

ผลกระทบของเศษอิฐดินเผาและอายุบ่มที่มีต่อคอนกรีตมวลรวม  
จากหินบะซอลต์เนื้อโพรงขำย

Effects of Ground Fired Clay Brick Waste and Curing Time on the Vesicular Basalt  
Aggregate Concrete

เจริญพล อินขัน

Chareonpon Inkhan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Civil Engineering (Structural Engineering)

Prince of Songkla University

2553

๑

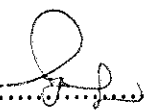
เลขที่	TA439 จย 4	ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
Bib Key	344 907	
	17 ม.ย. 2556	

(1)

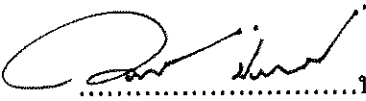
ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของเศษอิฐดินเผาบนและอายุปูนที่มีต่อคอนกรีตมวลรวมจาก  
หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย  
ผู้เขียน นายเจริญพล อินขัน  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)


---

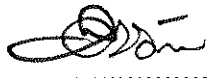
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

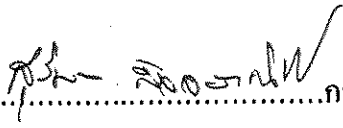
  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชญพล ตันน โยภาส)

คณะกรรมการสอบ

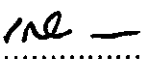
  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชญพล ตันน โยภาส)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล สังขวานิชย์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของเศษอิฐดินเผาและอายุบ่มที่มีต่อคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย
ผู้เขียน	นายเจริญพล อินขัน
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง)
ปีการศึกษา	2552

### บทคัดย่อ

ศึกษาประเมินสมบัติของคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบผิวจาก โรงอิฐท้องถิ่นเป็นแร่ผสมเพิ่ม ศึกษาหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายจากจังหวัดบุรีรัมย์และประเมินความเหมาะสมของหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นทรัพยากรมวลรวมทดแทนเตรียมคอนกรีตทรงลูกบาศก์สูตรหลายส่วนผสมขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. โดยใช้หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นมวลรวมหยาบและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเศษอิฐดินเผาเคลือบผิวในอัตราส่วนต่างกันได้ร้อยละ 10 20 30 และ 50 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และ 0.55 ทดสอบดัชนีกำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และประสิทธิภาพของแร่ผสมเพิ่มเศษอิฐดินเผาเคลือบผิวในการควบคุมปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกาตามมาตรฐาน ASTM ปัจจัยที่ทดสอบของเพสต์และคอนกรีตหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายประกอบด้วย วิเคราะห์ทางเคมี (เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เวลาการก่อตัว การยุบตัว ความชื้นเหลวปกติ การดูดซึมน้ำ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นรวม การเปลี่ยนแปลงความยาวแบบแห้ง ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคและกำลังอัด ปัจจัยทั้งหมดนำมาวัดภายหลังการบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 28 และ 56 วัน และไม่บ่ม ค่ากำลังอัดของคอนกรีตพบว่ายอมรับได้และอยู่ในเกณฑ์ของ ASTM ตามคอนกรีตกึ่งมวลเบาชนิด โครงสร้าง ตัวอย่างคอนกรีตทั้งอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55 มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 490 และ 424 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่บ่ม 28 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามตัวอย่างคอนกรีตหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานทั้งสองมีค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคคล้ายกัน ค่ากำลังอัดและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค น้อยหากเศษอิฐดินเผาเคลือบผิวใส่ในระดับต่ำ ที่อายุบ่มช่วงต้น โดยเฉพาะที่เศษอิฐดินเผาเคลือบผิวร้อยละ 50 อย่างไรก็ตามเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นทั้งกำลังอัดและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของทุกตัวอย่างเพิ่มขึ้น ผลบ่งว่าการเติมแทนที่ด้วยเศษอิฐดินเผาเคลือบผิวเหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 30 กำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ลดลงสามารถอธิบายจาก

การตรวจด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและความพรุนเพิ่มขึ้น อันสืบเนื่องมาจากการก่อตัวของแอตตริงไคต์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ลดลงอันเป็นผลของการยับยั้งปฏิกิริยาของกำมะถันที่มาจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

คำหลัก: เศษอิฐดินเผาบดละเอียด หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย วัสดุป่อขุไชนาน อายุบ่ม คลื่นอัลตราโซนิก



**Thesis Title**                Effects of Ground Fired Clay Brick Waste and Curing Time on the  
   Vesicular Basalt Aggregate Concrete

**Author**                        Mr.Chareonpon Inkhan

**Major Program**            Civil Engineering (Structural Engineering)

**Academic Year**            2009

### **ABSTRACT**

This study evaluated the properties of vesicular basalt aggregate concrete (VBAC) in which a ground fired clay brick waste (GFCBW) from local mill was employed as a mineral admixture. The vesicular basalt (VB) from a quarry in Buriram province was investigated and assessed for its suitability of the VB as alternative aggregate resource. Cubes in size of 10×10×10 cm were prepared from several concrete mixes using VB as coarse aggregate and replaced partially for Portland cement, type I in different percentages of 10%, 20% 30% and 50% with water-binder ratios (w/b) of 0.50 and 0.55. The strength activity index with Portland cement and the effectiveness of GFCBW admixture in controlling alkali-silica reactions were tested according to ASTM standards. The investigated parameters of pastes and VBAC included chemical compounds (X-ray fluorescence and X-ray diffraction), scanning electron microscope, setting times, slump, consistency, absorption, specific gravity, bulk density, drying length change, ultrasonic velocity (USV) and compressive strength. All parameters were measured after 7, 28 and 56 days of curing in water and non-curing. The results showed that all samples showed different trend in durability tests length change, with high value in the first 42 days in ambient condition, then reducing to almost a constant change value afterwards in ambient control. The compressive strength values of the cubes were found to be acceptable and satisfy the ASTM requirement for structural semi-lightweight concrete. Both 0.50 and 0.55 w/b specimens attained the highest compressive strength of 490 ksc and 424 ksc at 28 days, respectively. However, both w/b ratios of VBAC specimens showed similar results in terms USV. Compressive strength and USV values were very low for high the levels of GFCBW at an early age of curing, especially for samples containing 50%GFCBW. However, with the increase of curing period, both compressive

strength and USV of all the samples increased. The results indicated the optimal percentages of GFCBW substitution lies in range of 10% to 30%. The decreased compressive strength of VBAC can be explained by the XRD, micro-structure of scanning electron microscope and increased porosity due to the formation of ettringite and decrease secondary calcium silicate hydrate formed as a result of the suppress sulfur reaction from VB.

**Keywords:** Ground fired clay brick waste, Vesicular basalt aggregate, Pozzolanic material, Curing time, Ultrasonic velocity

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.คณพล ตันนโยภาส ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ไม่ว่าจะเป็นการให้ความรู้ คำปรึกษา ในการแก้ปัญหา คำแนะนำในการเขียนรายงานวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการตรวจสอบเนื้อหาและรูปแบบของวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล สัจฉาณิษฐ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย รวมถึงภาคีวิชาชีพกรรมโยธาและภาคีวิชาชีพกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านห้องปฏิบัติการและชุดอุปกรณ์เครื่องมือทดสอบ รวมถึงบริษัท นูริรัมย์ นวัตกรรมจำกัด และบริษัท หินเพชรจำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์หินบะซอลต์เนื้อโพรงขำ และเตาเผาอิฐบ้านคลองเปล อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ที่ให้ความอนุเคราะห์เศษอิฐดินเผาเพื่อใช้สำหรับทำวิจัย รวมถึงบุคคลที่ไม่ได้กล่าวไว้ในที่นี้ทุกท่านที่ให้กำลังใจและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้สิ่งสำคัญที่สุด ผู้เขียนขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

เจริญพล อินขัน

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์ บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
2 วรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 ปฏิริยาไฮดรชันและปฏิริยาปอซโซลาน	4
2.1.2 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	6
2.1.3 วัสดุปอซโซลาน	7
2.1.4 ผลกระทบของปอซโซลานต่อคอนกรีตสด	10
2.1.5 ผลกระทบของปอซโซลานต่อคอนกรีตแข็งตัว	11
2.1.6 ผงอิฐดินเผาละเอียด	11
2.1.7 โครงสร้างคินเนียว	12
2.1.8 มวลรวมหยาบผสมคอนกรีต	13
2.1.9 ธรณีวิทยาของหินบะซอลต์ที่นำมาใช้	14
2.1.10 ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม	15
2.1.11 ขนาดละเอียดของมวลรวม	16
2.1.12 รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวม	17
2.1.13 อิทธิพลของรูปร่างมวลรวมต่อสมบัติของคอนกรีต	18
2.1.14 ความสามารถเทได้ของคอนกรีตสด	19

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.15 ความหนาแน่นรวมของคอนกรีต	20
2.1.16 ชนิดของคอนกรีต	21
2.1.17 ปິงจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต	21
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 การเตรียมวัสดุ	32
3.2 การหล่อก้อนตัวอย่าง	33
3.3 กระบวนการทดสอบ	35
3.3.1 ทดสอบวัสดุผสมคอนกรีต	35
3.3.2 ทดสอบเพสต์และคอนกรีตสด	36
3.3.3 ทดสอบคอนกรีตแข็งตัว	37
3.4 วิเคราะห์และสรุปผล	38
4 ผลและอภิปรายผลการศึกษา	
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเศษอิฐดินเผาบดละเอียด	40
4.2 ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเศษอิฐดินเผาบดละเอียด	41
4.3 สมบัติมวลรวมของหินบะชอลต์เนื้อโพรงข่าย	43
4.4 สมบัติของเพสต์	49
4.4.1 ความขึ้นเหลวปกติของเพสต์	49
4.4.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์	50
4.4.3 กำลังอัดของเพสต์	51
4.5 การยุบตัวของคอนกรีตสด	52
4.6 ความหนาแน่นของคอนกรีตบะชอลต์เนื้อโพรงข่าย	53
4.7 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบะชอลต์เนื้อโพรงข่าย	59
4.8 ความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตบะชอลต์เนื้อโพรงข่าย	61
4.9 การหดและขยายตัวแบบแห้งของคอนกรีตบะชอลต์เนื้อโพรงข่าย	64
4.10 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านคอนกรีตบะชอลต์เนื้อโพรงข่าย	67

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.11 กำลั้งอัดของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพรงข่าย	69
4.11.1 ผลกระทบจากเศษอิฐดินเผาบดละเอียด	70
4.11.2 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	71
4.11.3 ผลกระทบจากความพรุน	71
4.11.4 ผลกระทบจากความหนาแน่นของคอนกรีต	72
4.11.5 ผลกระทบจากอายุบ่มคอนกรีต	73
4.11.6 ความสัมพันธ์ของกำลั้งอัดคอนกรีตต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค	73
4.12 โครงสร้างจุลภาค และองค์ประกอบทางเคมีคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพรงข่าย	74
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษา	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
บรรณานุกรม	90
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก.	96
ภาคผนวก ข.	111
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	125
ประวัติผู้เขียน	141

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การใช้ประโยชน์จากหินปูนสำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง พ.ศ. 2547 ถึง พ.ศ. 2551	2
2.1 ประเภทคุณภาพของวัสดุปอชโซลานตามมาตรฐาน ASTM C-618	8
2.2 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทั่วไปของ เศษอิฐดินเผา หินดินดานเผาให้แตกตัว และดินขาวแปร	9
2.3 ค่ายุบตัวที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างในประเทศไทย	19
3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตมวลรวมหินบะชอลต์เนื้อโพร่งขำย	34
3.2 คุณภาพคอนกรีตในพจน์ของความเร็วกลิ้นตามยาว	38
4.1 องค์ประกอบออกไซด์ทางเคมีของเศษอิฐดินเผาบดละเอียด (WBP)	40
4.2 สมบัติพื้นฐานเศษอิฐดินเผาบดละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	41
4.3 สมบัติพื้นฐานของหินบะชอลต์เนื้อโพร่งขำย	44
4.4 องค์ประกอบออกไซด์ทางเคมีของหินบะชอลต์เนื้อโพร่งขำยและตะกรันภูเขาไฟ	47
ก-1 ส่วนกลมมวลรวมหยาบของหินบะชอลต์เนื้อโพร่งขำย (Coarse Aggregate)	97
ก-2 ส่วนกลมมวลละเอียดของทรายหยาบ (Fine Aggregate)	97
ก-3 ความหนาแน่นของมวลรวมหยาบหินบะชอลต์เนื้อโพร่งขำย	98
ก-4 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินบะชอลต์เนื้อโพร่งขำย	98
ก-5 ดัชนีความแบน (Flakiness Index) หินบะชอลต์เนื้อโพร่งขำย	99
ก-6 ดัชนีความยาว (Elongation Index) หินบะชอลต์เนื้อโพร่งขำย	99
ก-7 ทดสอบความขึ้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผา บดละเอียดในอัตราส่วนต่างๆ	100
ก-8 ความขึ้นเหลวปกติของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผาบดละเอียด	101
ก-9 เวลาและระยะงมของเข็มไวแคตเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ของเพสต์แทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผาบดละเอียด	102
ก-10 ระยะเวลาที่อตัวขึ้นต้นและขึ้นปลายของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผา บดละเอียด (WBP)	102
ก-11 ค่ายุบตัวของคอนกรีตบะชอลต์เนื้อโพร่งขำยโดยใช้เศษอิฐแทนที่ปูนซีเมนต์ และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55	103

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-12 ปริมาณน้ำสถานะความชื้นเหลวปกติของเพสต์ที่ใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก	103
ก-13 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวมของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.50$ ผสมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดต่างกัน	104
ก-14 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายผสมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดต่างกัน	105
ก-15 ความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายผสมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดต่างกัน	106
ก-16 การหดและขยายตัวแบบแห้งของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย	107
ก-17 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.50$	108
ก-18 กำลังอัดของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายโดยใช้ $w/b = 0.50$	109
ก-19 ขนาดคละมวลรวมเบาสำหรับผสมคอนกรีตโครงสร้างตามมาตรฐาน ASTM C 330	110
ก-20 กำลังอัดของเพสต์ที่ใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่อายุ 28 วัน	110



## รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	6
2.2	ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	10
2.3	โครงสร้างแร่ประกอบดินเหนียว	12
2.4	พื้นที่ผิวของมวลรวม	15
2.5	รูปร่างมวลรวมหยาบมีลักษณะกลม และเป็นเหลี่ยมมุม	17
3.1	แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	31
3.2	ขนาดคละของมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อ โพรงข่ายที่ใช้ศึกษา	32
3.3	มวลรวมผสมคอนกรีต	33
3.4	วัสดุปอซโซลานที่ใช้เป็นมวลรวมผสมคอนกรีต	33
3.5	ก้อนตัวอย่างคอนกรีต	34
4.1	โครงสร้างจุลภาคเศษอิฐดินเผาเคลือบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	42
4.2	ขนาดอนุภาคกับเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของเศษอิฐดินเผาเคลือบ	43
4.3	ขนาดอนุภาคและเปอร์เซ็นต์ค้ำสะสมของเศษอิฐดินเผาเคลือบและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	43
4.4	หินบะซอลต์เนื้อ โพรงข่ายที่นำมาใช้	45
4.5	ขนาดรูโพรงคอนกรีตเกิดจากเนื้อหินบะซอลต์ที่มีลักษณะเป็นรู โพรงไม่ต่อถึงกัน	45
4.6	4.6 กำมะถันที่อยู่คูดอยู่ตามรู โพรงหินบะซอลต์เนื้อ โพรงข่ายที่ใช้	46
4.7	ขนาดคละของมวลรวม	48
4.8	ปริมาณน้ำสภาวะความชื้นเหลวปกติของเพสต์ที่ใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์	49
4.9	พฤติกรรมระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์	50
4.10	อิทธิพลเศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์	50
4.11	อิทธิพลเศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีต่อกำลังอัดของเพสต์	51

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.12	อิทธิพลเศษอิฐดินเผาบนคละเอี๊ยดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อค่ายุบตัว คอนกรีตสด	52
4.13	ความหนาแน่นของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.50$	53
4.14	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตไม่เต็มเศษอิฐดินเผาบนคละเอี๊ยด ที่ $w/b = 0.50$	54
4.15	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเต็มเศษอิฐดินเผาบนคละเอี๊ยด ร้อยละ 30 ที่ $w/b = 0.50$	55
4.16	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเต็มเศษอิฐดินเผาบนคละเอี๊ยด ร้อยละ 50 ที่ $w/b = 0.50$	55
4.17	ความหนาแน่นของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.55$	56
4.18	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตไม่เต็มผงอิฐดินเผา ที่ $w/b = 0.55$	58
4.19	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเต็มผงอิฐดินเผาร้อยละ 30 ที่ $w/b = 0.55$	58
4.20	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเต็มผงอิฐดินเผาร้อยละ 50 ที่ $w/b = 0.55$	58
4.21	อิทธิพลของอายุบ่มต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่ $w/b = 0.50$	59
4.22	อิทธิพลของอายุบ่มต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่ $w/b = 0.55$	60
4.23	อิทธิพลของอายุบ่มต่อความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่ $w/b = 0.50$	61
4.24	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของรูโพรงคอนกรีตบะซอลต์ เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.50$ อายุบ่ม 56 วัน	62
4.25	อิทธิพลของอายุบ่มต่อความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่ $w/b = 0.55$	63
4.26	อิทธิพลของอายุต่อการหดและขยายตัวแบบแห้งของก้อนตัวอย่างคอนกรีต บะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.50$	64
4.27	อิทธิพลของอายุต่อการหดและขยายตัวแบบแห้งของก้อนตัวอย่างคอนกรีต บะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.55$	65

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ภาพร่างการหดตัวแบบแห้งขององค์ประกอบคอนกรีตบะซอลเนื้อโพรงข่าย	66
4.29 อิทธิพลของอายุบ่มต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย โดยใช้ $w/b = 0.50$	67
4.30 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย	68
4.31 อิทธิพลของอายุบ่มต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย โดยใช้ $w/b = 0.55$	68
4.32 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.50$	69
4.33 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.55$	70
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความหนาแน่นคอนกรีตที่ $w/b = 0.50$	72
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความหนาแน่นคอนกรีตที่ $w/b = 0.55$	72
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่ $w/b = 0.50$	73
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่ $w/b = 0.55$	74
4.38 ความแปรปรวนของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อใช้เศษอิฐดินเผาบลละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์	75
4.39 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายไม่เติมเศษอิฐดินเผาบลละเอียด ที่ $w/b = 0.50$ อายุบ่ม 28 วัน	76
4.40 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบลละเอียดร้อยละ 50 ที่ $w/b = 0.50$ อายุบ่ม 28 วัน	77
4.41 เปรียบเทียบปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.50$ ผสมเศษอิฐดินเผาบลละเอียดในอัตราส่วนต่างกันในที่อายุบ่ม 28 วัน	78
4.42 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายไม่เติมเศษอิฐดินเผาบลละเอียดที่ $w/b = 0.55$ อายุบ่ม 28 วัน	79
4.43 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบลละเอียดร้อยละ 50 ที่ $w/b = 0.55$ อายุบ่ม 28 วัน	80

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.44 เปรียบเทียบปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.55$ ผสมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดในอัตราส่วนต่างกันในอายุบ่ม 28 วัน	81
4.45 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายไม่เติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดที่ $w/b = 0.50$ อายุบ่ม 56 วัน	82
4.46 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 ที่ $w/b = 0.50$ อายุบ่ม 56 วัน	83
4.47 เปรียบเทียบปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.50$ ผสมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดในอัตราส่วนต่างกันในอายุบ่ม 56 วัน	84
4.48 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายไม่เติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดที่ $w/b = 0.55$ อายุบ่ม 56 วัน	85
4.49 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 ที่ $w/b = 0.55$ อายุบ่ม 56 วัน	86
4.50 เปรียบเทียบปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ $w/b = 0.55$ ผสมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดในอัตราส่วนต่างกันในอายุบ่ม 56 วัน	87
ก-1 ความชันเหลวปกติของเพสต์จากกระยะจมเข็มไวแคตเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. กับ ปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้น	100
ก-2 ระยะเวลาก่อตัวขึ้นต้นของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผาบดละเอียด	101
ข-1 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 10 ที่ $w/b = 0.50$ บ่ม 28 วัน	112
ข-2 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 20 ที่ $w/b = 0.50$ บ่ม 28 วัน	113
ข-3 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 30 ที่ $w/b = 0.50$ บ่ม 28 วัน	114
ข-4 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 10 ที่ $w/b = 0.55$ บ่ม 28 วัน	115
ข-5 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 20 ที่ $w/b = 0.55$ บ่ม 28 วัน	116

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข-6	คอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่ง่ายเต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 30 ที่ $w/b = 0.55$ บ่ม 28 วัน	117
ข-7	คอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่ง่ายไม่เต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียด ที่ $w/b = 0.50$ บ่ม 56 วัน	118
ข-8	คอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่ง่ายเต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 10 ที่ $w/b = 0.50$ บ่ม 56 วัน	119
ข-9	คอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่ง่ายเต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 20 ที่ $w/b = 0.50$ บ่ม 56 วัน	120
ข-10	คอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่ง่ายเต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 30 ที่ $w/b = 0.50$ บ่ม 56 วัน	121
ข-11	คอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่ง่ายเต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 10 ที่ $w/b = 0.55$ บ่ม 56 วัน	122
ข-12	คอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่ง่ายเต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 20 ที่ $w/b = 0.55$ บ่ม 56 วัน	123
ข-13	คอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่ง่ายเต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 30 ที่ $w/b = 0.55$ บ่ม 56 วัน	124

