาปอซโซลาน แสดงเป็นแผนผังดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนผังจำแนกผลกระทบของแร่ธาตุผสมเพิ่มต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า (Cyr et al., 2006)

#### 2.6.2.1 ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาเคมีของสารประกอบซีเมนต์ล้วนได้อธิบายโดย Mindress and Young (1981) ดังสมการต่อไปนี้



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{C}_3\text{S}$ ) และ ไคแคลเซียมซิลิเกต ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{C}_2\text{S}$ ) ได้ผลิตผลเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrates หรือ C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide หรือ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ซึ่ง C-S-H เป็นผลผลิตหลักของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดย C-S-H มีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นและทำให้สามารถรับกำลังได้ตามลำดับ

### 2.6.2.2 ผลของการอัดตัวของอนุภาค

ผลของการอัดตัวของอนุภาค (filler effect) คือการจัดเรียงที่เหมาะสมของอนุภาคขนาดเล็กที่จะเติมช่องว่างและก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดโดยปราศจากปฏิกิริยาทางเคมีใด ๆ (Tangpagasit et al., 2005; Chindaprasirt et al., 2011; Jaturapitakkul et al., 2011) ผลลัพธ์เหล่านี้สืบเนื่องมาจากการกระจายตัว (dispersion) และการอัดแน่น (packing) ที่ดีของตัววัสดุปอซโซลานเอง เมื่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกแทนที่บางส่วนโดยอนุภาคของแก้วที่มีขนาดเล็ก ตรงนั้นจะมีการกระจายตัวของอนุภาคซีเมนต์ให้สัมผัสกับน้ำได้เป็นอย่างดี ดังนั้นซีเมนต์และน้ำจึงสามารถที่จะเร่งให้ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันและทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ผลของการอัดแน่นคือการแสดงถึงอนุภาคขนาดเล็กนั้นที่เติมเต็มช่องว่างของซีเมนต์เพสต์เพื่อให้เกิดการอัดตัวอย่างหนาแน่น (denser) ขึ้นภายในอนุภาคของวัสดุและทั่วถึงกันในลักษณะแบบ Matrix phase (Isaia et al., 2003; Cyr et al., 2006; Sata et al., 2010)

Jaturapitakkul et al. (2011) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการอัดแทรกของอนุภาครายที่มีขนาดที่แตกต่างกันต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่บางส่วนด้วยทรายแม่น้ำที่ผ่านการบดละเอียดคัดขนาด ซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ (Kiattikomol et al., 2000) ผลแสดงว่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่ประกอบด้วยวัสดุเฉื่อยเกือบจะคงที่และไม่ขึ้นอยู่กับการบดละเอียดของมอร์ต้า นอกจากนี้ยังพบว่ามอร์ต้าที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีความเฉื่อยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ที่มีอนุภาคเล็ก มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่ามอร์ต้าควบคุม (control mortar) อยู่ระหว่าง 2.7%–5.8%

### 2.6.2.3 ผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) คือปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารตั้งต้นกับซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินาไตรออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ ซิลิกาฟูม และซีโอไลต์ เป็นต้น ผลที่ได้จาก

ปฏิกิริยาปอซโซลานคือได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ทำให้กำลังแก่คอนกรีตเช่นเดียวกับ C-S-H จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารตั้งต้นสารประกอบ C-S-H และ C-A-H นอกจากนี้จะช่วยเพิ่มกำลังให้กับคอนกรีตแล้ว ยังช่วยทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของเม็ดซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตลดลง (Goldman and Bentur, 1993; Gopalan, 1993; Kiattikomol et al., 2000; Isaiya et al., 2003)

Billong et al. (2011) ศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์ผสมดินขาวเกาลีนิ (metakaolin) ซึ่งพบว่าซิลิกาออสันฐานทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  เพื่อสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต การเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 2.9 และ 2.10



Poon et al. (2001) ได้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของดินขาวเกาลีนิ (metakaolin) ในซีเมนต์เพสต์ ซึ่งพบว่าปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ในซีเมนต์เพสต์ปรากฏให้เห็นระดับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ในขณะที่  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ถูกใช้ไปในซีเมนต์เพสต์ผสมซึ่งสัมพันธ์กับระดับของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน นอกจากนี้ดินขาวเกาลีนิยังสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สูงกว่าเถ้าลอยเนื่องจากพื้นที่ผิวที่สูงของดินขาวเกาลีนิ ผลลัพธ์ที่ได้นี้คล้ายกับการศึกษาโดย Chindaprasirt et al. (2007) ที่พบว่าปูนซีเมนต์ผสมที่ใช้เถ้าลอยคัดขนาด (classified) แสดงให้เห็นว่า  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ผสมที่ใช้เถ้าลอยของเดิมที่ไม่ได้คัดขนาด นี่ก็สาเหตุที่ความละเอียดสูงซึ่งมีพื้นที่ผิวมากทำให้ซิลิกาและสารประกอบอลูมินามีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่าเถ้าลอยของเดิม ดังนั้นปูนซีเมนต์ผสมจึงกลายเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นและส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นทึบ (dense) ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันได้ว่าวัสดุปอซโซลานเม็ดละเอียดก่อให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่มากขึ้นและปล่อยให้อนุภาคเถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก (fill) ช่องว่างของมอร์ต้า ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด (Isaiya et al., 2003) ปัจจัยที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดีของวัสดุปอซโซลานคือการมีปริมาณคาร์บอน (carbon) ต่ำและปริมาณ ออสันฐานที่สูงของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ )

จากการทบทวนวรรณกรรมวิจัยจำนวนมากได้รายงานว่าวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนและกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้า นั้นมีสาเหตุมาจาก 3 ปัจจัยหลักด้วยกันคือ ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัว และปฏิกิริยาปอซโซลาน อย่างไรก็ตาม

ตามอิทธิพลของแต่ละสามปัจจัยที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมพิเศษเหล่านี้ยังไม่ได้กำหนดไว้ดี (well defined)

### 2.6.3 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

เมื่อมีการออกแบบส่วนผสมของโฟมคอนกรีต ความหนาแน่นที่ต้องการตามเป้าหมายจะต้องมีความแม่นยำและความหนาแน่นเชิงของส่วนผสมเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสม (Kearsley and Wainwright, 2001) ความหนาแน่นจึงถูกกำหนดด้วยคุณสมบัติทางกายภาพเป็นสำคัญที่ควรจะต้องได้รับการตรวจสอบ เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติของโครงสร้างของโฟมคอนกรีตคุณสมบัติเหล่านี้ต้องได้รับการระบุไว้

#### 2.6.3.1 กำลังรับแรงอัด

ความแข็งแรงหรือกำลัง (strength) ความทนทาน (durability) ความไม่ซึมผ่าน (impermeability) และเสถียรภาพของปริมาตรเป็นสิ่งสำคัญที่สุดต่อคุณลักษณะ โครงสร้างของคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดมักจะถูกยกให้เป็นตัวชี้วัดในคุณภาพของคอนกรีตโดยภาพรวม และเกี่ยวข้องโดยตรงกับโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ (Neville and Brooks, 1990) ดังนั้นในส่วนอื่น ๆ ของการศึกษานี้จึงทดสอบเกี่ยวกับกำลังรับแรงอัดเท่านั้น โดยจะใช้คุณสมบัติโครงสร้างจุลภาคเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของคอนกรีตมวลเบา CLC

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา CLC ขึ้นอยู่กับลักษณะปัจจัยพื้นฐานของส่วนผสมและสารเพิ่มฟองที่ใช้ ซึ่งมีดังนี้

##### 1) ความหนาแน่นของส่วนผสม (density of mix)

จากผลการศึกษาในรูปที่ 2.7 จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตมีการลดลงตามความหนาแน่นของคอนกรีตที่ลดลง สำหรับส่วนประกอบของส่วนผสมที่คล้ายกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังควรจะเป็นไปอย่างพอสสมเหตุ เพราะว่าส่วนประกอบของโฟมคอนกรีตสามารถแปรผันตามความหนาแน่นได้อย่างหลากหลาย กำลังหรือคุณภาพของโฟมคอนกรีตจึงไม่มีทางอื่นที่จะเป็นสิ่งที่ชี้แนะ (indicator) ที่น่าเชื่อถือได้เท่ากับค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

##### 2) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ผลของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดดูเหมือนว่าจะแปรผันกันไปด้วยความหนาแน่นของโฟมคอนกรีต Just and Middendorf (2009) ศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วยการลดลงของอัตราส่วน w/c โดยค่าอัตราส่วน w/c ของโฟมคอนกรีตที่ศึกษาระหว่าง 0.45–0.6 ซึ่งผลที่ได้นี้มีแนวโน้มคล้ายกันกับที่รายงานโดย De Rose and Morris (1999) ที่พบว่ากำลังของโฟมคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอัตราส่วน w/c สำหรับโฟมคอนกรีตที่มีอัตราส่วน w/c = 0.45 และความหนาแน่นสด  $1,200 \text{ kg/m}^3$

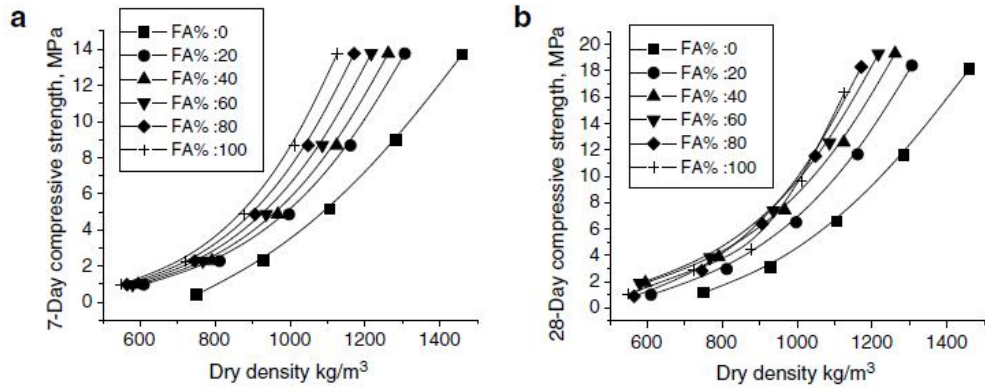
### 3) ชนิดของวัสดุอัดแทรก (type of fillers)

Khatib and Wild (1996), Kearsley and Wainwright (2002) ศึกษาพบว่าปริมาณทรายที่ใช้ในส่วนผสมไม่ได้มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามผลการศึกษายังไม่ได้ปรากฏผลที่ชัดเจนเท่าใดนัก กำลังของโฟมคอนกรีตลดลงเล็กน้อยในช่วงอายุต้น อาจเป็นเพราะว่าส่วนผสมที่ประกอบด้วยสารซีเมนต์มีการอัดตัว (cementitious filler) มากกว่าการใช้ทรายเป็นส่วนผสมจำนวนหนึ่ง แต่กำลังของโฟมคอนกรีตยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเกิน 28 วัน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ในขณะที่กำลังของโฟมคอนกรีตในระยะปลายไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ De Rose and Morris (1999) พบว่ากำลังของโฟมคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณของเถ้าลอยและซิลิกาฟูมที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีผลกระทบมากอย่างเห็นได้ชัดกับโฟมคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยที่ได้อ้างโดย Kearsley and Wainwright (2002)

De Rose and Morris (1999) ศึกษาการใช้ผงหินปูน (fine limestone) ที่ผ่านการบดละเอียดผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ผสมร่วมกับเถ้าลอย พบว่าสามารถเร่งอัตราการก่อตัวของโฟมคอนกรีตได้ ส่งผลทำให้คอนกรีตแข็งตัวเร็วในช่วงอายุต้นและมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นกว่าโฟมคอนกรีตที่ไม่ได้ใส่ผงหินปูน

### 4) ชนิดของโฟม (type of foam)

Kearsley and Wainwright (2002), Nambiar and Ramamurthy (2006), Nambiar and Ramamurthy (2007) พบว่ากำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของโฟม (foam) และประเภทของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ Nambiar and Ramamurthy (2006) ได้ศึกษาพบว่าโฟมคอนกรีตกำลังสูงโดยทั่วไปสามารถทำได้เมื่อฟองอากาศมีขนาดเล็กอย่างสม่ำเสมอและเมื่อใช้กับสารลดแรงตึงผิวชนิดโปรตีน หลังจากนั้นจากการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพของสารเพิ่มฟองสามารถให้เหตุผลได้ว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดโปรตีนมีความสามารถในการเกาะติดกับน้ำและทำให้ใช้ได้ดีกับซีเมนต์มอร์ต้าในอัตราความสูญเสียการยุบตัวของฟองอากาศที่ต่ำมาก



## 6) วัสดุไฟเบอร์

Lee et al. (2010) ได้ศึกษาคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสไฟเบอร์ (fiber) ที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากโดยการใส่ในปริมาณ 0.25%–0.5% โดยน้ำหนักของเส้นใยโพลีพรอพิลีน (polypropylene) การเพิ่มเส้นใยช่วยเพิ่มโครงข่ายเมตริกซ์ (matrix) ของคอนกรีตมวลเบาป้องกันการวิบัติแบบฉับพลัน (sudden failure) ของคอนกรีตซึ่งมีลักษณะเป็นที่น่าพอใจ

### 2.6.3.2 การหดตัวแห้ง

การหดตัวแห้ง (drying shrinkage) ของโฟมคอนกรีตปกติอยู่ระหว่างประมาณ 0.1%–0.3% หรือระหว่างประมาณ 4–10 เท่าของคอนกรีตน้ำหนักปกติ ซึ่งค่าการหดตัวแห้งที่สูงสำหรับโฟมคอนกรีตนี้สามารถให้เหตุผลได้ว่าเกิดจากส่วนประกอบของคอนกรีตที่มีปริมาณปูนซีเมนต์ค่อนข้างสูงและมีปริมาณน้ำที่สูงเพราะว่าไม่มีมวลรวมหยาบในส่วนผสมนั่นเอง

De Rose and Morris (1999) พบว่าปริมาณของการหดตัวแห้งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณโฟมด้วยการลดความหนาแน่นของคอนกรีต และด้วยการมีอุณหภูมิอบที่เพิ่มขึ้น

Chindaprasirt and Rattanasak (2011) รายงานว่าการหดตัวแห้งนั้นสามารถลดลงได้ด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยการใส่ถ้ำลอยและทรายในส่วนผสมและลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ w/c ประมาณ 0.5 สารเพิ่มฟองจำพวก Glycol ยังได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อลดการหดตัวแห้งของโฟมคอนกรีต ดังนั้นสารดังกล่าวก่อนที่จะถูกนำมาใช้ให้แน่ใจว่าสามารถเติมเต็มโพรงหรือช่องว่าง (cavity) อย่างสมบูรณ์ได้ นอกจากนี้ De Rose and Morris (1999) พบว่าการหดตัวมักจะเกิดขึ้นภายในช่วงอายุไม่เกิน 28 วันหรืออยู่ในช่วงของการหล่อ (casting)

### 2.6.3.3 ความต้านทานจากการโจมตีของซัลเฟต

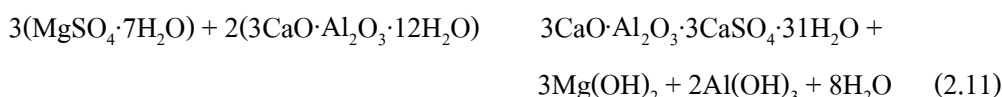
ซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินเค็มและน้ำทะเล การทำลายของซัลเฟตไม่ส่งผลกระทบต่อมากนักเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่จะมีคุณภาพที่รุนแรงเมื่อคอนกรีตมีสภาพเปียกและรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกันตลอดเวลา

ความเสียหายของคอนกรีตมวลเบามักเกิดจากการกัดกร่อนทางเคมีซึ่งเกลือที่อยู่ในรูปของสารละลาย เช่น แมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) หรือ โซเดียมซัลเฟต ( $Na_2SO_4$ ) สามารถ

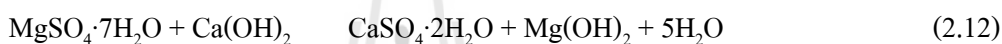


ทำลายคอนกรีตได้เนื่องจากการแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ที่มีอยู่ในซีเมนต์เพสต์

โดยกลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตเกิดจากการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรตได้สารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2.11



แมกนีเซียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซั่ม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ดังสมการที่ 2.12



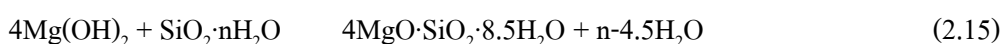
แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซั่มที่ได้จากสมการที่ 2.12 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรตได้สารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ดังสมการที่ 2.13



นอกจากนี้แมกนีเซียมซัลเฟตยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ( $\text{C-S-H}$ ) ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซั่ม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และซิลิกาเจล ดังสมการที่ 2.14



แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซั่มที่ได้จากสมการที่ 2.14 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ตามสมการที่ 2.13 ได้อีก ส่วนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และซิลิกาเจลทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต ดังสมการที่ 2.15



แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตหรือเอ็ททริงไจต์ (Ettringite) ที่เกิดจากสมการที่ 2.11 และ 2.13 ทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัว มีปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตเกิด

การแตกร้าว ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ที่เกิดจากสมการที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ เป็นสารที่ไม่มีความแข็งแรง มีผลเสียทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง

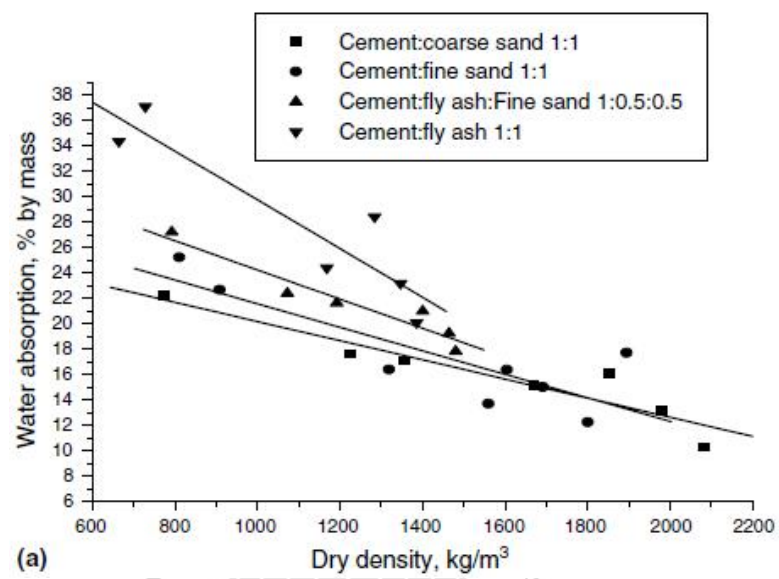
Mamun and Bindiganavile (2011) ศึกษาความต้านทานของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์เสริมเส้นใยในการสัมผัสซัลเฟตโดยการทดลองแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ที่มีความเข้มข้น 5% ตามคำแนะนำใน ASTM C1012-2012 อย่างไรก็ตามเมื่อแช่ในสารละลายซัลเฟตซึ่งขณะเดียวกันกำลังรับแรงอัดของโพลีเมอร์ที่มีโพลีเมอร์ อย่างแน่นอน (ความหนาแน่นเปียก  $750 \text{ kg/m}^3$ ) ลดลง 4% ก่อนตัวอย่างมีความเบา และไม่พบความผิดปกติใด ๆ อย่างชัดเจนในการรับกำลังอัด นี่เป็นการยืนยันว่าโพลีเมอร์มีความต้านทานที่ดีต่อการโจมตีจากซัลเฟต ในระยะสั้น

#### 2.6.3.4 การดูดซึมน้ำ

Kearsley and Wainwright (2001) พบว่าการทดสอบการดูดซึมน้ำพื้นผิวเริ่มต้น (initial surface absorption) ไม่เหมาะสมสำหรับโพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นแห้งต่ำกว่าประมาณ  $1,500 \text{ kg/m}^3$  นี่อาจเป็นเพราะโครงสร้างรูพรุนขนาดหยาบและโพรงอาจจะเชื่อมต่อกัน (interconnectivity) ของคอนกรีตนั้นก่อให้เกิดการรั่วไหลของน้ำขณะทดสอบที่ผาครอบหรือด้านข้างของชิ้นงานทดสอบได้ ผลของการทดสอบการดูดซึมน้ำพื้นผิวเริ่มต้นของโพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูงนั้นพบว่าค่าการดูดซึมน้ำพื้นผิวเริ่มต้นของส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแก้วลอยแทบจะลำดับได้ว่าสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้แต่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Chindaprasirt and Rattanasak (2011) ยังรายงานว่าการวัดการดูดซึมน้ำของตัวอย่างโพลีเมอร์ที่แช่ในน้ำทั้งหมดบ่งบอกพฤติกรรมที่คล้ายกันและระดับการดูดซึมน้ำสำหรับส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทรายและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แก้วลอย พบว่าส่วนผสมทั้งสองประเภทนี้มีอัตราการดูดซึมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามช่วงเวลาของการแช่ในน้ำ

Kunhanandan Nambiar and Ramamurthy (2007) รายงานว่าค่า Sorptivity สำหรับโพลีเมอร์ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์และแก้วลอย ด้วยความหนาแน่นแห้ง  $1,400 \text{ kg/m}^3$  มีช่วงค่าจาก  $0.5-0.7 \text{ mm/min}^{1/2}$  เมื่อเทียบกับค่าประมาณ  $0.3-0.6 \text{ mm/min}^{1/2}$  สำหรับส่วนผสมปูนซีเมนต์และทราย ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 25% นอกจากนี้ยังพบอีกว่าโพลีเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนผสมของปูนซีเมนต์และทรายมีค่าดัชนี Sorptivity ต่ำสุด ดังนั้นเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างเซลล์ปิด (closed cell structure) ของคอนกรีตนั้น



(a)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สามชนิด ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสม ซีเมนต์เพสต์ ซีเมนต์กับเถ้าลอย และซีเมนต์กับทราย มีค่าสูงประมาณ 100 เท่า ซึ่งมากกว่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตปกติ

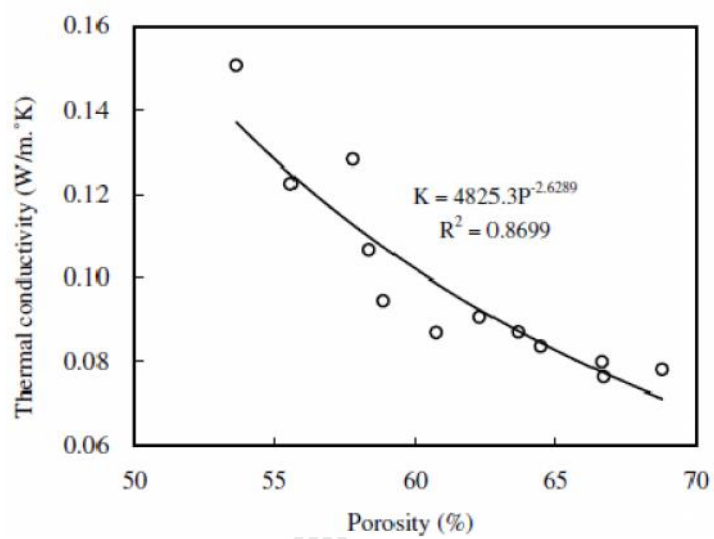
### 2.6.3.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

การที่โฟมคอนกรีตมีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์ (cellular structure) อากาศส่งผลดีทำให้มีคุณสมบัติการนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งมักจะอยู่ระหว่าง 5%–30% ของคอนกรีตน้ำหนักปกติ (Jones and Mc Carthy, 2005) ในแง่ของการปฏิบัตินั้นชิ้นส่วนคอนกรีตน้ำหนักปกติจะต้องมีความหนามากกว่าของโฟมคอนกรีตถึง 5 เท่า จึงจะมีความเป็นฉนวนกันความร้อนเทียบเท่ากันได้

De Rose and Morris (1999) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ของโฟมคอนกรีตความหนาแน่นต่ำอาจมีค่าต่ำมากถึง 0.10 W/m.K ค่าที่ต่ำนี้ส่งผลดีต่อคุณสมบัติการเป็นวัสดุฉนวนของโฟมคอนกรีต ซึ่งต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่อยู่ระหว่าง 1.1–1.4 W/m.K สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ จะเห็นว่าโฟมคอนกรีตมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าประมาณ 10 เท่า

Wang et al. (2005) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของโฟมคอนกรีตที่ทำจากเถ้าจากตะกอนน้ำเสียอยู่ระหว่าง 0.084–0.102 W/m.K ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนที่มีน้ำหนักเบา (lightweight filler) และฉนวนกันความร้อน

นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity หรือ  $k$ ) ของโฟมคอนกรีตที่ทำจากเถ้าจากตะกอนน้ำเสียยังมีความสัมพันธ์กับความพรุน (porosity) เป็นสมการเลขยกกำลังเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) โดยการนำความร้อนมีค่าลดลงตามปริมาณความพรุนที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง ดังแสดงในรูปที่ 2.9



$$\dots = 18700X_d^{-0.85} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$\dots = \text{Porosity (\%)}$$

$$X_d = \text{Dry density (kg/m}^3\text{)}$$

### 2.6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัด

มีสมการมากมายได้รับการแนะนำให้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังของวัสดุแข็งพรุน (porous solid) ตามที่ Röler and Odler (1985) สมการต่อไปนี้สามารถใช้ประสบความสำเร็จในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังของซีเมนต์เพสต์

$$\dagger = \dagger_o (1 - P)^n \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$\dagger = \text{Strength}$$

$$\dagger_o = \text{Strength at zero porosity}$$

$$P = \text{Porosity}$$

$$n = \text{Empirical constant}$$

Hoff (1972) ได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังรับแรงอัดของโฟมคอนกรีต โดยโฟมคอนกรีตที่ใช้ทดสอบทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และโฟมแบบ PRE-FORMED FOAM เท่านั้น ภายใต้เงื่อนไขปริมาณอากาศ โฟมคอนกรีตนั้นประกอบด้วยปูนซีเมนต์ วัสดุแทรก (ถ้ำลอยหรือซีโอไลต์) น้ำและโฟมเหลว (preformed foam) ฉะนั้นรูปแบบที่เสนอโดย Hoff (1972) จะต้องปรับเปลี่ยนเพื่อรวมเอาวัสดุแทรกเข้าไปในเฟสวัสดุตั้งแสดงโดยแผนภาพจำลองอย่างง่ายในรูปที่ 2.10 ซึ่งประกอบด้วยอากาศ น้ำที่ระเหยได้ (evaporable) น้ำที่ระเหยไม่ได้ (non-evaporable) วัสดุแทรก (filler) และปูนซีเมนต์ โฟมคอนกรีตถือว่าเป็นซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณช่องว่างขนาดใหญ่หรือความพรุนสูงและสมการที่ 2.17 สามารถใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลัง ในขณะที่ทฤษฎีความพรุน (theoretical porosity,  $P$ ) สำหรับโฟมคอนกรีตประกอบด้วย  $V_v = \text{Total voids}$  และ  $V_t = \text{Total volume}$  ได้รับโดยสมการที่ 2.18

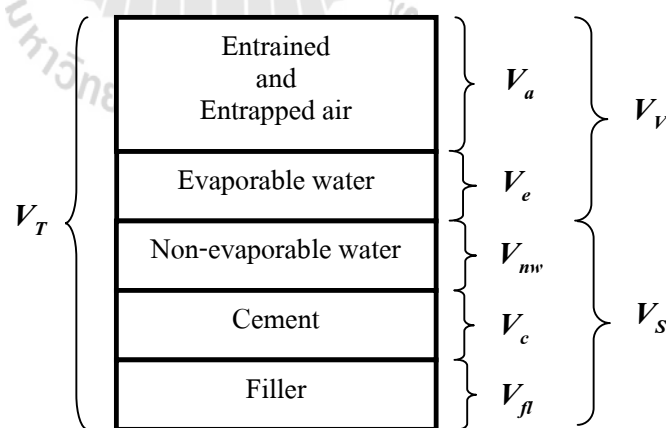
$$\text{Theoretical porosity, } P = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_a + V_e}{V_c + V_w + V_a + V_{fl}} \quad (2.18)$$

Hoff (1972) อธิบายทฤษฎีความพรุนว่าส่วนประกอบย่อยของปริมาตรทั้งหมดคือมีอากาศบวกรั่วที่ระเหยได้ (evaporable) จากการพิจารณาน้ำหนักและปริมาตรของวัสดุที่ใช้ผสม ความพรุนนั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.19

$$P = 1 - \frac{d_c(1 + 0.2 \dots_c + S_v)}{(1 + k_s)(1 + S_w) \dots_c X_w} \quad (2.19)$$

เมื่อ

- $P$  = Porosity
- $d_c$  = Fresh density of concrete =  $\frac{W_t}{V_t}$
- $k_s$  = Water-to-solids ratio by weight
- $S_w$  = Filler-to-cement ratio by weight
- $S_v$  = Filler-to-cement ratio by volume
- $\dots_c$  = Specific gravity of cement
- $X_w$  = Unit weight of water



รูปที่ 2.10 แผนภาพจำลองอย่างง่ายของส่วนประกอบของโฟมคอนกรีต (Hoff 1972; Nambiar and Ramamurthy, 2008)

การแทนสมการนี้สำหรับความพรุนจากสมการความสัมพันธ์กำลังและความพรุน (สมการที่ 2.17) สำหรับซีเมนต์เพสต์จะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

$$f = f_o \left[ \frac{d_c (1 + 0.2 \dots_c + S_V)}{(1 + k_s)(1 + S_w) \dots_c X_w} \right]^n \quad (2.20)$$

$$f = f_o \left( \frac{d_c}{1 + k_s} \right)^n \left( \frac{1 + 0.2 \dots_c + S_V}{(1 + S_w) \dots_c X_w} \right)^n \quad (2.21)$$

เมื่อ  
ตอนท้ายของสมการที่ 2.21 ยังคงเหมือนเดิมสำหรับปูนซีเมนต์ที่กำหนดและด้วยเหตุ

$$f \propto f_o = \left( \frac{d_c}{1 + k_s} \right)^n \quad (2.22)$$

เมื่อ

- $f$  = Strength
- $f_o$  = Strength at zero porosity
- $d_c$  = Density of concrete
- $k_s$  = Water-to-solid ratio
- $n$  = Empirical constant

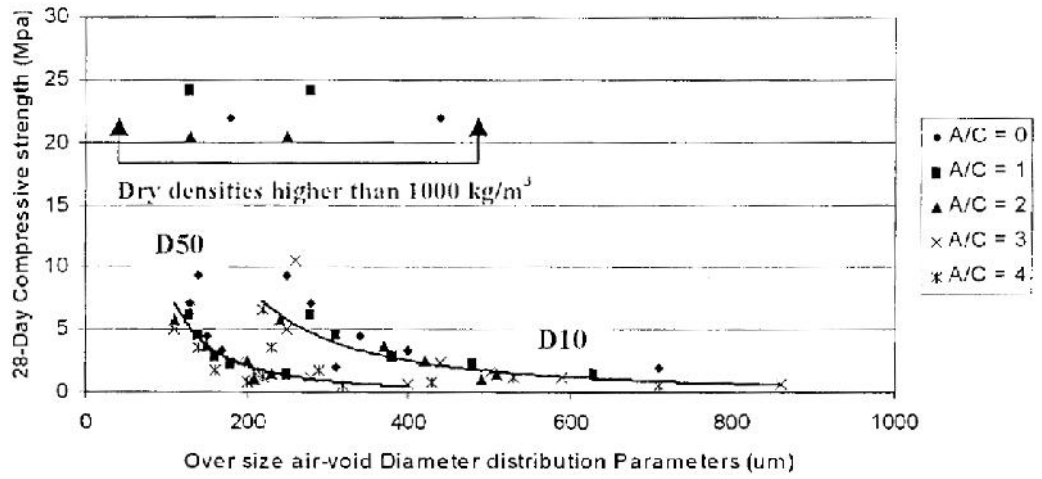
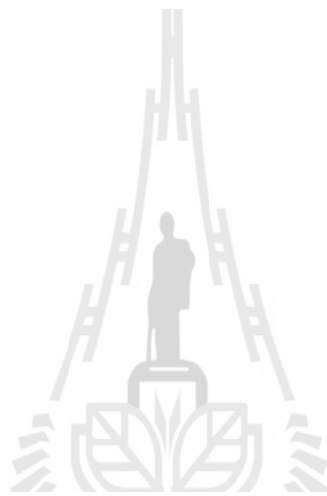
สมการเหล่านี้ถือว่าเป็นจริงได้สำหรับโฟมคอนกรีตที่ประกอบด้วย อากาศ น้ำและปูนซีเมนต์เท่านั้น Kearsley and Wainwright (2002) ทำการดัดแปลงสมการที่ 2.18 ฉะนั้นทฤษฎีสมการความพรุนของส่วนผสมต้องประกอบด้วยแก้วจึงจะสามารถเป็นไปได้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานและความถ่วงจำเพาะของวัสดุยึดประสานถูกนำมาใช้ในสมการที่ 2.18 เมื่อวัสดุยึดประสานถูกกำหนดให้เป็นวัสดุที่มีความเป็นสารซีเมนต์ (cementitious material) ทั้งหมดในส่วนผสม ความถ่วงจำเพาะของวัสดุยึดประสานคำนวณได้โดยเอาน้ำหนักวัสดุยึดประสานทั้งหมดหารด้วยน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่าวัสดุยึดประสานทั้งหมด ทฤษฎีความพรุนของโฟมคอนกรีตที่ประกอบด้วยส่วนผสมปูนซีเมนต์ขยายตัว (cement extender) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีอายุหนึ่งปีหลังจากเทคอนกรีตผ่านไป ดังแสดงในสมการต่อไป (Kearsley and Wainwright, 2002)

$$P = 1 - \frac{d_c (1 + 0.2 \dots_b)}{(1 + k) \dots_b X_w} \quad (2.23)$$

เมื่อ

- $d_c$  = Density of concrete





วิเคราะห์ภาพถ่ายอิทธิพลของโครงสร้างโพรงอากาศภายในที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ออปติคอลที่มีความละเอียดสูง พบว่าการกระจายขนาดโพรงอากาศเป็นแบบเชลลูล่า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กล่าวคือคอนกรีตที่ให้กำลังรับแรงอัดค่อนข้างสูง ลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศมักมีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ คล้ายกับรายงานการวิจัยของ Visagie (2000)

### 2.6.8 ผลของปริมาณเถ้า ความพรุนและอายุ ต่อกำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดของโพมคอนกรีตไม่ได้มีเพียงความพรุนและความหนาแน่นแห้งเท่านั้นที่เป็นปัจจัย แต่ยังมีอายุการบ่ม ส่วนผสมและปริมาณเถ้าร่วมอีก กำลังรับแรงอัดของโพมคอนกรีตสามารถแทนโดยสมการต่อไปนี้ (Kearsley and Wainwright, 2002)

$$f_c = (f + S \ln(t))(1 - P)^r \quad (2.24)$$

แทนด้วย

$$S = S_1 + S_2(a/c) + S_3(a/c)^2 \quad (2.25)$$

$$r = r_1 + r_2(a/c) + r_3(a/c)^2 \quad (2.26)$$

เมื่อ

- $f_c$  = Compressive strength (MPa)
- $t$  = Time since casting (days)
- $P$  = Porosity (as a fraction)
- $a/c$  = Ash-to-cement ratio (by weight)
- $f, S, r$  = Constants

Kearsley and Wainwright (2002) กำหนดค่าที่แตกต่างกันสำหรับค่าคงที่ ( $f, S$ , และ  $r$ ) สำหรับเถ้าเชื้อเพลิง (pulverized fuel ash หรือ PFA) และเถ้าถม (pozz-fill) หรือเถ้าลอยที่ไม่ได้คัดแยก (unclassified fly ash) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ใช้ปูนซีเมนต์ขยายตัวสำหรับขอบเขตของงานวิจัยเฉพาะ Pozz-fill ในประเทศแอฟริกาใต้เท่านั้น (เถ้าลอย unclassified) ถึงแม้ว่าผลของปริมาณเถ้าลอยสูงจะทำให้ลดกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นก็ตาม แต่ในช่วงอายุปลายการปรับปรุงกำลังรับแรงอัดทำให้ดีขึ้นได้โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูงสุดได้ถึง 75%

## โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบสำหรับค่าคงที่ของ  $\rho$ ,  $s$ , และ  $\beta$  (Kearsley and Wainwright, 2002)

Constant	PFA	Pozz-fill
	3.70	3.70
$S_1$	24.91	23.74
$S_2$	52.89	56.78
$S_3$	-12.27	-14.31
$\beta_1$	172.80	176.90
$\beta_2$	-196.00	-229.70
$\beta_3$	34.02	46.04

## 2.7 ข้อสรุปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 1) ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณอากาศหรือโฟมที่ใส่เข้าไปและมีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาตรของน้ำปูนเหลวขึ้น
- 2) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเป็นฟังก์ชันแปรผันกับความหนาแน่นและอายุของคอนกรีต
- 3) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเป็นฟังก์ชันผกผันกับปริมาณวัสดุอัดแทรกและความพรุน
- 4) ปริมาณการแทนที่ของเส้นใยที่เหมาะสมที่สุดจะส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดสูงสำหรับที่ความพรุนหนึ่ง
- 5) โครงสร้างโพรงอากาศเป็นสมบัติของโครงสร้างจุลภาคที่สำคัญมากซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส
- 6) ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเป็นฟังก์ชันผกผันกับปริมาณวัสดุอัดแทรกและความพรุน

## 2.8 กรอบแนวคิดงานวิจัย

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ได้แนวทางในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเส้นใย ซีโอไลต์ธรรมชาติ และนาโนซิลิกาผลิตโดยวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD ซึ่งได้กำหนดตัวแปรต่าง ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมา

ให้เหมาะสมในการวิจัยในครั้งนี้ โดยแต่ละส่วนผสมจะใช้วัสดุพอลิโพรพิลีนผสมแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยเส้นใยเคลเซียมสูงในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% ซีโอไลต์ธรรมชาติในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% และนาโนซิลิกาในปริมาณ 1%, 2%, และ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานเท่ากับ 0.5, 0.6, และ 0.7 ควบคุมความหนาแน่นแห้งทุกส่วนผสมประมาณ  $800 \text{ kg/m}^3$  บ่มที่อุณหภูมิห้องไว้ในถุงพลาสติกปิดผนึก (seal) จนมีอายุครบ 3, 14, 28, และ 60 วัน ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ กำลังรับแรงอัด การหดตัวแห้ง การดูดซึมน้ำ การนำความร้อน ทำการวิเคราะห์ภาพช่องว่างอากาศของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัลที่มีความละเอียดสูง



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในส่วนของบทนี้จะอธิบายรายละเอียดของแผนการทดสอบ วิธีการทดสอบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยใน ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาผลของปริมาณน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (w/b) และการแทนที่ของ เถ้าลอย ซีโอไลต์ธรรมชาติและนาโนซิลิกา ต่อระยะเวลาการก่อตัว กำลังรับแรงอัด หน่วงน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ การหดตัวแห้ง การทนซัลเฟต และการกระจายโพรงอากาศของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบการวิเคราะห์ด้วยภาพ (image analysis) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาด ปริมาณ และลักษณะของ โพรงที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพการนำความร้อน ผลกระทบของโพรงที่อาจมีต่อคุณสมบัติอื่น ๆ ได้แก่ กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ การหดตัวแห้ง การเกิดคราบเกลือเนื่องจากการถูกโจมตีด้วยสารแมกนีเซียมซัลเฟต ความไม่ต่อเนื่องของโพรงเปิด (open pore) เนื่องจากผลของปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุพอลิไซลันต่าง ๆ โดยการผ่าวิเคราะห์เนื้อข้างในของก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

### 3.1 วัสดุ (Materials)

#### 3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (type-I Portland cement หรือ OPC) ตามมาตรฐาน (ASTM C150-2000)

#### 3.1.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly ash หรือ FA) ที่ใช้ในการศึกษาเป็นเถ้าลอยชนิดมีปริมาณแคลเซียมสูง (high-calcium fly ash) จากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย (Mae Moh power plant, Thailand) เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษานำไปวิเคราะห์ทดสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-ray fluorescence (XRF) และคุณสมบัติทางกายภาพของ OPC, FA, NZ, และ NS

### 3.1.3 ซีโอไลต์ธรรมชาติ

ซีโอไลต์ธรรมชาติ (natural zeolite หรือ NZ) ที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิด Clinoptilolite  $((\text{Na,K,Ca})_6(\text{Si,Al})_3\text{O}_{72}\cdot 20\text{H}_2\text{O})$  ที่ผ่านการบดละเอียดโดยไม่ผ่านกระบวนการเผา (non-calcined) จากแหล่งของบริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดปทุมธานี

### 3.1.4 นาโนซิลิกา

นาโนซิลิกา (nano-silica หรือ NS) เป็นสารซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ที่มีขนาดของอนุภาคละเอียดสูงด้วยพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface) ไม่ต่ำกว่า  $200 \text{ m}^2/\text{g}$  ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบกับ FA และ NZ ซึ่งนาโนซิลิกามีความเป็น อัมมูฐาน (amorphous) หรือไม่เป็นผลึกอยู่ในรูปผง (powder) ที่ได้จากการสังเคราะห์ (Zhang et al., 2012) จากแหล่งของบริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดปทุมธานี

### 3.1.5 สารเพิ่มฟอง

สารเพิ่มฟองที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิดสังเคราะห์ประเภทประจุลบ

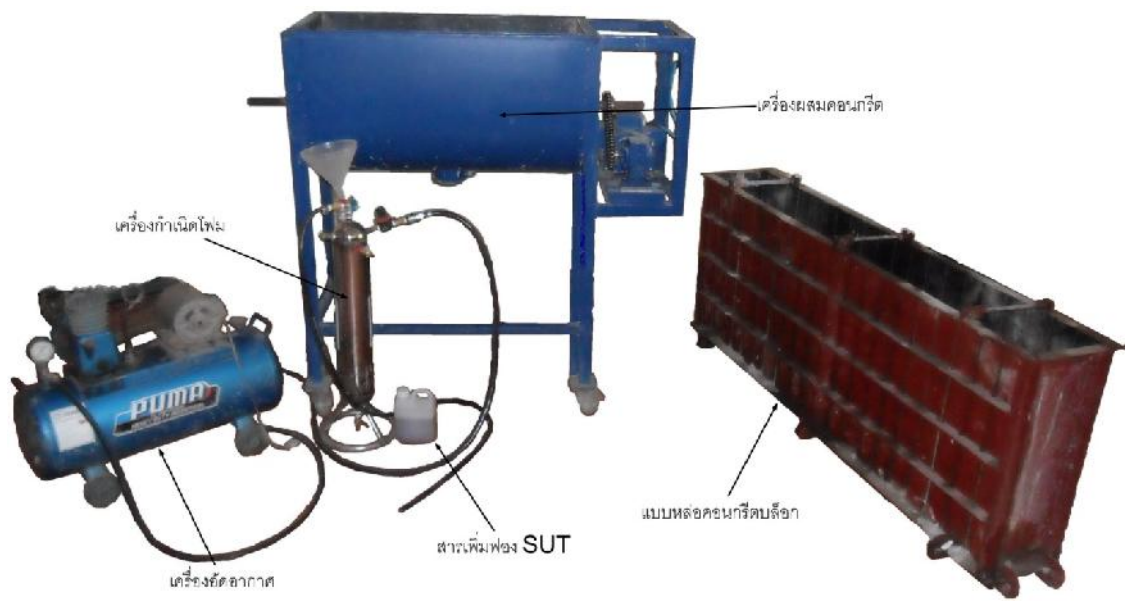
## 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

### 3.2.1 เครื่องผสม

เครื่องผสม (mixer) คอนกรีตมวลเบาเป็นแบบเพลลาหมุนในแนวนอน ที่ประกอบด้วยใบกวนแบบเกลียว (screw) ความจุในการผสมสูงสุดครั้งละไม่เกิน  $0.09 \text{ m}^3$  ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 Hp ทดรอบความเร็วด้วยเกียร์ทดให้มีอัตราการหมุนของใบกวนที่อัตราความเร็ว 40–45 r/min ลักษณะเครื่องผสมดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1

### 3.2.2 เครื่องกำเนิดโฟม

เครื่องสร้างฟองหรือเครื่องกำเนิดโฟม (foam generator) เป็นชนิดถังแรงดันใช้คู่กับเครื่องอัดอากาศ ลักษณะเครื่องสร้างฟองประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือตัวปรับแรงดันเข้าถัง (regulator) เพื่อให้ความดันภายในถังคงที่  $0.6 \text{ MPa}$  และอุปกรณ์ผสมสารเพิ่มฟองกับน้ำซึ่งจะให้ฟองในปริมาณมาก ที่ได้จากการใส่สารเพิ่มฟองเจือจางกับน้ำในสัดส่วน สารเพิ่มฟองต่อน้ำ 1 : 40 โดยน้ำหนัก







1) คำนวณหาปริมาณน้ำจากปริมาณซีเมนต์ทั้งหมด ( $w/c =$  ค่าคงที่ เช่น 0.5) ซึ่งอาจมีวัสดุอัดแทรก (filler) อื่นร่วมด้วย เช่น FA หรือ NZ

2) หาปริมาตรอากาศ ( $m^3$ ) ในส่วนผสมจากการพิจารณาของหนึ่งหน่วยปริมาตร (unit volume) และจากความหนาแน่นเป้าหมาย (target density) ของปริมาตรโฟมที่ต้องการ

สูตรคำนวณหาปริมาตรโฟมที่ต้องการสำหรับส่วนผสมได้จากสมการที่ 3.1 เมื่อทราบความหนาแน่นของคอนกรีตที่ออกแบบ (design density หรือ  $D_d$ ) สามารถคำนวณได้จากปริมาตรของอากาศที่ต้องการ (air required)

$$\text{Wet density, } D_d = \frac{(W_w + W_f) + W_c}{[(W_w/1000) + (W_c/3.15 \times 1000) + V_f]} \quad (3.1)$$

เมื่อ

$D_d$  = Design density ( $kg/m^3$ )

$V_f$  = Volume of foam required ( $m^3$ )

$W_w$  = Weight of water (kg)

$W_c$  = Weight of cement (kg)

สารเพิ่มฟองเมื่อเจือจางกับน้ำจะมีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เท่ากับ 1 หรือหน่วยน้ำหนักเท่ากับ  $1,000 \text{ kg/m}^3$  แต่เมื่อนำมาผ่านเครื่องกำเนิดโฟมจะมีหน่วยน้ำหนักเป็น  $W_{wf}$  (มีหน่วยเป็น  $kg/m^3$ ) ฉะนั้นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรอากาศและปริมาตรโฟมใน 1 ลูกบาศก์เมตร อาจกำหนดไว้ดังนี้

$$V_f = V_a + (W_f / W_{wf}) \quad (3.2)$$

เมื่อ

$V_a$  = Volume of air required ( $m^3$ )

$V_f$  = Volume of foam ( $m^3$ )

$W_f$  = Weight of foam (kg)

$W_{wf}$  = Unit weight of foam ( $kg/m^3$ )

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรอากาศและปริมาตรโฟมจากสมการที่ 3.2 อาจเขียนใหม่ได้เป็น  $V_a = V_f - (W_f / W_{wf})$

สำหรับการคำนวณความหนาแน่นแห้ง (oven-dry density) อาจหาได้โดยสมมุติว่าน้ำที่ผสมคอนกรีตส่วนหนึ่งนั้นถูกใช้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน 20% ของน้ำหนักซีเมนต์ กล่าวคือปริมาณ

น้ำ 20% กลายเป็นซีเมนต์เจล ดังนั้นกรณีที่ต้องการความหนาแน่นแห้งที่  $800 \text{ kg/m}^3$  ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้จึงควรมีประมาณ  $666.7 \text{ kg}$  ใน  $1 \text{ m}^3$  เพราะว่าน้ำหนักของคอนกรีตส่วนหนึ่งนั้นมาจากน้ำหนักของน้ำ เท่ากับ  $(20 \times 800) / (100 + 20) = 133.3 \text{ kg}$  ดังนั้นในคอนกรีตสดจึงต้องเพื่อปริมาณน้ำ 20% ของน้ำหนักซีเมนต์ของคอนกรีตแห้ง ดังสมการที่ 3.3

$$\text{Dry density} = (W_c + 0.2W_c) / V_{batch} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $W_c$  = Weight of cement (kg)

$V_{batch}$  = Volume of batch ( $\text{m}^3$ )

### 3.3.2 การเตรียมโฟม

คอนกรีตมวลเบาที่ใช้ในการศึกษาเป็นระบบ CLC โดยควบคุมความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตที่  $800 \text{ kg/m}^3$  โดยมีเทคนิคในการทำให้น้ำกลายเป็นโฟมเหลว (liquid foam) บางส่วนก่อนที่จะนำไปผสมกับคอนกรีตสดที่เรียกว่า PRE-FORMED FOAM METHOD โดยการใช้สารเพิ่มฟองในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กมีขนาดตั้งแต่  $0.1-1 \text{ mm}$  ซึ่งมีขั้นตอนคือนำสารเพิ่มฟองดังกล่าวเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน สารเพิ่มฟองต่อน้ำ 1 : 40 จากนั้นนำไปผ่านเครื่องสร้างฟองที่ต่อเข้ากับเครื่องอัดลมหรือเครื่องอัดอากาศ จากนั้นจึงเป็นโฟมเหลวไหลลงไปในเครื่องผสม โฟมเหลวมีความหนาแน่นเฉลี่ย  $45 \text{ kg/m}^3$  ปริมาณสารเพิ่มฟองที่ไหลลงไปในแต่ละส่วนผสมของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 วิธีการทดสอบทำตามมาตรฐาน (ASTM C796-2004)

### 3.3.3 การหล่อก้อนตัวอย่าง

ทำการเทคอนกรีตสดลงในแบบหล่อมาตรฐานขนาด  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$  ทันทีภายหลังผสมคอนกรีตเสร็จ และใช้ก้อนเคาะที่ข้างแบบเพื่อให้คอนกรีตไหลเข้าแบบทั่วถึงกันทั้งก้อนโดยเทให้พูนปากแบบเล็กน้อย จากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง จึงใช้เกรียงเหล็กปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ จำนวนก้อนตัวอย่างที่หล่ออย่างน้อยจำนวน 4 ก้อนสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด แล้วปิดด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ

### 3.3.4 การถอดแบบและการบ่ม

ภายหลังเทคอนกรีตประมาณ 24 ชั่วโมง จะทำการถอดแบบหล่อออก แล้วนำก้อนตัวอย่างห่อปิดทับรอบผิวหน้าทั้ง 6 ด้าน ด้วยแผ่นพลาสติกและเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดปากถุง

เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ (ASTM C495-99) และ นำไปบ่มไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ  $23 \pm 2$  °C จนถึงวันทดสอบก่อนตัวอย่าง

### 3.3.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength test) ของคอนกรีตมวลเบาโดยหล่อก้อนตัวอย่างขนาด  $100 \times 100 \times 100$  mm โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% ซีโอไลต์ธรรมชาติในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% และนาโนซิลิกาในปริมาณ 1–3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน คงที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5, 0.6, และ 0.7 ควบคุมความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตเท่ากับ  $800 \text{ kg/m}^3$  ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 3, 14, 28, และ 60 วัน ตามมาตรฐาน (BS 1881-116)

### 3.3.6 ความหนาแน่นแห้ง

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นแห้ง (dry density) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสทำได้โดยการนำก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์มาตรฐาน ขนาด  $100 \times 100 \times 100$  mm จำนวน 3 ก้อน ที่มีอายุบ่ม 28 วัน เข้าตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  °C จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดเพื่อหาปริมาตร ซึ่งความหนาแน่นคืออัตราส่วนระหว่างมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$  การทดสอบทำตามมาตรฐาน (ASTM C495-99)

### 3.3.7 การดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของคอนกรีตมวลเบาโดยเอาก้อนตัวอย่างขนาด  $100 \times 100 \times 100$  mm ที่มีอายุการบ่ม 28 วัน จำนวน 3 ก้อน รายละเอียดวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C642-97) จากนั้นแช่ก้อนตัวอย่างไว้ในน้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงเอาออกจากน้ำแล้วใช้ผ้าซับน้ำส่วนเกินที่ผิวของก้อนตัวอย่างและชั่งน้ำหนักภายในเวลา 30 วินาที ซึ่งค่าที่ได้คือน้ำหนักเปียก (wet weight) โดยบันทึกค่าให้ละเอียดถึง 0.05 kg

นำก้อนตัวอย่างเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ  $110$  °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำออกจากเตาอบ จากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักโดยบันทึกค่าให้ละเอียดถึง 0.05 kg ค่าที่ได้คือน้ำหนักอบแห้ง (dry weight) ของก้อนตัวอย่าง ค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4 โดยเป็นค่าเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างจำนวน 3 ก้อน

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ โดยน้ำหนัก} = (W_w / W_d) \times 100 \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } W_w &= \text{น้ำหนักน้ำในก้อนตัวอย่างที่ดูดซึมเข้าไป (kg)} \\ W_w &= \text{น้ำหนักก้อนตัวอย่างหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักก้อนตัวอย่างหลังอบ} \\ W_d &= \text{น้ำหนักก้อนตัวอย่างหลังอบ (kg)} \end{aligned}$$

### 3.3.8 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity ใช้สัญลักษณ์  $k$  หรือ ) คือ คุณสมบัติภายในของวัสดุอย่างหนึ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ การนำความร้อน (heat conductivity) เป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัสดุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัสดุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางปราศจากการเคลื่อนที่

การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ คล้ายกับการนำไฟฟ้าในของเหลวและของแข็งที่เกิดการสั่นของโมเลกุลข้างเคียงในก๊าซ การนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นสะเทือนระหว่าง โมเลกุล กล่าวคือ การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านโดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน วัสดุใดจะนำความร้อนได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้จากการทดสอบ การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาทำได้โดยการหล่อหรือเจาะเอาจากก้อนตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ความยาว 25 mm ผิวหน้าสัมผัสเรียบทั้งสองด้าน มีอายุการบ่มครบ 28 วัน จากนั้นนำไปเข้าเครื่องทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อน โดยให้ความร้อน ( $Q$ ) ด้วยการจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านขดลวดความร้อนบนผิวสัมผัสด้านหนึ่งที่อุณหภูมิ 50 °C และด้านผิวสัมผัสอีกด้านที่อยู่ตรงกันข้ามจะถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าเพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ทำการวัดค่าอุณหภูมิทั้งสองจุด ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดที่วัดคือ

$T$  นำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ 3.5 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การทดสอบทำตามมาตรฐาน (ASTM C177-97)

$$k = (Q \times L) / (A \times T) \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } k &= \text{Thermal conductivity (W/m.K หรือ W/m.}^\circ\text{C)} \\ Q &= \text{ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านตัวอย่างทดสอบ (Watt หรือ W)} \\ L &= \text{ความหนาของตัวอย่างทดสอบ (m)} \\ A &= \text{พื้นที่หน้าตัดขวาง (m}^2\text{)} \\ T &= \text{ผลต่างระหว่างจุดที่วัดอุณหภูมิ (K หรือ }^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

### 3.3.9 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว

ทำการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวระยะต้น (Initial setting time) และระยะปลาย (Final setting time) ตามมาตรฐาน (ASTM C191-2001) โดยใช้ปริมาณสัดส่วนวัสดุผสมตามที่ออกแบบ ซึ่งการก่อตัวระยะต้นคือระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm เป็นระยะ 25 mm ในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลายคือระยะเวลาที่คอนกรีตมวลเบา เซลลูล่าก่อตัวจนกระทั่งเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ไม่สามารถจมลงได้ด้วยน้ำหนักของเข็มมาตรฐาน

### 3.3.10 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐานเลชาทีลเฮอร์ (Le Chatelier flask) ทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C188-95) ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่าวัสดุนั้น โดยปริมาตรของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอซโซลานหาได้จากการแทนที่ในน้ำมันก๊าดที่อุณหภูมิ 21 °C

### 3.3.11 การทดสอบหาค่าความละเอียดโดยวิธีของเบลน

การทดสอบหาค่าความละเอียดโดยวิธีของเบลน (Blaine) เป็นการวัดความละเอียดสัมพัทธ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในรูปของพื้นที่ผิวจำเพาะ เป็นค่าของพื้นที่ผิวทั้งหมด มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2/\text{g}$  โดยใช้เครื่องวัดค่าการซึมผ่านอากาศของเบลนตามมาตรฐาน (ASTM C204-2004)

### 3.3.12 การทดสอบการทนซัลเฟต

การทดสอบความทนทานต่อสารซัลเฟต ทำได้โดยการแช่คอนกรีตมวลเบาในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก โดยใช้ก้อนตัวอย่างขนาด  $100 \times 100 \times 100$  mm สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด จำนวน 3 ก้อน ที่อายุ 3, 14, 28, 60, 90, 120, 150, และ 180 วัน

การทดสอบการขยายตัวหรือการเปลี่ยนแปลงความยาว (length change) ของตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้แบบหล่อก้อนตัวอย่างขนาด  $75 \times 75 \times 285$  mm จำนวน 3 ก้อน พร้อมติดตั้งหัว Stud ที่ปลายทั้งสองด้าน ทดสอบเป็นเวลานาน 180 วัน โดยสามารถหาค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตได้จากสมการที่ 3.6 วิธีการทดสอบทำตามมาตรฐาน (ASTM C1012-2012)

$$\Delta L = \frac{L - L_i}{L_g} \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $UL$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือขยายตัว (%)

$$\begin{aligned}
 L &= \text{ความยาวของแท่งตัวอย่างที่แช่ในสารละลายซัลเฟต (mm)} \\
 L_i &= \text{ความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่าง (mm)} \\
 L_g &= \text{Gauge length} = 250 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

### 3.3.13 การทดสอบการหดตัวแห้ง

การทดสอบการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสทำได้โดยการหล่อคอนกรีตมวลเบาด้วยแบบหล่อมาตรฐานขนาด 75×75×285 mm พร้อมติดตั้งหัว Stud เพื่อหาค่าการหดตัวแห้งเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง ภายหลังถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง จึงนำคอนกรีตไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำขึ้นตัวอย่างวัดความยาวเทียบกับแท่งโลหะความยาวมาตรฐานคงที่ (285 mm) ซึ่งจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้น จากนั้นนำขึ้นตัวอย่างบ่มไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 23±2°C ความชื้นสัมพัทธ์ 50 ±2 % ทำการวัดความยาวของแท่งตัวอย่างจำนวน 3 แท่ง เป็นเวลา 3, 14, 28, 60, และ 90 วัน โดยนับจากวันที่ปล่อยให้เกิดการหดตัวแห้ง

ค่าความยาวที่วัดได้ที่อายุต่าง ๆ สามารถนำไปคำนวณค่าร้อยละของการหดตัวแห้งได้จากสมการที่ 3.7

$$\Delta L = \frac{L - L_i}{L_g} \quad (3.7)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 U_L &= \text{ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือหดตัวแห้ง (mm/mm)} \\
 L &= \text{ความยาวของแท่งตัวอย่างที่อายุต่าง ๆ (mm)} \\
 L_i &= \text{ความยาวเริ่มต้นของแท่งตัวอย่าง (mm)} \\
 L_g &= \text{Gauge length} = 250 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

## 3.4 การทดสอบระดับจุลภาค

### 3.4.1 X-ray diffraction (XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (crystalline pattern phase) ของวัสดุโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้น โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.8 ของแบรกก์ (Bragg)

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.8)$$

- เมื่อ  $n$  = อันดับการเลี้ยวเบน (เลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 1, 2, 3,...)  
 $n$  = มุมตกกระทบ (องศา)  
 $\lambda$  = ความยาวคลื่น (Å หรือ อังสตรอม)  
 $d$  = ระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่รังสีตกกระทบ (Å หรือ อังสตรอม)

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ XRD นั้น ทำได้โดยการทุบก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด  $100 \times 100 \times 100$  mm ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ประมาณ 5–10 mm นำชิ้นตัวอย่างไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ  $-195$  °C ประมาณ 5 นาที นำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่อง Freeze-dryer ที่อุณหภูมิ  $-40$  °C ความดัน 0.5 Pascal เป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นจึงนำชิ้นตัวอย่างไปบดแล้วร่งผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 100 นำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบ XRD ด้วยเครื่อง XRD-6000 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (XRD)

### 3.4.2 Scanning electron microscope (SEM)

ก่อนตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาจะถูกนำมาเข้าเครื่องถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนหรือส่องกราด (Scanning electron microscope หรือ SEM) เพื่อที่จะนำภาพถ่ายขยายของอนุภาค (Scanning electron microscopy) มาวิเคราะห์ เตรียมตัวอย่าง โดยทำการทุบก้อนลูกบาศก์ขนาด  $100 \times 100 \times 100$  mm ให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ขนาดกว้าง  $\times$  ยาว ประมาณ  $10 \times 10$  mm ความหนา 5 mm จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งด้วยเครื่อง Freeze-dryer ที่อุณหภูมิ  $-40^{\circ}\text{C}$  ความดัน 0.5 Pascal เป็นเวลา 2 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบผิวด้วยทองคำและนำไปทดสอบถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงด้วยเครื่อง JSM-6460LA model Scanning Electron Microscope (JEOL) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง (SEM)

### 3.4.3 Mercury intrusion porosimeter (MIP)

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาขนาดและการกระจายของโพรง ทำได้โดยการทุบก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด  $100 \times 100 \times 100$  mm ให้แตกเป็นชิ้นเล็กประมาณ 5–8 mm โดยจะเลือกเอาชิ้นตัวอย่างที่อยู่ตรงใจกลางก้อนลูกบาศก์ ใช้ประมาณ 8 กรัม นำชิ้นตัวอย่างไปจุ่มลงใน



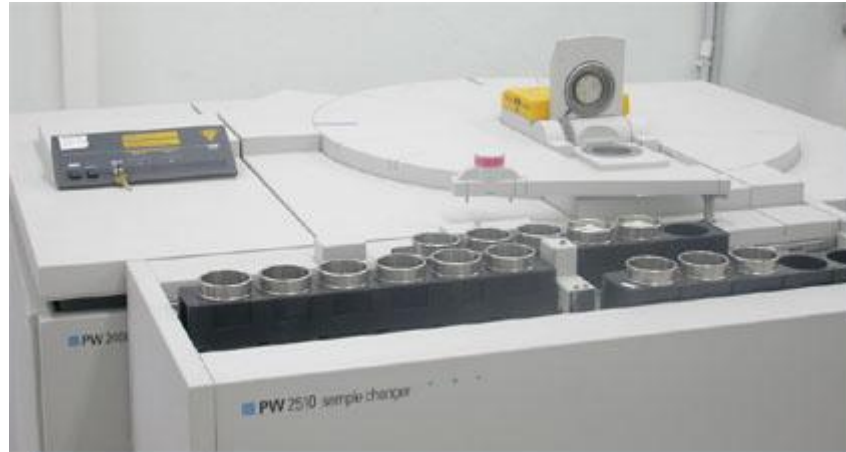
ไนโตรเจนเหลวซึ่งมีอุณหภูมิที่  $-195^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลาประมาณ 5 นาที จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งด้วยเครื่อง Freeze-dryer ที่อุณหภูมิ  $-40^{\circ}\text{C}$  ที่ความดัน 0.5 Pascal เป็นเวลา 2 วัน จากนั้นจึงนำชิ้นตัวอย่างประมาณ 1–2 กรัม ใส่ไว้ในแท่งใส่ตัวอย่าง (penetrometer) แล้วติดตั้งในช่องความดันต่ำ เดินเครื่องเพื่อให้ระบบเป็นสุญญากาศ หลังจากนั้นเพิ่มความดันจนถึง 30 psi และนำแท่งใส่ตัวอย่างชั่งน้ำหนักและติดตั้งที่ช่องความดันสูง เพื่ออัดความดันจนกระทั่งถึงความดันสูงสุดที่ 33,000 psi



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบ MIP

#### 3.4.4 X-ray fluorescence analysis (XRF)

ตัวอย่างวัสดุที่จะใช้ในการศึกษาจะผ่านการทดสอบหาลองค์ประกอบทางเคมีโดยผ่านเครื่องวิเคราะห์ X-ray fluorescence หรือ XRF ทำได้โดยการนำผงตัวอย่างมาบดในครก บดสาร (ceramic or agate mortar) เพื่อให้ตัวอย่างเป็นผงที่ละเอียดขึ้น และมีขนาดของเม็ดผงใกล้เคียงกัน ทาตัวอย่างลงบนเทปด้านที่เป็นกาวบนแผ่นเฟรมที่เตรียมไว้ ใช้ฟู่กันที่สะอาดเกลี่ยผงตัวอย่างให้ติดบนเทปเป็นชั้นบางอย่างสม่ำเสมอ ทำความสะอาดแผ่นตัวอย่างให้เรียบร้อย ตรวจสอบความสม่ำเสมอของแผ่นตัวอย่าง แล้วจึงใช้เทปใสปิดทับตัวอย่าง เพื่อกันไม่ให้ผงหลุดออกจากแผ่นเฟรม





รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

#### 3.4.6 การทดสอบโครงสร้างช่องว่างอากาศโดยวิธีวิเคราะห์ภาพ

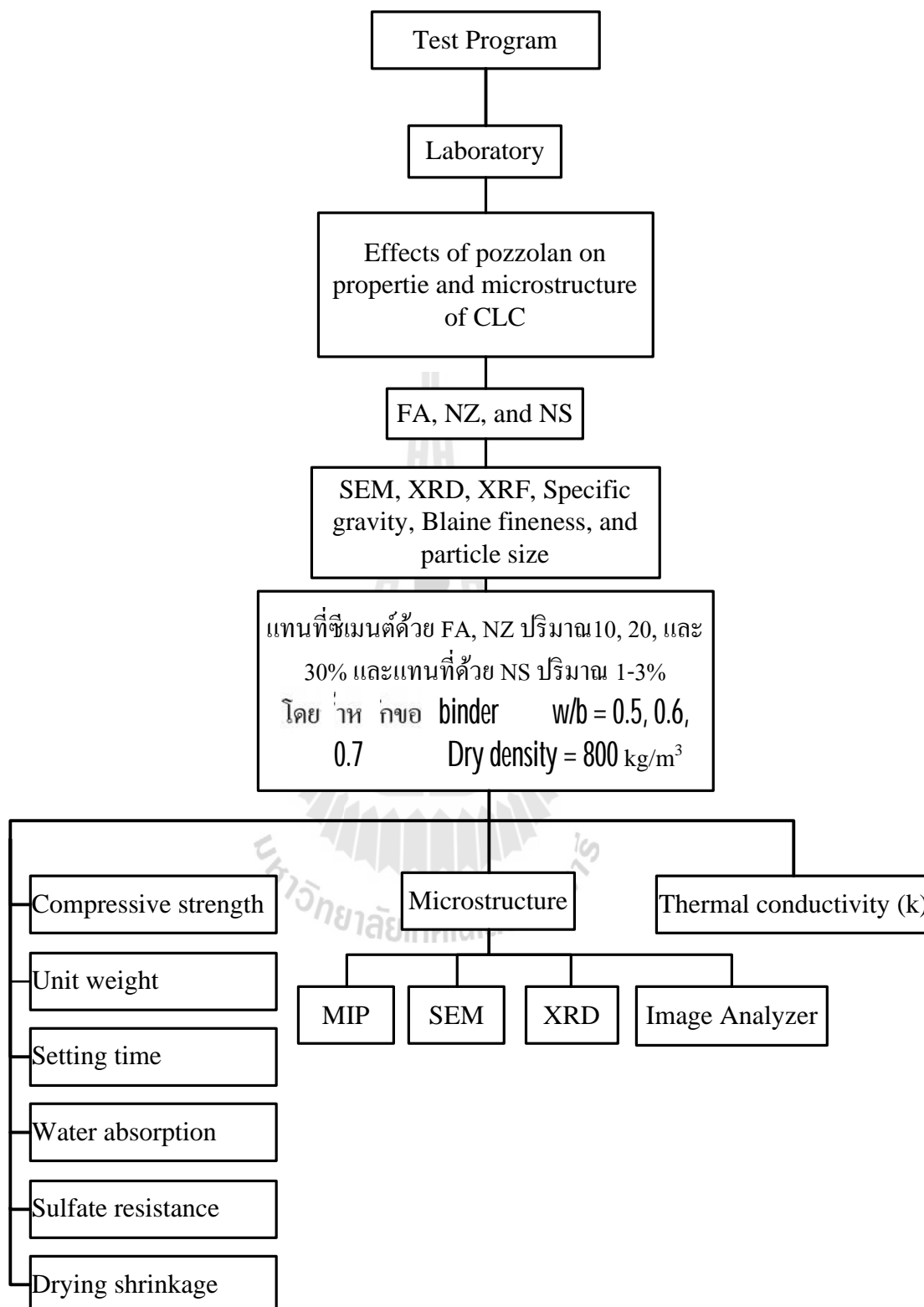
เนื่องจากโครงสร้างช่องว่างอากาศ (air-void structure) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (CLC) ถูกระบุว่าเป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญมากที่สุดของคุณสมบัติระดับจุลภาคที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของ CLC ในการค้นหาวิธีที่จะอธิบายโครงสร้างช่องว่างอากาศ (air-void structure) ของ CLC ซึ่งในบทที่สี่จะมีการประเมินผลวิธีการของการกำหนดของพารามิเตอร์ช่องว่างอากาศสำหรับคอนกรีตกักกระจายฟองอากาศที่แข็งตัวแล้ว

การตัดวัตถุให้ขาดออกจากกันเพื่อจะดูช่องว่างภายในเรียกว่าการทำ Stereology เป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์ภาพ (image analysis) เพราะนั่นหมายถึงวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการสร้างพารามิเตอร์สามมิติ (three-dimensional) ขึ้นใหม่ ที่จะทำให้มีความชัดเจนของโครงสร้างที่ได้จากการวัดบนส่วนตัด (section) ของโครงสร้าง (Pleau et al., 2001) โดยก่อนจะทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะทำการเตรียมชิ้นตัวอย่างทรงลูกบาศก์ความหนาแน่นระหว่าง 12–15 mm ถูกตัดโดยใช้เครื่องตัดใบเพชร ดังที่เห็นในรูปที่ 3.8 ชิ้นตัวอย่างที่ถูกตัดหน้าสัมผัสตั้งฉากกับแนวราบ และตัดแบ่งย่อยเป็นสี่ส่วนอีกครั้งจนมีขนาดของตัวอย่าง 50×50 mm ความหนา 12–15 mm จากนั้นทำการขัดพื้นผิวที่จะทดสอบของตัวอย่างในสภาพเปียกด้วยน้ำโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 180 และ 600 ตามลำดับ เพื่อให้ได้พื้นผิวที่เรียบเนียน ดังที่เห็นในรูปที่ 3.9 จากนั้นชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดด้วยลมเป่าโดยเครื่องอัดอากาศทั่วไป และเตรียมเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 50 °C เพื่อให้แน่ใจว่าผิวแห้งสำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

การประมวลผลภาพและระบบการวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้แสดงในรูปที่ 3.10