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการพัฒนาความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการของประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดถูกนำมาใช้ในการผลิตมากขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่ามากที่สุด วัสดุหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้แก่คอนกรีต โดยมีชนิดมวลรวมที่ใช้ผลิต ได้แก่ หินปูนหรือหินแกรนิต หินทราย ปูนซีเมนต์ และน้ำเป็นหลัก โดยเฉพาะหินแกรนิต (Granite) ซึ่งจัดอยู่ในประเภทของหินอัคนี (Igneous rocks) เกิดจากการหลอมตัวของแร่ธาตุจากความร้อนใต้พิภพ หินแกรนิตที่พบโดยทั่วไปถูกทับถมด้วยชั้นหินบะซอลต์เนื้อแน่นและชั้นหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (Vesicular Basalt) ซึ่งอยู่ด้านบนสุดมีลักษณะเป็นรูโพรง โดยปกติแล้วหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายมักนำไปย่อยและใช้เป็นวัสดุผสมทำอิฐบล็อก ใช้ถมบริเวณที่ลุ่มหรือบดอัดทำถนน จากข้อมูลสถิติการใช้ประโยชน์ของ หินปูน และหินบะซอลต์ พ.ศ. 2551 ของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม (<http://www.service.nso.go.th>) สำหรับการก่อสร้างพบว่าหินบะซอลต์ถูกนำไปใช้ในปริมาณ 8,736,654 ตัน คิดเป็นร้อยละ 12.70 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ประโยชน์จากหินปูนที่ 68,661,566 ตัน จากปริมาณหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่มีปริมาณร้อยละ 40 ของหินบะซอลต์ที่ผลิตได้คิดเป็นปริมาณ 3,494,661 ตัน เป็นหินที่ไม่นิยมนำไปใช้ผลิตคอนกรีต ดังนั้นถ้านำหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายมาผลิตเป็นคอนกรีตและมีน้ำหนักเบา เนื่องจากสภาพทางกายภาพของหินที่มีรูโพรงได้ก็จัดเป็นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้อีกวิธีหนึ่ง โดยแหล่งหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายจะพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยโดยเฉพาะบริเวณ เขาคระโดง จังหวัดบุรีรัมย์ ซึ่งเคยเป็นแหล่งปะทุของภูเขาไฟมาก่อน ลักษณะของหินที่ผลิตได้จะมีทั้งส่วนที่มีรูโพรง (หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย) และส่วนที่มีเนื้อแน่นเมื่อเปรียบเทียบกับหินที่มีรูโพรงกับหินที่ผลิตได้ทั้งหมดพบว่ามีมากถึงร้อยละ 40 ถึง 60

จากข้อมูลสถิติการนำหินปูนไปใช้งานของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2547 ถึง พ.ศ. 2551 แสดงใน ตารางที่ 1.1 พบว่าหินปูนได้

นำไปใช้สำหรับผลิตปูนซีเมนต์มากถึงร้อยละ 65-80 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งเป็นปริมาณที่มาก

ตารางที่ 1.1 การใช้ประโยชน์จากหินปูนสำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง พ.ศ. 2547 ถึง พ.ศ. 2551

การนำไปใช้งาน	พ.ศ. 2547 (ตัน)	พ.ศ. 2548 (ตัน)	พ.ศ. 2549 (ตัน)	พ.ศ. 2550 (ตัน)	พ.ศ. 2551 (ตัน)
ผลิตปูนซีเมนต์	57,354,380	53,383,775	64,108,994	60,042,538	55,845,113
อุตสาหกรรมก่อสร้าง	72,594,907	81,818,300	80,042,761	80,729,597	68,661,566
อุตสาหกรรมอื่นๆ	1,936,300	2,081,248	3,767,744	3,756,709	3,924,037

ที่มา : กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม

<http://www.service.nso.go.th>

ดังนั้นถ้าสามารถนำวัสดุที่เหลือใช้หรือของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อใช้เป็นวัสดุประสานได้ ก็ถือว่าเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่ามากที่สุด สามารถช่วยยืดระยะเวลาการลดปริมาณของหินปูนได้ อย่างไรก็ตามวัสดุที่เหลือใช้หรือของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตก็ไม่สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทุกชนิด เนื่องจากวัสดุบางชนิดอาจจะส่งผลเสียต่อสมบัติของคอนกรีตได้ ดังนั้นวัสดุที่คัดเลือกเพื่อใช้สำหรับแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะต้องมีสมบัติที่ดีต่อคอนกรีต นั่นคือควรมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolanic materials) ตามกำหนดไว้ ASTM C618 จากอุตสาหกรรมผลิตอิฐดินเผาพบว่ามีเศษอิฐดินเผาที่ไม่ได้คุณภาพนำไปใช้งานได้อยู่ที่ราวร้อยละ 5 ถึง 10 จากข้อมูลการผลิตอิฐดินเผาของเตาเผาอิฐบ้านคลองเป็ด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา สามารถผลิตอิฐทั้งหมด 144,000 ก้อนต่อปี ซึ่งมีส่วนแตกหักเสียหายประมาณ 7,200 ถึง 14,400 ก้อนต่อปี ดังนั้นถ้านับรวมเตาเผาอิฐที่มีทั้ทั้งประเทศก็ถือว่าในแต่ละปีจะมีเศษอิฐแตกหักเหลือทิ้งจำนวนมาก โดยทั่วไปแล้วดินเหนียวที่นำมาผลิตจะไม่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้แต่เมื่อเผาในอุณหภูมิระหว่าง 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส ก็จะสามารทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี (Baronio and Bindat , 1997) ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงได้มีแนวความคิดนำเศษอิฐดินเผาจากเตาเผาอิฐที่อยู่ภายในท้องถิ่นมาบดละเอียดใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เพื่อศึกษาผลกระทบและความเป็นไปได้สำหรับนำไปใช้ผสมคอนกรีตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นมวลรวมหยาบในการหล่อคอนกรีต
- 2) ประเมินผลกระทบการนำเศษอิฐดินเผาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสำหรับใช้เป็นตัวประสานในคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นทางเลือกหนึ่งในการนำหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายใช้เป็นมวลรวมหยาบในการผสมคอนกรีตเพื่อใช้ทดแทนหินแกรนิตและหินปูนในพื้นที่ขาดแคลน
- 2) นำเศษอิฐที่ทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตอิฐดินเผามาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ลดปริมาณของเสียลงให้เกิดสินค้าผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศน์
- 3) ส่งเสริมแรงจูงใจใช้ประโยชน์ของวัสดุของเสียหรือเหลือใช้ที่มีอยู่มาให้เกิดประโยชน์สูงสุดและยั่งยืน

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ผลิตคอนกรีต โดยใช้หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นมวลรวมหยาบ ใช้ผงอิฐดินเผาบดละเอียดจากเศษอิฐของเตาเผาอิฐมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักร้อยละ 10 20 30 และ 50 เพื่อเป็นวัสดุประสาน โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไว้ 2 ส่วนคือ 0.50 และ 0.55 วิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของมวลรวมบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่นำมาผสมคอนกรีต วิเคราะห์ผลกระทบการก่อตัวของเพสต์และกำลังอัด รวมถึงสมบัติการรับกำลังอัด ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ การหดตัวแบบแห้ง ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และหาปริมาณแร่ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของคอนกรีต คอนกรีตจะทดสอบที่อายุ 1 วัน และที่บ่มโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 7 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ยกเว้นการทดสอบหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตจะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ โดยใช้ระยะเวลาทดสอบถึง 90 วัน



## บทที่ 2

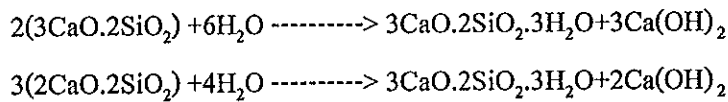
### วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

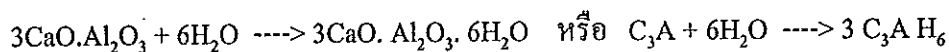
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อรวมตัวกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้น สามารถแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ดังนี้

1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ) ปริมาณร้อยละ 50 - 70 โดยปริมาตร จะทำหน้าที่เชื่อมประสานส่วนผสมของคอนกรีตให้จับตัวกันและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ปริมาณร้อยละ 20 - 25 โดยปริมาตร จะไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ใดๆ เลย ดังสมการต่อไปนี้



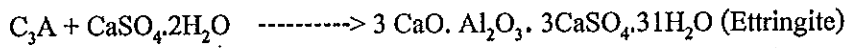
ผลของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  กับน้ำได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $CSH + Ca(OH)_2$ ) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นจะเกิดเมือก (Gel) เมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ นอกจากนี้  $Ca(OH)_2$  ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมีค่า pH. ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดี

2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $C_3A$ ) จะเกิดทันทีทันใดและก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการต่อไปนี้



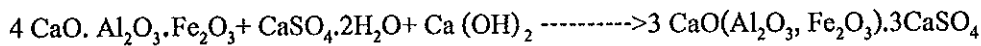
ดังนั้นจึงต้องหน่วงคอนกรีตให้เกิดปฏิกิริยาช้าลงโดยใส่ยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) เข้าไปในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นของ

แอดตริงไกต์ (Ettringite) บนผิวของอนุภาค  $C_3A$  ดังแสดงในรูป 2.1 ข) ชั้นของแอดตริงไกต์ ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ  $C_3A$  ทำให้การก่อตัวช้าลงดังแสดงในสมการดังนี้

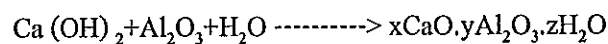
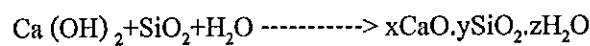


ในช่วงแรกการพัฒนากำลังจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  และ  $C_2S$  เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของแอดตริงไกต์ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  โดยจะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของแอดตริงไกต์แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิดแอดตริงไกต์ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง จนกระทั่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  เปลี่ยนแอดตริงไกต์เป็นโมโนซัลเฟต (Monosulphate) ดังแสดงใน รูปที่ 2.1 ข)

3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟรไรต์ ( $C_4AF$ ) จะเกิดในช่วงต้น ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยากับยิปซัมและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของซัลโฟอะลูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลโฟเฟรไรต์ (Sulphoferrite) ดังสมการ



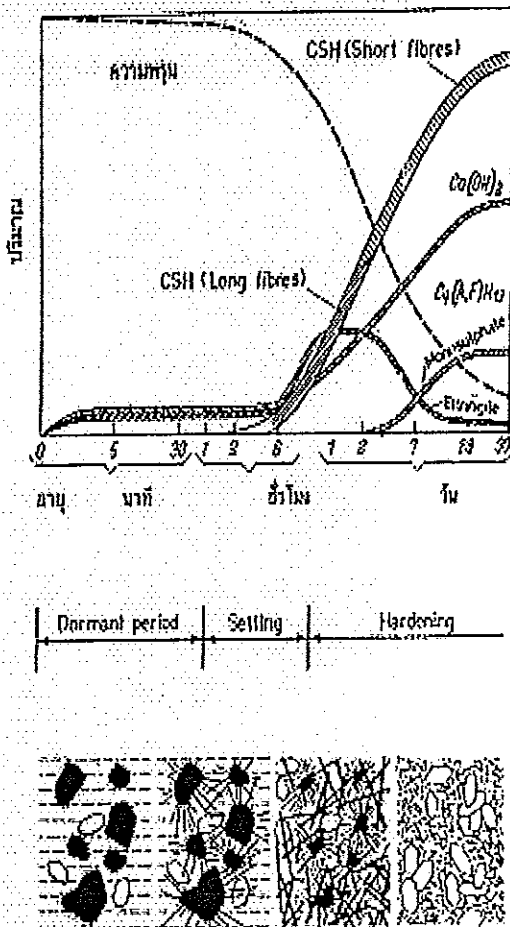
4) ปฏิกิริยาปอซโซลานหลังจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะทำปฏิกิริยาซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) และอะลูมินาไดรอกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) เกิดเป็นสารประกอบหลัก ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ดังสมการต่อไปนี้



โดยเรียกสมการนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานโดยที่ค่า  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ในสมการเป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองนี้มีสมบัติในการยึดประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต เช่นเดียวกับที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.1.2 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เฟสท์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยรวมของสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟรไรต์ทำให้เกิดเมือก CSH และ แอตตริงไคต์ เคลือบอยู่บนเม็ดปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน



ก)

ข)

รูปที่ 2.1 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เฟสท์ ก) การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เฟสท์ ข) ภาพขยายโมโนซัลเฟตและแอตตริงไคต์

ที่มา : ชัชวาล (2536)

โดยทั่วไปการเกิด Dormant Period จะเป็นช่วงเวลาที่ค่อนข้างไม่มีอะไรเกิดขึ้นเป็นเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง ในขณะที่นั้นซีเมนต์เฟสท์ยังคงเหลวและมีความสามารถเทได้อยู่ และเมื่อสิ้นสุดช่วง Dormant Period จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) ซึ่งเป็นช่วงที่ CSH ที่เคลือบอยู่

บนเม็ดปูนซีเมนต์แตกตัวออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีขนาดโตกว่าปูนซีเมนต์ก่อนทำปฏิกิริยา 2 เท่า ทำให้เกิดการเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์เกิดผิวสัมผัสก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ และเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากขึ้น ก่อให้เกิดความเข้มข้นของจุดสัมผัสและจำกัดการเคลื่อนที่ของเม็ดปูนซีเมนต์ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์กลายเป็นของแข็ง ซึ่งเป็นการเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ก) โดยที่ปูนซีเมนต์จะแสดงด้วยเม็ดสีดำ ในขณะที่  $\text{Ca(OH)}_2$  จะแสดงด้วยรูปเหลี่ยม ผลึกของแอดตริงไคต์มีรูปร่างเส้นบางๆ และสั้นๆ และ CHS เส้นเข็มมีความยาวพอสมควร และพบว่างระหว่างช่วง Dormant Period เม็ดปูนซีเมนต์จะเกิดทำปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิด  $\text{Ca(OH)}_2$  และแอดตริงไคต์เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมงผ่านไปเมือก CSH เริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและการขยายตัวของเมือก CSH นี้ก่อให้เกิดการก่อตัว ในขณะที่ปริมาณเพิ่มขึ้นความพรุนของเพสต์ก็จะลดลง กำล้างก็จะเริ่มพัฒนาขึ้นและหลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้วไอออนซัลเฟตถูกใช้หมดไป อะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์เริ่มก่อตัวและแอดตริงไคต์ถูกเปลี่ยนเป็นโมโนซัลเฟต ส่วน  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไปได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นก้อนมีแท่งเข็มโผล่ออกมาที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของเพสต์ลดลงในระยะยาว

### 2.1.3 วัสดุปอชโซลาน

วัสดุปอชโซลานจัดเป็นแร่ผสมเพิ่ม (Mineral Admixture) แบบแร่ธาตุชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปวัสดุปอชโซลานประกอบด้วยสารประกอบของซิลิกอนและอะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ วัสดุปอชโซลานอาจได้จากธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) หรือหินพัมมิช (Pumice) หรือผลิตขึ้นมา ได้แก่ ดินเหนียวหรือหินดินดานเผา (Burnt clay or Shale) และเถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้า วัสดุปอชโซลานที่บดละเอียดจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในซีเมนต์เพสต์กลายเป็นวัสดุประสานยึดเกาะติดกับมวลรวม วัสดุปอชโซลานช่วยทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวน้อยลง มีความทึบน้ำสูง ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยากับน้ำต่ำเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา จึงเหมาะสำหรับคอนกรีตหนา มีอัตราการพัฒนากำล้างอัดซ้ำเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่จะให้กำลังอัดในระยะหลังเท่ากันหรือมากกว่าเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาแต่จะต้องบ่มขึ้นให้นานกว่าปกติ นอกจากนี้ยังมีสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนของสารประกอบพวกซัลเฟตได้ดี (Neville, 1995)

การแบ่งประเภทชั้นคุณภาพของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C-618 สามารถจำแนกออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1) ชั้นคุณภาพ N เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ

2) ชั้นคุณภาพ F เป็นเถ้าลอยที่ได้จากเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือ บิทูมินัส (Bituminous) เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้จะมีสมบัติเป็นปอซโซลาน

3) ชั้นคุณภาพ C เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือ ซับบิทูมินัส (Subbituminous) เถ้าลอยในชั้นคุณภาพนี้นอกจากจะมีสมบัติเป็นปอซโซลานแล้วยังมีสมบัติใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์อีกด้วย หรือบางชนิดอาจจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ประกอบอยู่สูงกว่าร้อยละ 10

ประเภทชั้นคุณภาพของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C-618 ทั้งสามประเภทได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทคุณภาพวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C-618

สมบัติทางเคมี	ประเภทวัสดุปอซโซลาน		
	N	F	C
- ปริมาณความชื้นมากที่สุดไม่เกิน (%)	3	3	3
- การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้มากที่สุด (%)	10	12	6
- ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ + อะลูมิเนียมออกไซด์ + เฟร์ริกออกไซด์ไม่น้อยกว่า (%)	70	70	50
- ซัลเฟตไม่เกิน (%)	4	5	5
- แมงกานีสออกไซด์ไม่เกิน (%)	5	5	5
- โซเดียมออกไซด์ไม่เกิน (%)	1.5	1.5	1.5
สมบัติทางกายภาพ			
- ปริมาณที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่นเกิน (%)	34	34	34
- ค่าดัชนีกำลังเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า (%)	75	75	75
- ความต้องการน้ำไม่เกิน (%)	115	105	105

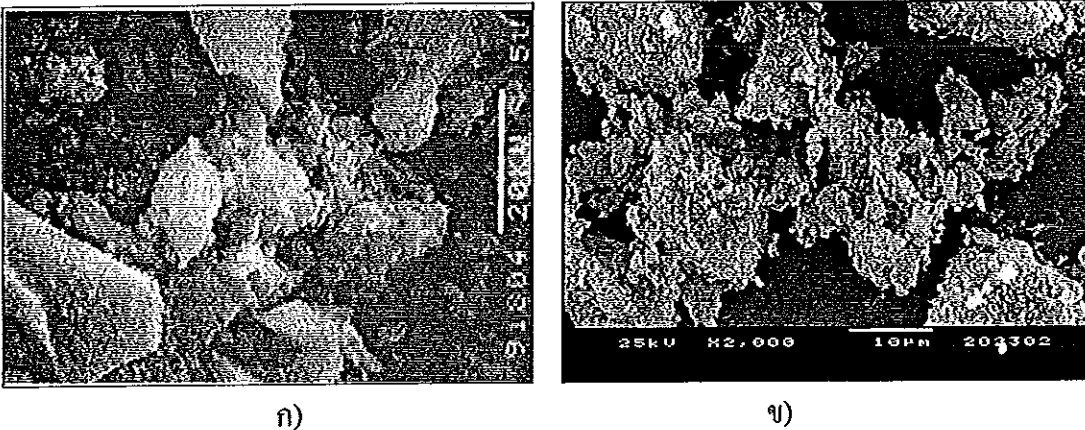
ที่มา : ASTM C 618

ปัจจุบันวัสดุปอชโซลานธรรมชาติส่วนใหญ่จะผ่านกระบวนการปรับปรุงได้แก่ การควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาและการบดละเอียด วัสดุปอชโซลานที่มีคุณภาพที่ดีจะต้องมีความละเอียดมากเนื่องจากช่วยเร่งการเกิดได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งวัสดุปอชโซลานธรรมชาติอาจจะเป็นดินเหนียวที่เผาให้แตกตัว (Calcined Clay) หินดินดานเผาให้แตกตัว (Calcined Shale) และดินขาวแปร (Metakaolin) โดยดินเหนียวที่เผาให้แตกตัวได้นำมาใช้ในการก่อสร้างทั่วไปมากเช่นเดียวกับการใช้ วัสดุปอชโซลานชนิดอื่นๆ โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในช่วงประมาณระหว่างร้อยละ 15 ถึง 35 เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานต่อสารละลายซัลเฟต (Farrell et al., 1999) ควบคุมปฏิกิริยาแอลคาไล-ซิลิกา (Turanli et al., 2003) และลดการซึมผ่านของน้ำ โดยมีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 2.2 นอกจากนี้โครงสร้างของอนุภาควัสดุปอชโซลานธรรมชาติได้แสดงภาพถ่ายกำลังขยายสูง (Scanning Electron Microscopy -SEM) ดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทั่วไปของ เศษอิฐดินเผา หินดินดานเผาให้แตกตัว และ ดินขาวแปร

องค์ประกอบทางเคมี	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน (%)		
	เศษอิฐดินเผา **	หินดินดานเผา * ให้แตกตัว	ดินขาวแปร *
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	25.49	20	43
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	63.89	50	53
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.29	8	0.10
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.73	8	0.50
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	-	0.40	0.10
โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	0.95	-	0.40
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)	-	-	0.05
สูญเสียจากการเผาไหม้ (LOI) (%)	-	3	0.70
Blaine Fineness, cm <sup>2</sup> /g.	189,900	7,300	190,000
Relative Density (%)	-	2.63	2.50

ที่มา : \* INSEE Concrete Handbook (2551) \*\* Toledo Filho et al (2007)



รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) อนุภาคของดินดานที่เผาแตกตัวที่กำลังขยาย 5000 เท่า และ ข) อนุภาคดินเหนียวที่เผาให้แตกตัวที่กำลังขยาย 2000 เท่า  
ที่มา : INSEE Concrete Handbook (2551)

#### 2.1.4 ผลกระทบของปอซโซลานต่อคอนกรีตสด

เมื่อใช้ปริมาณของปอซโซลานที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อคอนกรีตสดที่หลากหลายกันออกไปดังนี้

1) ความต้องการน้ำ โดยทั่วไปส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยจะมีความต้องการน้ำน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบที่ค่ายุบตัวที่เท่ากัน การใช้เถ้าลอยมากขึ้นสามารถช่วยลดปริมาณน้ำได้มาก อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยบางชนิดอาจเพิ่มความต้องการน้ำขึ้น การใช้ดินเผาและดินดานเผา มักจะมีผลกระทบต่อความต้องการน้ำไม่มากนัก เมื่อใช้ในปริมาณปกติ ส่วนการใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติชนิดอื่นๆ จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นและการลดลงของปริมาณน้ำที่ต้องการ

2) ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต เถ้าลอย ตะกรัน ดินเหนียวและหินดินดานที่เผาให้แตกตัว มักจะเพิ่มความสามารถเทได้ของคอนกรีตเมื่อค่ายุบตัวมีค่าเท่ากัน ในขณะที่เขม่าซิลิกาอาจส่งผลให้ส่วนผสมคอนกรีตมีความหนืดมากขึ้นซึ่งแก้ไขด้วยการเติมสารลดน้ำพิเศษ เพื่อรักษาความสามารถในการเทได้เพียงพอต่อการทำให้แน่นตัว

3) การเข้มน้ำและการแยกตัว โดยทั่วไปคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นผสมจะมีการเข้มน้ำและการแยกตัวน้อยกว่าคอนกรีตปกติ ทำให้นิยมใช้เถ้าลอยในคอนกรีตที่ขาดส่วนผสมของมวลรวมละเอียด เนื่องจากคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมมีความต้องการน้ำลดลง ทำให้เกิดการเข้มน้ำลดลงตามไปด้วย ส่วนการใช้ดินเหนียวและหินดินดานที่เผาให้แตกตัว และดินขาวแปรจะมีผลกระทบต่อการใช้เข้มน้ำน้อยมาก

4) ความร้อนจากการปฏิกิริยาไฮเดรชัน การใช้วัสดุปอซโซลานมาใช้ผสมคอนกรีต จะส่งผลให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นสามารถลดความร้อนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตได้