## 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

Mix No.	Symbol	%	Mix proportion (kg/m <sup>3</sup> )							
			Pozzolan	Binder				Foaming agent	Water	w/b
				OPC	FA	NZ	NS			
1	CON	-	665.0	-	-	-	-	0.772	332	0.5
2	0.5FA10	10	598.5	66.5	-	-	-	0.759	331	0.5
3	0.5FA20	20	532.0	133.0	-	-	-	0.746	332	0.5
4	0.5FA30	30	465.5	199.5	-	-	-	0.733	331	0.5
5	0.5NZ10	10	598.5	-	66.5	-	-	0.760	331	0.5
6	0.5NZ20	20	532.0	-	133.0	-	-	0.748	332	0.5
7	0.5NZ30	30	465.5	-	199.5	-	-	0.737	331	0.5
8	0.5NS1	1	658.35	-	-	6.65	-	0.771	332	0.5
9	0.5NS2	2	651.7	-	-	13.3	-	0.770	332	0.5
10	0.5NS3	3	645.05	-	-	19.95	-	0.769	332	0.5
11	0.6FA10	10	598.5	66.5	-	-	-	0.777	398	0.6
12	0.6FA20	20	532.0	133.0	-	-	-	0.764	399	0.6
13	0.6FA30	30	465.5	199.5	-	-	-	0.751	398	0.6
14	0.6NZ10	10	598.5	-	66.5	-	-	0.778	398	0.6
15	0.6NZ20	20	532.0	-	133.0	-	-	0.767	399	0.6
16	0.6NZ30	30	465.5	-	199.5	-	-	0.755	398	0.6
17	0.6NS1	1	658.35	-	-	6.65	-	0.789	399	0.6
18	0.6NS2	2	651.7	-	-	13.3	-	0.788	399	0.6
19	0.6NS3	3	645.05	-	-	19.95	-	0.787	398	0.6
20	0.7FA10	10	598.5	66.5	-	-	-	0.795	465	0.7
21	0.7FA20	20	532.0	133.0	-	-	-	0.782	464	0.7
22	0.7FA30	30	465.5	199.5	-	-	-	0.769	465	0.7
23	0.7NZ10	10	598.5	-	66.5	-	-	0.797	465	0.7
24	0.7NZ20	20	532.0	-	133.0	-	-	0.785	464	0.7
25	0.7NZ30	30	465.5	-	199.5	-	-	0.773	465	0.7
26	0.7NS1	1	658.35	-	-	6.65	-	0.807	464	0.7
27	0.7NS2	2	651.7	-	-	13.3	-	0.806	464	0.7
28	0.7NS3	3	645.05	-	-	19.95	-	0.805	464	0.7

: CON = Control mix, OPC = Type-I Portland cement ordinary Portland cement,  
 FA = Fly ash, NZ = Natural zeolite, NS = Nano-silica nano-SiO<sub>2</sub>, w/b =  
 Water-to-binder ratio

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 บทนำ

คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสในงานวิจัยนี้เป็นการนำสารเพิ่มฟองชนิดสังเคราะห์มาทำให้เป็นฟองโฟมก่อนผสมลงบนคอนกรีตสดโดยใช้วัสดุปอชโซลานธรรมชาติหรือสังเคราะห์ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุยึดประสาน ใช้แทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยหรือซีโอไลต์ธรรมชาติในอัตราส่วน 10%, 20%, และ 30% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน และแทนที่ด้วยนาโนซิลิกาในอัตราส่วน 1%, 2%, และ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ทำการหล่อและเก็บก้อนตัวอย่างบ่มที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน ตามลำดับสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน ทดสอบคุณสมบัติการหดตัวแห้ง การเปลี่ยนแปลงความยาวเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุต่าง ๆ ทดสอบความพรุนของก้อนตัวอย่างคอนกรีตในสภาพที่แข็งตัวแล้ว และทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตสด จากผลการศึกษา มีรายละเอียดดังนี้

#### 4.2 คุณสมบัติของวัสดุยึดประสาน

##### 4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดประสาน ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นสีเทา มีปริมาณของแข็งร้อยละ 99.02 และปริมาณความชื้นร้อยละ 0.98 เถ้าลอยมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล มีปริมาณของแข็งร้อยละ 98.77 และปริมาณความชื้นร้อยละ 1.23 ซีโอไลต์ธรรมชาติมีลักษณะเป็นสีขาว อมเขียว มีปริมาณของแข็งร้อยละ 98.59 และปริมาณความชื้นร้อยละ 1.41 ส่วนนาโนซิลิกามีลักษณะเป็นสีขาว มีปริมาณของแข็งร้อยละ 99.8 และปริมาณความชื้นร้อยละ 0.2

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดประสาน

Material	Appearance	Solid content (%)	Moisture content (%)
OPC	Powder (gray)	99.02	0.98
FA	Powder (light brown)	98.77	1.23



ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุยึดประสาน (ต่อ)

Material	Appearance	Solid content (%)	Moisture content (%)
NZ	Powder (white-green)	98.59	1.41
NS	Powder (white)	99.8	0.2

ผลจากการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ แสดงในตารางที่ 4.2 ปูนซีเมนต์ที่ใช้มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 ซึ่งอ้างอิงจากผู้ผลิต มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 14.12  $\mu\text{m}$  และมีพื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีของเบลน 3,600  $\text{cm}^2/\text{g}$  etailoy มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.02 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14.52  $\mu\text{m}$  และมีพื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีของเบลน 4,300  $\text{cm}^2/\text{g}$  ซีโอดีซีธรรมชาติ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.09 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 7.72  $\mu\text{m}$  และมีพื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีของเบลน 11,300  $\text{cm}^2/\text{g}$  และนาโนซิลิกา มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.012  $\mu\text{m}$  และมีพื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีของ BET เท่ากับ 1,040,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  ซึ่งนาโนซิลิกามีขนาดเม็ดอนุภาคเล็กที่สุดและพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด ในบรรดาวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้

ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาค โดยเฉลี่ย และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ

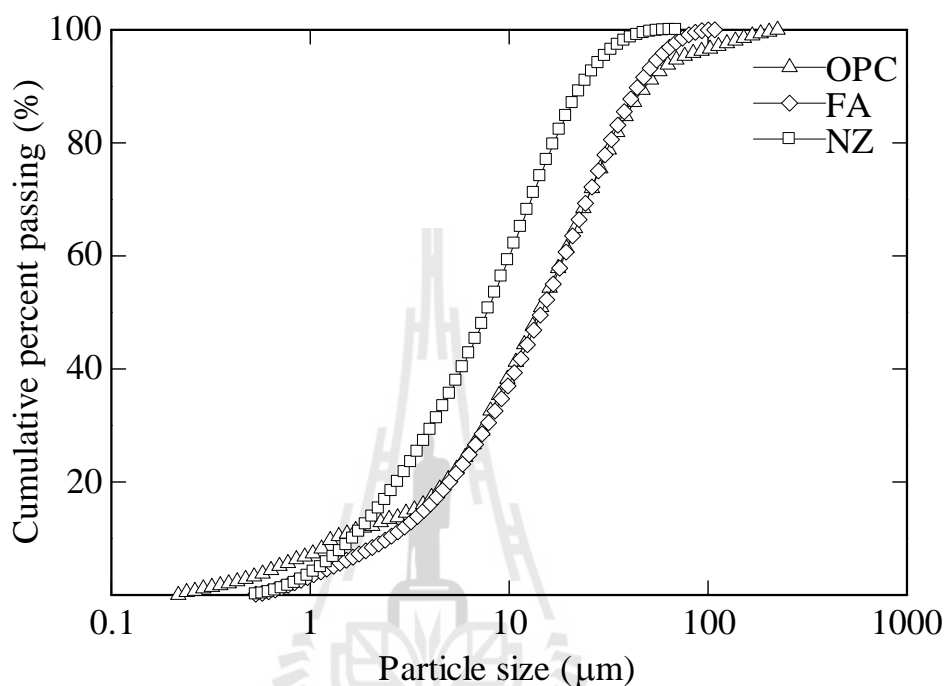
Material	Specific gravity	Median particle size, $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Specific surface area ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	
			Blaine fineness analysis	BET fineness analysis**
OPC	3.15*	14.12	3,600	—
FA	2.02	14.52	4,300	—
NZ	2.09	7.72	11,300	—
NS	2.2*	0.012*	—	1,040,000*

\* ข้อมูลอ้างอิงจากผู้ผลิต

\*\* BET คือ เทคนิคการวิเคราะห์การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุโดยอาศัยหลักทฤษฎีการดูดซับ (adsorption) ทางกายภาพของโมเลกุลก๊าซที่มีต่อพื้นผิวของแข็งอย่างหนึ่ง (Brunauer et al., 1938)

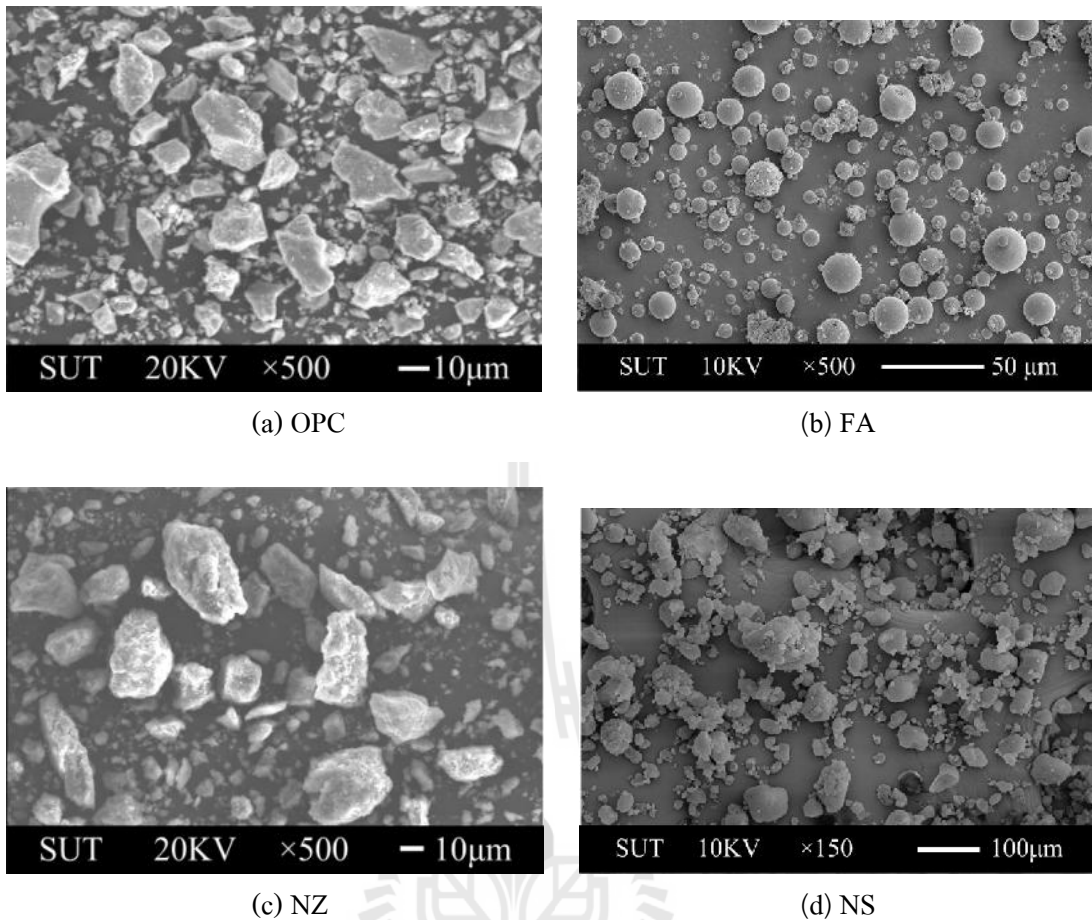
การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุปอซโซลานที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าปูนซีเมนต์มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.217–223.6  $\mu\text{m}$  etailoy มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.532–108.1  $\mu\text{m}$  และซีโอดีซีธรรมชาติมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.532–69  $\mu\text{m}$  ซึ่งการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอดีซีธรรมชาติมีลักษณะที่คล้ายกับของetailoy และขนาดอนุภาคโดย

เฉลี่ยของซีโอไลต์ธรรมชาติค่อนข้างเล็กกว่าเถ้าลอย แต่ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยใกล้เคียงกัน ส่วนนาโนซิลิกาไม่สามารถทดสอบหาการกระจายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Laser particle size analyzer ได้ ผลทดสอบการกระจายขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาจึงไม่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุ

จากภาพถ่ายขยายกำลังสูงวัสดุยึดประสานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) หรือ SEM พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนมีเหลี่ยมมุม ผิวค่อนข้างเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2(a) และเถ้าลอยมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลมมน ผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (b) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 (c) พบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ มีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนเหลี่ยมคล้ายกับอนุภาคซีเมนต์แต่ผิวหยาบและมีรูพรุน ส่วนนาโนซิลิกามีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนเกือบกลมไม่มีเหลี่ยมและมีผิวที่เรียบ โดยก้อนขนาดใหญ่เกิดจากการเกาะกลุ่มกันของก้อนที่มีขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (d)



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายกำลังสูง SEM ของวัสดุยึดประสาน

#### 4.2.2 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสาน โดย X-ray Fluorescence หรือ XRF แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบออกไซด์หลักอยู่ในรูปของสารประกอบ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เท่ากับ 66.96% และ 19.85% ตามลำดับ ส่วนเถ้าลอยและซีโอไลต์ธรรมชาติ มีซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมิเนียมไตรออกไซด์ เท่ากับ 43.87%, 75.32% และ 26.33%, 10.28% ตามลำดับ ซึ่งผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มีปริมาณมากกว่า 70% โดยน้ำหนัก ซึ่งเถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินแม่เมาะ จัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดสังเคราะห์ชั้น F (Class F) และยังมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) สูงเกินกว่า 10% โดยน้ำหนัก จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง (high-calcium fly ash) ตามมาตรฐาน ASTM C618-2001 ส่วนนาโนซิลิกา มีซิลิกอนไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว 99.8%

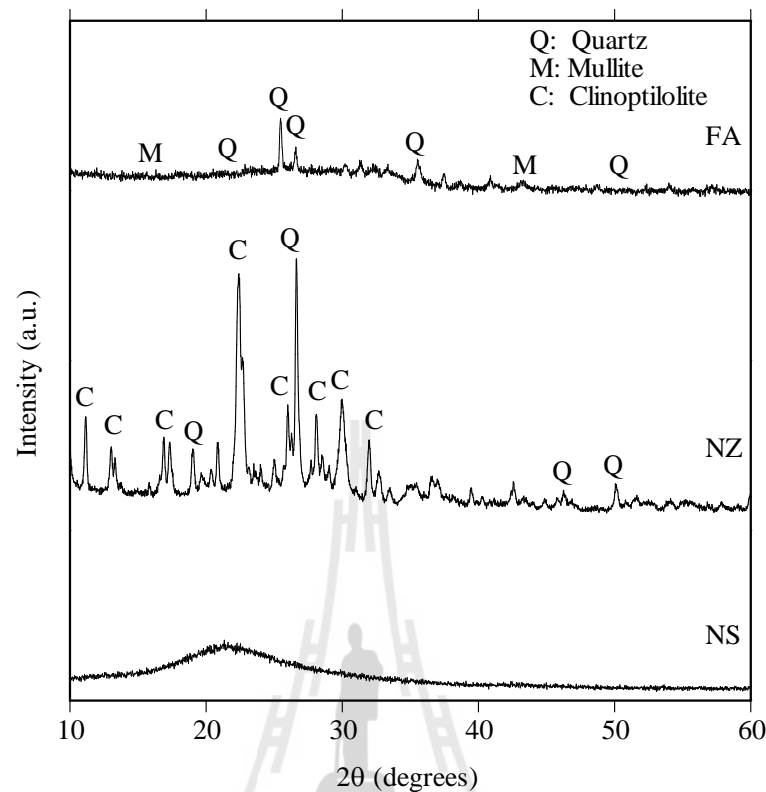
และซีโอไลต์ธรรมชาติถึงแม้จะไม่ผ่านการเผาจึงจัดว่าเป็นวัสดุพอชโซลานชนิดธรรมชาติชั้น N และยังมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์สูงกว่าของถ้ำลอย

จากการวิเคราะห์หาแร่ที่เป็นองค์ประกอบเพื่อระบุชนิดของซีโอไลต์ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) หรือ XRD พบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นชนิดไคลนออปติโลไลท์ (Clinoptilolite, (Na, K, Ca)<sub>6</sub>(Si, Al)<sub>36</sub>O<sub>72</sub>·20H<sub>2</sub>O) ตาม Pattern ที่ปรากฏ (รูปที่ 4.3) ซึ่งมีแร่ควอตซ์ (Quartz) ผสมอยู่เล็กน้อย และมีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) เฟสค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับถ้ำลอย ส่วนนาโนซิลิกามีความเป็น อสัณฐานค่อนข้างสูงหรือรูปผลึกค่อนข้างต่ำ โดยสังเกตได้จากค่าความเข้มข้นของ Intensity ที่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับถ้ำลอยและซีโอไลต์ธรรมชาติ ดังในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่านาโนซิลิกามีแนวโน้มจะทำปฏิกิริยาพอชโซลานิกได้ดี

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุซีดประสาน

Chemical composition	OPC (wt%)	FA (wt%)	NZ (wt%)	NS (wt%)
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	19.85	43.87	75.32	99.8
Aluminum trioxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.49	26.33	10.28	–
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.56	10.81	2.66	–
Calcium oxide (CaO)	66.96	12.69	3.95	–
Magnesium oxide (MgO)	1.36	1.23	1.2	–
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	–	–	0.89	–
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	0.34	1.10	4.29	–
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	2.46	2.74	–	–
LOI	0.98	1.23	1.41	0.2
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	81.01	88.26	–

LOI: loss on ignition



รูปที่ 4.3 XRD patterns โครงสร้างผลึกของวัสดุยึดประสาน

#### 4.3 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

จากการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (initial set) และปลาย (final set) พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุม (CON) ที่ยังไม่มีวัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและปลายเท่ากับ 5.2 ชั่วโมง และ 13.1 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานและปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่ามีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเปลี่ยนไป ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวยืดออกไปตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย FA และ NZ ที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ FA และ NZ เพิ่มขึ้นจาก 5.2 ถึง 14.45 ชั่วโมง และ จาก 5.2 ถึง 12.15 ชั่วโมง ตามลำดับ ขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวปลายของ FA และ NZ เพิ่มขึ้นจาก 13.1 ถึง 23.5 ชั่วโมง และ จาก 13.1 ถึง 19.95 ชั่วโมงตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.5 อย่างไรก็ตามมีบางส่วนผสมตามที่ออกแบบไว้ (Mix No. 8, 9, และ 10) ไม่สามารถขึ้นรูปเป็น CLC ในระหว่างขั้นตอนการผสมได้ เนื่องจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอ คอนกรีตมีความชื้นเหลวต่ำ ทำให้โฟมเหลวที่ฉีดใส่แทรกอยู่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์สดได้ไม่

ดีเท่าที่ควร จึงไม่ได้ทำการเก็บตัวอย่างสำหรับทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

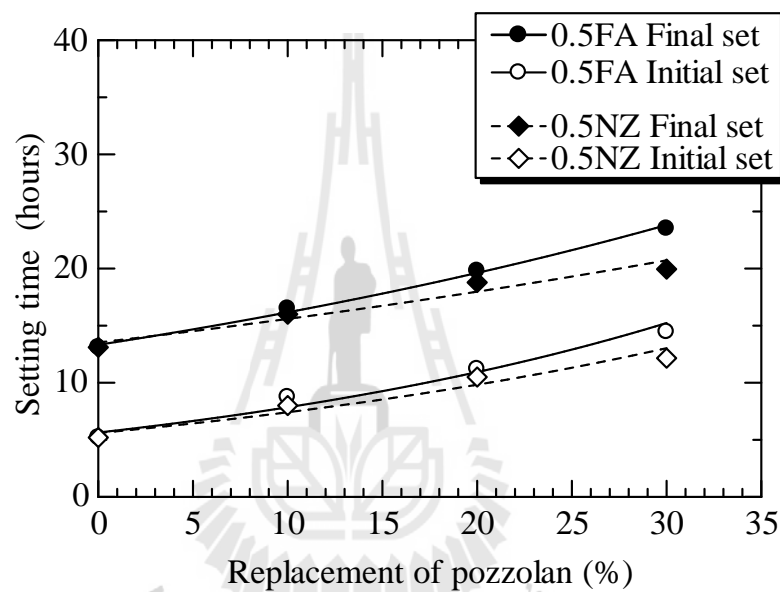
ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

Mix No.	Symbol	Time (hours)	
		Initial set	Final set
1	CON	5.2	13.1
2	0.5FA10	8.75	16.5
3	0.5FA20	11.2	19.8
4	0.5FA30	14.45	23.5
5	0.5NZ10	8.0	16.0
6	0.5NZ20	10.5	18.78
7	0.5NZ30	12.15	19.95
8	0.5NS1	–	–
9	0.5NS2	–	–
10	0.5NS3	–	–
11	0.6FA10	7.5	16.8
12	0.6FA20	11.3	20.2
13	0.6FA30	15.9	24.4
14	0.6NZ10	8.1	16.0
15	0.6NZ20	9.25	18.85
16	0.6NZ30	13.5	21.5
17	0.6NS1	5.6	11
18	0.6NS2	6.4	9
19	0.6NS3	6.6	8
20	0.7FA10	8.7	17
21	0.7FA20	12	21.7
22	0.7FA30	18	26.5
23	0.7NZ10	8.5	16.5
24	0.7NZ20	10.5	19.25
25	0.7NZ30	14.5	23

หมายเหตุ : ส่วนผสมของ Mix No. 8, 9, และ 10 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็น CLC ได้

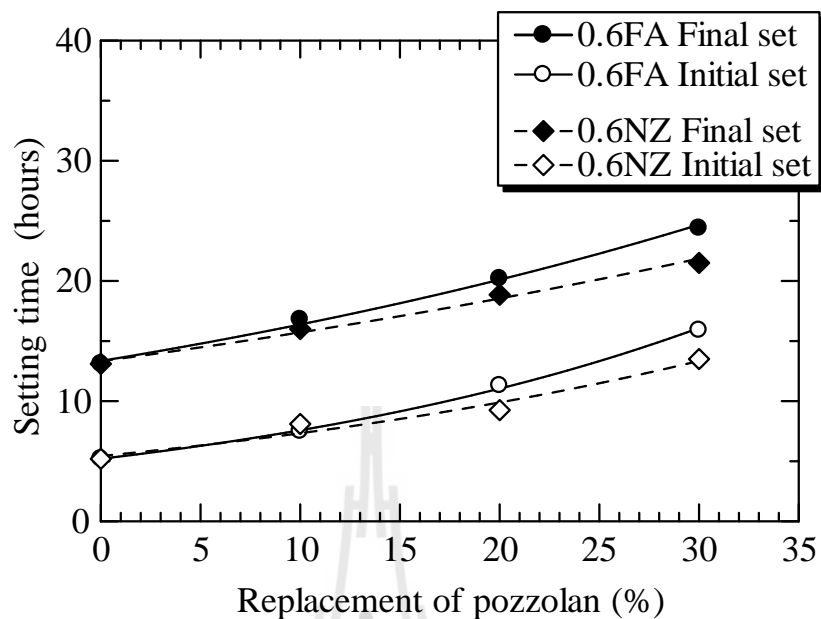
ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส (ต่อ)

Mix No.	Symbol	Time (hours)	
		Initial set	Final set
26	0.7NS1	5.7	12
27	0.7NS2	7.2	10
28	0.7NS3	7.5	9



รูปที่ 4.4 ผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA และ NZ ต่อระยะเวลาการก่อตัวของ CLC ที่ w/b = 0.5

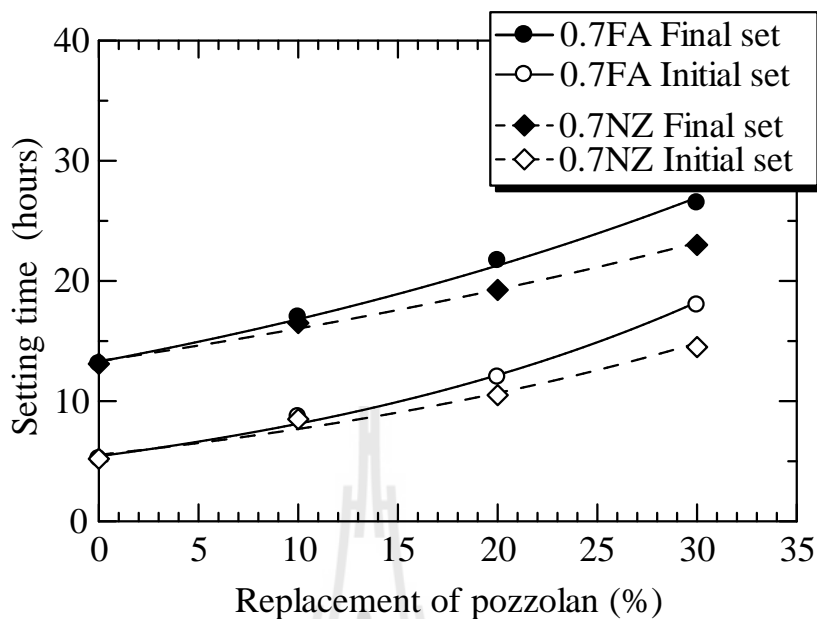
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวยืดยาวออกไปตามปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA และ NZ ที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ FA และ NZ เพิ่มขึ้นจาก 5.2 ถึง 15.9 ชั่วโมง และ จาก 5.2 ถึง 13.5 ชั่วโมง ตามลำดับ ขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวปลายของ FA และ NZ เพิ่มขึ้นจาก 13.1 ถึง 24.4 ชั่วโมง และ จาก 13.1 ถึง 21.5 ชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน 0.6



รูปที่ 4.5 ผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA และ NZ ต่อระยะเวลาการก่อตัวของ CLC ที่  $w/b = 0.6$

ผลจากการเพิ่มปริมาณน้ำหรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานให้สูงขึ้นจาก  $w/b = 0.5$  ถึง 0.7 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มยืดออกไปตามปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ FA และ NZ เพิ่มขึ้นจาก 5.2 ถึง 18 ชั่วโมง และ จาก 5.2 ถึง 14.5 ชั่วโมง ตามลำดับ ขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวปลายของ FA และ NZ เพิ่มขึ้นจาก 13.1 ถึง 26.5 ชั่วโมง และจาก 13.1 ถึง 23 ชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน 0.7 ดังรูปที่ 4.6



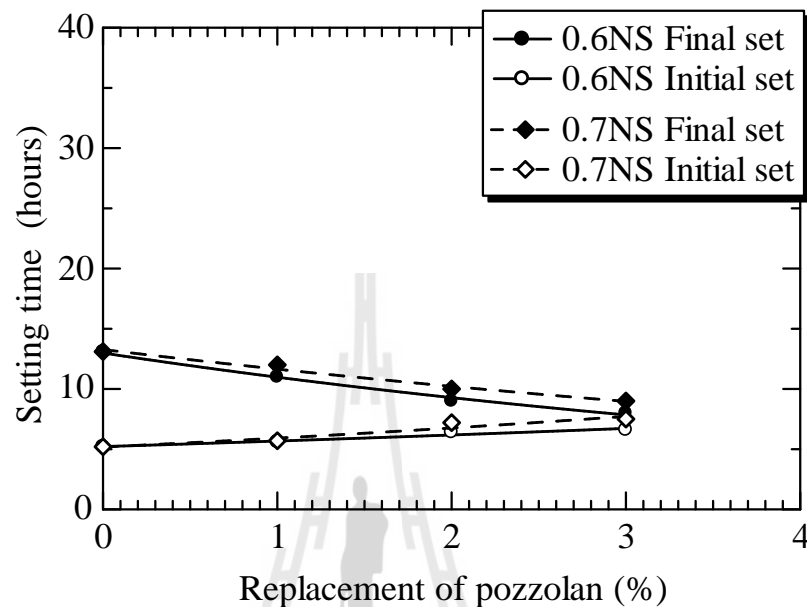


รูปที่ 4.6 ผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA และ NZ ต่อระยะเวลาการก่อตัวของ CLC ที่  $w/b = 0.7$

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มสั้นลงเล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกา (NS) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการแทนที่ด้วย FA หรือ NZ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ NS เพิ่มขึ้นจาก 5.2 ถึง 6.6 ชั่วโมง ขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวปลายของ NS ลดลงจาก 13.1 เหลือ 8 ชั่วโมง สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย NS ในปริมาณเพียง 1–3 % ของน้ำหนักวัสดุยึดประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน 0.6

ผลจากการเพิ่มปริมาณน้ำให้สูงขึ้นพบว่าระยะเวลาการก่อตัวยืคออกไปเล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย NS และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ NS เพิ่มขึ้นจาก 5.2 ถึง 7.5 ชั่วโมง ขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวปลายของ NS ลดลงจาก 13.1 เหลือ 9 ชั่วโมง สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย NS ในปริมาณ 1–3 % ของน้ำหนักวัสดุยึดประสานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน 0.7 อย่างไรก็ตามการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS ในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้แนวโน้มระยะห่างของเวลาระหว่างการก่อตัวเริ่มต้นกับการก่อตัวปลายมีแนวโน้มที่สั้นลงอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.7 เนื่องจาก NS มีขนาดอนุภาคเล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีของ BET สูงถึง  $1,040,000 \text{ cm}^2/\text{g}$  ส่งผลให้ความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงตาม จึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสั้นลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Canpolat et al.

(2004), Kroehong et al. (2011), Zhang et al. (2012) ที่พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานที่มีขนาดละเอียดจะให้ผลผลิตที่ดีกว่าวัสดุปอซโซลานที่มีขนาดหยาบ

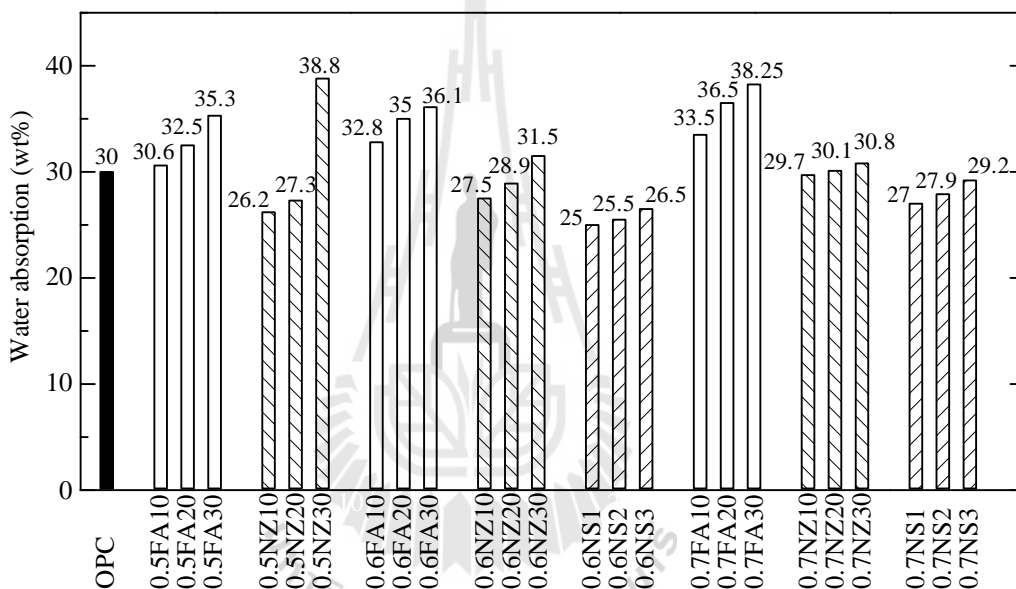


รูปที่ 4.7 ผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS ต่อระยะเวลาการก่อตัวของ CLC ที่  $w/b = 0.6$  และ  $0.7$

ผลจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน FA และ NZ ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ เนื่องจากเถ้าลอยและซีโอไลด์ธรรมชาติ มีออกไซด์ของซิลิกาสูง ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ประกอบกับคุณลักษณะของซีโอไลด์ธรรมชาติที่มีความพรุนสูง ทำให้มีพื้นที่สัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกได้เร็วขึ้น ในขณะที่เดียวกันการแทนที่ที่ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลทำให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ลดลง จึงเป็นเหตุให้เวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์นานกว่าส่วนผสมควบคุมที่ใช้ซีเมนต์ล้วนซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Canpolat et al. (2004) ที่พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงอันเนื่องมาจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน อย่างไรก็ตามระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสม NZ สั้นกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสม FA เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าของ NZ ด้วยพื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีของเบลน (Blaine fineness) ถึง  $11,300 \text{ cm}^2/\text{g}$

#### 4.4 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

ผลของการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าการดูดซึมน้ำของส่วนผสมควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน (CON) เท่ากับ 30% โดยน้ำหนัก ขณะที่ส่วนผสมที่ใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ซีเมนต์ของ 0.5FA10, 0.5FA20, และ 0.5FA30 มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 30.6%, 32.5%, และ 35.3% โดยน้ำหนักตามลำดับ ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม FA เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของ FA ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคล้ายรายงานผลการวิจัยของ Kunhanandan Nambiar and Ramamurthy (2007)



รูปที่ 4.8 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน

ค่าการดูดซึมน้ำของส่วนผสม 0.5NZ10 และ 0.5NZ20 เท่ากับ 26.3% และ 27.3% โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าการดูดซึมน้ำของ CON อันเนื่องมาจากผลของปริมาณโพรงอากาศ (pore bubble) ของฟองโฟมที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ซึ่งสามารถลดปริมาณการดูดซึมน้ำลงได้เล็กน้อยด้วยการแทนที่ของ NZ อย่างไรก็ตามการดูดซึมน้ำของ 0.5NZ30 มีปริมาณสูงขึ้น (38.8%) โดยน้ำหนัก สูงกว่าการดูดซึมน้ำของ CON เนื่องจากผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ ในระดับการแทนที่ 30% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ที่  $w/b=0.5$  เป็นเหตุให้ความพรุนคาปิลลารีและความพรุนรวมมีปริมาณสูงกว่าทุกส่วนผสม จึงส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำที่สูงตาม ซึ่งสอดคล้องกับผลการรายงานวิจัยของ Ahmadi and Shekarchi (2010), Chindapasirt and Rattanasak (2011) ที่พบว่า

การดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์ต่อความพรุน กล่าวคือการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของปริมาณโพรงคาปิลลารีในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสจะส่งผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อยเช่นกัน

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม NZ นั้นมีผลต่อการดูดซึมน้ำมากกว่าที่ผสมด้วย FA ที่ระดับการแทนที่ 0–20% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน และที่  $w/b = 0.5$  แต่การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม FA ในปริมาณ 30% (0.5FA30) โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าส่วนผสมของ 0.5NZ30 เล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่นการดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ FA แทนที่ระดับ 30% เพิ่มขึ้นจาก 35.3% เป็น 38.25% สำหรับอัตราส่วน  $w/b = 0.5$  และ 0.7 ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน การดูดซึมน้ำของส่วนผสมที่ใช้ NS แทนที่ระดับ 3% เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 26.5% เป็น 29.2% สำหรับอัตราส่วน  $w/b = 0.6$  และ 0.7 ตามลำดับ แต่สำหรับการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ ในระดับปริมาณสูง (มากกว่า 30%) และใช้อัตราส่วน  $w/b$  ที่ต่ำ ( $w/b = 0.5$ ) พบว่ามีการดูดซึมน้ำสูง แต่ก็มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก NZ มีขนาดอนุภาคที่เล็กและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเมื่อเทียบกับ FA ทำให้ความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงขึ้นส่งผลให้เกิดโพรงอากาศคาปิลลารีและโพรงเชื่อมต่อกันมีมากที่ระดับอัตราส่วน  $w/b$  ต่ำ ฉะนั้นเมื่อมีการเพิ่มน้ำในส่วนผสมให้สูงขึ้น ความเพียงพอของปริมาณในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและการขึ้นรูปโพรงอากาศจากสารเพิ่มฟองจึงเหมาะสมในระดับอัตราส่วน  $w/b$  ที่สูงส่งผลให้การดูดซึมน้ำของส่วนผสม 0.5NZ30 ลดลงจาก 38.8% มาเป็น 31.5% และ 30.8% สำหรับ 0.6NZ30 และ 0.7NZ30 ตามลำดับ

การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม 0.6NS1 มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด (25%) ในทุกส่วนผสมเนื่องจาก NS มีขนาดอนุภาคที่เล็กทำให้มีประสิทธิภาพหรือความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกและการที่ NS มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงนั้นทำให้ความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงขึ้น ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์ได้ผลิตภัณฑ์ C–S–H และ C–A–H ที่มากขึ้น โพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่ลดลง คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้นดังนั้นการดูดซึมน้ำจึงลดต่ำลงในที่สุด

## 4.5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

### 4.5.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.5$

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงอัดสัมพัทธ์ (Relative strength) เทียบกับส่วนผสมควบคุมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนด้วยเถ้าลอย ซีโอไลต์ธรรมชาติและนาโนซิลิกา พบว่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม

ควบคุม ที่อายุการบ่ม 3, 14, 28, และ 60 วัน เท่ากับ 1.81, 2.7, 3.05, และ 3.15 MPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์กับน้ำทำให้เพิ่มปริมาณของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ส่งผลต่อการพัฒนากำลังที่ดี (Scrivener and Nonat, 2011)

ที่อายุ 3 วัน กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA ในปริมาณ 10% โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสานมีกำลังสูงกว่าส่วนผสมควบคุมเล็กน้อย ผลที่ได้นี้เป็นเพราะว่า ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ที่พอเหมาะของ FA ทำให้อัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกและการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคและส่งผลดีต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ (Chindaprasirt et al., 2005; Kunhanandan Nambiar and Ramamurthy, 2006; Wongkeo and Chaipanich, 2010) กำลังรับแรงอัดซีเมนต์เพสต์ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแทนที่ด้วย FA ในปริมาณ 20% หรือ 30% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานมีกำลังต่ำกว่าส่วนผสมควบคุมเนื่องจากผลของปริมาณซีเมนต์ที่ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Koliass and Georgiou (2005) นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน ที่อายุ 14, 28, และ 60 วัน ต่ำกว่าทุกส่วนผสมเนื่องจากปริมาณการแทนที่ด้วย FA ที่สูง แล้กลายเป็นวัสดุปอซโซลานิกและความเป็นปฏิกิริยาปอซโซลานิกของมันต่ำเมื่อเทียบกับ OPC ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดจึงช้ากว่า ดังในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

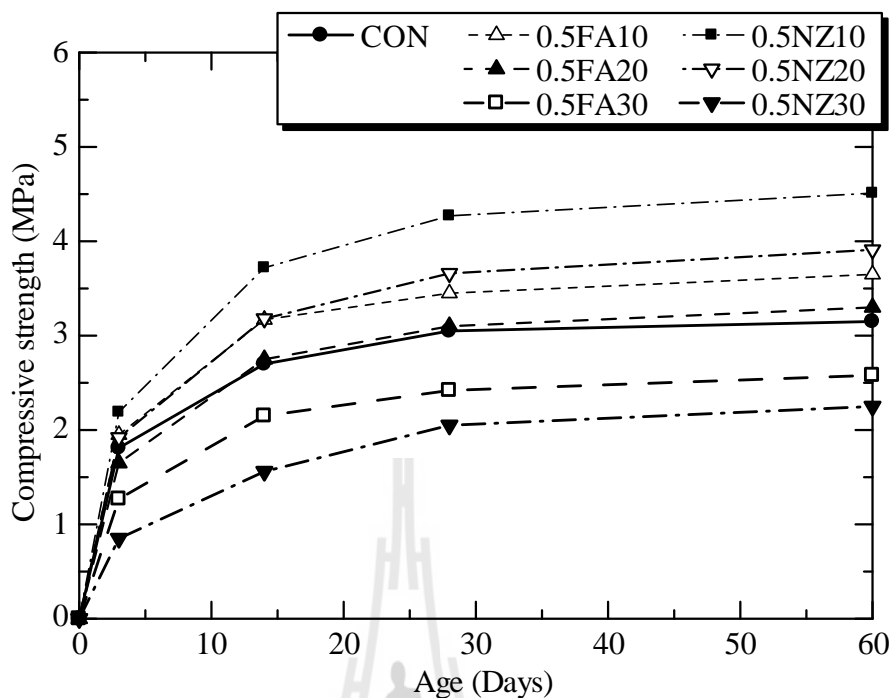
Mix No.	Symbol	Compressive strength, MPa (Relative strength to CON, %)			
		3 d	14 d	28 d	60 d
1	CON	1.81 (100)	2.70 (100)	3.05 (100)	3.15 (100)
2	0.5FA10	1.95 (108)	3.17 (117)	3.45 (113)	3.65 (116)
3	0.5FA20	1.65 (91)	2.75 (102)	3.10 (102)	3.30 (105)
4	0.5FA30	1.27 (70)	2.15 (80)	2.42 (79)	2.58 (82)
5	0.5NZ10	2.19 (121)	3.72 (138)	4.27 (140)	4.51 (143)
6	0.5NZ20	1.92 (106)	3.18 (118)	3.66 (120)	3.91 (124)
7	0.5NZ30	0.85 (47)	1.56 (58)	2.05 (67)	2.25 (71)
8	0.5NS1	–	–	–	–
9	0.5NS2	–	–	–	–
10	0.5NS3	–	–	–	–

หมายเหตุ : ส่วนผสมของ Mix No. 8, 9, และ 10 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็น CLC ได้

ตารางที่ 4.5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า (ต่อ)

Mix No.	Symbol	Compressive strength, MPa (Relative strength to CON, %)			
		3 d	14 d	28 d	60 d
11	0.6FA10	1.9 (105)	2.9 (107)	3.2 (105)	3.51 (111)
12	0.6FA20	1.53 (85)	2.58 (96)	3.05 (100)	3.26 (103)
13	0.6FA30	1.2 (66)	2.03 (75)	2.35 (77)	2.45 (78)
14	0.6NZ10	2.24 (124)	3.32 (123)	3.84 (126)	4.16 (132)
15	0.6NZ20	2.41 (133)	3.7 (137)	4.25 (139)	4.65 (148)
16	0.6NZ30	1.75 (97)	2.6 (96)	3.14 (103)	3.37 (107)
17	0.6NS1	2.9 (160)	3.7 (137)	4.1 (134)	4.29 (136)
18	0.6NS2	2.4 (133)	3.13 (116)	3.4 (111)	3.51 (111)
19	0.6NS3	1.5 (83)	2.25 (83)	2.45 (80)	2.5 (79)
20	0.7FA10	1.8 (99)	2.8 (104)	3.11 (102)	3.3 (105)
21	0.7FA20	1.47 (81)	2.5 (93)	2.9 (95)	3.1 (98)
22	0.7FA30	1.2 (66)	1.89 (70)	2.2 (72)	2.35 (75)
23	0.7NZ10	1.51 (83)	2.55 (94)	3.15 (103)	3.53 (112)
24	0.7NZ20	2.05 (113)	3.2 (119)	3.8 (125)	4.4 (140)
25	0.7NZ30	2.4 (133)	3.7 (137)	4.4 (144)	4.9 (156)
26	0.7NS1	3.35 (185)	4.25 (157)	4.7 (154)	5 (159)
27	0.7NS2	2.72 (150)	3.45 (128)	3.75 (123)	4.04 (128)
28	0.7NS3	1.9 (105)	2.45 (91)	2.78 (91)	2.93 (93)

กำลังรับแรงอัดของ NZ30 ที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน เท่ากับ 0.85, 1.56, 2.05, และ 2.25 MPa ตามลำดับ ซึ่งกำลังอัดต่ำกว่าของส่วนผสม OPC เนื่องจากปริมาณ NZ ที่สูงและอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ช้าของซีโอไลต์ กล่าวคือการแทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติในปริมาณที่สูงเกินไปทำให้ไม่เกี่ยวพันต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.9 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.5$

กำลังรับแรงอัดของ NZ10, และ NZ20 ที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน เท่ากับ 2.19, 3.72, 4.27, และ 4.51 MPa และ 1.92, 3.18, 3.66, และ 3.91 MPa ตามลำดับ ซึ่ง ณ ที่เวลาเดียวกันกำลังอัดเหล่านั้นสูงกว่าของส่วนผสมควบคุม ปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ที่สูง และขนาดอนุภาคของ NZ ที่มีขนาดเล็ก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย =  $7.72 \mu\text{m}$ ) ทำให้ปรับปรุงปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการปรับปรุงกำลังรับแรงอัดให้ดีขึ้นตามอายุ ดังรูปที่ 4.9

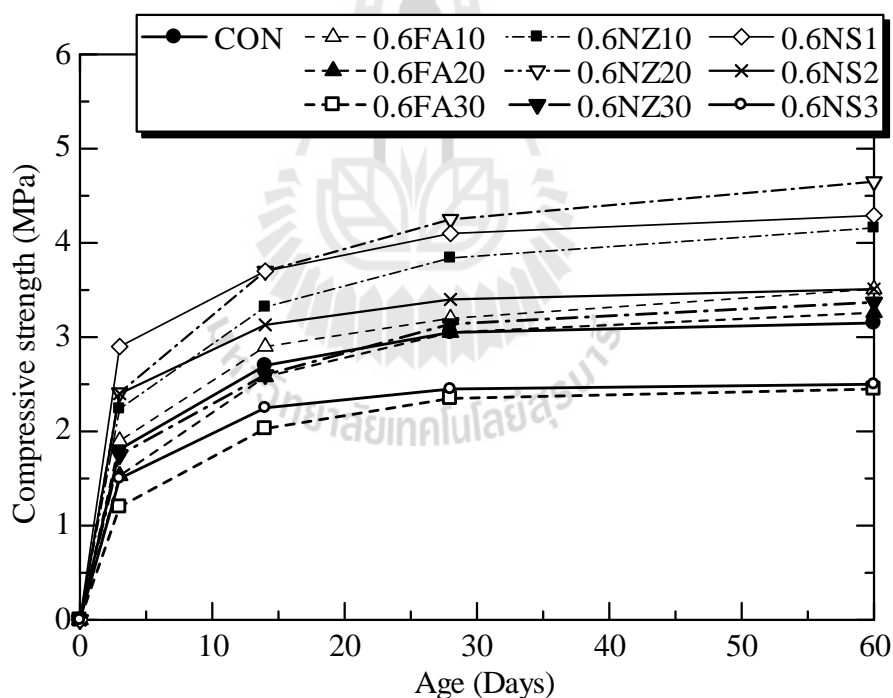
ที่ระดับปริมาณการแทนที่ 10% และ 20% กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม NZ สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม FA ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.9 เนื่องจาก NZ มีระดับความบริสุทธิ์สูง (90%) และมีปริมาณซิลิกาสูงเมื่อเทียบกับของ FA สอดคล้องกับรายงานผลการวิจัยของ Ahmadi and Shekarchi (2010)

#### 4.5.2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.6$

รูปที่ 4.10 แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.6$  กำลังรับแรงอัดของ 0.6FA10 และ 0.6FA20 ที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน เท่ากับ 1.9, 2.9, 3.2, และ 3.51 MPa และ 1.53, 2.58, 3.05, และ 3.26 MPa ตามลำดับ ซึ่งกำลังอัดยังสูงกว่าของ OPC ที่

w/b = 0.5 ส่วนกำลังรับแรงอัดของ 0.6FA30 ที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน เท่ากับ 1.2, 2.03, 2.35, และ 2.45 MPa ตามลำดับซึ่งต่ำกว่าของ OPC เล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงขึ้น จาก w/b = 0.5 มาเป็น 0.6 นี้สังเกตพบว่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม FA ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากผลของปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ที่สูงกว่า

กำลังรับแรงอัดของ 0.6NZ20 และ 0.6NZ30 ที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน เท่ากับ 2.41, 3.7, 4.25, และ 4.65 MPa และ 1.75, 2.6, 3.15, และ 3.37 MPa ตามลำดับ ซึ่งกำลังอัดสูงกว่าที่ w/b = 0.5 และกำลังอัดในอายุปลายของ 0.6NZ30 มีแนวโน้มสูงกว่าของส่วนผสม OPC เนื่องจากเติมการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ ที่ปริมาณ 30% ที่ w/b = 0.5 ทำให้ปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกของซีโอล์ไคต์ยังไม่เหมาะสม ฉะนั้นเมื่อปรับ w/b ให้สูงขึ้นอีกเล็กน้อย (w/b = 0.6) ปริมาณน้ำจึงเพียงพอและส่งผลเกี่ยวพันต่อกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ 0.6NZ30 อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.10

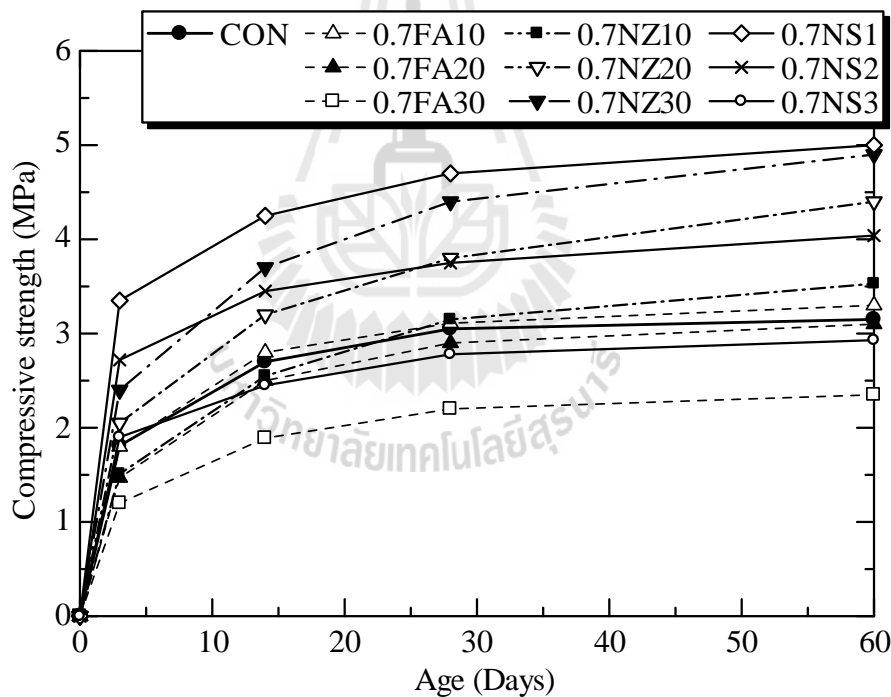


รูปที่ 4.10 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ w/b = 0.6

กำลังรับแรงอัดของ 0.6NS1 และ 0.6NS2 ที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน เท่ากับ 2.9, 3.7, 4.1, และ 4.29 MPa และ 2.4, 3.13, 3.4, และ 3.51 MPa ตามลำดับ ซึ่งกำลังอัดสูงกว่าของส่วนผสม OPC กำลังอัดในช่วงเริ่มต้นของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมนาโนซิลิกา (NS) แทนที่ซีเมนต์ 1% (0.6NS1) สูงกว่าของ 0.6NZ20 เนื่องจากขนาดอนุภาคเล็กของนาโนซิลิกา (0.012  $\mu\text{m}$ )



ทำให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการปรับปรุงกำลังรับแรงอัดให้ดีขึ้นในช่วงอายุเริ่มต้นแต่กำลังอัดในระยะปลายยังต่ำกว่า 0.6NZ20 ขณะที่กำลังรับแรงอัดของ 0.6NS3 ที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน เท่ากับ 1.5, 2.25, 2.45, และ 2.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งกำลังอัดต่ำกว่าของส่วนผสม OPC เนื่องจากปริมาณ NS ที่สูงและอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของ NS ช้าลง กล่าวคือการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาในปริมาณที่สูงเกิน หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS ทำให้สัดส่วนของซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์ลดลง จึงมี  $\text{Ca(OH)}_2$  ไม่เพียงพอสำหรับทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารปอซโซลานที่มีอยู่ใน NS กับ  $\text{Ca(OH)}_2$  จึงเกิดขึ้นได้น้อย ดังนั้นการรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์จึงลดลง ซึ่งคล้ายกับกรณีการแทนที่ด้วย FA และ NZ ในปริมาณ 30% ที่  $w/b = 0.5$



รูปที่ 4.11 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.7$

#### 4.5.3 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.7$

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม FA แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 10%–30% และ NZ แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 10%–20% ของวัสดุยึดประสานมีกำลังลดลงเล็กน้อยตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น ส่วนการแทนที่ด้วย

NZ ในปริมาณ 30% ของวัสดุยึดประสานมีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปริมาณน้ำบางส่วนที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมถูกดูดกลืนเข้าไปในอนุภาคของ NZ อย่างเพียงพอ ทำให้น้ำส่วนที่เหลือจากการดูดกลืนมีปริมาณเพียงพอในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก

กำลังรับแรงอัดของ 0.7NS1, 0.7NS2, และ 0.7NS3 ที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน เท่ากับ 3.35, 4.25, 4.7, และ 5 MPa และ 2.72, 3.45, 3.75, และ 4.04 MPa และ 1.9, 2.45, 2.78, และ 2.93 MPa ตามลำดับ ซึ่งกำลังอัดสูงกว่า NS ที่ระดับ w/b = 0.6 และที่อายุ 3 วันมีกำลังอัดสูงกว่าของส่วนผสม OPC เนื่องจากขนาดอนุภาคเล็กของ NS (0.012  $\mu\text{m}$ ) ทำให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่เพิ่มขึ้นในช่วงอายุต้น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ซีเมนต์ด้วย NS ในปริมาณ 1% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.7 มีกำลังสูงที่สุดกว่าทุกส่วนผสม สอดคล้องกับรายงานผลการวิจัยของ Zhang and Islam (2012) เนื่องจากการมีพื้นที่ผิวจำเพาะตามวิธีของ BET สูง (1,040,000  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) ของ NS ทำให้ความต้องการปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกของนาโนซิลิกาเหมาะสมที่ w/b = 0.7 ดังนั้นปริมาณน้ำที่เพียงพอส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ 0.7NS1 สูงทั้งอายุต้นและปลาย อย่างมีนัยสำคัญ ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 ในขณะที่เพสต์ 0.7NS3 ให้กำลังอัดต่ำ เนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วย NS สูงถึงร้อยละ 3 ทำให้กำลังอัดของ C-S-H จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นน้อย กล่าวคือการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS ทำให้สัดส่วนของซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้ปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ลดลง จึงมี  $\text{Ca(OH)}_2$  ไม่เพียงพอสำหรับทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก จึงเป็นผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารปอซโซลานที่มีอยู่ใน NS กับ  $\text{Ca(OH)}_2$  เกิดขึ้นได้น้อย ดังนั้นกำลังรับแรงอัดซีเมนต์เพสต์ของ 0.7NS3 จึงลดลง อย่างไรก็ตามถึงแม้กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุต้นของส่วนผสม 0.7NS3 ต่ำกว่า OPC แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงอายุปลายตามปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังสังเกตได้จากรูปที่ 4.11

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส มี 3 ปัจจัย ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลของการอัดแทรก (filler effect) และปฏิกิริยาปอซโซลานิก ผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นเกี่ยวข้องกับโดยตรงต่อปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสม ส่วนผลของการอัดแทรกอาจแบ่งได้เป็นสองปัจจัยด้วยกันคือ ผลจากการอัดตัว (packing effect) และผลจากการกระจายตัว โดยทั้งสองปัจจัยขึ้นอยู่กับความละเอียดของวัสดุ ซึ่งผลของการกระจายตัวเกิดขึ้นได้เมื่ออนุภาควัสดุมีขนาดเล็ก และจะส่งผลทำให้ซีเมนต์เพสต์มีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ขณะที่ผลจากการอัดตัวนั้นเป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะ

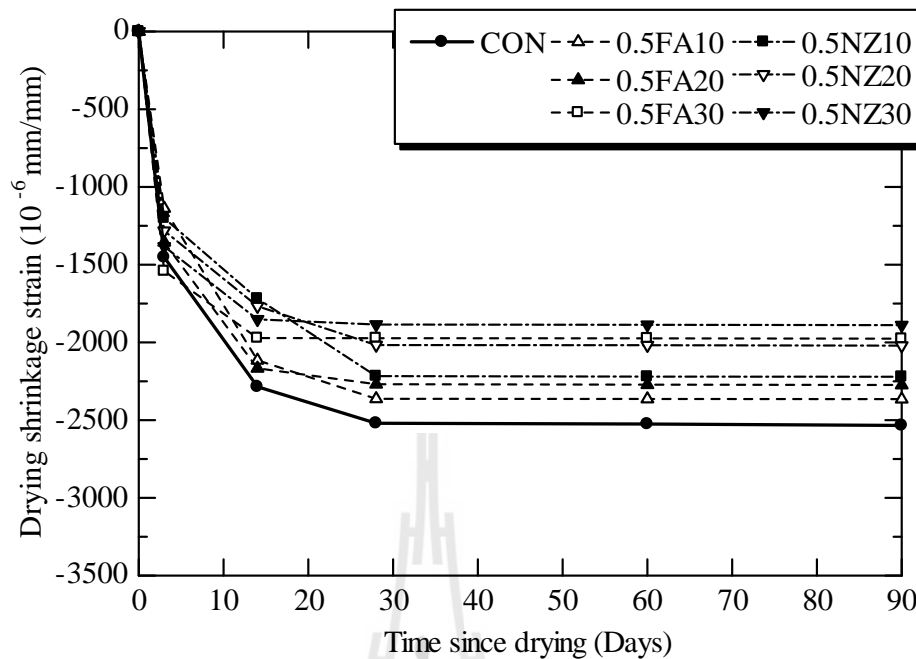
ทำให้ความสามารถในการอุดหรือแทรกตัวในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ได้ดี (Montgomery et al., 1981; Gopalan, 1993; Cyr et al., 2006)

#### 4.6 การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

##### 4.6.1 การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.5$

รูปที่ 4.12 แสดงการหดตัวแห้งที่เวลาต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.5$  พบว่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ปล่อยให้แห้ง ซึ่งมีอัตราการหดตัวแห้งสูงในช่วงระยะต้น (3 วัน) และอัตราการหดตัวแห้งลดลงเกือบคงที่ในช่วง 28 วัน แนะนำว่าหากมีการนำไปใช้งานจริง ควรให้คอนกรีตมีอายุบ่ม (curing) ไม่น้อยกว่า 14 วัน จึงจะเหมาะสม ทั้งนี้เพื่อลดความเสียหายหรือการสูญเสียที่อาจเกิดจากการหดตัวแห้งที่สูงในช่วงอายุต้นของ CLC เมื่อคอนกรีตมีอายุ 90 วัน อัตราการหดตัวแห้งคงที่มากขึ้น โดยอัตราการหดตัวแห้งของส่วนผสมควบคุม ที่เวลา 90 วัน เท่ากับ  $2,534 \times 10^{-6}$  mm/mm หรือ 0.2 % อัตราการหดตัวแห้งที่เวลา 90 วันของส่วนผสม 0.5FA10, 0.5FA20, และ 0.5FA30 เท่ากับ  $2,365 \times 10^{-6}$ ,  $2,274 \times 10^{-6}$ , และ  $1,976 \times 10^{-6}$  mm/mm ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าของ CON และมีอัตราการหดตัวแห้งลดลงตามปริมาณการแทนที่ FA ที่เพิ่มขึ้น

การหดตัวแห้งที่เวลา 90 วันของส่วนผสม 0.5NZ10, 0.5NZ20, และ 0.5NZ30 เท่ากับ  $2,221 \times 10^{-6}$ ,  $2,021 \times 10^{-6}$ , และ  $1,889 \times 10^{-6}$  mm/mm ตามลำดับซึ่งต่ำกว่าของ CON และมีอัตราการหดตัวแห้งลดลงตามปริมาณการแทนที่ NZ ที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม 0.5NZ30 มีอัตราการหดตัวแห้งต่ำที่สุดสำหรับ  $w/b = 0.5$  เนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วย NZ ในระดับสูง สัดส่วนปริมาณการใช้ซีเมนต์ต่ำ ประกอบกับอนุภาค NZ ที่มีความละเอียด ฉะนั้นปริมาณน้ำจึงลดลง ทำให้คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีอัตราการหดตัวแห้งต่ำ



รูปที่ 4.12 การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.5$

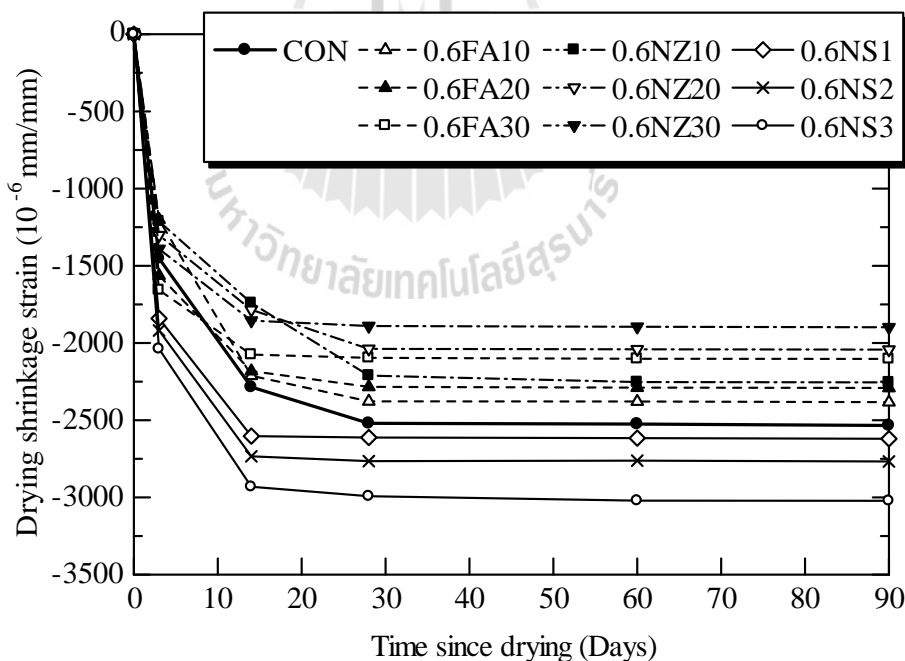
เปรียบเทียบการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสระหว่างการผสม FA กับ NZ พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ ในปริมาณไม่เกิน 30% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน มีอัตราการหดตัวแห้งต่ำกว่าของ FA ในขณะที่การแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA ในระดับปริมาณเท่ากัน (30%) โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน พบว่ามีอัตราการหดตัวแห้งสูงกว่า NZ เล็กน้อย อย่างไรก็ตามอัตราการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.5$  ที่เวลา 90 วัน มีค่าอยู่ในช่วง  $1,889 \times 10^{-6}$  ถึง  $2,534 \times 10^{-6}$  mm/mm หรือ 0.19% ถึง 0.25%

#### 4.6.2 การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.6$

รูปที่ 4.13 แสดงการหดตัวแห้งที่เวลาต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.6$  พบว่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ปล่อยให้แห้ง ซึ่งมีอัตราการหดตัวแห้งสูงในช่วงระยะต้น (3 วัน) และอัตราการหดตัวแห้งลดลงเกือบคงที่ในช่วง 28 วันไปจนถึง 90 วัน การหดตัวแห้งที่เวลา 90 วันของส่วนผสม 0.6FA10, 0.6FA20, และ 0.6FA30 เท่ากับ  $2,383 \times 10^{-6}$ ,  $2,291 \times 10^{-6}$ , และ  $2,103 \times 10^{-6}$  mm/mm ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าของ CON และมีอัตราการหดตัวแห้งลดลงตามปริมาณการแทนที่ FA ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ระหว่าง  $w/b = 0.5$  กับ 0.6 พบว่าค่าอัตราการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น

การหดตัวแห้งที่เวลา 90 วันของส่วนผสม 0.6NZ10, 0.6NZ20, และ 0.6NZ30 เท่ากับ  $2,255 \times 10^{-6}$ ,  $2,043 \times 10^{-6}$ , และ  $1,898 \times 10^{-6}$  mm/mm ตามลำดับซึ่งต่ำกว่าของ CON และมีอัตราการหดตัวแห้งลดลงตามปริมาณการแทนที่ NZ ที่เพิ่มขึ้น โดยการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ ในปริมาณไม่เกิน 30% มีอัตราการหดตัวแห้งต่ำสุด และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน  $w/b = 0.5$  กับ 0.6 พบว่าค่าอัตราการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นทำให้ความพรุนมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นดังกล่าว

การหดตัวแห้งที่เวลา 90 วัน ของส่วนผสม 0.6NS1, 0.6NS2, และ 0.6NS3 เท่ากับ  $2,620 \times 10^{-6}$ ,  $2,767 \times 10^{-6}$  และ  $3,022 \times 10^{-6}$  mm/mm ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าของ CON และมีอัตราการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ NS ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ส่วนผสม 0.6NS3 มีอัตราการหดตัวแห้งสูงสุดใน  $w/b = 0.6$  เนื่องจากขนาดอนุภาคของ NS มีความละเอียดสูง ทำให้คอนกรีตมีความพรุนขนาดเล็ก (gel porosity) และคาปิลลารีสูง ส่งผลให้อัตราการหดตัวแห้งที่สูง



รูปที่ 4.13 การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.6$

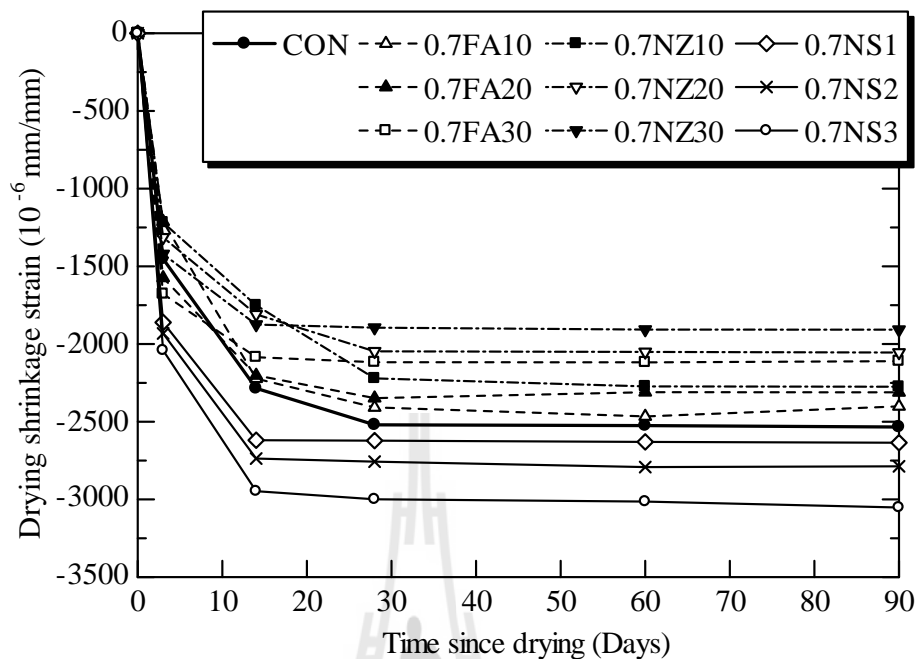
เมื่อเปรียบเทียบการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ระดับปริมาณการแทนที่เท่ากันที่  $w/b = 0.6$  เวลา 90 วัน อัตราการหดตัวแห้งเรียงจากน้อยไปหามากคือ NZ, FA, และ

NS ตามลำดับ โดยการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS ในปริมาณไม่เกิน 3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน มีอัตราการหดตัวแห้งสูงกว่าทุกส่วนผสมใน  $w/b = 0.6$  เนื่องจากผลของความละเอียดของอนุภาค NS และผลของปริมาณซีเมนต์ (cement content) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานผลการวิจัยของ Jaturapitakkul et al. (2004) อย่างไรก็ตามอัตราการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.6$  ที่เวลา 90 วัน มีค่าอยู่ในช่วง  $1,898 \times 10^{-6}$  ถึง  $3,022 \times 10^{-6}$  mm/mm หรือ 0.19% ถึง 0.3%

#### 4.6.3 การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ $w/b = 0.7$

รูปที่ 4.14 แสดงการหดตัวแห้งที่เวลาต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.7$  พบว่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ปล่อยให้แห้ง ซึ่งมีอัตราการหดตัวแห้งสูงในช่วงระยะต้น (3 วัน) และอัตราการหดตัวแห้งลดลงเกือบคงที่ในช่วง 28 วันไปจนถึง 90 วัน การหดตัวแห้งที่เวลา 90 วันของส่วนผสม 0.7FA10, 0.7FA20 และ 0.7FA30 เท่ากับ  $2,401 \times 10^{-6}$ ,  $2,311 \times 10^{-6}$ , และ  $2,110 \times 10^{-6}$  mm/mm ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าของ CON และมีอัตราการหดตัวแห้งลดลงตามปริมาณการแทนที่ FA ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบอัตราการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน ( $w/b = 0.5$  ถึง  $0.7$ ) พบว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA ในปริมาณ 10%–30% มีอัตราเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น

การหดตัวแห้งที่เวลา 90 วันของส่วนผสม 0.7NZ10, 0.7NZ20, และ 0.7NZ30 เท่ากับ  $2,275 \times 10^{-6}$ ,  $2,055 \times 10^{-6}$ , และ  $1,908 \times 10^{-6}$  mm/mm ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าของ CON และมีอัตราการหดตัวแห้งลดลงตามปริมาณการแทนที่ NZ ที่เพิ่มขึ้น การแทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ ในปริมาณ 10%–30% มีอัตราการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น (จาก  $w/b = 0.5$  ถึง  $0.7$ ) เนื่องจากปริมาณน้ำในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความพรุนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.7$

การหดตัวแห้งที่เวลา 90 วัน ของส่วนผสม 0.7NS1, 0.7NS2, และ 0.7NS3 เท่ากับ  $2,635 \times 10^{-6}$ ,  $2,787 \times 10^{-6}$ , และ  $3,052 \times 10^{-6}$  mm/mm ตามลำดับ สูงกว่าของ CON อัตราการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ NS ที่เพิ่มขึ้น โดยการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานมีอัตราการหดตัวแห้งกว่าทุกส่วนผสม เนื่องจากผลของปริมาณน้ำปริมาณซีเมนต์และอนุภาคของ NS ที่มีความละเอียดสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนขนาดเล็กและคาปิลลารีสูง จึงทำให้มีอัตราการหดตัวแห้งที่สูง อย่างไรก็ตามอัตราการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่  $w/b = 0.7$  ที่เวลา 90 วัน มีค่าอยู่ในช่วง  $1,908 \times 10^{-6}$  ถึง  $3,052 \times 10^{-6}$  mm/mm หรือ 0.19% ถึง 0.3%

## 4.7 โครงสร้างระดับจุลภาคของ CLC

### 4.7.1 ความพรุนของ CLC

ผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสทั้งหมดที่อายุ 28 วัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 ระบบความพรุนประกอบด้วยโพรง 4 ชนิดได้แก่ โพรงเจลหรือโพรงขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 10  $\mu\text{m}$  โพรงคาปิลลารีขนาดปานกลางซึ่งมีขนาด 10-50  $\mu\text{m}$  โพรงคาปิลลารีขนาดใหญ่ซึ่งมีขนาด 50-10,000  $\mu\text{m}$  และโพรงอากาศหรือโพรงขนาดใหญ่พิเศษ