5) การก่อตัว โดยทั่วไปการใช้เถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดจะหน่วงระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ซึ่งระยะเวลาของการหน่วงการก่อตัวจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่นปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปริมาณน้ำที่ต้องการ ชนิดและความไวต่อปฏิกิริยาของวัสดุปอซโซลานและอุณหภูมิของคอนกรีต ข้อดีของการหน่วงคอนกรีตทำให้มีระยะเวลาในการเทเข้าแบบและตกแต่งผิวหน้าได้มากขึ้น นอกจากนี้การใช้ดินคานเผาและดินเหนียวที่เผาให้แตกตัวจะมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวไม่มากนัก

#### 2.1.5 ผลกระทบของปอซโซลานต่อคอนกรีตแข็งตัว

1) กำลังอัดของคอนกรีต การใช้เถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ดินขาว ดินเหนียวและหินดินคานที่เผาให้แตกตัว หรือเขม่าซิลิกา มักช่วยเพิ่มกำลังให้แก่คอนกรีต อย่างไรก็ตามกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยวัสดุเหล่านี้ อาจให้กำลังสูงกว่าหรือต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียวก็ได้

2) ความสามารถในการดูดซึมน้ำและการดูดซึมน้ำ การใช้เถ้าลอย ตะกรันบดละเอียดและวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ สามารถช่วยลดสามารถช่วยลดค่าการซึมน้ำและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต โดยเฉพาะการใช้เขม่าซิลิกาและดินขาวแปรมีผลต่อการลดค่าการซึมน้ำและการดูดซึมน้ำได้อย่างมาก

#### 2.1.6 ผงอิฐดินเผาบดละเอียด

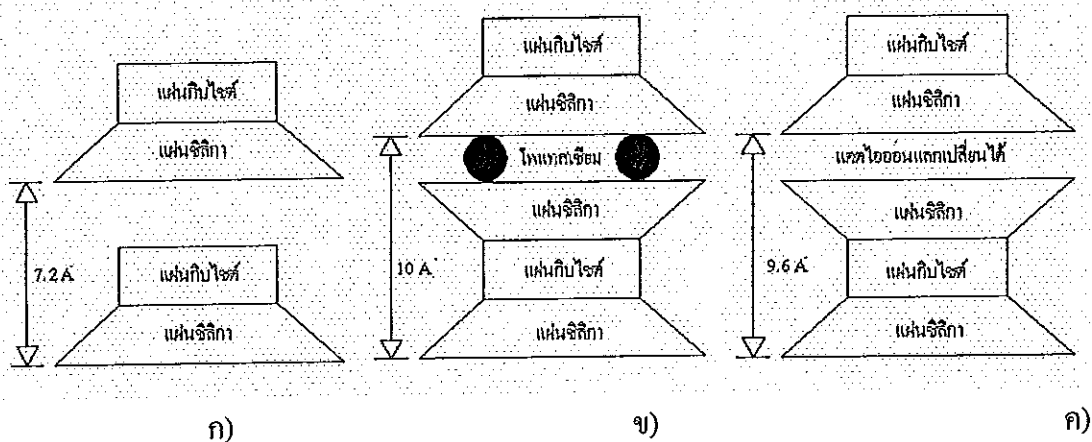
ผงอิฐดินเผาบดละเอียดได้จากการนำเศษอิฐหรืออิฐดินเผาผ่านกระบวนการบดละเอียด ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ทุกภาคของประเทศไทย โดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ กระบวนการผลิตอิฐจะนำดินเหนียวจากธรรมชาติที่อาจจะมีส่วนประกอบของควอตซ์ เฟลด์สปาร์ และแร่ชนิดอื่นๆ มาคัดแยกเม็ดหินก้อนใหญ่ออกก่อนแล้วผสมน้ำนวดให้เนื้อวัสดุเข้ากัน หลังจากนั้นเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูป ตากให้แห้ง แล้วทำการเผาอิฐ ความร้อนจากการเผาจะทำลายผลึก โครงสร้างของดินเหนียวผลที่ได้จะอยู่ในรูปของสารวัสดุปอซโซลานที่ไม่เสถียรเมื่อเผาในอุณหภูมิ 450 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินในดิน



ที่นำมาทำ สารที่ไม่เสถียรนี้จะมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับปูนขาวทำให้เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮดรตสามารถพัฒนากำลังได้เพิ่มมากขึ้น (Böke et al., 2006) ความละเอียดของผงอิฐดินเผาละเอียดจะมีความสำคัญต่อการทำปฏิกิริยาไฮดรชันมาก เนื่องจากมีพื้นที่ผิวเพื่อเพิ่มโอกาสในการเข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้ามีความละเอียดมากเกินไปจะทำให้เกิดการดูดความชื้นในอากาศก่อนและจับตัวกันเป็นก้อนก่อนเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้คุณภาพของคอนกรีตเสียไปได้ (คนุพล และคณะ, 2549)

### 2.1.7 โครงสร้างดินเหนียว

ลักษณะของดินเหนียวสามารถบ่งชี้ได้ในเบื้องต้นคือมวลดินที่ประกอบด้วยเม็ดดินที่มีขนาดเล็กๆ เม็ดดินส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นแผ่นบางทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง สารประกอบทางเคมีซึ่งรวมกันขึ้นเป็นเม็ดดินเรียกว่า แร่ดิน (Clay Minerals) โดยปกติแล้วมวลดินที่ประกอบด้วยเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. มากกว่าร้อยละ 50 ของมวลดินทั้งหมดจะจัดอยู่ในประเภทดินเหนียว เม็ดดินเหล่านี้ส่วนใหญ่จะเกิดมาจากการผุกร่อนของหิน โดยวิธีทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งหินที่มีแร่เฟลด์สปาร์ชนิดออร์โทเคลส (Orthoclase Feldspar) เฟลด์สปาร์ชนิดแพลจิโอเคลส (Plagioclase Feldspar) หรือ ไมกา (Mica) แร่เหล่านี้ล้วนมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมและซิลิเกต ทั้งสิ้น หน่วยโครงสร้างพื้นฐานดังกล่าวนี้อาจประกอบกันเป็นแร่ประกอบดินเหนียวที่สำคัญได้ 3 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแร่ประกอบดินเหนียว ก) เทโอลิไนต์ ข) อิลไลต์ ค) มอนต์มอริลโลไนต์  
ที่มา : สันชัย และพานิช (2547)

1) เคโอลิไนต์ (Kaolinite) ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐานของหน่วยซิลิกา (Silica Unit) และหน่วยกิบไซต์ (Gibbsite Unit) สลับกัน ในเมื่อดินเคโอลิไนต์แต่ละเม็ดอาจจะประกอบด้วยหน่วยเหล่านี้จำนวน 70 ถึง 100 หน่วย แต่ละหน่วยยึดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจน (Hydrogen Bonds) และแรงแวน เดอ วาลส์ (Van der Waals Forces) ทำให้โครงสร้างของเคโอลิไนต์มีความแข็งแรงและเสถียรมาก จะมีการเปลี่ยนแปลงหรือสลายตัวได้ยาก ทำให้เคโอลิไนต์เป็นแร่ดินที่มีค่าการขยายตัวต่ำ

2) อิลไลต์ (Illite) เป็นแร่ซึ่งมีกำเนิดมาจากการสลายตัวของแรมส์โคไวต์ (Muscovite) หน่วยโครงสร้างของเมื่อดินประกอบด้วยหน่วยกิบไซต์ประกอบด้วยหน่วยซิลิกา ทั้งด้านบนและด้านล่างมีความแข็งแรงและมั่นคงน้อยกว่าเคโอลิไนต์

3) มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) หน่วยโครงสร้างพื้นฐานมีลักษณะเช่นเดียวกับอิลไลต์ ประกอบด้วยหน่วยกิบไซต์และหน่วยซิลิกาทั้งด้านบนและด้านล่าง แต่มีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ระหว่างหน่วยโครงสร้างทำให้การยึดเหนี่ยวไม่มั่นคงแข็งแรงและทำให้มีการขยายตัวสูง

### 2.1.8 มวลรวมหยาบผสมคอนกรีต

มวลรวมหยาบจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ ในประเทศไทยมีการนำหินชนิดต่างๆ มาใช้เป็นมวลรวมหยาบผสมคอนกรีต ได้แก่ หินตะกอนและหินอัคนี ในบางพื้นที่มีการขาดแคลนหินตะกอนที่นำมาทำเป็นมวลรวมในคอนกรีตจึงใช้หินอัคนีแทน ซึ่งในประเทศไทยส่วนมากได้แก่ หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินอัคนีที่มีการผลิตในประเทศไทย ได้แก่ หินแกรนิตมีแหล่งผลิตอยู่ที่จังหวัดชลบุรี ระยอง ตาก ปราจีนบุรี สงขลา และสุราษฎร์ธานี หินแอนดีไซต์ มีแหล่งผลิตแถบจังหวัดสระบุรี เพชรบุรี และสระแก้ว หินบะซอลต์ มีผลิตแถบจังหวัดสุรินทร์ บุรีรัมย์ และศรีสะเกษ

หินบะซอลต์เป็นหินภูเขาไฟที่มีสีเทาจนถึงดำ เนื้อจุล (Aphanitic Texture) แร่ประกอบที่สำคัญคือ ไพโรอกซีน (Pyroxene) โอลิวีน (Olivine) และบางครั้งมีแคลไซต์ หินบะซอลต์มีความแข็งแรง และสีมักสม่ำเสมออาจเป็นสีดำหรือสีเทาแก่ ลักษณะของเนื้ออาจพบตั้งแต่เนื้อจุลและพวกที่มีโพรงข่าย (Vesicular) ซึ่งโพรงข่ายเหล่านี้บางครั้งพบว่ามีแร่ชนิดอื่นปนอยู่ด้วย หินบะซอลต์ที่มีเนื้อจุลสีดำมีชื่อเรียกตามลักษณะที่เห็นเช่น หินดับเป็ด หรือหินบะซอลต์ที่เป็นรูปพูนมีชื่อเรียกว่า หินบะซอลต์เนื้อ โพรงข่ายหรือถ้ามีแร่ไปบรรจุอยู่ในรูปพูนก็เรียกเสียใหม่ว่า

หินบะซอลต์ฟองในหิน (Amygdaloidal Basalt) โดยทั่วไปหินบะซอลต์เนื้อ โฟรงข่ายมีกำลังแรงกดจุดได้ 9.88 กก./ตร.ซม. และความคงทนสึกหรออยู่ระหว่าง 28.6% ถึง 31.81% (คณพล และคณะ, 2551) หินบะซอลต์เนื้อ โฟรงข่ายที่มีลักษณะรูพรุนจะพบมากทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

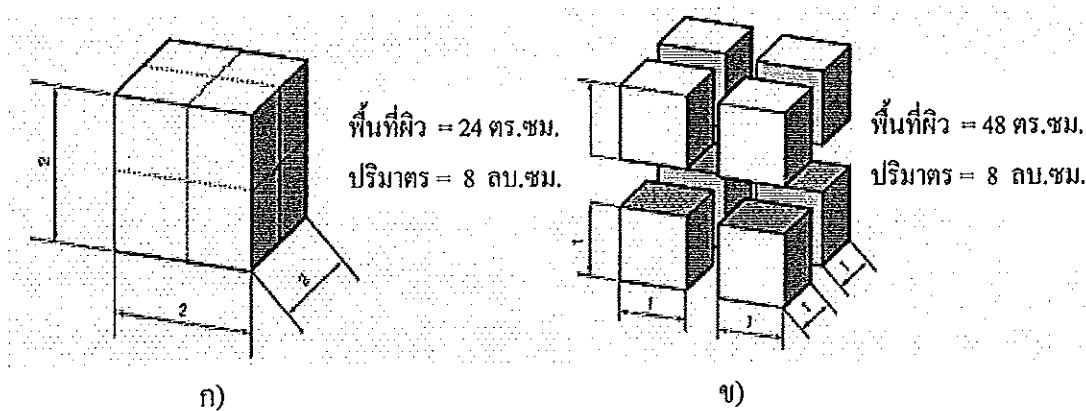
### 2.1.9 ธรณีวิทยาของหินบะซอลต์ที่นำมาใช้

จากการศึกษาลักษณะธรณี สัณฐานของภูเขาไฟบริเวณตอนใต้ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่ากระบวนการกำเนิดภูเขาไฟมีกำเนิดเนื่องจากหินหนืดปะทุขึ้นมาตามรอยแยกของแผ่นดินแล้วแผ่ธารลาวากระจายออกจากช่องประทุปกคลุมพื้นที่บริเวณตอนใต้ การปะทุขึ้นมาครั้งนี้มี 2 ช่วง คือ ช่วงแรกปะทุขึ้นทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ เป็นภูเขาครบุรี ช่วงหลังได้แก่ ภูเขาไฟกระโดง ภูเขาไฟหลุบ ภูเขาไฟอังคาร ภูเขาไฟไพบรบัด ภูเขาไฟพนมรุ้ง ภูเขาไฟสวายจากการศึกษาธรณีวิทยาในภาคสนามบ่งชี้ว่าหินภูเขาไฟครบุรี มีการผุพังสลายตัวมากและเกือบทั่วพื้นที่ ส่วนภูเขาไฟกระโดง ภูเขาไฟหลุบ ภูเขาไฟอังคาร ภูเขาไฟไพบรบัด ภูเขาไฟพนมรุ้ง ภูเขาไฟสวายนั้น ยังมีการผุสลายกลายเป็นวัตถุต้นกำเนิดดินน้อย ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่ามีการการปะทุหินภูเขาไฟออกได้เป็น 2 ช่วง เพราะส่วนภูเขาไฟครบุรี มีชั้นดินหนามาก การที่เป็นเช่นนี้แสดงว่ามีระยะเวลาของการสร้างดินยาวนานกว่า นั่นคือมีอายุมากกว่านั่นเอง ส่วนภูเขาไฟกระโดง ภูเขาไฟหลุบ ภูเขาไฟอังคาร ภูเขาไฟไพบรบัด ภูเขาไฟพนมรุ้ง ภูเขาไฟสวายนั้นชั้นดินบางและมีหินผสมอยู่มาก ลักษณะของหินภูเขาไฟยังคงอยู่มาก และภูเขาไฟบางลูก เช่น ภูเขาไฟกระโดง ยังปรากฏบอมม์ (Bomb) ภูเขาไฟอยู่ และยังมีรูปร่างเกือบสมบูรณ์ แสดงว่าสภาพของพื้นที่ยังได้รับอิทธิพลของกระบวนการผุพังน้อยกว่า ดังนั้นภูเขาไฟกระโดงจึงน่าจะมีอายุน้อยที่สุดลูกหนึ่งของประเทศไทย ร่องรอยการปะทุระเบิด เศษหินที่ผุสลายตัวง่าย เช่น ตะกรันภูเขาไฟ (Slag) กรวดภูเขาไฟ (Cinder) ลูกระเบิดภูเขาไฟ (Bomb) หินถ้ำภูเขาไฟ (Volcanic Tuff) และหินกรวดเหลี่ยมภูเขาไฟ (Breccia) ตามบริเวณปล่องปะทุระเบิดหรือเขตไหล่เนินภูเขาไฟ ภูเขาไฟกระโดงประกอบด้วยหินบะซอลต์เนื้อ โฟรงข่ายและหินบะซอลต์เนื้อตะกรันภูเขาไฟ (Scoriaceous Basalt) หินตะกอนภูเขาไฟ (Pyroclastic Materials) ถ้ามเป็นวัสดุที่ถูกแรงระเบิดปลิวขึ้นไปในอากาศแล้วตกลงมา อาจเป็นตัวในอากาศหรือตกลงมาแล้วแข็งตัวก็ตาม หินเหล่านี้จะตกลงมาทับถมอยู่ตามบริเวณรอบปากปล่องปะทุ ลูกระเบิดภูเขาไฟมีมากกว่าตะกอนภูเขาไฟชนิดอื่น ในเขตอีสานใต้ และในประเทศไทยมีลักษณะรูปร่างเป็นแบบหยดน้ำ จานบิน หัวมันเทศ (Fusiform Bomb) มีขนาดเล็กตั้งแต่เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-3 ซม. ถึงเกือบ 2 เมตร และแต่ละก้อนแสดงร่องรอยของการหลอม

ละลายและการบิดเป็นเกลียวควั่น เนื่องจากถูกแรงประทุเหวี่ยงปลิวขึ้นไปหมุนคว้างในอากาศ หินบะซอลต์ใกล้ปล่องประทุมึลลักษณะแสดงการไหลหลาก (Lava Flow) ชนิดปาฮอยฮอย (Pahoehoe) มีผิวเรียบ (Dermolitic Solidification) แบบบิดเป็นเกลียวเชือก (Ropy or Tape Stray Like) หรือคล้ายผ้าพับทับซ้อนกันเป็นแผ่นบางๆ (Thin Sheets) เนื้อหินเป็นเนื้อละเอียด สีดำถึงเทา มีผลึกแร่ขนาดเล็กของแร่โอลิวีนเนื้อพื้น (Groundmass) เป็นแร่เฟลด์สปาร์ชนิดแพลจิโอเคลส มีผลึกของแร่อะพาไทต์ (Apatite) และแมกนีไทต์ (Magnetite) ออไจต์ (Augite) และพบแร่ซีโอไลต์ แคลไซต์ (Calcite) ตกผลึกในโพรงหิน (<http://www.buriramnawarat.com/saranaru.html>)

### 2.1.10 ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้มีผล โดยตรงกับปริมาณซีเมนต์พิเศษที่ต้องการ และขนาดคละของวัสดุผสม กล่าวคือมวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิว (Surface Area) โดยรวมน้อยกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็กเมื่อมีมวลรวมน้ำหนักเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 พื้นที่ผิวของมวลรวม ก) มวลรวมก้อนใหญ่ก่อนแตกตัว ข) มวลรวมก้อนเล็กที่แตกจากมวลรวมก้อนใหญ่จะมีพื้นที่ผิวมากขึ้น

ที่มา : ชัชวาลย์ (2543)

ดังนั้นมวลรวมขนาดใหญ่จึงต้องการปริมาณซีเมนต์พิเศษเพื่อเคลือบผิวมวลรวม น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถเท่ากัน หรือถ้าใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และค่ายุบตัวที่เท่ากันกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากลดน้ำหรือลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์นั่นเอง ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบควรตัดสินใจเลือกขนาดใหญ่สุดของมวลรวมโดยคำนึงถึงดังต่อไปนี้

1) ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม ต้องมีขนาดไม่เกิน  $1/5$  ของส่วนที่แคบที่สุดของแบบหล่อ ไม่เกิน  $3/4$  ของระยะแคบสุดระหว่างเหล็กเสริมกับแบบหล่อ และไม่เกิน  $1/3$  ของความหนาพื้น

2) สำหรับกรณีใช้ปี้ม ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมต้องไม่เกิน  $1/5$  ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคอนกรีตปี้ม

3) สำหรับกรณีคอนกรีตกำลังอัดสูง การวิบัติของคอนกรีต (Failure) จะเกิดที่มวลรวมแทนที่จะเกิดที่ซีเมนต์เพสต์เหมือนคอนกรีตกำลังอัดทั่วไป เพราะว่าในมวลรวมขนาดใหญ่ที่มีโอกาสที่จะมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กอยู่ (Microcracks) ดังนั้นมวลรวมควรมีขนาดเล็กลงเมื่อใช้ในคอนกรีตกำลังอัดสูง ส่วนขนาดใหญ่สุดของมวลรวมที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไปควรมีขนาดไม่เกิน 40 มม. และควรมีขนาดเล็กลงเมื่อใช้ในงานคอนกรีตกำลังอัดสูง

#### 2.1.11 ขนาดกะของมวลรวม

ขนาดกะของมวลรวมนับเป็นสมบัติที่สำคัญสำหรับการกำหนดปริมาณเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการนำไปห่อหุ้มมวลรวม ผลของขนาดกะมวลรวมที่มีผลต่อสมบัติของคอนกรีตดังนี้

1) ปริมาณซีเมนต์เพสต์ คอนกรีตที่มีขนาดกะของมวลรวมดี มวลรวมหยาบและมวลละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เมื่อนำมาผสมร่วมกันแล้วมวลรวมที่ขนาดเล็กกว่าจะบรรจุอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมที่ใหญ่กว่าส่งผลให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมมีปริมาณน้อยลง และทำให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ยึดมวลรวมมีปริมาณน้อยลง รวมถึงสามารถลดปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ลงได้

2) ความสามารถเทได้ คอนกรีตที่ผสมมวลรวมซึ่งมีขนาดกะดีจะมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่เหลือจากการเติมช่องว่างในมวลรวมมากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมกะขนาดเดียวหรือกะขนาดช่วง ดังนั้นปริมาณซีเมนต์เพสต์ดังกล่าวจะทำหน้าที่หล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างมวลรวมทำให้ความสามารถเทได้เพิ่มขึ้น

3) การแยกตัว โดยปกติการแยกตัวของคอนกรีตมี 2 ชนิด คือ การแยกตัวของมอร์ต้าร์ออกจากเนื้อคอนกรีต เนื่องจากการจับเข่ามากเกินไป ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือการแยก โดยจะมีลักษณะการจมลงของมวลรวม ซึ่งจะดันให้น้ำบางส่วนลอยตัวขึ้นบนผิวหน้าของคอนกรีต มีสาเหตุจากส่วนผสมที่ไม่สามารถกักน้ำที่แผ่กระจายอยู่เอาไว้ขณะที่มวลรวมหนักกว่าน้ำจะจมลง

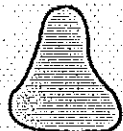
## 2.1.12 รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวม

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมมีอิทธิพลต่อสมบัติของคอนกรีตสดมากกว่าสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มวลรวมที่มีผิวหยาบหรือมีรูปร่างแบนและยาวจะต้องการปริมาณซีเมนต์พิเศษมากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรูปร่างกลมหรือเหลี่ยมที่ระดับความสามารถเท่ากัน ซึ่งตามมาตรฐานอังกฤษ BS 812 Part 1 1975 (รูปที่ 2.5) ได้ให้คำนิยามของรูปร่างและมวลรวมดังนี้

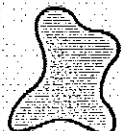
### กลม (Rounded)



กลม



บิ๊ดเบี้ยว



บิ๊ดเบี้ยวมาก

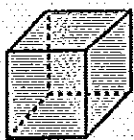


แบน

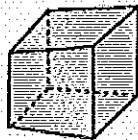


ยาวเรียว

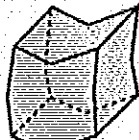
### เป็นเหลี่ยมมุม (Angular)



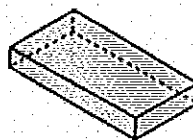
ลูกบาศก์



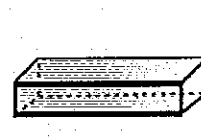
บิ๊ดเบี้ยว



บิ๊ดเบี้ยวมาก



แบน



เรียวยาว

รูปที่ 2.5 รูปร่างมวลรวมหยาบมีลักษณะกลม (Rounded) และเป็นเหลี่ยมมุม (Angular)