ซึ่งมีขนาดโตกว่า 10,000 nm (Mehta, 1981; Khatib and Wild, 1996) ความพรุนรวม (total porosities) ของส่วนผสมควบคุม, 0.5FA10, 0.5FA20, และ 0.5FA30 ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 52.27%, 48.56%, 50.78%, และ 59.32% ตามลำดับ ผลจากการประสานร่วมกันของการแทนที่ด้วย FA ในปริมาณ 10% และ 20% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานในคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส พบว่าทำให้ความพรุนรวมลดลง นี่เป็นผลเนื่องมาจากการเติมเต็มทีละน้อย (gradual filling) บนโพรงขนาดใหญ่ด้วยปัจจัย ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลของการกระจายตัว ผลของการอัดตัวและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของอนุภาคเถ้าลอย การที่อนุภาคเถ้าลอยมีรูปร่างทรงกลมและเล็กทำให้สามารถอุดช่องว่างอากาศและลดความพรุนลง (Montgomery et al., 1981; Cyr et al., 2006) ที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน พบว่าความพรุนรวมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผลของการอัดตัวของอนุภาค FA เติมเต็มฟองอากาศ ซึ่งทำให้ความพรุนคาปิลลารีของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเพิ่มขึ้น การที่ความพรุนรวมและความพรุนคาปิลลารีเพิ่มขึ้นนั้นส่งผลทำให้โพรงขนาดใหญ่และความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสลดลง คล้ายกับรายงานผลการวิจัยของ Chindaprasirt et al. (2005)

ตารางที่ 4.6 ความพรุนของ CLC ผสม OPC, FA, NZ, และ NS ที่อายุ 28 วัน

Mix No.	Symbol	Porosity at 28 d (%)				
		Gel (<10nm)	Medium capillary (10-50nm)	Large capillary (50-10,000nm)	Extra large (>10,000nm)	Total
1	OPC	0.05	2.84	26.72	22.66	52.27
2	0.5FA10	0.28	1.94	38.62	7.72	48.56
3	0.5FA20	0.19	2.93	40.51	7.15	50.78
4	0.5FA30	0.24	4.39	47.70	6.99	59.32
5	0.5NZ10	0.20	4.29	33.88	4.69	43.06
6	0.5NZ20	0.38	4.72	34.37	5.34	44.81
7	0.5NZ30	0.30	9.26	50.60	9.55	69.71
8	0.5NS1	—	—	—	—	—
9	0.5NS2	—	—	—	—	—
10	0.5NS3	—	—	—	—	—

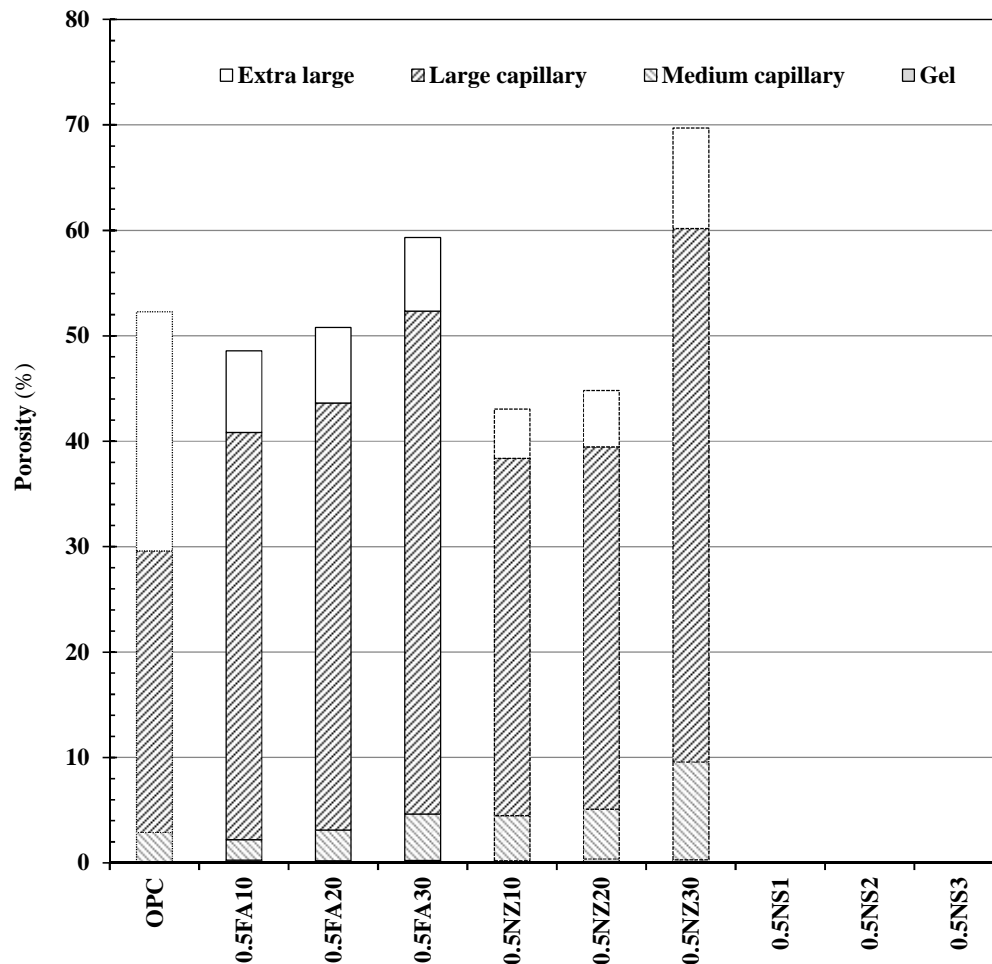


ตารางที่ 4.6 ความพรุนของ CLC ผสม OPC, FA, NZ, และ NS ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Mix No.	Symbol	Porosity at 28 d (%)				
		Gel (<10nm)	Medium capillary (10-50nm)	Large capillary (50-10,000nm)	Extra large (>10,000nm)	Total
11	0.6FA10	0.28	1.96	39.13	7.82	49.20
12	0.6FA20	0.19	2.94	40.68	7.18	51.00
13	0.6FA30	0.24	4.44	48.21	7.07	59.95
14	0.6NZ10	0.21	4.41	34.83	4.82	44.27
15	0.6NZ20	0.38	4.77	34.73	5.40	45.27
16	0.6NZ30	0.46	5.92	33.55	6.34	46.28
17	0.6NS1	1.32	7.91	29.45	5.27	43.95
18	0.6NS2	1.77	8.40	29.61	4.42	44.20
19	0.6NS3	3.15	9.45	29.70	2.70	45.00
20	0.7FA10	0.28	1.99	39.67	7.93	49.88
21	0.7FA20	0.20	3.06	42.31	7.47	53.04
22	0.7FA30	0.24	4.51	48.97	7.18	60.90
23	0.7NZ10	0.22	4.63	36.52	5.06	46.42
24	0.7NZ20	0.40	5.04	36.71	5.70	47.86
25	0.7NZ30	0.49	6.27	35.50	6.71	48.97
26	0.7NS1	1.33	8.00	29.79	5.34	44.46
27	0.7NS2	1.83	8.69	30.65	4.58	45.75
28	0.7NS3	3.27	9.80	31.26	2.33	46.65

จากรูปที่ 4.15 ความพรุนรวมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสสำหรับส่วนผสม 0.5NZ10 และ 0.5NZ20 น้อยกว่าของ OPC นั้นเป็นเพราะว่า NZ มีประสิทธิภาพในการลดขนาดโพรงเนื่องจากผลดีของการกระจายตัว การอัดตัวและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของอนุภาคซีโอไลด์ธรรมชาติที่มีความละเอียด โดยขนาดอนุภาค NZ ที่เล็กสามารถอุดรูโพรงและลดความพรุนลง แต่การเพิ่มปริมาณการแทนที่ในระดับ 20% และ 30% ทั้งของ FA และ NZ พบว่าแนวโน้มความพรุนรวมมีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่วนผลการทดสอบความพรุนของส่วนผสม 0.5NS1, 0.5NS2, และ 0.5NS3 ที่

ว่างเปล่าในรูปที่ 4.15 นั้น เป็นเพราะไม่มีผลการทดสอบมาแสดง เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปเป็น CLC ในระหว่างขั้นตอนการผสมได้

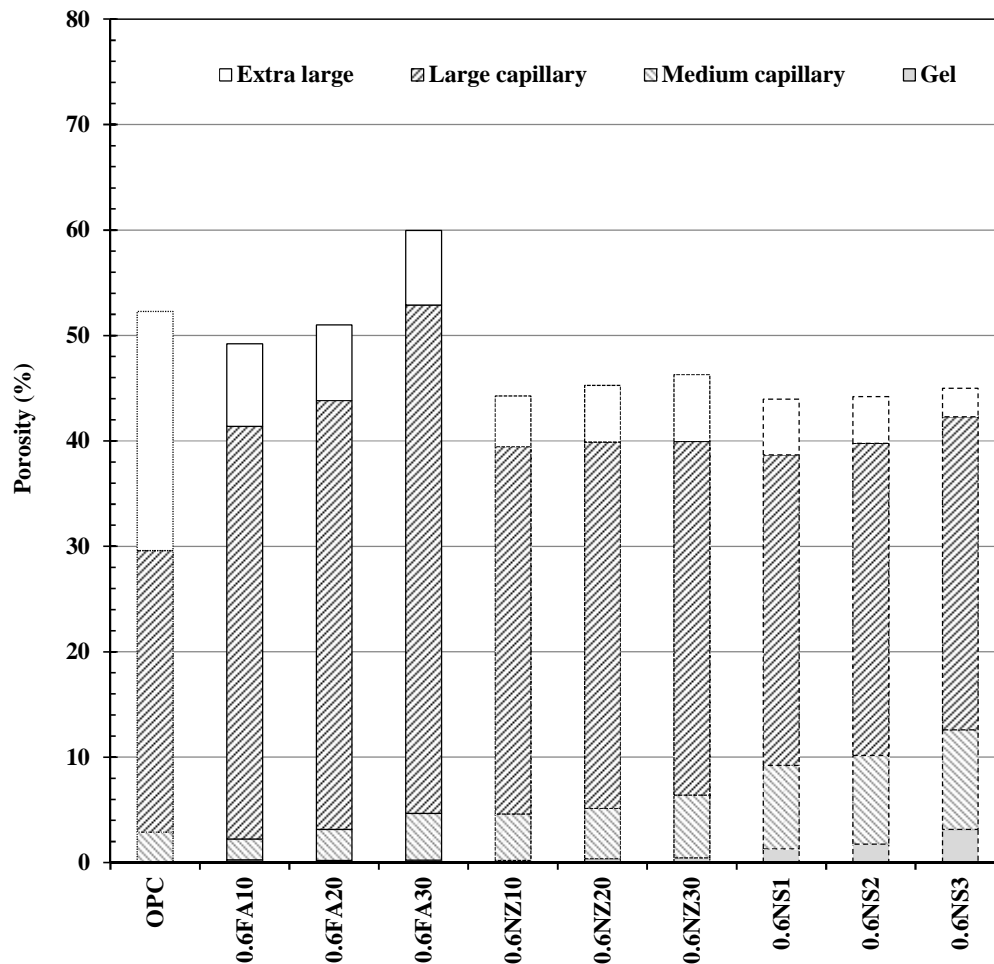


รูปที่ 4.15 ความพรุนของ CLC ผสม FA และ NZ ที่  $w/b = 0.5$  อายุ 28 วัน

ที่  $w/b = 0.6$  ความพรุนรวมของส่วนผสม 0.6FA10, 0.6FA20, และ 0.6FA30 ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 49.2%, 51%, และ 59.95% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ  $w/b = 0.5$  แสดงให้เห็นว่าความพรุนรวมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม FA มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน  $w/b$  ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้มีช่องว่างเพิ่มขึ้น

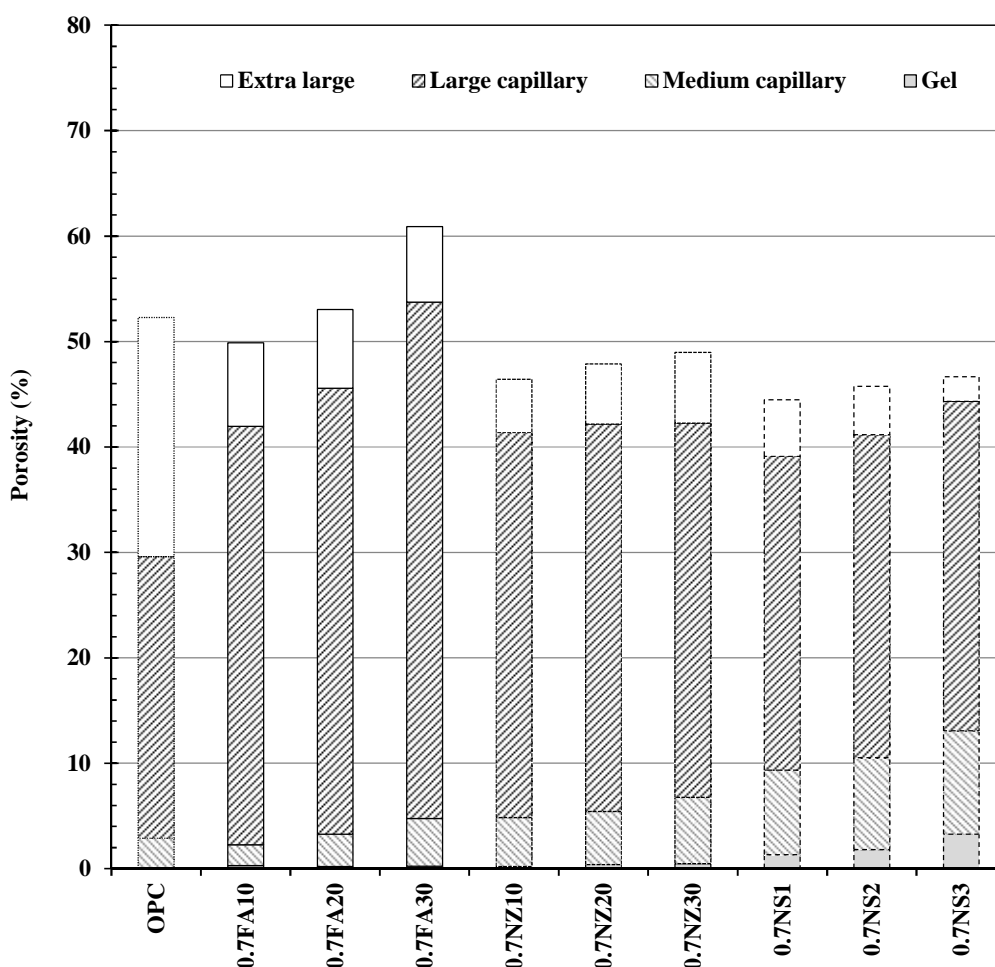
ที่  $w/b = 0.6$  ความพรุนรวมของส่วนผสม 0.6NZ10 และ 0.6NZ20 ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 44.27% และ 45.27% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ  $w/b = 0.5$  แสดงให้เห็นว่าความพรุนรวมของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม NZ (ไม่เกิน 20%) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน  $w/b$  ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำในส่วนผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้มีช่องว่างเพิ่มขึ้น ขณะที่ความพรุน

รวมของส่วนผสม 0.6NZ30 เท่ากับ 46.28% ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ  $w/b = 0.5$  เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้น (จาก  $w/b = 0.5$  เป็น 0.6) มีผลทำให้ปริมาณความพรุนรวมลดลง



รูปที่ 4.16 ความพรุนของ CLC ผสม FA, NZ, และ NS ที่  $w/b = 0.6$  อายุ 28 วัน

ที่  $w/b = 0.6$  ความพรุนรวมของส่วนผสม 0.6NS1, 0.6NS2, และ 0.6NS3 ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 43.95%, 44.2%, และ 45% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของ CON และมีค่าความพรุนรวมเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ NS ที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.16 เมื่อเปรียบเทียบกับ การแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA และ NZ พบว่ามีค่าต่ำกว่า เนื่องจากอนุภาคของ NS มีความละเอียดสูงและขนาดเล็กทำให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกและผลของการอัดแทรกที่ดีกว่าในการลดช่องว่างของ CLC



รูปที่ 4.17 ความพรุนของ CLC ผสม FA, NZ, และ NS ที่ w/b = 0.7 อายุ 28 วัน

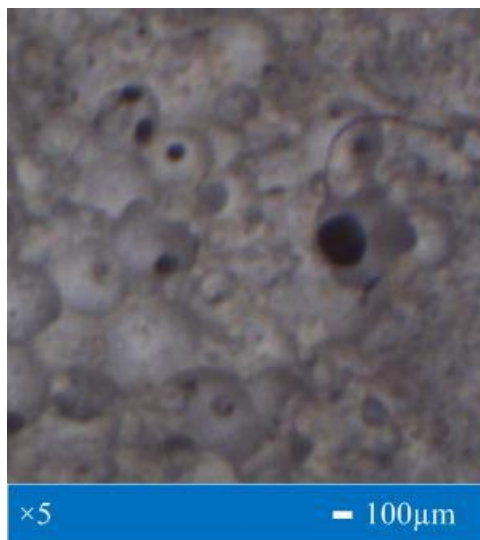
จากรูปที่ 4.17 พบว่าความพรุนรวมของส่วนผสม FA เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น (จาก w/b = 0.5 ถึง 0.7) สำหรับระดับการแทนที่ FA ในปริมาณ 10%–30% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ส่วนความพรุนรวมของส่วนผสม NZ พบว่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น (จาก w/b = 0.5 ถึง 0.7) สำหรับระดับการแทนที่ NZ ในปริมาณ 10%–20% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน แต่ความพรุนรวมมีค่าลดลง (จาก w/b = 0.5 ถึง 0.6) และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ w/b = 0.7 สำหรับระดับการแทนที่ NZ ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน

การแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS พบว่าค่าความพรุนรวมของส่วนผสม NS เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น (จาก w/b = 0.6 ถึง 0.7) สำหรับระดับการแทนที่ NS ในปริมาณเพียง 1%–3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน และคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม NS ยังพบว่าความพรุนเจลมีปริมาณมากกว่าของ FA และ NZ ดังรูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17 นั้นแสดงให้เห็น

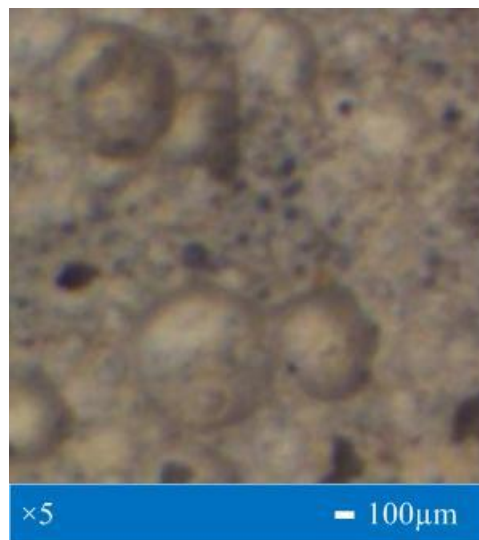
เห็นว่า NS มีประสิทธิภาพสูงกว่า FA และ NZ เนื่องจากผลดีของการกระจายตัว การอัดตัวและปฏิกิริยาปอซโซลานิกของอนุภาคนาโนซิลิกาในซีเมนต์เพสต์ผสม (blended cement paste)

#### 4.7.2 ผลของวัสดุยึดประสานต่อการกระจายขนาดโพรงของ CLC

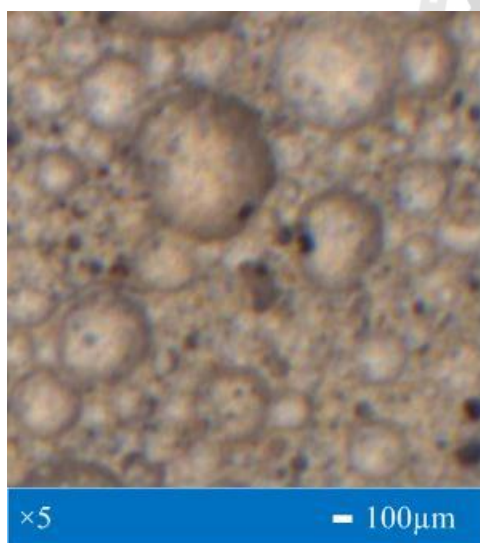
จากรูปที่ 4.18 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีความละเอียดสูงและเมื่อนำไปวิเคราะห์การกระจายขนาดโพรงอากาศของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า โดยจำนวนโพรงอากาศที่นับ (counts) บนพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $2,500 \times 2,500 \mu\text{m}$  ของก้อนตัวอย่างหล่อแข็งทุกส่วนผสม (จำนวน 25 ตัวอย่าง) นำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศ (% area of air-pore) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศโดยเฉลี่ย (average diameter) และแจกแจงความถี่ทางสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 4.19, 4.20, และ 4.21 สำหรับอัตราส่วน w/b = 0.5, 0.6, และ 0.7 ตามลำดับ จากการหล่อก้อนตัวอย่างขัดผิวหน้าที่ยังอายุ 28 วัน w/b = 0.5 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายพบว่า คอนกรีตที่ไม่มีการใช้วัสดุแทนที่ซีเมนต์ (CON) มีขนาดเฉลี่ยของโพรงเท่ากับ  $376 \mu\text{m}$  ขนาดโพรงเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศของ CLC แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสำหรับส่วนผสม 0.5FA10, 0.5FA20, 0.5FA30 เท่ากับ  $337 \mu\text{m}$ ,  $315 \mu\text{m}$ ,  $257 \mu\text{m}$  และ 46.6%, 39.5%, 28.3% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งขนาดโพรงเฉลี่ยต่ำกว่าของ CON เนื่องจากการรวมกัน (incorporating) ในปริมาณที่เหมาะสมของวัสดุปอซโซลาน โดยการเติมเต็มช่องว่างนั้นทำให้ลดความพรุนลงและเพิ่มความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ กล่าวคือ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ได้ผลิตภัณฑ์ C-S-H และ C-A-H ซึ่งเป็นการลดปริมาณ  $\text{Ca(OH)}_2$  ลงโดยปฏิกิริยาปอซโซลานิก ขนาดโพรงเฉลี่ยที่เล็กลงสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนขนาดใหญ่พิเศษ (extra large porosity) ที่ทดสอบโดยวิธี MIP และเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศที่มีแนวโน้มลดลงตามระดับการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA ที่เพิ่มขึ้น คล้ายกับรายงานการวิจัยของ Visagie (2000) ขนาดโพรงเฉลี่ย และเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศของ CLC แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลด์ธรรมชาติ สำหรับส่วนผสม 0.5NZ10, 0.5NZ20, และ 0.5NZ30 เท่ากับ  $257 \mu\text{m}$ ,  $255 \mu\text{m}$ ,  $253 \mu\text{m}$  และ 24.1%, 30.2%, 50.8% ตามลำดับ ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าขนาดโพรงเฉลี่ยของ CLC ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ ในระดับการแทนที่ไม่เกิน 20% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ส่งผลทำให้โพรงอากาศมีขนาดเล็กกว่าการแทนที่ด้วย FA



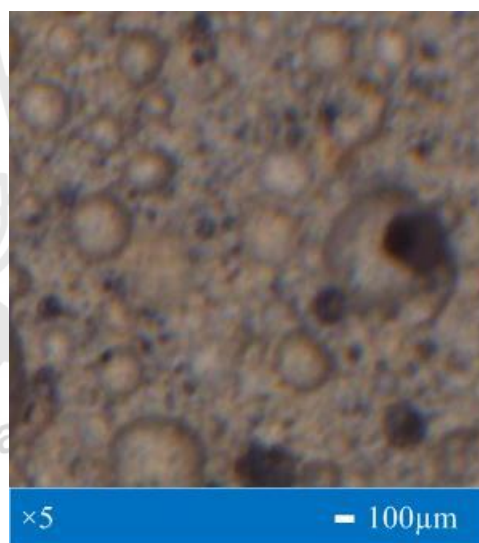
(a) CON อายุ 28 วัน (5×)



(b) 0.5FA10 อายุ 28 วัน (5×)

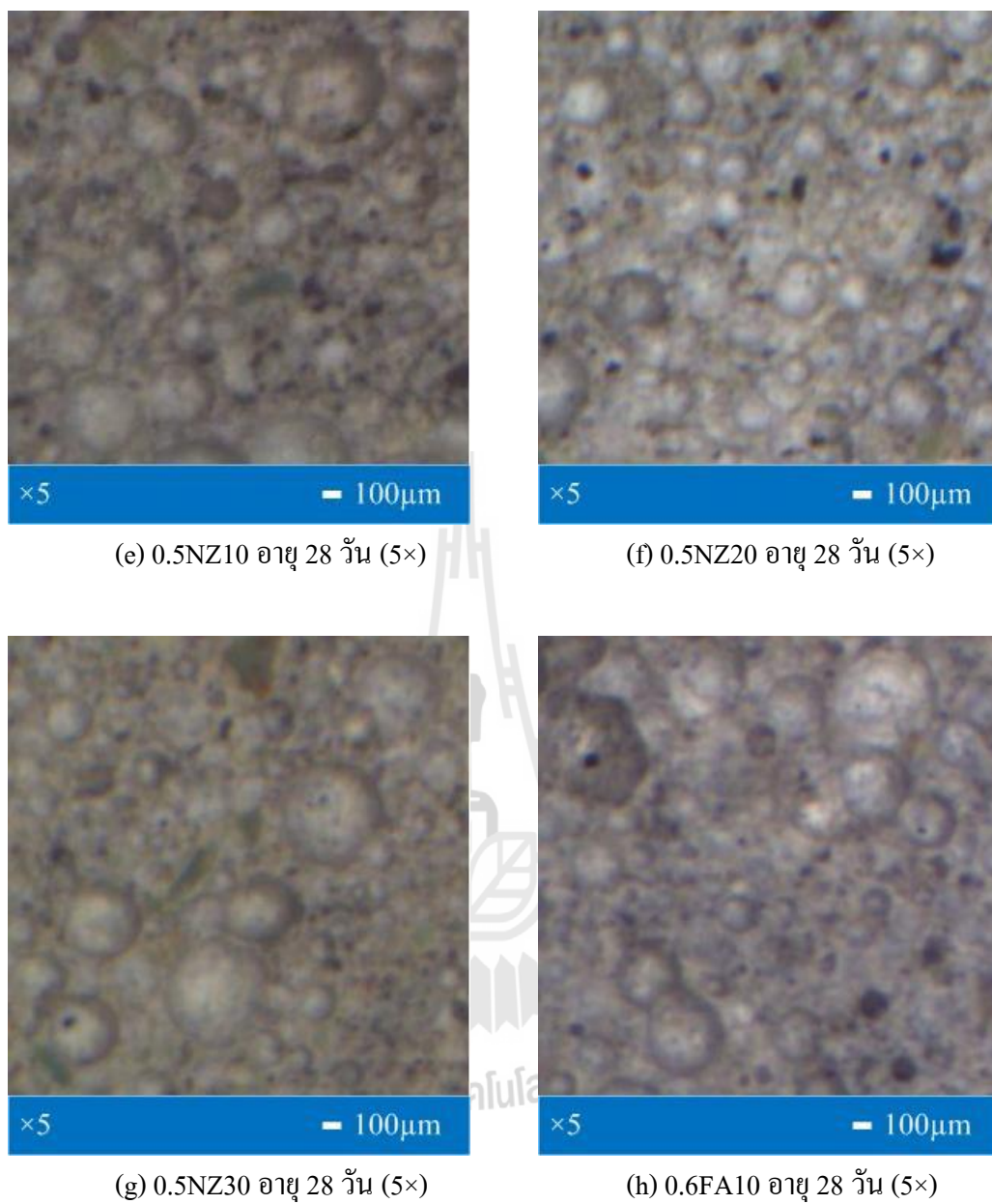


(c) 0.5FA20 อายุ 28 วัน (5×)

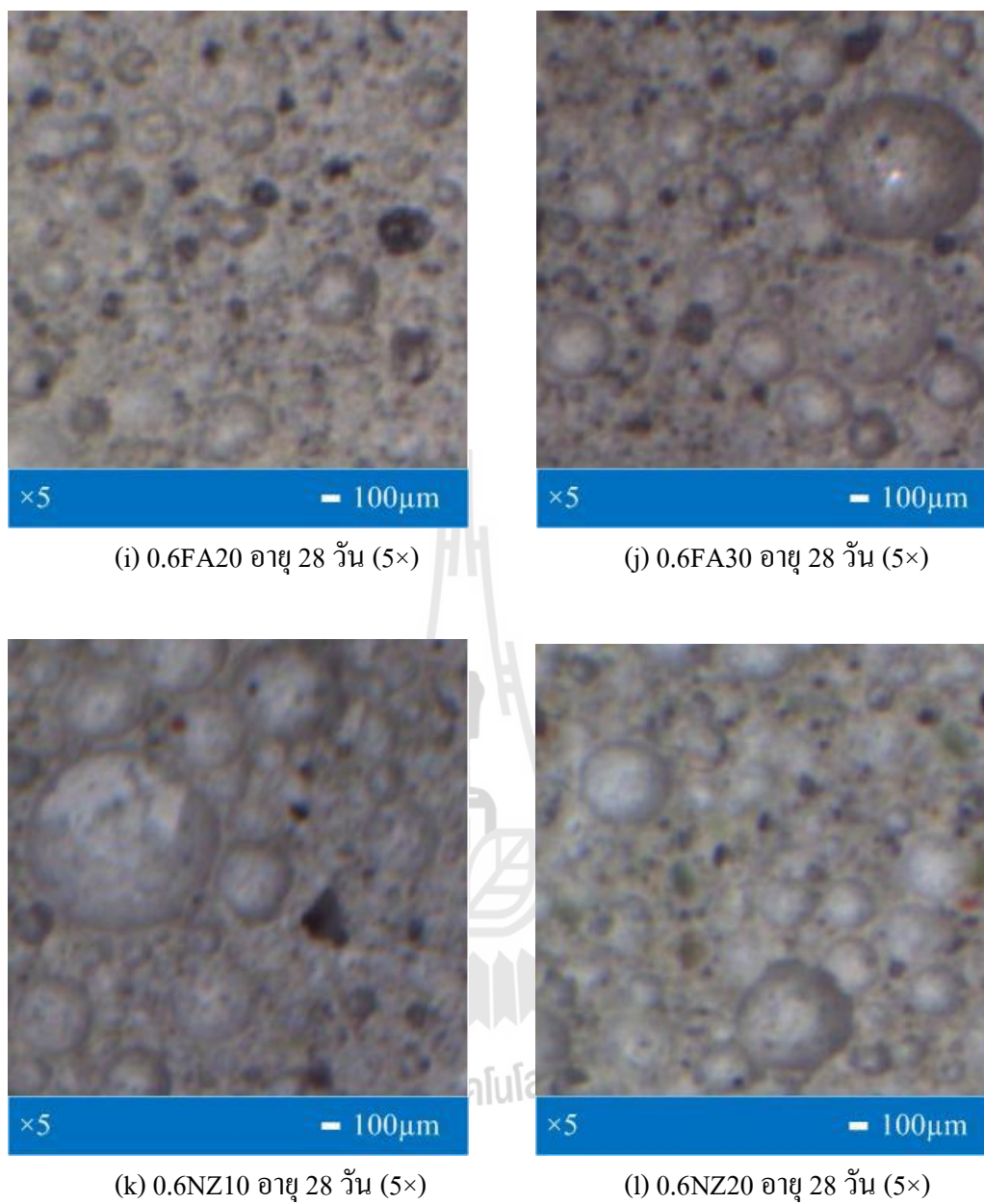


(d) 0.5FA30 อายุ 28 วัน (5×)

รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายขนาดโพรงของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล

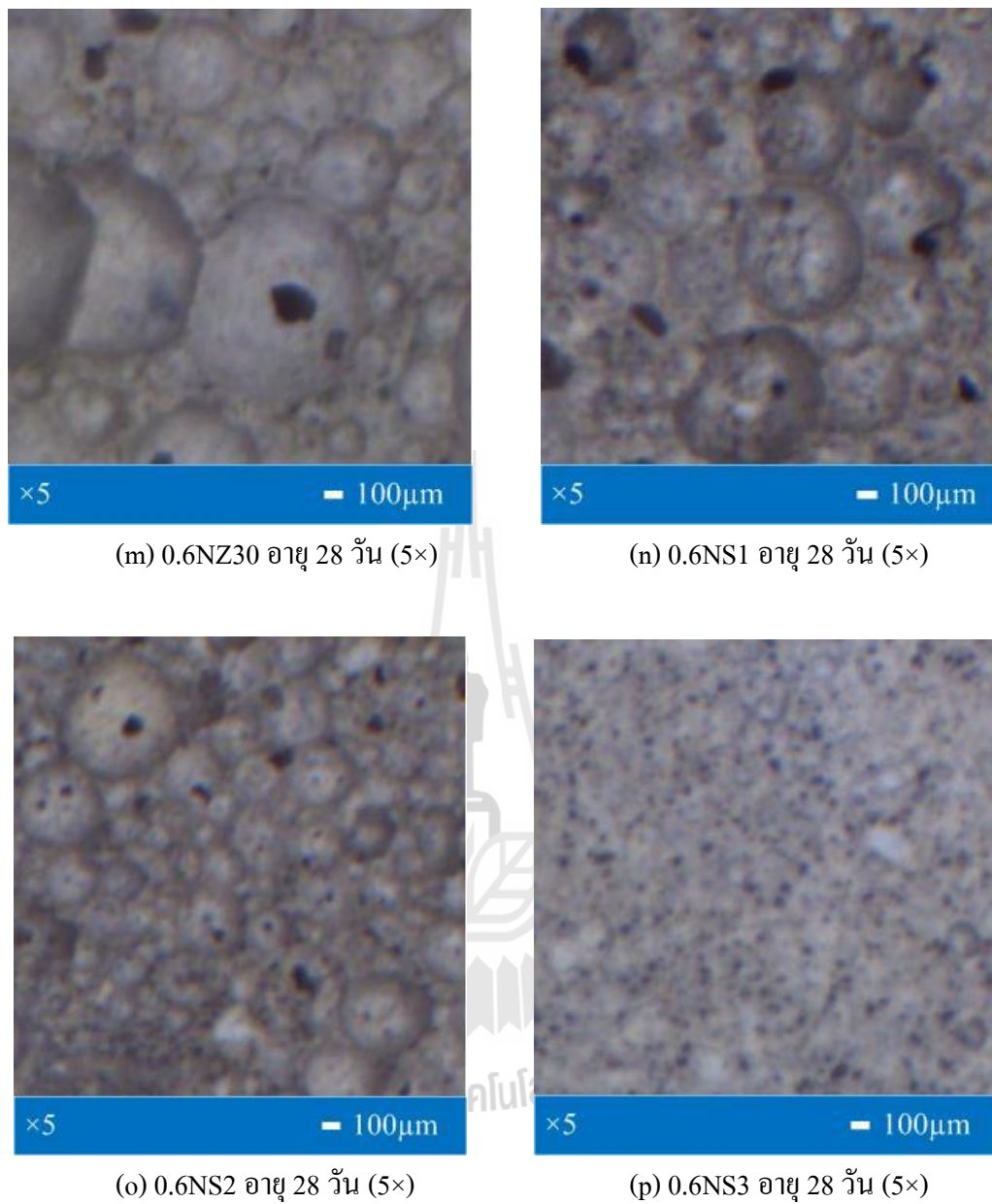


รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายขนาดโพรงของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล (ต่อ)

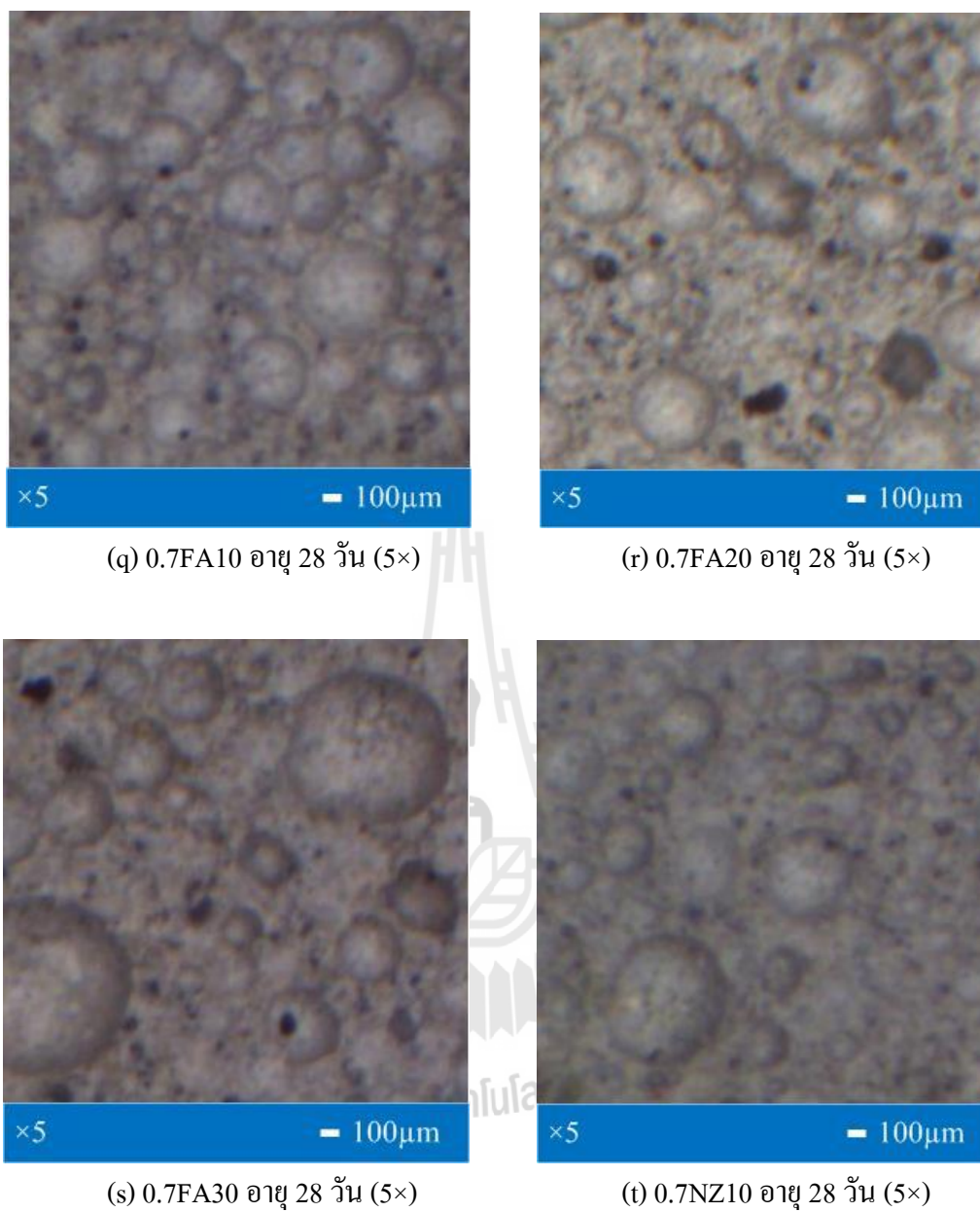


รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายขนาดโพรงของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล (ต่อ)





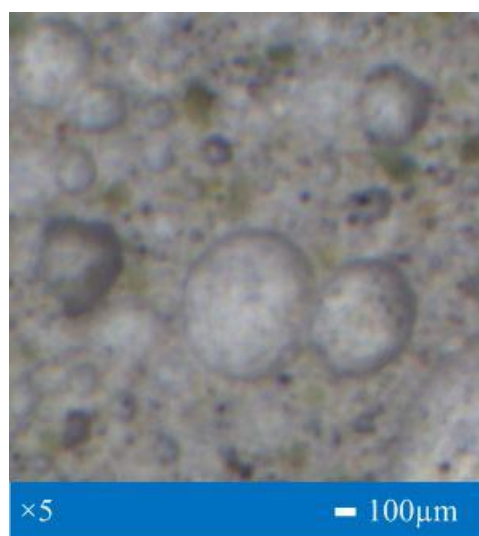
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายขนาดโพรงของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล (ต่อ)



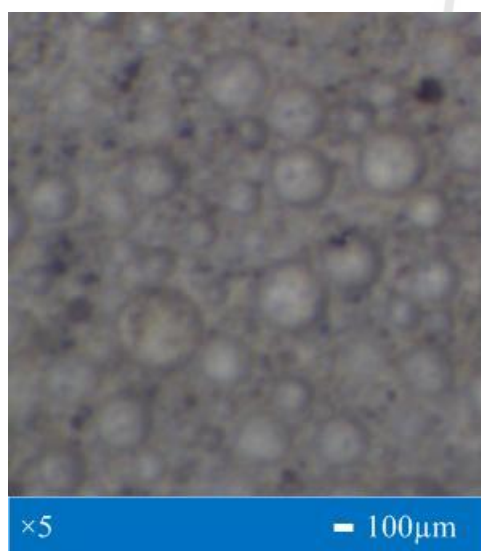
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายขนาดโพรงของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล (ต่อ)



(u) 0.7NZ20 อายุ 28 วัน (5×)



(v) 0.7NZ30 อายุ 28 วัน (5×)

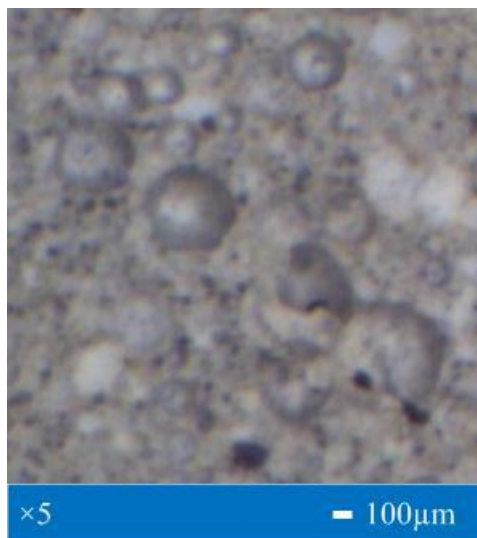


(w) 0.7NS1 อายุ 28 วัน (5×)



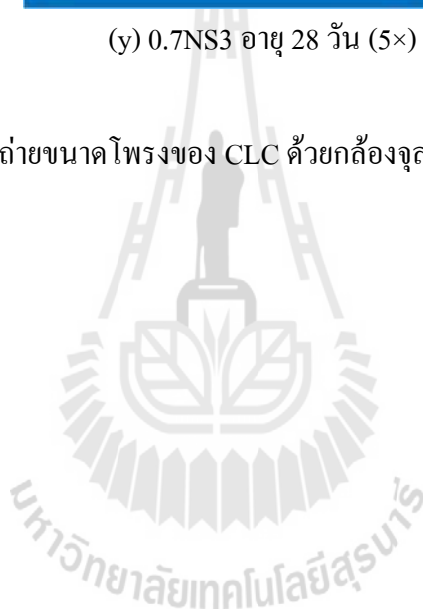
(x) 0.7NS2 อายุ 28 วัน (5×)

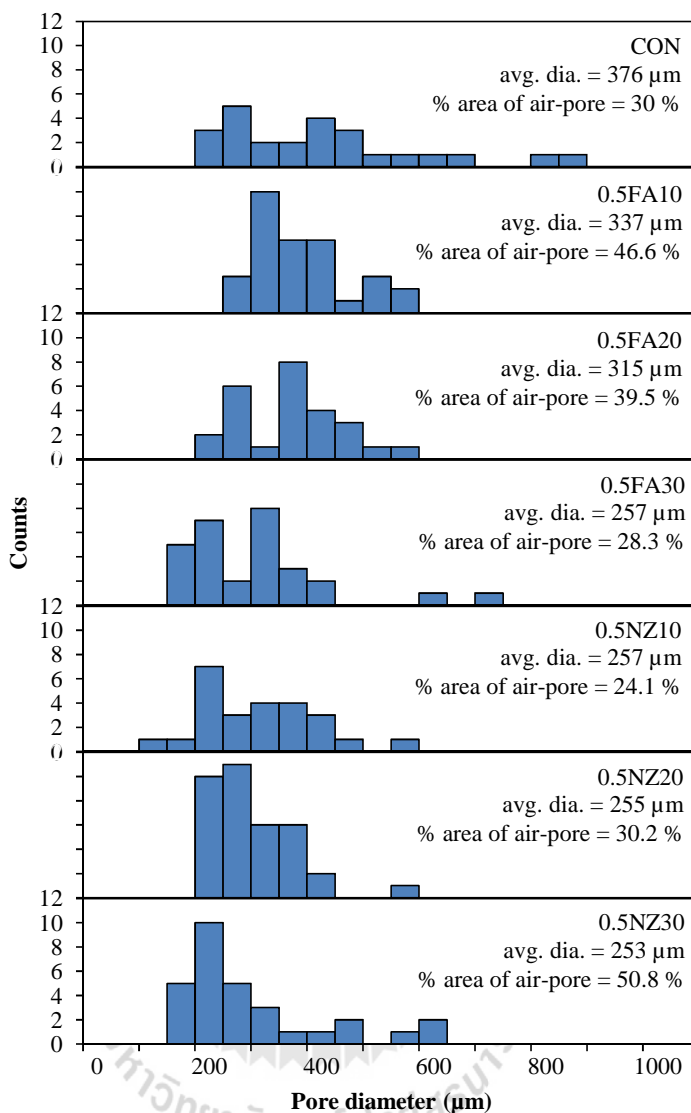
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายขนาดโพรงของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล (ต่อ)



(y) 0.7NS3 อายุ 28 วัน (5 $\times$ )

รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายขนาดโพรงของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ต่อ)



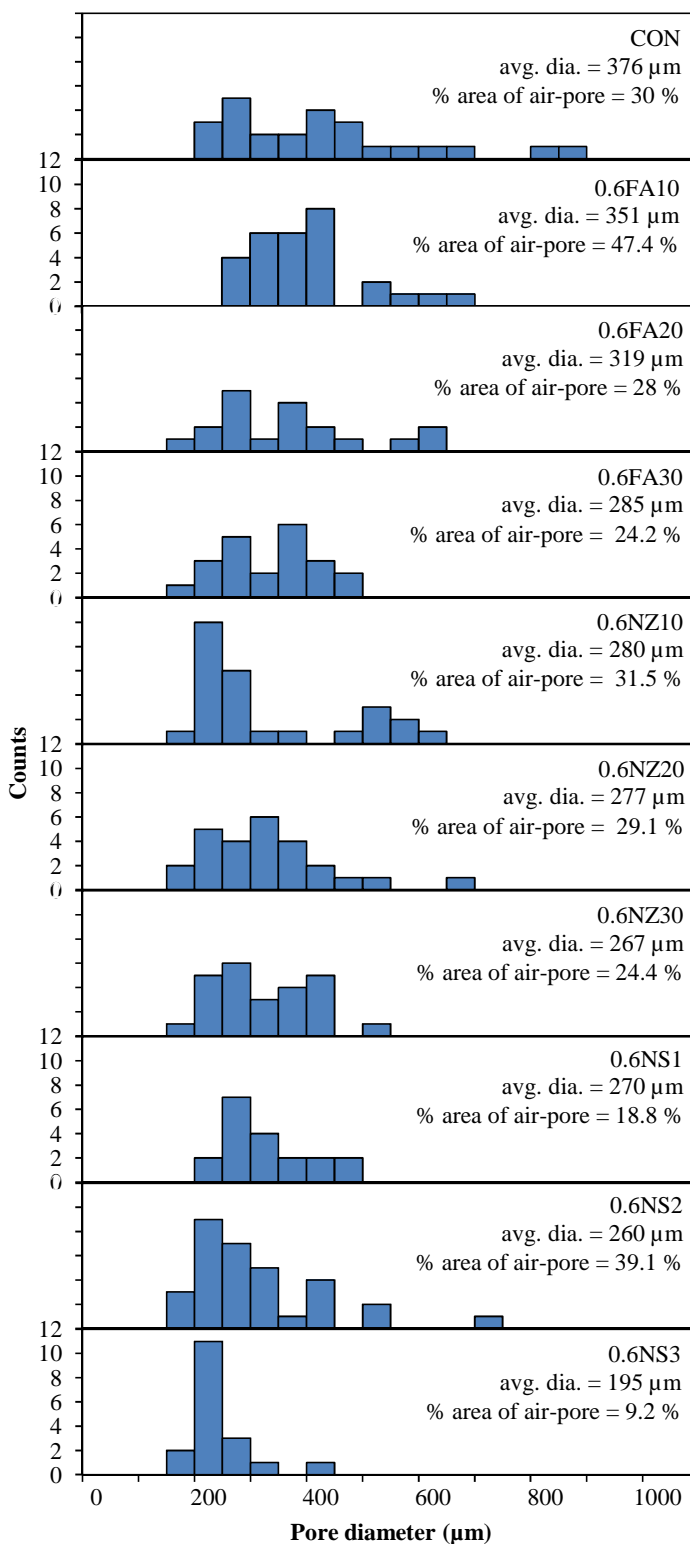


รูปที่ 4.19 การกระจายขนาดโพรงของ CLC ที่อายุ 28 วัน และ w/b = 0.5

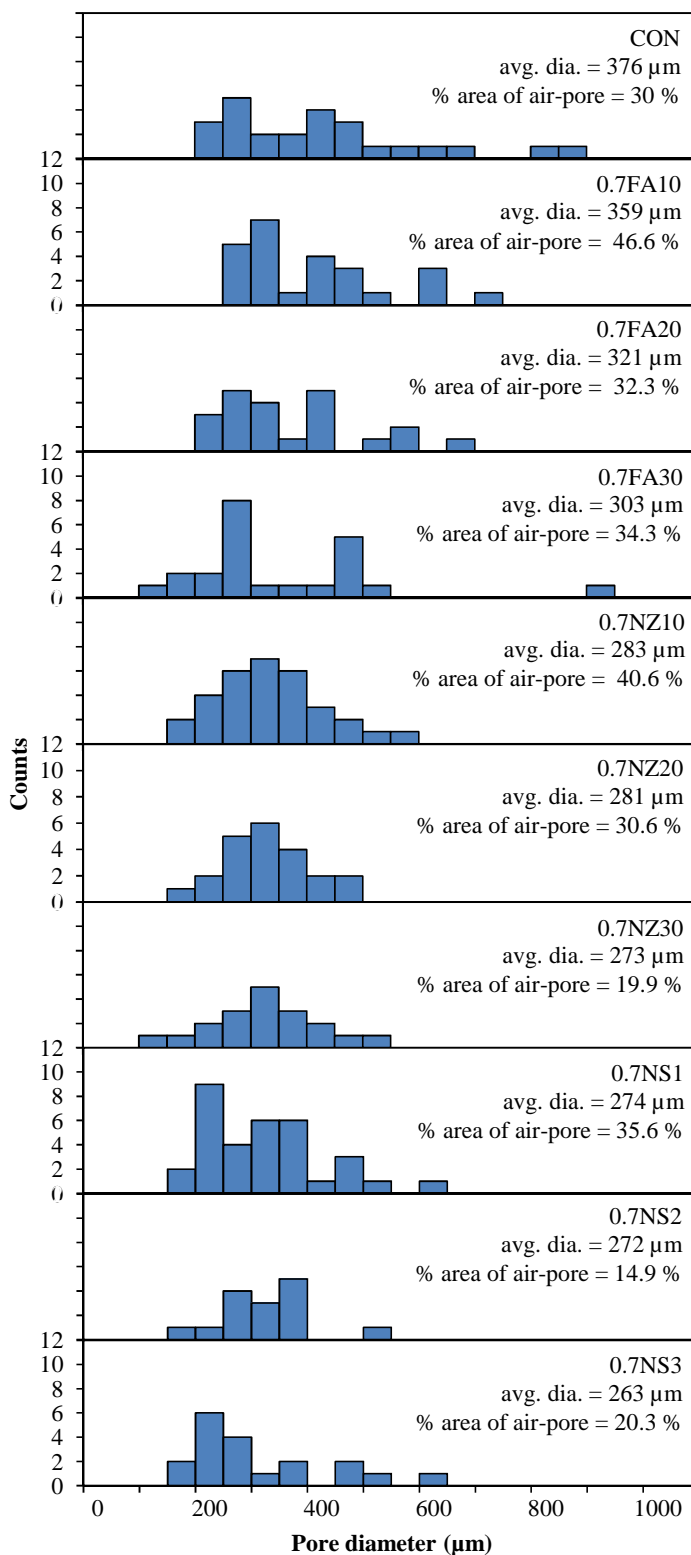
จากรูปที่ 4.20 แสดงการกระจายขนาดโพรงของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ได้จากการหล่อก้อนตัวอย่างขัดผิวหน้าที่อายุ 28 วัน w/b = 0.6 ขนาดโพรงเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศของ CLC ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสำหรับส่วนผสม 0.6FA10, 0.6FA20, และ 0.6FA30 เท่ากับ 351  $\mu\text{m}$ , 319  $\mu\text{m}$ , 285  $\mu\text{m}$  และ 47.4%, 28%, 24.2% ตามลำดับ ซึ่งขนาดโพรงเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีขนาดและปริมาณพื้นที่ลดลงตามระดับการแทนที่ของ FA ที่เพิ่มขึ้น และโพรงมีขนาดใหญ่กว่าของ CLC ที่ w/b = 0.5 ที่ปริมาณการแทนที่ระดับเดียวกัน นอกจากนี้ขนาดโพรงที่เล็กก็ยังสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนขนาดใหญ่พิเศษ (extra large porosity) ที่วิเคราะห์โดยวิธี MIP และเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศมีแนวโน้มลดลงตามระดับการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA ที่เพิ่มขึ้น ขนาดโพรงเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของโพรงอากาศ

ของ CLC ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโพลีโพรพิลีนสำหรับส่วนผสม 0.6NZ10, 0.6NZ20, 0.6NZ30 เท่ากับ 280  $\mu\text{m}$ , 277  $\mu\text{m}$ , 267 $\mu\text{m}$  และ 31.5%, 29.1%, 24.4% ตามลำดับ ซึ่งขนาดโพรงเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ของ NZ ที่เพิ่มขึ้น แต่มีขนาดโพรงเฉลี่ยใหญ่กว่าของ CLC ที่  $w/b = 0.5$  ที่ระดับปริมาณการแทนที่เดียวกัน ส่วนขนาดโพรงเฉลี่ยและเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศของ CLC ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาสำหรับส่วนผสม 0.6NS1, 0.6NS2, และ 0.6NS3 เท่ากับ 270  $\mu\text{m}$ , 260  $\mu\text{m}$ , 195  $\mu\text{m}$  และ 18.8%, 39.1%, 9.2% ตามลำดับ ซึ่งขนาดโพรงเฉลี่ยเล็กกว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA และ NZ โดยเฉพาะส่วนผสม 0.6NS3 มีขนาดโพรงเฉลี่ยที่เล็กกว่าทุกส่วนผสม เนื่องจากอนุภาค NS มีขนาดเล็กและความละเอียดสูง ทำให้การรวมกันของวัสดุปอซโซลานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเติมเต็มช่องว่างทำให้ลดความพรุนลง และเพิ่มความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ด้วยปฏิกิริยาปอซโซลานิก

จากกรณีการกระจายขนาดโพรงอากาศของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่แทนที่ด้วย NZ ที่  $w/b = 0.5$  ในระดับปริมาณการแทนที่ 10%, 20%, และ 30% ที่มีเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศเพิ่มขึ้นตามระดับการแทนที่ (รูปที่ 4.19) แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมให้สูงขึ้น จาก  $w/b = 0.5$  เป็น 0.6 ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์พื้นที่โพรงอากาศมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญนั้น (รูปที่ 4.20) นี้แสดงว่าไม่เพียงแต่ผลของ ชนิด ขนาด ของวัสดุปอซโซลานที่ใช้แทนที่ซีเมนต์ หรือแม้แต่ชนิดของสารเพิ่มฟองที่ใช้ที่มีอิทธิพลต่อการกระจายขนาดโพรงอากาศเท่านั้น ปริมาณน้ำในส่วนผสมล้วนมีอิทธิพลต่อการกระจายขนาดโพรงอากาศของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าได้เช่นกัน



รูปที่ 4.20 การกระจายขนาดโพรงของ CLC ที่อายุ 28 วัน และ w/b = 0.6



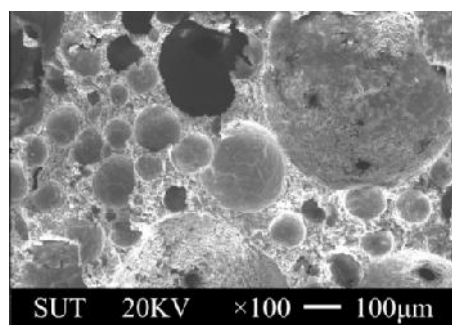
รูปที่ 4.21 การกระจายขนาดโพรงของ CLC ที่อายุ 28 วัน และ w/b = 0.7



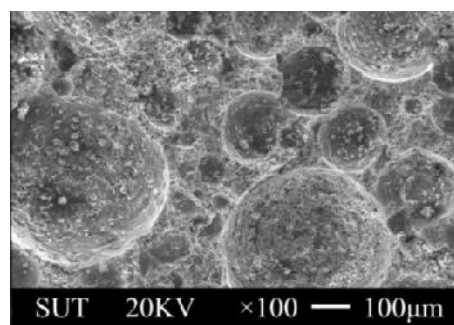
จากรูปที่ 4.21 แสดงการกระจายขนาดโพรงของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ได้จากการหล่อก้อนตัวอย่างขัดผิวหน้าที่มีอายุ 28 วัน  $w/b = 0.7$  ขนาดโพรงเฉลี่ยของ CLC ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสำหรับส่วนผสม 0.7FA10, 0.7FA20, และ 0.7FA30 เท่ากับ 359  $\mu\text{m}$ , 321  $\mu\text{m}$ , และ 303  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดโพรงเล็กลงตามปริมาณการแทนที่ของ FA ที่เพิ่มขึ้นและมีขนาดโพรงใหญ่กว่าของ CLC ที่  $w/b = 0.5$  และ 0.6 ที่ปริมาณการแทนที่ระดับเดียวกัน ขนาดโพรงเฉลี่ยของ CLC แทนที่ซีเมนต์ด้วยซีโอไลด์ธรรมชาติส่วนผสม 0.7NZ10, 0.7NZ20, และ 0.7NZ30 เท่ากับ 283  $\mu\text{m}$ , 281  $\mu\text{m}$ , และ 273  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดโพรงเล็กลงตามปริมาณการแทนที่ของ NZ ที่เพิ่มขึ้นและมีขนาดโพรงใหญ่กว่าของ CLC ที่  $w/b = 0.5$  และ 0.6 ที่ปริมาณการแทนที่ระดับเดียวกัน นอกจากนี้ขนาดโพรงเฉลี่ยที่เล็กลงยังสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนขนาดใหญ่พิเศษ (extra large porosity) ที่วิเคราะห์โดยวิธี MIP และเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของโพรงอากาศที่มีแนวโน้มลดลงตามระดับการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ ที่เพิ่มขึ้น ส่วนขนาดโพรงเฉลี่ยของ CLC ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาสำหรับส่วนผสม 0.7NS1, 0.7NS2, และ 0.7NS3 เท่ากับ 274  $\mu\text{m}$ , 272  $\mu\text{m}$ , และ 263  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งขนาดโพรงเฉลี่ยของ CLC มีขนาดเล็กลงตามปริมาณการแทนที่ของ NS ที่เพิ่มขึ้นและโพรงมีขนาดใหญ่กว่าของ CLC ที่  $w/b = 0.6$  นอกจากนี้ขนาดโพรงเฉลี่ยที่เล็กลงยังสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความพรุนขนาดใหญ่พิเศษ (extra large porosity) ที่วิเคราะห์โดยวิธี MIP และเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของโพรงอากาศที่มีแนวโน้มลดลงตามระดับการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการแทนที่ด้วยวัสดุ FA และ NZ

#### 4.7.3 การวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM โครงสร้างจุลภาคของโพรง CLC

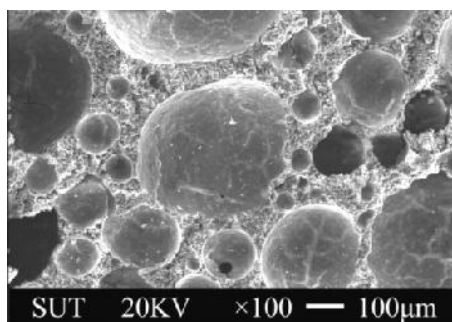
โครงสร้างผิวกะเทาะ (fractured surface) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่มีอายุ 28 วัน แสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าโพรงของส่วนผสมควบคุมมีรูปร่างทรงกลมขนาดต่าง ๆ ขนาดพองมีตั้งแต่น้อยกว่า 50  $\mu\text{m}$  ไปจนถึง 600  $\mu\text{m}$  รูปที่ 4.22 (b)–4.22 (d) แสดงภาพถ่าย SEM ของ CLC ที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคที่ต่างจากส่วนผสมควบคุม (รูปที่ 4.22 (a)) เป็นที่ชัดเจนว่าโพรง CLC มีการกระจายตัวมากกว่าของส่วนผสมควบคุม เพราะว่า FA มีอิทธิพลทำให้ช่องว่างอากาศกระจายตัวโดยการป้องกันการเชื่อมต่อและการซ้อนทับซึ่งกันและกัน (overlapping) ของฟองอากาศ (Kunhanandan Nambiar and Ramamurthy, 2007) ขนาดโพรงของ CLC อยู่ในช่วง น้อยกว่า 50  $\mu\text{m}$  ถึง 400  $\mu\text{m}$  ขนาดโพรงลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ของ FA ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของโพรง ที่พบว่าเมื่อมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA ทำให้โพรงอากาศมีขนาดเล็กลง



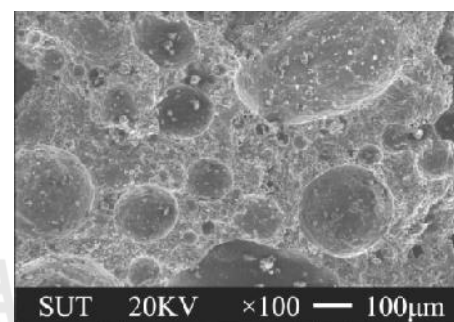
(a) OPC



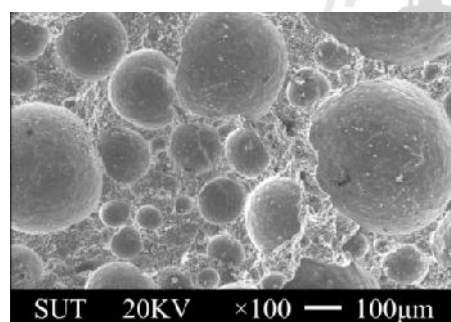
(b) 0.5FA10



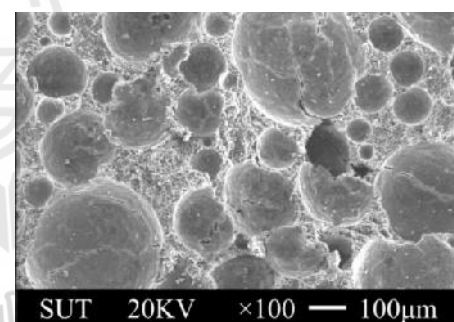
(c) 0.5FA20



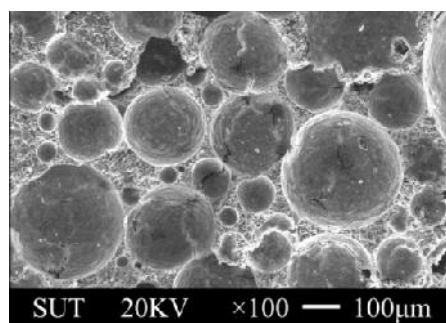
(d) 0.5FA30



(e) 0.5NZ10



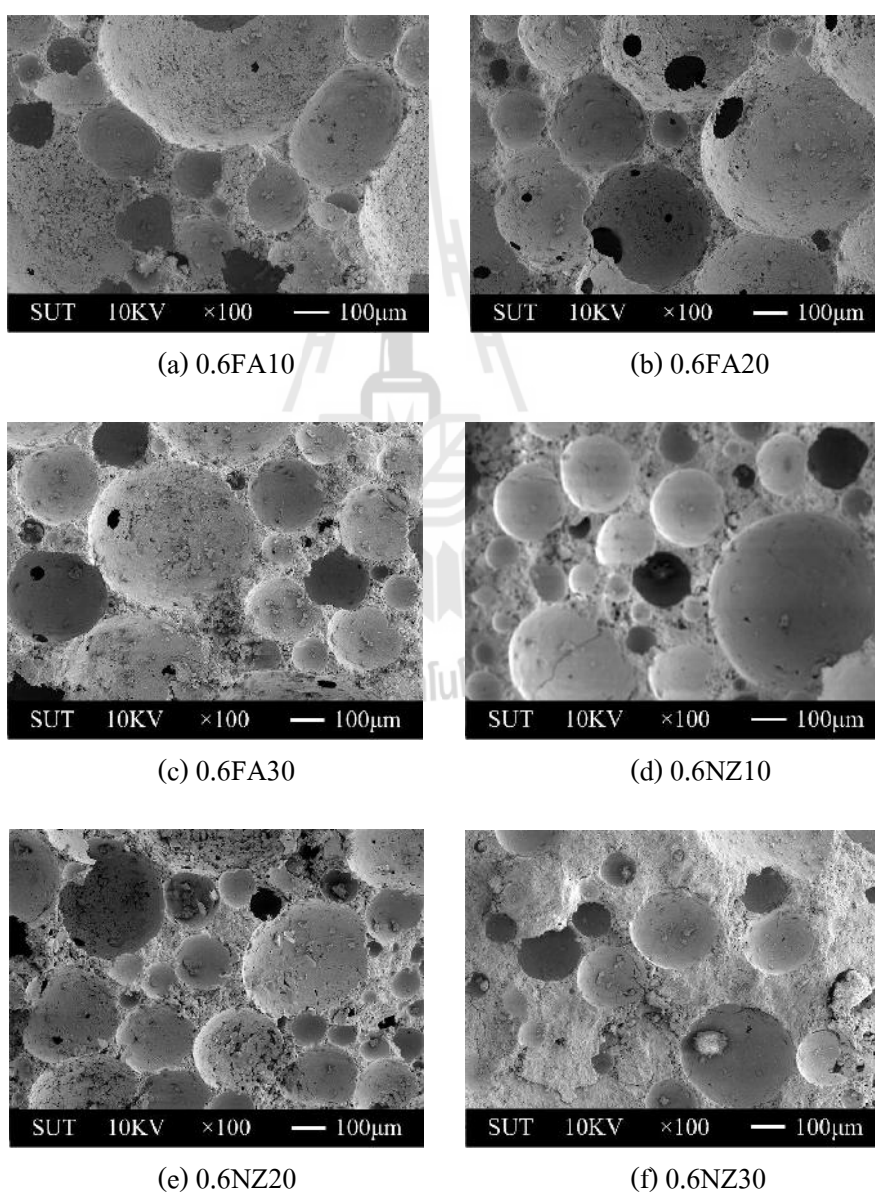
(f) 0.5NZ20



(g) 0.5NZ30

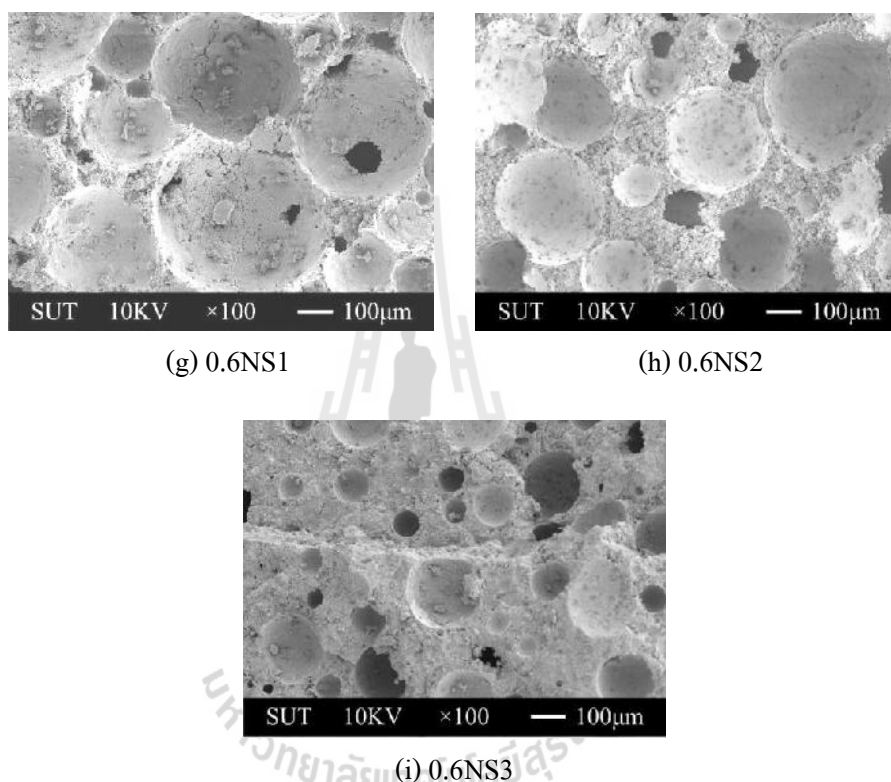
รูปที่ 4.22 ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่อายุ 28 วัน  $w/b = 0.5$

รูปที่ 4.22 (e)–4.22 (g) แสดงภาพถ่าย SEM ของ CLC ที่ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติ แทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% โดยน้ำหนักตามลำดับ เป็นที่ชัดเจนว่าโพรงมีการกระจายตัวมากกว่า CLC ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเล็กน้อย ซึ่งขนาดโพรงของซีเมนต์เพศตั้งอยู่ในช่วง น้อยกว่า 50  $\mu\text{m}$  ถึง 300  $\mu\text{m}$  และขนาดโพรงลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ของ NZ ที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนมากโพรงมีลักษณะเป็นโพรงปิด (close pore) ดังรูปที่ 4.22(e) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของส่วนผสม 0.5NZ10 ที่พบว่ามียุทธการดูดซึมน้ำที่ต่ำ



รูปที่ 4.23 ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่อายุ 28 วัน w/b = 0.6

รูปที่ 4.23 (a)–4.23 (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของ CLC ที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าโพรงมีการกระจายตัวเช่นเดียวกับที่  $w/b = 0.5$  ซึ่งขนาดโพรงของซีเมนต์เฟสตั้งอยู่ในช่วง น้อยกว่า 50  $\mu\text{m}$  ถึง 600  $\mu\text{m}$  และขนาดโพรงลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ของ FA ที่เพิ่มขึ้น

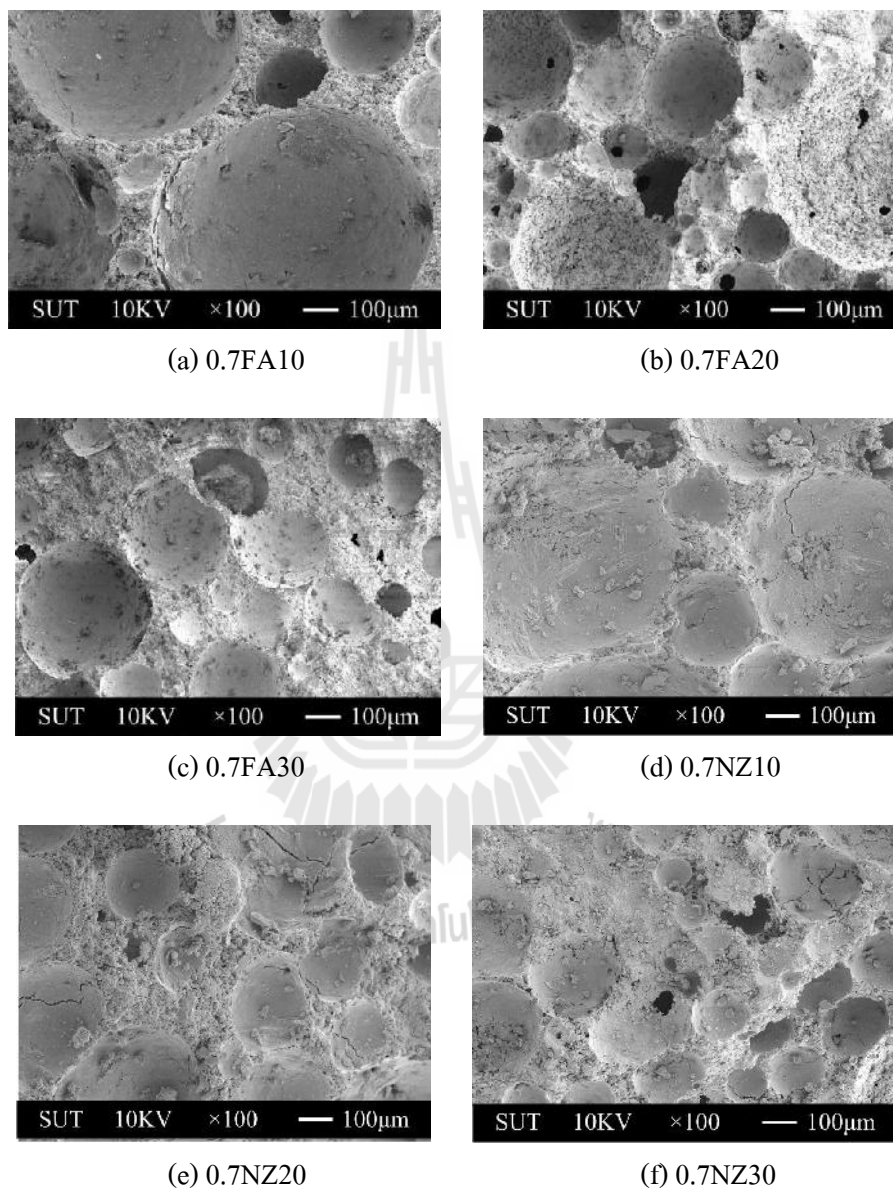


รูปที่ 4.23 ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่อายุ 28 วัน  $w/b = 0.6$  (ต่อ)

รูปที่ 4.23 (d)–4.23 (f) แสดงภาพถ่าย SEM ของ CLC ที่ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% โดยน้ำหนักตามลำดับ เป็นที่ชัดเจนว่าโพรงมีการกระจายตัวมากกว่า CLC ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเล็กน้อย ซึ่งขนาดโพรงของซีเมนต์เฟสตั้งอยู่ในช่วง น้อยกว่า 50  $\mu\text{m}$  ถึง 300  $\mu\text{m}$  และขนาดโพรงลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ของ NZ ที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนมากโพรงมีลักษณะเป็นโพรงปิด (close pore) และมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.23(e)

รูปที่ 4.23 (g)–4.23 (i) แสดงภาพถ่าย SEM ของ CLC ที่ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 1%, 2%, และ 3% โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งขนาดโพรงของซีเมนต์เฟสตั้งอยู่

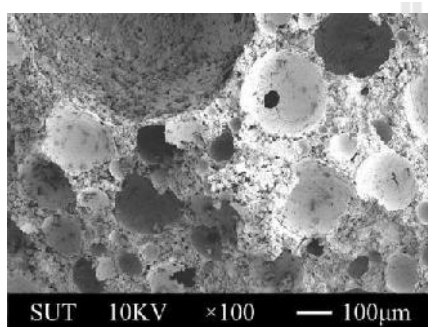
ในช่วง น้อยกว่า 50  $\mu\text{m}$  ถึง 400  $\mu\text{m}$  และขนาดโพรงลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ของ NS ที่เพิ่มขึ้น โดยโพรงมีหลายขนาดลักษณะส่วนใหญ่เป็นโพรงปิดคล้ายกับโพรงเปิด



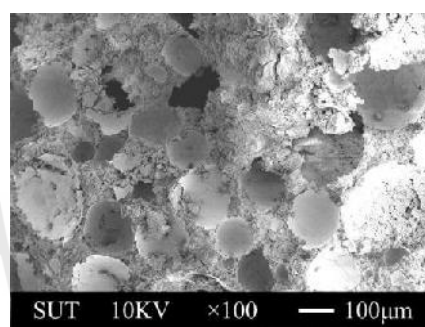
รูปที่ 4.24 ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่อายุ 28 วัน  $w/b = 0.7$

รูปที่ 4.24 (a)–4.24 (c) แสดงภาพถ่าย SEM ของ CLC ที่ผสมแก้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าโพรงมีการกระจายตัวเช่นเดียวกับที่  $w/b = 0.5$  และ 0.6 ซึ่งขนาดโพรงของซีเมนต์เพสต์อยู่ในช่วง น้อยกว่า 50  $\mu\text{m}$  ถึง 800  $\mu\text{m}$  และขนาดโพรงลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ของ FA ที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 4.24 (d)–4.24 (f) แสดง

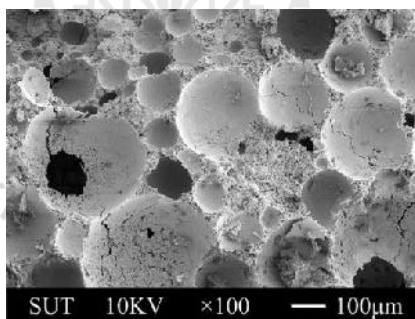
ภาพถ่าย SEM ของ CLC ที่ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% โดยน้ำหนักตามลำดับ เป็นที่ชัดเจนว่าโพรงมีการกระจายตัวมากกว่า CLC ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยเล็กน้อย ซึ่งขนาดโพรงของซีเมนต์เพศต์อยู่ในช่วง น้อยกว่า 50  $\mu\text{m}$  ถึง 400  $\mu\text{m}$  และขนาดโพรงลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ของ NZ ที่เพิ่มขึ้น โดยการแทนที่ NZ ในปริมาณ 30% ที่  $w/b = 0.7$  พบว่ามีลักษณะเป็นโพรงปิดกระจายตัวเพิ่มขึ้นกว่า  $w/b = 0.5$  และ 0.6 ดังรูปที่ 4.24 (f) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซึมน้ำที่พบว่าม้อัตรการดูดซึมน้ำลดลงด้วย



(g) 0.7NS1



(h) 0.7NS2



(i) 0.7NS3

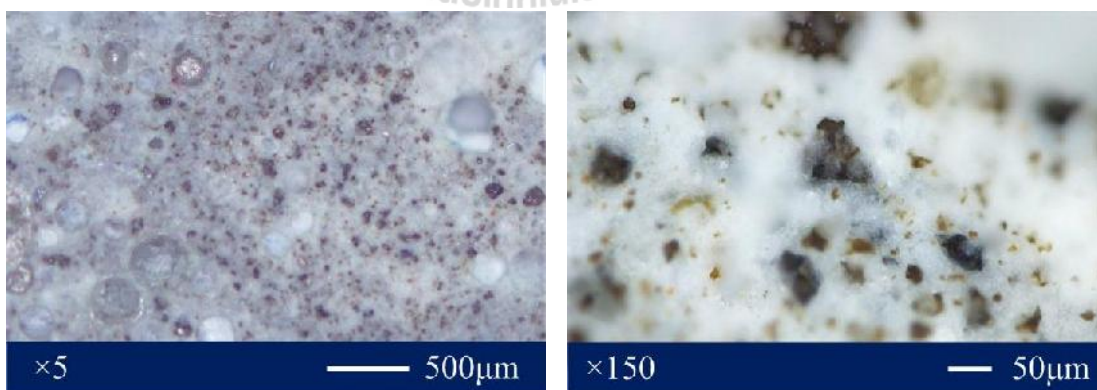
รูปที่ 4.24 ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่อายุ 28 วัน  $w/b = 0.7$  (ต่อ)

รูปที่ 4.24 (g)–4.24 (i) แสดงภาพถ่าย SEM ของ CLC ที่ผสมนาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 1%, 2%, และ 3% โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งขนาดโพรงของซีเมนต์เพศต์อยู่ในช่วง น้อยกว่า 50  $\mu\text{m}$  ถึง 500  $\mu\text{m}$  และขนาดโพรงลดลงตามระดับปริมาณการแทนที่ของ NS ที่เพิ่มขึ้น โดยโพรงมีหลายขนาดลักษณะส่วนใหญ่เป็นโพรงปิดคละกับโพรงเปิด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดโพรงกับส่วนผสม NS ที่  $w/b = 0.6$  พบว่าโพรงมีขนาดโตขึ้นเล็กน้อย

#### 4.7.4 การวิเคราะห์ภาพถ่ายผลึกซีเมนต์เฟสค์ของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอลล

รูปที่ 4.25 แสดงภาพถ่ายผลึกซีเมนต์เฟสค์ผิวหน้าตัดเรียบ (polished section) ของ CLC ผ่านการชะ (etching) ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกมีชื่อเรียกทั่วไปว่ากรดกัดแก้วเพื่อให้ผลึกเกิดการแยกเฟสสีที่ต่างกัน (De Schepper et al., 2013) และถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอลล สำหรับส่วนผสมที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงอย่างมีนัยสำคัญ ประกอบด้วยส่วนผสม 0.5FA10, 0.5NZ10, 0.6FA20, 0.6NZ20, 0.6NS1, 0.7NZ30, และ 0.6NS1 พบว่าส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุม (OPC) ปรากฏเฟส (phase) ผลึกสีน้ำตาลหรือสีม่วงของ C-S-H และเฟสผลึกสีดำของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ซึ่งกระจายอยู่ทั่วบริเวณ ดังรูปที่ 4.25 (a, b) ส่วนคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้ FA แทนที่ซีเมนต์ ปรากฏเฟสผลึกสีดำเข้มและสีด่างกลมของอนุภาคเถ้าลอยบางส่วน ดังรูปที่ 4.25 (c, d, g, h) ซึ่งเฟสผลึกสีดำมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับส่วนผสม OPC แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้ปริมาณของ  $\text{Ca(OH)}_2$  ลดลง

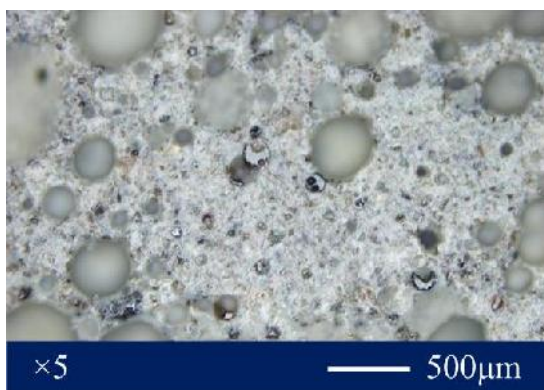
ส่วนคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้ NZ แทนที่ซีเมนต์ พบว่าเฟสผลึกสีดำเข้มหรือเฟสผลึกของ  $\text{Ca(OH)}_2$  และเฟสสีเขียวของอนุภาคซีโอไลต์ธรรมชาติ ดังรูปที่ 4.25 (e, f, i, j, m, n) ซึ่งเฟสผลึกสีดำมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับส่วนผสม OPC เช่นเดียวกับส่วนผสมที่ใช้ FA ส่วนคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้ NS แทนที่ซีเมนต์ พบว่าเฟสผลึกสีดำเข้มมีปริมาณลดลงเช่นกัน โดยเฉพาะส่วนผสม 0.7NS3 ดังรูปที่ 4.25 (k, l, o, p)



(a) OPC อายุ 28 วัน (5×)

(b) OPC อายุ 28 วัน (150×)

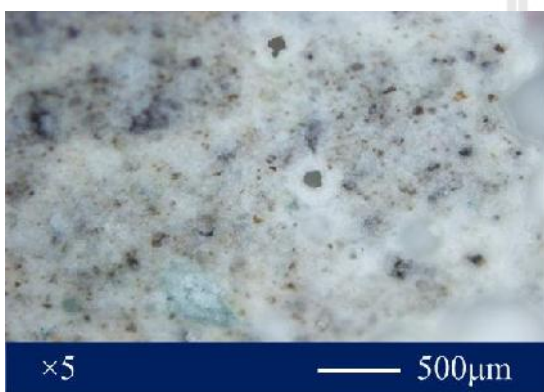
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายผิวซีเมนต์เฟสค์ของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอลล



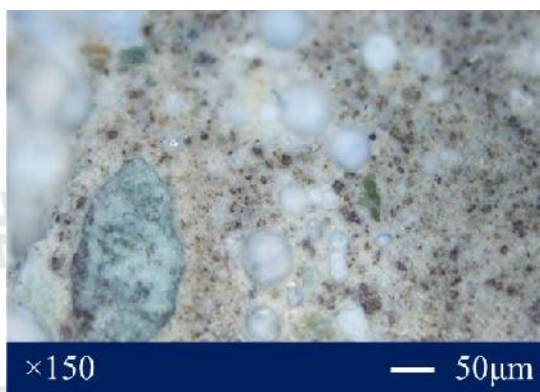
(c) 0.5FA10 อายุ 28 วัน (5×)



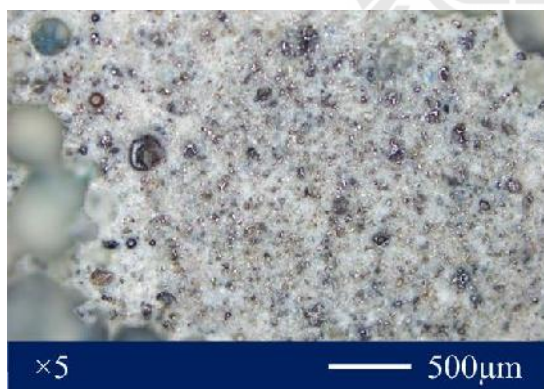
(d) 0.5FA10 อายุ 28 วัน (150×)



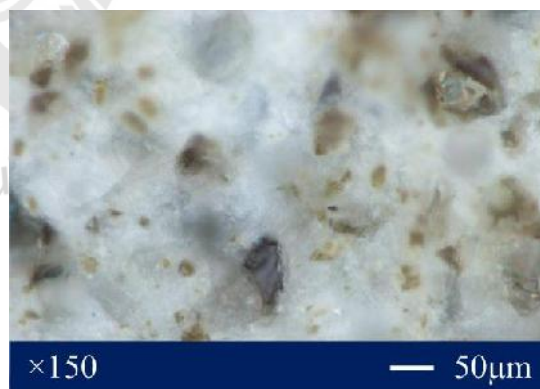
(e) 0.5NZ10 อายุ 28 วัน (5×)



(f) 0.5NZ10 อายุ 28 วัน (150×)



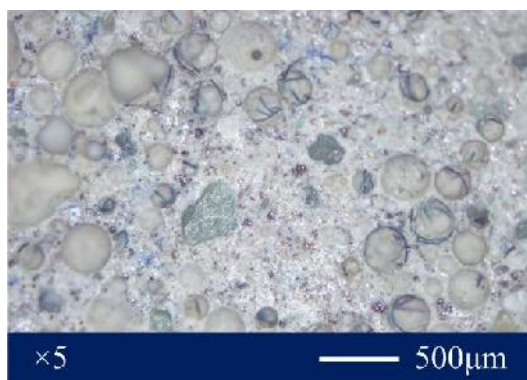
(g) 0.6FA20 อายุ 28 วัน (5×)



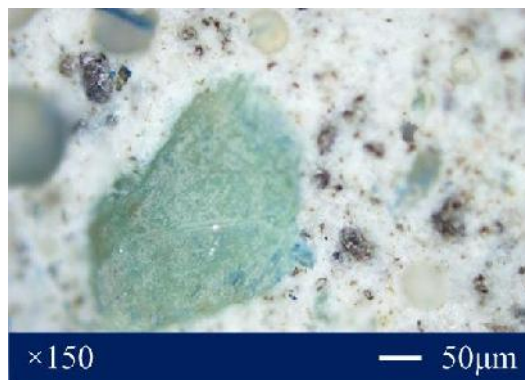
(h) 0.6FA20 อายุ 28 วัน (150×)

รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายผิวซีเมนต์เพสต์ของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล (ต่อ)

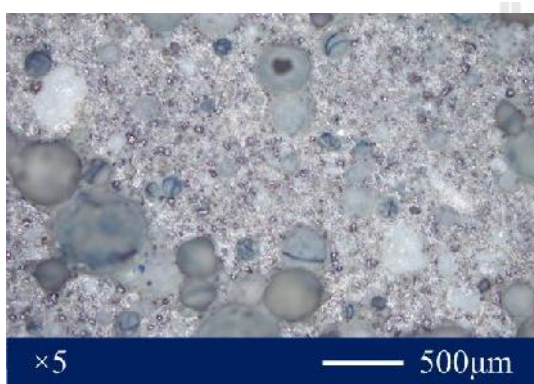




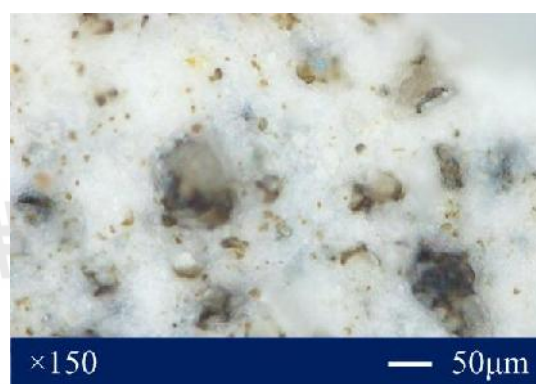
(i) 0.6NZ20 อายุ 28 วัน (5×)



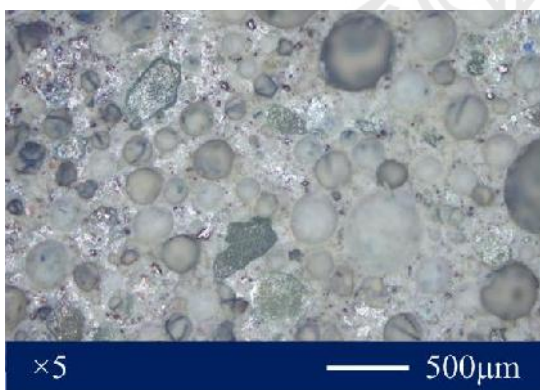
(j) 0.6NZ20 อายุ 28 วัน (150×)



(k) 0.6NS1 อายุ 28 วัน (5×)



(l) 0.6NS1 อายุ 28 วัน (150×)

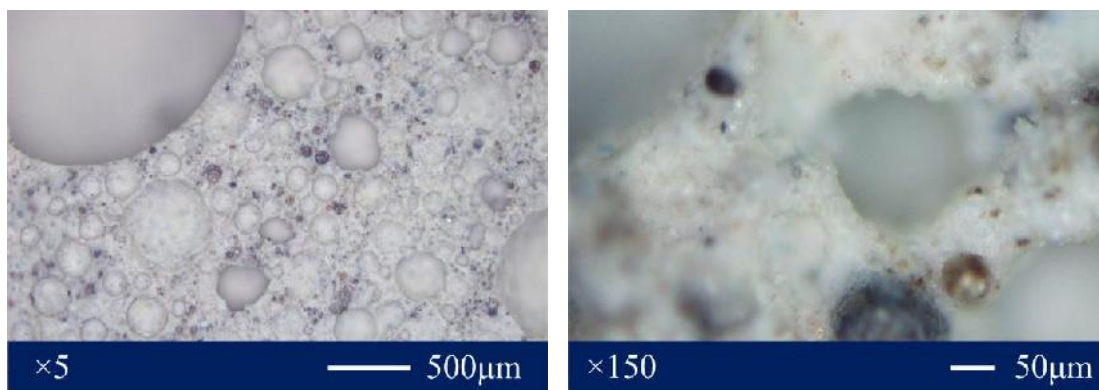


(m) 0.7NZ30 อายุ 28 วัน (5×)



(n) 0.7NZ30 อายุ 28 วัน (150×)

รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายผิวซีเมนต์เพชรของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล (ต่อ)



(o) 0.7NS1 อายุ 28 วัน (5×)

(p) 0.7NS1 อายุ 28 วัน (150×)

รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายผิวซีเมนต์เพสต์ของ CLC ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอล (ต่อ)

## 4.8 ความทนทานต่อสารแมกนีเซียมซัลเฟตของ CLC

### 4.8.1 กำลังรับแรงอัดของ CLC เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ตารางที่ 4.7 แสดงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก ที่อายุต่าง ๆ พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสของส่วนผสมควบคุม ที่อายุ 3, 14, 28, และ 60 วัน เท่ากับ 1.82, 2.73, 2.88, และ 2.97 MPa ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่ไม่ได้แช่ใน  $MgSO_4$  พบว่ากำลังรับแรงอัดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอายุต้นที่ 3 วัน และ 14 วัน เท่ากับ 0.55% และ 1.11% ตามลำดับ เนื่องจากการขยายตัวของเกลือซัลเฟตทำให้โพรงคอนกรีตมีความแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่มีกำลังอัดลดลงในช่วงอายุปลายที่ 28 วัน และ 60 วัน เท่ากับ 5.57% และ 5.71% ตามลำดับ เนื่องการเกิดเอ็ททริงไจต์และซิงเกิ้ลเจลเล็กน้อย ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส 0.5FA10 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัด ที่ 3 วัน, 14 วัน, 28 วัน, และ 60 วัน เท่ากับ 1.97, 3.18, 3.34, และ 3.53 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอายุต้นเช่นกัน แต่มีกำลังอัดลดลงในช่วงอายุปลาย โดยมีอัตรากำลังอัดเปลี่ยนแปลง (strength change) น้อยกว่าของ CON เมื่อเปรียบเทียบกับที่อายุต่าง ๆ อย่างไม่รู้ก็ตามกำลังอัดเปลี่ยนแปลงลดลงตามปริมาณการแทนที่ FA ที่เพิ่มขึ้นทุกอายุ

ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5 คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม NZ แทนที่ซีเมนต์ ในปริมาณ 10% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัด ที่ 3 วัน, 14 วัน, 28 วัน

, และ 60 วัน เท่ากับ 2.2, 3.71, 4.15, และ 4.39 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอายุต้นเช่นเดียวกับส่วนผสม CON และ FA แต่มีกำลังอัดลดลงในช่วงอายุปลาย โดยมีอัตรากำลังอัดเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าของ CON และ FA เมื่อเปรียบเทียบกันที่อายุต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างส่วนผสมที่ใช้ FA และ NZ ในปริมาณการแทนที่เท่ากัน (ไม่เกิน 20%) โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน พบว่า NZ มีประสิทธิภาพในการทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตดีกว่า FA ส่วนคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสม NS แทนที่ซีเมนต์ ในปริมาณ 1%–3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ที่  $w/b = 0.6$  พบว่ามีอัตรากำลังอัดเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 5% ซึ่งต่ำกว่าของ CON

ที่  $w/b = 0.6$  พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้วัสดุพอซโซลานทั้งสามเป็นส่วนผสม (FA, NZ, และ NS) พบว่ามีกำลังเปลี่ยนแปลงมากกว่าของ  $w/b = 0.5$  เล็กน้อย เนื่องจากผลของปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความพรุนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลต่อการซึมผ่านของสารแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดของ CLC เมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  ความเข้มข้น 5%

Mix No.	Symbol	Compressive strength, MPa (Strength change to normal, %)			
		3 d	14 d	28 d	60 d
1	CON	1.82 (0.55)	2.73 (1.11)	2.88 (-5.57)	2.97 (-5.71)
2	0.5FA10	1.97 (1.03)	3.18 (0.32)	3.34 (-3.19)	3.53 (-3.29)
3	0.5FA20	1.67 (1.21)	2.78 (1.09)	3.01 (-2.9)	3.2 (-3.03)
4	0.5FA30	1.28 (0.79)	2.16 (0.47)	2.35 (-2.89)	2.51 (-2.71)
5	0.5NZ10	2.2 (0.46)	3.71 (-0.27)	4.15 (-2.81)	4.39 (-2.66)
6	0.5NZ20	1.93 (0.52)	3.18 (0)	3.56 (-2.73)	3.81 (-2.56)
7	0.5NZ30	0.86 (1.18)	1.55 (-0.64)	2 (-2.44)	2.17 (-3.56)
8	0.5NS1	–	–	–	–
9	0.5NS2	–	–	–	–
10	0.5NS3	–	–	–	–
11	0.6FA10	1.93 (1.58)	2.95 (1.72)	3.09 (-3.44)	3.37 (-3.99)
12	0.6FA20	1.54 (0.65)	2.59 (0.39)	2.96 (-2.95)	3.16 (-3.07)
13	0.6FA30	1.22 (1.67)	2.07 (1.97)	2.28 (-2.98)	2.38 (-2.86)

ตารางที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดของ CLC เมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  ความเข้มข้น 5% (ต่อ)

Mix No.	Symbol	Compressive strength, MPa (Strength change to normal, %)			
		3 d	14 d	28 d	60 d
14	0.6NZ10	2.26 (0.89)	3.32 (0)	3.72 (-3.12)	4.04 (-2.88)
15	0.6NZ20	2.4 (-0.41)	3.65 (-1.35)	4.13 (-2.82)	4.52 (-2.8)
16	0.6NZ30	1.76 (0.57)	2.62 (0.77)	3.1 (-1.27)	3.26 (-3.26)
17	0.6NS1	2.95 (1.72)	3.78 (2.16)	3.9 (-4.88)	4.1 (-4.43)
18	0.6NS2	2.44 (1.67)	3.21 (2.56)	3.25 (-4.41)	3.4 (-3.13)
19	0.6NS3	1.53 (2)	2.3 (2.22)	2.35 (-4.08)	2.43 (-2.8)
20	0.7FA10	1.84 (2.22)	2.87 (2.5)	3 (-3.54)	3.16 (-4.24)
21	0.7FA20	1.49 (1.36)	2.55 (2)	2.8 (-3.45)	3 (-3.23)
22	0.7FA30	1.23 (2.5)	1.95 (3.17)	2.13 (-3.18)	2.28 (-2.98)
23	0.7NZ10	1.5 (-0.66)	2.55 (0)	3.01 (-4.44)	3.4 (-3.68)
24	0.7NZ20	2.03 (-0.98)	3.21 (0.31)	3.68 (-3.16)	4.27 (-2.95)
25	0.7NZ30	2.4 (0)	3.71 (0.27)	4.24 (-3.64)	4.7 (-4.08)
26	0.7NS1	3.44 (2.69)	4.35 (2.35)	4.47 (-4.89)	4.77 (-4.6)
27	0.7NS2	2.8 (2.94)	3.5 (1.45)	3.58 (-4.53)	3.87 (-4.21)
28	0.7NS3	1.97 (3.68)	2.5 (2.04)	2.66 (-4.32)	2.81 (-4.1)

หมายเหตุ : - ส่วนผสมของ Mix No. 8, 9, และ 10 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็น CLC ได้ จึงไม่มีผลการทดสอบแสดง  
 - ค่าในวงเล็บที่มีเครื่องหมายบวก (+) หมายถึง คอนกรีตที่แช่  $MgSO_4$  มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตปกติที่ไม่ได้แช่  $MgSO_4$   
 - ค่าในวงเล็บที่มีเครื่องหมายติดลบ (-) หมายถึง คอนกรีตที่แช่ใน  $MgSO_4$  มีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตปกติที่ไม่ได้แช่  $MgSO_4$

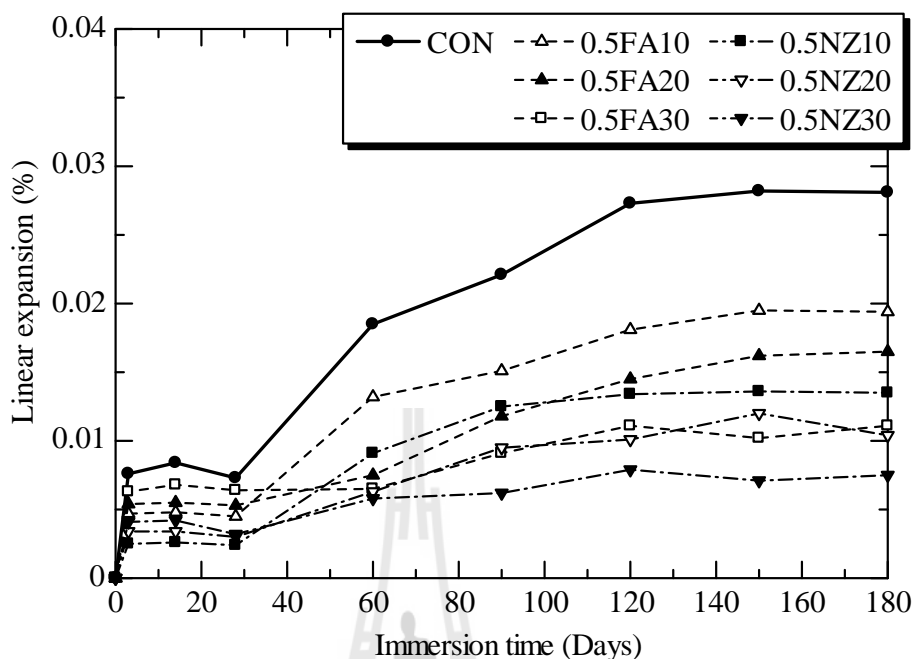
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานเท่ากับ 0.7 พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้วัสดุพอซโซลานทั้งสามเป็นส่วนผสม มีกำลังเปลี่ยนแปลงมากกว่าของ  $w/b = 0.5$  และ 0.6 เล็กน้อย เนื่องจากผลของปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความพรุนเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการซึมผ่านของสารแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก ในช่วงเวลา 3 ถึง 60 วัน ให้ค่ากำลังรับแรงอัดไม่แตกต่างกับที่บ่มด้วยวิธีปกติก่อนนัก แสดงว่าการวัดการเปลี่ยนแปลงหรือการสูญเสียกำลังของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

ภายใต้การแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตช่วงอายุ 60 วัน ไม่สามารถแสดงผลหรืออิทธิพลความแตกต่างของการทำลาย

#### 4.8.2 การขยายตัวของแท่งคอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 4.26 แสดงอัตราการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า ที่  $w/b = 0.5$  เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก พบว่าแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าของส่วนผสมควบคุมเมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  เป็นเวลา 180 วัน มีการขยายตัวเท่ากับ 0.0281% ซึ่งขยายตัวเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นและการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงเวลาก่อน 28 วัน สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่พบว่ามีกำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอายุต้นที่อายุ 3–14 วัน และเมื่อเวลาผ่านไปหลังจาก 28 วัน การขยายตัวของแท่งตัวอย่างจึงเห็นชัดเจนมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าลดลงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างเกลือซัลเฟตของ  $MgSO_4$  กับ  $C_3A$  แล้วได้สารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $MgSO_4$  กับ  $Ca(OH)_2$  (ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน) แล้วได้สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (ยิปซัม) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับ  $C_3A$  (ที่มีอยู่แล้วใน OPC) จะทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เอ็ททริงไจต์ ซึ่งถ้ามีปริมาณมากจะส่งผลให้คอนกรีตขยายตัวและแตกร้าวได้ในที่สุด อย่างไรก็ตามการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าเมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  เป็นเวลา 180 วัน ของส่วนผสม 0.5FA10, 0.5FA20, และ 0.5FA30 เท่ากับ 0.0194%, 0.0165%, และ 0.0111% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่า CON และมีการขยายตัวที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ FA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วย FA ทำให้ปริมาณ  $Ca(OH)_2$  ที่ได้จากผลผลิต C-S-H มีปริมาณลดลง นอกจากนี้การผสมเกลือและปฏิกิริยาปอซโซลานิกช่วยลดการซึมผ่านลงได้ ทำให้สารซัลเฟตเข้าทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น

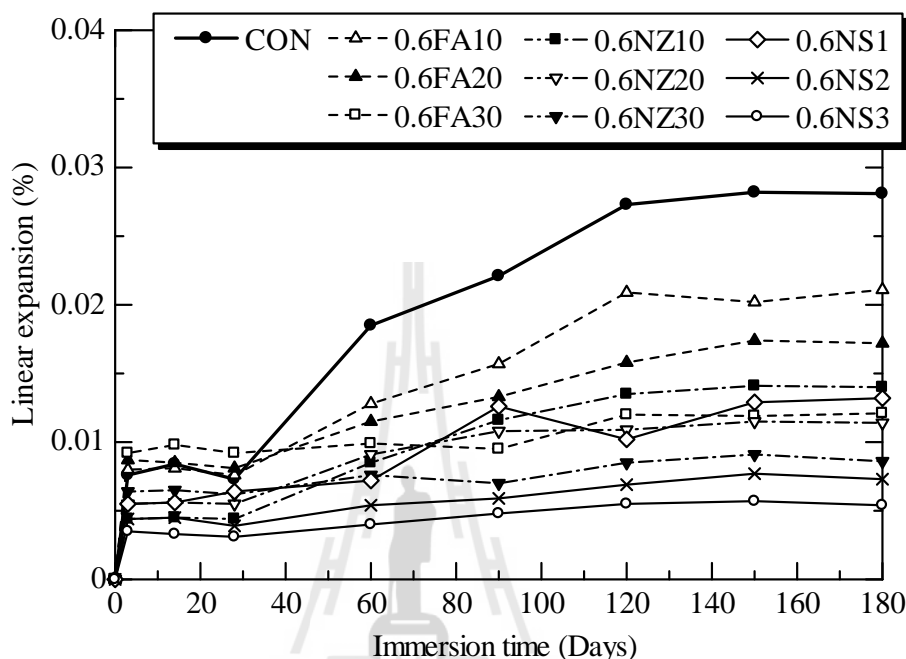
อัตราการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าเมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  เป็นเวลา 180 วัน ของส่วนผสม 0.5NZ10, 0.5NZ20, และ 0.5NZ30 เท่ากับ 0.0135%, 0.0104%, และ 0.0075% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่า CON มีการขยายตัวลดลงตามปริมาณการแทนที่ NZ ที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม 0.5NZ30 มีอัตราการขยายตัวต่ำสุดสำหรับ  $w/b = 0.5$  และเมื่อเปรียบเทียบการลดการขยายตัวของแท่งคอนกรีตส่วนผสมที่ใช้เกลือแทนที่ซีเมนต์กับส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติที่มีปริมาณการแทนที่เท่ากัน พบว่าการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีประสิทธิภาพในการลดการขยายตัวของคอนกรีตได้ดีกว่าการแทนที่ด้วยเกลือ



รูปที่ 4.26 การขยายตัวของแท่ง CLC ที่  $w/b = 0.5$  ในสารละลาย  $MgSO_4$  ความเข้มข้น 5%

รูปที่ 4.27 แสดงอัตราการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ที่  $w/b = 0.6$  เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงเวลา ก่อน 28 วัน สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่พบว่ากำลังอัดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอายุต้น (3–14 วัน) เมื่อเวลาผ่านไปหลังจาก 28 วัน การขยายตัวของแท่งตัวอย่างจึงเห็นชัดเจนมากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าลดลงเล็กน้อยเช่นเดียวกับส่วนผสมที่ใช้  $w/b=0.5$  การขยายตัวของแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  เป็นเวลา 180 วัน ของส่วนผสม 0.6FA10, 0.6FA20, และ 0.6FA30 เท่ากับ 0.0211%, 0.0172%, และ 0.0121% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่า CON และมีการขยายตัวที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ FA ที่เพิ่มขึ้น อัตราการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  เป็นเวลา 180 วัน ของส่วนผสม 0.6NZ10, 0.6NZ20, และ 0.6NZ30 เท่ากับ 0.014%, 0.0114%, และ 0.0086% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่า CON มีการขยายตัวลดลงตามปริมาณการแทนที่ NZ ที่เพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  เป็นเวลา 180 วัน ของส่วนผสม 0.6NS1, 0.6NS2, และ 0.6NS3 เท่ากับ 0.0132%, 0.0073%, และ 0.0054% ตามลำดับ ซึ่ง

ต่ำกว่า CON มีการขยายตัวลดลงตามปริมาณการแทนที่ NS ที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม 0.6NS3 มีอัตราการขยายตัวต่ำสุดสำหรับ  $w/b = 0.6$

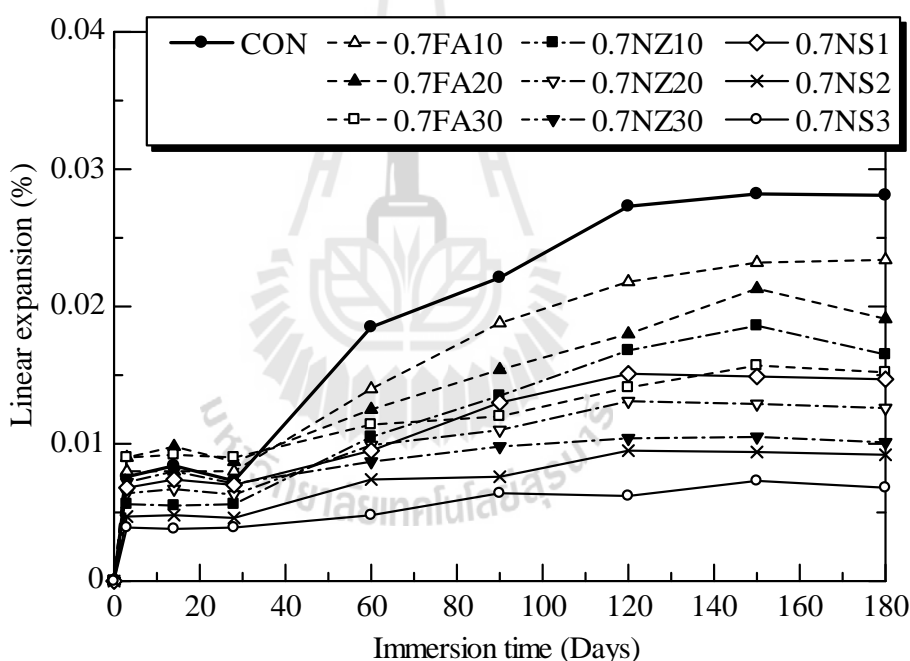


รูปที่ 4.27 การขยายตัวของแท่ง CLC ที่  $w/b = 0.6$  ในสารละลาย  $MgSO_4$  ความเข้มข้น 5%

รูปที่ 4.28 แสดงอัตราการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส ที่  $w/b = 0.7$  เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงเวลาก่อน 28 วัน สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่พบว่ากำลังอัดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอายุต้น และเมื่อเวลาผ่านไปหลังจาก 28 วัน การขยายตัวของแท่งตัวอย่างจึงเห็นชัดเจนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าลดลงเช่นเดียวกับส่วนผสมที่ใช้  $w/b=0.5$  และ  $0.6$  โดยอัตราการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  เป็นเวลา 180 วันของส่วนผสม 0.7FA10, 0.7FA20, และ 0.7FA30 เท่ากับ 0.0234%, 0.0191%, และ 0.0152% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าของ CON และมีการขยายตัวที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ FA ที่เพิ่มขึ้น อัตราการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  เป็นเวลา 180 วันของส่วนผสม 0.7NZ10, 0.7NZ20, และ 0.7NZ30 เท่ากับ 0.0165%, 0.0126%, และ 0.0101% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าของ CON มีการขยายตัวลดลงตามปริมาณการแทนที่ NZ ที่เพิ่มขึ้น ส่วนการขยายตัวของ

แท่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  เป็นเวลา 180 วัน ของส่วนผสม 0.7NS1, 0.7NS2, และ 0.7NS3 เท่ากับ 0.0147%, 0.0092%, และ 0.0068% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าของส่วนผสม CON และมีอัตราการขยายตัวลดลงตามปริมาณการแทนที่ NS ที่เพิ่มขึ้น โดยส่วนผสม 0.7NS3 มีอัตราการขยายตัวต่ำสุดสำหรับ  $w/b = 0.7$

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน พบว่ามีอัตราอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำในส่วนผสมมีอิทธิพลต่อขนาดโพรง และขนาดโพรงมีผลต่อการซึมผ่านของ  $MgSO_4$  ดังนั้นจึงมีผลต่ออัตราการขยายตัวของคอนกรีต อย่างไรก็ตามอัตราการขยายตัวมีแนวโน้มลดลงเกือบคงที่ในช่วงเวลาตั้งแต่ 150 วัน



รูปที่ 4.28 การขยายตัวของแท่ง CLC ที่  $w/b = 0.7$  ในสารละลาย  $MgSO_4$  ความเข้มข้น 5%

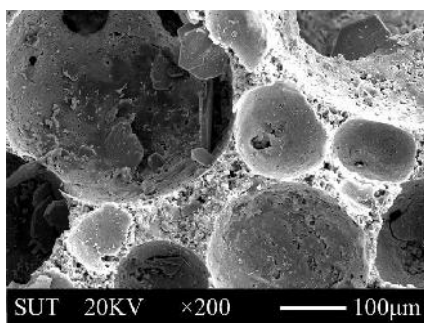
จากผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมาตรฐานของ CLC เมื่อแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  ความเข้มข้น 5% (รูปที่ 4.26–4.28) ที่ให้ค่าอัตราการขยายตัวที่แตกต่างกันนั้น มีสาเหตุมาจากปัจจัยหลักเดียวกันโดยปฏิกิริยาเคมีระหว่างเกลือซัลเฟตของ  $MgSO_4$  กับ  $C_3A$  แล้วได้สารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ดังสมการที่ 2.11 หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $MgSO_4$  กับ  $Ca(OH)_2$  (ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน) แล้วได้สารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (ยิปซั่ม)



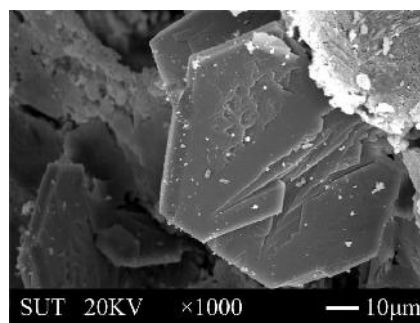
ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งเมื่อยิปซั่มทำปฏิกิริยากับ  $C_3A$  (ที่มีอยู่แล้วใน OPC) จะทำให้ได้สารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ดังสมการที่ 2.13 ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เอ็ททริงไจต์ ซึ่งถ้ามีปริมาณมากจะส่งผลให้คอนกรีตขยายตัวและแตกร้าวได้ นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจาก  $MgSO_4$  ที่ทำปฏิกิริยาเคมีโดยตรงกับ C-S-H แล้วได้สารประกอบ ยิปซั่ม สาร  $Mg(OH)_2$  และ ซิลิกาเจล ดังสมการที่ 2.14 โดยที่  $Mg(OH)_2$  และซิลิกาเจลทำปฏิกิริยากันได้สารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังสมการที่ 2.15 ซึ่งแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตและซิลิกาเจลมีคุณสมบัติไม่แข็งแรง ส่วนยิปซั่ม (ที่ได้จากสมการที่ 2.14) สามารถทำปฏิกิริยากับ  $C_3A$  ได้อีก แต่การเกิดปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวของแต่ละส่วนผสมนั้นอาจมีปริมาณที่ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับผลของ ชนิด ความเป็นอิสระ ขนาดอนุภาคหรือความละเอียด ปริมาณสารซิลิกา ของวัสดุปอซโซลาน ระดับการแทนที่ OPC ด้วยวัสดุปอซโซลานหรือปริมาณ OPC ที่ใช้ ตลอดจนความพรุนของคอนกรีต และอัตราส่วน w/b ที่ใช้ ซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างซีเมนต์เฟสค์ของ CLC ให้มีอัตราการขยายตัวที่แตกต่างกัน (Jaturapitakkul et al., 2007; Setina et al., 2013)

#### 4.8.3 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจากภาพถ่าย SEM ของ CLC เมื่อแช่ใน $MgSO_4$

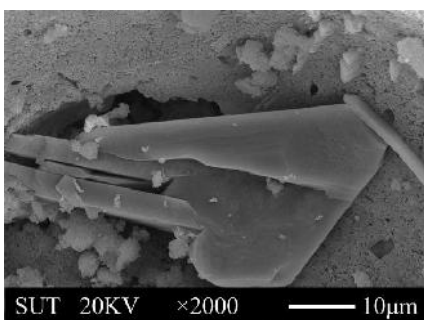
แท่งตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ผ่านการแช่ในสารละลาย  $MgSO_4$  อายุ 90 วัน จำนวน 3 ตัวอย่างของส่วนผสม CON, 0.7FA10, และ 0.6NS3 ซึ่งมีการขยายตัวอย่างมีนัยสำคัญ ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โครงสร้างในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดกำลังขยายสูง (SEM) จากภาพจับในรูปแบบที่ 4.29 (a) แสดงภายในเซลล์ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าของส่วนผสมควบคุมที่แช่  $MgSO_4$  อายุ 90 วัน ปรากฏผลึกของ  $Ca(OH)_2$  เกิดขึ้นที่ผิวเซลล์ ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (hexagonal plate) ดังในรูปแบบที่ 4.29 (b) การเข้าทำลายของ  $MgSO_4$  ทำให้เกิดผลึกของยิปซั่มและผลึกเอ็ททริงไจต์ผุดขึ้นที่ผิวของเซลล์ ดังในรูปแบบที่ 4.29 (c-d) ซึ่งทั้งสองเป็นสารที่มีความหนาแน่นต่ำมีปริมาตรโตขึ้นทำให้ซีเมนต์เกิดการขยายตัว ด้วยเหตุนี้ส่วนผสมควบคุมจึงมีอัตราการขยายตัวมากกว่าทุกส่วนผสม นอกจากนี้จากภาพถ่ายของ CON ยังแสดงให้เห็นถึงการดึงคัลเซียมของ C-S-H ที่ทำให้เกิดผลผลิตซิลิกาเจล ที่มีความนุ่มไม่แข็งแรงหรือทนต่อการชะละลายได้ ส่งผลให้ซีเมนต์เฟสค์สูญเสียกำลังรับแรงอัด



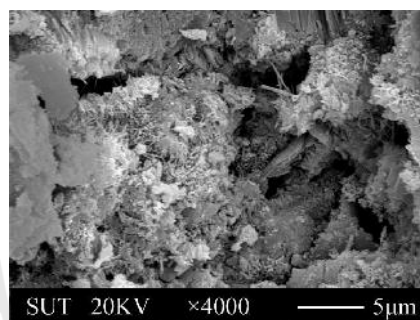
(a) CON อายุ 90 วัน (200×)



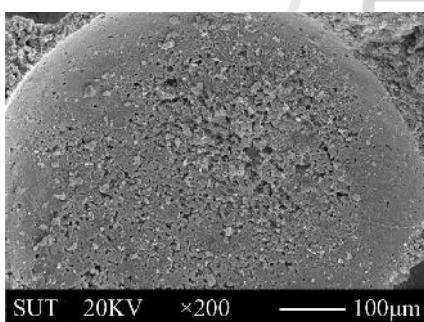
(b) CON อายุ 90 วัน (1000×)



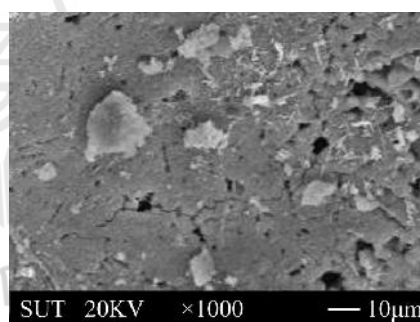
(c) CON อายุ 90 วัน (2000×)



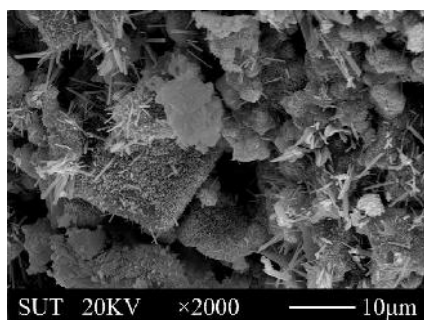
(d) CON อายุ 90 วัน (4000×)



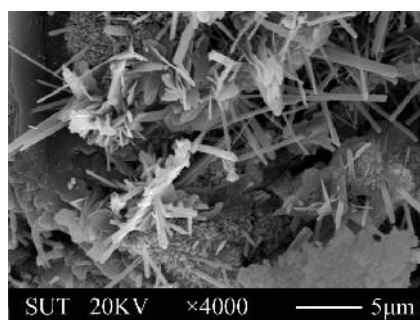
(e) 0.7FA10 อายุ 90 วัน (200×)



(f) 0.7FA10 อายุ 90 วัน (1000×)

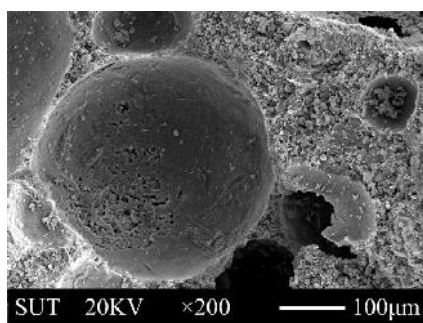


(g) 0.7FA10 อายุ 90 วัน (2000×)

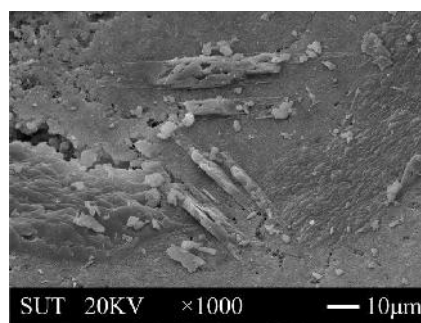


(h) 0.7FA10 อายุ 90 วัน (4000×)

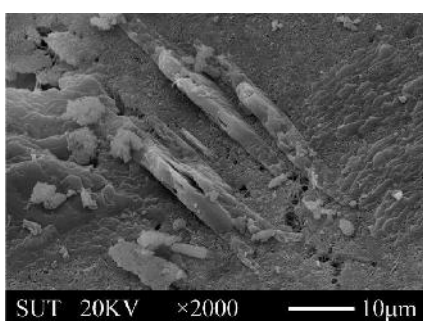
รูปที่ 4.29 ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่แช่ใน  $MgSO_4$



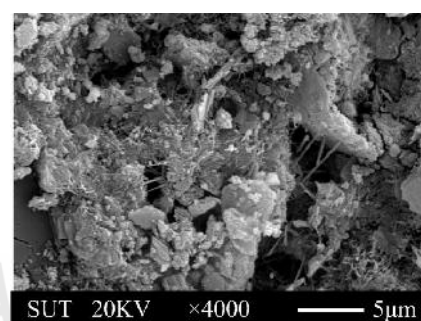
(i) 0.7NS3 อายุ 90 วัน (200×)



(j) 0.7NS3 อายุ 90 วัน (1000×)



(k) 0.7NS3 อายุ 90 วัน (2000×)



(l) 0.7NS3 อายุ 90 วัน (4000×)

รูปที่ 4.29 ภาพ SEM ของ Fractured Surface ของ CLC ที่แช่ใน  $MgSO_4$  (ต่อ)

จากภาพ SEM ในรูปที่ 4.29 (e-f) แสดงภายในเซลล์ของคอนกรีตมวลเบาเซลล์ดูว่า ส่วนผสม 0.7FA10 ที่แช่  $MgSO_4$  อายุ 90 วัน ซึ่งมีผลอัตราการขยายตัวมากเป็นอันดับที่สองรองจาก CON พบว่าที่ผิวของเซลล์เกิดผลึก (crystalline) อุดช่องว่างขนาดเล็กขึ้น เนื่องจากผลของการเข้า ทำลายของ  $MgSO_4$  ด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอายุ ต้น แต่คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดลดลงในช่วงอายุปลาย เนื่องจากการเกิดผลึกของยิปซัมและ ผลึกเอ็ททริงไนด์ที่ต่อเนื่องตามอายุคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังในรูปที่ 4.29 (g-h) ส่วนการแทนที่ด้วยนา โนซิลิกา (0.6NS3) ซึ่งมีผลอัตราการขยายตัวต่ำกว่าทุกส่วนผสม พบว่าผิวเซลล์มีลักษณะเรียบ ผลึก ของ  $Ca(OH)_2$  เกิดขึ้นไม่มากเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุมและ 0.7FA10 เนื่องจากผลของขนาด อนุภาคที่เล็กและปริมาณ  $SiO_2$  ของนาโนซิลิกา ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ฉะนั้นผลึกของ  $Ca(OH)_2$  จึงปรากฏให้เห็นเพียงเล็กน้อย ดังในรูปที่ 4.29 (i-j) ส่งผลต่อการเกิด ผลึกของยิปซัมและเอ็ททริงไนด์ลดลงตามลำดับ ดังในรูปที่ 4.29 (k-l) ซึ่งคล้ายกับรายงาน ผลการวิจัยของ Qing et al. (2007)

#### 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาคของ CLC

##### 4.9.1 ความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำ

ตารางที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำสำหรับส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเปรียบเทียบกับฟังก์ชัน (Fit curve) เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Best fit) พบว่าความพรุนรวมสัมพันธ์กับการดูดซึมน้ำของคอนกรีต ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามชนิดและปริมาณวัสดุปอซโซลานที่ใช้แทนที่ซีเมนต์ โดยคอนกรีตมีแนวโน้มการดูดซึมน้ำมากขึ้นตามปริมาณความพรุนรวมที่เพิ่มขึ้นใกล้เคียงฟังก์ชันโพลิโนเมียล เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่เรียกว่า R-Square หรือ  $R^2$  เท่ากับ 0.88 มีค่าใกล้เคียง 1.00 มากที่สุดในจำนวนฟังก์ชันที่เปรียบเทียบทั้งหมด ดังรูปที่ 4.30

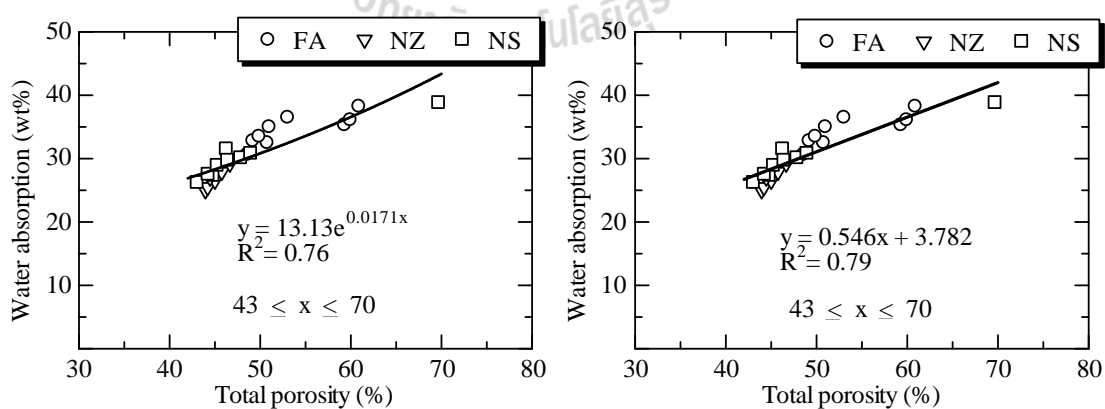
ตารางที่ 4.8 ความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของ CLC ที่อายุ 28 วัน

Mix No.	Symbol	Total porosity at 28 days (%)	Water absorption at 28 days (wt%)
1	OPC	52.27	30.00
2	0.5FA10	48.56	30.60
3	0.5FA20	50.78	32.50
4	0.5FA30	59.32	35.30
5	0.5NZ10	43.06	26.20
6	0.5NZ20	44.81	27.30
7	0.5NZ30	69.71	38.80
8	0.5NS1	–	–
9	0.5NS2	–	–
10	0.5NS3	–	–
11	0.6FA10	49.20	32.80
12	0.6FA20	51.00	35.00
13	0.6FA30	59.95	36.10
14	0.6NZ10	44.27	27.50
15	0.6NZ20	45.27	28.90
16	0.6NZ30	46.28	31.50

ตารางที่ 4.8 ความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของ CLC ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Mix No.	Symbol	Total porosity at 28 days (%)	Water absorption at 28 days (wt%)
17	0.6NS1	43.95	25.00
18	0.6NS2	44.20	25.50
19	0.6NS3	45.00	26.50
20	0.7FA10	49.88	33.50
21	0.7FA20	53.04	36.50
22	0.7FA30	60.90	38.25
23	0.7NZ10	46.42	29.70
24	0.7NZ20	47.86	30.10
25	0.7NZ30	48.97	30.80
26	0.7NS1	44.46	27.00
27	0.7NS2	45.75	27.90
28	0.7NS3	46.65	29.20

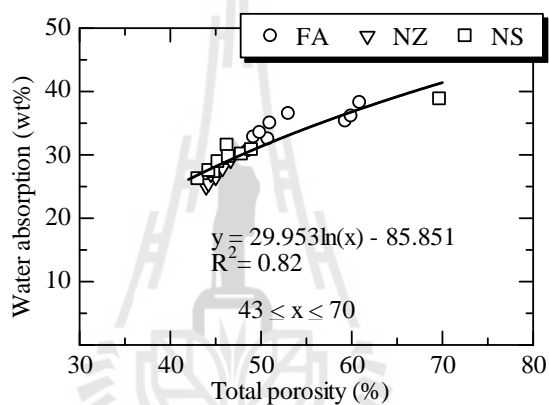
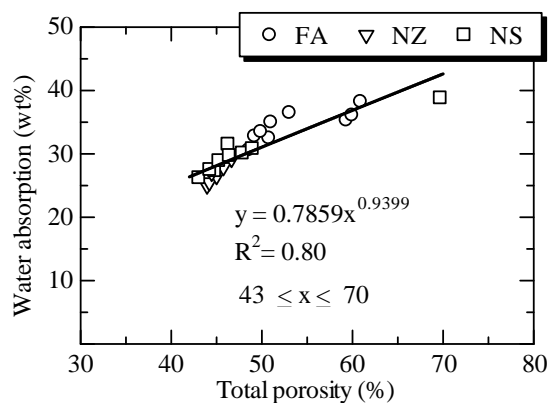
หมายเหตุ : Mix. No. 8, 9, และ 10 ยกเลิกการทดสอบ



(a) เอ็กซ์โพเนนเชียล

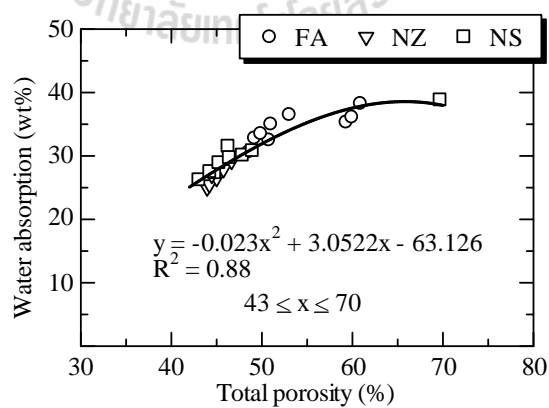
(b) เชิงเส้น

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของ CLC ที่อายุ 28 วัน  
เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ



(c) เลขยกกำลัง

(d) ลอการิทึม



(e) โพลีโนเมียล

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของ CLC ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ (ต่อ)

จากรูปที่ 4.30 (e) เมื่อเส้นแนวโน้มระหว่างความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำของ CLC ที่ศึกษาี้ใกล้เคียงฟังก์ชัน โพลีโนเมียล โดยมีขอบเขตความพรุนรวมอยู่ในช่วง 43% ถึง 70% ซึ่งความลาดชันของเส้นแนวโน้มเริ่มลดลงในช่วงความพรุนรวมระหว่าง 65–70% นั้นแสดงว่าค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเมื่อมีความพรุนมากขึ้นตั้งแต่ระดับ 65% ขึ้นไป การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบฟังก์ชันของความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำกับผลงานวิจัยที่ผ่านมามีความแตกต่างกัน โดย Cahit (2011) พบว่าการดูดซึมน้ำและความพรุนมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (linear) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.86 ขณะที่ Kearsley and Wainwright (2001) ก็พบว่าการดูดซึมน้ำและความพรุนนั้นมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.86 เช่นเดียวกัน ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบ Fit Curve ความพรุนรวมและการดูดซึมน้ำกับผลงานวิจัยต่างประเทศ

Authors	Type of concrete and dry density	Function	Equation fitted	R <sup>2</sup>
Cahit (2011)	Cement mortar (2004 kg/m <sup>3</sup> )	Linear	$y = 0.4878x$	0.86
Kearsley and Wainwright (2001)	Foamed concrete (824 kg/m <sup>3</sup> )	Linear	$y = 0.6429x - 10.286$	0.86
Present study	Cellular lightweight concrete (800 kg/m <sup>3</sup> ) *	Polynomial	$y = -0.023x^2 + 3.0522x - 63.126$	0.88

หมายเหตุ : \* ค่าโดยประมาณ

จากผลการศึกษา CLC ทุกส่วนผสมซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 25–39 % และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ผ่านมามีค่าการดูดซึมน้ำเพียง 2–3 % (Medina et al., 2013) หรืออาจกล่าวได้ว่า CLC ดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตน้ำหนักปกติประมาณ 10 เท่า เนื่องจาก CLC มีความพรุนที่สูงกว่า ในขณะที่คอนกรีตมวลรวมเบาอบไอน้ำ (ออโตเคลป) ที่ศึกษาโดย Topçua and Uyguno lu (2007) ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำระหว่าง 66–75 % โดยสูงกว่าของ CLC ประมาณ 2 เท่า อย่างไรก็ตามค่าการดูด

ซึมน้ำของ CLC ที่ศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกับโฟมคอนกรีตที่ศึกษาโดย Kearsley and Wainwright (2001) ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 29–37 % ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตกับงานวิจัยต่างประเทศ

Authors	Type of concrete and dry density	Material composition	Porosity (%)	Water absorption (%)
Medina et al. (2013)	Normal weight concrete (2,390 kg/m <sup>3</sup> )	Cement-sand-stone	15.72	2–3
Topçua and Uyguno lu (2007)	Autoclaved lightweight aggregate concrete (900 kg/m <sup>3</sup> )	Cement-diatomite	60–63	66–75
Kearsley and Wainwright (2001)	Foamed concrete (824 kg/m <sup>3</sup> )	Cement-pulverized fuel ash	59–63	29–37
Present study	Cellular lightweight concrete (800 kg/m <sup>3</sup> ) *	Cement-FA	49–61	31–38
		Cement-NZ	43–70	26–39
		Cement-NS	44–47	25–29

หมายเหตุ : \* ค่าโดยประมาณ

#### 4.9.2 ความพรุนเจล ความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนเจล ความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดสำหรับส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยและซีโอไลด์ธรรมชาติเป็นส่วนผสม แนวโน้มกราฟของความพรุนเจลและกำลังรับแรงอัดไม่สัมพันธ์กัน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R square หรือ R<sup>2</sup>) มีค่าต่ำ ดังสังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 4.31 ส่วนความพรุนเจลของคอนกรีตที่ใช้นาโนซิลิกา แนวโน้มสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดเนื่องจากความพรุนเจลมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ FA หรือ NZ อย่างเห็นได้ชัด แต่ระดับความพรุนคาปิลลารีของคอนกรีตสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กล่าวคือคอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีปริมาณความพรุนต่ำลง โดยกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 2 – 4.5 MPa ขณะที่มีความพรุนคาปิลลารีระหว่าง 29% – 60% ดังรูปที่ 4.32 ถึง รูปที่ 4.34 นอกจากนี้ยังพบว่าส่วนผสมคอนกรีตที่ให้กำลังอัดสูงจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ



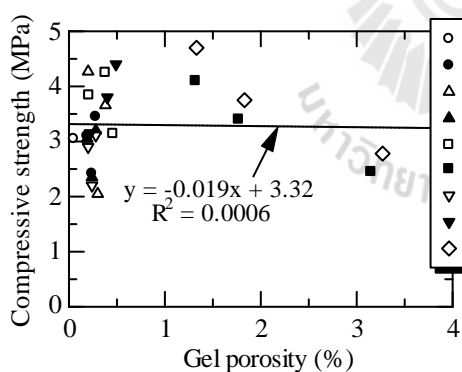
เทียบกับของ CON นี้เป็นเพราะว่าน้ำในส่วนผสมกลายเป็นของแข็งด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกบางส่วน ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เพสต์ (C-S-H และ C-A-H) มีปริมาณมากขึ้นและมีมวลเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดโพรง กล่าวคือเมื่อมีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานิกในปริมาณที่พอเหมาะ จะทำให้ขนาดโพรงลดลงและทำให้ซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของวัสดุปอซโซลานิกบางส่วนยังอุดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ในขณะที่การแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานิกในปริมาณมากขึ้นนั้น ความพรุนและช่องว่างขนาดเล็กละเอียดในซีเมนต์เพสต์ก็เพิ่มขึ้นตาม โดยเฉพาะส่วนผสมที่แทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ ในปริมาณสูง (30%) ส่งผลให้โครงสร้างซีเมนต์เพสต์มีโพรงขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วบริเวณ ซึ่งคล้ายในรายงานการวิจัยของ Jaturapitakkul et al. (2011), Napia et al. (2012), Madani et al. (2012), Setina et al. (2013)

ตารางที่ 4.11 ความพรุนเจล ความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน

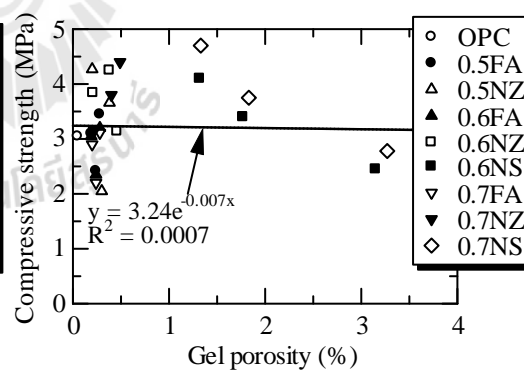
Mix No.	Symbol	Dry density at 28 days (kg/m <sup>3</sup> )	Gel porosity at 28 days (%)	Capillary porosity at 28 days (%)	Compressive strength at 28 days (MPa)
1	OPC	802	0.05	29.56	3.05
2	0.5FA10	827	0.28	40.56	3.45
3	0.5FA20	821	0.19	43.44	3.10
4	0.5FA30	773	0.24	52.09	2.42
5	0.5NZ10	840	0.20	38.17	4.27
6	0.5NZ20	834	0.38	39.09	3.66
7	0.5NZ30	808	0.30	59.86	2.05
8	0.5NS1	–	–	–	–
9	0.5NS2	–	–	–	–
10	0.5NS3	–	–	–	–
11	0.6FA10	822	0.28	41.09	3.20
12	0.6FA20	816	0.19	43.62	3.05
13	0.6FA30	810	0.24	52.65	2.35
14	0.6NZ10	825	0.21	39.24	3.84
15	0.6NZ20	846	0.38	39.50	4.25
16	0.6NZ30	831	0.46	39.47	3.14

ตารางที่ 4.11 ความพรุนเจล ความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

Mix No.	Symbol	Dry density at 28 days (kg/m <sup>3</sup> )	Gel porosity at 28 days (%)	Capillary porosity at 28 days (%)	Compressive strength at 28 days (MPa)
17	0.6NS1	854	1.32	37.36	4.10
18	0.6NS2	802	1.77	38.01	3.40
19	0.6NS3	789	3.15	39.15	2.45
20	0.7FA10	819	0.28	41.66	3.11
21	0.7FA20	814	0.20	45.37	2.90
22	0.7FA30	778	0.24	53.48	2.20
23	0.7NZ10	820	0.22	41.15	3.15
24	0.7NZ20	800	0.40	41.75	3.80
25	0.7NZ30	848	0.49	41.77	4.40
26	0.7NS1	866	1.33	37.79	4.70
27	0.7NS2	814	1.83	39.34	3.75
28	0.7NS3	806	3.27	41.06	2.78

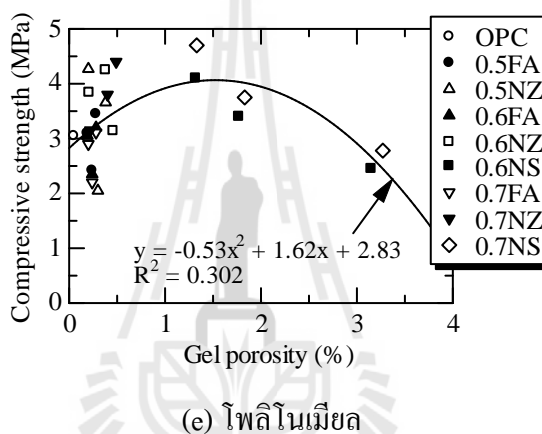
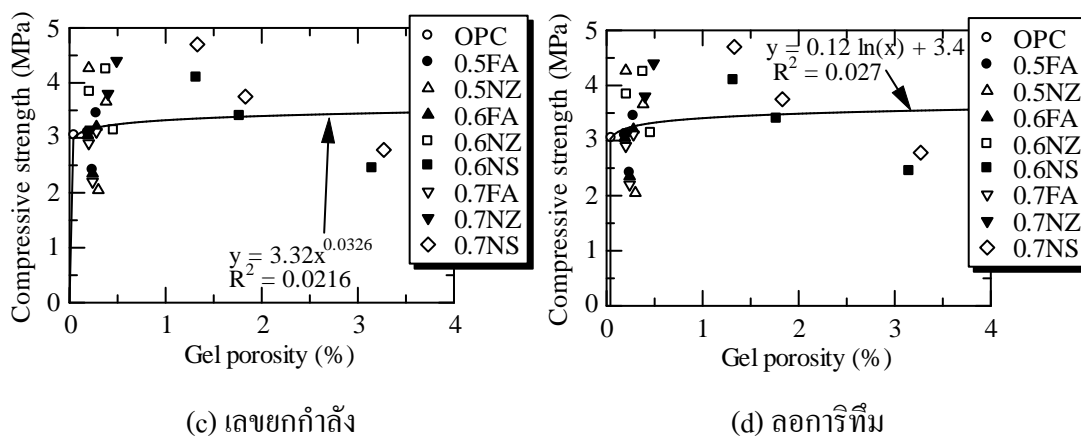


(a) เซิงเส้น



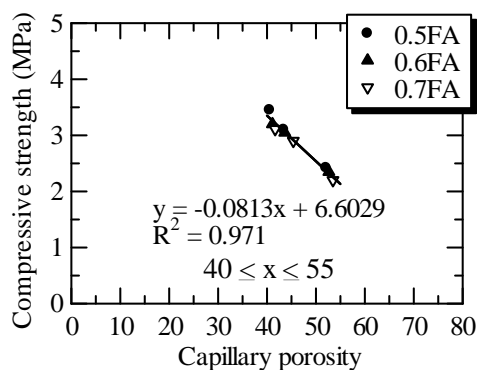
(b) เอ็กซ์โพเนนเชียล

รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนเจลและกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน

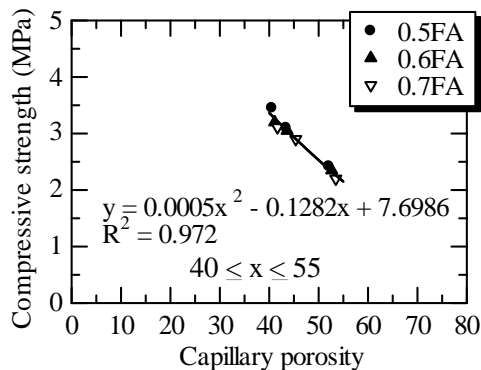


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนเจลและกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

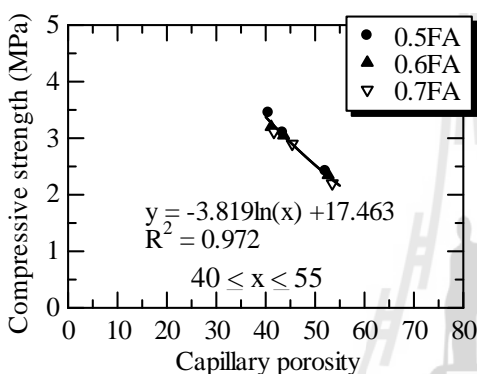
เมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสม FA เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ เพื่อหาฟังก์ชันที่ดีที่สุด พบว่าเส้นแนวโน้มใกล้เคียงกับฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลมากที่สุด เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.976 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1.00 และมากกว่า 0.8 ถือว่าสมการที่ได้รับนี้มีผลเป็นที่น่าพอใจ เพราะว่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระในสมการถดถอย มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง ดังรูปที่ 4.32 (e)