ที่มา : ชัชวาลย์ (2543)

1) กลม (Rounded) ลักษณะผิวของมวลรวมเกลี้ยง ไม่มีเหลี่ยมเนื่องจากการเสียดสีกันเอง เช่น ทรายจากแม่น้ำ หรือทรายทะเล มวลรวมที่มีลักษณะกึ่งกลมจะช่วยให้ทำงานง่ายและประหยัด เพราะต้องการปูนซีเมนต์และน้ำในส่วนผสมน้อย เนื่องจากพื้นที่สัมผัสน้อย

2) บิ๊ดเบี้ยว (Irregular) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมไม่สม่ำเสมอโดยธรรมชาติหรือถูกเสียดสีมาบ้างและมีเหลี่ยมมุม เช่น ทรายที่ได้จากบ่อหินเหล็กไฟ ที่ได้จากพื้นดินหรือขุดขึ้นมา

3) เหลี่ยม (Angular) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีเหลี่ยมเกิดจากด้านที่เรียบมาบรรจบกันและเห็นได้ชัด เช่น หินย่อยจากเครื่องโม่ทุกแบบ หินที่ตกตามไหล่เขา

4) แบน (Flat or Flaky) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีความหนาแน่นน้อยมากเมื่อเทียบกับความกว้างหรือความยาว ปกติจะเป็นเหลี่ยมคี่ เช่น หินที่มีลักษณะเป็นชั้น การพิจารณาว่ามวลรวมนั้นแบนก็ต่อเมื่อมีความหนาแน่นน้อยกว่า 0.6 เท่า ของค่าเฉลี่ยขนาดตะแกรงมาตรฐาน ซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาดอนุภาคในแต่ละขนาดตะแกรง

5) ยาวเรียว (Elongated) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีความยาวมาก เมื่อเทียบกับความกว้างและความหนา การพิจารณาว่ามวลรวมนั้นยาวเรียว (Elongated) ก็ต่อเมื่อมีความยาวมากกว่า 1.8 เท่า ของค่าเฉลี่ยขนาดตะแกรงมาตรฐานซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดขนาดอนุภาคในแต่ละขนาดตะแกรง

6) แบนและยาวเรียว (Flaky and Elongated) ลักษณะรูปร่างของมวลรวมมีความยาวมากกว่าความกว้างมาก และมีความกว้างมากกว่าความหนามาก

### 2.1.13 อิทธิพลของรูปร่างมวลรวมต่อสมบัติของคอนกรีต

1) กำลังอัดและความสามารถเทได้ (Strength and Workability) รูปร่างของมวลรวมมีความสำคัญต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดและกำลังอัดของคอนกรีต โดยมวลรวมที่มีรูปร่างแบนหรือยาวเรียวจะมีพื้นที่ผิวโดยรวมมากกว่ามวลรวมปกติเมื่อน้ำหนักของมวลรวมเท่ากัน มวลรวมที่มีรูปร่างแบนหรือยาวเรียวจะมีความต้องการปริมาณน้ำหรือปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้นเพื่อให้ได้ความสามารถเทได้เท่าๆ กัน หรือถ้าใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และค่ายุบตัวเท่าเดิม กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง เพราะต้องเพิ่มปริมาณน้ำหรือเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์นั่นเอง

2) สภาพคงทน (Durability) จากการที่มวลรวมมีรูปร่างแบนหรือยาวเรียว ถ้าใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และค่ายุบตัวเท่าเดิม นอกจากกำลังอัดของคอนกรีตจะลดลง เพราะต้องเพิ่มปริมาณหรือเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์แล้ว ยังมีผลให้ความทนทานของคอนกรีตลดลงอีกด้วย ทั้งนี้เพราะน้ำส่วนหนึ่งจะอยู่ในลักษณะเป็นแอ่งใต้หิน และบางส่วนจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าคอนกรีตหรือที่เรียกว่า การซึม (Bleeding) เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว แอ่งน้ำดังกล่าวจะเป็นโพรงต่อถึงกัน (Inter Connection Void) ทำให้คอนกรีตมีความสามารถซึมผ่านได้ (Permeability) ของน้ำเพิ่มขึ้นและสภาพคงทนลดลง

สำหรับงานคอนกรีตทั่วไปในประเทศไทยมวลรวมที่จะนำมาใช้ควรมีดัชนีความแบน (Flakiness Index) ไม่เกินร้อยละ 40 และดัชนีความยาว (Elongation Index) ไม่เกินร้อยละ 35

ส่วนคอนกรีตที่ใช้ในงานบ่ยมและคอนกรีตกำลังอัดสูงควรมีค่าดังกล่าวไม่เกินร้อยละ 25 (ชัชวาลย์, 2543)

#### 2.1.14 ความสามารถเทได้ของคอนกรีตสด

ในทางทฤษฎีผลรวมของพลังงานที่จะเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค (Internal Friction) เพื่อให้เกิดการอัดแน่นอย่างสมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติพลังงานที่ใส่เข้าไปนั้นจะต้องเอาชนะทั้งแรงเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคและแรงเสียดทานที่ผิว (Surface Friction) ระหว่างเนื้อคอนกรีตกับไม้แบบและเหล็กเสริม นอกจากนี้พลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปในการเขย่าไม้แบบและเขย่าคอนกรีตให้แน่นอีกด้วย ความสามารถเทได้ของคอนกรีตจะประกอบด้วยสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ

1) ความขึ้นเหลว (Consistency) คือ สภาพความเหลวของคอนกรีตซึ่งเกี่ยวข้องกับ การไหลของคอนกรีต

2) การยึดเกาะ (Cohesiveness) คือ สมบัติของเนื้อคอนกรีตที่สามารถจับรวมตัว เป็นกลุ่มหรือสลายตัวออกจากกันได้ยาก ซึ่งเกี่ยวข้องกับแนวโน้มของคอนกรีตที่จะเกิดการแยกตัว หรือการแยกตัว (Segregation)

#### ตารางที่ 2.3 ค่าขุบตัวที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างในประเทศไทย

ประเภทของงาน	ค่าขุบตัวที่เหมาะสม (ซม.)
พื้นถนนสนามบิน	$5.0 \pm 2.5$
คอนกรีตสำหรับงานทั่วไป	$7.5 \pm 2.5$
คอนกรีตสำหรับงานฐานราก	$10.0 \pm 2.5$
คอนกรีตสำหรับงานบ่ยม	$10.0 \pm 2.5$
คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะเล็ก	$10.0 \pm 2.5$
คอนกรีตสำหรับงานเสาเข็มเจาะใหญ่	มากกว่า 15
คอนกรีตสำหรับฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ งานเหล็กเสริมหนาแน่น	มากกว่า 15



ความสามารถเทได้ของคอนกรีตยังต้องคำนึงชนิดของโครงสร้าง วิธีการเทและวิธีการจี้เขย่าเพื่อให้เนื้อคอนกรีตเกิดการอัดแน่น ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีที่กำหนดเป็นมาตรฐานในการวัดค่าความสามารถเทได้ของคอนกรีต แต่ในทางปฏิบัติสามารถประมาณค่าความสามารถเทได้ด้วยการทดสอบค่าความยุบตัว (Slump Test) ค่ายุบตัวไม่ได้เป็นค่าที่วัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตโดยตรง แต่เป็นการวัดความชื้นเหลวของคอนกรีต (Consistency) หรือลักษณะการไหลตัวของคอนกรีต (Flow Characteristic) แม้วิธีนี้จะไม่เหมาะสมสำหรับทดสอบคอนกรีตที่เหลวหรือแห้งมาก แต่ก็มิได้มีประโยชน์อย่างมากและสะดวกสำหรับการควบคุมความสม่ำเสมอของการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จดังแสดงใน ตารางที่ 2.3

#### 2.1.15 ความหนาแน่นรวมของคอนกรีต

เป็นค่าน้ำหนักของคอนกรีตในหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยรวมปริมาณอากาศด้วย มีประโยชน์สำหรับการเปลี่ยนค่าปริมาตรให้เป็นค่าน้ำหนักหรือค่าน้ำหนักให้เป็นค่าปริมาตร เพื่อคำนวณหาค่าน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของคอนกรีต ได้แก่

1) จำนวนและความหนาแน่นของมวลรวมที่นำมาผสมคอนกรีต มวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight Aggregate) ที่ใช้ผลิตคอนกรีตมวลเบา เช่น มวลรวมดินที่ขยายตัว (Expanded Clay Aggregate) มวลรวมหินดินดานที่ขยายตัว (Expanded Shale Aggregate) เวอร์มิคูไลต์ (Vermiculite) หินเพอร์ไลต์ (Perlite) หรือ หินพัมมิช (Pumice) มีหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 60 ถึง 1000 กก./ลบ.ม. ส่วนมวลรวมน้ำหนักหนัก (Heavyweight Aggregate) ที่ใช้สำหรับผลิตคอนกรีตหนัก เช่น แมกนีไทต์ (Magnetite,  $Fe_3O_4$ ) แบไรต์ (Barite,  $BaSO_4$ ) หรือก้อนเหล็ก ที่มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 2100 ถึง 6100 กก./ลบ.ม. และมวลรวมปกติที่ใช้สำหรับผลิตคอนกรีตทั่วไป เช่น หินปูนหรือกรวด มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1100 ถึง 1750 กก./ลบ.ม.

2) ฟองอากาศที่ถูกกักกระจายและปริมาณช่องว่างของน้ำที่ถูกกักอยู่ได้มวลรวมหรือเหล็กเสริม การที่คอนกรีตมีช่องว่างหรือปริมาณอากาศมากขึ้นทำให้เนื้อแท้ของคอนกรีตลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงนั่นเอง

3) อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การที่คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำนั้นจะมีเนื้อแน่นและส่งผลให้ค่าความหนาแน่นสูงขึ้นด้วย

### 2.1.16 ชนิดของคอนกรีต

คอนกรีตสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามความหนาแน่นได้ดังนี้

1) คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete) คือคอนกรีตที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 300-1,850 กก./ลบ.ม. นิยมนำไปใช้ในงานก่อสร้างตั้งแต่ทำเป็นฉนวนกันความร้อน จนถึงใช้เป็นชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น พื้น เสา กาน ผนัง และฐานราก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดน้ำหนักของอาคาร ส่งผลให้เป็นการประหยัดต้นทุนโดยรวม มีความคงทนอยู่ในระดับที่ดีแต่มีความต้านทานต่อการขัดสีต่ำสามารถจำแนกได้แก่

ก) คอนกรีตมวลเบาชนิดฉนวน (Insulating Lightweight Concrete) ความหนาแน่นตั้งแต่ 315 ถึง 1,100 กก./ลบ.ม. ด้านกำลังอัดที่อายุ 28 วันได้ 7 - 70 กก./ซม<sup>2</sup>.

ข) คอนกรีตมวลเบาชนิดโครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete) ความหนาแน่นตั้งแต่ 1,400 ถึง 1,800 กก./ลบ.ม. ด้านกำลังอัดที่อายุ 28 วันได้ไม่ต่ำกว่า 170 กก./ซม<sup>2</sup>.

ค) คอนกรีตมวลกึ่งเบา (Semi - Lightweight Concrete) มีหน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 1,800 ถึง 2,050 กก./ลบ.ม. กำลังอัดที่อายุ 28 วันได้ไม่ต่ำกว่า 120 กก./ซม<sup>2</sup>.

2) คอนกรีตทั่วไป (Normalweight Concrete) คือคอนกรีตที่มีความหนาแน่นประมาณ 2,400 กก./ลบ.ม. ใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไปทั้งในอาคารและงานถนน

3) คอนกรีตมวลหนัก (Heavyweight Concrete) คือคอนกรีตที่มีน้ำหนักมากกว่า 3,200 กก./ลบ.ม. โดยทั่วไปจะใช้สำหรับงานโครงสร้างที่ต้องป้องกันรังสีหรือกัมมันตภาพรังสี

### 2.1.17 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีต

1) การเตรียมก้อนตัวอย่าง คอนกรีตที่ได้รับการทำให้แน่น โดยการกระทุ้งด้วยเหล็ก จะให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าการทำคอนกรีตให้แน่นด้วยเครื่องเขย่า

2) ขนาดและลักษณะของก้อนตัวอย่าง การใช้ขนาดก้อนตัวอย่างที่ต่างจากขนาดมาตรฐานที่กำหนดให้ความสูงเป็น 2 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลาง จะมีผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตเกิดความแตกต่างกัน

3) อัตราการกด ถ้าใช้อัตราการกดสูงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงควรใช้อัตราการกดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ 1.43-3.47 กก./ตร.ซม./วินาที สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอก และ 1.12-2.72 กก./ตร.ซม./วินาที สำหรับก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

4) ความชื้นของก้อนตัวอย่าง ก้อนตัวอย่างที่มีความชื้นจะให้กำลังอัดต่ำกว่าก้อนตัวอย่างที่แห้งเพราะการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ อันเนื่องมาจากการดูดซึมน้ำจะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมลดลง โดยมาตรฐาน ASTM C 39 แนะนำให้ทำการทดสอบก้อนตัวอย่างในสภาพชื้นทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความผันแปรอันเนื่องมาจากระดับของความแห้ง

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Böke et al. (2006) ได้ศึกษาถึงลักษณะพิเศษของการใช้อิฐเป็นมวลรวมในประวัติศาสตร์ของมอร์ตาร์อิฐ-ปูนขาว และพลาสติกอร์ พบว่าผงอิฐจะมีความเป็นปอซโซลานสูงเนื่องจากประกอบด้วยแร่ดินที่มีแคลเซียมต่ำค่อนข้างสูง กระบวนการผลิตอิฐจะนำหินหรือทรายเม็ดหยาบออกจากดินเหนียวแล้วนำมาผสมกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสมและขึ้นรูปนำไปตากแห้งและเข้าสู่กระบวนการเผาออกมาเป็นแท่งอิฐ ความร้อนจะทำให้ลายโครงสร้างของดินเหนียวผลที่ได้สารปอซโซลานที่ไม่เสถียร ซึ่งจะคล้ายกับดินขาวแปรเมื่อให้อุณหภูมิการเผาอยู่ระหว่าง 450 — 800 องศาเซลเซียส ตามแต่ลักษณะชนิดของดินแต่ละแห่ง ถ้าใช้อุณหภูมิเผามากกว่านี้จะทำให้พื้นที่ผิวลดลง

Turanli et al. (2003) ได้ศึกษาการใช้อนุอิฐดินเหนียวเป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อช่วยลดปฏิกิริยาการเป็นด่างของสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ โดยหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์และใช้หินที่มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.20 ถึง 2.00 มม. เป็นมวลรวมหยาบ ผงอิฐดินเหนียวแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสาน และใช้อิฐดินเผาที่เผาอุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส (WB) และ 1000-1100 องศาเซลเซียส (SB) ที่ผ่านกระบวนการบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 20 และ 30 บ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถช่วยยับยั้งการขยายของปฏิกิริยาระหว่างด่างกับซิลิกา (Alkali-Silica Reaction) ได้ ซึ่งปฏิกิริยาด่างกับซิลิกามีค่าลดลงตามการเพิ่มปริมาณผงอิฐดินเหนียวในมอร์ตาร์ที่มากขึ้น

Baronio and Bindat (1997) ได้ศึกษาความเป็นปอซโซลานของอิฐและดินเหนียวบางชนิด พบว่าดินเหนียวไม่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้แต่เมื่อนำไปเผาในอุณหภูมิระหว่าง 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส ก็จะสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ เนื่องจากมีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาสูง ซึ่งจะเกิดการประสานแน่นกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และถ้ามีความละเอียดมากจะทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานดียิ่งขึ้น นอกจากนี้การเผาที่อุณหภูมิเกินกว่า 900 องศาเซลเซียส ไม่ทำให้เกิดเป็นวัสดุปอซโซลานได้ และดินเหนียวบางชนิดเมื่อเผาแล้วอาจจะไม่กลายเป็นวัสดุปอซโซลานหรืออิฐเก่าๆ บางทีก็อาจไม่มีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานก็ได้ อีกทั้ง

อุณหภูมิและเวลาที่ใช้เผาส่วนส่งผลต่อการกลายเป็นวัสดุปอชโซลานทั้งสิ้น นอกจากนี้การแข็งตัวของมอร์ตาร์ที่อยู่ในระดับที่ดีจะได้มาจากการใช้ผงอิฐที่มีความละเอียดและขึ้นอยู่ภายใต้เงื่อนไขของแร่ดินเหนียวที่นำมาผลิตแต่ละชนิด อีกทั้งพบว่าอิฐสมัยใหม่ไม่ค่อยมีความเป็นวัสดุปอชโซลานมากนัก ไม่ใช่แค่เพราะการเผาในอุณหภูมิที่สูงเกินไปเท่านั้น แต่เป็นเพราะองค์ประกอบวัสดุที่นำมาใช้ผลิตเป็นอิฐดินเผามีส่วนประกอบของดินเหนียวน้อยด้วย

Al-Rawas and Hago (2005) ศึกษาการประเมินผลในห้องปฏิบัติการและจากงานสนามของการผลิตวัสดุปอชโซลานจากดินเหนียวเผา โดยคัดเลือกตัวอย่างเหนียวจาก 3 แหล่งทางตอนเหนือของประเทศโอมาน โดยจะเผาดินเหนียวที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลจากการวิเคราะห์ห้องประกอบทางเคมีพบว่ามี 2 แหล่งที่จัดเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีที่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618-98

Toledo Filho et al. (2007) ศึกษาศักยภาพการใช้เศษอิฐดินเผาเพื่อใช้เสริมเป็นวัสดุประสานในประเทศบราซิล เพื่อดูผลกระทบของศักยภาพการใช้เศษอิฐดินเผาทดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยใช้เศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 จากผลทดสอบพบว่าเศษอิฐดินเผาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (วิธี BET) 189,900 ตารางเซนติเมตร/กรัม และสามารถใช้เศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ที่ร้อยละ 10-20 นอกจากนี้ผลการตรวจชนิดแร่ของเศษอิฐดินเผาละเอียดพบไมโครไคลน์ (Microcline) ประกอบอยู่

Sabir et al. (2001) กล่าวว่าเมื่อไม่นานมานี้มีการเอาดินเหนียวซึ่งเผาจนแตกตัวในรูปของดินขาวแปรมาทำเป็นวัสดุปอชโซลานสำหรับมอร์ตาร์และคอนกรีต ความสนใจงานนี้ได้แพร่ออกไปอย่างกว้างขวาง โดยมีเป้าหมายที่ใช้ของเสียและของพลอยได้จากอุตสาหกรรมเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ลง อันเป็นอุตสาหกรรมบั่นทอนสิ่งแวดล้อม เหตุผลอีกประการคือมอร์ตาร์และคอนกรีตซึ่งบรรจุด้วยวัสดุปอชโซลานแสดงความเป็นเลิศด้านสมบัติความคงทน และยังเป็นปอชโซลานประสิทธิผลปรับปรุงโครงสร้างโพรงอย่างมาก ทำให้คอนกรีตด้านทานสารละลายอันตรายได้

Mouli and Khelafi (2007) ศึกษาเรื่องลักษณะพฤติกรรมพิเศษของคอนกรีตมวลรวมเบาที่ผสมด้วยปอชโซลานธรรมชาติ วัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีตได้แก่ ปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบน้ำหนักเบาที่ได้จากแหล่งกำเนิดธรรมชาติและวัสดุปอชโซลานจากธรรมชาติทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของแอลจีเรีย โดยก่อนนำมวลรวมหยาบไปผสมคอนกรีตได้แช่น้ำให้อิ่มตัวก่อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และพบว่าปอชโซลานจะไม่มีสถานะของความเป็นปูนซีเมนต์แต่สามารถแข็งตัวเมื่อผสมกับสารประกอบของน้ำปูนขาว เนื่องจากประกอบด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกตซึ่งจะทำ

ปฏิกิริยากับปูนขาวที่มีอยู่แล้วในคอนกรีต หรือส่วนที่เป็นปูนขาวอิสระที่อยู่ระหว่างกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้ปอชโซลานธรรมชาติจากแอลจีเรียมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน โดยใช้ปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 50 ผลการวิจัยพบว่าการใช้ปอชโซลานแทนที่ร้อยละ 20 ได้กำลังอัดสูงสุด อีกทั้งการใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่มากเกินไป (ร้อยละ 40 ถึง 50) จะทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงทุกอายุบ่มสามารถอธิบายจากการทำปฏิกิริยาของวัสดุปอชโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และกลายเป็น CSH เมื่อใช้ปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ผสมคอนกรีตลดลง ส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ลดลง ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับวัสดุปอชโซลานได้น้อย เมื่อเพิ่มวัสดุปอชโซลานมากขึ้นประสิทธิภาพของคอนกรีตจะลดลง

Yasar et al. (2003) ศึกษาเรื่องสมบัติความแข็งแรงของคอนกรีตเบาโดยใช้มวลรวมตะกรันภูเขาไฟ (Scoria) และใช้เถ้าปอชโซลานจากโรงไฟฟ้าทางตอนใต้ของประเทศตุรกี พบว่าการใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก กำลังอัดคอนกรีตจะสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียวที่อายุบ่มที่ 28 วัน ขึ้นไปสามารถบ่งชี้ว่าการใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตในระยะยาวได้

Kilic et al. (2003) ศึกษาเรื่องคอนกรีตมวลเบากำลังสูงโดยใช้ตะกรันภูเขาไฟเป็นมวลรวมโดยใช้เถ้าปอชโซลานจากโรงไฟฟ้าทางตอนใต้ของประเทศตุรกีและซิลิกาฟูม (Silica fume) แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นตัวประสานอย่างเดียว นอกจากนี้การใช้ตะกรันภูเขาไฟเป็นมวลรวมในการผสมคอนกรีตยังสามารถช่วยทำให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักลดลงกว่าคอนกรีตทั่วไปอีกด้วย

Farrell et al. (1999) ศึกษาความต้านทานทางด้านเคมีของมอร์ต้าร์ผสมผงอิฐบดละเอียดต่อปัญหาของโซเดียมซัลเฟต โดยใช้ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ทราย และผงอิฐดินเผา โดยใช้ผงอิฐบดแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ที่มีไตรแคลเซียมอะลูมิเนตสูง ( $\text{C}_3\text{A}$ ) เพื่อสนใจในแง่ของความต้านทานต่อโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมผงอิฐ ผลที่ได้พบว่าการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์จะเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ผงอิฐที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามผงอิฐแต่ละชนิดจะมีความหลากหลายในการต้านทานการขยายตัวของซัลเฟตเมื่อนำไปใช้แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นเหตุผลทางเคมีและส่วนประกอบต่างๆที่มารวมกัน ได้แก่ ซัลเฟต แก้ว (glass) และอ็อกไซด์ทางด้านเคมี ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมผงอิฐ

นอกจากนี้ซัลเฟตจำนวนน้อยๆ ที่อยู่ภายในผงอิฐจะไม่ส่งผลกระทบต่อ ต่อมอร์ตาร์ทผสมผงอิฐบดได้ และอิฐที่มีผลึกธาตุแคลเซียมสูง (high-calcium glass) ไม่ควรนำมาใช้เป็นวัสดุ پوشโซลาน แต่อิฐที่มีผลึกธาตุแคลเซียมต่ำ (low-calcium glass) เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุ پوشโซลานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้พบว่า การแทนที่ด้วยผงอิฐร้อยละ 30 สามารถช่วยลดการขยายตัวของมอร์ตาร์ทในโซเดียมซัลเฟตได้ดี และยังส่งผลให้น้ำหนักของมอร์ตาร์ทลดลงตามการแทนที่ของผงอิฐดินเผาที่มากขึ้น

Farrell et al. (2000) ศึกษาความต้านทานทางด้านเคมีของมอร์ตาร์ทผสมผงอิฐบดละเอียดต่อน้ำทะเลสังเคราะห์ โดยใช้ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ทราย และผงอิฐบดเพื่อใช้แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ที่มีไตรแคลเซียมอะลูมิเนตสูง ( $C_3A$ ) เพื่อต้านทานจากน้ำทะเลสังเคราะห์ และการสูญเสียกำลังตามมา จากผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ทมีความต้านทานต่อการขยายตัวเพิ่มขึ้นและกำลังลดลงตามการแทนที่ปริมาณผงอิฐที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามความแตกต่างของชนิดผงอิฐเมื่อนำไปแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ท พบว่าระดับความต้านทานน้ำทะเลสังเคราะห์ของมอร์ตาร์ทจะแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความแปรผันทางด้านเคมีและส่วนประกอบของอิฐเอง ได้แก่ ซัลเฟต แก้ว และออกไซด์ทางด้านเคมี ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ทผสมผงอิฐ สรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณผงอิฐดินเผามีอิทธิพลสำคัญต่อการขยายตัวของมอร์ตาร์ทเมื่อสัมผัสกับสารสังเคราะห์จากน้ำทะเล ที่มีส่วนประกอบของโซเดียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมซัลเฟต แคลเซียมซัลเฟต และโพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และพบว่าชนิดของผงอิฐดินเผาจะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อขยายตัว

Nuran and Mevlut (2000) ศึกษาการใช้ประโยชน์จากเศษเซรามิกปูพื้นนำมาใช้ผลิตเป็นซีเมนต์ โดยผ่านกระบวนการบดละเอียดใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 25 30 35 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าเซรามิกบดละเอียดมีสมบัติเป็นวัสดุ پوشโซลาน สามารถยืดระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ได้ และใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก

เจริญวุฒิ (2546) ศึกษาการปรับปรุงซีเมนต์มอร์ตาร์ทโดยใช้ดินขาวแปรสำหรับงานซ่อม พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผสมดินขาวแปรร้อยละ 20 ที่อายุ 1 3 7 และ 28 วัน โดยพิจารณาในส่วนของคุณสมบัติของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก ความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ที่ผสมดินขาวแปรลดลงกว่าเพสต์ตัวอย่างควบคุมทุกอายุทดสอบ และที่อายุ 3 และ 7 วัน ความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเพสต์ผสมดินขาวแปรลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ตัวอย่างควบคุมที่อายุเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาเพสต์ผสมดินขาวแปรตามอายุจะมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยคาดว่าเป็นการเพิ่มขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ยังคงอยู่ และเมื่ออายุครบ 28 วัน ความเข้มของ

แคลเซียม ไฮดรอกไซด์มีค่าลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลงขณะที่การทำปฏิกิริยาปอซโซลานยังคงใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาอยู่

Farrell et al. (2001) ศึกษาการกระจายขนาดของโพรงและกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ได้จากเศษอิฐดินเหนียว พบว่าการใส่ผงอิฐแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในมอร์ตาร์มีอิทธิพลต่อการกระจายของโพรงและกำลังอัดของมอร์ตาร์ ผงอิฐแต่ละชนิดมีผลกระทบทางด้านกายภาพที่มีลักษณะเฉพาะออกไป การบ่มในช่วงเวลาสั้นๆ ของมอร์ตาร์ที่ใช้ผงอิฐเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีโพรงเพิ่มมากขึ้น ร้อยละช่องว่างขนาดเล็กมีน้อยและกำลังลดลง เนื่องจากผงอิฐอยู่กันอย่างอิสระภายในมอร์ตาร์ ส่วนการบ่มในช่วงยาวปรากฏว่ามีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างมอร์ตาร์ตัวควบคุม ส่วนแก้วที่อยู่ในผงอิฐจะมีความสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาของมอร์ตาร์ การรวมตัวของแร่ยิปซัมเพิ่มเติมส่งผลชะลอกำลังอัดช้าลงและเป็นโพรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้กำลังอัดมีความสัมพันธ์กับช่องว่าง โดยเป็นตัวชี้วัดขนาดของโพรงภายในมอร์ตาร์

คุณพล และคณะ (2551) ศึกษาอิทธิพลชนิดของมวลรวมหยาบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต ได้ใช้หิน 3 ชนิด เป็นมวลรวมหยาบได้แก่ หินแกรนิต หินกร่อยแวก และหินบะซอลต์เนื้อโพรงชาย พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินบะซอลต์เนื้อโพรงชาย แม้ให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าการใช้มวลรวมหยาบชนิดอื่นๆ แต่มีความเด่นในเรื่องของความหนาแน่นที่มีค่าน้อยสามารถช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างให้มีค่าน้อยลงได้

Korkanc and Tugrul (2004) ศึกษาการประเมินถึงการเลือกใช้หินบะซอลต์ที่แพร่หลายในเขต Anatolian ตอนกลางของประเทศตุรกี เพื่อเลือกใช้เป็นมวลรวมคอนกรีต หินเหล่านี้มีลักษณะเนื้อและแร่หลากหลาย อาจมีผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลสำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ได้เก็บตัวอย่างอันเป็นตัวแทนของหินบะซอลต์มา 11 ชนิด ผลการทดสอบและเปรียบเทียบกับข้อจำกัดของการยอมรับการใช้งานโดยทั่วไป พบว่าหินบะซอลต์ที่มีโอลิวินเด่นเป็นมวลรวมที่มีคุณภาพดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามหินบะซอลต์ส่วนมากล้วนเหมาะกับการนำไปย่อยผลิตเป็นมวลรวมสำหรับการผลิตคอนกรีตได้

Topcu et al. (1996) ศึกษาการผลิตคอนกรีตกึ่งมวลเบาจากตะกรันภูเขาไฟ (Volcanic slag) โดยแบ่งการทดสอบคอนกรีตออกเป็น 5 ส่วนตามขนาดของตะกรันภูเขาไฟดังนี้ ที่ 0-8, 0-16, 0-31.5, 4-8 และ 8-16 มม. และใช้อัตราส่วนตะกรันภูเขาไฟต่อปริมาตรที่ 0.15, 0.30, 0.45 และ 0.60 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.40 ตลอดการศึกษา และบ่มโดยแช่น้ำเป็นเวลา 28 วัน พบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคจะลดลงเมื่อเพิ่มตะกรันภูเขาไฟผสมคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากโพรงอากาศจากตะกรันภูเขาไฟเข้าไปอยู่ในเนื้อ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอัตราส่วนตะกรันภูเขาไฟต่อปริมาตรมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง

Moufti et al. (2000) ศึกษาถึงการประเมินของการใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมของตะกรันภูเขาไฟตอนกลางของ Harrat Rahat ประเทศซาอุดีอาระเบีย และประเมินการใช้ประโยชน์โดยหล่อก้อนคอนกรีตที่มีอัตราส่วนตะกรันภูเขาไฟที่ต่างๆ กันทั้งทำเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ผลทดสอบค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ได้เป็นไปตามเกณฑ์ของคอนกรีต โครงสร้างการประเมินการใช้ประโยชน์จากตะกรันภูเขาไฟเป็นสารเติมปูนซีเมนต์ จากผลการทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานที่เป็นไปตามมาตรฐานของอิตาลีพบว่าเป็นที่น่าพอใจ การทดสอบดัชนีกำลังกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และประสิทธิภาพของการเพิ่มตะกรันภูเขาไฟเพื่อควบคุมปฏิกิริยาแอลคาไลซิลิกา (Alkali-Silica) ได้ผลเป็นที่น่าพอใจเช่นกัน

Tasong et al. (1998) ศึกษาบทบาทของมวลรวมเมื่อเทียบกับการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น ในบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมกับน้ำปูนชั้น โดยเปรียบเทียบกันระหว่างหินปูนทรายแก้ว หินบะซอลต์ และหินควอร์ตไซต์ ซึ่งมวลรวมทั้ง 4 มีสมบัติทางเคมีที่ต่างกัน สังเกตว่าไอออนมีทั้งดูดซับและปลดปล่อย โดยมวลรวมในระบบสารละลาย และมวลรวมกับปูนซีเมนต์พบว่าหินบะซอลต์มีการเร่งเกิดปฏิกิริยามากที่สุด

Demirdag and Gunduz (2008) ได้ศึกษาสมบัติกำลังของคอนกรีตตะกรันภูเขาไฟสำหรับการทำงานก่อสร้าง พบว่าตะกรันภูเขาไฟสามารถใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตเบาได้ เพื่อประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมโยธาของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมกับตะกรันภูเขาไฟมวลรวมละเอียด (FVSA) ที่มีสีแดง และตะกรันภูเขาไฟมวลรวมหยาบ (CVSA) จากประเทศตุรกี เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอัตราส่วน FVSA และ CVSA ต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก (A/C) พบว่าสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตขึ้นส่วนก่อสร้างมวลเบาจากตะกรันภูเขาไฟที่ใช้ A/C เท่ากับ 5/1 ถึง 25/1 พบว่ามีความหนาแน่นแบบแห้งอยู่ในช่วงระหว่าง 1180-1480 กก./ลบ.ม. และนอกจากนี้การดูดซึมน้ำคอนกรีตอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 13.39-21.50 ซึ่งจากการทดลองพบว่าคอนกรีตตะกรันภูเขาไฟมีกำลังใกล้เคียงกับคอนกรีตมวลเบาทั่วไป

Czarnecki and Gillott (1990) พบการขยายตัวของคอนกรีตซัลเฟอร์ ทำจากมวลรวมหินไซอีไนต์ (syenite) แกรนิต ไดออไรต์ บะซอลต์และแกรย์แวก ผสมกับกำมะถันร้อยละ 20 เมื่อปริมาณกำมะถันเพิ่มถึงร้อยละ 23 การขยายตัวลดลง แต่ยังคงไม่ยอมรับสำหรับคอนกรีตทำจากมวลรวมหินไซอีไนต์ แกรนิตและบะซอลต์ การศึกษาแสดงว่าหินผุและ โดยเฉพาะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากอาจเป็นสาเหตุเกิดปัญหาความคงทนต่อความชื้นหากใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตกำมะถัน การขยายตัวอาจลดลงอย่างมากหากใช้สารผสมเพิ่มที่เหมาะสม

Cole (1979) ศึกษามวลรวมหินบะซอลต์ใช้สำหรับคอนกรีต โครงสร้างในเมลเบิร์น ออสเตรเลีย พบว่าบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายสีเทาแทบไม่พบการเปลี่ยนจากการทดสอบวิธี



เฉพาะสำหรับการเสื่อมสภาพและปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ อย่างไรก็ตามมีการเปลี่ยนแปลงต่อสภาพเปียกและแห้ง การเปลี่ยนแปลงนี้มีส่วนทำให้คอนกรีตหดตัวแบบแห้ง ขนาดของก้อนเปลี่ยนแปลง

Poon and Chan (2006) ศึกษาการทำบดก้อนปูพื้นจากเศษคอนกรีตและเศษอิฐหัก มีวัสดุผสมได้แก่ ปูนซีเมนต์ ละเอียด และเศษก้อนอิฐที่มีขนาดเล็ก อิฐที่ใช้เป็นอิฐดินเหนียวทั่วไป จากการก่อสร้างที่ฮ่องกง ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะบดนำเอากลับมาใช้ใหม่เพื่อใช้เป็นมวลรวมสำหรับการทำบดก้อนปูพื้น และพบว่าการใช้อิฐดินเหนียวสามารถช่วยลดน้ำหนักของบดก้อนปูพื้น และค่ากำลังอัดของบดก้อนปูพื้นได้ลดลงตามการเพิ่มปริมาณของอิฐดินเหนียว นอกจากนี้การดูดซึมน้ำมากขึ้นตามไปด้วย

Debieb and Kenai (2007) ศึกษาการใช้อิฐย่อยหยาบและอิฐย่อยละเอียดเป็นมวลรวมในคอนกรีต มีวัสดุผสมได้แก่ วัสดุหยาบและละเอียดจากธรรมชาติ อิฐย่อยมวลหยาบและอิฐย่อยละเอียด ทรายธรรมชาติ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลจากการทดสอบบ่งชี้ว่าเป็นไปได้ที่สามารถใช้อิฐย่อยมวลหยาบและอิฐย่อยละเอียดเป็นมวลรวมในการผสมคอนกรีต โดยความเหมาะสมของการใช้อิฐมวลละเอียดจำกัดได้ถึงร้อยละ 25 และอิฐย่อยมวลหยาบได้ถึงร้อยละ 50 และพอสรุปได้ว่าการนำอิฐมาผสมคอนกรีตส่งผลให้หน่วยน้ำหนักลดลง และการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุธรรมชาติ

Tommy et al. (2007) ศึกษาผลกระทบของสมบัติมวลรวมต่อคอนกรีตมวลเบา โดยใช้เซรามิกเป็นมวลรวมน้ำหนักเบา และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.40 0.44 และ 0.48 พบว่ากำลังของคอนกรีตสอดคล้องกับหน่วยน้ำหนักของมวลรวม ถ้ามวลรวมมีหน่วยน้ำหนักมากกำลังของคอนกรีตก็มากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากขึ้นทำให้จำนวนโพรงในซีเมนต์พาสต์ และโพรงที่เกิดขึ้นระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์พาสต์เพิ่มมากขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

วิบูลย์ และคณะ (2548) ศึกษาเรื่องการเปรียบเทียบการประเมินกำลังคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิค ฆ้อนชนิดดี และการทดสอบแบบทำลาย พบว่าคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20,000 Hz สามารถเดินทางผ่านของแข็งได้ดีกว่าของเหลวและอากาศ การที่คลื่นเสียงจะส่งผ่านจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้นั้น จำเป็นจะต้องอาศัยตัวกลางในการส่งผ่าน โดยที่ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคที่เคลื่อนผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุนั้นๆ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากการเดินทางผ่านของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคจะมากกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อย ดังนั้นการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคในของแข็งจึงสามารถใช้เป็นตัวชี้ถึงกำลังของของแข็งได้ในทางอ้อม และความหนาแน่นของคอนกรีตได้

พรนรายณ์ (2551) ศึกษาเรื่องอิทธิพลของเถ้าเใยป่าล้มน้ำมันและเถ้าแกลบต่อสมบัติของคอนกรีต มวลรวมกะลาป่าล้มน้ำมัน พบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีตมวลรวมกะลาป่าล้มน้ำมัน จัดเป็นคุณภาพของคอนกรีตระดับพอใช้ซึ่งมีค่าความเร็วคลื่นตามยาว อยู่ระหว่าง 3.000-3.500 กม./วินาที นอกจากนี้ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม และลดลงตามปริมาณเถ้าเใยป่าล้มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากอิทธิพลของความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศและการดูดซึมน้ำ คอนกรีตมวลรวมกะลาป่าล้มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น จะมีความหนาแน่นรวมแห้งในอากาศ การหดตัวแบบแห้งลดลง และการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น

อาปีเต็ง (2551) ศึกษาเรื่องอิทธิพลของเถ้าแกลบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมหิมมิช พบว่าการใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์สำหรับผสมคอนกรีตมากขึ้นจะส่งผลให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตลดลง และระยะเวลาก่อตัว (Setting Time) ทั้งระยะเวลาก่อตัวขั้นต้น (Initial Setting Time) และระยะเวลาก่อตัวขั้นปลาย (Final Setting Time) มีค่าลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราและเถ้าแกลบ

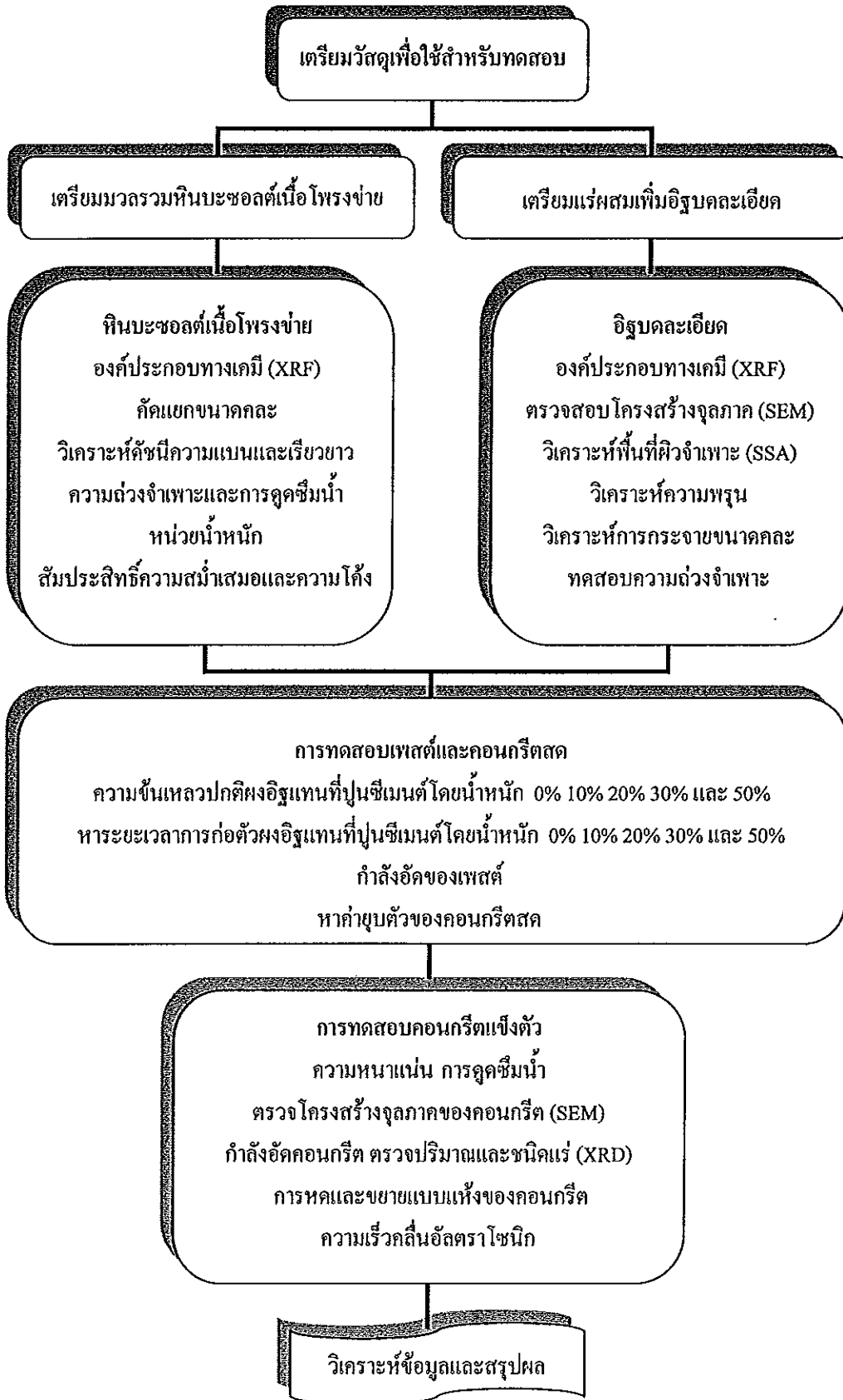
### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้ ได้ศึกษาครอบคลุมตั้งแต่การเตรียมตัวอย่างวัสดุเพื่อใช้สำหรับเป็นมวลรวมผสมคอนกรีต ได้แก่ หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายและผงอิฐดินเผาที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมครอน) พร้อมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย อาทิเช่น วิเคราะห์ขนาดผลึก วิเคราะห์ดัชนีความแบนและเรียวยาว ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ สัมประสิทธิ์ความโค้ง และหน่วยน้ำหนัก รวมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางด้านกายภาพของผงอิฐดินเผาละเอียด ได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (SEM) พื้นผิวจำเพาะ (SSA) และความพรุน การกระจายขนาดผลึก และความถ่วงจำเพาะ อีกทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (XRF) พร้อมเตรียมวัสดุเพื่อทดสอบสมบัติของเพสต์โดยใช้ส่วนผสมระหว่างวัสดุประสานกับน้ำ หาความชื้นเหลือปกติของปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยผงอิฐดินเผาละเอียดในอัตราส่วนต่างๆ พร้อมวิเคราะห์ระยะเวลาก่อตัวและกำลังอัดของเพสต์ เพื่อนำผลการทดสอบไปประเมินพฤติกรรมคอนกรีตแข่งตัวต่อไป

เตรียมก้อนตัวอย่างเพื่อใช้ทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 และ 0.55 ตามลำดับ วัสดุประสานจะใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว และแทนที่ด้วยผงอิฐดินเผาละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 50 ตามลำดับ พร้อมบ่มแช่น้ำอุณหภูมิปกติเป็นเวลา 7 28 และ 56 วัน โดยหล่อก้อนตัวอย่างทดสอบขนาด 10×10×10 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS EN 12390 ซึ่งแต่ละอัตราส่วนของก้อนตัวอย่างแต่ละอายุบ่มต้องหล่อตัวอย่างละ 3 ก้อน และก่อนหล่อก้อนตัวอย่างจะทดสอบค่าความยุบตัวคอนกรีตสดเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของความสามารถในการเทคอนกรีต และเป็นแนวทางสำหรับการนำไปใช้งานจริงต่อไป