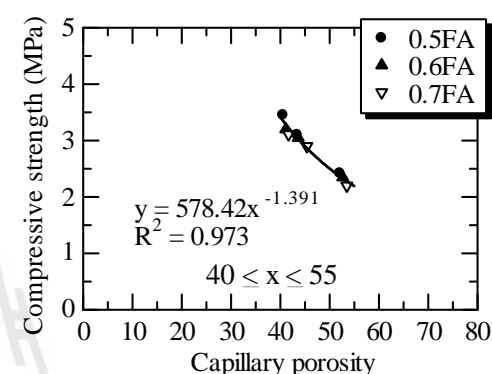
(a) เซิงเส้น



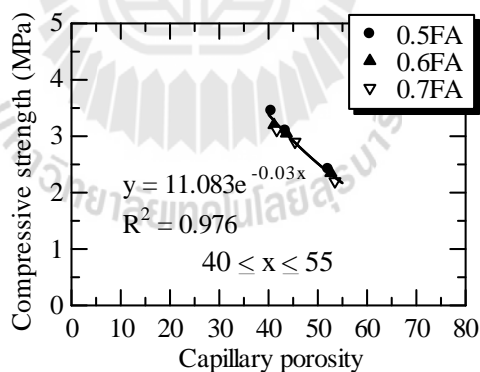
(b) โพลีโนเมียล



(c) ลอการิทึม



(d) เลขยกกำลัง



(e) เอ็กซ์โพเนนเชียล

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC ผสม FA ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ

จากรายงานผลการวิจัยที่ผ่านมา โดย Kearsley and Wainwright (2002) ที่ระบุว่า ความพรุนและกำลังรับแรงอัดโดยทั่วไปมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเลขยกกำลังเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยที่  $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-AP}$  เมื่อ  $\sigma$  คือกำลังรับแรงอัดที่ความพรุน  $P$ ,  $\sigma_0$  คือกำลังรับแรงอัดที่ความพรุนเป็น ศูนย์ (MPa),  $P$  คือ ความพรุน (%), และ  $A$  คือ experimental constant โดย Ryshkevitch (1953) ซึ่ง

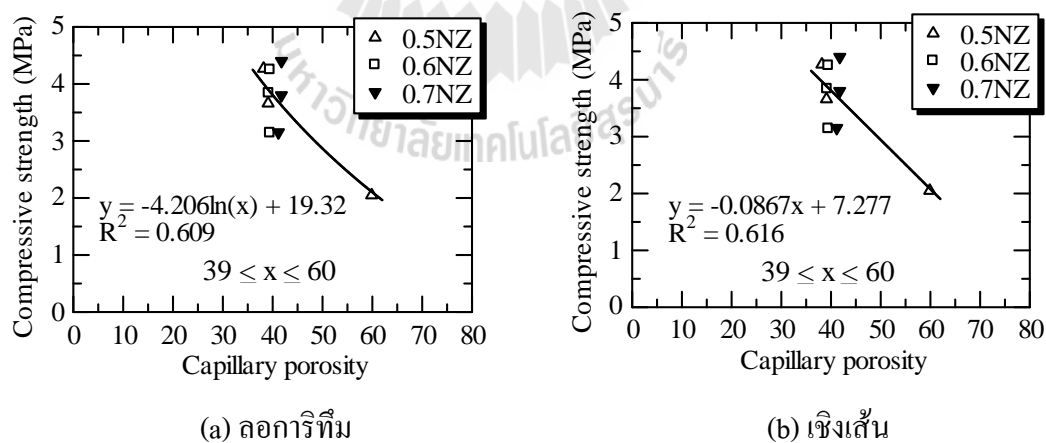
เป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดที่ได้จากผลการทดสอบสำหรับคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ที่ความหนาแน่นประมาณ  $800 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 – 0.7 อาจนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 4.1 สำหรับ CLC ที่ผสมวัสดุ FA โดยความคลาดเคลื่อนของกำลังรับแรงอัดที่ทำนายได้จากสมการที่ 4.1 มีค่าขอบเขตคลาดเคลื่อน (boundary limit) ของการทำนายเท่ากับ  $\pm 4\%$  ดังรูปที่ 4.35 ซึ่งไม่เกินกว่าค่าที่ยอมรับได้โดยทั่วไปที่ไม่ควรเกินกว่า 20%

$$\sigma_{FA} = 11.083e^{-0.03P} \quad (4.1)$$

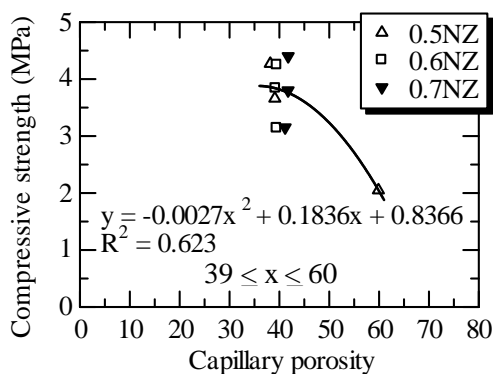
เมื่อ  $\sigma_{FA}$  คือ กำลังรับแรงอัด CLC ผสม FA ที่ความพรุนคาปิลลารี อายุ 28 วัน (MPa)

P คือ ความพรุนคาปิลลารี ที่อายุ 28 วัน (ค่าระหว่าง 40 – 55)

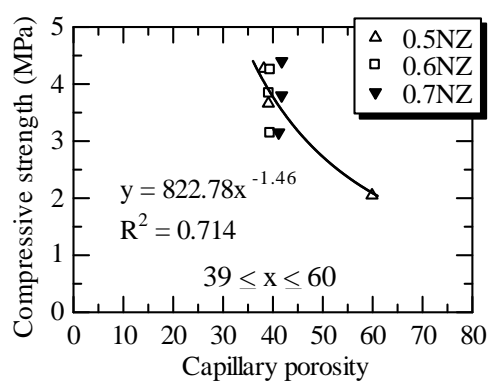
ในส่วนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสม NZ เมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ (รูปที่ 4.33) เพื่อหาฟังก์ชันที่ดีที่สุด พบว่าเส้นแนวโน้มใกล้เคียงกับฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลมากที่สุด ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0.722 แต่ต่ำกว่า 0.8 แสดงว่าความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดที่ได้จากการ Model มีความสัมพันธ์กันน้อย ซึ่งถือว่าไม่มี Model ทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 4.33 (e)



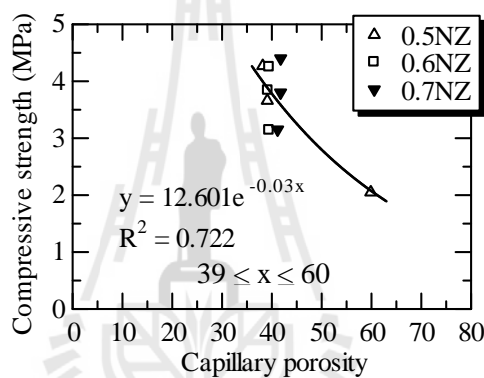
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC ผสม NZ ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ



(c) โพลีโนเมียล



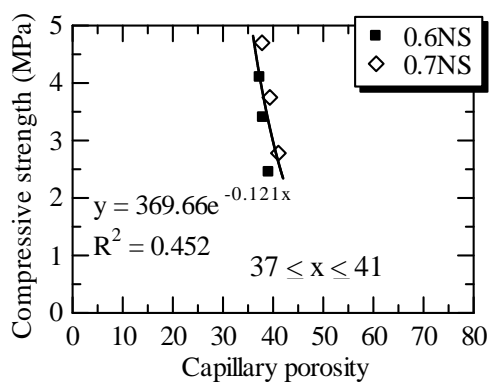
(d) เลขยกกำลัง



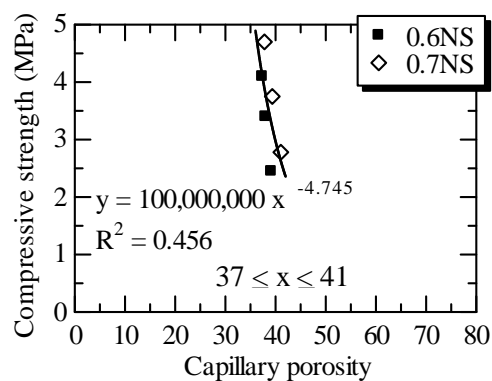
(e) เอ็กซ์โพเนนเชียล

รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC ผสม NZ ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ (ต่อ)

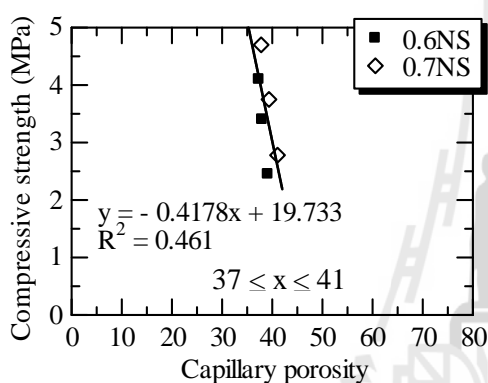
ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสม NS เมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ เพื่อหาฟังก์ชันที่ดีที่สุด พบว่าเส้นแนวโน้มใกล้เคียงกับฟังก์ชันโพลีโนเมียลมากที่สุด ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 0.513 แต่มีค่าต่ำกว่า 0.80 ซึ่งถือว่าไม่มี Model คณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 4.34 (e)



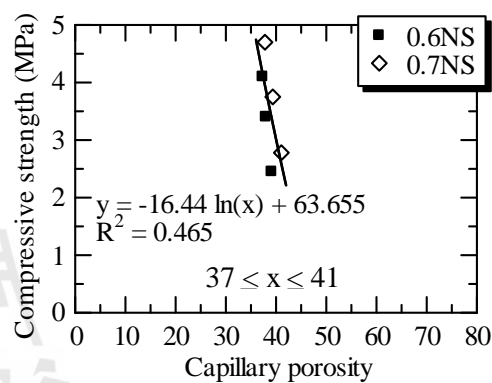
(a) เอ็กซ์โพเนนเชียล



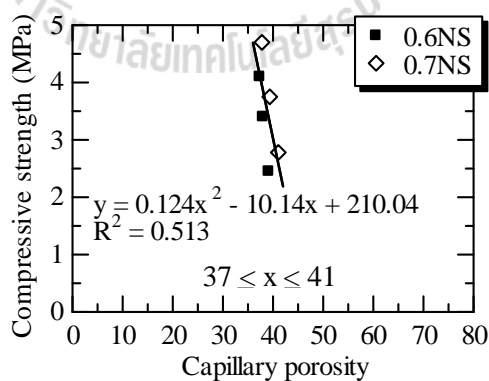
(b) เลขยกกำลัง



(c) เชิงเส้น

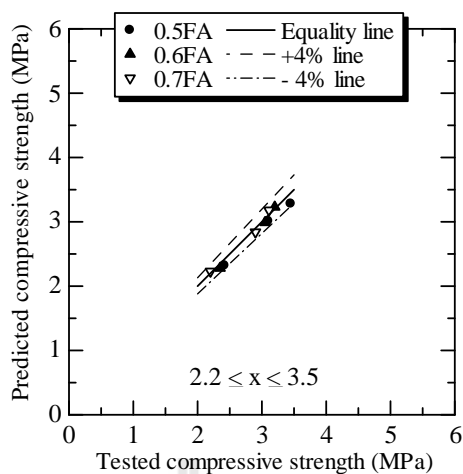


(d) ลอการิทึม



(e) โพลีโนเมียล

รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC ผสม NS ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับฟังก์ชันต่าง ๆ



รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบค่าการทำนายและผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน สำหรับผสมวัสดุ FA

สมการที่ได้จากการ Fit Curve ของเส้นแนวโน้มที่ดีที่สุด ระหว่างความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดของ CLC เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาในต่างประเทศ พบว่า CLC ที่แทนที่ด้วย FA และ NZ มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล คล้ายกับฟังก์ชันของสมการ โดย Ryshkevitch (1953) ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบ Fit Curve ความพรุนคาปิลลารีและกำลังรับแรงอัดกับผลงานวิจัยต่างประเทศ

Authors	Equation fitted	R <sup>2</sup>
Balshin (1949)	$f_c = 321(1-P)^{3.6}$	0.926
Ryshkevitch (1953)	$f_c = 981e^{-7.43P}$	0.936
Schiller (1971)	$f_c = 109.5 \ln(0.66/P)$	0.89
Hasselmann (1964)	$f_c = 147-226P$	0.848
Kearsley and Wainwright (2002)	$f_c = 39.6(\ln(t))^{1.174}(1-P)^{3.6}$	0.86
Present study	$\sigma_{FA} = 11.083e^{-0.03P}$	0.976
	$\sigma_{NZ} = 12.601e^{-0.03P}$ *	0.722
	$\sigma_{NS} = 0.124P^2 - 10.14P + 210.04$ *	0.513

หมายเหตุ : \* ไม่มี Model ทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม เนื่องจากค่า R<sup>2</sup> ต่ำกว่า 0.8 (ในทางวิศวกรรมให้ การยอมรับ Model ที่ค่า R<sup>2</sup> ตั้งแต่ 0.8 ขึ้นไป)



#### 4.9.3 การจำลองสมการทำนายกำลังรับแรงอัดของ CLC

รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอายุบ่มของ CLC ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน และเปอร์เซ็นต์การแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานชนิดต่าง ๆ การจำลองสมการจากผลการทดสอบ (experimental model) เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ซึ่งเป็นตัวแปรตาม กับอายุบ่ม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน และเปอร์เซ็นต์การแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระ เนื่องจากตัวแปรมีมากกว่าหนึ่งตัวจึงจัดเป็นสหสัมพันธ์พหุคูณ (multiple correlation) สามารถนำมาเขียนเป็นสมการเลขยกกำลัง (multivariable power equation) ในรูปแบบทั่วไป (Kheder et al., 2003) ได้ดังสมการที่ 4.2

$$C = a.T^b(w/b)^c.R^d \quad (4.2)$$

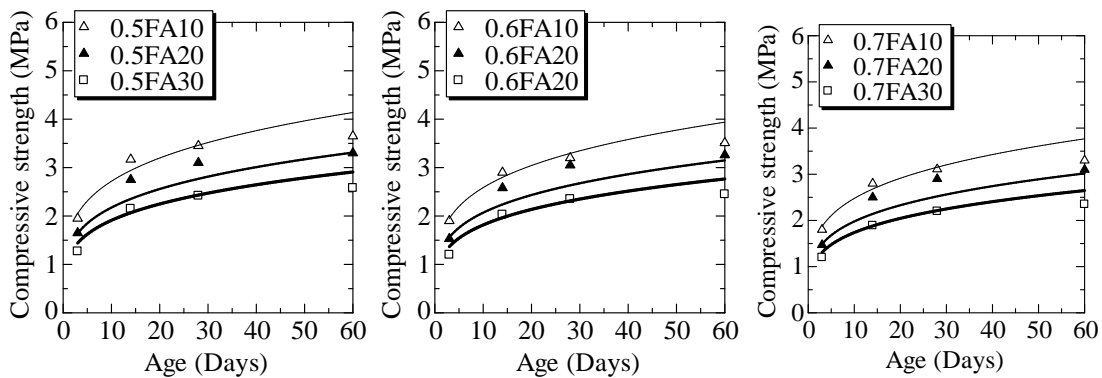
เมื่อ C คือ กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ (MPa)

T คือ อายุบ่ม (3 – 60 Days)

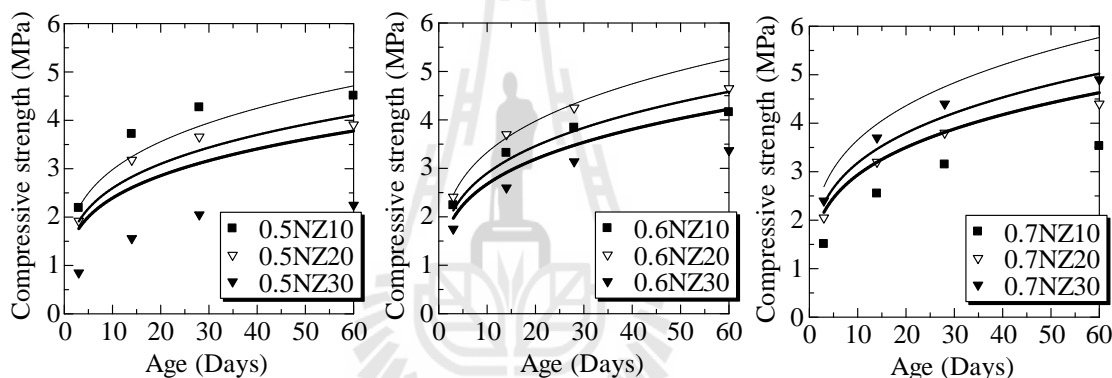
w/b คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (0.5 – 0.7)

R คือ ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน (%)

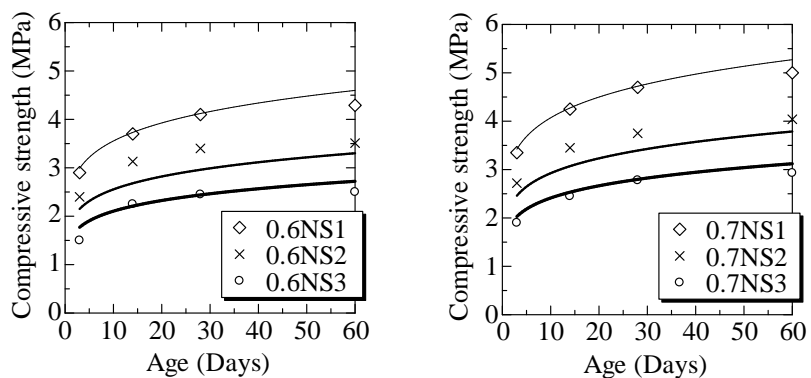
a, b, c, และ d คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระที่ได้จากการจำลองโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square)



a) ผสม FA และ w/b=0.5      b) ผสม FA และ w/b=0.6      c) ผสม FA และ w/b=0.7



d) ผสม NZ และ w/b=0.5      e) ผสม NZ และ w/b=0.6      f) ผสม NZ และ w/b=0.7



g) ผสม NS และ w/b=0.6      h) ผสม NS และ w/b=0.7

รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุบ่มแต่ละส่วนผสมของ CLC

ผลการวิเคราะห์จำลองสมการทั้งสามตัวแปรอิสระจากข้อมูล 9 ส่วนผสม ทำให้ได้สมการที่สามารถใช้ทำนายกำลังรับแรงอัดของ CLC สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุ FA แทนที่ซีเมนต์ ดังสมการที่ 4.3

$$C_{FA} = 0.622T^{0.235}(w/b)^{-0.278} R^{-0.322} \quad (4.3)$$

- เมื่อ  $C_{FA}$  คือ กำลังรับแรงอัดของ CLC แทนที่ซีเมนต์ด้วย FA (MPa)  
 T คือ อายุบ่ม (3 – 60 Days)  
 w/b คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (0.5 – 0.7)  
 R คือ ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วย FA (10 – 30%)

จากตัวแปรความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.3 เมื่อทดลองเอาตัวแปรอิสระ ( T, w/b, และ R) แทนค่ากลับคืนในสมการดังกล่าว พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังรับแรงอัดที่ทำนายได้จากสมการที่ 4.3 มีขอบเขตความคลาดเคลื่อน  $\pm 10\%$  (ส่วนต่างกับค่า  $R^2$ ) จากเส้นเสมอภาค (equality line) ดังรูปที่ 4.37(a) ซึ่งเท่ากับค่าความคลาดเคลื่อนโดย Kheder (2003) ที่ได้เท่ากับ  $\pm 10\%$  แต่น้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนโดย Hannesson (2012) ที่ได้เท่ากับ  $\pm 20\%$  และ Sadrmomtazi (2013) ที่ได้เท่ากับ  $\pm 25\%$  อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบข้อมูลพบว่าอยู่ในกรอบของขอบเขตความคลาดเคลื่อน แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ใช้ในการทำนายสำหรับการศึกษานี้มีผลเป็นที่น่าพอใจ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ค่าความคลาดเคลื่อน (error) ที่ยอมรับได้ แสดงในตารางที่ 4.13 ส่วนผลการวิเคราะห์จำลองสมการทั้งสามตัวแปรอิสระจากข้อมูล 9 ส่วนผสม ทำให้ได้สมการที่สามารถใช้ทำนายกำลังรับแรงอัดของ CLC สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุ NZ แทนที่ซีเมนต์ ดังสมการที่ 4.4

$$C_{NZ} = 1.59T^{0.255}(w/b)^{0.604} R^{-0.2} \quad (4.4)$$

- เมื่อ  $C_{NZ}$  คือ กำลังรับแรงอัดของของ CLC แทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ (MPa)  
 T คือ อายุบ่ม (3 – 60 Days)  
 w/b คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (0.5 – 0.7)  
 R คือ ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NZ (10 – 30%)

จากตัวแปรความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.4 เมื่อทดลองเอาตัวแปรอิสระ ( T, w/b, และ R) แทนค่ากลับคืนในสมการดังกล่าว พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังรับแรงอัดที่ทำนายได้จากสมการที่ 4.4 มีขอบเขตความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเท่ากับ  $\pm 58\%$  (ส่วนต่างกับค่า  $R^2$ ) ดังรูปที่ 4.37(b) ซึ่งมากกว่า 20% ถือว่า Model ที่ได้จากสมการที่ 4.4 ไม่มี Model คณิตศาสตร์ที่เหมาะสม จึงไม่เหมาะที่จะใช้เป็นสมการในการทำนาย และความคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบกับสมการทำนาย แสดงในตารางที่ 4.14

ส่วนผลการวิเคราะห์จำลองสมการทั้งสามตัวแปรอิสระจากข้อมูล 6 ส่วนผสม ทำให้ได้สมการที่สามารถใช้ทำนายกำลังรับแรงอัดของ CLC สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุ NS แทนที่ซีเมนต์ ดังสมการที่ 4.5

$$C_{NS} = 0.446T^{0.144}(w/b)^{0.887}R^{-0.477} \quad (4.5)$$

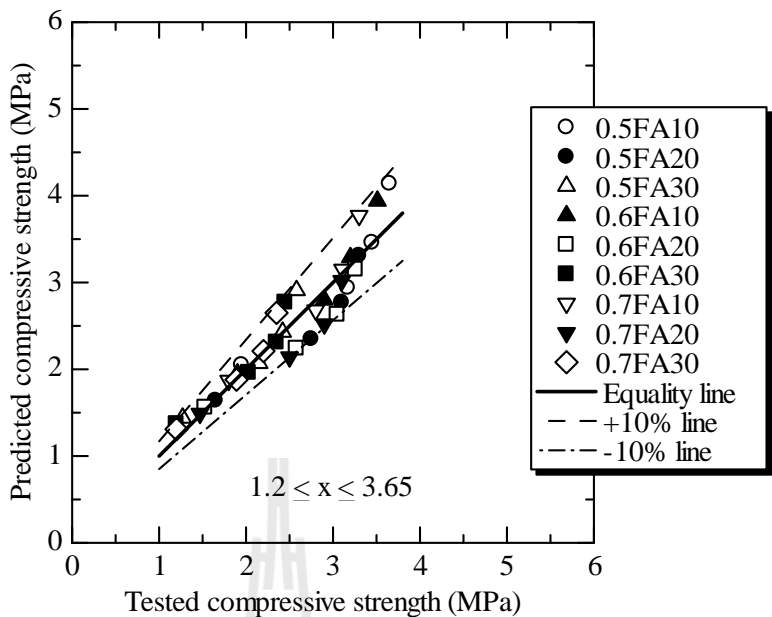
เมื่อ  $C_{NS}$  คือ กำลังรับแรงอัดของของ CLC แทนที่ซีเมนต์ด้วย NS (MPa)

T คือ อายุบ่ม (3 – 60 Days)

w/b คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (0.6 – 0.7)

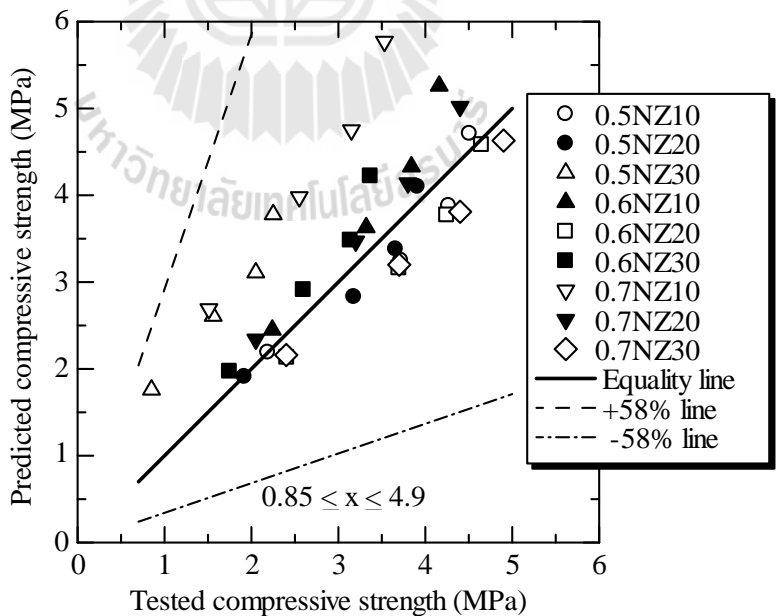
R คือ ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วย NS (1 – 3%)

จากตัวแปรความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.5 เมื่อทดลองเอาตัวแปรอิสระ ( T, w/b, และ R) แทนค่ากลับคืนในสมการดังกล่าว พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังรับแรงอัดที่ทำนายได้จากสมการที่ 4.5 มีขอบเขตความคลาดเคลื่อนในการทำนายเท่ากับ  $\pm 7\%$  ดังรูปที่ 4.37(c) ซึ่งต่ำกว่า 20% แสดงให้เห็นว่าข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการทำนายสำหรับการศึกษานี้ มีผลเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการทำนายมีค่าที่อยู่ภายนอกขอบเขต  $\pm 7\%$  จำนวน 3 จุด ดังแสดงในตารางที่ 4.15

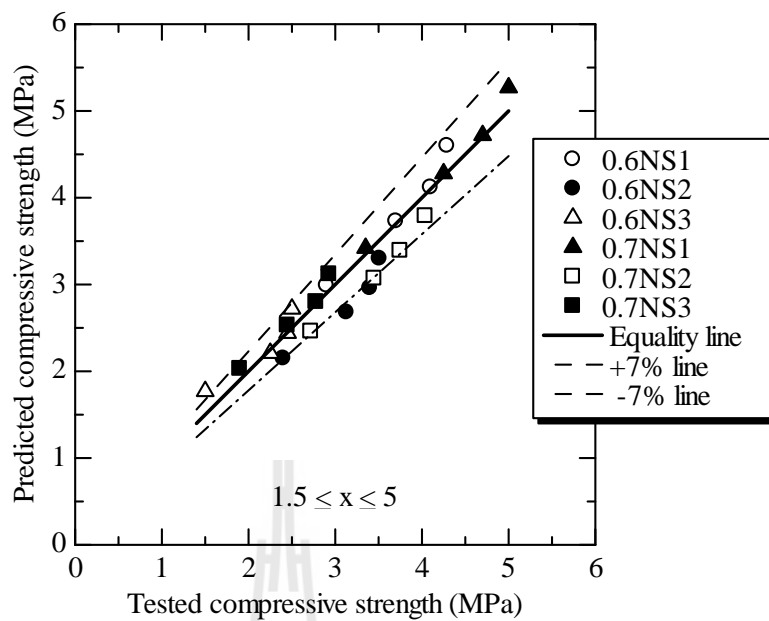


a) ผสม FA และ w/b=0.5, 0.6, 0.7

รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าการทำนายและผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของ CLC



b) ผสม NZ และ w/b=0.5, 0.6, 0.7



c) ผสม NS และ w/b=0.6, 0.7

รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าการทำนายและผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของ CLC (ต่อ)

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ CLC จากสมการที่ 4.3 กับผลการทดสอบ

Mix	Curing age (Days)	Compressive strength (MPa)		
		Experiment	Model	% Error
0.5FA10	3	1.95	2.05	5.1
	14	3.17	2.94	-7.2
	28	3.45	3.46	0.4
	60	3.65	4.14	13.5
0.5FA20	3	1.65	1.64	-0.6
	14	2.75	2.35	-14.4
	28	3.1	2.77	-10.6
	60	3.3	3.31	0.4
0.5FA30	3	1.27	1.44	13.3
	14	2.15	2.07	-3.9
	28	2.42	2.43	0.5
	60	2.58	2.91	12.7
0.6FA10	3	1.9	1.95	2.5
	14	2.9	2.80	-3.5
	28	3.2	3.29	2.9
	60	3.51	3.94	12.2
0.6FA20	3	1.53	1.56	1.9
	14	2.58	2.24	-13.3
	28	3.05	2.63	-13.6
	60	3.26	3.15	-3.4
0.6FA30	3	1.2	1.37	14.0
	14	2.03	1.96	-3.2
	28	2.35	2.31	-1.6
	60	2.45	2.77	12.9
0.7FA10	3	1.8	1.87	3.7
	14	2.8	2.68	-4.3
	28	3.11	3.15	1.4
	60	3.3	3.77	14.3
0.7FA20	3	1.47	1.49	1.6
	14	2.5	2.14	-14.2
	28	2.9	2.52	-13.0
	60	3.1	3.02	-2.6
0.7FA30	3	1.2	1.31	9.2
	14	1.89	1.88	-0.4
	28	2.2	2.21	0.7
	60	2.35	2.65	12.7

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ CLC จากสมการที่ 4.4 กับผลการทดสอบ

Mix	Curing age (Days)	Compressive strength (MPa)		
		Experiment	Model	% Error
0.5NZ10	3	2.19	2.19	0
	14	3.72	3.25	-12.6
	28	4.27	3.88	-9.2
	60	4.51	4.71	4.4
0.5NZ20	3	1.92	1.91	-0.5
	14	3.18	2.83	-11.0
	28	3.66	3.38	-7.8
	60	3.91	4.10	4.9
0.5NZ30	3	0.85	1.76	107.2
	14	1.56	2.61	67.2
	28	2.05	3.11	51.9
	60	2.25	3.78	68.0
0.6NZ10	3	2.24	2.45	9.3
	14	3.32	3.63	9.3
	28	3.84	4.33	12.7
	60	4.16	5.26	26.4
0.6NZ20	3	2.41	2.13	-11.5
	14	3.7	3.16	-14.6
	28	4.25	3.77	-11.3
	60	4.65	4.58	-1.6
0.6NZ30	3	1.75	1.97	12.4
	14	2.60	2.91	12.0
	28	3.14	3.48	10.7
	60	3.37	4.22	25.2
0.7NZ10	3	1.51	2.69	78.0
	14	2.55	3.98	56.2
	28	3.15	4.75	50.9
	60	3.53	5.77	63.5
0.7NZ20	3	2.05	2.34	14.2
	14	3.2	3.47	8.3
	28	3.8	4.14	8.9
	60	4.4	5.02	14.2
0.7NZ30	3	2.4	2.16	-10.1
	14	3.7	3.20	-13.6
	28	4.4	3.81	-13.3
	60	4.9	4.63	-5.5



ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ CLC จากสมการที่ 4.5 กับผลการทดสอบ

Mix	Curing age (Days)	Compressive strength (MPa)		
		Experiment	Model	% Error
0.6NS1	3	2.9	2.99	3.1
	14	3.7	3.73	0.8
	28	4.1	4.12	0.5
	60	4.29	4.60	7.2
0.6NS2	3	2.4	2.15	-10.6
	14	3.13	2.68	-14.4 *
	28	3.4	2.96	-12.9 *
	60	3.51	3.30	-5.9
0.6NS3	3	1.50	1.77	17.9 *
	14	2.25	2.21	-1.9
	28	2.45	2.44	-0.4
	60	2.50	2.72	8.9
0.7NS1	3	3.35	3.42	2.2
	14	4.25	4.28	0.6
	28	4.7	4.72	0.5
	60	5	5.27	5.4
0.7NS2	3	2.72	2.46	-9.5
	14	3.45	3.07	-11.0
	28	3.75	3.39	-9.5
	60	4.04	3.79	-6.2
0.7NS3	3	1.9	2.03	6.7
	14	2.45	2.53	3.3
	28	2.78	2.80	0.6
	60	2.93	3.12	6.5

หมายเหตุ : \* สมการไม่สามารถใช้ในการทำนายได้ เพราะว่ายอยู่นอกกรอบเส้นขอบเขต Error  $\pm 7\%$

#### 4.9.4 ขนาดโพรงเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัด

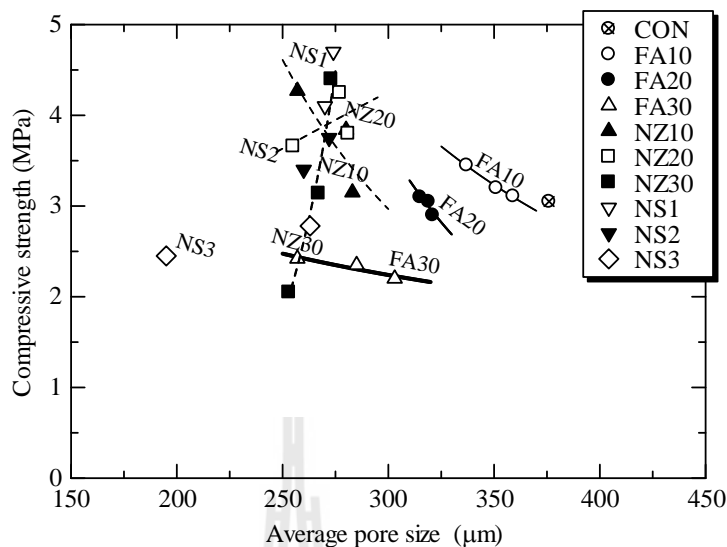
ตารางที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงภายในเนื้อซีเมนต์เพสต์โดยเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า ที่อายุ 28 วัน สำหรับส่วนผสมต่าง ๆ พบว่าขนาดโพรงสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ซึ่งขนาดโพรงเล็กลงตามปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยแก้วลอยที่เพิ่มขึ้นและขนาดโพรงมีแนวโน้มโตขึ้นตาม w/b ที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 250–360  $\mu\text{m}$  โดยเฉลี่ย ขนาดโพรงของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่แทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติมีขนาดเล็กลงตามปริมาณซีโอไลต์ธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นและขนาดโพรงมีแนวโน้มโตขึ้นเล็กน้อยตาม w/b ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งขนาดโพรงแต่ละ w/b แตกต่างกันไม่มากนักเมื่อ

เทียบกับของแก้วลอยโดยอยู่ในช่วงประมาณ 250–300  $\mu\text{m}$  โดยเฉลี่ย ส่วนขนาดโพรงของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่แทนที่ด้วยนาโนซิลิกาพบว่ามีความถี่ของขนาดเล็กลงตามปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาที่เพิ่มขึ้นและขนาดโพรงมีแนวโน้มโตขึ้นตาม  $w/b$  ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับของแก้วลอย แต่การแทนที่ด้วยนาโนซิลิกาจะมีอิทธิพลสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากขนาดที่เล็กของอนุภาคนาโนซิลิกา ซึ่งขนาดโพรงเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 200–275  $\mu\text{m}$  ดังรูปที่ 4.38

จากรูปที่ 4.38 จะเห็นว่าขนาดโพรงเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่านั้นเปลี่ยนแปลงตามผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน ชนิดและระดับการแทนที่ของวัสดุปอซโซลาน โดยขนาดโพรงเฉลี่ยของ CLC ที่ผสมวัสดุปอซโซลาน FA ในระดับการแทนที่ 10% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน มีขนาดโตอันดับสองรองจาก CON เมื่อมีการใช้ FA แทนที่ซีเมนต์เข้าไปในส่วนผสมของ CLC ขนาดโพรงเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัด CLC มีค่าลดลงตามสัดส่วนการแทนที่ด้วย FA และ  $w/b$  ที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของการใช้ NZ แทนที่ซีเมนต์นั้นพบว่า CLC มีขนาดโพรงเฉลี่ยเล็กเป็นอันดับสามรองจากการแทนที่ด้วย FA และ CON ตามลำดับ ขนาดโพรงเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในขณะที่กำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากตามระดับการเพิ่มหรือลดลงของอัตราส่วน  $w/b$  ในส่วนของการใช้ NS แทนที่ซีเมนต์นั้น พบว่ามีขนาดโพรงเฉลี่ยเล็กที่สุด ซึ่งขนาดโพรงเฉลี่ยมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากทั้งที่การใช้วัสดุ (NS) แทนที่ซีเมนต์ในระดับเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการแทนที่ของวัสดุปอซโซลานมีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงสวนทางกับระดับปริมาณการแทนที่ กล่าวคือเมื่อแทนที่ในปริมาณที่สูงเกินความเหมาะสม จะส่งผลทำให้ขนาดโพรงอากาศลดลง แต่กำลังรับแรงอัดอาจลดลงอย่างมาก (Visagie, 2000) ยกตัวอย่างกรณี CLC แทนที่ซีเมนต์ด้วย FA ในระดับปริมาณร้อยละ 30 ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าการแทนที่ในระดับปริมาณร้อยละ 10 แต่อย่างไรก็ตามขนาดโพรงอากาศของ CLC ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยปริมาณน้ำในส่วนผสม เช่นในกรณีใช้วัสดุ NZ แทนที่ซีเมนต์ในระดับปริมาณร้อยละ 30 ที่  $w/b = 0.7$  ซึ่งมีขนาดโพรงอากาศเฉลี่ยที่โตกว่า  $w/b = 0.5$  เพียงเล็กน้อยแต่คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกันค่อนข้างมากอย่างมีนัยสำคัญ ดังตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.38

ตารางที่ 4.16 ขนาดโพรงเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน

Mix No.	Symbol	Average pore size at 28 days ( $\mu\text{m}$ )	Compressive strength at 28 days (MPa)
1	OPC	376	3.05
2	0.5FA10	337	3.45
3	0.5FA20	315	3.10
4	0.5FA30	257	2.42
5	0.5NZ10	257	4.27
6	0.5NZ20	255	3.66
7	0.5NZ30	253	2.05
8	0.5NS1	–	–
9	0.5NS2	–	–
10	0.5NS3	–	–
11	0.6FA10	351	3.20
12	0.6FA20	319	3.05
13	0.6FA30	285	2.35
14	0.6NZ10	280	3.84
15	0.6NZ20	277	4.25
16	0.6NZ30	267	3.14
17	0.6NS1	270	4.10
18	0.6NS2	260	3.40
19	0.6NS3	195	2.45
20	0.7FA10	359	3.11
21	0.7FA20	321	2.90
22	0.7FA30	303	2.20
23	0.7NZ10	283	3.15
24	0.7NZ20	281	3.80
25	0.7NZ30	273	4.40
26	0.7NS1	274	4.70
27	0.7NS2	272	3.75
28	0.7NS3	263	2.78



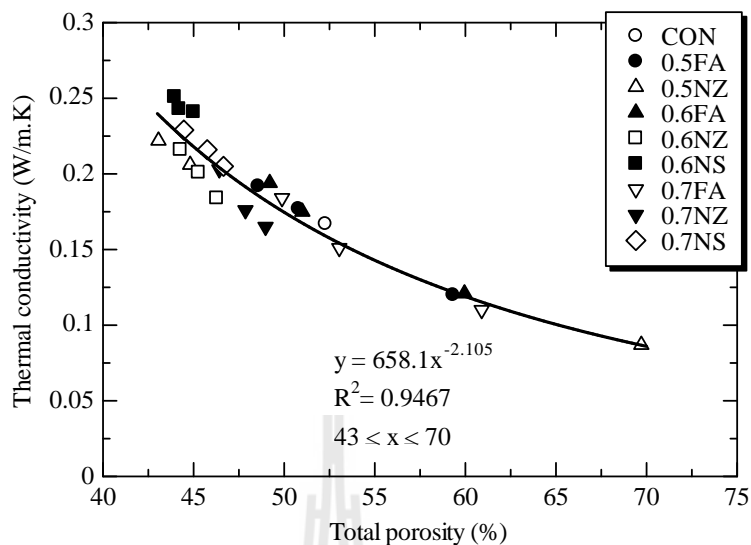
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัดของ CLC ที่อายุ 28 วัน

#### 4.9.5 ความพรุนรวมและการนำความร้อน

ตารางที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวมและค่าการนำความร้อน สำหรับส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน พบว่าความพรุนรวมของเนื้อคอนกรีตสัมพันธ์กับค่าการนำความร้อนของคอนกรีต โดยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส อยู่ในช่วง 0.087–0.251 W/m.K สำหรับความพรุนรวมประมาณ 43%–70% ซึ่งคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ซีเมนต์ให้ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตต่ำกว่าทุกส่วนผสมในระดับปริมาณการแทนที่เท่ากัน เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้วัสดุเถ้าลอย หรือเทียบเท่ากับนาโนซิลิกา เนื่องจากคุณลักษณะเฉพาะของซีโอไลต์ธรรมชาติที่อนุภาคมีความพรุนสูง และเมื่อนำความพรุนรวมและค่าการนำความร้อนทุกส่วนผสมมาหาความสัมพันธ์กัน พบว่าการนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความพรุนรวมที่เพิ่มขึ้นเป็นสมการเลขยกกำลัง ดังรูปที่ 4.39 ซึ่งคล้ายกับผลการรายงานวิจัยของ Wang et al. (2005) ที่พบว่าคอนกรีตมวลเบาทำจากซีเมนต์ผสมเถ้าจากตะกอนน้ำเสีย ความหนาแน่นระหว่าง 610 และ 930 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีความสัมพันธ์กับปริมาตรโพรงที่เพิ่มขึ้นเป็นสมการเลขยกกำลังเอ็กซ์โพเนนเชียล

ตารางที่ 4.17 ความพรุนรวมและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ CLC ที่อายุ 28 วัน

Mix No.	Symbol	Total porosity at 28 days (%)	Thermal conductivity at 28 days (W/m.K)
1	OPC	52.27	0.167
2	0.5FA10	48.56	0.192
3	0.5FA20	50.78	0.177
4	0.5FA30	59.32	0.120
5	0.5NZ10	43.06	0.222
6	0.5NZ20	44.81	0.206
7	0.5NZ30	69.71	0.087
8	0.5NS1	–	–
9	0.5NS2	–	–
10	0.5NS3	–	–
11	0.6FA10	49.20	0.194
12	0.6FA20	51.00	0.175
13	0.6FA30	59.95	0.121
14	0.6NZ10	44.27	0.216
15	0.6NZ20	45.27	0.201
16	0.6NZ30	46.28	0.184
17	0.6NS1	43.95	0.251
18	0.6NS2	44.20	0.243
19	0.6NS3	45.00	0.241
20	0.7FA10	49.88	0.184
21	0.7FA20	53.04	0.151
22	0.7FA30	60.90	0.110
23	0.7NZ10	46.42	0.203
24	0.7NZ20	47.86	0.176
25	0.7NZ30	48.97	0.165
26	0.7NS1	44.46	0.229
27	0.7NS2	45.75	0.216
28	0.7NS3	46.65	0.205



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวมและการนำความร้อนของ CLC ที่อายุ 28 วัน

จากผลการทดสอบการนำความร้อนของ CLC และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนทุกส่วนผสมของ CLC ที่ศึกษานี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.087–0.251 W/m.K ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตน้ำหนักปกติที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1.15–1.44 W/m.K ที่ศึกษาโดย Tay and Yip (1989) ด้วยเหตุนี้จึงแนะนำว่าหากมีการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับผนังห้อง จะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพในการใช้เครื่องปรับอากาศ โดยสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าผนังที่ทำด้วยคอนกรีตปกติอย่างแน่นอน ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ CLC ที่ผสม FA มีค่าใกล้เคียงคอนกรีตมวลเบาแบบอโตะเคลปผสมไดอะตอมไมต์ (0.13–0.14 W/m.K) ที่ศึกษาโดย Topçua and Uyguno lu (2007) อย่างไรก็ตาม CLC ที่ผสม NZ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานและ  $w/b = 0.5$  มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาแบบไม่อโตะเคลปผสมเถ้ากากตะกอนน้ำเสีย (0.084 W/m.K) ที่ศึกษาโดย Wang et al. (2005) ดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบค่า  $k$  ของคอนกรีตกับงานวิจัยต่างประเทศ

Authors	Type of concrete and dry density	Material composition	Porosity (%)	Thermal conductivity (W/m.K)
Tay and Yip (1989)	Normal weight concrete (2,400 kg/m <sup>3</sup> )	Cement-sand-stone	5–13	1.15–1.44
Wang et al. (2005)	Non-autoclaved aerated concrete (820 kg/m <sup>3</sup> )	Cement-sewage sludge ash	52–57	0.084–0.102
Topçua and Uyguno lu (2007)	Autoclaved lightweight aggregate concrete (900 kg/m <sup>3</sup> )	Cement-diatomite	60–63	0.13–0.14
Present study	Cellular lightweight concrete (800 kg/m <sup>3</sup> ) *	Cement-FA	49–61	0.11–0.194
		Cement-NZ	43–70	0.087–0.222
		Cement-NS	44–47	0.205–0.251

หมายเหตุ : \* ค่าโดยประมาณ



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นวัสดุยึดประสาน ในปริมาณต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาค ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและการดูดซึมน้ำ ความพรุนและกำลังรับแรงอัด ขนาดโพรงและกำลังรับแรงอัด จากผลการศึกษาพบข้อสรุปที่สำคัญดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดสอบในงานวิจัย

จากผลการศึกษาคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส โดยวิธี PRE-FORMED FOAM METHOD ความหนาแน่นแห้งประมาณ  $800 \text{ kg/m}^3$  อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานเท่ากับ 0.5, 0.6, และ 0.7 ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอชโซลานโดยการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยถ้ำลอยแคลเซียมสูง หรือ ซีโอไลต์ธรรมชาติ ในปริมาณ 10%, 20%, และ 30% และการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยนาโนซิลิกา ในปริมาณ 1%, 2%, และ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

##### 5.1.1 ระยะเวลาการก่อตัว

จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมนาโนซิลิกา มีการก่อตัวเร็วกว่าที่ผสมซีโอไลต์ธรรมชาติและถ้ำลอยแคลเซียมสูง นี่เป็นเพราะว่าความละเอียดสูงของนาโนซิลิกา ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและขนาดอนุภาคที่เล็กจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอชโซลานิกได้มากกว่าการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติหรือถ้ำลอย การใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานในระดับที่สูงขึ้นมีผลทำให้ยี่ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสยาวนานขึ้น เนื่องจากการมีปริมาณซีเมนต์ต่ำจากการแทนที่ด้วยวัสดุปอชโซลาน แต่การแทนที่ซีเมนต์ด้วยนาโนซิลิกาสามารถทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสสั้นลงเมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม



### 5.1.2 การดูดซึมน้ำ

จากการศึกษาพบว่า การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระดับปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแทนที่ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติในปริมาณไม่เกิน 20% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน มีประสิทธิภาพทำให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตลดลงมากกว่าการใช้เถ้าลอย นอกจากนี้ การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสยังสัมพันธ์กับความพรุน กล่าวคือการดูดซึมน้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความพรุนคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันก็เป็นการลดกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลงด้วย

### 5.1.3 กำลังรับแรงอัด

จากการศึกษาพบว่า การแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยแคลเซียมสูง หรือ ซีโอไลต์ธรรมชาติ หรือ นาโนซิลิกา โดยมีการควบคุมความหนาแน่นแห้งที่  $800 \text{ kg/m}^3$  โดยประมาณ ซึ่งให้ผลการรับกำลังอัดค่อนข้างดี โดยส่วนผสมที่ใช้นาโนซิลิกามีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอย หรือ ซีโอไลต์ธรรมชาติ และส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยเล็กน้อย ระดับปริมาณการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ซีเมนต์ที่ให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีประสิทธิภาพสูงสุด ที่อายุ 28 วัน คือ ใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่  $w/b = 0.5$  หรือใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 30 ที่  $w/b = 0.7$  หรือใช้นาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 1 ที่  $w/b = 0.7$

### 5.1.4 การหดตัวแห้ง

จากการศึกษาพบว่า การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีอัตราการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นตามอายุ เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานและปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้น โดยส่วนผสมที่ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติที่ระดับปริมาณการแทนที่ 30% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน และ  $w/b = 0.5$  ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมากกว่าส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงหรือนาโนซิลิกา

### 5.1.5 โครงสร้างระดับจุลภาค

จากการศึกษาพบว่า ความพรุนคาปิลลารีของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง ซีโอไลต์ธรรมชาติ และนาโนซิลิกา มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระดับปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสานที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ

ส่วนผสมที่ใช้ในโนซิลิก้าซึ่งมีปริมาณความพรุนเจลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญขณะที่ความพรุนขนาดใหญ่พิเศษมีปริมาณลดลง

การลดปริมาณช่องว่างอากาศในระบบเซลล์ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสโดยการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานภายใต้การควบคุมความหนาแน่นให้คงที่ ซึ่งการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานเป็นเหตุให้อนุภาคถูกอัดแทรกเบียดชิดกัน และส่งผลดีขึ้นต่อขนาดโครงสร้างโพรงของซีเมนต์เพสต์ ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากโพรงที่มีขนาดใหญ่ไปสู่โพรงที่มีขนาดเล็กลง ดังนั้นคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมด้วยเถ้าลอยแคลเซียมสูง หรือซีโอไลต์ธรรมชาติ หรือ โนซิลิก้าในปริมาณที่พอเหมาะ จะทำให้มีปริมาณความพรุนรวมน้อยกว่าส่วนผสมควบคุม

### 5.1.6 ความทนทานต่อสารแมกนีเซียมซัลเฟต

จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีกำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงอายุต้น แต่มีกำลังรับแรงอัดลดลงในช่วงอายุปลาย ซึ่งคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเปลี่ยนแปลงลดลงประมาณไม่เกิน 6% เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ไม่ได้แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต อัตราการขยายตัวของแท่งคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานที่ลดลง ซึ่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมนาโนซิลิก้า 3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานที่  $w/b = 0.6$  มีอัตราการขยายตัวของแท่งคอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่เวลา 180 วัน มีค่าต่ำสุด

### 5.1.7 คุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างจุลภาค

ผลจากการวิเคราะห์สรุปได้ว่า การดูดซึมน้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความพรุนคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณความพรุนรวมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่มีกำลังรับแรงอัดค่อนข้างสูงมักมีขนาดโพรงเฉลี่ยที่เล็กอยู่ในช่วง 200–275  $\mu\text{m}$  ส่วนค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความพรุนรวมที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตที่ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นส่วนผสมให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำสุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาแนวทางการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น ๆ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส
- 2) ควรศึกษาความทนทานซัลเฟตที่อายุมากกว่า 180 วัน เพื่อศึกษาผลกระทบในระยะยาว

## รายการอ้างอิง

- ณททัย ราตรี (2554). สถิติเบื้องต้น : แนวคิดและทฤษฎี. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ ฯ.
- กองบรรณาธิการ (2546). เทคนิค Regression and Calibration. วารสาร **Lab.Today**. ปีที่ 2, ฉบับที่ 10, ประจำเดือนพฤษภาคม: หน้า 47–52.
- ACI 116R-2000. Cement and Concrete Terminology. **American Concrete Institute Publication**. SP-19: 144.
- Ahmadi, B., and Shekarchi, M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**. 32(2): 134–141.
- Albayrak, M., Yörüko lu, A., Karahan, S., Atlıhan, S., Arunta , H. Y., and Girgin, . (2007). Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete. **Building and Environment**. 42(9): 3161–3165.
- ASTM C150-2000. Standard specification for portland cement. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia).
- ASTM C177-97. Standard test method for steady state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia).
- ASTM C188-95. Standard test method for density of hydraulic cement. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia).
- ASTM C191-2001. Standard test method for time of setting of hydraulic cement by vicat needle. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.01 (Philadelphia).
- ASTM C204-2004. Standard test method for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia).
- ASTM C457-98. Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia).

- ASTM C495-99. Standard test method for compressive strength of lightweight insulating concrete. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia).
- ASTM C618-2001. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia): 310–313.
- ASTM C642-97. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia).
- ASTM C796-2004. Standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam. **Annual book of ASTM standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia): 144.
- ASTM C869-99. Standard specification for foaming agents used in making preformed foam for cellular concrete. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia).
- ASTM C1012-2012. Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 04.02 (Philadelphia).
- Beben, D., and Manko, Z. Z. (2011). Influence of selected hydrophobic agents on some properties of autoclaving cellular concrete (ACC). **Construction and Building Materials**. 25(1): 282–287.
- Billong, N., Melo, U. C., Kamseu, E., Kinuthia, J. M., and Njopwouo, D. (2011). Improving hydraulic properties of lime-rice husk ash (RHA) binders with metakaolin (MK). **Construction and Building Materials**. 25(4): 2157–2161.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., and Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**. 60:309–319.
- BS1881-116. Method of determination of compressive strength of concrete cubes. **British Standards Institute**. 1983.
- Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M.M., Sümer, M., and Yurdusev, M.A. (2004). Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. **Cement and Concrete Research**. 34(5): 731–735.
- Cebeci, Ö. Z. (1981). Pore structure of air-entrained hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**. 11(2): 257–265.

- Chindaprasirt, P., Chotetanorm, C., and Rukzon, S. (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., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T. (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., Jaturapitakkul, C., and Sinsiri, T. (2007). Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. **Construction and Building Materials**. 21(7): 1534–1541.
- Chindaprasirt, P., and Rattanasak, U. (2011). Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash. **Materials and Design**. 32(2): 723–727.
- Cyr, M., Lawrence, P., and Ringot, E. (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.
- De Schepper, M., De Buysser, K., Van Driessche, I., and De Belie, N. (2013). The regeneration of cement out of Completely Recyclable Concrete: Clinker production evaluation. **Construction and Building Materials**. 38(0): 1001–1009.
- De Rose 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.
- Esmaily, H., and Nuranian, H. (2012). Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag. **Construction and Building Materials**. 26(1): 200–206.
- Feng, N.-Q., and Peng, G.-F. (2005). Applications of natural zeolite to construction and building materials in China. **Construction and Building Materials**. 19(8): 579–584.
- Goldman, A., and Bentur, A. (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 Material Journal**. 90(2): 117–121.

- Hannesson, G., Kuder, K., Shogren, R., and Lehman, D. (2012). The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**. 30(0): 161–168.
- Hoff, G. C. (1972). Porosity-strength considerations for cellular concrete. **Cement and Concrete Research**. 2(1): 91–100.
- Hull, Fu, Y., Ding, J., and Beaudoin, J. J. (1996). 5494513 Zeolite-based lightweight concrete products. **Journal of Cleaner Production**. 4: 82.
- Isaia, G. C., Gastaldini, A. L. G., and Moraes, R. (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., Kiattikomol, K., Sata, V., and Leekeeratikul, T. (2004). Use of ground coarse fly ash as a replacement of condensed silica fume in producing high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**. 34(4): 549–555.
- Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W., and Saeting, T. (2007). Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash. **Construction and Building Materials**. 21(7): 1399–1405.
- Jaturapitakkul, C., Tangpagasit, J., Songmue, S., and Kiattikomol, K. (2011). Filler effect and pozzolanic reaction of ground palm oil fuel ash. **Construction and Building Materials**. 25(11): 4287–4293.
- Jitchaiyaphum, K., Sinsiri, T., and Chindaprasirt, P. (2011). Cellular Lightweight Concrete Containing Pozzolan Materials. **Procedia Engineering**. 14(0): 1157–1164.
- Jones, M. R., and Mc Carthy, A. (2005). Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications. **N. M. Dhir RK, McCarthy A. London, Thomas Telford:** 61–88.
- Jones, M. R., and Mc Carthy, A. (2005). Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete. **Fuel**. 84(11): 1398–1409.
- Just, A., and Middendorf, B. (2009). Microstructure of high-strength foam concrete. **Materials Characterization**. 60(7): 741–748.
- Karakurt, C., Kurama, H., and Topçu, . B. (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. Mc Carthy. London, E & FN: 233–243.
- Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J. (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 Wainwright, P. J. (2001). Porosity and permeability of foamed concrete. **Cement and Concrete Research**. 31(5): 805–812.
- Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J. (2002). Ash content for optimum strength of foamed concrete. **Cement and Concrete Research**. 32(2): 241–246.
- Kearsley, E. P., and Wainwright, P. J. (2002). The effect of porosity on the strength of foamed concrete. **Cement and Concrete Research**. 32(2): 233–239.
- Khatib, J. M., and Wild, S. (1996). Pore size distribution of metakaolin paste. **Cement and Concrete Research**. 26(10): 1545–1553.
- Kheder, G. F., Al Gabban, A. M., and Abid S. M. (2003). Mathematical model for the prediction of cement compressive strength at the ages of 7 and 28 days within 24 hours. **Materials and Structures**. 36(10): 693–701.
- Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., and Tangpagasit, J. (2000). Effect of insoluble residue on properties of Portland cement. **Cement and Concrete Research**. 30(8): 1209–1214.
- Kolias, S., and Georgiou, C. (2005). The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete. **Cement and Concrete Composites**. 27(2): 211–216.
- Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., and Chindapasirt, P. (2011). Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. **Construction and Building Materials**. 25(11): 4095–4104.
- Kunhanandan Nambiar, E. K., and Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. **Cement and Concrete Composites**. 28(5): 475–480.
- Kunhanandan Nambiar, E. K., and Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete. **Cement and Concrete Research**. 37(2): 221–230.

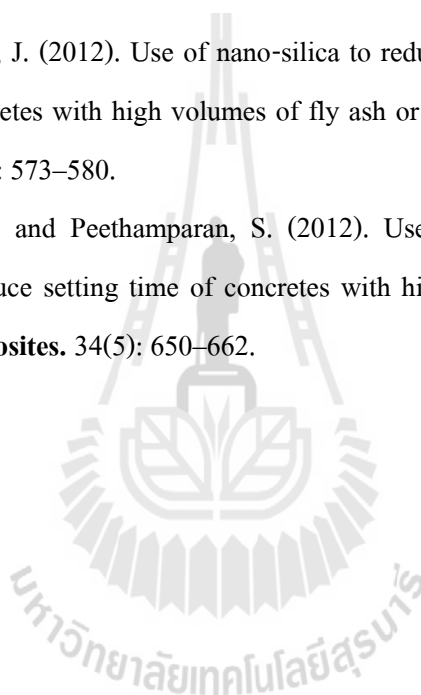
- Kunhanandan Nambiar, E. K., and Ramamurthy, K. (2007). Sorption characteristics of foam concrete. **Cement and Concrete Research**. 37(9): 1341–1347.
- Laukaitis, A., and Fiks, B. (2006). Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. **Applied Acoustics**. 67(3): 284–296.
- Lee, H. K., Kim, H. K., and Hwang, E. A. (2010). Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber-reinforced cellular concrete. **Waste Management**. 30(2): 274–284.
- Madani, H., Bagheri, A., and Parhizkar, T. (2012). The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement. **Cement and Concrete Research**. 42(12): 1563–1570.
- Mamun, M., and Bindiganavile, V. (2011). Sulphate resistance of fibre reinforced cement-based foams. **Construction and Building Materials**. 25(8): 3427–3442.
- Medina, C., Sánchez de Rojas, M.I., and Frías, M. (2013). Properties of recycled ceramic aggregate concretes: water resistance. **Cement and Concrete Composites**. 40(): 21–29.
- Mehta, P. K. (1981). Studies on blended Portland cements containing Santorin earth. **Cement and Concrete Research**. 11(4): 507–518.
- Metha, J.L., Smith, L.A., and Nehring, K.W. (1995). **The application of solidification/stabilization to waste materials**. London, Lewis Publishers.
- Mindress and Young, J. F. (1981). **Concrete**. Prentice-Hall, Engle Cliffs.
- Montgomery, D. G., Hughes, D. C., and Williams, R. I. T. (1981). Fly ash in concrete — a microstructure study. **Cement and Concrete Research**. 11(4): 591–603.
- Mydin, M. A. O., and Wang, Y. C. (2012). Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**. 26(1): 638–654.
- Nambiar, E. K. K., and Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. **Cement and Concrete Composites**. 28(5): 475–480.
- Nambiar, E. K. K., and Ramamurthy, K. (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 Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete." **Cement and Concrete Research**. 37(2): 221–230.



- Nambiar, E. K. K., and Ramamurthy, K. (2008). Models for strength prediction of foam concrete. **Materials and Structures**. 41(2): 247–254.
- Napia, C., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt, P. (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 Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**. 22(5): 321–329.
- Neville, A. M., and Brooks, J. J. (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., Pigeon, M., and Laurencot, J.-L. (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., Lam, L., Kou, S. C., Wong, Y.-L., and Wong, R. (2001). Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. **Cement and Concrete Research**. 31(9): 1301–1306.
- Powers, T. C., and Helmuth, R. A. (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.
- Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., and Rongshen, C. (2007). Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. **Construction and Building Materials**. 21(3): 539–545.
- Rieger, M. M. (1996). **Surfactant Encyclopedia**. Allured Publishing Corporation.
- Röler, M., and Odler, I. (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.
- Sadrmomtazi, A., Sobhani, J., and Mirgozar, M.A. (2013). Modeling compressive strength of EPS lightweight concrete using regression, neural network and ANFIS. **Construction and Building Materials**. 42(0): 205–216.

- Said, A. M., Zeidan, M. S. Bassuoni, M. T., and Tian, Y. (2012). Properties of concrete incorporating nano-silica. **Construction and Building Materials**. 36(0): 838-844.
- Sanchez, F., and Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. **Construction and Building Materials**. 24(11): 2060–2071.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C., and Rattanashotinunt, C. (2010). Compressive Strength and Heat Evolution of Concretes Containing Palm Oil Fuel Ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 22(10): 1033–1038.
- Scrivener, K. L., and Nonat, A. (2011). Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and Concrete Research**. 41(7): 651–665.
- Setina, J., Gabrene, A., and Juhnevica, I. (2013). Effect of pozzolanic additives on structure and chemical durability of concrete. **Procedia Engineering**. 57(0): 1005–1012.
- Sinsiri, T. (2005). Effect of particle size and shape of fly ash on pore structure and permeability of blended cement paste. **Doctor of Philosophy (Civil Engineering) Thesis, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi**. 70–75.
- Tay J.-H., and Yip W.-K. (1989). Sludge ash as lightweight concrete material. **Environ Eng**. 115(1): 56–64.
- Tangpagasit, J., Cheerarot, R., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K. (2005). Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. **Cement and Concrete Research**. 35(6): 1145–1151.
- Tikalsky, P. J., Pospisil, J., and MacDonald, W. (2004). A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete. **Cement and Concrete Research**. 34(5): 889–893.
- Topçua, . B., and Uyguno lu, T., (2007). Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete. **Building and Environment**. 42(12): 4108–4116.
- Visagie, M. (2000). The effect of microstructure on properties of foamed concrete. **Master of Engineering (Structural Engineering) Thesis, Faculty of Engineering, University of Pretoria**. 4–7.
- Wang, K.-S., Chiou, I.-J., Chen, C.-H., and Wang, D. (2005). Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash. **Construction and Building Materials**. 19(8): 627–633.

- Wongkeo, W., and Chaipanich, A. (2010). Compressive strength, microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume. **Materials Science and Engineering: A**. 527(16-17): 3676–3684.
- Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Pimraksa, K., and Chaipanich, A. (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.
- Zhang, M.-H., and Islam, J. (2012). Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag. **Construction and Building Materials**. 29(0): 573–580.
- Zhang, M.-H., Islam, J., and Peethamparan, S. (2012). Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. **Cement and Concrete Composites**. 34(5): 650–662.



ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส



### ก.1 ตัวอย่างการคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสมของ CON

โดยไม่ผสมวัสดุปอซโซลานแทนที่ซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน 0.5 ( $w/b = 0.5$ ) วิธีการคำนวณตามมาตรฐาน ASTM C 796-2004 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. Oven dry density ของ CLC ที่ต้องการ คือ  $800 \text{ kg/m}^3$

2. ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ของปูนซีเมนต์  $3.15$

3. ความหนาแน่นของฟองโฟม (Foamed density)  $45 \text{ kg/m}^3$

4. อัตราส่วนสารเพิ่มฟองต่อน้ำเจือจาง  $1 : 40$

5. ปริมาณปูนซีเมนต์  $= 800 - (800 \times 20)/(100 + 20) = 666.7 \text{ kg}$  (ใช้ 665 kg)

6. ปริมาณน้ำทั้งหมด ( $w$ )  $w = 0.5(665) = 332.5 \text{ kg}$

7. ปริมาตรซีเมนต์ ( $V_c$ )  $V_c = \frac{M_c}{SG_c \cdot \dots_w} = \frac{665}{3.15 \times 1000} = 0.211 \text{ m}^3$

8. ปริมาตรน้ำทั้งหมด ( $V_w$ )  $V_w = \frac{M_w}{SG_w \cdot \dots_w} = \frac{332.5}{1 \times 1000} = 0.333 \text{ m}^3$

$$800 = \frac{(W_w + W_f) + W_c}{\left[\frac{W_w}{1000} + \frac{W_c}{3.15 \times 1000} + V_f\right]}$$

$$800 = \frac{(332.5) + (665)}{\left[\frac{332.5}{1000} + \frac{665}{3.15 \times 1000} + V_f\right]}$$

9. จะได้  $V_f = 0.703 \text{ m}^3$  หรือฟองโฟมที่ขยายตัวแล้วมีมวล  $= 45 \times 0.703 = 31.65 \text{ kg}$

10. สารเพิ่มฟองก่อนเจือจางมีมวล  $= 31.65/(40 + 1) = 0.772 \text{ kg}$

11. น้ำที่จะใช้เจือจาง  $= 31.65 - 0.772 = 30.88 \text{ kg}$

12. น้ำที่จะใช้ผสมวัสดุยึดประสาน  $= 332.5 - 31.65 - 0.772 = 300 \text{ kg}$

13. ปริมาณน้ำ ไม่รวมสารเพิ่มฟอง  $= 332.5 - 0.772 = 331.7 \text{ kg}$

สรุปปฏิภาคส่วนผสมของ CON ในหนึ่งลูกบาศก์เมตรประกอบด้วย

ปูนซีเมนต์  $665 \text{ kg}$

สารเพิ่มฟอง  $0.772 \text{ kg}$

น้ำ  $331.7 \text{ kg}$

## ก.2 ตัวอย่างการคำนวณหาปฏิภาคส่วนผสมของ 0.7NS3

โดยใช้นาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ 3% โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน 0.7 ( $w/b = 0.7$ ) วิธีการคำนวณตามมาตรฐาน ASTM C 796-2004 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. Oven dry density ของ CLC ที่ต้องการ คือ 800 kg/m<sup>3</sup>
2. ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ของปูนซีเมนต์ 3.15
3. ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ของนาโนซิลิกา 2.2
4. ความหนาแน่นของฟองโฟม (Foamed density) 45 kg/m<sup>3</sup>
5. อัตราส่วนสารเพิ่มฟองต่อน้ำเจือจาง 1 : 40
6. ปริมาณปูนซีเมนต์ในกรณีใช้แต่ซีเมนต์ล้วน = 665 kg
7. ปริมาณนาโนซิลิกาแทนที่ซีเมนต์ 3% =  $665 \times 3/100 = 19.95$  kg
8. ปริมาณปูนซีเมนต์ =  $665 - 19.95 = 645.1$  kg
9. ปริมาณน้ำทั้งหมด ( $w$ )  $w = 0.7(645.1 + 19.95) = 465.5$  kg
10. ปริมาตรซีเมนต์ ( $V_c$ )  $V_c = \frac{M_c}{SG_c \cdot \dots \cdot w} = \frac{645.1}{3.15 \times 1000} = 0.205$  m<sup>3</sup>
11. ปริมาตรนาโนซิลิกา ( $V_{nz}$ )  $V_{nz} = \frac{M_{nz}}{SG_{nz} \cdot \dots \cdot w} = \frac{19.95}{2.2 \times 1000} = 0.009$  m<sup>3</sup>
12. ปริมาตรน้ำทั้งหมด ( $V_w$ )  $V_w = \frac{M_w}{SG_w \cdot \dots \cdot w} = \frac{465.5}{1 \times 1000} = 0.466$  m<sup>3</sup>

$$800 = \frac{(W_w + W_f) + W_c}{\left[ \frac{W_w}{1000} + \left( \frac{W_c}{3.15 \times 1000} + V_f \right) \right]}$$

$$800 = \frac{(465.5) + (645.1 + 19.95)}{\left[ \frac{(465.5)}{1000} + \left( \frac{645.1}{3.15 \times 1000} + (19.95/2.2 \times 1000) + V_f \right) \right]}$$

13. จะได้  $V_f = 0.734$  m<sup>3</sup> หรือฟองโฟมที่ขยายตัวแล้วมีมวล =  $45 \times 0.734 = 33.02$  kg
14. สารเพิ่มฟองก่อนเจือจางมีมวล =  $33.02/(40 + 1) = 0.805$  kg
15. น้ำที่จะใช้เจือจาง =  $33.02 - 0.805 = 32.21$  kg
16. น้ำที่จะใช้ผสมวัสดุยึดประสาน =  $465.5 - 32.21 - 0.805 = 432.48$  kg
17. ปริมาณน้ำ ไม่รวมสารเพิ่มฟอง =  $465.5 - 0.805 = 464.69$  kg

สรุปปฏิภาคส่วนผสมของ 0.7NS3 ในหนึ่งลูกบาศก์เมตรประกอบด้วย

ปูนซีเมนต์	645.1 kg
นาโนซิลิกา	19.95 kg
สารเพิ่มฟอง	0.805 kg
น้ำ	464.69 kg

ภาคผนวก ข

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

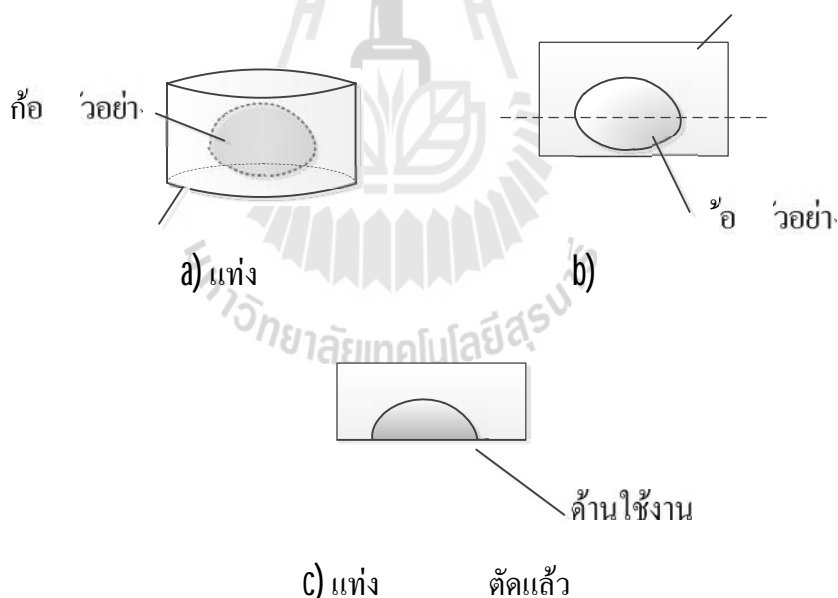
### ข.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอล

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอลมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ทุบก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่จะทดสอบให้แตกออกเป็นชิ้นเล็ก มีขนาดประมาณ 10–15 mm จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำก้อนตัวอย่างของ CLC ที่ผ่านการอบแล้วใส่ลงในโมลด์ (mold) พีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ที่ทำจารบีไว้แล้ว และเทอีพ็อกซี่ (epoxy) ที่ผสมส่วน A กับส่วน B ไว้แล้วตามสัดส่วนที่กำหนด ให้น้ำอีพ็อกซี่เคลือบไหลโอบหุ้มก้อนตัวอย่าง โดยรอบ จากนั้นปล่อยให้อีพ็อกซี่แข็งตัว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 วัน

3. ทำการแกะอีพ็อกซี่ออกจากโมลด์ และทำการตัดแท่งอีพ็อกซี่ที่แข็งตัวแล้ว ให้ขาดออกจากกันที่ตำแหน่งประมาณครึ่งหนึ่งของก้อนตัวอย่างด้วยเลื่อยตัดเหล็ก ดังรูปที่ ข.1



.1

แท่งตัวอย่าง ที่หล่อแล้ว

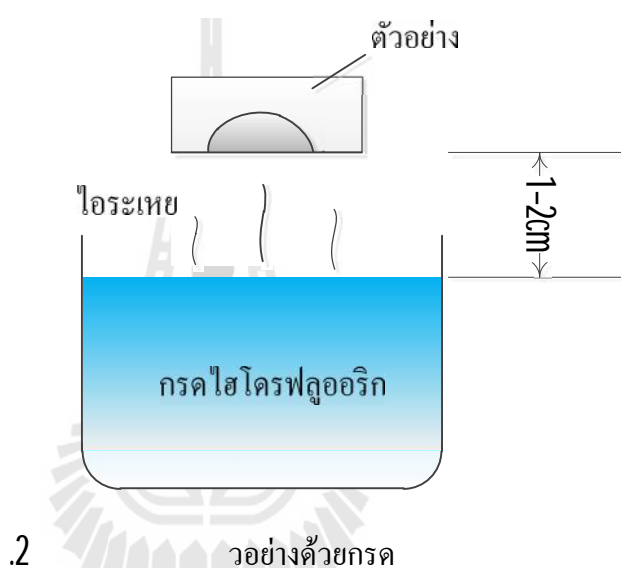
4. ชิ้นงานให้เรียบด้วยกระดาษทรายและหล่อเย็นด้วยน้ำ

No. 120, No. 320, No. 400, No. 600, No. 800, No. 1200, ชัดด้วยผ้า

โดยใช้ผงอลูมิน่า No. 5  $\mu\text{m}$ , ผงอลูมิน่า No. 1  $\mu\text{m}$ , ผงขัดอลูมิน่า No. 0.5  $\mu\text{m}$ , ผงขัดอลูมิน่า, No. 0.05  $\mu\text{m}$ , ผงขัดอลูมิน่า No. 0.01  $\mu\text{m}$



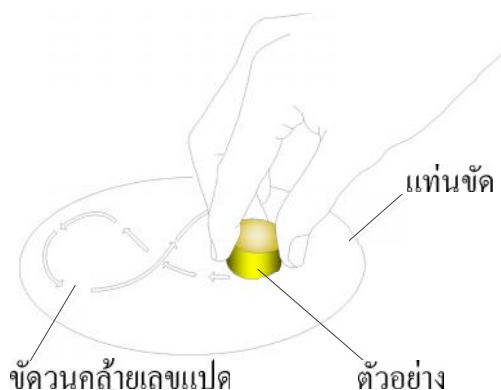
5. ล้างก้อนตัวอย่างด้วยน้ำสะอาดและเช็ดให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู (tissue paper)
6. นำไปส่อง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ว่าผิวตัวอย่างใหม่ หรือไม่ ถ้า  
ซีเมนต์เพสต์เป็นสีดำแสดงว่าใหม่ ให้ขัดซ้ำใหม่โดยเริ่มที่ผงขัดลูมิน่าขนาด No. 1 $\mu$ m แล้ว  
จึงส่อง ด้วยกล้องจุลทรรศน์
7. (etching) ซีเมนต์เพสต์ด้วยไอระเหยของ (hydrofluoric acid)  
อาจใช้กรดไนตริก (nitric acid) ก็ได้ ให้ผิวตัวอย่างอยู่ห่างจาก 1 - 2 cm  
เป็นเวลา 5 .2



8. เมื่อก่อนตัวอย่างได้ทำการ Etching สมบูรณ์แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัล

### ข.2 ข้อควรระวังในการ Etching ก่อนตัวอย่าง

1. Etching ก่อนตัวอย่างจะเป็นสีดำ ใหม่  
No. 1200
2. การขัดด้วยผ้าขัดจะต้องกดให้แน่นด้วย ไปมาคล้าย
3. ถ้า ตัวอย่างไม่แน่น ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผ้าขัดกับ ตัวอย่าง  
ทำให้ ใหม่ เป็นสีดำ



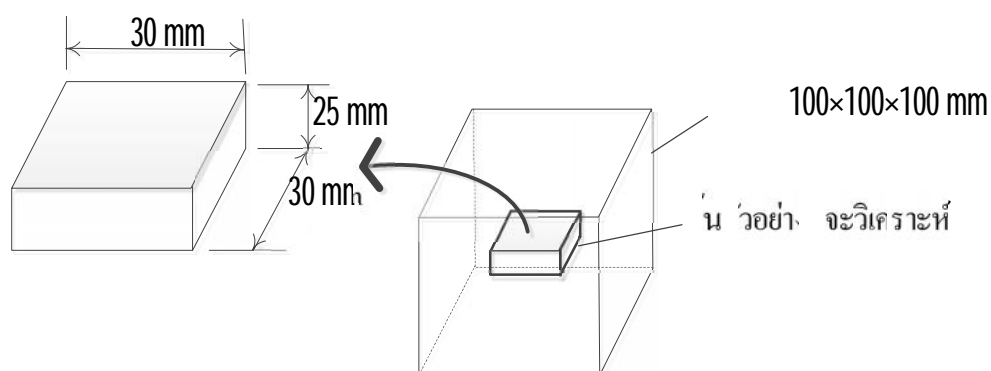
### .3 การขีดแท่งตัวอย่าง

3. และล้างด้วยน้ำไม่ควรทิ้งไว้นานเกิน 1 เพราะตัวอย่างจะเป็น (scaly) แต่ถ้าต้อง เก็บตัวอย่างไว้เป็นเวลานาน (stop hydration) ด้วยไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen) แต่ตัวอย่าง ผ่านการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ก่อน ซึ่งของเหลวที่ไม่ทำปฏิกิริยา ซีเมนต์ เป็นฟิล์ม ตัวอย่างไว้

### ข.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ขนาดโพรงด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอล

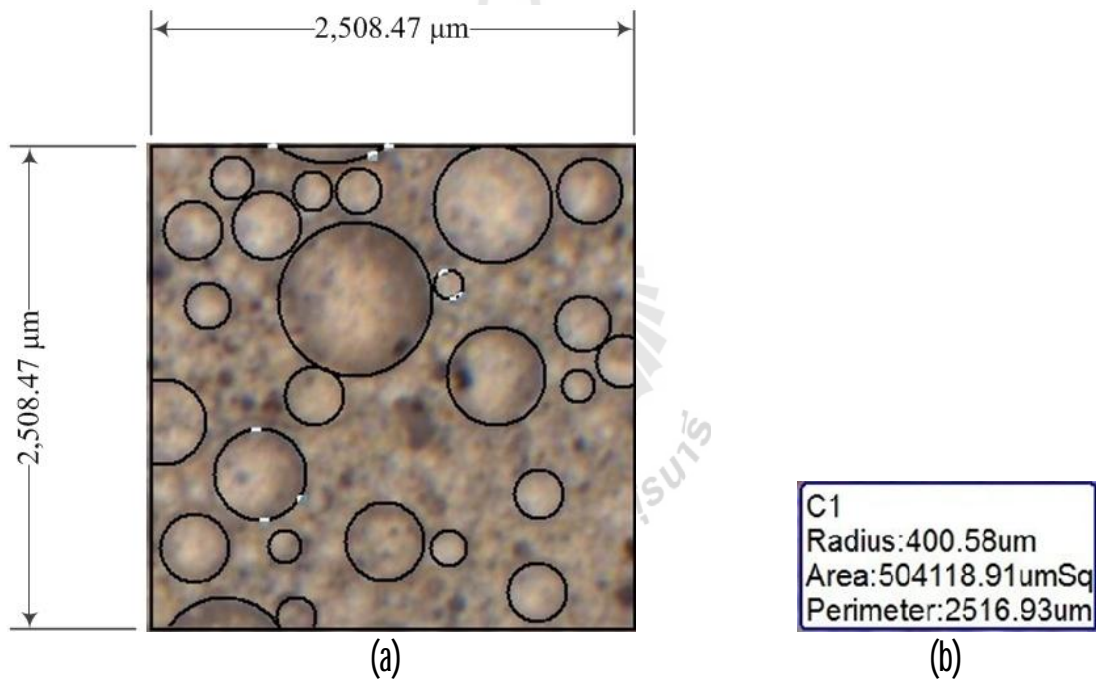
การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอล

1. ทำการตัดก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่จะทดสอบ ให้มีทรงลูกบาศก์ขนาดประมาณ  $30 \times 30$  mm  $25$  mm โดยเลือกเอาส่วนที่อยู่ใจกลางข้างในของก้อนตัวอย่าง .4



### .4 แสดงตำแหน่ง ตัดก้อนตัวอย่างไปทดสอบ

2. ขึ้นตัวอย่างให้เรียบ ด้วยกระดาษทรายและหล่อเย็นด้วยน้ำ  
No. 120, No. 320, No. 400, No. 600, No. 800, No. 1200
3. ล้างก้อนตัวอย่างด้วยน้ำสะอาดและเช็ด ให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู
4. ก้อนตัวอย่าง  $110 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24
5. ก้อนตัวอย่างไปวิเคราะห์ภาพถ่ายขนาดโพรงด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอล  
ดี (Software) เวอร์ชัน Motic 2000 Mega Advance Co.,  
Ltd. มอนิเตอร์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยการใช้เมาส์ลากจุด (trace)  
ภาพถ่ายที่ต้องการทราบค่า .5 (a) พร้อมจะปรากฏค่า  
ตัวอย่างแสดงใน .5 (b)



### .5 ตัวอย่างการวิเคราะห์ขนาดโพรงจากภาพถ่ายของ 0.5FA20

6. ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ ถ่าย บันทึกให้เป็นระเบียบ
- .1 จะปรากฏให้เห็นโพรง ต่าง ๆ ถูกจัดให้อยู่ในช่วงข้อมูล
- .2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรง
- (counts) จะได้กราฟแท่ง .6

.1 ตัวอย่างตารางบันทึก

วิเคราะห์

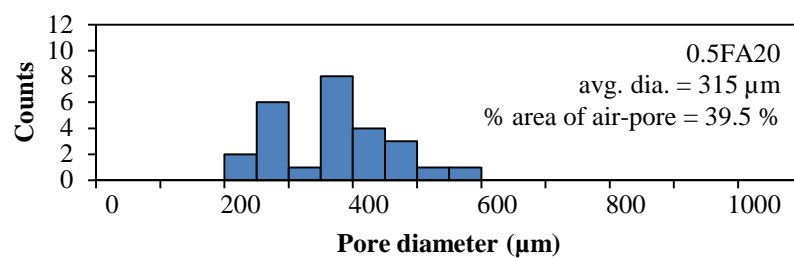
0.5FA20

Pore No.	Pore diameter ( $\mu\text{m}$ )	Area of air-pore ( $\mu\text{m}^2$ )
1	401.16	45,336.65
2	359.08	101,268.82
3	220.78	38,263.88
4	343.02	92,409.60
5	521.32	213,443.77
6	304.5	72,821.42
7	476.86	178,602.88
8	360.14	101,869.73
9	407.8	130,614.14
10	240.02	45,246.75
11	260.32	53,225.24
12	309.9	75,431.36
13	319.62	80,322.24
14	195.1	29,895.21
15	176.68	24,516.48
16	312.8	76,849.77
17	220.82	38,356.32
18	211.42	35,162.77
19	244.96	47,129.92
20	371.44	108,304.62
21	364.26	104,157.99
22	240.32	45,336.65
23	323.64	82,223.13
24	400.3	125,788.47
25	304.62	72,842.78
26	301.18	71,206.87
	Average dia. = 315 $\mu\text{m}$	Total = 2,488,025.4 $\mu\text{m}^2$ $\% \text{ area of air-pore} = \left( \frac{2,488,025.4}{2,508.47 \times 2,508.47} \right) \times 100 = 39.5\%$

.2 ตัวอย่าง

0.5FA20

Pore diameter ( $\mu\text{m}$ )	Frequency of counts
0	0
50	0
100	0
150	0
200	2
250	6
300	1
350	8
400	4
450	3
500	1
550	1
600	0
650	0
700	0
750	0
800	0
850	0
900	0
950	0
1000	0



.6 ตัวอย่างกราฟแสดงความถี่

0.5FA20

ภาคผนวก ค

ทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์



### ค.1 การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์

การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ (regression analysis and correlation) มีความสำคัญในการอนุมานเชิงสถิติสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล หรือตัวอย่างที่ได้ วิจัย เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น สัมพันธ์ ตั้งแต่ 2 ซึ่งจะช่วยให้ผู้วิจัยทราบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรชัดเจน

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นการกำหนดตัวแบบ (model) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัว (dependent variable) เรียกว่าตัวเกณฑ์ ภายใต้อิทธิพลของตัวแปรอิสระ (independent variable) ซึ่งเรียกว่าตัวพยากรณ์ ตัวแบบที่ได้ นั้น เป็นประโยชน์ในการใช้พยากรณ์หรือการทำนาย (predict) ค่าตัวแปรตาม ยังมีค่า (coefficient of determination) เรียกว่า เป็นดัชนีเพื่อใช้ในการตัดสินใจ ว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นจากการวิเคราะห์ตัวอย่างนั้นมีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด โดยมี วิเคราะห์สหสัมพันธ์เป็น ซึ่งวัดว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์มากน้อยเพียงใด และมีทิศทาง เป็นไปอย่างไร ( ) หรือไม่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งเป็นการวัดความแข็งแกร่ง (strength) ระหว่างตัวแปรเหล่านั้น

การวิเคราะห์ ถดถอยหรือการพยากรณ์ เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้สร้างสมการเส้นตรง หรือเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวหรือมากกว่า ซึ่งประกอบด้วย หนึ่งตัวกับตัวแปรอิสระอย่างน้อยหนึ่งตัว ยกตัวอย่างเช่น ผล ขึ้นอยู่กับ (X) ส่วนตัวแปรตาม (Y)

วิเคราะห์การถดถอยถ้ามีตัวพยากรณ์หรือตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวจะเรียก การศึกษาความสัมพันธ์นั้นว่า การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (simple regression analysis) เช่น การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) แต่ถ้ามีตัวพยากรณ์ตั้งแต่ 2 โดยมีตัวเกณฑ์เพียงตัวเดียวจะเรียกการศึกษาความสัมพันธ์นั้นว่า การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple regression analysis) จุดประสงค์หลักดังนี้

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ว่ามีความสัมพันธ์ น้อยเพียงใด ถ้า X Y มีความสัมพันธ์กันมาก แสดงว่า ถ้า X มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อค่า Y เป็นอย่างมาก (model) ความสัมพันธ์ ของตัวแปรได้

2. ใช้ความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้มาประมาณค่าหรือพยากรณ์ (predict) ค่า Y เมื่อกำหนดค่า X

### 3. ทดสอบสมมติฐานและประมาณค่าพารามิเตอร์ในสมการถดถอยได้

#### ค.1.1 การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย

เป็นการศึกษาข้อมูลที่ประกอบด้วยตัวแปร 2 ตัว หรือ เรียกว่า ตัวแปรคู่ (bivariate data) เป็นตัวแปรเชิงปริมาณหรือข้อมูลต่อเนื่อง เเคราะห์จะนำตัวแปรทั้งสองมาพิจารณาหรือ เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ในเชิงเส้นตรง (linear) โดยที่ต้องทราบค่าของตัวแปรตัวหนึ่ง หรือต้องกำหนดค่าของตัวแปร ตัวหนึ่งไว้ล่วงหน้า ตัวแปรที่ต้องการทราบค่าหรือต้องการพยากรณ์ เรียกว่า มีสัญลักษณ์แทนด้วย  $Y$  ตัวแปรตามขึ้นอยู่กับตัวแปรอีกตัวหนึ่งเป็นตัวแปรที่ทราบค่า เรียกว่า ตัวแปรอิสระ มีสัญลักษณ์แทนด้วย  $X$

วิเคราะห์

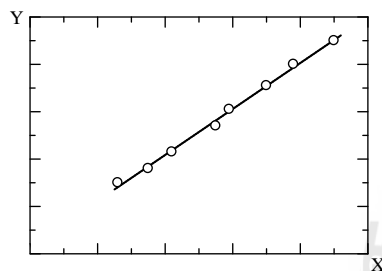
1.  $X$  แต่ละตัวกับตัวแปรตาม  $Y$  ข้อมูลว่ามีการแจกแจงปกติหรือไม่ มีรูปแบบความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นหรือไม่
2. ค้นหาสมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่เหมาะสมที่สุดกับข้อมูล โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)
3. การทดสอบความเหมาะสมของเส้นถดถอยเชิงเส้นตรงที่ได้ (model fit) รูปแบบที่ได้สามารถอธิบาย  $Y$  ได้ได้อย่างไรโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R square  $R^2$ )  $Y$  ได้ร้อยละเท่าไร
4. ตรวจสอบเส้นถดถอยที่ได้ว่าเป็นไปตามหลักเบื้องต้นของการวิเคราะห์ห้ก ที่ว่า ตัวแปรอิสระ ( $X_i$ ) ทุกตัวเป็นอิสระกัน ซึ่งให้ผลลัพธ์แสดงค่า Correlation และค่า Covariance ระหว่างตัวแปรอิสระ  $X_i$  แต่ในกรณีการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายที่มีตัวแปรอิสระ  $X$  เดียวก็ไม่จำเป็นต้องตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นข้อนี้
5. ตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นตรงว่าถูกต้องหรือไม่ โดยการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (residual analysis) และอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้คือการทดสอบที่เรียกว่า Lack of Fit แต่ไม่ได้กล่าวในวิทยานิพนธ์นี้
6. ถ้าพบว่าไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง ต้องหาตัวแบบใหม่ที่เหมาะสมกับข้อมูลอีกครั้ง โดยอาจใช้ฟังก์ชัน เอ็กซ์โพเนนเชียล หรือ ลอการิทึม เป็นต้น



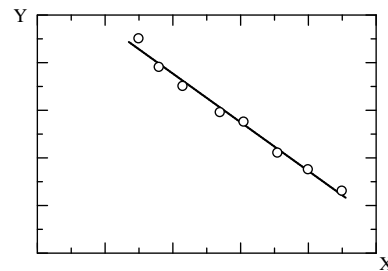
## ค.1.2 แผนภาพการกระจาย

(scatter diagram) เป็นการแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัว  
 (X) (Y) ว่ามีลักษณะแบบใด ซึ่งในการวิเคราะห์ Regression  
 Correlation จำเป็นต้องดูลักษณะของความสัมพันธ์ทั้ง X Y ว่ามีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง  
 หรือไม่ ก่อนจะทำกรวิเคราะห์ต่อไปโดยนำค่า X Y Scatter Plot

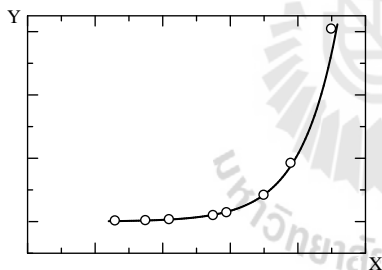
.1



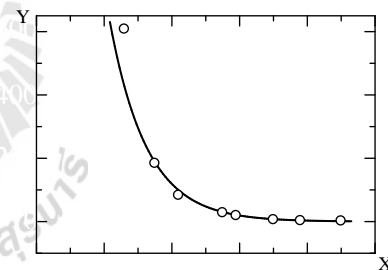
a) เชิงเส้นและเป็นบวก



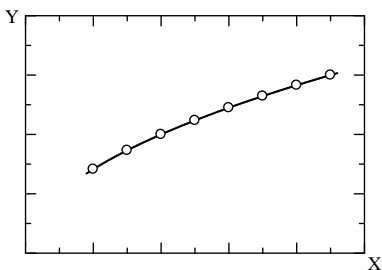
b) เชิงเส้นและเป็นลบ



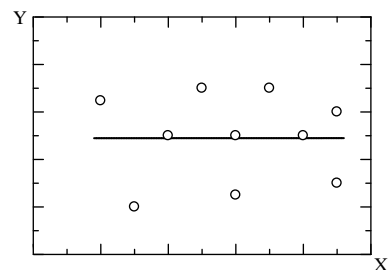
c) เอ็กซ์โพเนนเชียลและเป็นบวก



d) เอ็กซ์โพเนนเชียลและเป็นลบ



e)



f) ไม่มีความสัมพันธ์

.1 ตัวอย่างแผนภาพแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X Y

.1 (a) แสดงความสัมพันธ์ของ  $X$  และ  $Y$  ในลักษณะเชิงเส้นตรงที่มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกันหรือเป็นบวก ส่วน .1 (b) มีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้ามกันหรือเป็นลบ เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression analysis)

## ก.2 ทฤษฎีกำลังสองน้อยที่สุด

การประมาณค่าพารามิเตอร์  $\alpha$  และ  $\beta$  ประชากรเพื่อสร้างสมการตัวอย่างอาจทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการประมาณ (maximum likelihood estimation) แต่การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (least square method) ซึ่งจะกล่าวในวิทยานิพนธ์

สมมติว่าค่าเฉลี่ยทุกค่าบนเส้นแนวโน้ม คือ  $\bar{Y}_X$  (อ่านว่า มิว Y given X) อยู่บนเส้นตรง และมีความสัมพันธ์ สั้น .1 สามารถเขียนตัวแบบสำหรับตัวแปรสุ่ม  $Y_i = Y/X_i$  ได้ดังนี้

$$Y_i = r + sX_i + E_i \quad (.1)$$

เมื่อตัวแปรสุ่ม  $E_i$  หมายถึงตัวแปรสุ่มเศษตกค้าง ที่เป็นอิสระต่อกันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และค่าความแปรปรวนเท่ากับ  $\sigma_{Y/X}^2 = \sigma^2$  ดังนั้นทุกค่าสังเกตของกลุ่มอันดับ  $(X_i, Y_i)$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $X$  และ  $Y$  ได้ดังนี้

$$Y_i = r + sX_i + v_i \quad (.2)$$

และสมการถดถอยตัวอย่าง ซึ่งเป็นค่าประมาณของ  $\bar{Y}_X$  เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

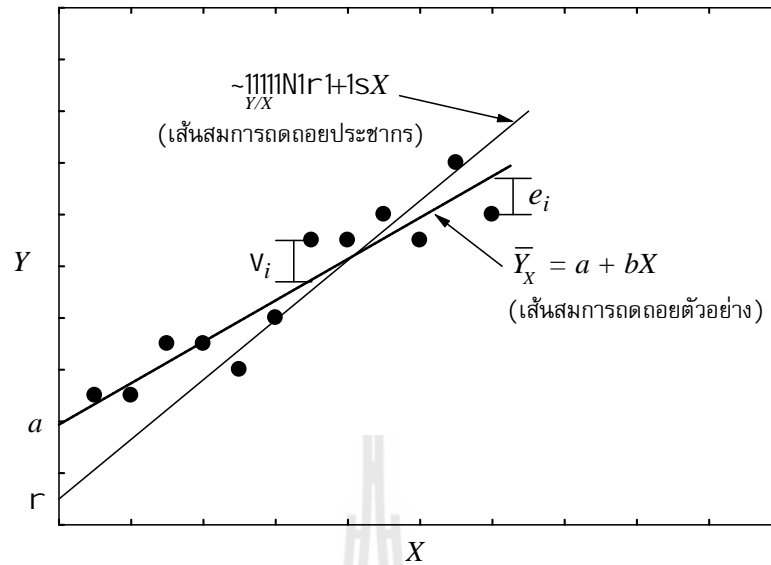
$$\bar{Y}_x = a + bX \quad (.3)$$

ค่าสังเกต  $n$  ค่าจากตัวอย่างคือกลุ่มอันดับ  $\{(X_i, Y_i); i = 1, 2, \dots, n\}$  แต่ละค่าจึงสอดคล้องกับความสัมพัทธ์

$$Y_i = a + bX_i + e_i \quad (.4)$$

$e_i$  เรียกว่า เศษตกค้างจากสมการ ตัวอย่าง

โดยตัวแปรสุ่ม  $e$  ไม่ใช่ตัวแปรสุ่ม  $v$  เนื่องจากตัวแปรสุ่ม  $v$  หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนคู่  $(X_i, Y_i)$  จากสมการถดถอยประชากร ซึ่งเป็นค่าจริงแต่ตัวแปรสุ่ม  $e$  หมายถึง ส่วนเบี่ยงเบนของกลุ่มอันดับ  $(X_i, Y_i)$  ตัวอย่างซึ่งเป็นเส้นประมาณตามรูปที่ ก.2



## .2 สมการถดถอยตัวอย่างและสมการถดถอย

เส้นตรงที่ได้จากสมการ  $\bar{Y}_X = a + bX$  เป็นสมการถดถอยจากข้อมูลตัวอย่างอาจมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น เส้นประมาณสมการถดถอย (estimate line of regression) เส้นกำลังสองน้อยที่สุด (least square line) เส้นถดถอย (regression line) (regression equation)

ถดถอยตัวอย่าง เป็นต้น ซึ่งโดยปกติเส้นสมการถดถอยตัวอย่างไม่ทับกับเส้นสมการถดถอย

(.2) เนื่องจากไม่สามรถทราบได้ว่าเส้นสมการถดถอยที่แท้จริงของประชากรเป็นอย่างไร จึงมีข้อสมมติว่าสมการถดถอยตัวอย่าง จะเป็นตัวแทนที่ดีของประชากรได้ ถ้าข้อมูลในแต่ละค่าของ  $X_i$

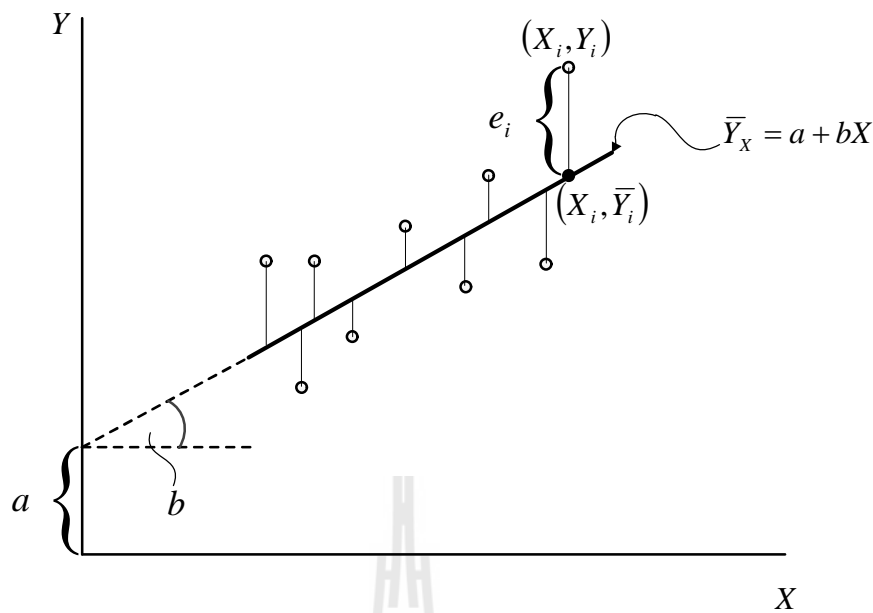
### ค.3 สมการถดถอยตัวอย่างหรือเส้นกำลังสองน้อยที่สุด

เมื่อต้องการหาสมการถดถอยตัวอย่างที่ดีที่สุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด  
เศษตกค้าง  $e_i, i = 1, 2, \dots, n$  .3

$$e_i = Y_i - \bar{Y}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (.5)$$

$Y_i$  คือ ค่าสังเกตที่เกิดขึ้นตามค่า  $X_i$

$\bar{Y}_i$  คือ ค่าที่ได้จากสมการถดถอย  $Y_i = a + bX_i$  เมื่อกำหนดค่า  $X_i$



.3 ค่าสังเกตจากคู่อันดับ  $(X_i, Y_i)$  และเศษตกค้าง  $e_i$

ถ้ายกกำลังสองเศษตกค้างทุกค่าแล้วบวกกัน คือ  $e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2$  จะได้ผลบวกกำลังสองของค่าความคล

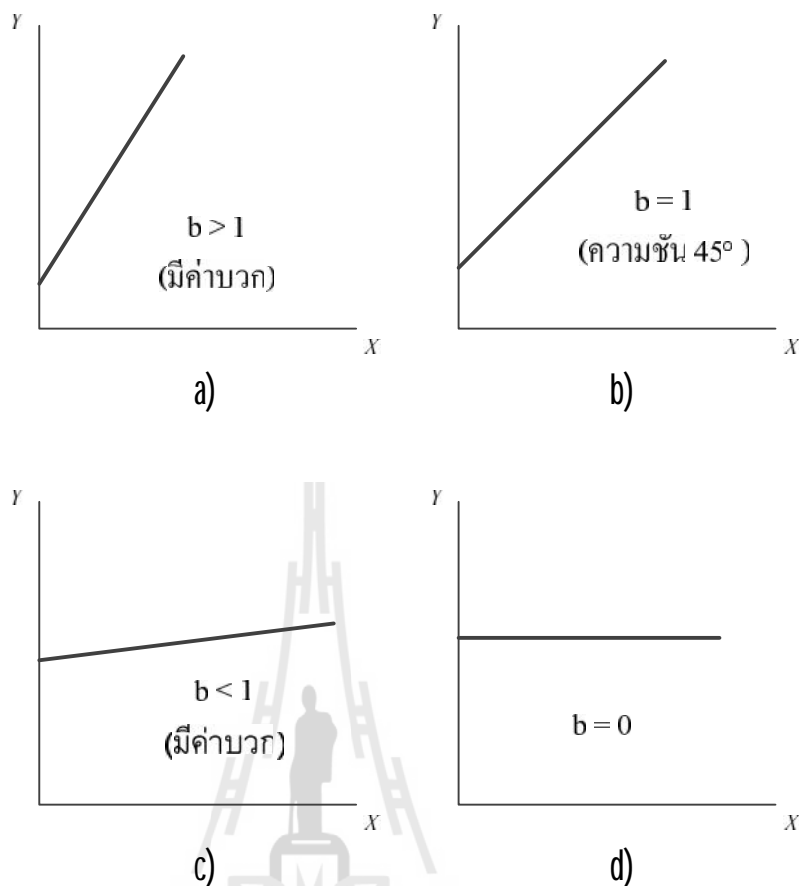
เรียกว่า ผลบวกกำลังสองใช้ตัวย่อว่า  $SSE$

กำลังสองน้อยที่สุดถ้าสามารถทำให้  $SSE$  มีค่าน้อยที่สุดก็ทำให้ได้เส้นสมการถดถอยที่ดีที่สุดด้วย (best fit) ซึ่งสามารถทำได้โดยการหาอนุพันธ์ (differential)  $SSE$  เทียบกับค่าคงที่  $a$   $b$  เป็นความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ  $Y$   $X$

เรียกส่วนนี้ว่า (regression coefficient)

พยากรณ์ ถ้าทราบค่า  $b$  และค่า  $a$  แล้ว ก็จะสามารถพยากรณ์ค่าของตัวแปร  $Y$  ได้ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1. ถ้า  $b > 0$  แสดงว่า  $X$   $Y$  มีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ถ้า  $X$  มีค่าของ  $Y$  ก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย
2. ถ้า  $b < 0$  แสดงว่า  $X$   $Y$  มีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ถ้า  $X$  มีค่าของ  $Y$
3. ถ้า  $b$  มีค่าใกล้ 0 แสดงว่า  $X$   $Y$  มีความสัมพันธ์กันน้อย
4. ถ้า  $b = 0$  แสดงว่า  $X$   $Y$  ไม่มีความสัมพันธ์กันเลย เส้น  $Y$  จะเป็นเส้นตรง ค่า  $Y$  จะมีค่า เท่ากับค่า  $a$  .4 (d)
5. ถ้า  $b = 1$  แสดงว่าความชันของเส้นกราฟมีค่าเท่ากับ 45  $Y$  จะมีค่าเท่ากับ  $a$  เท่ากับศูนย์ .4 (b)



4 สมการเส้นตรงของการถดถอยเมื่อ  $b$  มีค่าแตกต่างกัน

$$SSE = \sum e_i^2 = \sum (Y_i - a - bX_i)^2 \quad (.6)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\partial}{\partial a} SSE = 2 \sum (Y_i - a - bX_i)(-1)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} SSE = 2 \sum (Y_i - a - bX_i)(-X_i)$$

โดยทฤษฎีการหาค่าต่ำสุด ถ้าให้  $\frac{\partial}{\partial a} SSE = 0$        $\frac{\partial}{\partial b} SSE = 0$  จะได้สมการปกติจำนวน

2

$$\sum Y_i - na - b \sum X_i = 0 \quad (.7)$$

$$\sum X_i Y_i - a \sum X_i - b \sum X_i^2 = 0 \quad (.8)$$

จากการย้ายข้าง

$$na + b \sum X_i = \sum Y_i \quad (.9)$$

$$a \sum X_i + b \sum X_i^2 = \sum X_i Y_i \quad (.10)$$

จากการแก้สมการปกติทั้งสองสมการ จะได้ตัวประมาณ  $a$        $b$

$$b = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (.11)$$

$$a = \frac{\sum Y_i - b(\sum X_i)}{n} \quad (.12)$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (.13)$$

การสร้างเส้นสมการถดถอยตัวอย่าง จึงสรุปไว้เป็นทฤษฎีดังนี้

$$\hat{y}_{x} = r + sX \text{ จากสมการถดถอยตัวอย่าง } \bar{Y}_x = a + bX$$

สามารถทำได้เมื่อ

$$b = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}$$

**นิยามที่ ค.1**

ถ้าให้  $x = X - \bar{X}$        $y = Y - \bar{Y}$  แล้วสามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$n \sum x^2 = n \sum X^2 - (\sum X)^2 \quad (.14)$$

$$n \sum y^2 = n \sum Y^2 - (\sum Y)^2 \quad (.15)$$

$$n \sum xy = n \sum XY - \sum X \sum Y \quad (.16)$$

(.11) อาจใช้อักษรตัวเล็กเขียนใหม่โดยนิยามที่ ค.1 ได้ดังนี้

$$b = \frac{n \sum xy}{n \sum x^2} = \frac{\sum xy}{\sum x^2} \quad (.17)$$

#### ค.4 คุณสมบัติของสมการถดถอยตัวอย่าง

สมการถดถอยตัวอย่างหรือเส้นกำลังสองน้อยที่สุดที่คำนวณได้ มีคุณสมบัติดังนี้

1.  $(\bar{X}, \bar{Y})$  อยู่บนเส้นกำลังสองน้อยที่สุด
2. ผลรวมของค่าเบี่ยงเบนระหว่างคู่อันดับแต่ละค่ากับค่ากำลังสองน้อยที่สุด) จะเท่ากับ 0 (ซึ่งอยู่บนเส้น
3. ผลบวกกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนมีค่าต่ำสุด

### ค.5 ตัวอย่างการสร้างสมการถดถอยระหว่างการดูซึมน้ำและความพรุนของ CLC

ในกรณีเทียบกับฟังก์ชันเชิงเส้น ดังนั้นสมการถดถอยตัวอย่างจึงได้เป็น  $\bar{Y}_x = a + bX$   
 กำหนดค่า  $a$   $b$  .1

.1 การคำนวณค่า  $a$   $b$  เพื่อสร้างสมการถดถอยตัวอย่าง

X	Y	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
48.56	30.6	1,485.94	2,358.07	936.36
50.78	32.5	1,650.35	2,578.61	1,056.25
59.32	35.3	2,094.00	3,518.86	1,246.09
43.06	26.2	1,128.17	1,854.16	686.44
44.81	27.3	1,223.31	2,007.94	745.29
69.71	38.8	2,704.75	4,859.48	1,505.44
49.2	32.8	1,613.76	2,420.64	1,075.84
51	35	1,785.00	2,601.00	1,225.00
59.95	36.1	2,164.20	3,594.00	1,303.21
43.95	25	1,098.75	1,931.60	625.00
44.2	25.5	1,127.10	1,953.64	650.25
45	26.5	1,192.50	2,025.00	702.25
44.27	27.5	1,217.43	1,959.83	756.25
45.27	28.9	1,308.30	2,049.37	835.21
46.28	31.5	1,457.82	2,141.84	992.25
49.88	33.5	1,670.98	2,488.01	1,122.25
53.04	36.5	1,935.96	2,813.24	1,332.25
60.9	38.25	2,329.43	3,708.81	1,463.06
44.46	27	1,200.42	1,976.69	729.00
45.75	27.9	1,276.43	2,093.06	778.41
46.65	29.2	1,362.18	2,176.22	852.64
46.42	29.7	1,378.67	2,154.82	882.09
47.86	30.1	1,440.59	2,290.58	906.01
48.97	30.8	1,508.28	2,398.06	948.64
52.27	30	1,568.10	2,732.15	900.00
$\sum X_i =$ 1,241.56	$\sum Y_i =$ 772.45	$\sum X_i Y_i =$ 38,922.39	$\sum X_i^2 =$ 62,685.71	$\sum Y_i^2 =$ 24,255.48

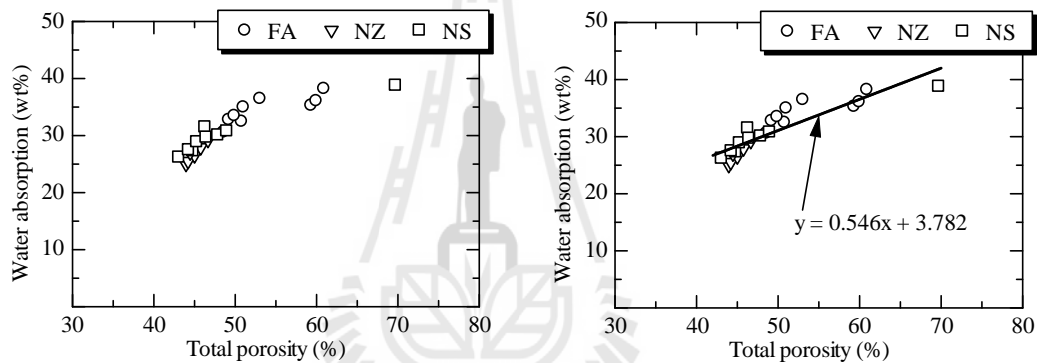
โดยกำหนดให้

$X$  ,  $Y$  CLC, และจำนวนข้อมูลทดสอบ  $n = 25$   
 แทนค่า  $n = 25$ ,  $\sum X_i Y_i = 38,922.39$ ,  $\sum X_i = 1,241.56$ ,  $\sum Y_i = 772.45$ ,  $\sum X_i^2 = 62,685.71$   
 .11 .13 จะได้ค่าประมาณ  $a$   $b$  สำหรับพารามิเตอร์  $r$   $s$   
 ดังต่อไปนี้

$$b = \frac{25(38,922.39) - (1,241.56)(772.45)}{25(62,685.71) - (1,241.56)^2} = 0.546$$

$$a = \frac{772.45}{25} - 0.546 \left( \frac{1,241.56}{25} \right) = 3.782$$

ดังนั้นสมการถดถอยตัวอย่างคือ  $y = 3.782 + 0.546x$  แสดงไว้ในรูปที่ ค.5



a) แผนภาพการกระจายของข้อมูล

b) สมการถดถอยตัวอย่างเชิงเส้น

.5 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการสร้างเส้นสมการถดถอยตัวอย่าง

## ค.6 สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด

ในการวิเคราะห์สมการถดถอย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ ตัวแปรต้น กับตัวแปรตาม สมการถดถอยที่ได้จะสามารถใช้พยากรณ์ค่าของตัวแปรตามได้ดีเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับ หรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม กล่าว

เปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเป็นผลมาจากอิทธิพลของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นมากน้อยเพียงใด สมการถดถอยที่ได้จะสามารถพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่า

(coefficient of determination)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient)

ใช้ตัว ย่อ  $r^2$   $R^2$  ซึ่งเป็น

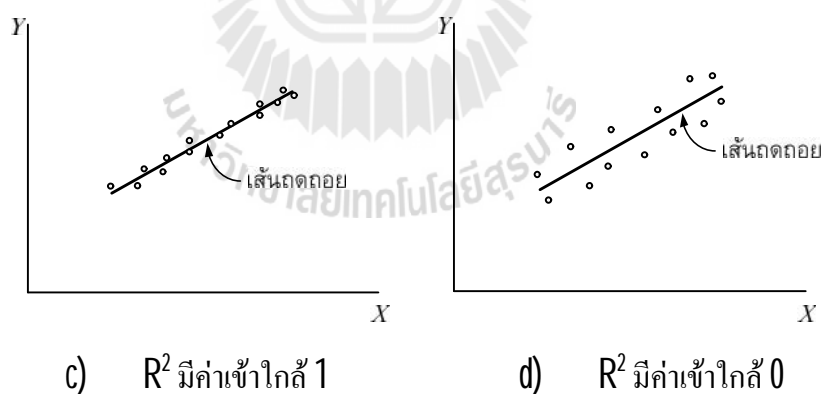
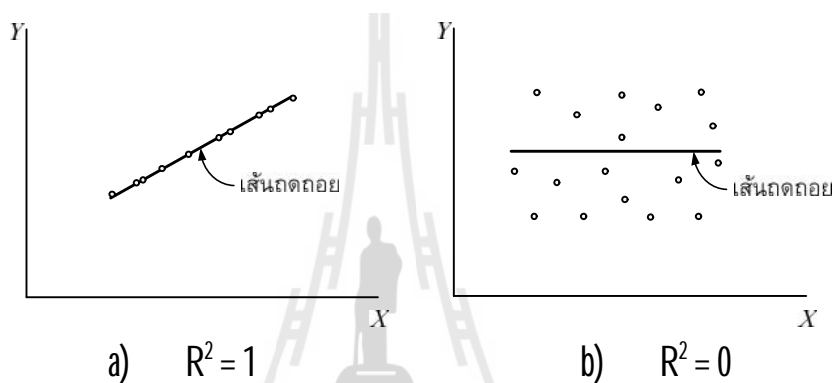
ชี้วัดความแข็งแกร่ง (strength of fit)

1. ค่า

( $R^2$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 1



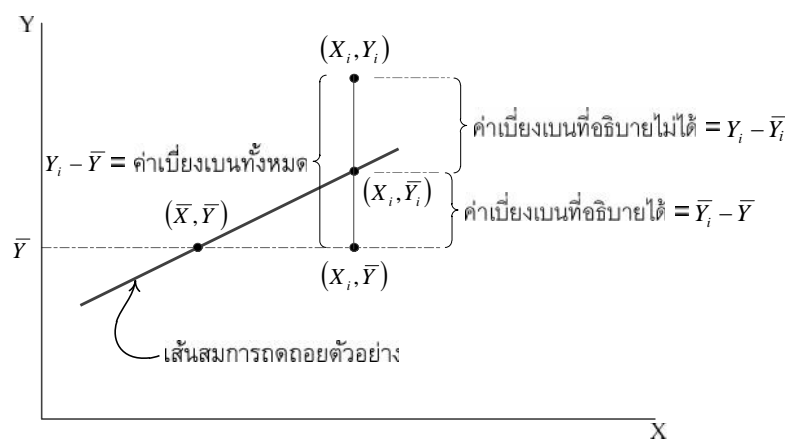
2. ค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 0 แสดงว่าสมการถดถอยสามารถอธิบายค่าของตัวแปรตามได้ไม่ดี กล่าวได้ว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อย .6 (d)
3. ค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากเท่าใด แสดงว่าสมการถดถอยสามารถอธิบายค่าของตัวแปรตามได้ดี เนื่องจากตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น มีความสัมพันธ์กันมาก .6 (c)
4. ถ้า  $R^2 = 1$  แสดงว่าทุกจุดคู่ลำดับอยู่บนเส้นถดถอย และมีความสัมพันธ์เชิงเส้นสมบูรณ์ (perfectly linear) ตัวอย่างใน .6 (a)
5. ถ้า  $R^2 = 0$  แสดงว่าเส้น ถดถอยไม่มีประโยชน์ต่อการพยากรณ์ค่าของ Y .6 (b)



.6 กราฟเปรียบเทียบเส้นถดถอยกับการกระจายข้อมูล

#### ค.6.1 การแยกส่วนค่าเบี่ยงเบนทั้งหมด

จากตัวอย่าง  $n$  หนึ่งตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย จะมีความสัมพันธ์ ว่าค่าสังเกตคู่อันดับ  $(X_i, Y_i)$  ใด ๆ กับจุดต่าง ๆ บนเส้น ตัวอย่าง .7



### .7 การแยกส่วนค่าเบี่ยงเบนของค่าสังเกตคู่อันดับ $(X_i, Y_i)$

พิจารณาจุดต่าง ๆ .7 ต่อไปนี้

1.  $(\bar{X}, \bar{Y})$  คือ คู่อันดับของค่าเฉลี่ยจากตัวแปรอิสระ  $X$  และ  $Y$  เป็นจุดอยู่บนเส้นสมการถดถอยตัวอย่าง
2.  $(X_i, Y_i)$  คือ คู่อันดับของค่าสังเกตจริงใด ๆ จากตัวแปร  $X$  และ  $Y$
3.  $(X_i, \bar{Y}_i)$  คือ คู่อันดับของค่าตัวแปร  $X$  (ค่า  $X_i$ ) กับค่า  $\bar{Y}_i$  ที่ได้จากการแทนค่าถดถอยเมื่อกำหนดค่า  $X_i$
4.  $(X_i, \bar{Y})$  คือ คู่อันดับของ  $X_i$  กับค่าเฉลี่ยของ  $Y$

ถ้าพิจารณาค่าเบี่ยงเบนระหว่างค่าสังเกตจริง  $Y_i$  ที่ต่างจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร  $Y$  จากเส้น  $(\bar{Y})$  พบว่าค่าเบี่ยงเบนดังกล่าวนี้ได้มาจาก 2 ส่วนคือ ค่าเบี่ยงเบนที่อธิบายได้ด้วย  $\bar{Y}_i - \bar{Y}$  และค่าเบี่ยงเบนที่อธิบายไม่ได้เนื่องจากสาเหตุอื่น ดังสมการต่อไปนี้

ค่าเบี่ยงเบนทั้งหมด = ค่าเบี่ยงเบนที่อธิบายได้ + ค่าเบี่ยงเบนที่อธิบายไม่ได้

$$SST = SSR + SSE$$

$$Y_i - \bar{Y} = (\bar{Y}_i - \bar{Y}) + (Y_i - \bar{Y}_i) \quad (.18)$$

ถ้ายกกำลังสองและรวมทุกจุดคู่อันดับจากตัวอย่างขนาด  $n$  จะได้ผลบวกกำลังสอง (sum of square SS) ความผันแปรของแหล่งที่มาของข้อมูล ดังนี้

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 \quad (.19)$$

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad \text{Total sum of square} \quad SST$$

$\sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2$  ผลบวกกำลังสองที่อธิบายได้ด้วย regression SSR Sum square due to

$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2$  คือ ผลบวกกำลังสองที่อธิบายไม่ได้ หรือ Sum square error SSE

ค่า  $(R^2)$  ซึ่งมีพิสัยตั้งแต่  $[0, 1]$  จึงมาจากแหล่งความผันแปร 2 ส่วนข้างต้นดังนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{SSR}{SST} \quad (.20)$$

ทราบค่าความแปรปรวน (variance)  $n$   
 กำหนดค่า  $R^2$  ได้ดังนี้

$$V_{(Y)} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} \quad (.21)$$

จะได้  $\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = (n-1)V_{(Y)}$

ถอดออกจากตัวอย่างจำนวนได้จากสมการ

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}{(n-1)V_{(Y)}} \quad (.22)$$

$V_{(Y)}$  = ค่าความแปรปรวนของ ถดถอยหรือของตัวอย่าง

$n$  = จำนวนตัวอย่าง  $n-1$  เรียกว่า (degree of freedom)

เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด ใช้สัญลักษณ์

แทนด้วย  $R^2$  นวนได้โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $r^2$  เท่ากับ  $R^2$  เท่ากับ  $r^2$  จำนวนได้ ดังนี้

$$r^2 = R^2 = \frac{(\sum X_i Y_i - n\bar{X}\bar{Y})^2}{(\sum X_i^2 - n\bar{X}^2)(\sum Y_i^2 - n\bar{Y}^2)} \quad (.23)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad \bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n}$$

จากตัวอย่าง ( .1) ค่า  $R^2$  ได้

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{1,241.56}{25} = 49.6624 & \bar{Y} &= \frac{772.45}{25} = 30.898 \\ R^2 &= \frac{(38,922.39 - 25(49.6624 \times 30.898))^2}{(62,685.71 - 25(49.6624)^2)(24,255.48 - 25(30.898)^2)} \\ &= \frac{(560.669)^2}{(1026.861)(388.3199)} = 0.79\end{aligned}$$

### ค.6.2 ความหมายของ $R^2$

ค่า  $R^2$  มาจากค่า สัมพันธ์ นอกจากมีประโยชน์ต่อการวัดความแข็งแกร่ง สัมพันธ์ระหว่างตัวแปรคู่ ( .20) ค่า  $R^2$  คือ อัตราส่วนความผันแปร ระหว่างที่อธิบายได้จากสมการถดถอยกับที่เกิดขึ้นในความหมายทางสถิติ คือ ค่า สัมพันธ์ที่กำหนดเป็นตัวแทนสัดส่วนความแปรปรวนทั้งหมดของตัวแปรตาม  $Y$  ที่อธิบายได้จากสมการ ถดถอย กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ เป็นการบอกสัดส่วนความผันแปรของตัวแปรตาม  $Y$  พยากรณ์ได้  $X$  ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นดัชนีที่ทำให้ตัดสินใจได้ว่าสมการถดถอยตัวอย่างมี ความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ยิ่งค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากขึ้นเท่าใดผู้วิจัยจะมีความมั่นใจในสมการ จะได้ค่าพยากรณ์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงได้มากขึ้น เช่น ค่า

$$\text{ค่า } R^2 = 0.79 \text{ หมายความว่า } 79\%$$

(  $Y$  ) อธิบายได้ด้วยความพรุนของคอนกรีต ส่วนที่เหลืออีก 21 % แปรอื่นที่ไม่ใช่ความพรุนกับค่าความคลาดเคลื่อน (error term) แต่ถ้าต้องการความแม่นยำสำหรับค่า พยากรณ์มากกว่านี้ก็อาจต้องนำตัวแปรอื่นมาเพิ่มในตัวแบบ เป็นต้น

### ค.7 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (coefficient of correlation  $r$  ) เป็นค่าที่แสดงถึง ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรสองตัว ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และ

$$r = \pm\sqrt{R^2} \quad (.24)$$

ค่า  $r$  มีขอบเขตตั้งแต่ -1 ถึง 1  $r$  มีค่าเข้าใกล้ -1 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมี ความสัมพันธ์ เชิงเส้นตรงแบบผกผันกัน กล่าวคือเมื่อตัวแปรหนึ่งมีค่ามากขึ้นอีกตัวแปรหนึ่งจะมีค่า แต่ ถ้า  $r$  มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแบบตามกัน กล่าวคือเมื่อตัวแปรหนึ่งมีค่ามากขึ้นอีกตัวแปรหนึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้า  $r$  มีค่าเท่ากับ 0

แสดงว่าตัวแปร ทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงต่อ

นพจน์ค่า  $r$  ได้

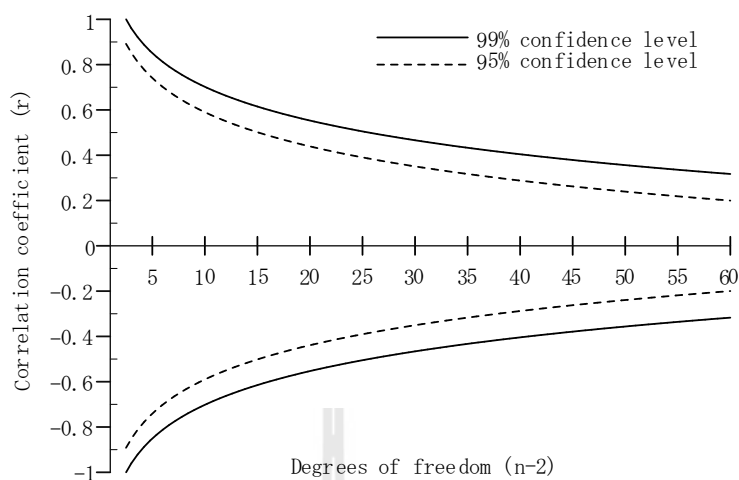
$$r_{(x,y)} = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right] \left[ n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \right]}} \quad (.25)$$

ค่านัยสำคัญในทางสถิติของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับจำนวนของข้อมูล เพื่อตรวจสอบว่าค่า  $r$  ใดๆ ในการบ่งชี้บอกถึงความสัมพันธ์ทางนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ สามารถใช้ Pearson's correlation coefficient test .2 .8 กล่าวคือถ้ามีข้อมูลเพียง 4 ตัว สำหรับจำนวนของดีกรีอิสระเป็น 2 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเส้นตรงที่หา ได้ดีวิธีกำลังสองน้อย สุดเท่ากับ  $-0.94$  จะไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น (confidence level) 95% อย่างไรก็ตาม ถ้ามีข้อมูลมากกว่า 60 ตัว และค่า  $r$  เท่ากับ  $0.26$  ( $r^2 = 0.0676$ ) จะบอกได้ว่ามีนัยสำคัญพอสมควร เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นด้านบวก หรืออีกนัยหนึ่งความสัมพันธ์สามารถมีนัยสำคัญทางสถิติว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือไม่

## .2 Pearson's correlation coefficient

Degrees of freedom (n-2)	Confidence level	
	95% ( $\alpha = 0.05$ )	99% ( $\alpha = 0.01$ )
2	0.950	0.990
3	0.878	0.959
4	0.811	0.917
5	0.754	0.875
6	0.707	0.834
7	0.666	0.798
8	0.632	0.765
9	0.602	0.735
10	0.576	0.708
11	0.553	0.684
12	0.532	0.661
13	0.514	0.641
14	0.497	0.623
15	0.482	0.606
20	0.423	0.537
30	0.349	0.449
40	0.304	0.393
60	0.250	0.325

Significant correlation when  $|r| \geq$  table value



.8

Pearson's correlation coefficient

### ค.8 ตัวอย่างการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ในกรณีเทียบกับฟังก์ชันเชิงเส้น ดังนั้นสมการถดถอยตัวอย่างจึงได้เป็น  $\bar{Y}_x = a + bX$

วนหา ค่า  $a$   $b$  .1

.3 การคำนวณค่าตัวอย่างสุ่

X	Y	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
48.56	30.6	1,485.94	2,358.07	936.36
50.78	32.5	1,650.35	2,578.61	1,056.25
59.32	35.3	2,094.00	3,518.86	1,246.09
43.06	26.2	1,128.17	1,854.16	686.44
44.81	27.3	1,223.31	2,007.94	745.29
69.71	38.8	2,704.75	4,859.48	1,505.44
49.2	32.8	1,613.76	2,420.64	1,075.84
51	35	1,785.00	2,601.00	1,225.00
59.95	36.1	2,164.20	3,594.00	1,303.21
43.95	25	1,098.75	1,931.60	625.00
44.2	25.5	1,127.10	1,953.64	650.25
45	26.5	1,192.50	2,025.00	702.25
44.27	27.5	1,217.43	1,959.83	756.25
45.27	28.9	1,308.30	2,049.37	835.21
46.28	31.5	1,457.82	2,141.84	992.25

3 การคำนวณค่าตัวอย่างคู่ของการคูณซ้ำน้ำแ (ต่อ)

X	Y	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
49.88	33.5	1,670.98	2,488.01	1,122.25
53.04	36.5	1,935.96	2,813.24	1,332.25
60.9	38.25	2,329.43	3,708.81	1,463.06
44.46	27	1,200.42	1,976.69	729.00
45.75	27.9	1,276.43	2,093.06	778.41
46.65	29.2	1,362.18	2,176.22	852.64
46.42	29.7	1,378.67	2,154.82	882.09
47.86	30.1	1,440.59	2,290.58	906.01
48.97	30.8	1,508.28	2,398.06	948.64
52.27	30	1,568.10	2,732.15	900.00
$\sum_{i=1}^{25} X_i = 1,241.56$	$\sum_{i=1}^{25} Y_i = 772.45$	$\sum_{i=1}^{25} X_i Y_i = 38,922.39$	$\sum_{i=1}^{25} X_i^2 = 62,685.71$	$\sum_{i=1}^{25} Y_i^2 = 24,255.48$

โดยกำหนดให้ X , Y CLC, และจำนวนข้อมูลสถิติ

n = 25 แทนค่าลงในสมการที่ ค.25 จะได้

$$r = \frac{(25)(38,922.39) - (1,241.56)(772.45)}{\sqrt{[25(62,685.71) - (1,241.56)^2][25(24,255.48) - (772.45)^2]}}$$

$$= \frac{14,016.73}{\sqrt{25,671.52 \times 9,707.997}} = 0.889$$

จากผลการคำนวณตัวอย่างพบว่าค่า  $r = 0.889$  นั้น แสดงให้เห็นว่า ความพรุนและคอนกรีตมีความแข็งแกร่งของความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับมาก ถ้าความพรุนเพิ่มขึ้นควรมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตาม

อย่างไรก็ดี สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่คำนวณได้ ก็คือเกณฑ์การตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เกณฑ์นี้ไม่สามารถจะระบุชี้ชัดลงไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสำคัญของหรือตัวแปรที่ศึกษาด้วย สหสัมพันธ์ที่พบระหว่างตัวแปรมีค่า 0.2 อาจจะไม่มีความสำคัญบางอย่าง แต่อาจมี อีกอย่าง

เกี่ยวกับทางการแพทย์ เช่น การศึกษาความสัมพันธ์ของยาชนิดใหม่กับความปลอดภัยในชีวิตมนุษย์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามได้มีเกณฑ์ ความหมายของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไว้ดังนี้

Cohen (1988) ได้แนะนำว่าสหสัมพันธ์ที่มีขนาดเล็ก หรือมีความสัมพันธ์กันน้อย ค่าสหสัมพันธ์จะอยู่ระหว่าง -0.29 -0.1 0.1 0.29 ส่วนสหสัมพันธ์ที่มีขนาดปานกลาง หรือ





Y โดยใช้เส้นกราฟถดถอยก็จะเกิดความคลาดเคลื่อนมาก แต่ถ้าค่าที่รวบรวมมาแต่ละค่าอยู่บนเส้นกราฟถดถอยหรืออยู่ใกล้ ๆ เส้นกราฟถดถอยมากเท่าใด การพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม Y โดยใช้เส้นกราฟถดถอยก็จะถูกต้องมากขึ้น เท่านั้น

(Error residual) ความแตกต่างระหว่างค่าของตัวแปรตาม Y เกิดจากการพยากรณ์ (predicted ) กับค่า ได้ (tested observed)

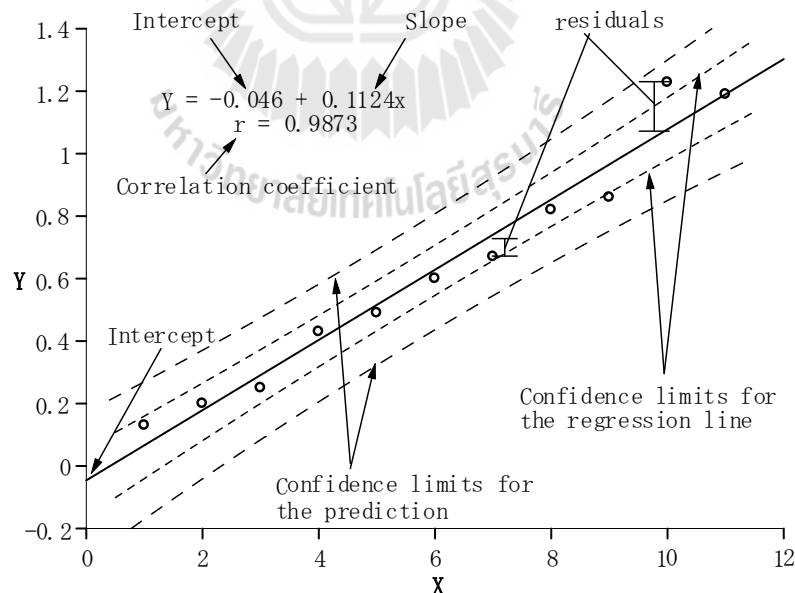
.9 Residual ระหว่างค่าที่ทำนายและค่าจริง จะเห็นลักษณะและความโค้งเบนของข้อมูล .10 และยังใช้หาข้อมูลที่มีผลต่อความโค้งได้ ค่า Error ใช้ตัวย่อว่า  $e$

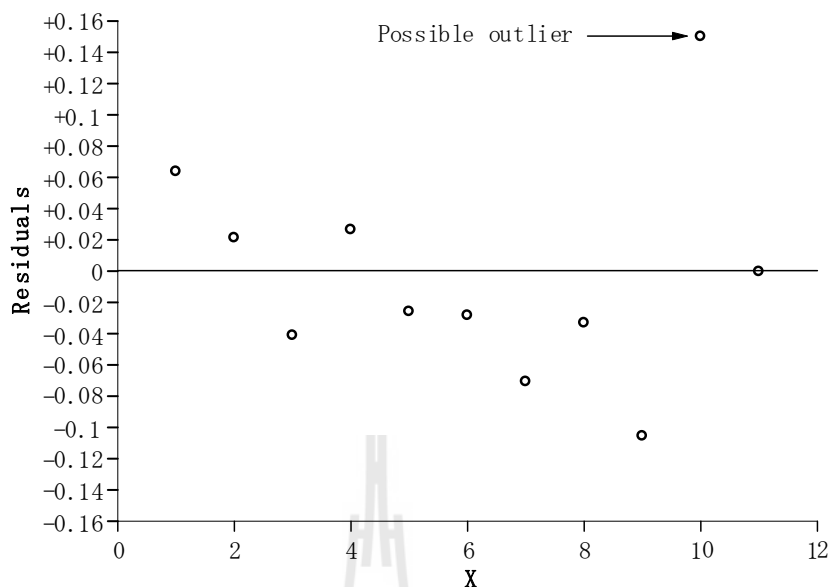
$e = Y - Y'$  ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะใช้เป็นตัวพยากรณ์ค่าการกระจายของข้อมูลรอบ ๆ เส้นกราฟถดถอย สำหรับสถิติ ที่ใช้วัดการกระจายของข้อมูลรอบ ๆ เส้นกราฟถดถอย เรียกว่า ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (standard error of estimate) ใช้ตัวย่อว่า SEE

Residual standard error (RSE) Residual standard deviation (RSD) ซึ่งเป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานชนิดหนึ่งที่ใช้เปรียบเทียบของคะแนนพยากรณ์จากคะแนนที่ ได้

ว่า เป็นการวัดทางสถิติของค่า Residual เป็น

(deviation) ของเส้นถดถอย (regression line) นอกจากนี้ค่า RSE ยังใช้คำนวณค่า Regression รวมถึงระยะห่างที่เชื่อมั่น ค่า Outlier test อีกด้วย





### .10 การพล็อตค่า Residual

ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$RSE = \pm \sqrt{\frac{\sum (Y - Y')^2}{n - k - 1}} \quad (.26)$$

$RSE$  = ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์

$Y'$  = คะแนนพยากรณ์ของตัวแปรต

$n$  = ตัวอย่าง

$k$  = จำนวนตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นในสมการถดถอย

$\sum (Y - Y')^2$  = ผลรวมกำลังสองของส่วนที่เหลือ (sum squares of residual) ซึ่งใช้ตัวย่อว่า SSR

ในกรณีของสมการถดถอยเชิงเส้น      ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นเพียงตัวเดียว ( $k = 1$ )

$$RSE = \pm \sqrt{\frac{\sum (Y - Y')^2}{n - 2}} \quad (.27)$$

ถ้าแทนค่าผลรวมกำลังสองของส่วนที่ (SSR) ผ่านมา จะได้ว่า  
 มาตรฐานในการพยากรณ์ได้ว่า

$$RSE = \pm \sqrt{\frac{\sum SSR}{n-2}} \quad (.28)$$

ในทางปฏิบัติข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อแทนค่า ในสูตรจะมีเป็นจำนวนมาก สูตรดังกล่าวข้างต้นจึงไม่เหมาะกับการคำนวณ จึงได้มีการเปลี่ยนแปลงสูตรสำหรับหาค่ามาตรฐานในการพยากรณ์ให้ง่ายขึ้น ดังนี้

$$RSE = \pm \sqrt{\frac{\sum Y^2 - a \sum Y - b \sum XY}{n-2}} \quad (.29)$$

นอกจากนี้ ถ้าทราบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น X  
Y  
ก็โอนมาตรฐานในการพยากรณ์ได้

$$RSE = \pm S_{(y)} \left( \frac{(n-1)}{(n-2)} (1-r^2) \right)^{1/2} \quad (.30)$$

$S_{(y)}$  = ค่า

$r$  = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$n$  = ตัวอย่าง

ค่า

$S_{(y)}$  จำนวนได้จากสมการ

$$S_{(y)} = +\sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (.31)$$

$S^2$  = ค่าความแปรปรวนของตัวอย่าง

$\bar{Y}$  = ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของตัวอย่าง

$y_i$  = ค่าสังเกตที่  $i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$

$n$  = ตัวอย่าง

#### ค.10 ช่วงของความเชื่อมั่น

ในกรณีเส้นถดถอยเป็นสมการเชิงเส้นตรง ความชันของเส้นตรง ( $b$ ) เส้นตัด  
( $a$ ) เป็นการประมาณจากตัวอย่างที่แน่นอน ดังนั้นยังมีความไม่แน่นอน (uncertainty) ในค่า  
เหล่านี้ ค่าความไม่แน่นอนนี้ถูก อยู่เสมอในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยอาจแสดงในรูป  
(confidence limit) Standard error ซึ่งมีขอบเขตระหว่างฝั่งบวก

ขอบเขตฝั่งลบที่เรียกว่า ช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval) ค่า  $p$  โดยตัวอย่างเหล่านี้มีอยู่ใน .4

ค่า  $p$  ความเป็นไปได้ที่จะเกิดค่า  $a$  เมื่อค่าจริงเป็นศูนย์ โดยปกติค่า  $p$  ที่น้อยกว่า 0.05 บ่งบอกถึงนัยสำคัญแบบไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นการพิจารณาผลของข้อมูล จึงไม่มีเหตุผลที่จะปฏิเสธสมมติฐานที่ว่าเส้นตัดแกน (intercept) เป็นศูนย์ ยกเว้นว่ามีนัยสำคัญเชิงบวก ค่า ช่วงความเชื่อมั่น สำหรับเส้นถดถอย สามารถพล็อตได้ทุกจุดตามแนวแกน  $X$  .9 ในทางปฏิบัติหมายความว่า จะเชื่อมั่นค่าที่อยู่ตรงกลางของเส้นมากกว่าค่าที่อยู่ไกลเส้น ผู้วิจัยใช้ Regression ในการสร้าง กราฟทดสอบเทียบก็เป็นตัวทำนายความไม่แน่นอน หรือค่าของ ช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval) โดยใช้สมการ

$$\text{ช่วงความเชื่อมั่น} = X_{\text{predicted}} \pm \frac{(t)(RSE)}{b} \left( \frac{1}{m} + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{Y} - \bar{y})^2}{b^2(n-1)S_x^2} \right)^{1/2} \quad (.32)$$

$$X_{\text{predicted}} = \frac{\bar{Y} - a}{b} \quad (.33)$$

$S_{(x)}$  = ค่า สำหรับข้อมูล  $X$   $n$

$RSE$  = Residual standard error

$n$  = ตัวอย่าง

$a$  =  $b$  = ที่ได้จากสมการถดถอย

$\bar{Y}$  = ค่าเฉลี่ยของการตอบสนอง (เช่น เครื่องมือที่ใช้อ่าน)  $m$

$\bar{y}$  = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล  $y$   $n$

$t$  = ค่าที่วิเคราะห์ได้จาก t-table ความอิสระเท่ากับ  $n-2$

$m$  = จำนวนทำซ้ำในการวิเคราะห์ (ควรอยู่ในช่วง 2-5)

เพื่อตรวจสอบว่า จุดหนึ่ง ๆ  $(x_i, y_i)$  ไม่เข้ากลุ่มหรือเป็น Outlier หรือไม่ สามารถใช้ Outlier test ได้

$$\text{Test value} = \frac{|\text{residual}_{\max}|}{RSE \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(Y_i - \bar{y})^2}{(n-1)S_y^2}}} \quad (.34)$$

$RSE$  = Residual Standard Error

$s_y$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $Y$

$Y_i$  = ค่า  $y$

$n$  = ตัวอย่าง

$\bar{y}$  = ค่าเฉลี่ยของค่า  $y$  ทั้งหมดในเส้นกราฟ และค่า  $residual_{max}$  ค่า residual

#### 4. วออย่างผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Excel 5.0 การใช้ข้อมูลเพื่อสอบเทียบกราฟ

.9

	Coefficients	Standard Error	t Stat	p value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-0.046000012	0.039648848	-1.160185324	0.279423552	-0.137430479	0.045430455
Slope	0.112363638	0.00638999	17.58432015	$1.11755 \times 10^{-7}$	0.097628284	0.127098992

#### ค.11 ตัวอย่างการคำนวณขอบเขตความคลาดเคลื่อนของ CLC

ยกตัวอย่างกรณีการคำนวณ

(boundary limit) ระหว่าง

ทดสอบและผลการทำนายของสมการใช้ทำนาย

CLC 28 ค่า

คาปิลลารีซึ่งเป็นตัวแปรอิสระ สำหรับส่วนผลมที่ใช้ FA แทนที่ซีเมนต์

Fit curve ได้

Model เส้นสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุดเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล คือ  $y = 11.083e^{-0.03x}$

$R^2 = 0.976$

1. สร้างแผน

(scatter)

ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบและผลการ

ที่ได้จากการแทนค่า

ความพรุนคาปิลลารีลงใน

( $y = 11.083e^{-0.03x}$ ) โดยให้แกน X เป็น

(tested)

Y เป็นผลการทำนาย

(predicted)

2. หาค่า

( $R^2$ )

ดังกล่าว โดยใช้สมการที่ ค.22 (ไม่ใช่ค่า  $R^2$  ที่ได้จากการ Model)

3. สร้างเส้นเสมอภาค (equality line) ซึ่งมีค่า

$R^2 = 1$

เปรียบเทียบกับค่า  $R^2$  ที่ได้จากการทดสอบและผลการทำนาย ถ้าค่า  $R^2$

ผลการทำนายเท่ากับ 1 แสดงว่า เส้นแนวโน้ม (trend line) ทับกับเส้นเสมอภาค

ามว่า

Model

สัมพันธ์กันมาก

เท่ากับ  $1 - 1 = 0\%$  แต่

ถ้า  $R^2$

เท่ากับ 0.8 แสดงว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ  $1 -$

$0.8 = \pm 0.2$

คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ  $0.2 \times 100 = \pm 20\%$

(boundary limit)

4. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบและผลการทำนายของกำลังรับแรงอัด

เส้นเสมอภาคพร้อมเส้นขอบเขต

.11

## .5 ตัวอย่าง

No.	Tested capillary porosity (%) ( $X_i$ )	Tested compressive strength (MPa)	Predicted compressive strength (MPa) ( $Y_i$ )	$(Y_i - \bar{Y})^2$	Error = Predicted - Tested $(\bar{Y}_i - \bar{Y})^2$
1	40.56	3.45	3.2825	0.214853792	0.028048466
2	43.44	3.1	3.0108	0.036794843	0.007953105
3	52.09	2.42	2.3227	0.246354947	0.00947538
4	41.09	3.2	3.2307	0.169533003	0.000945185
5	43.62	3.05	2.9946	0.03083719	0.003068583
6	52.65	2.35	2.2840	0.28626382	0.00436079
7	41.66	3.11	3.1760	0.127426015	0.004351751
8	45.37	2.9	2.8414	0.000503737	0.003428794
9	53.48	2.2	2.2278	0.349523087	0.000772574
			$\bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n}$ $= 2.8189$	$\sum_{i=1}^9 (Y_i - \bar{Y})^2$ $= 0.182761304$	$\sum_{i=1}^9 (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2$ $= 0.062404628$

$$n = 9$$

$$V_{(Y)} = \frac{0.182761304}{9-1} = 0.183 \quad (\text{MPa})^2$$

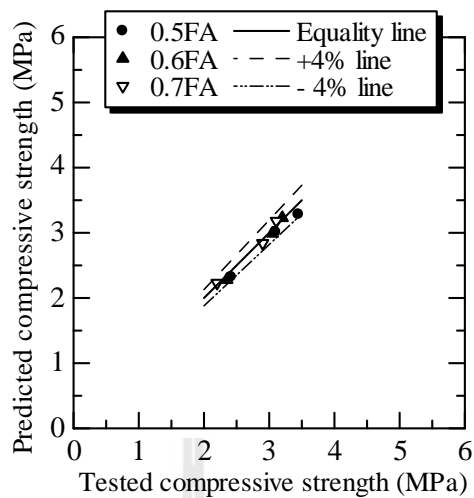
$$R^2 = 1 - \frac{0.062404628}{(9-1)(0.183)} = 0.96$$

$$= 1 - 0.04 = 0.04 \quad \pm 4\%$$

เส้นขอบเขต 4% ของเส้นเสมอภาค  $= \frac{(4)(45)}{100} = 1.8$  จะได้ขอบเขตบนและล่างดังนี้

Upper limit  $= 45 + 1.8 = 46.8$  X

Lower limit  $= 45 - 1.8 = 43.2$  X



.11 เปรียบเทียบค่าการทำนายและผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของ CLC

28





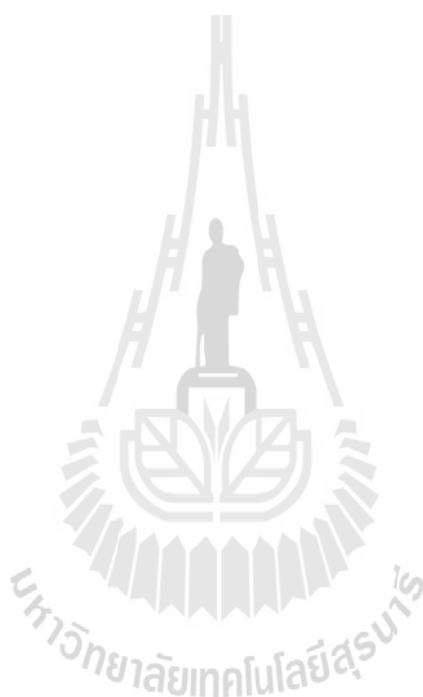
ภาคผนวก ง

ทรัพย์สินทางปัญญา



### ทรัพย์สินทางปัญญา

- ธีรวัฒน์ สี , , . (2553). เครื่องกำเนิดฟองชนิดถังอัด  
อากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาระบบเซลล์สุล่า.
- ธีรวัฒน์ สีนศิริ . (2554). สูตรสารเพิ่มฟองเพื่อการผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC สูตร 1.
- ธีรวัฒน์ สีนศิริ . (2554). กรรมวิธีการผลิตสารเพิ่มฟองเพื่อการผลิตคอนกรีตมวลเบา แบบ  
CLC สูตร 1.





ลํานา

เลขที่อนุสิทธิบัตร 7009 อสป/200 - ข

**อนุสิทธิบัตร**

อาศัยอำนาจตามความในพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522  
ซึ่งแก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542  
อธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญาออกอนุสิทธิบัตรฉบับนี้ให้แก่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สำหรับการประดิษฐ์ตามรายละเอียดการประดิษฐ์ ข้อถือสิทธิ และรูปเขียน (ถ้ามี)  
ปรากฏในอนุสิทธิบัตร

เลขที่คำขอ	1003001033
วันขอรับอนุสิทธิบัตร	23 กรกฎาคม 2553
ผู้ประดิษฐ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ ลินศิริ และคณะ
ข้อที่แสดงถึงการประดิษฐ์	เครื่องกำเนิดฟองชนิดกึ่งอัตโนมัติสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์สุ

ให้ผู้ทรงสิทธิหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยสิทธิบัตรทุกประการ

ออกให้	2	เดือน	มีนาคม	พ.ศ. 2555
หมดอายุ	22	เดือน	กรกฎาคม	พ.ศ. 2559

(ลงชื่อ) 

( นายสมศักดิ์ พนิชยกุล )  
รองอธิบดี ปฏิบัติราชการแทน  
อธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญา  
ผู้ออกสิทธิบัตร.

  
พนักงานเจ้าหน้าที่

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรต้องชำระค่าธรรมเนียมรายปีเริ่มแต่ปีที่ 5 ของอายุสิทธิบัตร มิฉะนั้น อนุสิทธิบัตรจะสิ้นอายุ
2. ผู้ทรงอนุสิทธิบัตรจะขอชำระค่าธรรมเนียมรายปีล่วงหน้าโดยชำระทั้งหมดในคราวเดียวกันได้
3. ภายใน 90 วันก่อนวันสิ้นอายุอนุสิทธิบัตร ผู้ทรงสิทธิบัตรมีสิทธิขอต่ออายุอนุสิทธิบัตรได้ 2 ครั้ง  
มีกำหนดคราวละ 2 ปี โดยยื่นคำขอต่ออายุ
4. การอนุญาตให้ใช้สิทธิตามอนุสิทธิบัตรและการโอนอนุสิทธิบัตรต้องทำเป็นหนังสือและจดทะเบียนต่อพนักงานเจ้าหน้าที่

012300

หน้า 1 ของจำนวน 4 หน้า

**รายละเอียดการประดิษฐ์**

**ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์**

เครื่องกำเนิดฟองชนิดตั้งอัดอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลส

**สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์**

- 5 วิศวกรรมศาสตร์ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดฟองชนิดตั้งอัดอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบา ระบบเซลลูโลส ที่มีขนาดเล็กกะทัดรัดสามารถพกพาสะดวก

**ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้อง**

- คอนกรีตคือวัสดุที่ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ หิน ทราย และน้ำ มีประโยชน์ใช้สำหรับปลูกสร้างอาคารต่าง ๆ เช่น อาคารพักอาศัย ถนน และสะพาน เป็นต้น โดยทั่วไปคอนกรีตธรรมดาจะมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 2400 กิโลกรัมต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร ขณะที่คอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 500 ถึง 1600 กิโลกรัมต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร ซึ่งถ้าหากใช้เป็นวัสดุก่อสร้างแทนคอนกรีตธรรมดาจะทำให้ตัวอาคารมีน้ำหนักเบา โครงสร้างอาคารมีขนาดเล็กลง คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาสามารถทำงานได้มากขึ้น ทำให้ประหยัดวัสดุและเวลาในการก่อสร้าง นอกจากนี้คอนกรีตมวลเบายังเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีกว่าอิฐมวลเบา จึงทำให้ลดปริมาณการใช้พลังงานจากการใช้เครื่องปรับอากาศได้

- 15 ปัจจุบันคอนกรีตมวลเบาแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ได้จากการผสมมวลรวมเบา ชนิดที่ไม่มีมวลรวมละเอียดผสม และชนิดผสมสารเพิ่มฟองที่เรียกว่าคอนกรีตมวลเบา ระบบเซลลูโลสหรือ โฟมคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตมวลเบา ระบบเซลลูโลสแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ทำจากสารลดแรงตึงผิวผสมกับน้ำปูนทราย และชนิดที่ทำจากผงภูมิเย็บผสมกับปูนขาว ทราย และปูนซีเมนต์

- ขั้นตอนการผสมคอนกรีตมวลเบา ระบบเซลลูโลสชนิดที่ใช้สารลดแรงตึงผิวนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องกำเนิดฟอง ซึ่งอาจใช้เครื่องกำเนิดฟองชนิดที่ใช้ปั๊มหายใจหรือชนิดที่ใช้ถังอัดอากาศ ปัจจุบันได้มีการประดิษฐ์เครื่องกำเนิดฟองรูปแบบต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบา ระบบเซลลูโลส ซึ่งมีทั้งชนิดที่ใช้ถังแรงดันหรือถังอัดอากาศและชนิดที่ใช้ปั๊มหายใจโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับ

หน้า 2 ของจำนวน 4 หน้า

สิ่งประดิษฐ์เครื่องกำเนิดฟองชนิดตั้งออคอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสนี้ ต่ำจากเครื่องกำเนิดฟองชนิดตั้งออคอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสโดยทั่วไป กล่าวคือมีขนาดเล็กสามารถเคลื่อนย้ายหรือพกพาสะดวก มีความประหยัดในการใช้ลมเพื่อออคอากาศ ซึ่งวาล์วเปิด-ปิดสามารถระบายอากาศออกด้านบนขณะเติมน้ำลดปัญหาการเกิดฟอง มีวาล์วเปิด-ปิดระบายน้ำทิ้งที่กั้นดังทำให้

5 สะดวกต่อการใช้งาน และวาล์วเปิด-ปิดในการปล่อยฟองมีเพียงตัวเดียว ทำให้ฟองที่ได้มีความสม่ำเสมอ อีกทั้งทำให้สะดวกในการควบคุม เครื่องกำเนิดฟองชนิดตั้งออคอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสโดยทั่วไปจะมีขนาดใหญ่ ใช้ลมเพื่อออคอากาศในปริมาณที่มากและใช้เวลานาน เมื่อเติมสารเพิ่มฟองมักจะเกิดฟองอากาศขึ้นออกมาที่จุดเติมน้ำ ทำให้ยากต่อการเติมสารเพิ่มฟอง เมื่อต้องการล้างทำความสะอาดภายในถังจะต้องล้างถังเพื่อระบายน้ำทิ้งออกที่จุดเติมน้ำ และจุดปล่อยฟองมีวาล์วเปิด-ปิด 2 ตัว คือ วาล์ว

10 อากาศและวาล์วของเหลว ขณะใช้งานทุกครั้งจะต้องมีการปรับวาล์วทั้ง 2 ตัว เพื่อควบคุมให้แรงดันของอากาศและของเหลวผสมกันจนได้ฟองที่เหมาะสมซึ่งทำให้ไม่สะดวกในการควบคุม แต่เครื่องกำเนิดฟองชนิดตั้งออคอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสตามการประดิษฐ์นี้ได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น โดยการแก้ไขปัญหาดังกล่าวและประหยัดพลังงานในการออคอากาศกว่าเครื่องกำเนิดฟองตามท้องตลาดทั่วไป

#### ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

15 สิ่งประดิษฐ์ เครื่องกำเนิดฟองชนิดตั้งออคอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสตามการประดิษฐ์นี้มีลักษณะเป็นถังทนแรงดันใช้สารเพิ่มฟองเป็นวัตถุดิบเพื่อกำเนิดฟองหรือ โฟมสำหรับใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส โดยใช้ลมออคอากาศเข้าไปภายในถังและมีท่อดูดของเหลวผสมกับอากาศและส่วนผสมที่ได้ภายในผ่านมาสู่วาล์วเปิด-ปิดจุดปล่อยฟองที่ปลายท่อภายนอกให้ฟองในปริมาณมาก

20 ความมุ่งหมายของการประดิษฐ์นี้ เพื่อให้สิ่งประดิษฐ์มีขนาดเล็กกะทัดรัดสามารถเคลื่อนย้ายสะดวก ใช้พลังงานและเวลาในการออคอากาศเข้าตัวถังน้อยเนื่องจากตัวถังมีขนาดเล็ก เหมาะสำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการหรือภาคสนาม มีวาล์วเปิด-ปิดสำหรับปล่อยฟองเพียงตัวเดียวซึ่งสะดวกในการควบคุม

หน้า 3 ของจำนวน 4 หน้า

คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

รูปที่ 1 แสดงรูปสามมิติของเครื่องกำเนิดฟองชนิดถังอัดอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาระบบ  
เซลล์ตามการประดิษฐ์นี้

รูปที่ 2 แสดงรูปด้านบนของเครื่องกำเนิดฟองชนิดถังอัดอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาระบบ  
5 เซลล์ตามการประดิษฐ์นี้

รูปที่ 3 แสดงรูปทอสุดของเหลวผสมกับอากาศของเครื่องกำเนิดฟองชนิดถังอัดอากาศสำหรับ  
คอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ตามการประดิษฐ์นี้

การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

เครื่องกำเนิดฟองชนิดถังอัดอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ตามการประดิษฐ์นี้  
10 ประกอบด้วย ส่วนตัวของถัง (1a) ส่วนด้านล่างของถัง (1b) และส่วนบนของถัง (1c) มีลักษณะเป็นท่อโลหะ  
แผ่นที่ขึ้นรูปให้มีรูปร่างคล้ายแคปซูลวางในแนวตั้ง โดยที่ส่วนด้านล่างของส่วนถัง (1b) มีแท่นรองเป็น  
ฐานรอง (2) มีลักษณะเป็นท่อโลหะทรงกระบอกแบนกลางคอดโค้งวงกลมคล้ายขนมโดนัทที่มีขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลางใหญ่กว่าส่วนของถัง (1a) และมีขารองรับสามจุดเชื่อมต่อระหว่าง ส่วนตัวของถัง (1a) กับ  
ฐานรอง (2) ซึ่งส่วนด้านล่างของส่วนถัง (1b) จะมีวาล์วเปิด-ปิดสำหรับใช้เป็นท่อระบายน้ำทิ้ง (3) เชื่อม  
15 ท่อสู่ผ่านเข้าภายในส่วนของถัง (1a) ส่วนด้านบนของถัง (1c) จะมีวาล์วเปิด-ปิดสำหรับใช้เป็นช่องเติมน้ำ  
(4) วาล์วเปิด-ปิดระบายอากาศออก (5) และวาล์วนิรภัยกันแรงดันเกิน (6) เชื่อมต่อท่อผ่านเข้าไปภายใน  
ส่วนด้านบนของถัง (1c) ที่ซึ่งด้านข้างส่วนบนของถัง (1c) จะเป็นช่องทางเข้าของอากาศ (7) จากเครื่องอัด  
อากาศที่มีวาล์วควบคุมเปิด-ปิดซึ่งยึดเข้ากับตัวปรับลดแรงดันอากาศ (8) เพื่อไม่ให้แรงดันอากาศเกินค่าที่ตั้ง  
ไว้คือ  $6 \text{ kg/cm}^2$  เชื่อมต่อท่อผ่านเข้าไปภายในส่วนด้านบนของถัง (1c) โดยที่ปลายสุดอีกด้านหนึ่งของ  
20 วาล์วควบคุมเปิด-ปิดจะมีข้อต่อแบบสวมสำหรับสวมยึดแน่นเข้ากับท่อลมที่ต่อมาจากเครื่องอัดอากาศ ด้าน  
บนสุดของส่วนด้านบนของถัง (1c) จะมีท่อสุดของเหลวอยู่ภายในถังประกอบด้วย ส่วนตัวท่อสุดของเหลว  
(9a) ส่วนล่างท่อสุดของเหลว (9b) และส่วนบนท่อสุดของเหลว (9c) ซึ่งอยู่ตรงกลางสอดท่อผ่านไว้ภายใน  
ถังเชื่อมลงมายังด้านล่างของส่วนถัง (1b) โดยที่ด้านบนของท่อสุดของเหลว (9c) จะมีเกลียวขันยึดแน่นกับ  
ส่วนด้านบนของถัง (1c) ซึ่งสามารถถอดเข้าออกได้ ส่วนด้านบนของท่อสุดของเหลว (9c) มีรูอากาศเข้า  
25 ขนาดเล็ก (10) ซึ่งส่วนบนของท่อสุดของเหลว (9c) จะมีเบ้ารับอากาศและของเหลวผสมกัน ที่มีเส้นผ่าน

หน้า 4 ของจำนวน 4 หน้า

ศูนย์กลางใหญ่กว่าตัวท่อคูดของเหลว (9a) โดยมีเกลียวตัวผู้ขันยึดแน่นกับข้อต่อตัวเมียและวาล์วควบคุม การเปิด-ปิดฟอง (11) มายังท่อปล่อยฟองสายอ่อน (12) เพื่อนำฟองอากาศไปใช้งาน

การบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดฟองชนิดตั้งอัดอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาระบบเซลดูต้า จะมีวาล์ว เปิด-ปิดสำหรับใช้เป็นท่อระบายน้ำทิ้ง (3) ใช้ในกรณีที่ต้องการทำความสะอาดถัง ซึ่งสามารถเห็นผ่านช่อง 5 เดิมน้ำ (4) เข้าไปในส่วนตัวของถัง (1a) แล้วปล่อยน้ำทิ้งออกที่ระบายน้ำทิ้ง (3) เพื่อเป็นการทำความสะอาด ถังอัดอากาศให้พร้อมใช้งานในเวลาถัดไป และไม่ทำให้เกิดการเน่าเสียของสารที่ตกค้างในส่วนตัว ของถัง (1a)

กระบวนการทำงาน อากาศจะถูกปล่อยออกจากเครื่องอัดอากาศผ่านวาล์วควบคุมเปิด-ปิดซึ่งยอมเข้า กับตัวปรับลดแรงดันอากาศ (8) ผ่านวาล์วปรับแรงดันอากาศเปิด-ปิดช่องทางเข้าของอากาศ (7) ให้แรงดัน 10 อากาศตามที่กำหนดเข้าสู่ตัวถังที่เป็นรูปทรงแคปซูล แรงดันอากาศก็จะดันของเหลวที่อยู่ด้านล่างให้เคลื่อนที่ เข้าในท่อคูดของเหลว (9a) จากด้านล่างไปสู่ด้านบน ของเหลวก็จะผสมกับกับอากาศที่เข้ามาจากรูอากาศเข้า ขนาดเล็ก (10) จะเกิดฟองสารลดแรงตึงผิวกับของเหลวที่ผสมกัน เพื่อนำไปใช้งาน โดย ผ่านวาล์วควบคุม การเปิด-ปิดฟอง (11) ผ่านออกจากส่วนบนของถัง (1c) เพื่อนำฟองของสารลดแรงตึงผิวผสมกับของเหลว 15 ออกไปใช้งานตามท่อปล่อยฟองสายอ่อน (12) เป็นท่อที่เชื่อมโยงฟองของสารลดแรงตึงผิวผสมกับของเหลว ไปผสมกับคอนกรีตมวลเบา ซึ่งตั้งประคิษฐ์นี้ ออกแบบให้มีขนาดหน้าตัดที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดฟอง ละเอียดสม่ำเสมอ

**วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด**

เหมือนกับที่ได้อธิบายไว้ใน การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

หน้า 1 ของจำนวน 1 หน้า

**ข้ออธิธิ**

1. เครื่องกำเนิดฟองชนิดถังอัดอากาศสำหรับคอนกรีตมวลเบาระบบเซลล์ล่า ที่ประกอบด้วย

- ส่วนตัวของถัง (1a) ส่วนด้านล่างของถัง (1b) และส่วนบนของถัง (1c) มีลักษณะเป็นท่อโลหะแผ่นที่ขึ้นรูปให้มีรูปร่างคล้ายแคปซูลวางในแนวตั้ง มีแท่นเป็นฐานรอง (2) และกันถังมีท่อระบายน้ำทิ้ง (3) ส่วนบนของถัง (1c) มีจุดเติมน้ำ (4) หรือมวลตัวเปิด-ปิดระบายอากาศออก (5)

**โดยมีลักษณะเฉพาะคือ**

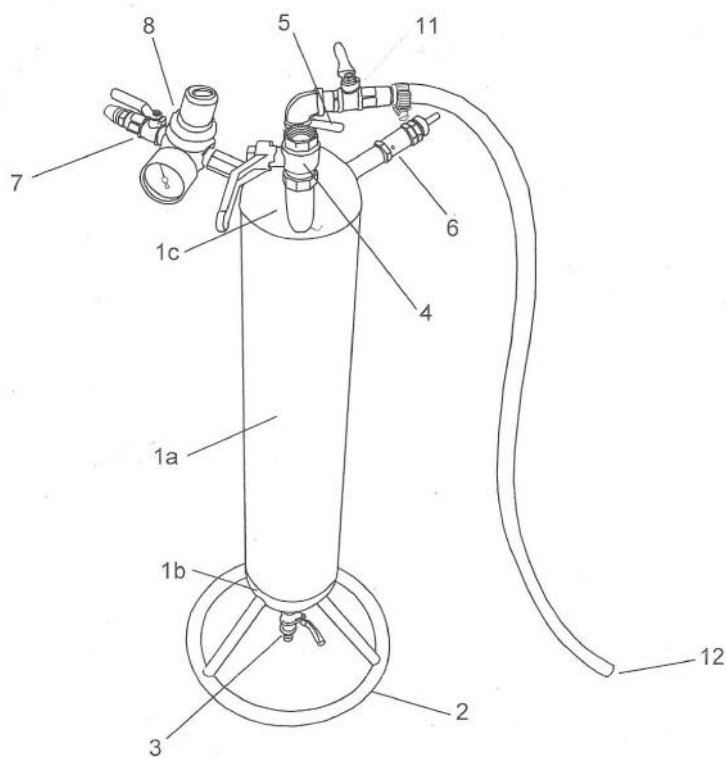
- จุดต่อเครื่องปั๊มลมเพื่ออัดอากาศเข้าในช่องทางเข้าของอากาศ (7) ที่มีวาล์วเปิด-ปิดซึ่งสามารถปรับลดแรงดันอากาศ (8) ภายในถังจะมีท่อดูดของเหลวที่ประกอบด้วย ส่วนตัวท่อดูดของเหลว (9a) ส่วนล่างท่อดูดของเหลว (9b) และส่วนบนท่อดูดของเหลว (9c) มีรูอากาศเข้าขนาดเล็ก (10) ซึ่งส่วนบนท่อดูดของเหลว (9c) จะเป็นบาริอากาสและของเหลวผสมกันและมีวาล์วควบคุมการเปิด-ปิดฟอง (11) มายังท่อปล่อยฟองสายอ่อน (12) เพื่อนำฟองอากาศไปใช้งาน

2. เครื่องกำเนิดฟองชนิดถังอัดอากาศตามข้ออธิธิ 1 ที่ซึ่งส่วนตัวของถัง (1a) ส่วนด้านล่างของถัง (1b) และส่วนบนของถัง (1c) มีลักษณะเป็นท่อโลหะแผ่นที่ขึ้นรูปให้มีรูปร่างคล้ายแคปซูลวางในแนวตั้ง ด้านล่างของถัง (1b) มีท่อระบายน้ำทิ้ง (3) เพื่อระบายน้ำเพื่อทำความสะอาดถัง เมื่อเติมน้ำที่จุดเติมน้ำ (4)

3. เครื่องกำเนิดฟองชนิดถังอัดอากาศตามข้ออธิธิ 1 ที่ซึ่งส่วนถังด้านบนของถัง (1c) เชื่อมจุดต่อเครื่องปั๊มลมเพื่ออัดอากาศเข้าในช่องทางเข้าของอากาศ (7) มีวาล์วเปิด-ปิดสามารถปรับแรงดันอากาศเข้าออกเพื่อผสมกับของเหลวที่จุดเติมน้ำ (4) ซึ่งของเหลวเป็นสารลดแรงดึงผิว เพื่อทำให้เกิดฟองที่มีความสม่ำเสมอ

4. เครื่องกำเนิดฟองชนิดถังอัดอากาศตามข้ออธิธิ 1 ที่ซึ่งภายในถังจะมีท่อดูดของเหลวที่ประกอบด้วย ส่วนตัวท่อดูดของเหลว (9a) ส่วนล่างท่อดูดของเหลว (9b) และส่วนบนท่อดูดของเหลว (9c) มีรูอากาศเข้าขนาดเล็ก (10)

หน้า 1 ของจำนวน 3 หน้า

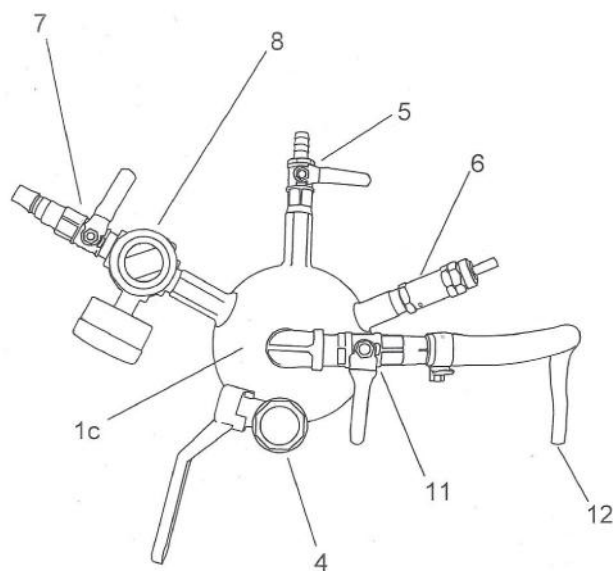


รูปที่ 1

รูปที่ 1



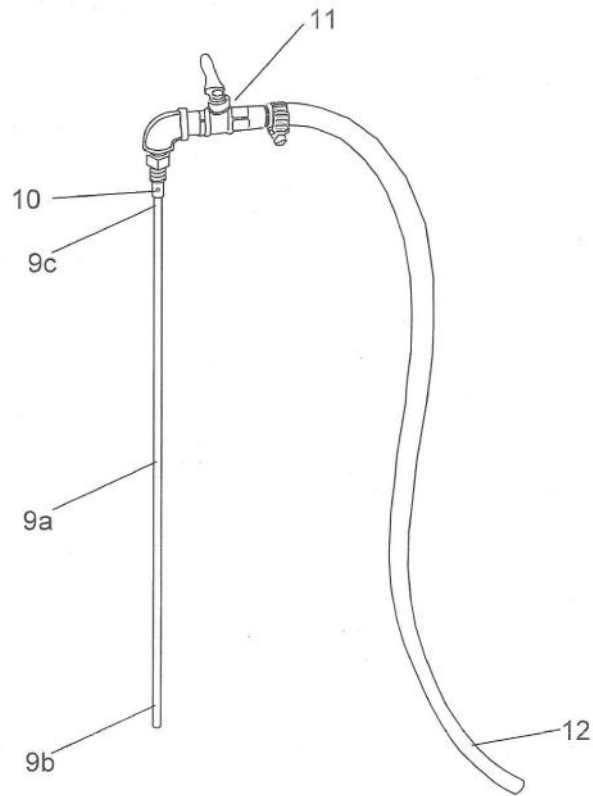
หน้า 2 ของจำนวน 3 หน้า



รูปที่ 2

รูปที่ 2

หน้า 3 ของจำนวน 3 หน้า



2009 2 2 89

รูปที่ 3



รลค. 01

ทะเบียนข้อมูลเลขที่ อค.5815

หนังสือรับรองการแจ้งข้อมูล  
ความลับทางการค้า  
ออกให้แก่  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เพื่อแสดงว่า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ได้แจ้งข้อมูลความลับทางการค้า ประเภท ข้อมูลการค้าด้านอุตสาหกรรม  
ชื่อเรื่อง สูตรสารเพิ่มฟองเพื่อการผลิตคอนกรีตมวลเบา แบบ CLC สูตร 1  
ไว้ต่อกรมทรัพย์สินทางปัญญา ตามคำขอแจ้งข้อมูลความลับทางการค้า  
เลขที่ รลค.6108 เมื่อวันที่ 24 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ.2554

ให้ไว้ ณ วันที่ 5 เดือน เมษายน พ.ศ.2554

ลงชื่อ

(นายวรวุฒิ โปษกานนท์)

ผู้อำนวยการสำนักกฎหมาย

หมายเหตุ

การเปลี่ยนแปลงรายการข้างต้น ให้ดูด้านหลัง



รลค. 01

ทะเบียนข้อมูลเลขที่ อก.5816

หนังสือรับรองการแจ้งข้อมูล  
ความลับทางการค้า  
ออกให้แก่  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เพื่อแสดงว่า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ได้แจ้งข้อมูลความลับทางการค้า ประเภท ข้อมูลการค้าด้านอุตสาหกรรม  
ชื่อเรื่อง กรรมวิธีการผลิตสารเพิ่มฟองเพื่อการผลิตคอนกรีตมวลเบา แบบ CLC  
สูตร 1  
ไว้ต่อกรมทรัพย์สินทางปัญญา ตามคำขอแจ้งข้อมูลความลับทางการค้า  
เลขที่ ลค.6109 เมื่อวันที่ 24 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ.2554  
ให้ไว้ ณ วันที่ 5 เดือน เมษายน พ.ศ.2554

ลงชื่อ

(นายวรวิทย์ โปษกานนท์)

ผู้อำนวยการสำนักกฎหมาย

หมายเหตุ

การเปลี่ยนแปลงรายการข้างต้น ให้ดูด้านหลัง

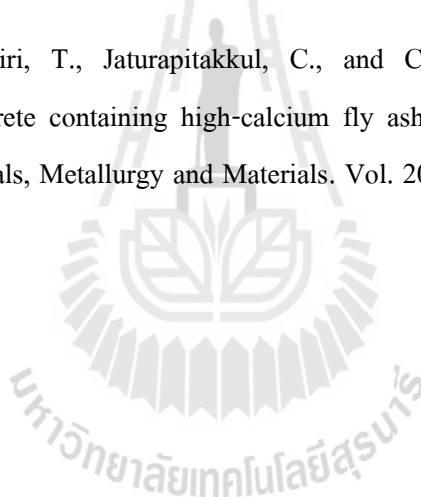
ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- คำภี จิตชัยภูมิ, ชีรวัดน์ สิ้นศิริ และปริญญา จินดาประเสริฐ (2552). **คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ**. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5 (Annual Concrete Conference 5)., หน้า MAT-129–135
- ปาริชาติ บุญเลิศ, พิมพิสา บุญสูงเพชร, คำภี จิตชัยภูมิ และชีรวัดน์ สิ้นศิริ (2553). **คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมวัสดุปอซโซลาน**. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6 (Annual Concrete Conference 6)., หน้า 225–232
- Jitchaiyaphum, K., Sinsiri, T., and Chindaprasirt, P. (2011). Cellular lightweight concrete containing pozzolan materials. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12). Procedia Engineering. Vol. 14, pp. 1157–1164.
- Jitchaiyaphum, K., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt, P. (2013). Cellular lightweight concrete containing high-calcium fly ash and natural zeolite. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. Vol. 20 No.5, pp. 462–471, (2012 Impact factor = 0.483)



**คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ**  
**CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING**  
**NATURAL POZZOLANIC MATERIALS**

คำถึ จิตชัยภูมิ (Khamphoo Jitchaiyaphum)<sup>1</sup>

ธีรวัฒน์ สินศิริ (Theerawat Sinsiri)<sup>2</sup>

ปริญญญา จินดาประเสริฐ (Prinya Chindaprasirt)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, khamphooj@yahoo.com

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, sinsiri@su.ac.th

<sup>3</sup>ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, prinya@kku.ac.th

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าล้รับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ก้จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ และสารเพิ่มฟอง โดยใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ ไดอะตอมไมท์และเพอร์ไลท์ ผ่านการเผาและร้่งผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 325 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประมาณ 0.5 หน่วยน้ำหนัก 700 ถึง 800 kg/m<sup>3</sup> เปรียบเทียบค่าล้รับแรงอัด ที่อายุ 3, 14 และ 28 วัน ทบว่าค่าล้รับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมเพอร์ไลท์แทนที่ซีเมนต์ให้ผลเป็นที่น่าพอใจกว่าการแทนที่ด้วยไไดอะตอมไมท์ และสารเพิ่มฟองที่ผลิตขึ้นเองให้ค่าล้รับแรงอัดใกล้เคียงกับสารเพิ่มฟองในท้องตลาด

**ABSTRACT :** This research was study of cellular lightweight concrete made from ordinary portland cement containing natural pozzolanic materials and foaming agent on compressive strength at age of 3, 14 and 28 days. Use of natural pozzolanic materials of diatomaceous earth from Lampang Province and perlite from Lopburi Province. The natural pozzolan was obtained by calcined and passing No. 325 ASTM sieve. Control of binder ratio for 0.5 and 700 to 800 kg/m<sup>3</sup> unit weight are investigated. According to the test results, compressive strength of cellular lightweight concrete containing perlite as replacement for cement which are satisfyingly more than diatomite and use of SUT foam as foaming agent are obtain strength nearby.

**KEYWORDS:** Cellular Lightweight Concrete, Natural Pozzolanic Materials, Compressive Strength, Unit Weight

### 1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส (cellular lightweight concrete) คือ คอนกรีตที่มีเซลล์อากาศขนาดเล็กที่ไม่ต่อยเนื่องกันแทรกอยู่ภายในไม่น้อยกว่า 50 % ของปริมาตร ซึ่งเซลล์เหล่านี้จะได้จากการผสมสารเพิ่มฟอง (foaming agent) ชนิดนี้หรือชนิดเป็นผงโลหะลงไปในคอนกรีต

เนื่องจากโครงสร้างภายในของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีลักษณะเป็นโพรงปิดอยู่จำนวนมากจึงทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นน้อย ค่าการซึมผ่านเสีียงต่ำ ค่าการนำความร้อนต่ำ ค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ถึงแม้ว่าโพรงนั้นจะมีขนาดใหญ่ก็ลาย คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสได้ถูกนำมาป้ระยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างกันอย่าง

แพร่หลายในปัจจุบัน เช่น ใช้เป็นวัสดุกันเสียง ฉนวนกันไฟ วัสดุเทพื้นหน้า แผ่นผนังอาคาร คอนกรีตบล็อก พื้นทางนี้หกักเขา และวัสดุถมที่ในงานธรณีวิทยา เป็นต้น [1]

วัสดุปอซโซลานก็เช่นกัน ปัจจุบันได้ใช้ร่วมกับขบภายในงานคอนกรีตโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิต ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น ตามมาตรฐาน ASTM วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีซิลิกาเพียงอย่างเดียวหรือมีทั้งซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนวัสดุปอซโซลานธรรมชาติก็คือ วัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ โดอะคอมไมท์ เพอร์ไลท์ ดินขาว และซีโอไลท์ โดยปกติแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่ถ้าขนาดเม็ดมีความละเอียดและความชื้นที่เพียงพอก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานเช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ต่อมารู้จักจะเข้าใจว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน [2]

แร่ดินเบาหรือโดอะคอมไมท์ (diatomite) เป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งเกิดจากการทับถมของสาหร่ายเซลล์เดียวเป็นเวลานานจนกลายเป็นหิน แร่ดินเบาในประเทศไทยมีมากที่จังหวัดลำปาง โดยมีปริมาณมากกว่า 100 ล้านตัน แร่ดินเบาที่มีคุณสมบัติเชิงโครงสร้างที่เบา หากนำมาบดให้ละเอียดจะคล้ายดินเหนียว หลักของแร่ดินเบาที่มีประจุลบตกค้างอยู่ในจำนวนมาก ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการแตกหักของขอบผลึกทำให้กลุ่มไฮดรอกซิลที่จับอยู่กับอลูมิเนียมหรือซิลิกอนแตกตัวออกมา ทำให้เกิดความไม่สมดุลทางประจุไฟฟ้าขึ้น ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของผลึกนี้จะสามารถดึงดูดประจุบวกไว้ในสัดส่วนที่เท่ากันกับประจุลบที่มีอยู่ในลักษณะหลวม ๆ ซึ่งสามารถถูกใส่แทนที่โดยประจุบวกชนิดอื่น ๆ ได้ การใส่ที่กันของประจุบวกที่ผิวดินเหนียวในลักษณะนี้อาจเรียกว่าการแลกเปลี่ยนประจุบวก [3,4]

เพอร์ไลท์ (perlite) คือวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของปอซโซลานธรรมชาติ อาจรวมถึงหินภูเขาไฟเนื้อแก้วทุกชนิดที่มีลักษณะเป็นสีเทาและมีความวาวแบบ

แก้ว จะขยายตัวเมื่อนำไปเผาในอุณหภูมิที่เหมาะสมในเวลาอันรวดเร็ว หินเพอร์ไลท์ดิบหากผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิสูงกว่า  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีน้ำหนักเบา ความพรุนสูง และมีลักษณะคล้ายหินฟูมิช ความหนาแน่นต่ำอยู่ระหว่าง 80 ถึง  $200\text{ kg/m}^3$  แหล่งกำเนิดหินเพอร์ไลท์ในประเทศไทยมีที่แรกพบที่เทือกเขาลำยาวชัย จังหวัดลพบุรี [5]

สารเพิ่มฟอง (foaming agent) คือสารที่ใช้เจือจางลงในน้ำให้ฟองในปริมาณมากโดยการผ่านเครื่องสร้างฟองก่อนที่จะฉีดผสมลงบนคอนกรีตสด อาจกล่าวได้ว่าสารเพิ่มฟองก็คือสารลดแรงตึงผิว (surface active agent) ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติในการลดแรงตึงผิวของน้ำลง ฟองเกิดจากการกระจายตัวของอากาศในน้ำและคงตัว (stable) อยู่ได้ด้วยโมเลกุลของมันเองซึ่งประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนหัวที่ชอบน้ำและส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำ สารลดแรงตึงผิวเมื่อละลายในน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนในการทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับอากาศ หรือน้ำกับของแข็ง เช่น ซีเมนต์ทราย เป็นต้น เมื่อมีอากาศมาผสมกับน้ำและทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย โมเลกุลส่วนหัวที่ชอบน้ำจะจับกับชั้นผิวของน้ำที่ห่อหุ้มอากาศ ส่วนหางก็จะหันมาด้านอากาศ ในลักษณะนี้จะทำให้เกิดฟองขึ้นมาในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ทั้งนี้ความคงตัวของฟองนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารเพิ่มฟอง ปริมาณฟองขึ้นอยู่กับอัตราการใช้ของสารที่ผสมและชนิดของสารเพิ่มฟองที่ใช้ [1]

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมสารเพิ่มฟองที่ผลิตขึ้นเองกับสารเพิ่มฟองที่มีในท้องตลาด โดยการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยโดอะคอมไมท์ และเพอร์ไลท์ ในอัตราส่วนน้ำหนักต่อวัสดุประสาน 0.5 ความหนาแน่น  $700\text{ kg/m}^3$



### 3. วิธีการศึกษา

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 2) ใช้ไคอะดอมไมท์จากแหล่งจังหวัดลำปาง ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง ขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 325
- 3) ใช้เทอร์ไรท์จากแหล่งจังหวัดลพบุรี ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง ขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 325
- 4) ใช้สารเพิ่มฟองที่ผลิตขึ้นเองและสารเพิ่มฟองที่มีในท้องตลาด

#### 3.2 การเตรียมวัสดุ

ปูนซีเมนต์ที่ 1 จะทำการแรงเพื่อคัดส่วนที่จับตัวเป็นก้อนออก ไคอะดอมไมท์และเทอร์ไรท์ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 ถึง 600 °C เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง บดละเอียดและแรงผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 325

#### 3.3 อัตราส่วนผสม

หล่อชิ้นตัวอย่างซีเมนต์พาสต์ควบคุมอัตราส่วนนี้คือปูนซีเมนต์ 0.50 และใช้เทอร์ไรท์และไคอะดอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใส่ฟองลงบนคอนกรีตสดในระหว่างขั้นตอนผสมเพื่อให้คอนกรีตมีความหนาแน่น 700 kg/m<sup>3</sup> ควบคุมอัตราส่วนนี้ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 หล่อชิ้นตัวอย่างทรงลูกบาศก์คืบมาตรฐาน ASTM C 109 ขนาด 50×50×50 mm ทำการบ่มโดยใช้แผ่นพลาสติกใสคลุมจนถึงอายุทดสอบ

#### 3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย

CLC หมายถึงคอนกรีตมวลเบาเซลล์สุ่ง

DM หมายถึงไคอะดอมไมท์

DM500 °C หมายถึงไคอะดอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C

PL600 °C หมายถึงเทอร์ไรท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C

PL หมายถึงเทอร์ไรท์

Gen หรือ General หมายถึงตามท้องตลาด

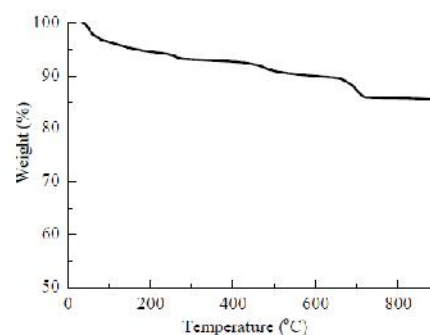
SUT หมายถึงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

TGA หมายถึงการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermo gravimetric Analysis)

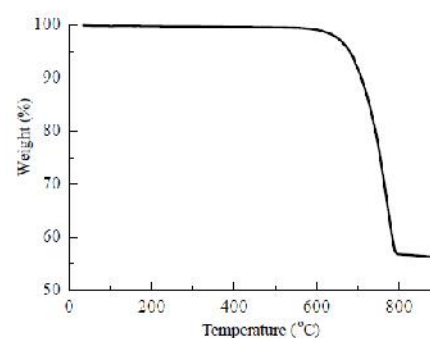
### 4. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

#### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ภาพที่ 1 (a) แสดงผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (TGA) ของไคอะดอมไมท์จะสังเกตเห็นว่าปฏิกิริยาดูดซับความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 470 °C คือการสูญเสียน้ำบนพื้นผิวอนุภาคของไคอะดอมไมท์และเกิดการสูญเสียน้ำของแร่ธาตุคินเนียวในไคอะดอมไมท์ ภาพที่ 1 (b) แสดงผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (TGA) ของเทอร์ไรท์จะสังเกตเห็นว่าปฏิกิริยาดูดซับความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 600 °C



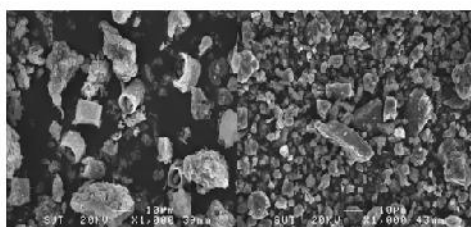
(a)



(b)

ภาพที่ 1 กราฟ TGA (a) ไคอะดอมไมท์ (b) เทอร์ไรท์

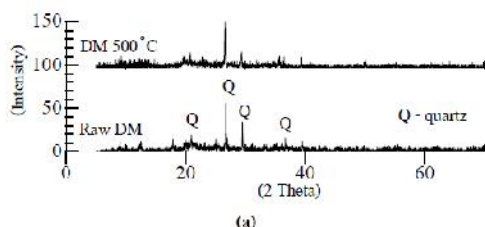
ลักษณะสีของไคอะตอมไมท์ เพลร์ไลท์ก่อนเผาและ  
 ภายหลังเผาพบว่าไคอะตอมไมท์กลายเป็นสีเหลืองเข้มซึ่ง  
 จากเดิมสีเหลืองอ่อน และเพลร์ไลท์ไม่เปลี่ยนสีซึ่งจากเดิมสี  
 ขาว ค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักของไคอะตอม  
 ไมท์ และเพลร์ไลท์ภายหลังเผามีค่าเท่ากับ 2.32 และ 2.54  
 ตามลำดับ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (median particle size :  $d_{50}$ )  
 ของไคอะตอมไมท์และเพลร์ไลท์ เท่ากับ 10.11 และ 10.02  
 $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ลักษณะอนุภาคก่อนเผาจากภาพถ่ายด้วย  
 กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning Electron  
 Microscope : SEM) แสดงไว้ในภาพที่ 2



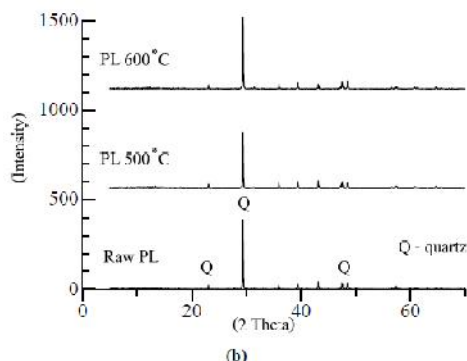
ภาพที่ 2 ภาพถ่าย SEM (a) ไคอะตอมไมท์ (b) เพลร์ไลท์

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เมื่อนำไคอะตอมไมท์ และเพลร์ไลท์ที่ผ่านการเผามา  
 วิเคราะห์ด้วยวิธีฟลูออเรสเซนซ์ของรังสีเอกซ์ (X-ray  
 fluorescence) พบว่ามีสารประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์  
 อยู่ในปริมาณที่สูง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 สำหรับผลการ  
 วิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray  
 diffraction) พบว่าไคอะตอมไมท์มีความเป็นผลึกลดลง ส่วน  
 เพลร์ไลท์มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มผลึกเล็กน้อย ซึ่ง  
 สังเกตได้จากกราฟในภาพที่ 3



(a)



(b)

ภาพที่ 3 ผลทดสอบ XRD (a) ไคอะตอมไมท์ (b) เพลร์ไลท์

ไคอะตอมไมท์และเพลร์ไลท์ มีปริมาณสารประกอบ  
 ออกไซด์ของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  
 รวมกันมากกว่า 70 % ค่า LOI ไม่มากกว่า 10 และค่า  $\text{SO}_3$   
 ไม่มากกว่า 4 % ซึ่งจัดเป็นวัสดุพอใช้หลายชั้น N ตาม  
 มาตรฐาน ASTM C618(2001)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท  
 ที่ 1 ไคอะตอมไมท์ และเพลร์ไลท์

Oxide	portland	diatomite	perlite
Compositions	cement type 1		
(%)			
$\text{SiO}_2$	20.8	60.09	69.35
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4.7	9.25	14.72
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.4	18.36	6.7
$\text{CaO}$	65.3	1.01	0.56
$\text{Na}_2\text{O}$	0.1	0.21	1.78
$\text{K}_2\text{O}$	0.4	2.07	6.18
$\text{SO}_3$	2.71	0.01	-
$\text{TiO}_2$	-	0.64	0.4
LOI	3.2	4.85	12.5

4.3 ลักษณะ โครงสร้างระดับจุลภาค

โครงสร้างระดับอนุภาคจากภาพถ่าย SEM ของไค  
 อะตอมไมท์มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกกลางกล้าย  
 ทรงตั้ง มีความหนาสูง ขนาดอนุภาคประมาณ 1 ถึง 21  
 ไมครอน ส่วนเพลร์ไลท์มีลักษณะเม็ดเป็นเหลี่ยมคมเนื้อ

แผ่น โปกสวางหรือพูน เนื่องจากไม่ได้อ่านกระบวนการเผาเพื่อให้เกิดการขยายตัว ขนาดอนุภาคประมาณ 0.5 ถึง 25 ไมครอน

#### 4.1 กำลังรับแรงอัด

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมวัสดุโปกโซลานธรรมชาติ โคละคอมไมท์ และเพอร์ไลท์ ในห้องปฏิบัติการพบว่าความยากง่ายในการผสม การเทและการตั้งผิวคอนกรีตมีความแตกต่างกัน โดยคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลท์สามารถทำงานได้ง่ายกว่า ส่วนผสมที่ใช้โคละคอมไมท์จะมีความต้องการน้ำสูง เนื่องจากโครงสร้างอนุภาคมีความพูน ส่วนผสมจะแห้งมากเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณ 30 % ส่งผลให้กำลังคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมโคละคอมไมท์และเพอร์ไลท์ที่อายุ 28 วัน

Mixture	Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )		
	General foaming agent	SUT foaming agent	
Control	34.06	28.55	
10%	29.84	24.95	
DM500°C	20%	22.35	17.11
	30%	10.5	9.21
10%	29.25	24.27	
	PL600°C	20%	26.15
30%		20.21	20

#### 4.4.1 การแทนที่ซีเมนต์ด้วยโคละคอมไมท์

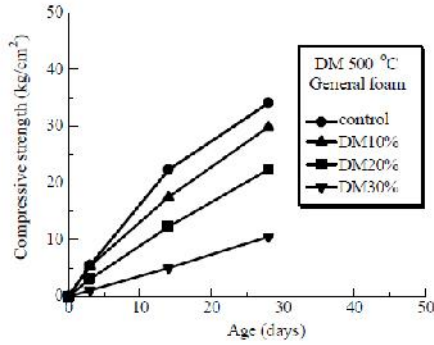
จากภาพที่ 4 พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมโคละคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C และสารเพิ่มฟองในท้องตลาด ในช่วงอายุไม่เกิน 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยโคละคอมไมท์ที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณการแทนที่ 10 %, 20% และ 30 % มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 29.84,

22.35 และ 10.5 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตมวลเบาที่ควบคุมเท่ากับ 34.06 kg/cm<sup>2</sup> จากภาพที่ 4 จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟของการแทนที่โคละคอมไมท์ 30 % มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ต่ำมากเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ควบคุม เนื่องจกปริมาณโคละคอมไมท์ที่มากเกินไปทำให้ประจุของโคละคอมไมท์กับประจุของสารเพิ่มฟองดึงดูดกันซึ่งสังเกตได้จกชั้นคอนกรีตผสมในท้องตลาด เป็นเหตุให้อนุภาคทั้งสองเกาะติดกันเป็นก้อนกลม กล่าวคือซีเมนต์กับโคละคอมไมท์มีการกระจายตัวต่ำกว่าปกติ ส่งผลให้การเชื่อมประสานของส่วนผสมและกำลังอัดลดลงในที่สุด

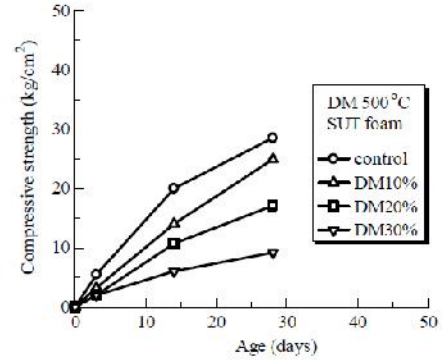
จากภาพที่ 5 พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมโคละคอมไมท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C และสารเพิ่มฟอง SUT ในช่วงอายุไม่เกิน 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยโคละคอมไมท์ที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับส่วนผสมที่ใช้สารเพิ่มฟองในท้องตลาด โดยปริมาณการแทนที่ 10 %, 20% และ 30 % มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 24.95, 17.11 และ 9.21 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตมวลเบาที่ควบคุมเท่ากับ 28.55 kg/cm<sup>2</sup> จากภาพที่ 5 จะสังเกตเห็นว่าเส้นกราฟของการแทนที่โคละคอมไมท์ 30 % มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ต่ำมากเช่นเดียวกับส่วนผสมที่ใช้สารเพิ่มฟองในท้องตลาด และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสควบคุมที่ใช้สารเพิ่มฟอง SUT ที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าที่ใช้สารเพิ่มฟองในท้องตลาด 19 %

#### 4.4.2 การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์

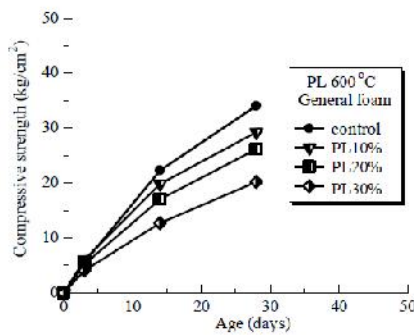
จากภาพที่ 6 พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเพอร์ไลท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C และสารเพิ่มฟองในท้องตลาด ในช่วงอายุไม่เกิน 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณการแทนที่ 10 %, 20% และ 30 % มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 29.25, 26.15 และ 20.21 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ



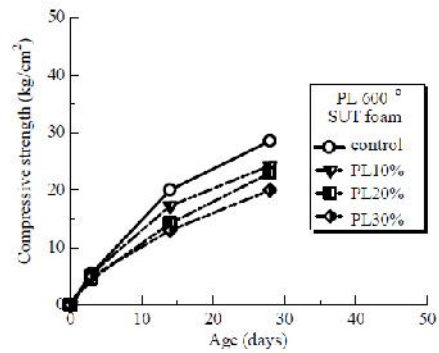
ภาพที่ 4 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับอายุของคอนกรีตมวลเบา เซลลูล่าผสม โดอะคอมไมท์และ ใช้สารเพิ่มฟองในท้องตลาด



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับอายุของคอนกรีตมวลเบา เซลลูล่าผสม โดอะคอมไมท์และ ใช้สารเพิ่มฟอง SUT



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับอายุของคอนกรีตมวลเบา เซลลูล่าผสมเพอร์ไลท์และ ใช้สารเพิ่มฟองในท้องตลาด



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับอายุของคอนกรีตมวลเบา เซลลูล่าผสมเพอร์ไลท์และ ใช้สารเพิ่มฟอง SUT

จากภาพที่ 7 พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา เซลลูล่าผสมเพอร์ไลท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C และ สารเพิ่มฟอง SUT ในช่วงอายุไม่เกิน 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเพอร์ไลท์ที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณการแทนที่ 10 %, 20% และ 30 % มีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 24, 27, 23 และ 20 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่ใช้สารเพิ่มฟองในท้องตลาด เท่ากับ 17 %, 12 % และ 1 % สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ 10 %, 20% และ 30 % ตามลำดับ

4.5 หน่วยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าที่ผสม โดอะคอมไมท์และเพอร์ไลท์ที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้โดอะคอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าหน่วยน้ำหนักที่แตกต่างกันมาก โดยเฉพาะการใช้โดอะคอมไมท์แทนที่ปูนซีเมนต์ 30 %

ตารางที่ 3 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมไคอะคอมไมท์และเพอร์ไลท์ที่อายุ 28 วัน

Mixture	Compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
Control & Gen	34.06	709
Control & SUT	28.55	704
DM500°C & Gen	10%	29.84
	20%	22.35
	30%	10.5
DM500°C & SUT	10%	24.95
	20%	17.11
	30%	9.21
PL600°C & Gen	10%	29.25
	20%	26.15
	30%	20.21
PL600°C & SUT	10%	24.27
	20%	23
	30%	20

Gen หมายถึง สารเพิ่มฟองในท้องตลาด

เนื่องจากผลของอุณหภูมิเกิดการแลกเปลี่ยนประจุซึ่งกันและกันทำให้การผสม การเท และการตั้งหน้าคอนกรีตสามารถทำได้ยาก ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร แต่สำหรับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมเพอร์ไลท์ที่มีค่าหน่วยน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากเพอร์ไลท์มีการกระจายตัวในชั้นคอนกรีตผสมที่ดีกว่าไคอะคอมไมท์ ซึ่งผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักได้ลดลงไว้ในตารางที่ 3

### 5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาเบื้องต้นของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมไคอะคอมไมท์และเพอร์ไลท์โดยใช้สารเพิ่มฟองที่ผลิตขึ้นเองและสารเพิ่มฟองที่มีในท้องตลาด เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมวัสดุปอซโซลานธรรมชาติจะให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสปกติ โดยการใช้เพอร์ไลท์แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าการใช้ไคอะคอมไมท์ และคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ใช้สารเพิ่ม

ฟองที่ผลิตขึ้นเองให้ค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับสารเพิ่มฟองในท้องตลาด

### 6. กิตติกรรมประกาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตามแผนยุทธศาสตร์

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Neopor System GMBH. Cellular Lightweight Concrete Product Information, <<http://www.neopor.com>>
- [2] ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2547. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.) : 346 หน้า
- [3] R.B. Owen, C. Utharoon, 1999. Diatomaceous sedimentation in the tertiary Lampang basin, northern Thailand. *J. Paleolimnol*, 22 : P 81-95.
- [4] K. Pimraksa and P. Chindaprasit, 2008. Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime and gypsum. *Ceramics International*, 35 : P 471-478.
- [5] S. Pantawee and T. Sinsiri, 2008. The Use of Natural Pozzolans in Lightweight Concrete. *The 3rd ACE International Conference ACE/VCA 2008*.

## คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมวัสดุปอซโซลาน

## CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING POZZOLANIC MATERIALS

ปารีชาติ บุญเลิศ (Parichat Boonlerd)<sup>1</sup>พิมพ์พิลา บุญสูงเพชร (Phimphisa Boonsungphee)<sup>1</sup>คำภีร์ จิตชัยภูมิ (Khamphree Jitchaiyaphum)<sup>1</sup>ธีรวัฒน์ อินศิริ (Theerawat Sinsiri)<sup>2</sup><sup>1</sup>นักศึกษารัฐบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, pm4806332@hotmail.com<sup>1</sup>นักศึกษารัฐบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, phim\_yip.sur@bmail.com<sup>1</sup>นักศึกษารัฐบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, khamphreej@yahoo.com<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, sinsiri@su.ac.th

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาความแตกต่างของกำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำ และความพรุนของคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสหรือ CLC ที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับสารที่มฟอง และวัสดุปอซโซลาน โดยใช้เถ้าลอยและซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 และหน่วยน้ำหนัก 800 กก/ม<sup>3</sup> เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3, 14, 28 และ 60 วัน ผลที่ได้จากการวิจัยนี้พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยทำให้คอนกรีต CLC มีกำลังรับแรงอัดสูงในช่วงอายุระยะสั้น ในทางตรงกันข้ามการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติทำให้คอนกรีต CLC มีกำลังรับแรงอัดในช่วงระยะปลาย และการดูดซึมน้ำน้อยกว่าคอนกรีต CLC ที่ผสมด้วยเถ้าลอยในทุกๆ ส่วนผสม

**ABSTRACT:** This research studies properties of compressive strength, water absorption and the porosity of cellular lightweight concrete or CLC type preformed foam which is made from portland cement blended with foaming agent and pozzolanic materials. Fly ash and natural zeolite were used to replace cement in the proportions 10, 20 and 30 percent by weight of cement. Constant water to binder ratio of 0.5 and unit weight of 800 kg/m<sup>3</sup> were controlled and the compressive strength at curing age of 3, 14, 28 and 60 days were investigated. The study showed that replacing cement with fly ash produced high strength at the early age. While the cement replacement by natural zeolite produced high strength at long term and low water absorption than CLC containing fly ash in all mixes.

**KEYWORDS:** Cellular lightweight concrete, Compressive strength, Pozzolanic, Foaming agent

## 1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส (CLC) หรือบางครั้งเรียกว่า โฟมคอนกรีต คือซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ต้าชนิดหนึ่งที่อยู่ภายในที่ประกอบด้วยฟองอากาศขนาดเล็กที่ไม่ต่อเนื่องกันแทรกอยู่ภายใน ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาที่มีความสามารถในการเทได้สูง [1] ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้เกิดจากการเติมสารเพิ่มฟองลงในเครื่องกำเนิดโฟมเพื่อทำให้เป็นฟองอากาศก่อนผสมลงในมอร์ต้าหรือซีเมนต์เพสต์โดยควบคุมปริมาณโฟมให้มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 500 ถึง 1600 กก/ม<sup>3</sup> คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้างต่าง ๆ อาทิเช่น ผนังกันไฟ คอนกรีตบล็อก เป็นต้น จนวนกันความร้อน เป็นต้น [2]

วัสดุโพซโซลานเป็นวัสดุที่นำมาใช้ในการก่อสร้างมาตั้งแต่สมัยโบราณกว่า 2000 ปีที่ผ่านมาและปัจจุบันก็ยังเป็นที่นิยมกันอยู่ในสมัยโบราณได้นำเอาวัสดุโพซโซลาน เช่น เถ้าจากภูเขาไฟมาผสมกับปูนขาวเพื่อผลิตเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (hydraulic cement) วัสดุโพซโซลานเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินาที่มีคุณสมบัติในการกักประจุประจุเล็กน้อยหรือไม่เลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น [3]

วัสดุจำพวกโพซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีมาจาก 2 แหล่งได้แก่ โพซโซลานจากธรรมชาติ (natural pozzolan) และโพซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต (artificial pozzolan) โพซโซลานที่มาจากธรรมชาติได้แก่ ไดอะตอมมาเซียสเอิร์ธ (diatomaceous earth) เถ้าภูเขาไฟเปลือกหอย หินภูเขาไฟ วัสดุเหล่านี้เมื่อนำไปใช้งานต้องนำไปผ่านขบวนการต่าง ๆ ก่อนจึงนำไปใช้งานได้ เช่น การเผา การบด และการทำให้แห้ง เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเอาโพซโซลานจากกระบวนการผลิตไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเจ็คน และสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำและช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟตและช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างด่างกับ ซิลิกา นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้ในการลดค่าใช้จ่ายในการ

ก่อสร้างอีกทางหนึ่งด้วย โพซโซลานที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ เถ้าลอยที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่ถูกกลั่นในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมของซิลิกาเป็นส่วนประกอบที่สำคัญประมาณ 66 – 68 % เถ้าลอยบางชนิดสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับปูนขาวและด่างเกิดเป็นสารประกอบที่มีแรงยึดประสาน แต่เถ้าลอยบางชนิดก็สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและแข็งตัวได้เช่นเดียวกับตาม ASTM C 618 ได้จำแนกโพซโซลาน ออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1) ชั้นคุณภาพ N เป็นโพซโซลานจากธรรมชาติหรือโพซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

2) ชั้นคุณภาพ F เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (anthracite) หรือบิทูมินัส (bituminous) เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้มีคุณสมบัติเป็นโพซโซลาน

3) ชั้นคุณภาพ C เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (lignite) หรือซับบิทูมินัส (subbituminous) เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้นอกจากมีคุณสมบัติเป็นโพซโซลานแล้วยังมีคุณสมบัติเหมือนกับปูนซีเมนต์อีกด้วยสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดแรงยึดประสานได้โดย เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้อาจมีปูนขาวในอยู่มากกว่าร้อยละ 10 เกณฑ์กำหนดองค์ประกอบทางเคมีของโพซโซลานทั้ง 3 ชั้นคุณภาพ เป็นไปตามตารางที่ 1 [3]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของโพซโซลาน

ปริมาณ (ร้อยละไม่เกิน)	class		
	N	F	C
(SiO <sub>2</sub> ) + (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	70.0	70.0	50.0
SO <sub>3</sub>	4.0	5.0	3.0
Moisture	3.0	3.0	3.0
LOI	6.0	6.0	6.0

ในเมืองไทยส่วนใหญ่แหล่งถ่านหินที่มีส่วนมากเป็นถ่านหินประเภทลิกไนต์ซึ่งมีอายุน้อยและคุณภาพต่ำ และเนื่องจากเถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิต จึงไม่มีการควบคุมคุณภาพเหมือนปูนซีเมนต์ คุณภาพ

ของเถ้าลอยจึงไม่มีความสม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับว่าเถ้าลอยชุดนั้นได้จากถ่านหินชุดที่มีคุณภาพดีหรือไม่ เมื่อนำเถ้าลอยมาใช้ในการผสมคอนกรีตจึงมีโอกาสเสี่ยง เนื่องจากคุณภาพของเถ้าลอยที่ไม่สม่ำเสมอค่อนข้างสูง จึงต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของเถ้าลอยก่อนที่จะนำมาใช้งานทุกครั้ง ซึ่งการตรวจสอบทำได้โดยการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM

ซีโอไลต์มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก zein แปลว่า to boil และ lithos แปลว่า stone รวมความหมายแล้วก็คือ boiling stone หรือ หินเดือด ซีโอไลต์คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม ( $\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{AlO}_2$ ) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) ซีโอไลต์มีคุณสมบัติคล้ายกับคาร์บอนคือ สามารถดูดซับไอออนบวกได้ด้วยขบวนการดูดซับ [4]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะนำเอาเถ้าลอย และซีโอไลต์ธรรมชาติมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต และปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสในด้านกำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำ และความพรุน ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมวัสดุไอโซโซลาน และเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิจัยด้านความทนทานของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมวัสดุโพซโซลาน

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำ และความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและซีโอไลต์ธรรมชาติ ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.5 ความหนาแน่น 800 กก/ม<sup>3</sup>

## 3. การเตรียมวัสดุและการทดลอง

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

- 2) ใช้สารเพิ่มฟองเจือจางกับน้ำในอัตราส่วน 1:40 โดยน้ำหนัก ผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องกำเนิดโฟม (foam generator) ซึ่งโฟมมีความหนาแน่นเท่ากับ 45 กก/ม<sup>3</sup> ก่อนนำไปผสมลงในมอร์ต้าสด ตามมาตรฐาน ASTM C796 [5]

- 3) ใช้เถ้าลอย (fly ash) จากแหล่งอำเภอมะเมาะ จังหวัดฉะเชิงเทรา

- 4) ใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ (natural zeolite)

### 3.2 อัตราส่วนผสม

หล่อก้อนตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ความหนาแน่นน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ใช้เถ้าลอยและซีโอไลต์ธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ใส่ฟองลงบนคอนกรีตสดในระหว่างขั้นตอนผสมเพื่อให้คอนกรีตมีความหนาแน่น 800 กก/ม<sup>3</sup> หล่อก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ตามมาตรฐาน ASTM ขนาด 100×100×100 มม. ทำการบ่มโดยใช้แผ่นพลาสติกคลุมไว้จนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 3, 14, 28 และ 60 วัน

### 3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย

CLC	หมายถึง คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส
OPC	หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
FA	หมายถึง เถ้าลอย
NZ	หมายถึง ซีโอไลต์ธรรมชาติ
SEM	หมายถึง การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope)

## 4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

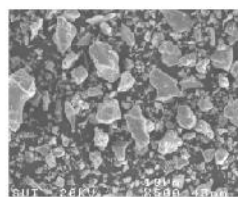
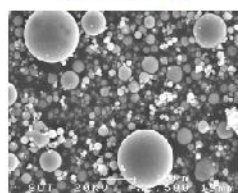
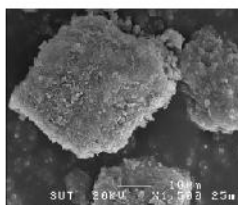
จากตารางที่ 2 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคเฉลี่ย (median particle size: d50) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะและขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์กับเถ้าลอยพบว่าเถ้าลอยมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ และขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์



ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุ

Sample	Specific gravity	Median particle size ( $\mu m$ )	Blaine fineness ( $cm^2/g$ )
OPC	3.15	14.75	3,600
FA	2.02	14.52	-
NZ	2.09	7.72	-

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์พบว่ามีส่วนประกอบออกไซด์ของซิลิกา ( $SiO_2$ ) อลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และ  $Fe_2O_3$  รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 ค่า LOI น้อยกว่า 10 และ  $SO_3$  น้อยกว่าร้อยละ 4 จึงจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชั้น N [3] ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และซีไอไฮดรธรรมชาติจากภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) แสดงไว้ในภาพที่ 1

a) OPC ( $\times 500$ )b) Fly ash ( $\times 1,500$ )c) Natural zeolite ( $\times 1,500$ )

ภาพที่ 1 ภาพถ่าย SEM แสดงขนาดอนุภาค

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

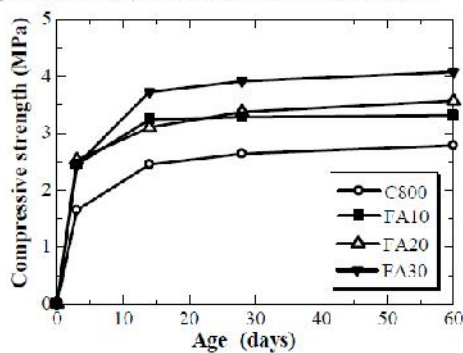
Chemical composition	OPC	FA	NZ
Silicon dioxide ( $SiO_2$ )	19.85	43.87	75.32
Aluminum oxide ( $Al_2O_3$ )	4.49	26.33	10.28
Iron oxide ( $Fe_2O_3$ )	3.56	10.81	2.66
Calcium oxide (CaO)	66.96	12.69	3.95
Magnesium oxide (MgO)	1.36	1.23	1.2
Sodium oxide ( $Na_2O$ )	-	-	0.89
Potassium oxide ( $K_2O$ )	0.34	1.10	4.29
Sulfur trioxide ( $SO_3$ )	2.46	2.74	-
Loss on ignition (LOI)	0.98	1.23	1.41
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	-	81.01	88.26

#### 4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

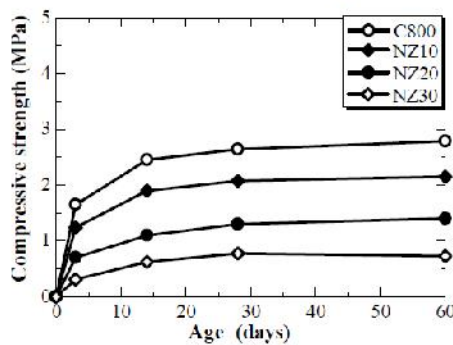
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลเบาเซลลูโลสผสมวัสดุปอซโซลานเถ้าลอยและซีไอไฮดรธรรมชาติได้แสดงไว้ในภาพที่ 2 พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์สูงมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต่ำกว่า [6] เมื่อพิจารณาพื้นผิวการแตกหักของชิ้นส่วนวัสดุจากภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดขยาย 100 เท่า ( $\times 100$ ) พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนน้อยมีการกระจายตัวของโพรงอากาศไม่สม่ำเสมอและไม่ต่อเนื่องกัน (Disconnected) โพรงอากาศมีรูปร่างค่อนข้างกลมและขนาดใกล้เคียงกัน ส่วนคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงโพรงอากาศส่วนใหญ่มีการเชื่อมต่อกัน (Connected) และมีรูปร่างผิดปกติเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปริมาณต่ำ แสดงว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยในปริมาณมากทำให้รูปแบบการจัดกลุ่มของโพรงอากาศผิดปกติและการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ

คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมซีไอไฮดรธรรมชาติมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาพื้นผิวการแตกหักของชิ้นส่วนวัสดุจากภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดขยาย 100 เท่า

( $\times 100$ ) พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมซีโอไลด์ธรรมชาติในปริมาณต่ำมีขนาดโพรงอากาศที่เล็กและการกระจายตัวของโพรงอากาศสม่ำเสมออย่างไม่ต่อเนื่องกัน (Disconnected) ส่วนคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมซีโอไลด์ธรรมชาติในปริมาณสูงโพรงอากาศส่วนใหญ่มีการเชื่อมต่อกัน (connected) และมีรูปร่างโศคผิดปกติ แสดงว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ผสมซีโอไลด์ธรรมชาติในปริมาณมากทำให้รูปแบบการจัดกลุ่มของโพรงอากาศผิดปกติด้วยเช่นกัน



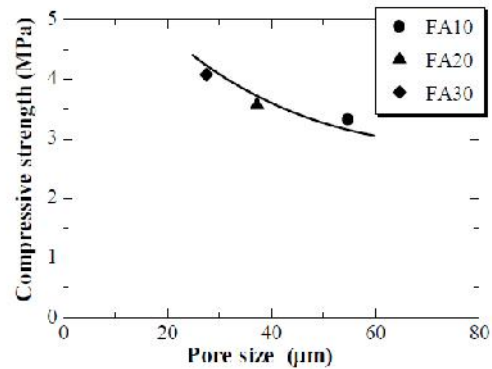
ภาพที่ 2 ก) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสม FA



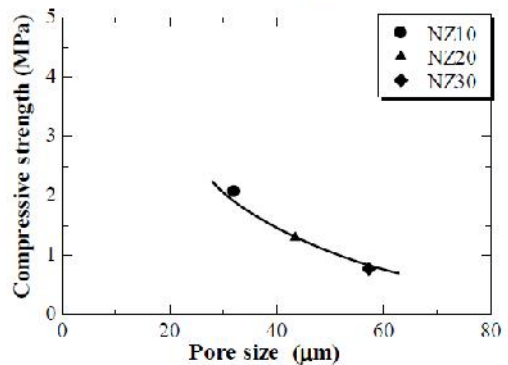
ภาพที่ 2 ข) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสม NZ  
ภาพที่ 3 ก) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสม  
เถ้าลอยและซีโอไลด์ธรรมชาติ

จากการศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโพรงอากาศและกำลังรับแรงอัดสำหรับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยแสดงในภาพที่ 3 (a) พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า และขนาดของโพรงอากาศในคอนกรีตจะมีขนาดเล็กกว่าผสมเถ้า

ลอยในปริมาณต่ำ แต่ในทางตรงกันข้ามการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีโอไลด์ธรรมชาติพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโพรงอากาศและกำลังรับแรงอัดสำหรับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมกับซีโอไลด์ธรรมชาติแสดงในภาพที่ 3 (b) คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมซีโอไลด์ธรรมชาติในปริมาณสูงมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่า และขนาดของโพรงอากาศในคอนกรีตจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าผสมเถ้าลอยในปริมาณต่ำ แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดจะสัมพันธ์กับขนาดของโพรง [7]



ภาพที่ 3 ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับขนาดโพรงของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอย



ภาพที่ 3 ข) คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสม NZ

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับขนาดโพรงของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยและซีโอไลด์ธรรมชาติ

4.3 ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำและความพรุน

ตารางที่ 4 แสดงผลกำลังรับแรงอัดและอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส พบว่าแตกต่างจาก

คอนกรีตทั่วไปคือ อัตราการดูดซึมน้ำและกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณของโพรงอากาศ โดยเมื่อคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง ปริมาณโพรงอากาศที่น้ำสามารถซึมผ่านได้มีมากเนื่องจากโพรงอากาศต่อเนื่องกัน ถึงแม้โพรงอากาศจะมีขนาดเล็กก็ตาม จึงทำให้อัตราการดูดซึมน้ำสูงขึ้นเร็วกว่าคอนกรีตมวลเบาชนิดคอนกรีต [8] ขณะที่คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมซีไอไลต์ธรรมชาติในปริมาณสูงโพรงอากาศมีขนาดโตต่อเนื่องกัน ปริมาณโพรงอากาศที่น้ำสามารถซึมผ่านได้มีมาก จึงทำให้อัตราการดูดซึมน้ำสูง

การดูดซึมน้ำและความพรุนที่อายุ 28 วันของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส แสดงในตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ตามลำดับ เห็นได้ว่าความสัมพันธ์โดยใช้เถ้าลอย ผสมกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 อัตราการดูดซึมน้ำสูง เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมกับเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ในขณะที่แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 มีความพรุนต่ำ

ความสัมพันธ์การใช้ซีไอไลต์ธรรมชาติโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 อัตราการดูดซึมน้ำสูง เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมกับซีไอไลต์ธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 สอดคล้องกับปริมาณความพรุนที่มีมาก ในขณะที่การแทนที่ซีไอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 10 มีความพรุนสูงใกล้เคียงกับการแทนที่ซีไอไลต์ธรรมชาติร้อยละ 30 แต่กลับมีอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามความแตกต่างเหล่านี้มีผลเพียงเล็กน้อยและสามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยและซีไอไลต์ธรรมชาติไม่มีผลต่อความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

#### 4.4 การกระจายขนาดโพรงอากาศและโครงสร้างจุลภาค

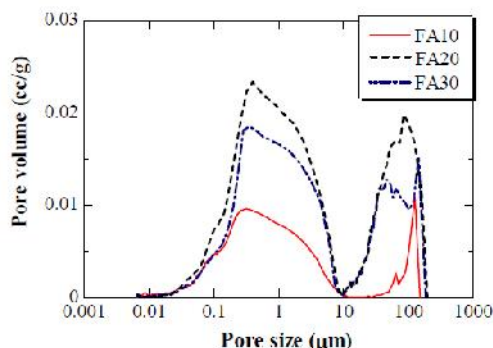
ปริมาณโพรงอากาศทั้งหมดและการกระจายขนาดโพรงอากาศโดยเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสแสดงในตารางที่ 5 ครอบคลุมถึงปริมาณโพรงอากาศรวมที่ 0.33 - 0.76 cc/g ความพรุนมีค่าประมาณร้อยละ 56 - 91 ของปริมาณโพรงอากาศทั้งหมด เป็นที่รู้จักกันว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ส่วนใหญ่สร้างโพรงอากาศขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน [9] อย่างไรก็ตามโพรงอากาศที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มี

ขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอน ในการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นโพรงอากาศมีขนาดเล็กกว่า 30 ไมครอน นั้นหมายความว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสกับพองอากาศส่วนใหญ่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่กว่า 30 ไมครอนจึงทำให้โครงสร้างโพรงอากาศเกิดและเชื่อมต่อกัน [11] ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากภาพถ่าย SEM

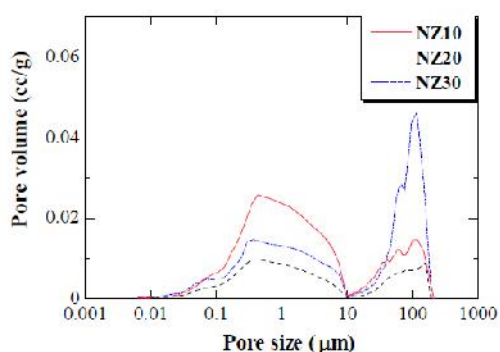
ภาพที่ 6 แสดงภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดของพื้นผิวคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุ 28 วัน ในภาพที่ 6 (a) แสดงโครงสร้างโพรงอากาศปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังสูง ( $\times 100$ ) ในภาพที่ 6 (b) และ (c) แสดงโครงสร้างโพรงอากาศของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ตามลำดับ โครงสร้างโพรงอากาศมีลักษณะเป็นแบบปิดทำให้คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสมีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำ ส่วนภาพที่ 6 (d) มีการเชื่อมต่อโพรงอากาศและโพรงอากาศมีขนาดเล็กคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสจึงมีอัตราการดูดซึมน้ำสูง

ตารางที่ 4 กำลังรับแรงอัดและอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผสมเถ้าลอยและซีไอไลต์ธรรมชาติ

Symbol	Content (% by weight)	Compressive strength (MPa)				Water absorption (% by weight)
		3 days	14 days	28 days	60 days	
C800	0	1.65	2.46	2.64	2.79	31
FA10	10	2.45	3.25	3.29	3.32	35
FA20	20	2.53	3.11	3.38	3.57	39
FA30	30	2.45	3.73	3.92	4.08	47
NZ10	10	1.24	1.90	2.07	2.15	26
NZ20	20	0.70	1.10	1.30	1.40	27
NZ30	30	0.31	0.62	0.78	0.73	34



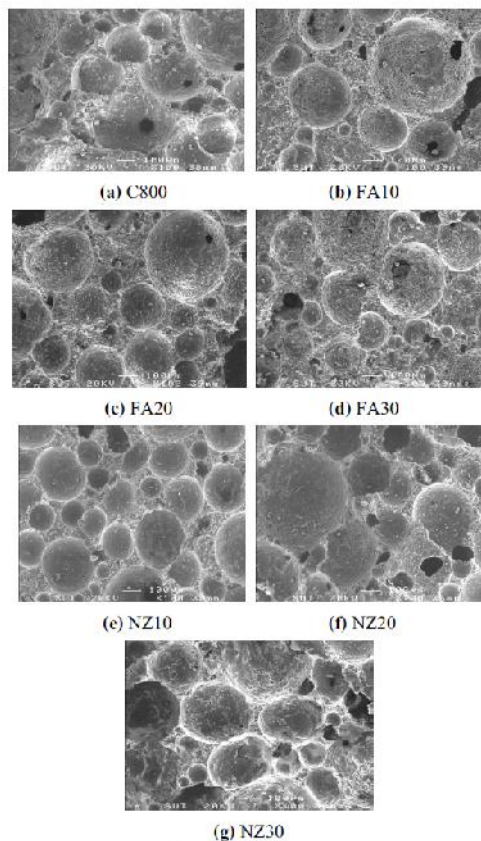
ภาพที่ 4 ผลกระทบของคอนกรีตมวลเบาเซลล์ผสมเถ้าลอย



ภาพที่ 5 ผลกระทบของคอนกรีตมวลเบาเซลล์ผสมซีไอไลต์ธรรมชาติ

ตารางที่ 5 ความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลล์ที่อายุ 28 วัน

Symbol	Content (% by weight)	Pore size (µm)	Total pore volume (cc/g)	Porosity (%)
FA10	10	54.78	0.3379	59.15
FA20	20	37.23	0.7651	90.03
FA30	30	27.53	0.3325	56.38
NZ10	10	32.06	0.7828	85.48
NZ20	20	43.48	0.3426	57.34
NZ30	30	57.22	0.7775	99.44



ภาพที่ 6 ภาพ SEM พื้นผิวการแตกของคอนกรีตมวลเบาเซลล์ผสมวัสดุฟลูออซโซลานที่อายุ 28 วัน ( $\times 100$ )

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตมวลเบาเซลล์ผสมเถ้าลอยมีกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำสูงขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น โพรงอากาศมีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้น ขณะที่ซีไอไลต์ธรรมชาติมีกำลังรับแรงอัดลดลงตามปริมาณซีไอไลต์ธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น โพรงอากาศมีขนาดและการดูดซึมน้ำสูงขึ้นตามปริมาณซีไอไลต์ธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น

การใช้เถ้าลอยและซีไอไลต์ธรรมชาติไม่มีผลต่อความพรุนของคอนกรีตมวลเบาเซลล์ และกำลังรับแรงอัดลดลงตามขนาดของโพรงที่ใหญ่ขึ้น

### 7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและวิจัย สำหรับนักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา

### 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Nambiar, E.K. Kunhanandan and Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No. 5, pp. 475-480.
- [2] Nambiar, E.K. Kunhanandan and Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 2, pp. 221-230.
- [3] ASTM. Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolana for use as a mineral admixture in portland cement concrete, ASTM C 618-89, Philadelphia, 1989
- [4] <http://www.oknation.net>
- [5] ASTM. Standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam, ASTM C 796-97, Philadelphia, 1997.
- [6] Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J. (2001). The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 1, pp. 105-112.
- [7] Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J. (2002). The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 233-239.
- [8] Narayanan, N. and Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, No. 5, pp. 321-329.
- [9] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 4, pp. 425-428.
- [10] Wang, Kuen-Sheng, Chiou, Ing-Jia, Chen, Ching-Ho and Wang, Davin (2005). Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 19, No. 8, pp. 627-633.
- [11] Galle, C. (2001). Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 1467-1477.
- [12] Konecny, L. and Naqvi, S.J. (1993). The effect of different drying techniques on the pore size distribution of blended cement mortars. *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No. 5, pp. 1223-1228.



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Procedia Engineering 14 (2011) 1157–1164

---

**Procedia  
Engineering**


---

[www.elsevier.com/locate/procedia](http://www.elsevier.com/locate/procedia)

The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction

## Cellular Lightweight Concrete Containing Pozzolan Materials

Khamphree Jitchaiyaphum<sup>a\*</sup>, Theerawat Sinsiri<sup>a†</sup>, Prinya Chindaprasirt<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand*

<sup>b</sup>*Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, Thailand*

---

### Abstract

This research studies various properties of compressive strength, water absorption, and the porosity of cellular lightweight concrete or CLC, which is pre-formed foam method made from portland cement blended with foaming agent and pozzolan materials. Uses of fly ash replace cement in the proportions 10, 20 and 30 percent by weight of binder. Constant water to binder ratio of 0.5 and unit weight of 800 kg/m<sup>3</sup> compared compressive strength at curing age 3, 14, 28 and 60 days. The study result that replacing cement with fly ash that is high strength on the early stage.

© 2011 Published by Elsevier Ltd.

*Keywords:* Cellular lightweight concrete, compressive strength, pozzolan material, foaming agent

---

### 1. INTRODUCTION

The cellular lightweight concrete (CLC) or sometimes might often call that foamed concrete is either a cement paste or mortar, classified as lightweight concrete, in which air voids are entrapped in mortar by suitable foaming agent. By proper control in dosage of foam content, a wide range of densities between 500 to 1600 kg/m<sup>3</sup>. A study on fineness of filler type on compressive strength of foamed concrete made with cement fly ash mix, suggesting that the inclusion of fly ash helps in achieving more uniform distribution of air voids than fine sand, is a journal paper, reference (Nambiar and Ramamurthy, 2006). The cellular lightweight concrete can be obtained for application to structural, partition, insulation wall

---

\* Presenter: Email: [khamphreej@yahoo.com](mailto:khamphreej@yahoo.com)

† Corresponding author: Email: [sinsiri@e.sut.ac.th](mailto:sinsiri@e.sut.ac.th)

and filling hole. Few studies report on the influence of pozzolan materials on the properties of cellular lightweight concrete. By using fly ash as filler (fine aggregate) instead of sand, the high volume utilization of fly ash becomes possible, thus providing a means of economic and safe disposal of this waste product. The pore system in based cement material is conventionally classified as gel pores, capillary pores, macro pores due to deliberately entrained air, and macro pore due to compaction has not enough. The gel pores not influence the strength of concrete through its porosity, although these pores are directly related to creep and shrinkage. Fly ash being finer, helps in uniform distribution of air voids by providing a well and uniform coating on each bubbles and preventing it from merging and overlapping, is a journal paper, reference (Nambiar and Ramamurthy, 2007). This paper discusses a systematic study on the influence of filler contents on the properties of cellular lightweight concrete made using pre-formed foam method.

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1. Parameters investigated and mix compositions

As the experimental program was aimed at studying the effect of the filler contents on the properties like density, flow behavior, water absorption and strength of cellular lightweight concrete, the following mixes were investigated by constant water to binder ratio of 0.5 by weight. The foam required for one density of cellular lightweight concrete of 800 kg/m<sup>3</sup> was arrived as per ASTM C 796-97. In the fly ash mixes 0%, 10%, 20% and 30% by weight of binder are instead with fly ash by use symbols of C800, FA10, FA20 and FA30, respectively.

### 2.2. Materials

The foaming agent used was hydrolyzed protein foam and manufactured in Thailand. The mixture has used ordinary portland cement (OPC) which its particle is shown in Fig. 1(a), no fine river sand added and class F fly ash conforming to ASTM C 618 were used. The properties of cement and fly ash used in this study are presented in Table 1 and the scanning electron microscope (SEM) image of a fly ash particle is shown in Fig. 1(b).

### 2.3. Details of study

Foamed concrete is produced under controlled conditions from cement, filler, water and a liquid chemical that is diluted with water and aerated to form the foaming agent. The foaming agent was diluted with water in ratio of 1 : 40 by weight, and then aerating to a density of 45 kg/m<sup>3</sup>. The specimens were removed from the mould after 24 hours then wrapped with plastic film until near the time tests. The compressive strength, dry density and water absorption were determined. Even for mixes with fly ash at the age 3, 14, 28, and 60 days for five samples. Strength test was conducted so that comparison with the fly ash contents mixes would be possible. Size 100×100×100 mm cubic specimens, as the recommendations in ASTM standards, cast for the study of each parameter were used for the compressive strength test.

### 2.4. Scanning electron microscope image

The microstructure of cellular lightweight concrete was investigated using SEM (JOEL JSM-6400). The sample were split middle portion hardened blended cement paste. Samples were submerged directly

into liquid nitrogen for 5 minutes then are evacuation under pressure of 0.5 N/m<sup>2</sup> at temperature of -40 °C for 2 days (Galle, 2001, Konecny and Naqvi, 1993).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Characteristic of OPC and fly ash

Physical properties of the materials are shown in Table 1. The specific gravity of fly ash is 3.15. The median particle size of fly ash (D50) is 14.52 μm, particle size has small sized and nearby cement particle. The chemical compositions of OPC and fly ash are given in Table 2. The main chemical composition of fly ash has total amount of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> more than 70 %.

Table 1: Physical properties of materials used

Sample	Specific gravity	Median particle size (μm)	Blaine fineness (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	3.15	14.75	3,600
Fly ash	2.02	14.52	-

Table 2: Chemical composition of materials used

Chemical composition (% by weight)	OPC	Fly ash
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	19.85	43.87
Aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.49	26.33
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.56	10.81
Calcium oxide (CaO)	66.96	12.69
Magnesium oxide (MgO)	1.36	1.23
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	-	-
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	0.34	1.10
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	2.46	2.74
Loss on ignition (LOI)	0.98	1.23
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	81.01



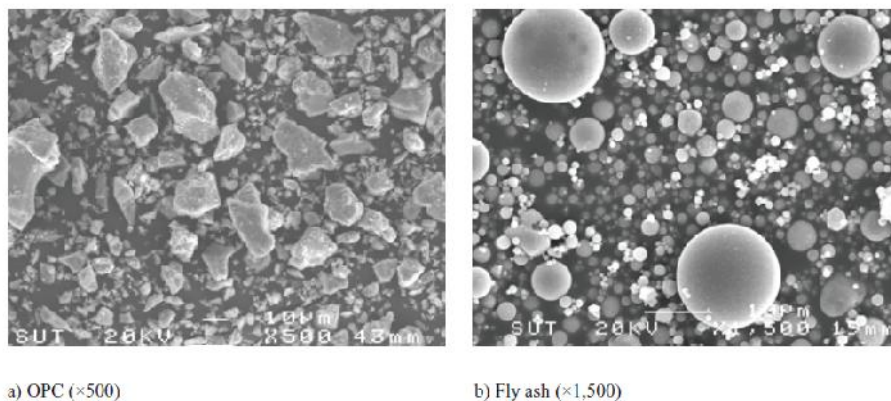
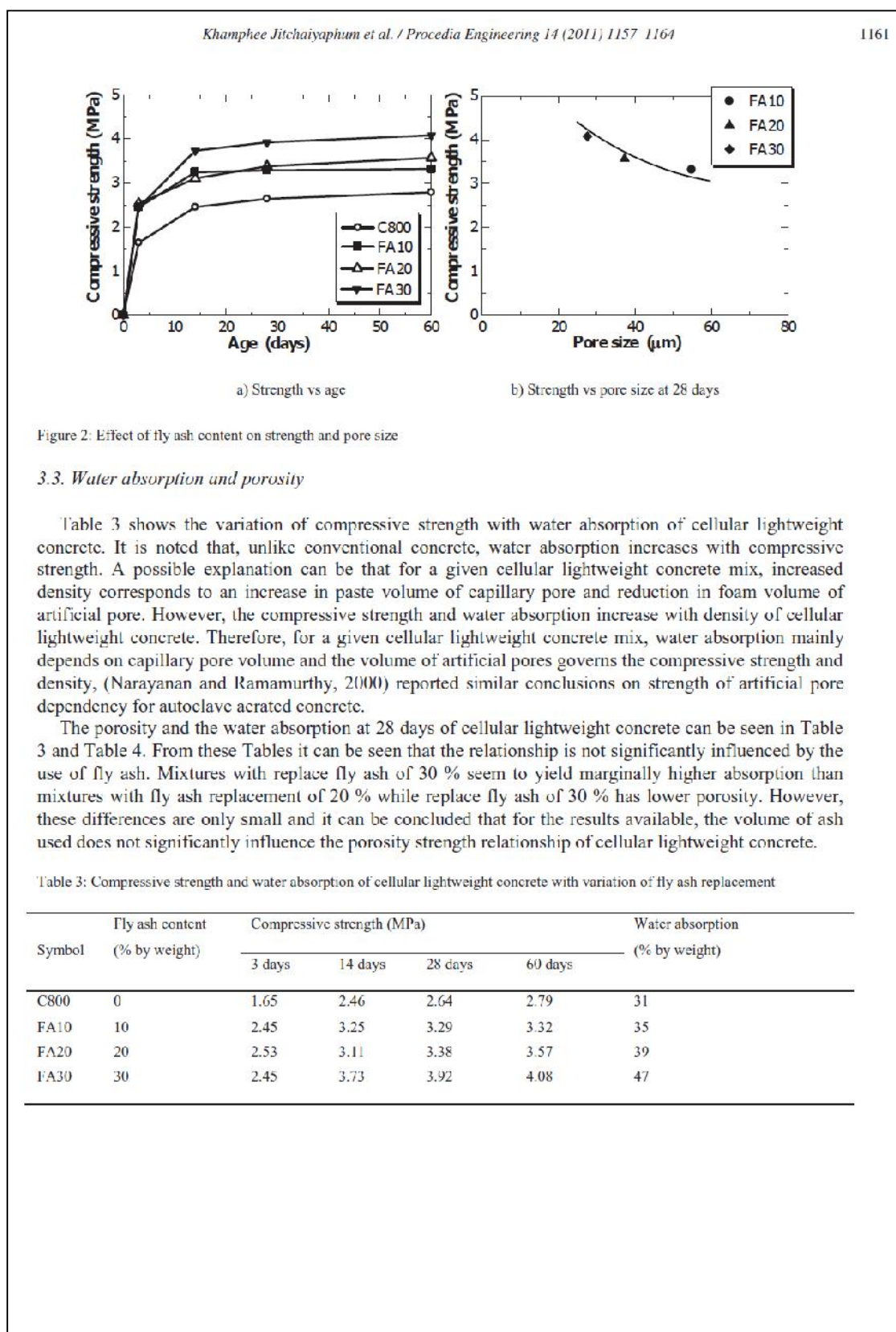


Figure 1: Scanning electron microscope images of particle

### 3.2. Compressive strength

The effect of fly ash contents on the compressive strength of cellular lightweight concrete is presented in Fig. 2(a). For a given density, the mix with high contents resulted in higher strength than the mix with low contents and the variation is higher at higher density. Similar results have been reported in literature as (Kearsley and Wainwright, 2001, Nambiar and Ramamurthy, 2006). Fracture surface of the specimens viewed through a scanning electronic microscope with magnification factor of 100 showed that there was a comparatively uniform distribution of pore in the case of cellular lightweight concrete with low contents, while the pores were connected mostly and irregular for mixes with high contents. This indicates that high contents causes clustering of bubbles to form irregular small pores and concrete is slump while it is setting. Thus it can be concluded that low contents results in uniform distribution of bubbles and hence results in lower strength than high contents at a given density, (Kearsley and Wainwright, 2002) reported similar observations on the effect of density on the strength of lightweight concrete.

In order to study the effect of replacement of cement with fly ash, the relationship between pore size and compressive strength for cellular lightweight concrete mixes with fly ash as filler is shown in Fig. 2(b). For a given density, an increase in fly ash content results in higher strength. Apart from pozzolanic activity of fly ash, the lower requirement of foam volume for a given density of foam concrete will also contribute to strength enhancement by reducing the pore volume and facilitating uniform distribution of pores. Reference (Chindapasirt et al., 2005, Nambiar and Ramamurthy, 2007) observed a similar enhancement in strength due to fly ash and this was attributed to the development of strong inter particle bond between the gel matrix and the fly ash particles.



### 3.4. Pore size distribution and microstructure

From the total pore volume and pore size distribution of cellular lightweight concrete shown in Table 4. It explained that total pore volume of 0.33 to 0.76 cc/g. The capillary pore ( $>0.01 \mu\text{m}$ ) took 56 to 91% of total pore volume. The pore size distribution in Fig. 3, it was known that hydration reactions of cement mainly generated pores smaller than  $0.1 \mu\text{m}$ . Similar results have been reported in reference as (Chindaprasirt et al., 2005). However, during foaming insert of air bubble foam, the pores generated were mostly larger than  $100 \mu\text{m}$ . In adding fly ash increased the volume of pores smaller than  $30 \mu\text{m}$ . This meant that cellular lightweight concrete with foaming agent mostly produced pores larger than  $30 \mu\text{m}$  and thus to result in a flowable structure due to its open and connected pores. Similar results have been reported in reference as (Wang et al., 2005). Thus it can be proved in SEM micrograph.

Table 4: Porous structure of cellular lightweight concrete at 28 days

Symbol	Fly ash content (% by weight)	Pore size ( $\mu\text{m}$ )	Total pore volume (cc/g)	Porosity (%)
FA10	10	54.78	0.3379	59.15
FA20	20	37.23	0.7651	90.03
FA30	30	27.53	0.3325	56.38

Fig. 4 shows the scanning electron microscope images of fractured surface of cellular lightweight concrete at 28 days. In Fig. 4(a) is shown the plain cement paste, all porous structure has smoothly surface seen under the higher power microscope ( $\times 100$ ). In Fig. 4(b),(c), there are close pores and it proved that cellular lightweight concrete had the characteristic of low water absorption under the higher power microscope ( $\times 100$ ). In Fig. 4(d), there are connecting pores and small pores which are proved that cellular lightweight concrete had the characteristic of high water absorption.

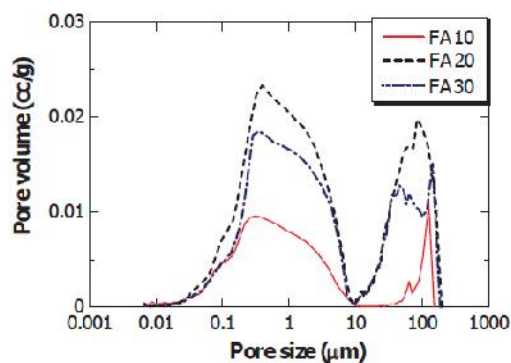


Figure 3: Effect of fly ash content on cellular lightweight concrete.

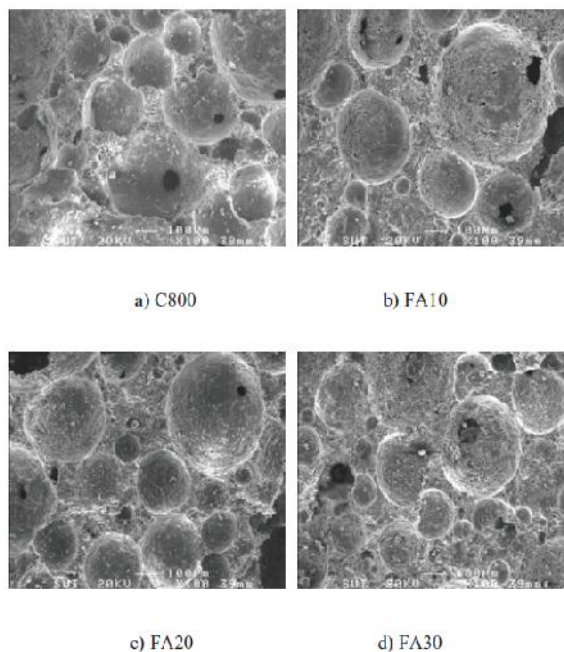


Figure 4: Fractured surface of cellular lightweight concrete at 28 days ( $\times 100$ ).

#### 4. CONCLUSIONS

The conclusions drawn from this study and summarized below are applicable to the characteristics of the materials used and the range of parameters investigated:

1. For a given density, an increase in fly ash content of the mix results in increased strength.
2. Replacing cement with high fly ash not affect the compressive strength in early age.
3. Replacing cement with high fly ash affects the pore size decrease and cause compressive strength increased.

#### Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the financial supports of the Commission by Rajamangala University of Technology Isan of Thailand for support given through a grant fund under the Strategic Scholarships for Frontier Research Network for the Joint Ph.D. Program, Thai Doctoral degree.

#### References

- [1] ASTM. Standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam, ASTM C 796-97, Philadelphia, 1997.

- [2] ASTM. Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolana for use as a mineral admixture in portland cement concrete, ASTM C 618-89, Philadelphia, 1989.
- [3] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, I. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 4, pp. 425-428.
- [4] Galle, C. (2001). Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 1467-1477.
- [5] Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J. (2001). The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 1, pp. 105-112.
- [6] Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J. (2002). The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 2, pp. 233-239.
- [7] Konecny, L. and Naqvi, S.J. (1993). The effect of different drying techniques on the pore size distribution of blended cement mortars. *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No. 5, pp. 1223-1228.
- [8] Nambiar, E.K. Kunhanandan and Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 28, No. 5, pp. 475-480.
- [9] Nambiar, E.K. Kunhanandan and Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 37, No. 2, pp. 221-230.
- [10] Narayanan, N. and Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, No. 5, pp. 321-329.
- [11] Wang, Kuen-Sheng, Chiou, Ing-Jia, Chen, Ching-Ho and Wang, Davin (2005). Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 19, No. 8, pp. 627-633.

## Cellular lightweight concrete containing high-calcium fly ash and natural zeolite

*Khanphee Jitchaiyaphum<sup>1)</sup>, Theerawat Sinsiri<sup>1)</sup>, Chai Jaturapitakkul<sup>2)</sup>, and Prinya Chindaprasirt<sup>3)</sup>*

1) School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

2) Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

3) Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

(Received: 12 July 2012; revised: 3 October 2012; accepted: 10 October 2012)

**Abstract:** Cellular lightweight concrete (CLC) with the controlled density of approximately 800 kg/m<sup>3</sup> was made from a preformed foam, Type-I Portland cement (OPC), fly ash (FA), or natural zeolite (NZ), and its compressive strength, setting time, water absorption, and microstructure were tested. High-calcium FA and NZ with the median particle sizes of 14.52 and 7.72 μm, respectively, were used to partially replace OPC at 0, 10wt%, 20wt%, and 30wt% of the binder (OPC and pozzolan admixture). A water-to-binder mass ratio (W/B) of 0.5 was used for all mixes. The testing results indicated that CLC containing 10wt% NZ had the highest compressive strength. The replacement of OPC with NZ decreased the total porosity and air void size but increased the capillary porosity of the CLC. The incorporation of a suitable amount of NZ decreased the setting time, total porosity, and pore size of the paste compared with the findings with the same amount of FA. The total porosity and cumulative pore volume decreased, whereas the gel and capillary pores increased as a result of adding both pozzolans at all replacement levels. The water absorption increased as the capillary porosity increased; this effect depended on the volume of air entrained and the type or amount of pozzolan.

**Keywords:** lightweight concrete; fly ash; zeolites; compressive strength; microstructure; water absorption

### 1. Introduction

Lightweight concrete has been widely used in wall panels, masonry blocks, roof decks, and precast concrete units in many building applications. There are many advantageous qualities of lightweight concrete, such as its low density, low thermal conductivity, reduction of dead load, fast building rate, and low haulage cost [1]. The air voids needed to produce lightweight concrete can be obtained using expanded lightweight aggregate materials, such as perlite, blast furnace slag, volcanic ash, and coal bottom ash. The air voids can also be formed in cement paste by adding the prepared foam to the unhardened mixture. Cellular lightweight concrete (CLC) is a well-known low-density product that contains blends of Portland cement, silica, pozzolan, and lime as well as a homogeneous void or

cellular structure attained with gas-forming chemicals or foaming agents. Autoclave curing is usually employed for CLC that contains binder ingredients other than, or in addition to, Portland cement [2]. Density control is achieved by substituting macroscopic air cells for all or part of the fine aggregate. Normal-weight coarse aggregates are not usually used, but lightweight aggregates, both fine and coarse, are often found in CLC [3]. After molding, the concrete hardens under normal atmospheric conditions [4].

Since CLC is a porous material with a homogeneous cellular structure, it possesses a number of attractive characteristics, such as good thermal and acoustic insulation, satisfactory workability, and self-flowing properties. Its good thermal and acoustic performance makes it a natural choice as a building construction material. Although

Corresponding author: Theerawat Sinsiri E-mail: sinsiri@sut.ac.th

© University of Science and Technology Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

its mechanical properties are low compared with those of normal concrete, CLC products are used in many applications, such as partition walls and load-bearing walls in low-rise residential buildings [5–6].

Fly ash (FA) is a by-product from the combustion of pulverized coal in power plants. More than 3.5 million tons of coal fly ash is produced in Thailand annually. Using FA as a replacement ingredient in cement is currently a common practice in Thailand because FA improves the properties of concrete and reduces its cost. The high content of amorphous silica, alumina (which comprises more than 70wt%), and fine spherical particles (15  $\mu\text{m}$  in diameter on average) in FA are the primary reasons for its high pozzolanic index. Many researchers have already examined the influence of FA on the properties of concrete, such as compressive strength, sulfate resistance, and durability [7].

Natural zeolite (NZ), a volcanic or volcanogenic sediment material, has a three-dimensional structure, and it is classified as a hydrated aluminosilicate of alkali and alkaline earth cations with uniform pores, grooves, and pits. NZs possess special properties, such as ion exchange, molecular sieves, large surface areas, and catalytic activity, which make this material preferable for large-scale industrial applications[1]. Approximately 40 NZs have been identified over the last 200 years. The most common NZs are analcime, chabazite, clinoptilolite, mordenite, and phillipsite. Based on the recorded production and production estimates, the worldwide production of NZ is approximately 3–4 million tons per year[1].

The current research presents the test results and evaluations of incorporating FA and NZ into preformed foam CLC as a replacement for Portland cement. This informa-

tion is essential for its wider application to other construction materials.

## 2. Experimental

### 2.1. Materials

Type-I Portland cement (OPC), foaming agent, water, FA, and NZ were the materials used. The specific gravities of OPC, FA, and NZ were measured in accordance with ASTM C 188-95(2003) [8], and their particle sizes were measured using laser particle size analysis. These data are provided in Table 1. A scanning electron microscopy (SEM) photo of an OPC particle is shown in Fig. 1(a). FA was obtained from a silo at the Mae Moh Power Plant in northern Thailand. Its SEM photo, which is shown in Fig. 1(b), reveals the spherical shape of the particles. NZ was a clinoptilolite  $((\text{Na},\text{K},\text{Ca})_6(\text{Si},\text{Al})_{36}\text{O}_{72}\cdot 20\text{H}_2\text{O})$ . An SEM photo of NZ, which is shown in Fig. 1(c), demonstrates its irregular and crushed-shape particles. Other researchers have also reported similar observations [9]. The chemical compositions of these three materials are listed in Table 2. The foaming agent was synthetic. Fig. 2 shows the particle size distributions obtained using the Malvern Mastersizer Instrument. The particle size of FA is similar to that of cement, whereas that of NZ is smaller.

Table 1. Physical properties of the material

Sample	Specific gravity	Median particle size, $d_{50}$ / $\mu\text{m}$	Blaine fineness / $(\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$
OPC	3.15	14.12	3500
FA	2.02	14.52	4300
NZ	2.09	7.72	11300

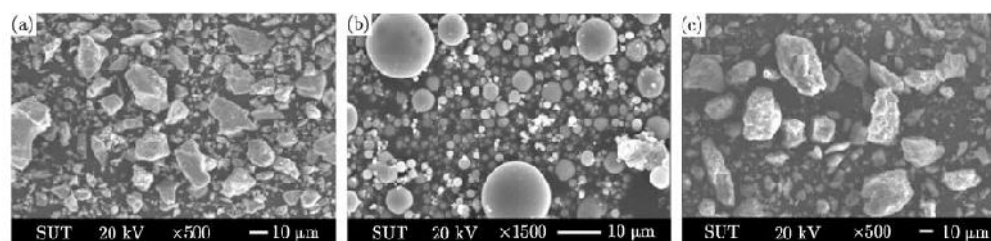


Fig. 1. SEM images of OPC (a), FA (b), and NZ (c).

Table 2. Chemical compositions of OPC, FA, and NZ

Ingredient	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LOI	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	wt%
OPC	19.85	4.49	3.56	66.96	1.36	—	0.34	2.46	0.93	—	
FA	43.87	26.33	10.81	12.69	1.23	—	1.10	2.74	1.23	81.01	
NZ	75.32	10.28	2.66	3.95	1.20	0.89	4.29	—	1.41	88.26	

Note: LOI—loss on ignition.

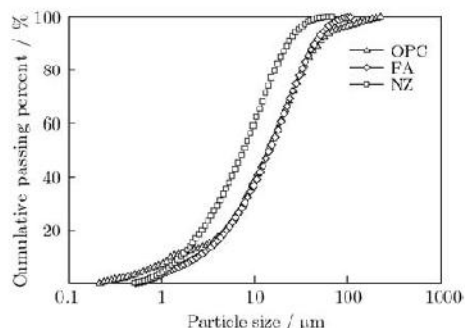


Fig. 2. Material particle size distribution.

## 2.2. Mix proportions

This experiment studied the effect of the filler contents on the density, setting time, water absorption, and compressive strength of CLC. The OPC was replaced with FA and NZ at levels of 0-30wt%. The mixes were labeled CON, FA10, FA20, FA30, NZ10, NZ20, and NZ30. For example, FA10 denotes the mix with 10wt% FA, and CON denotes the control mix (CLC with only OPC). The mass ratio of water to binder (W/B) of 0.5 was used for all mixtures. The foam required for a CLC density of 800-850 kg/m<sup>3</sup> was obtained per ASTM C 796-04[3]. The concrete mix proportions are provided in Table 3.

Table 3. Mix proportion of CLC

Mix No.	Symbol	Pozzolan replacement / wt%	Mix proportion / (kg·m <sup>-3</sup> )				W/B	
			Cement	Binder		Foaming agent		Water
1	CON	0	665.0	—	—	0.772	332	0.5
2	FA10	10	598.5	66.5	—	0.759	332	0.5
3	FA20	20	532.0	133.0	—	0.746	332	0.5
4	FA30	30	465.5	199.5	—	0.733	332	0.5
5	NZ10	10	598.5	—	66.5	0.760	332	0.5
6	NZ20	20	532.0	—	133.0	0.748	332	0.5
7	NZ30	30	465.5	—	199.5	0.737	332	0.5

The foaming agent was diluted with water at a mass ratio of 1:40. Next, the liquid was pressurized with air at 6 kg/cm<sup>2</sup> and aerated to a density of 45 kg/m<sup>3</sup>. OPC and FA (or NZ) were thoroughly mixed using a horizontal mixer. The foaming agent was added and mixed until a uniform paste was obtained. This process usually required approximately 3 min. The samples were poured into molds, and an external vibrator was applied to facilitate compaction. The CLCs were removed from the molds after 24 h, wrapped with a plastic film and placed in a moist room at (23±2)°C. A set of 100 mm×100 mm×100 mm specimens was used for the strength and porosity tests.

## 2.3. Compressive strength test

A compressive strength test was conducted at 3, 14, 28, and 60 d in accordance with BS 1881-116 [10]. The results are presented as the averages of three samples.

## 2.4. Concrete porosity determination

The pore-size measurements of the hardened CLC were determined using mercury intrusion porosimetry (MIP) with a pressure capacity of 228 MPa. The Washburn equation was used to determine pressure [11]. After curing for 3, 14, 28, and 60 d, the samples were obtained by carefully breaking the cube specimens with a chisel. The representative samples of 5 to 10-mm pieces, weighing between 2 and 3 g, were removed from the middle of each specimen. To stop the hydration reaction, the samples were submerged directly into liquid nitrogen for 5 min

and vacuumed at a pressure of 0.5 Pa at 40°C for 48 h. This method has been previously used to stop the hydration reaction of cement paste [12-14]. A constant contact angle of 140° and a constant mercury surface tension of 480×10<sup>-3</sup>J·m<sup>-2</sup> were used to calculate the pore size.

## 2.5. X-ray diffraction (XRD)

Dried FA and NZ sample powders were sifted through a No. 100 sieve (150 μm openings). A sample of powder weighing approximately 1 g was used for XRD analysis. The XRD scans were performed for 2θ between 10° and 65° with an increment of 0.02°/step at a scan speed of 0.5 s/step. A quantitative XRD analysis determined the amorphous FA and NZ phases using Bruker's TOPAS software.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Material properties

The chemical compositions of OPC, FA, and NZ are provided in Table 2. The main chemical component of FA is SiO<sub>2</sub>, which accounts for 43.57wt% of its mass. As prescribed by ASTM C 618-03 [15], this sample is a Class F fly ash because the sum of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is higher than 70wt%, and the LOI and SO<sub>3</sub> content do not exceed 6% and 5wt%, respectively. NZ has a high SiO<sub>2</sub> content of 75.32wt% and an LOI of 1.41%. The total content of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the NZ is 88.26wt%, which is more than the minimum requirement (70wt%) specified by



ASTM C 618-03 [15] for natural pozzolans.

The XRD patterns of FA and NZ shown in Fig. 3 indicate that the former powder consists primarily of crystalline phases of quartz; for NZ, the common zeolite mineral clinoptilolite is the major crystalline phase, and quartz is contained as a minor phase. Uzal and Turanli [9] reported a similar result. A quantitative XRD analysis reveals that the contents of amorphous phases in FA and NZ are 78.8wt% and 20.5wt%, respectively. Moreover, the crystalline phase consists of 85wt% quartz and 15wt% mullite for FA and 22wt% quartz and 78wt% clinoptilolite for NZ.

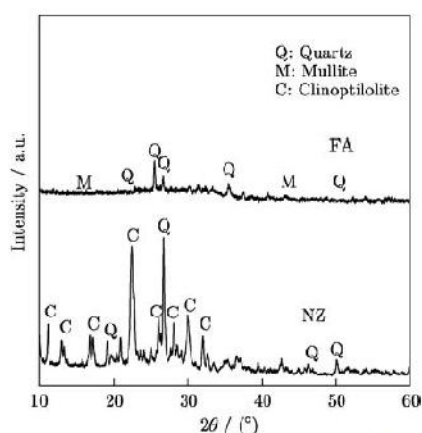


Fig. 3. XRD patterns of FA and NZ.

### 3.2. Setting time

The initial and final setting times of CLCs containing FA and NZ are presented in Fig. 4. It shows that the setting times prolong as the content of FA or NZ increases. The initial setting times of FA and NZ pastes increase from 5.2 to 14.45 h and from 5.2 to 12.15 h, respectively, whereas the final setting times increase from 13.1 to 23.5 h and from 13.1 to 19.95 h, respectively. The increase of pozzolan content reduces the cement content in the mix. As a result, a delay in the setting time of the cementitious system is due primarily to a lower proportion of cement in the blended system. The setting times of the paste that contained NZ are slightly shorter than those of the paste contained FA

because the former is a pozzolan with a Blaine fineness of 11300 cm<sup>2</sup>/g, whereas the latter has a fineness of only 4300 cm<sup>2</sup>/g. The fine pozzolan with a high surface area produces a greater pozzolanic reaction than the coarser pozzolan [16-17].

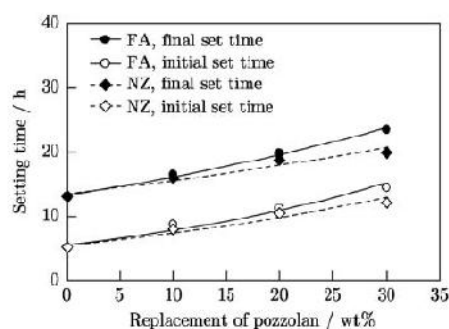


Fig. 4. Effect of FA and NZ on the setting time of CLC.

### 3.3. Compressive strength

Table 4 shows the compressive and relative strengths of CON. The compressive strengths of the control mix at 3, 14, 28, and 60 d are 1.81, 2.70, 3.05, and 3.15 MPa, respectively. The compressive strengths of the CLC increase with increasing the curing time due to the hydration reaction that increases the calcium silicate hydrate (C-S-H) product [18]. At 3 d the compressive strength of CLC containing 10wt% FA is slightly higher than that of the control mix at the same time point. This result is due to the proper amount of FA content, which affects the pozzolanic reaction rate and better dispersion and improves the compressive strength of the paste [7, 19-20]. The compressive strengths of CLC containing 20wt% or 30wt% FA are lower than that of the control mix. This result is due to the low OPC content that have been observed in other research [21]. In addition, the compressive strengths of FA30 at 14, 28, and 60 d are lower than those of the other mixes due to the greater amount of FA. FA is a pozzolan, and its pozzolanic reaction is slow compared with that of OPC; thus, the rate of strength development is also slow [19, 22].

Table 4. Compressive strength of CLCs containing OPC, FA, and NZ

Mix No.	Symbol	Compressive strength / MPa				Relative strength to CON / %			
		3 d	14 d	28 d	60 d	3 d	14 d	28 d	60 d
1	CON	1.81	2.70	3.05	3.15	100	100	100	100
2	FA10	1.95	3.17	3.45	3.65	108	117	113	116
3	FA20	1.65	2.75	3.10	3.30	91	102	102	105
4	FA30	1.27	2.15	2.42	2.58	70	80	79	82
5	NZ10	2.19	3.72	4.27	4.51	121	138	140	143
6	NZ20	1.92	3.18	3.66	3.91	106	118	120	124
7	NZ30	0.85	1.56	2.05	2.25	47	58	67	71

The compressive strengths of NZ30 at 3, 14, 28, and 60 d are 0.85, 1.56, 2.05, and 2.25 MPa, respectively. The strengths are weaker than those of the OPC due to the high NZ content and the slower pozzolanic reaction rate of zeolite, which do not significantly contribute to compressive strength [23]. The compressive strengths of NZ10 and NZ20 at 3, 14, 28, and 60 d are 2.19, 3.72, 4.27, and 4.51, and 1.92, 3.18, 3.66, and 3.91 MPa, respectively. These strengths are higher than those of CON at the same time point. The high SiO<sub>2</sub> content (75.32wt%) and NZ fineness (median particle size = 7.72 μm) improve the reaction with Ca(OH)<sub>2</sub> to produce an additional calcium silicate hydrate (C-S-II), which improves the compressive strength [1, 24–25].

At the replacement levels of 10wt% and 20wt%, the compressive strengths of CLC containing NZ are higher than those of CLC containing FA, as shown in Table 4. This finding is due to the high purity level (up to 90wt%) of NZ and the high SiO<sub>2</sub> content compared with those of FA. According to Ref. [25], the 28 d strength of zeolite concrete with a replacement level of 15wt% (the optimum) is also 23wt% higher than that of the control mix. As a result, the strength of hardened concrete is improved by incorporating a proper amount of zeolite [1, 16, 19, 26–27]. The optimum replacement level of NZ or FA is 10wt%. For a higher replacement level of 20wt%, the strengths of CLC are slightly reduced compared with those at the optimum replacement level of 10wt%; however, these strengths are still higher than those of the control mix. Replacing cement with FA or NZ affects the compressive strength because the compressive strength significantly increases with time but decreases with increasing the replacement level. Three factors can explain the increased compressive strength of CLC: hydration reaction, filler effect, and pozzolanic reaction. Hydration reaction is directly related to the cement amount in the mix. The filler effect involves the nucleation and packing effects, which depend on the material fineness. The nucleation effect occurs when small particles are dispersed into the cement paste and act as nucleation sites that enhance cement hydration, whereas the packing effect is the result of small particles that fill the voids of the paste [28–30]. Therefore, CLC with pozzolans of high fineness results in a more homogeneous and denser matrix, which increases the compressive strength of the paste.

### 3.4. Water absorption

The results of CLC water absorption at 28 d are presented in Fig. 5. The water absorption of CON is 30.0wt% at 28 d, whereas those of FA10, FA20, and FA30 are 30.6wt%, 32.5wt%, and 35.3wt%, respectively. The water absorption of CLC containing FA increases as the FA content increases. Kunhanandan Nambiar and Ramamurthy [31] reported similar results when they used Class F fly

ash to replace sand at the sand to FA ratio of 0–100wt% to obtain foam concrete with the water absorption of 23wt%–30wt%.

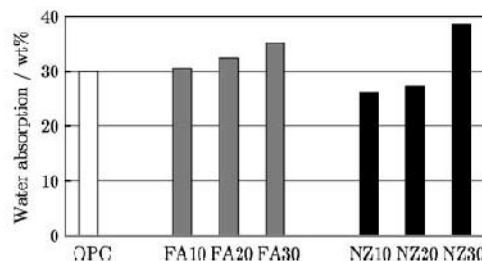


Fig. 5. Water absorption of CLC at 28 d.

The water absorptions of NZ10 and NZ20 are 26.3wt% and 27.3wt%, respectively. These figures are lower than those of CON. This finding is due to the amount of pore bubbles from the foam, which is slightly reduced with the addition of NZ. However, the water absorption of NZ30 is higher (38.8wt%). Other researchers have made similar observations regarding water absorption [25, 32]. This finding is related to the porosity results: a small increase in capillary pores in CLC hence causes a small increase of water absorption.

Fig. 5 shows that the water absorption of CLC containing NZ is more effective than CLC with FA at replacement levels of 0–20wt%. The water absorption of CLC containing 30wt% FA is slightly lower than that containing 30wt% NZ. It is observed that replacing cement with pozzolan in CLC results in the increase of large capillary pores. The result shows that large capillary pores of FA10 and FA20 are higher than those of NZ10, NZ20, and CON. Therefore, an increase of large capillary pores in CLC could influence their water absorption.

### 3.5. Microstructure of CLC

#### 3.5.1. Porosity of CLC

The porosity results of all CLCs at 28 and 60 d are presented in Table 5 and Fig. 6. The porosity system consists of four types of pores: gel pores or small pores, less than 10 nm; medium capillary pores, 10 to 50 nm; large capillary pores, 50 to 10000 nm; and air void or extra large pores, larger than 10000 nm. Large capillary pores and extra large pores are influential on strength and permeability characteristics, whereas small pores and medium capillary pores are influential on drying shrinkage and creep [33–34]. The total porosities of the control mix, FA10, FA20, and FA30 at 28 d are 52.27%, 48.56%, 50.78%, and 59.32%, respectively. Incorporating 10wt% and 20wt% FA results in the CLCs with reduced total porosity. This result is due to the gradual filling of large pores from factors, such as the hydration reaction, the dispersing effect, the packing effect, and the pozzolanic reaction of FA particles. Small

and spherical FA particles fill air voids and decrease the porosity [28, 30]. At 30wt% FA, the total porosity significantly increases, primarily due to the packing effect of FA particles filling the air bubbles, which increases the capillary porosity of CLC. Note that the total porosity and

capillary porosity of the CLCs increase, whereas the compressive strength and extra large pores decrease. Other investigations have reported similar findings [7]. The porosity of CLC containing FA at 60 d has a similar trend to that at 28 d.

Table 5. Porosity of CLCs containing OPC, FA, and NZ

Mix No.	Symbol	Porosity at 28 d / %				Total	Porosity at 60 d / %				Total
		Small	Medium capillary	Large capillary	Extra large		Small	Medium capillary	Large capillary	Extra large	
1	CON	0.05	2.84	26.72	22.66	52.27	0.05	2.15	26.93	22.51	51.64
2	FA10	0.28	1.94	38.62	7.72	48.56	0.35	1.86	36.80	7.71	46.72
3	FA20	0.19	2.93	40.51	7.15	50.78	0.20	2.42	40.37	7.56	50.55
4	FA30	0.24	4.39	47.70	6.99	59.32	0.25	3.96	47.67	6.73	58.61
5	NZ10	0.20	4.29	33.88	4.69	43.06	0.21	3.77	31.72	4.55	40.25
6	NZ20	0.38	4.72	34.37	5.34	44.81	0.31	4.40	34.11	5.13	43.95
7	NZ30	0.30	9.26	50.80	9.55	69.71	0.31	7.90	50.49	9.13	67.83

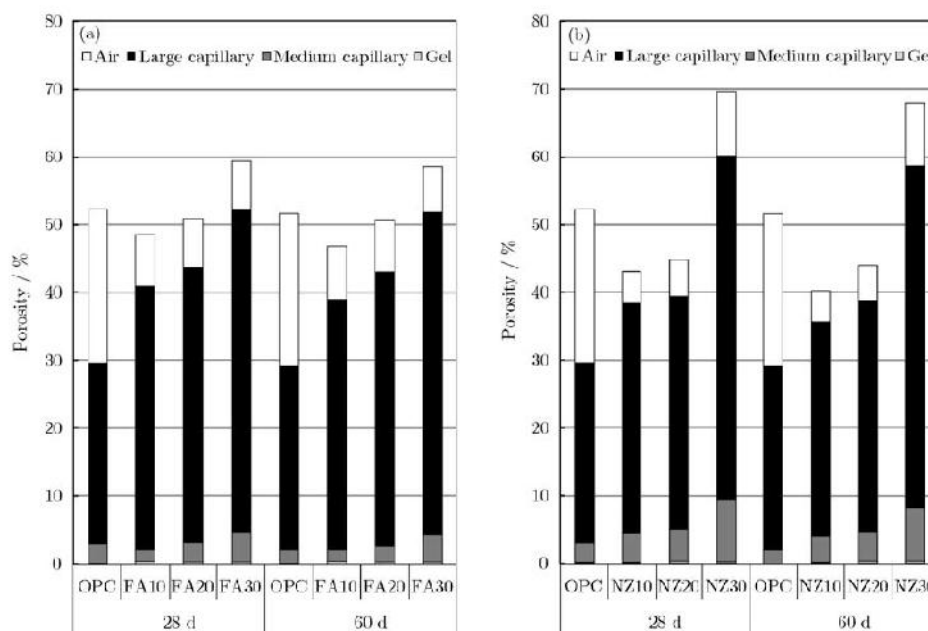


Fig. 6. CLC porosity with admixtures FA (a) and NZ (b).

As shown in Fig. 6, the total porosity of CLCs containing NZ10 and NZ20 are smaller than that of OPC concrete at all replacement levels and times. It is because NZ is more effective at reducing pore size due to a better dispersing effect, packing effect, and pozzolanic reaction of finer NZ particles. The small NZ particles fill the pores and decrease the porosity [9, 27].

Compared with FA, high-fineness NZ has a faster pozzolanic reaction and a better filler effect at reducing the voids of CLC. However, a considerable decrease in the total porosity of NZ10 occur 28 d later, primarily due to

the decrease in large capillary pores. This decrease might be associated with the pore system becoming denser as a result of the additional formation and growth of the pozzolanic reaction products [9, 27].

The 10wt% incorporation of pozzolanic materials decreases the total porosity due to the filling effect and pore refinement. The total porosity of OPC concrete is 52.27%, whereas those of FA10 and NZ10 are 48.56% and 43.06%, respectively. The total porosity of NZ10 is reduced more than that of FA10 due to its finer particles. The increase in pozzolan content to 20% and 30% increases the total

porosity. The reduced OPC content and hydration products offset the filling effect. The extra large pores of CLCs containing pozzolans are reduced, whereas the small pores, medium capillary pores, and large capillary pores increase. The filling effect reduces extra large pores and increases small pores, medium capillary pores, and large capillary pores. All pores other than small pores increase significantly for 30% pozzolans. Again, this result is due to the reduced amounts of OPC and hydration products. Other investigations also reported similar findings [7]. The pores exhibit a similar trend at 60 d compared with that at 28 d.

As shown in Table 5 and Fig. 6, the incorporation of higher CLC replacement levels of both FA and NZ results in greater gel porosity compared with that of the control

mix at all times. CLC with NZ exhibits increased gel porosity, which suggests that CLC with NZ is more effective than that with FA, and this is due to the better dispersion, packing effect and pozzolanic reaction in the blended cement paste. Other researchers have reported similar results [7, 16].

### 3.5.2. Effects of FA and NZ on the pore size distribution of CLC

The cumulative pore volumes of CLCs with FA and NZ are shown in Figs. 7 and 8. The cumulative pore volumes of the control mix at 28 and 60 d are 0.454 and 0.452 mL/g, respectively. These values decrease with curing time due to the hydration reactions and the increase of the C S H product [14, 23].

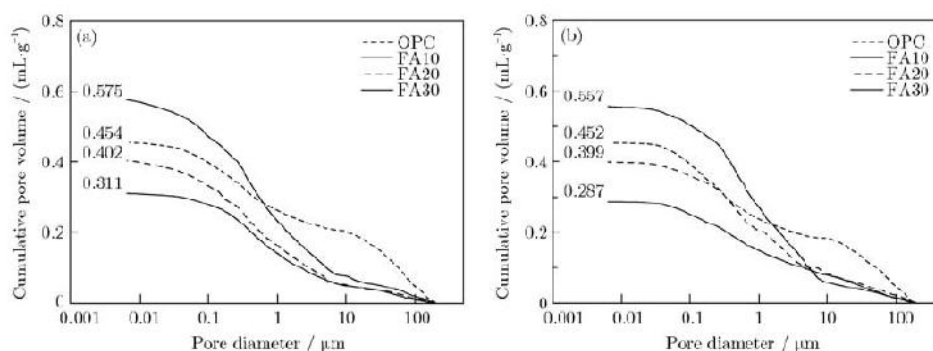


Fig. 7. Relationship of cumulative pore volume and pore diameter of CLC containing FA: (a) 28 d; (b) 60 d.

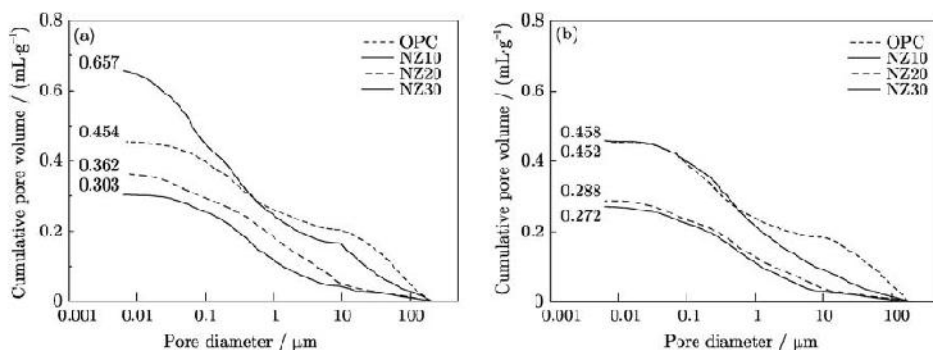


Fig. 8. Relationship of cumulative pore volume and pore diameter of CLC containing NZ: (a) 28 d; (b) 60 d.

As shown in Fig. 7, the cumulative pore volumes of CLC containing 10wt% FA are 0.311 mL/g at 28 d and 0.287 mL/g at 60 d. These figures are lower than those of the control mix and CLC containing 20wt% or 30wt% FA. As shown in Fig. 8, the cumulative pore volumes of CLC containing 10wt% NZ are 0.303 mL/g at 28 d and 0.272 mL/g at 60 d. FA and NZ are effective pozzolans with successful pozzolanic reactions. Incorporating a proper

amount of pozzolan fills voids, reduces porosity, and increases the density of the paste [14, 16]. The  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in pozzolanic materials react with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  to produce C S H and C A H, which results in a reduction of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content by pozzolanic reaction [23, 27]. The results also reveal that the cumulative pore volumes of concretes containing NZ are smaller than those containing FA. This finding suggests that NZ is slightly more effective than

FA at reducing porosity.

### 3.5.3. SEM observations

The morphologies of the fractured surfaces of CLCs at 28 d are shown in Figs. 9 and 10. The pores of the control

mix are clearly shaded circles of various sizes with relatively smooth surfaces. The pore sizes vary from less than 50  $\mu\text{m}$  to 600  $\mu\text{m}$ . Another researcher reported a similar observation [32].

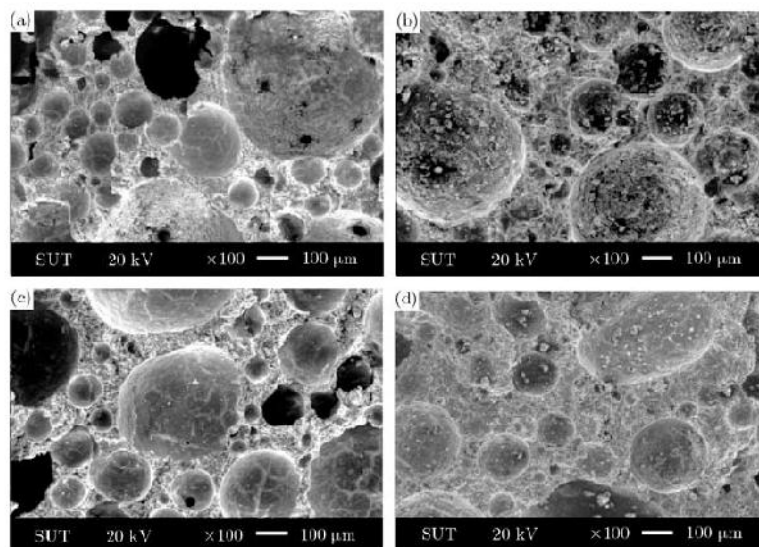


Fig. 9. SEM images of the fractured surfaces of CLCs containing FA at 28 d: (a) OPC; (b) FA10; (c) FA20; (d) FA30.

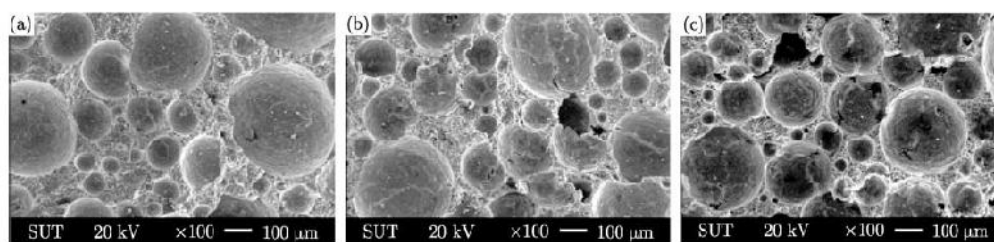


Fig. 10. SEM images of the fractured surfaces of CLCs containing NZ at 28 d: (a) NZ10; (b) NZ20; (c) NZ30.

Figs. 9(b)–9(d) display the SEM images of CLCs containing 10wt%, 20wt%, and 30wt% FA, respectively, which have completely different microstructures from the control mix (Fig. 9(a)). Clearly, the pores are more uniform than those of the control mix because FA facilitates the distribution of air voids by preventing them from merging and overlapping [35]. The pore sizes of these CLCs range from less than 50  $\mu\text{m}$  to 400  $\mu\text{m}$ . In addition, the pore size decreases as the FA replacement level increases [14]. Furthermore, some microcracks are detected at the pore surfaces (Figs. 9(c) and 9(d)). Drying shrinkage and mechanical stresses that occurred during sample preparation probably induce these features.

Figs. 10(a)–10(c) display the SEM images captured

from CLCs containing 10wt%, 20wt%, and 30wt% NZ, respectively. Clearly, these pore sizes are slightly more uniform than those of CLCs containing FA. The pore sizes range from less than 50  $\mu\text{m}$  to 300  $\mu\text{m}$ . Fig. 10(a) shows that there are several closed pores, which demonstrates that CLC with 10wt% NZ have low water absorption [36]. In addition, the pore size decreases as the NZ replacement level increases (Fig. 10(c)).

SEM observations reveal that the pores of CLCs containing NZ are denser than those of CLCs containing FA at the same replacement level (excluding the 30wt% replacement level) and control mix. This effect is due to cement hydration and pozzolanic reactions [14, 26]. Numerous large pores are observed with 30wt% pozzolan re-

placement, which reflects the high total porosity and low strength of these CLCs, due primarily to their low OPC content and reduced hydration products.

#### 4. Conclusions

CLCs with OPC partially replaced by FA or NZ with a density of approximately  $800 \text{ kg/m}^3$  can be produced with relatively good compressive strength. NZ is slightly more reactive than FA and enhances the strength of CLC. The optimum replacement level for both FA and NZ is 10wt%, which, compared with CON, results in the 28-d compressive strength increasing by 113% and 140%, respectively. A replacement level of 20wt% results in decreased strength; however, these CLCs are still stronger than the control mix.

CLCs containing NZ set slightly faster than those containing FA. This finding is due to the high fineness of NZ, which also has a higher surface area and a greater pozzolanic reaction. The increase in pozzolans also prolongs the setting time of CLCs with NZ compared with the control mix due to the lower content of OPC.

The capillary porosity of CLCs containing FA and NZ increases as the replacement level of both types of pozzolans increases. Moreover, water absorption is primarily related to capillary porosity. The water absorption increases as the capillary porosity increases, which decreases the compressive strength.

The reduction of air voids in CLCs with density control is due to replacing OPC with pozzolans. The pozzolans cause a filler effect and refine the pore-size structure of the paste. This effect changes larger pores into smaller ones. Thus, the total porosity and cumulative pore volumes of CLCs containing FA and NZ are less than those of OPC.

#### Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support of the Rajamangala University of Technology Isan, Thailand, for a grant originating from the Strategic Scholarships for Frontier Research Network, which supports the Joint Ph.D. Program and Thai doctoral degree. Thanks are also extended to the Thailand Research Fund (TRF) for financial support originating from the TRF Senior Research Scholarship (No. RTA5480004), as well as the TRF New Researcher Scholarship (No. MRG5280178).

#### References

- [1] C. Karakurt, H. Kurama, and İ.B. Topçu, Utilization of natural zeolite in aerated concrete production, *Cem. Concr. Compos.*, 32(2010), No.1, p. 1.
- [2] ACI Committee 116, *Cement and Concrete Terminology (ACI 116R-90)*, ACI Manual of Concrete Practice, 2000.
- [3] ASTM C796-04, *Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam*, Annual Book of ASTM Standards, 2004.
- [4] A. Just and B. Middendorf, Microstructure of high strength foam concrete, *Mater. Charact.*, 60(2009), No. 7, p. 741.
- [5] P.J. Tikalsky, J. Pospisil and W. MacDonald, A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete, *Cem. Concr. Res.*, 34(2004), No. 5, p. 889.
- [6] E.K. Kunhanandan Nambiar and K. Ramamurthy, Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology, *Cem. Concr. Compos.*, 28(2006), No. 9, p. 752.
- [7] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, and T. Sinsiri, Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste, *Cem. Concr. Compos.*, 27(2005), No. 4, p. 425.
- [8] ASTM C188-95, *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, 2003.
- [9] B. Uzal and L. Turanl, Blended cements containing high volume of natural zeolites: properties, hydration and paste microstructure, *Cem. Concr. Compos.*, 34(2012), No. 1, p. 101.
- [10] BS 1881-116, *Method of Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes*, British Standards Institute, 1983.
- [11] E.W. Washburn, Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material, *PNAS*, 7(1921), No. 4, p. 115.
- [12] C. Gallé, Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: a comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying, *Cem. Concr. Res.*, 31(2001), No. 10, p. 1467.
- [13] L. Konecny and S.J. Naqvi, The effect of different drying techniques on the pore size distribution of blended cement mortars, *Cem. Concr. Res.*, 23(1993), No. 5, p. 1223.
- [14] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, and T. Sinsiri, Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste, *Constr. Build. Mater.*, 21(2007), No. 7, p. 1534.
- [15] ASTM C618, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Concrete*, Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 2003.
- [16] W. Kroshong, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, *Constr. Build. Mater.*, 25(2011), No. 11, p. 4095.
- [17] F. Canpolat, K. Yılmaz, M.M. Köse, M. Sümer, and M.A. Yurdusev, Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production, *Cem. Concr. Res.*, 34(2004), No. 5, p. 731.
- [18] K.L. Scrivener and A. Nonat, Hydration of cementitious materials, present and future, *Cem. Concr. Res.*,

- 41(2011), No. 7, p. 651.
- [19] W. Wongkeo and A. Chaipanich, Compressive strength, microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume, *Mater. Sci. Eng. A*, 527(2010), No. 16-17, p. 3676.
- [20] E.K. Kunhanandan Nambiar and K. Ramamurthy, Influence of filler type on the properties of foam concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 28(2006), No. 5, p. 475.
- [21] S. Kolias and C. Georgiou, The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 27(2005), No. 2, p. 211.
- [22] T. Nochaiya, W. Wongkeo, and A. Chaipanich, Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement fly ash silica fume concrete, *Fuel*, 89(2010), No. 3, p. 768.
- [23] C.S. Poon, L. Lam, S.C. Kou, and Z.S. Lin, A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes, *Constr. Build. Mater.*, 13(1999), No. 8, p. 427.
- [24] T. Perraki, E. Kontori, S. Tsivilis, and G. Kakali, The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements, *Cem. Concr. Compos.*, 32(2010), No. 2, p. 128.
- [25] B. Ahmadi and M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cem. Concr. Compos.*, 32(2010), No. 2, p. 134.
- [26] B. Yılmaz, A. Uçar, B. Öteyaka, and V. Uz, Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement, *Build. Environ.*, 42(2007), No. 11, p. 3808.
- [27] C. Bilin, Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material, *Constr. Build. Mater.*, 25(2011), No. 8, p. 3175.
- [28] M. Cyr, P. Lawrence, and E. Ringot, Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, *Cem. Concr. Res.*, 36(2006), No. 2, p. 264.
- [29] M.K. Gopalan, Nucleation and pozzolanic factors in strength development of class fly ash concrete, *ACI Mater. J.*, 90(1993), No. 2, p. 117.
- [30] D.G. Montgomery, D.C. Hughes, and R.I.T. Williams, Fly ash in concrete: a microstructure study, *Cem. Concr. Res.*, 11(1981), No. 4, p. 591.
- [31] E.K. Kunhanandan Nambiar, K. Ramamurthy, Sorption characteristics of foam concrete, *Cem. Concr. Res.*, 37(2007), No. 9, p. 1341.
- [32] P. Chindaprasit and U. Rattanasak, Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash, *Mater. Des.*, 32(2011), No. 2, p. 723.
- [33] P.K. Mehta, Studies on blended Portland cements containing Santorin earth, *Cem. Concr. Res.*, 11(1981), No. 4, p. 507.
- [34] J.M. Khatib and S. Wild, Pore size distribution of metakaolin paste, *Cem. Concr. Res.*, 26(1996), No. 10, p. 1545.
- [35] E.K. Kunhanandan Nambiar and K. Ramamurthy, Air-void characterisation of foam concrete, *Cem. Concr. Res.*, 37(2007), No. 2, p. 211.
- [36] K.S. Wang, I.J. Chiou, C.H. Chen, and D. Wang, Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash, *Constr. Build. Mater.*, 19(2005), No. 8, p. 627.

## ประวัติผู้เขียน

นายคำภี จิตชัยภูมิ เกิดเมื่อวันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2515 ที่อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่ตำบลโคกสูง อำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนไตรราษฎร์สามัคคีวิทยา ตำบลหนองไผ่ อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ เมื่อปี พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนเมืองพญาแลวิทยา จังหวัดชัยภูมิ เมื่อปี พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างก่อสร้าง จากวิทยาลัยเทคนิคชัยภูมิ เมื่อปี พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างโยธา รุ่นที่ 26 จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เมื่อปี พ.ศ. 2535 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เมื่อปี พ.ศ. 2537

หลังสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ได้ปฏิบัติงานตำแหน่งวิศวกร ประจำบริษัทธารงพัฒนาการ จำกัด ช่วงปี พ.ศ. 2537–2540 ที่หน่วยงานก่อสร้างโครงการบ้านร่มรื่น อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และโครงการก่อสร้างห้างสรรพสินค้าโรบินสัน จันทบุรี ต่อมาในปี พ.ศ. 2540 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (แขนงวิศวกรรมโครงสร้าง) ที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น จนสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ. 2543 ซึ่งระหว่างที่กำลังศึกษาระดับปริญญาโทอยู่นั้น ได้ปฏิบัติงานตำแหน่งอาจารย์อัตราจ้าง ที่แผนกวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคหลวงพ่อกุณปริสุทฺโธ อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมาและเมื่อสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท จึงได้มาปฏิบัติงานตำแหน่งอาจารย์อัตราจ้าง ประจำโปรแกรมวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่สถาบันราชภัฏชัยภูมิ และสถาบันราชภัฏราชชนครินทร์ ต่อมาในปี พ.ศ. 2546–2549 ได้ปฏิบัติงานตำแหน่งอาจารย์ช่วยสอน ที่มหาวิทยาลัยมหาสารคาม กระทั่งปี พ.ศ. 2549 จนถึงปัจจุบันปฏิบัติงานตำแหน่งอาจารย์ประจำอยู่ที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ในระหว่างศึกษาระดับปริญญาเอก (พ.ศ. 2551–2557) มีบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 4 บทความ ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก จ.