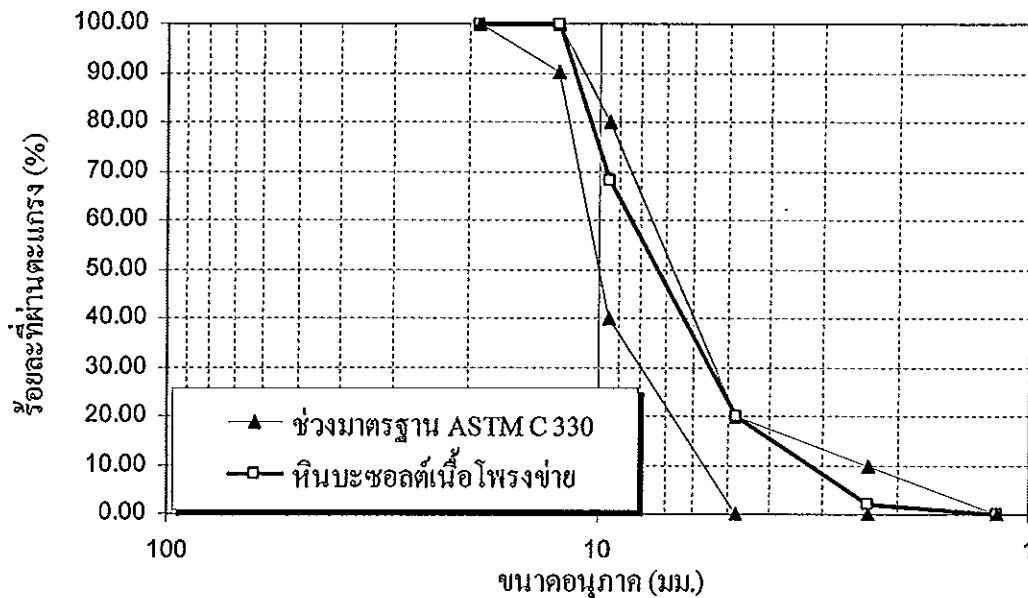
ก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่เตรียมไว้ตามกำหนด นำไปวิเคราะห์สมบัติของคอนกรีต ได้แก่ ความหนาแน่น กำลังอัด การดูดซึมน้ำ ตรวจโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต (SEM) ตรวจปริมาณและชนิดแร่ (XRD) ของคอนกรีต พร้อมทั้งทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคเพื่อตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีต จากนั้นหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 7.5×7.5×28 เซนติเมตร เพื่อทดสอบการหดหรือขยายตัวแบบแห้งของคอนกรีต ผลการทดสอบทั้งหมดมาวิเคราะห์เชิงสถิติอย่างง่ายและสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งขั้นตอนการทำวิจัยได้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 การเตรียมวัสดุ

มวลรวมหยาบใช้หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าจากเหมืองหินจังหวัดบุรีรัมย์ โดยนำมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าล้างทำความสะอาดตกแคคให้แห้งด้วยเครื่องบดปากกรวย (Gyratory mill) และคัดขนาดให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 330 - 77 ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 1.18 ถึง 12.5 มิลลิเมตร มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (2.36 มิลลิเมตร) อยู่ที่ร้อยละ 2 โดยแช่ไว้ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแช่ให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเพื่อเตรียมเป็นมวลรวมหยาบสำหรับผสมคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.2



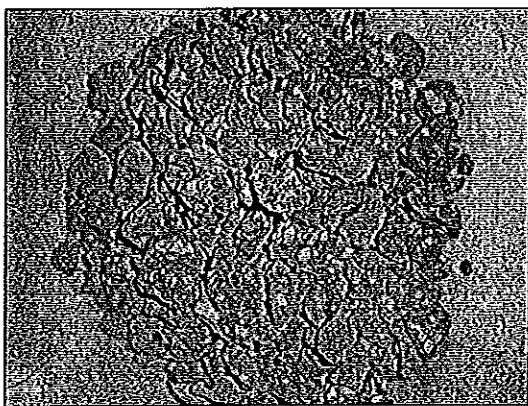
รูปที่ 3.2 ขนาดคละของมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าที่ใช้ศึกษา

ทรายหยาบน้ำจืดจากจังหวัดสงขลา ผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดและอบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 4 (4.76 มิลลิเมตร) เตรียมเป็นมวลรวมละเอียดสำหรับผสมคอนกรีต

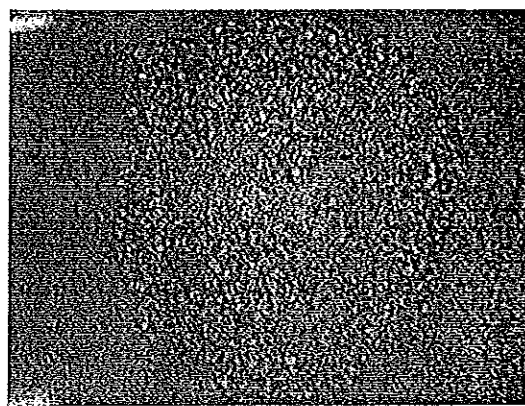
ผงอิฐดินเผาละเอียดได้จากการบดเศษอิฐดินเผา ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากเตาเผาอิฐบ้านคลองเปล ตำบล คอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัด สงขลา เริ่มจากนำเศษอิฐมาบดให้เป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบดด้วยลูกเหล็ก (Ball mill) แล้วร่อนผ่านน้ำสะอาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมครอน) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำเข้าเครื่องบดละเอียดอีกครั้งด้วยลูกเหล็ก (Ball mill) อีกครั้งเพื่อเตรียมไว้สำหรับผสมคอนกรีต

### 3.2 การหล่อก่อนตัวอย่าง

มวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ได้จากการย่อยคัดขนาดตามเกณฑ์ มาตรฐาน ASTM C 330 – 77 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ก) ที่มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 1.18 ถึง 12.5 มิลลิเมตร ผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาแล้วนำขึ้นจากน้ำเช็ดให้อยู่ในสภาพอิมตัวแต่ผิวแห้งเพื่อใช้ผสมเป็นมวลรวมหยาบ ใช้ผสมกับมวลรวมละเอียด ซึ่งจะเป็นทรายหยาบที่คัดขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ไว้เรียบร้อยแล้วดังแสดงในรูปที่ 3.3 ข)

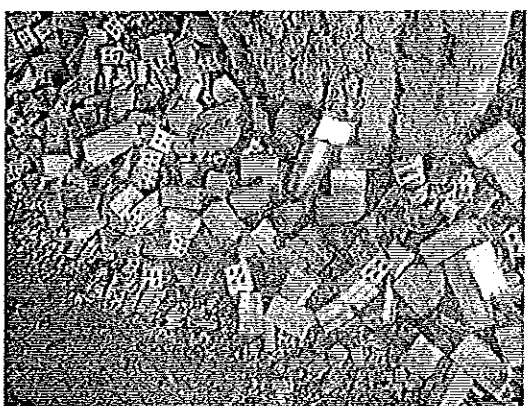


ก)

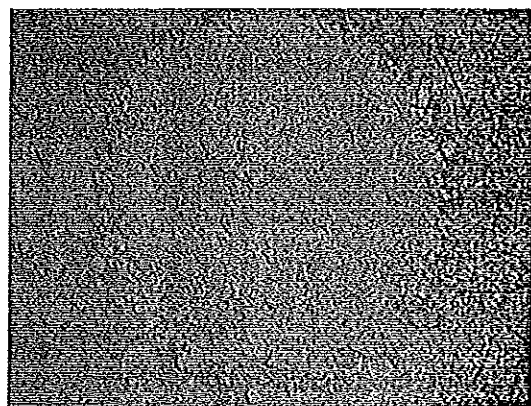


ข)

รูปที่ 3.3 มวลรวมผสมคอนกรีต ก) หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ข) ทรายหยาบร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4



ก)



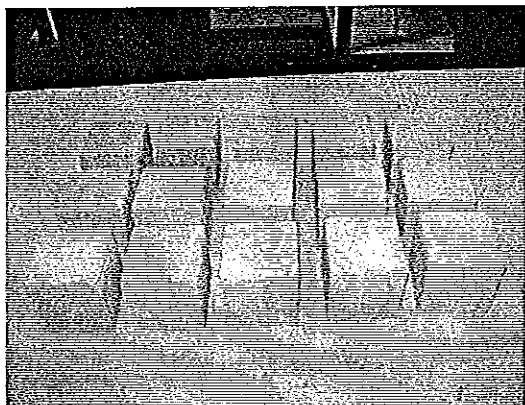
ข)

รูปที่ 3.4 วัสดุปอซโซลานที่ใช้เป็นมวลรวมผสมคอนกรีต ก) เศษอิฐดินเผาที่เหลือจากกระบวนการผลิตอิฐ ข) อิฐดินเผาละเอียดจากเศษอิฐที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325

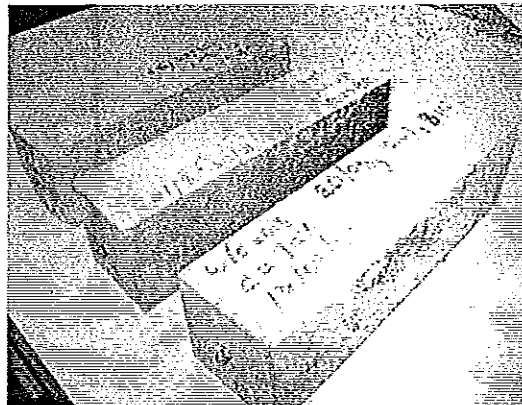
แล้วผสมกับวัสดุประสานได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงอิฐดินเผา บดละเอียดดังแสดงใน รูปที่ 3.4 ข) ในปริมาณร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 โดยน้ำหนักตามลำดับ พร้อมผสมน้ำประปาสะอาดในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงขำย

อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสาน (w/b)	ปริมาณผสมคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)					
	รหัส ตัวอย่าง	หินบะซอลต์	ทรายหยาบ	ปูนซีเมนต์	ผงอิฐบด	น้ำ
0.50	WBP 0	787	582	500	0	250
	WBP 10	787	582	450	50	250
	WBP 20	787	582	400	100	250
	WBP 30	787	582	350	150	250
	WBP 50	787	582	250	250	250
0.55	WBP 0	787	517	500	0	275
	WBP 10	787	517	450	50	275
	WBP 20	787	517	400	100	275
	WBP 30	787	517	350	150	275
	WBP 50	787	517	250	250	275



ก)



ข)

รูปที่ 3.5 ก้อนตัวอย่างคอนกรีต ก) ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 ซม. ใช้ทดสอบกำลังอัด และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ข) ตัวอย่างขนาด 7.5×7.5×28 ซม. ใช้ทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบแห้ง

ก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้สำหรับทดสอบกำลังอัดและวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคมีขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ก) ส่วนก้อนตัวอย่างทดสอบการหดตัวแบบแห้งจะหล่อคอนกรีตขนาด  $7.5 \times 7.5 \times 28$  ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ข) โดยก้อนตัวอย่างทั้งสองจะใช้ปฏิกิริยาส่วนผสมตามตารางที่ 3.1 แล้วจะบ่มคอนกรีตในน้ำอุณหภูมิ 25 เซลเซียส เป็นเวลา 7 28 และ 56 วัน ตามลำดับ

### 3.3 กระบวนการทดสอบ

การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบวัสดุผสมคอนกรีตทั้งในส่วนของมวลรวม หยาบ มวลรวมละเอียด และวัสดุประสาน พร้อมทั้งทดสอบสมบัติของเพสต์ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบทางด้านการก่อตัว รวมถึงสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัว เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมคอนกรีตต่อไป

#### 3.3.1 ทดสอบวัสดุผสมคอนกรีต

1) ทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนของผงอิฐดินเผาละเอียดที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 โดยใช้ชุดเครื่องมือทดสอบ COULTER SA3100 ภาควิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ด้วยวิธีการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen Adsorption) และคำนวณโดยใช้สมการของ BET or Langmuir Function

2) ทดสอบการกระจายขนาดละเอียดของผงอิฐดินเผาละเอียดที่ร้อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 โดยใช้ชุดเครื่องมือ Hydro 2000 MU (A) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3) ทดสอบความถ่วงจำเพาะของผงอิฐดินเผา (Specific Gravity) โดยใช้ชุดเครื่องมือทดสอบขวดเลอว์ชาแตรีแยร์ (LeChatelier) อ่างควบคุมอุณหภูมิ และน้ำมันก๊าด ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 340 โดยผงอิฐดินเผาละเอียดที่นำมาทดสอบจะต้องร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325

4) ทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ใช้สำหรับทดสอบได้จากหินที่คัดแยกขนาดละเอียดไว้เรียบร้อยแล้ว โดยมีขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 330 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 128

5) ทดสอบหน่วยน้ำหนักหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (Unit Weight) โดยจะนำหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่มีขนาดละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 330 ที่ได้เตรียมไว้ก่อนหน้าจะ



ทดสอบด้วยชุดอุปกรณ์ถังรูปทรงกระบอก 3 ขนาด ซึ่งมีความจุ 3 9 และ 14 ลิตร ตามลำดับ การทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 29-89

6) ทดสอบขนาดกะของหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates) โดยใช้ตะแกรงร่วมกับเครื่องร่อนวัสดุผสมหยาบตามมาตรฐาน ASTM E 11 ขนาด 3/4" 1/2" 3/8" เบอร์ 4 เบอร์ 8 และเบอร์ 16 การทดสอบจะยึดตามมาตรฐาน ASTM C 136

7) ทดสอบหาค่าดัชนีความแบนของหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (Flakiness Index) โดยคัดแยกขนาดหินบะซอลต์ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 63.0 มม. 50.0 มม. 37.5 มม. 28.0 มม. 20.0 มม. 14.0 มม. 10.0 มม. และ 6.3 มม. โดยใช้เครื่องมือทดสอบความแบน (Metal Thickness Gauge) ตามมาตรฐานการทดสอบ BS 812: Section 105.1:1989

8) ทดสอบหาค่าดัชนีความเรียวยาวของหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (Elongation Index) โดยคัดแยกขนาดหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50.0 มม. 37.5 มม. 28.0 มม. 20.0 มม. 14.0 มม. 10.0 มม. และ 6.3 มม. และโดยใช้เครื่องมือทดสอบความแบน (Metal Length Gauge) การทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน BS 812: Section 105.2:1990

9) ทดสอบสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient- $C_u$ ) และสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature- $C_c$ ) ของหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

10) ทดสอบวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงอิฐดินเผาละเอียด โดยใช้เครื่องมือเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometry: XRF) จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

10) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของอิฐดินเผาละเอียดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-SEM5200-001 และ WI-RES-SEM-001 จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### 3.3.2 ทดสอบเพสต์และคอนกรีตสด

1) ทดสอบความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ (Normal Consistency of Hydraulic Cement) ของผงอิฐดินเผาละเอียดใช้ทดสอบได้จากเศษอิฐดินเผาละเอียดร่อนน้ำสะอาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 แล้วอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่ได้เตรียมไว้เรียบร้อยแล้วมาผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักที่ปริมาณร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ตามลำดับ ใช้อุปกรณ์ไวแคต (Vicat Apparatus) ขนาดเข็มผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 187

2) ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวขึ้นคั้นและขึ้นปลายของเพสต์ (Time of setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle) นำผงอิฐดินเผาละเอียดที่ได้เตรียมไว้เรียบร้อยแล้วมาผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานจากการทดสอบความชื้นเหลวปกติของเพสต์การทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 191

3) ทดสอบกำลังอัดก้อนตัวอย่างเพสต์ที่แข็งตัว โดยใช้ก้อนตัวอย่างขนาด 5×5×5 เซนติเมตร และใช้อัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 และ 0.55 แทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยผงอิฐดินเผาโดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ตามลำดับ และบ่มโดยการแช่ในน้ำเป็นเวลา 28 วัน

4) ทดสอบค่าความยุบตัวของคอนกรีตสด (Slump Test) โดยใช้ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตาม ตารางที่ 3.1 การทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 143

### 3.3.3 ทดสอบคอนกรีตแข็งตัว

1) ทดสอบความหนาแน่นคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (Density Test) โดยใช้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 10×10×10 ซม. ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ในการผสมคอนกรีต 0.50 และ 0.55 ที่อายุการบ่ม 7 28 และ 56 วัน ตามลำดับ

2) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ในการผสมคอนกรีต 0.50 และ 0.55 ที่อายุบ่ม 28 และ 56 วัน ตามลำดับ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-SEM5200-001 และ WI-RES-SEM-001 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3) ตรวจสอบปริมาณและชนิดแร่ที่เกิดในคอนกรีต ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานผสมคอนกรีต 0.50 และ 0.55 ที่อายุบ่ม 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ด้วยเครื่องมือเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (PHILIPS X' Pert MPD) โดยวิธีการทดสอบเป็นไปตามรายละเอียดในวิธีปฏิบัติงานการใช้เครื่อง XRD (WI-RES-XRD-001) จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

4) ทดสอบกำลังอัดคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (Compression Test) ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต ก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีขนาด 10×10×10 ซม. ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานผสมคอนกรีต 0.50 และ 0.55 ที่อายุบ่ม 7 28 และ 56 วัน ตามลำดับ การทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน BS EN 12390

5) ทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย โดยนำก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการทดสอบกำลังอัดและแตกออกที่มีขนาด 3-4 นิ้ว มาใช้ใน

การทดสอบ ทั้งในส่วนของคนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55 ที่อายุบ่ม 7 28 และ 56 วัน ตามลำดับ โดยการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 642-82

6) ทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55 ที่อายุบ่ม 1 ถึง 90 วัน ตามลำดับ ก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 7.5×7.5×28 ซม. โดยการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐานโดย ASTM C 595

7) ทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายก้อนตัวอย่าง (Non-Destructive Testing – NDT) เพื่อหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายผสมผงอิฐดินเผาละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C 597 โดยใช้เครื่องมือ V-METER MK II ของ NDT James Instrument วัดกับคอนกรีตหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 10×10×10 ซม. ผ่านก้อนตัวอย่างที่อายุ 1 7 28 และ 56 วัน ผลที่ได้นำมาประเมินคุณภาพของคนกรีตตาม Neville (1995) ดังในตารางที่ 3.3 และนำไปพิจารณาความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดและความหนาแน่นของคนกรีต

ตารางที่ 3.2 คุณภาพคอนกรีตในพจน์ของความเร็คลื่นตามยาว

ลำดับ	ความเร็วคลื่นตามยาว (กม./วินาที)	คุณภาพของคนกรีต
1	4.50	ดีเยี่ยม
2	3.50-4.50	ดี
3	3.00-3.50	พอใช้
4	2.00-3.00	ต่ำ
5	2.00	ต่ำมาก

ที่มา : Neville (1995)

### 3.4 วิเคราะห์และสรุปผล

หลังจากการทดสอบวัสดุปอซโซลานและก้อนตัวอย่างคอนกรีตมวลหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ผสมผงอิฐดินเผาละเอียดแล้วเสร็จ นำผลการทดสอบทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุปผล ดังต่อไปนี้

1) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบสมบัติของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้ผสมคอนกรีต รวมถึงสมบัติของผงอิฐดินเผาละเอียด โดยวิเคราะห์จากผลการตรวจสอบทางห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ คือ การตรวจ โครงสร้างจุลภาค โดยภาพถ่าย SEM การตรวจองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี XRF เพื่อวิเคราะห์ว่าเป็นวัสดุปอซโซลานหรือเปล้าก่อนที่นำมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และวิเคราะห์ความชื้นเหลว ระยะเวลาการก่อตัว และกำลังอัดของเพสต์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน

2) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบของคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรง ข่ายผสมผงอิฐดินเผาละเอียด จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และสมบัติเชิงกลทางด้านกำลังอัด และวิเคราะห์ตรวจสอบทางเคมีและ โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต

3) วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายผสมผงอิฐดินเผาละเอียด ที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ผสมวัสดุปอซโซลานต่อไป

## บทที่ 4

### ผลและอภิปรายผลการศึกษา

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเศษอิฐดินเผาบดละเอียด

ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีเศษอิฐดินเผาบดละเอียด โดยใช้เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometry-XRF) จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ผลทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบออกไซด์ทางเคมีของเศษอิฐดินเผาบดละเอียด (WBP)

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอชโซลาน		
	เศษอิฐดินเผาบด	ดินเหนียวเผา*	อิฐดินเผาบด **
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	20.20	16.70	25.49
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	68.06	54.10	63.89
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.36	1.00	0.29
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.00	10.10	7.73
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	0.24	0.40	-
โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	2.70	1.80	0.95
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> )	1.59	2.00	-
รูบิเดียม (Rb)	0.30	-	-
เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO <sub>2</sub> )	0.13	-	-
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)	-	0.5	-
น้ำหนักสูญเสียน้ำ (LOI) (%)	1.42	9.88	-

ที่มา : \* Al-Rawas and Hago (2005) \*\* Toledo Filho et al (2007)

พบว่าเศษอิฐดินเผาบดละเอียดมีองค์ประกอบทางเคมีของ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) รวมกันได้ร้อยละ 93.26 มีน้ำหนัก

สูญหายหลังเผา (LOI) ร้อยละ 1.42 และเมื่อพิจารณาจากผลรวมของปริมาณออกไซด์ทั้งสามชนิดสามารถจัดเศษอิฐดินเผาบดละเอียดไว้ในวัสดุปอซโซลานประเภท N ตามมาตรฐานวัสดุปอซโซลาน ASTM C 618 ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Toledo Filho et al (2007) ได้นำเศษอิฐดินเผาบดละเอียดในประเทศบราซิลแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อหล่ออมอร์ต้าร์ ซึ่งมีผลรวมของ อะลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) อยู่ที่ร้อยละ 97.11 (ตารางที่ 4.1) นอกจากนี้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดจากเตาเผาอิฐบ้านคลองเปลงยังมีองค์ประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ร้อยละ 1.59 ซึ่งมีสมบัติด้านทานการกัดกร่อนของคลอรินและน้ำทะเล ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติที่ดีต่อการต้านทานการกัดกร่อน

#### 4.2 ผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเศษอิฐดินเผาบดละเอียด

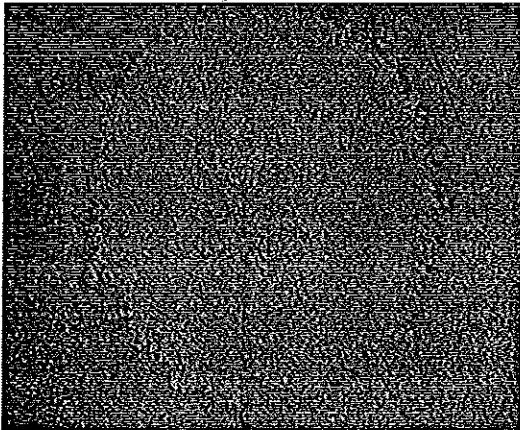
จากการเตรียมเศษอิฐดินเผาบดละเอียด โดยนำเข้าเครื่องบดด้วยลูกเหล็ก (Ball mill) และร่อนน้ำสะอาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 แล้วอบที่อุณหภูมิ  $110^{\circ}C$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำเข้าเครื่องบดละเอียดอีกครั้ง ผลการทดสอบตรวจโครงสร้างจุลภาคเศษอิฐดินเผาบดละเอียดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมและมีลักษณะกลมมนบางส่วนแสดงดังในรูปที่ 4.1

ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานเศษอิฐดินเผาบดละเอียด และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าเศษอิฐดินเผาบดละเอียดมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 209,190 ตารางเซนติเมตร/กรัม (วิธี BET) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Toledo Filho et al. (2007) ที่ใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อหล่อก้อนอมอร์ต้าร์ พบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะ 189,900 ตารางเซนติเมตร/กรัม (วิธี BET) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และความพรุน 26,470 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่งผลดีต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและความพรุนมากกว่า เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อผสมคอนกรีตทำให้ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตลดลง

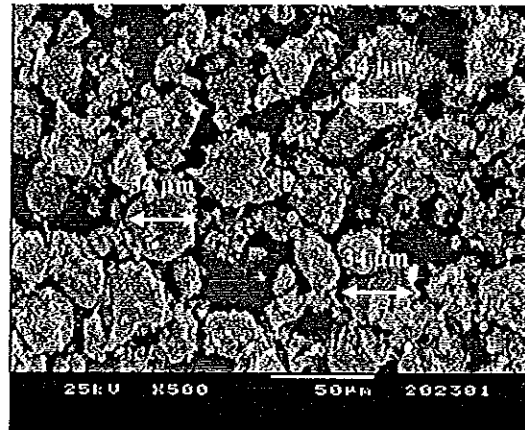
ตารางที่ 4.2 สมบัติพื้นฐานเศษอิฐดินเผาบดละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

รายละเอียดการทดสอบ	ผงอิฐดินเผา	ปูนซีเมนต์
พื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) (ตร.ซม./ก.)	209,190	16,280 *
ความพรุน (ตร.ซม./ก.)	26,470	0.000 *
ความถ่วงจำเพาะ	2.60	3.15

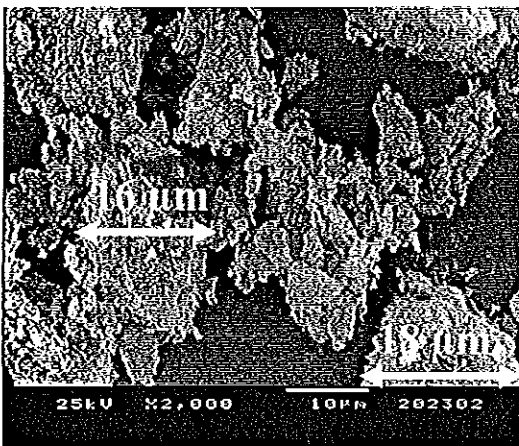
ที่มา : \* อภิรักษ์ (2551)



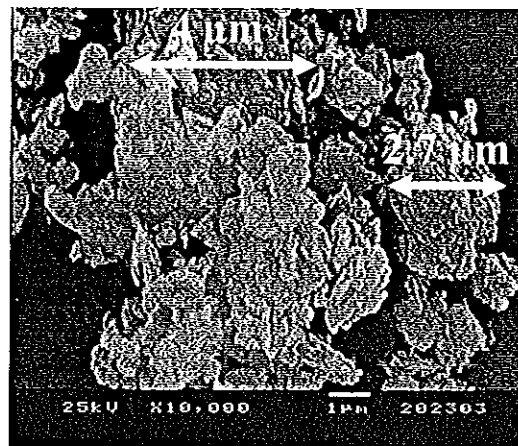
ก)



ข)



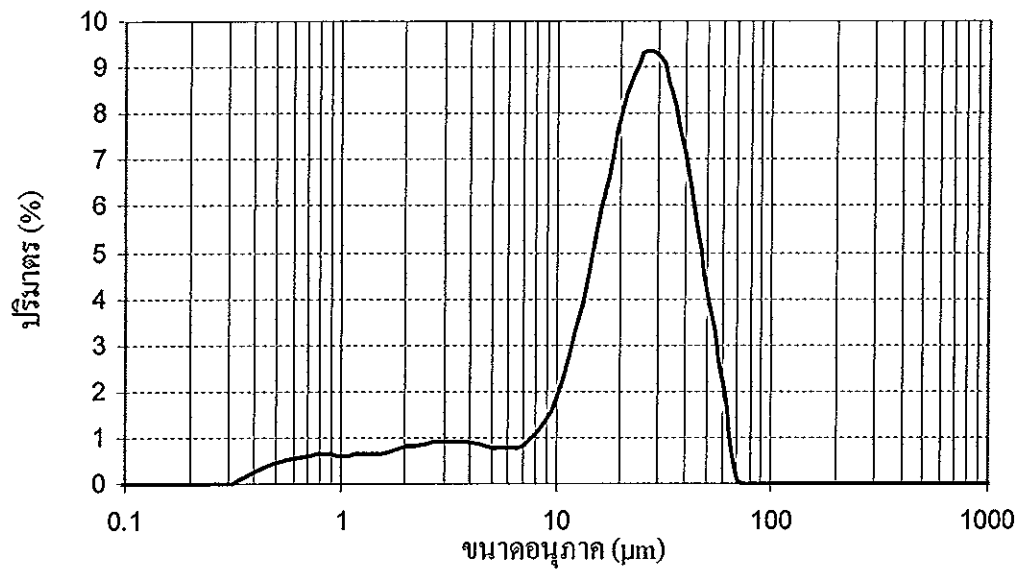
ค)



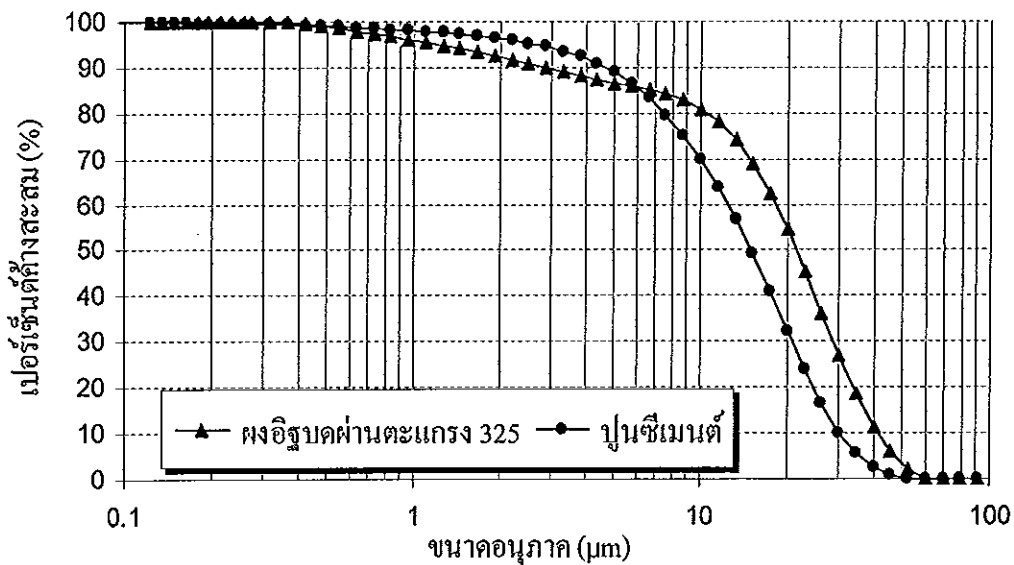
ง)

รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคเศษอิฐดินเผาบดละเอียด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก) เศษอิฐดินเผาบดละเอียด ข) กำลังขยาย 500 เท่า ค) กำลังขยาย 2,000 เท่า และ ง) กำลังขยาย 10,000 เท่า

ผลการวิเคราะห์ขนาดคละเศษอิฐดินเผาบดละเอียดพบว่ามีขนาดคละอยู่ในช่วง 0.316 ไมครอน ถึง 69.183 ไมครอน เหลือแล้วมีขนาด 26.303 ไมครอนมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.2 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการกระจายขนาดคละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าเศษอิฐดินเผาบดละเอียดและปูนซีเมนต์มีการกระจายขนาดคละใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งส่งผลดีต่อการผสมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากสามารถผสมให้เข้ากันได้ง่ายและการแทนที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันและโอกาสทำปฏิกิริยาพอกัน



รูปที่ 4.2 ขนาดอนุภาคกับเปอร์เซ็นต์ปริมาณของเศษอีพอกซีเรซินพิเศษ



รูปที่ 4.3 ขนาดอนุภาคและเปอร์เซ็นต์ค้างสะสมของเศษอีพอกซีเรซินพิเศษและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

#### 4.3 สมบัติมวลรวมของหินบะชอลต์เนื้อโพรงข่าย

จากผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของหินบะชอลต์เนื้อโพรงข่ายดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าร้อยละการสึกหรอแบบลอสแอนเจลิสโดยวัดค่าความสึกหรอ (Abrasion) ของ



มวลรวมจากการกระแทกและการเสียดสีกับลูกเหล็กกลมอยู่ที่ร้อยละ 28.60 ถึง 31.81 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 33 ของมวลรวมที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีต ซึ่งต้องสีกร่อนไม่เกินร้อยละ 35 มีค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) และดัชนีความยาว (Elongation Index) เท่ากับร้อยละ 28.40 และ 31.90 ตามลำดับ เป็นไปตามมาตรฐานมวลรวมที่นำไปใช้ผสมคอนกรีตทั่วไป สำหรับประเทศไทยตั้งเกณฑ์มวลรวมจะต้องมีค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) ไม่เกินร้อยละ 40 และดัชนีความยาว (Elongation Index) ไม่เกินร้อยละ 35 (ชัชวาลย์, 2543)

#### ตารางที่ 4.3 สมบัติพื้นฐานของหินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำย

รายการทดสอบ	ค่า
การดูดซึมน้ำ (%)	4.30
ความถ่วงจำเพาะมวลรวมอิมตัวผิวแห้ง	2.42
ความถ่วงจำเพาะมวลรวมแห้ง	2.32
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.57
หน่วยน้ำหนักแบบหลวม (กก/ลบ.ม.)	1219.70
หน่วยน้ำหนักแบบแน่น (กก/ลบ.ม.)	1456.70
โมดูลัสความละเอียด	3.15
การสึกหรอแบบลอสแอนเจลิส (%)	28.6-31.81*
สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Cc)	1.04
สัมประสิทธิ์ของความโค้ง (Cu)	2.50
ดัชนีความแบน (%)	28.40
ดัชนีความยาว (%)	31.90

ที่มา : \* ดนุพล และคณะ (2551)

ผลการตรวจสอบลักษณะรูปร่างของหินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำย พบว่าลักษณะเนื้อหินจะมีรูพรองภายในดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทำให้คอนกรีตที่ผลิตมีรูพรองภายในดังแสดงในรูปที่ 4.5 ส่งผลดีต่อคอนกรีตทำให้น้ำหนักรวมของคอนกรีตลดลง

ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายของแหล่งหินที่ใช้ โดยใช้เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (XRF) พบว่ามีส่วนประกอบของ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) รวมกันร้อยละ 70.25 น้ำหนักสูญเสียหลังเผา (LOI) ร้อยละ 4.06 ซึ่งใกล้เคียงกับตะกรันภูเขาไฟจากแหล่งต่างๆ ในโลกที่นำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบผสมคอนกรีต ได้แก่ ประเทศแอลจีเรียจากงานวิจัยของ Mouli and Khelafi (2006) และประเทศตุรกีจากงานวิจัยของ Demirdag and Gunduz (2008) ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4 ซึ่งจากภูเขาไฟในจังหวัดบุรีรัมย์ส่วนใหญ่มีลักษณะของช่องปล่องประทุระเบิดภูเขาไฟชนิดเจเน เนินภูเขาไฟเกิดจากการทับถมของตะกอนภูเขาไฟ (Pyroclastic Materials) ซึ่งเกิดจาก แรงดันของก๊าซต่างๆ ที่แทรกอยู่ในหินหลอมละลาย เช่น ไอน้ำ 70.75% คาร์บอนไดออกไซด์ 14.07% ไฮโดรเจน 0.33% ไนโตรเจน 5.45% ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 6.40% ตะกอนภูเขาไฟเหล่านี้ เป็นมวลหินหนืดที่ถูกดันประทุขึ้นไปและเย็นแข็งตัวในอากาศ มีขนาดต่างๆ กัน (<http://www.buriramnawarat.com/saranaru.html>) และแม้ว่าหินบะซอลต์เป็นหินอัคนีฤทธิ์ เป็นด่าง ปกติไม่ทำปฏิกิริยากับแอลคาไลในคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามหากในหินบะซอลต์มีซิลิกาที่เป็นชนิดโอปอกก็สามารถส่งผลให้ทำปฏิกิริยากับบะซอลต์ได้เช่นกันแม้ว่าประกอบด้วยซิลิกาสูง ร้อยละ 34 และโอปอกมีเพียงร้อยละ 1.6 ก็ตาม (Shayan and Quick, 1988)



รูปที่ 4.6 กำมะถันที่อยู่คูดอยู่ตามรูโพรงหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ใช้

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบออกไซด์ทางเคมีของหินบะซอลต์เนื้อโพร่ง่ายและตะกรันภูเขาไฟ

องค์ประกอบทางเคมี	จังหวัดนุรีร์มี (%)	ตุรกี (%)*	แอลจีเรีย(**)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	41.79	43.90	46.40
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	12.97	15.70	17.50
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	15.53	13.80	9.69
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	4.64	6.80	2.42
โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	3.09	0.60	1.51
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	8.68	8.80	9.90
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> )	3.53	----	3.10
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)	4.09	3.60	3.30
ฟอสฟอรัสออกไซด์ (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1.21	----	0.80
แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO <sub>2</sub> )	0.22	----	----
สตรอนเชียมออกไซด์ (SrO)	0.19	----	----

ที่มา : \* Demirdag and Gunduz (2008) \*\* Mouli and Khelafi (2006)

นอกจากนี้พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์เนื้อโพร่ง่ายจากจังหวัดนุรีร์มี จะมีส่วนประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) 3.53% ซึ่งมีสมบัติด้านทานการกัดกร่อนของคลอไรด์และน้ำทะเล (<http://wikipedia.org/wiki>) เมื่อผ่าหินบะซอลต์เนื้อโพร่ง่ายดูลักษณะภายในพบว่า มีซัลเฟตลักษณะเป็นผงสีเหลืองจุดตันอยู่ภายในรูโพร่งของหินบะซอลต์เนื้อโพร่ง่าย (รูปที่ 4.6) เมื่อนำหินไปใช้เป็นมวลรวมผสมคอนกรีตตัวควบคุม (ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว) ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง แคลเซียม ซัลเฟต และน้ำ จับตัวกลายเป็นยิปซัม (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) ดังแสดงจากผลการทดสอบ XRD และผลการทดสอบ SEM ของคอนกรีตที่ไม่เติมเศษอิฐดินเผาเคลือบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่อายุปม 28 วัน พบว่ามียิปซัมประกอบอยู่มากถึงร้อยละ 14.14 (รูปที่ 4.39) และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 พบว่ามียิปซัมประกอบอยู่เช่นกันถึงร้อยละ 6.96 (รูปที่ 4.42) อย่างไรก็ตามทั้งสองปรากฏการณ์ผสมพบว่าเมื่อเติมเศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนหรือบ่มคอนกรีตนานขึ้น จะไม่ปรากฏยิปซัมอยู่อีก

ผลการวิเคราะห์ขนาดคละหินบะซอลต์เนื้อโพร่ง่าย (Sieve Analysis of Coarse Aggregates) ด้วยวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ขนาด 3/4" 1/2" 3/8" เบอร์ 4 เบอร์ 8 และ เบอร์ 16

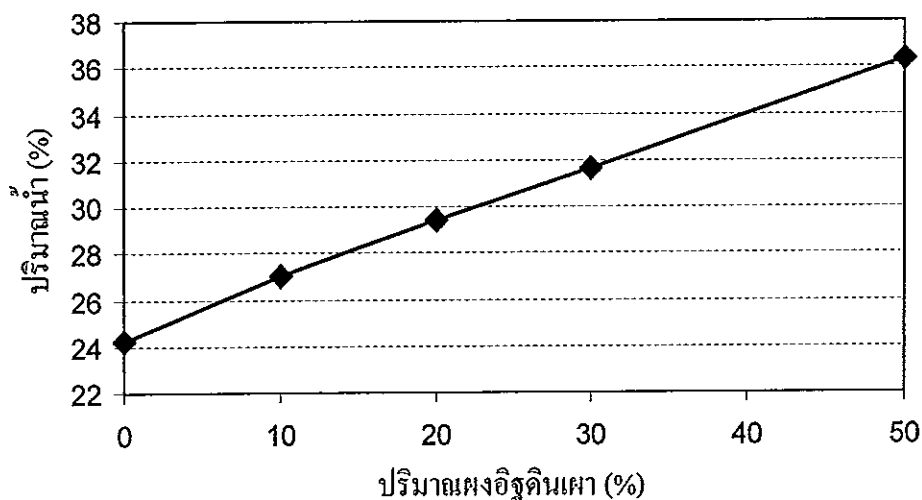


ผลการทดสอบพบว่าการขนาดละเอียดหยาบของเม็ดเนื้อโพรงข่ายมีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ 1.04 และค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้ง 2.50 ค่าโมดูลัสความละเอียด 3.10 โดยที่ขนาดละเอียดของมวลรวมสำหรับผสมคอนกรีตทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.7 ข)

#### 4.4 สมบัติของเพสต์

##### 4.4.1 ความชันเหลวปกติของเพสต์

จากผลทดสอบความชันเหลวปกติของเพสต์ (Normal Consistency) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 50 ตามลำดับ ทำให้เพสต์ต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นตามไปด้วยที่ 24.23% 27.06% 29.40% 31.62% และ 36.32% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เนื่องจากเศษอิฐดินเผาละเอียดมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อใช้ปริมาตรปูนซีเมนต์ลดลงและแทนที่ด้วยเศษอิฐดินเผาละเอียดเพิ่มขึ้นเพื่อให้หนักรวมเท่าเดิม ส่งผลให้ปริมาตรโดยรวมและพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น ทำให้เพสต์ต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นตามไปด้วย



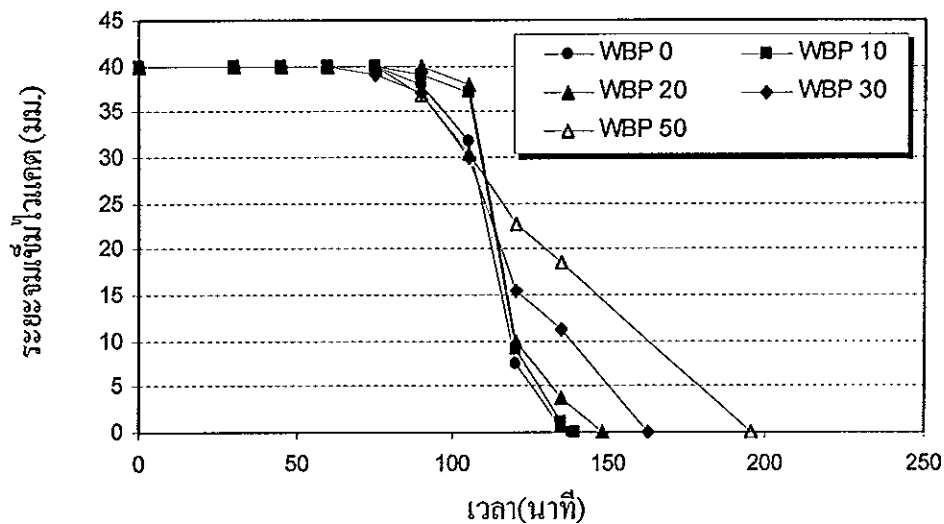
รูปที่ 4.8 ปริมาณน้ำสถานะความชันเหลวปกติของเพสต์ที่ใช้เศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์

ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเศษอิฐดินเผาละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้เพสต์ต้องการปริมาณน้ำเพื่อให้อยู่ในช่วงสถานะความชันเหลวปกติเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดสอบสอดคล้องกับ

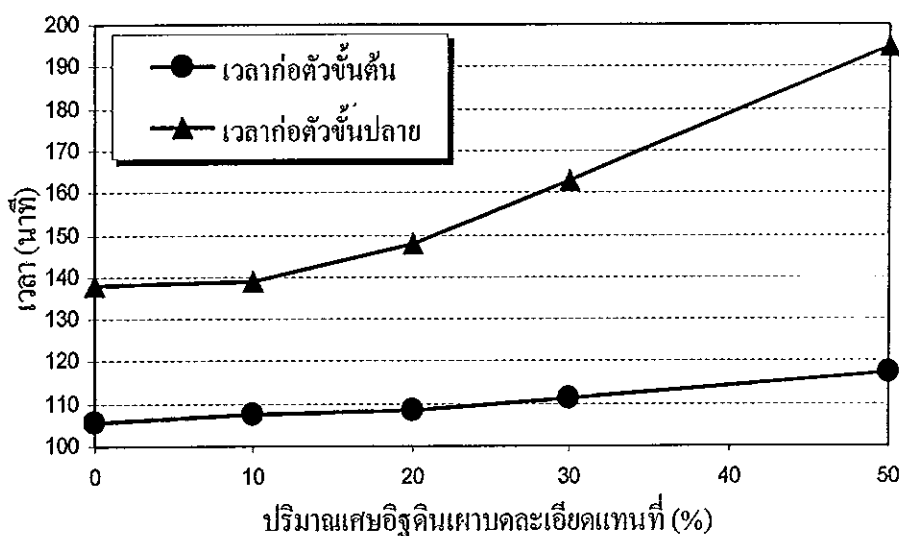
งานวิจัยของ อภิรักษ์ (2551) และ พรนราชน์ (2551) พบว่าวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) และความพรุนมากกว่าส่งผลให้มีความต้องการปริมาณน้ำเพื่อให้เพสต์อยู่ในช่วงสภาวะความชื้นเหลวปกติที่มากขึ้นเช่นกัน

#### 4.4.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ที่ใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 พฤติกรรมระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

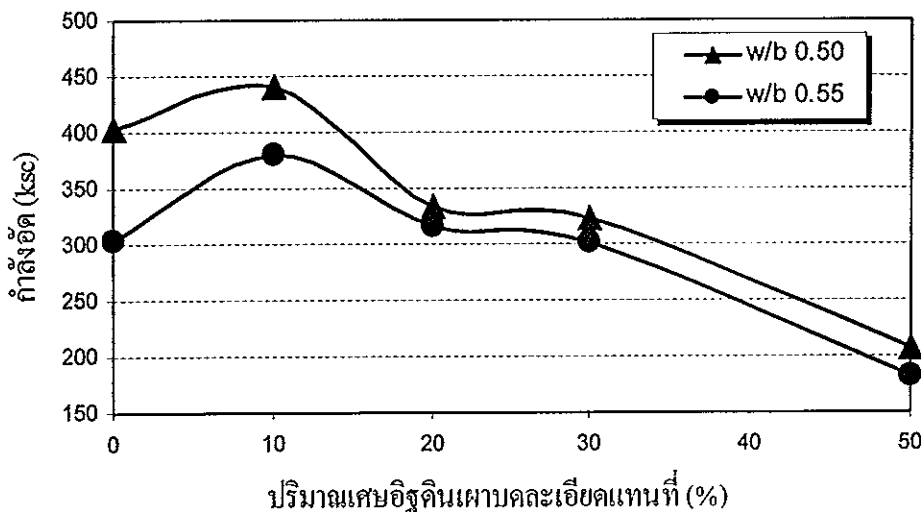


รูปที่ 4.10 อิทธิพลเศษอิฐดินเผาบดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

จากผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้นและขึ้นปลายของซีเมนต์เพสต์ล้วน (WBP 0) มีค่า 106 นาที และ 138 นาที และเมื่อแทนที่เศษอิฐดินเผาบดละเอียดในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักร้อยละ 10 ถึง 50 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้นมีค่า 108 ถึง 118 นาที และระยะเวลาการก่อตัวขึ้นปลาย 139 ถึง 195 นาที ตามลำดับ จากการทดสอบเมื่อแทนที่เศษอิฐดินเผาบดละเอียดมากขึ้นสามารถยืดระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ได้ เนื่องจากเมื่อใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้นจำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำมากขึ้นด้วยเช่นกัน เพื่อให้เพสต์อยู่ในสภาวะความชื้นเพียงพอ ทำให้ชะลอการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้เพสต์แข็งตัวช้าลงตามลำดับ อย่างไรก็ตามเพสต์ที่ผสมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดทุกอัตราส่วนผสมมีการก่อตัวขึ้นต้นและขึ้นปลายอยู่ในค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C 191-92 (1998) คือไม่น้อยกว่า 45 นาที สำหรับการก่อตัวขึ้นต้น และไม่เกิน 375 นาที สำหรับระยะเวลาการก่อตัวขึ้นปลาย

#### 4.4.3 กำลังอัดของเพสต์

ผลทดสอบกำลังอัดของเพสต์ที่ใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 โดยน้ำหนัก และบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55 ได้ผลทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.11



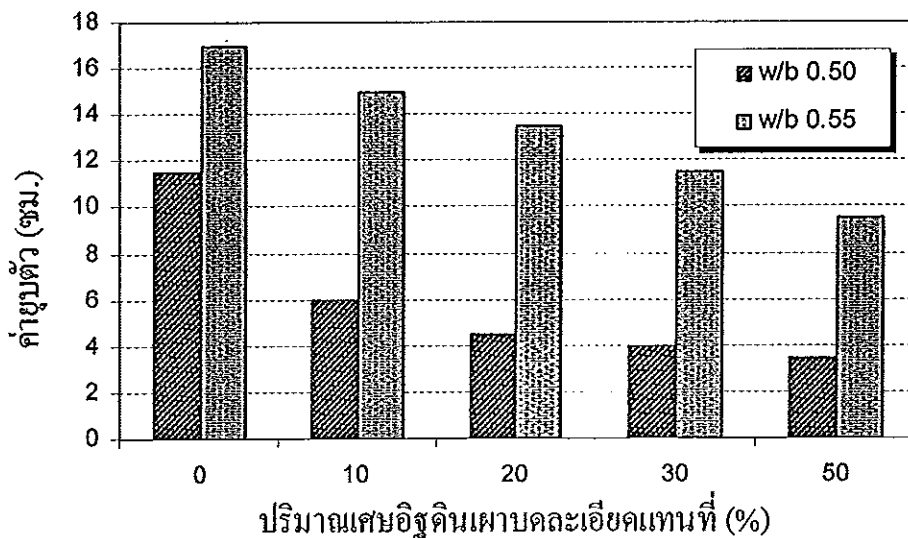
รูปที่ 4.11 อิทธิพลเศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีต่อกำลังอัดของเพสต์

พบว่ากำลังอัดของเพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ได้กำลังอัด 404 441 334 324 และ 207 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ได้กำลังอัด 304

380 316 302 และ 182 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ พบว่าผลทดสอบกำลังอัดของเพสต์ที่ใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีกำลังอัดสูงสุด ซึ่งยืนยันได้ว่าเศษอิฐดินเผาเคลือบมีสมบัติเป็นวัสดุพอชโซลานจริง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Toledo Filho et al. (2007) โดยใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อหล่อคอนกรีต พบว่าปริมาณเศษอิฐดินเผาเคลือบที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 10 ถึง 20 นอกจากนี้เมื่อแทนที่เศษอิฐดินเผาเคลือบมากขึ้นร้อยละ 20 30 และ 50 กำลังอัดของเพสต์ได้ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมดุลของปฏิกิริยาพอชโซลาน จึงทำให้ไม่ก่อเกิดอีกต่อไปทำปฏิกิริยาของเพสต์ให้ลดลง

#### 4.5 การยุบตัวของคอนกรีตสด

จากผลทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีตสด (Slump Test) โดยใช้ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามตารางที่ 3.1 ได้ผลทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 อิทธิพลเศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักต่อค่ายุบตัวของคอนกรีตสด

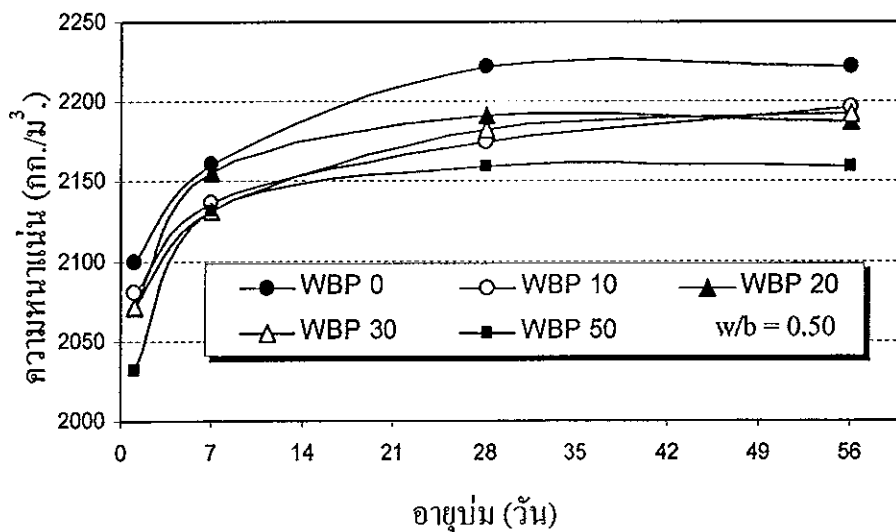
เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเศษอิฐดินเผาเคลือบโดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ตามลำดับ ได้ค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ใช้ปฏิภาคส่วนผสม  $w/b = 0.50$  ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานอย่างเดียว (WBP 0) ได้ค่ายุบตัว 11.50 ซม. และเมื่อแทนที่เศษอิฐดินเผาเคลือบโดยน้ำหนักร้อยละ 10 20 30 และ 50 มีค่ายุบตัว 6.00 ซม. ถึง 3.50 ซม. และเมื่อใช้ปฏิภาคส่วนผสม  $w/b = 0.55$  ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานอย่างเดียว (WBP 0) ได้ค่ายุบตัว 17.00 ซม. เมื่อแทนที่เศษอิฐดินเผาเคลือบโดยน้ำหนักร้อยละ 10 20 30 และ 50 มีค่ายุบตัว 15.00 ถึง 9.50 ซม. ผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ค่า



ยูปตัวของคอนกรีตลดลง เนื่องจากเศษอิฐดินเผาบดละเอียดมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) และความพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในปริมาณน้ำหนักรวมวัสดุประสานและปริมาณน้ำเท่าเดิม แต่มีปริมาตรพื้นที่ผิว และความพรุนมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีปริมาณน้ำเหลือเพื่อเคลือบอนุภาคของวัสดุประสานและมวลรวมได้น้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแห้งตัวและมีค่ายูปตัวน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อาปีเต็ง (2551) พบว่าการใช้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวและความพรุนมาก (เถ้าแกลบ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 331,300 ตารางเซนติเมตร/กรัมและความพรุน 306,600 ตารางเซนติเมตร/กรัม) แทนที่ปูนซีเมนต์สำหรับผสมคอนกรีตมากขึ้น ทำให้คอนกรีตยูปตัวลดลงเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น ( $w/b = 0.55$ ) ทำให้มีปริมาณน้ำเหลือเพื่อเคลือบอนุภาควัสดุประสานและมวลรวมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคของวัสดุประสานและมวลรวมสามารถไหลคล่องตัวได้มากขึ้น ดังนั้นค่ายูปตัวของคอนกรีตจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

#### 4.6 ความหนาแน่นของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงขำย

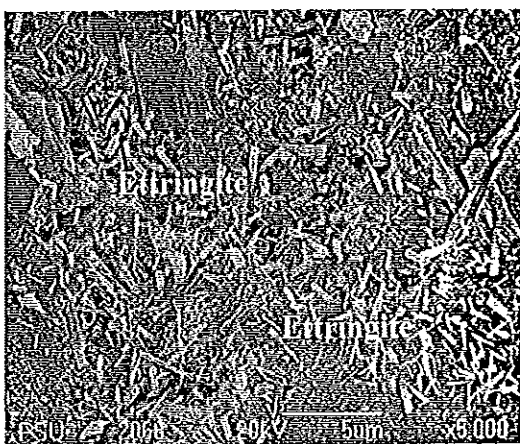
ผลทดสอบความหนาแน่นก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด  $10 \times 10 \times 10$  ซม. โดยใช้ปฏิภาคส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55 ตามลำดับ โดยใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ที่อายุบ่ม 1 7 28 และ 56 วัน ตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 4.13



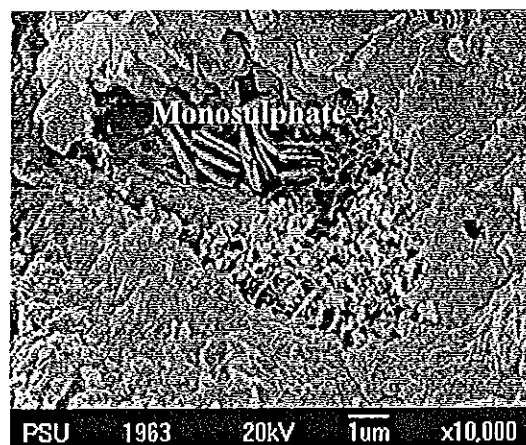
รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงขำยที่  $w/b = 0.50$

จากผลทดสอบความหนาแน่นพบว่าที่อายุบ่ม 28 วัน ความหนาแน่นคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 มีค่า 2222 2175 2191 2182 และ 2160 กก./ม<sup>3</sup>. ที่อายุบ่ม 56 วัน มีค่า 2222 2196 2188 2192 และ 2160 กก./ม<sup>3</sup>. ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นลดลง เนื่องจากเศษอิฐดินเผาบดละเอียดมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบปริมาตรกับน้ำหนักระหว่างเศษอิฐดินเผาบดละเอียดกับปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน พบว่าเศษอิฐดินเผาบดละเอียดมีปริมาตรมากกว่า และเมื่อนำไปผสมคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายโดยจำกัดน้ำหนักวัสดุประสานเท่าเดิม พบว่าปริมาตรคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานเศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์จะมีค่ามากกว่า คอนกรีตตัวควบคุม (WBP 0) ส่งผลให้คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายมีความหนาแน่นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Farrell et al. (1999) พบว่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีค่าลดลงตามการใช้ปริมาณผงอิฐแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักร้อยละ 50 พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตจะลดลงจากคอนกรีตตัวควบคุมมาก

รวมถึงอิทธิพลจากเศษอิฐดินเผาบดละเอียดมีมากกว่าการเกิดประสานเนื้อคอนกรีต จึงมีเศษอิฐดินเผาบดละเอียดส่วนเหลือไม่ทำปฏิกิริยาทำให้น้ำหนักทั้งหมดลดลง และเมื่อบ่มคอนกรีตมากขึ้นถึง 56 วัน พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตเกือบทุกอัตราส่วนผสมจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และปฏิกิริยาระหว่างเศษอิฐดินเผาบดละเอียดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ได้ผลเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ทำให้ช่องว่างภายในคอนกรีตลดลง อย่างไรก็ตามยังมีบางอัตราส่วนผสม (WBP 20) ที่ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง

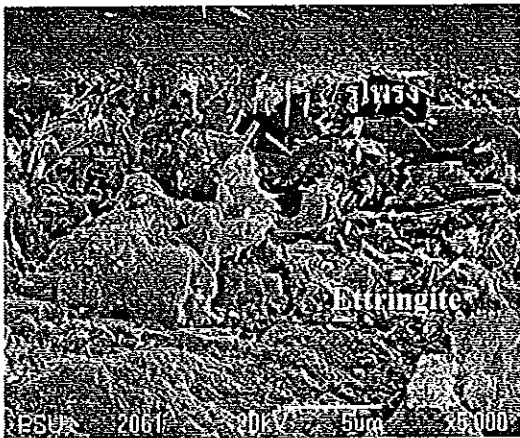


ก)

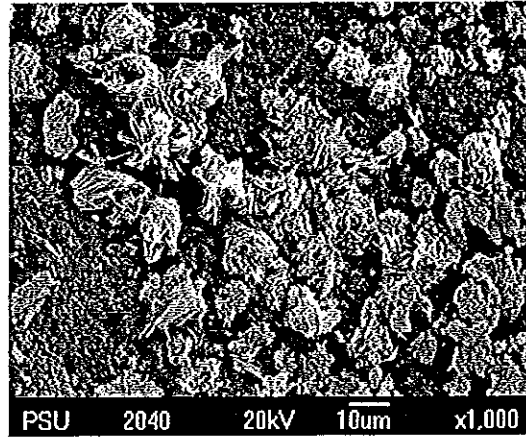


ข)

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตไม่เติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดที่  $w/b = 0.50$   
ก) อายุบ่ม 28 วัน และ ข) อายุบ่ม 56 วัน

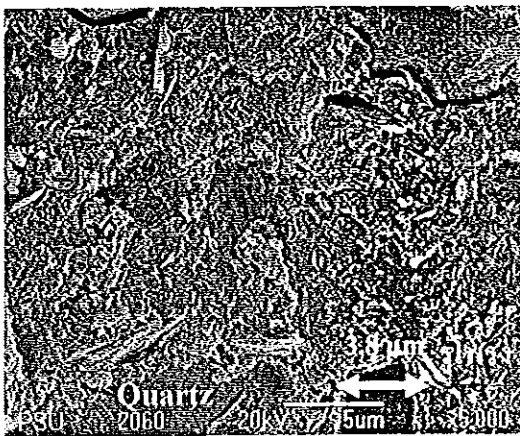


ก)

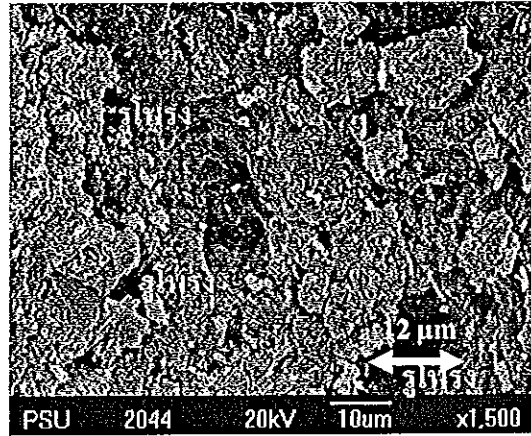


ข)

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเต็มเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบรอยละ 30 ที่  $w/b=0.50$  ก) อายุบ่ม 28 วัน และ ข) อายุบ่ม 56 วัน



ก)



ข)

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเต็มเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบรอยละ 50 ที่  $w/b=0.50$  ก) อายุบ่ม 28 วัน และ ข) อายุบ่ม 56 วัน

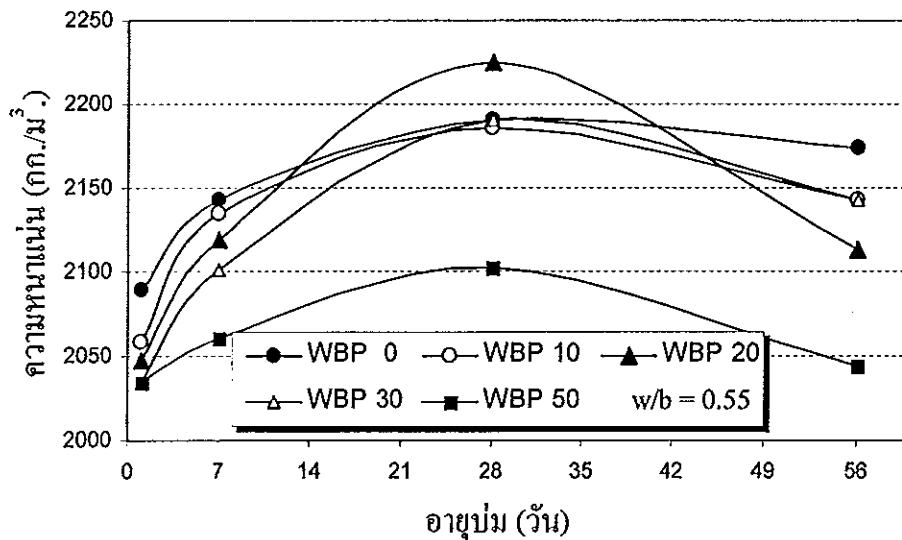
ผลตรวจสอบภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 และ 56 วัน พบว่า สอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่นคอนกรีต ดังนี้

จากรูปที่ 4.14 ภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพรงข่ายไม่เต็ม เศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบ  $w/b = 0.50$  ที่อายุบ่ม 28 วัน พบแอดตริงไคต์หน่วงการก่อตัวของคอนกรีต (รูปที่ 4.14 ก) แต่เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นถึง 56 วัน (รูปที่ 4.14 ข) พบว่าแอดตริงไคต์ได้หมดไปและ เปลี่ยนสภาพเป็น โมโนซัลเฟต (Monosulphate) ทำให้รูโพรงภายในคอนกรีตลดลง

จากรูปที่ 4.15 ภาพถ่ายโครงสร้างจุดภาคคอนกรีตเต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียด ร้อยละ 30  $w/b = 0.50$  ที่อายุบ่ม 28 วัน พบแอตตรงไคต์หน้าวงการก่อตัวของคอนกรีตและพบรูโพรงบางส่วน (รูปที่ 4.15 ก) เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นถึง 56 วัน รูโพรงของคอนกรีตลดลง (รูปที่ 4.15 ข)

จากรูปที่ 4.16 ภาพถ่ายโครงสร้างจุดภาคคอนกรีตเต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียด ร้อยละ 50 ที่อายุบ่ม 28 วัน พบรูโพรงภายในคอนกรีตบางส่วน (รูปที่ 4.16 ก) และเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นถึง 56 วัน กลับพบว่ายังมีรูโพรงปรากฏอยู่ (รูปที่ 4.16 ข)

ผลการทดสอบความหนาแน่นคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายโดยใช้ปฏิภาคส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 2190 2185 2225 2190 และ 2102 กก./ม<sup>3</sup>. ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 56 วัน มีค่า 2173 2143 2113 2142 และ 2044 กก./ม<sup>3</sup>. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยเฉพาะที่อายุบ่ม 7 วัน บ่งว่าเมื่อใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักจะทำให้ความหนาแน่นคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.55$

จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้ปฏิภาคส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 เมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มคอนกรีตมากขึ้นถึง 56 วัน ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงกว่าอายุบ่ม 28 วัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเศษอิฐดินเผาบดละเอียดมากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเนื่องจากปูนซีเมนต์ลดลงไปด้วย ทำให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ที่ได้จากกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ส่งผลให้ผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (CAH) ลดลง คอนกรีตเกิดรูโพรงมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำมากขึ้นจะส่งผลให้คอนกรีตมี

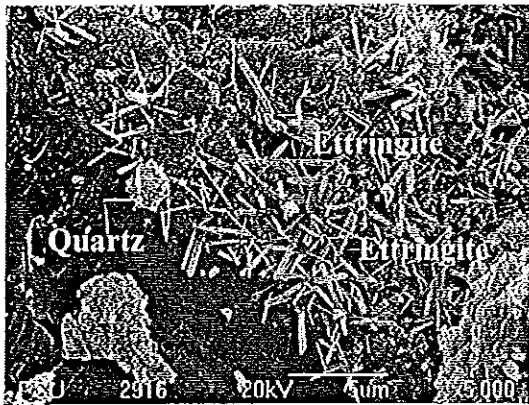
ปริมาณน้ำเหลือจากกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น และเกิดจำนวนโพรงในเพสต์และโพรงที่เกิดขึ้นระหว่างมวลรวมกับเพสต์เพิ่มมากขึ้น เมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะทำให้เกิดรูโพรงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tommy et al. (2007) ทำการศึกษาผลกระทบของสมบัติมวลรวมต่อคอนกรีตเบาโดยวัดการกระจายของจำนวนโพรงที่มีขนาดตั้งแต่ 1-100 ไมครอน ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเพสต์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากขึ้น ( $w/c = 0.48$ ) ทำให้คอนกรีตเกิดรูโพรงภายในเพสต์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง ดังแสดงรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20

ตัวอย่างคอนกรีตไม่เติมเศษอิฐดินเผาละเอียด  $w/b = 0.55$  (รูปที่ 4.18) ที่อายุบ่ม 28 วัน ตรวจพบแอตตรึงไคต์ห่วงการก่อตัวของคอนกรีต (รูปที่ 4.18 ก) เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น 56 วัน พบว่าเนื้อคอนกรีตประสานกันน้อยลง (รูปที่ 4.18 ข) และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าเนื้อคอนกรีตประสานกันน้อยกว่า

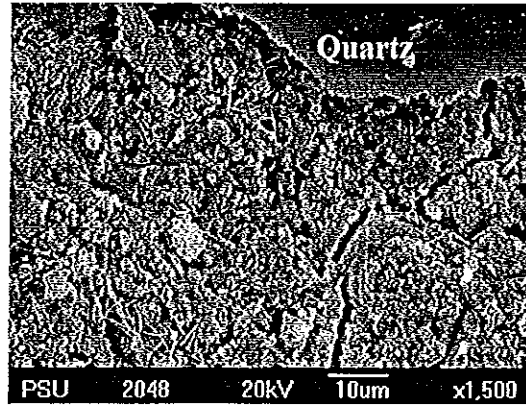
ตัวอย่างคอนกรีตเติมเศษอิฐดินเผาละเอียด 30%  $w/b = 0.55$  (รูปที่ 4.19) ที่อายุบ่ม 28 วัน จะมีรูโพรงคอนกรีตน้อย (รูปที่ 4.19 ก) เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น 56 วัน พบว่าเกิดรูโพรงภายในคอนกรีตมากขึ้น การประสานของเนื้อคอนกรีตลดลง (รูปที่ 4.19 ข)

ตัวอย่างคอนกรีตเติมเศษอิฐดินเผาละเอียด 50%  $w/b = 0.55$  (รูปที่ 4.20) ที่อายุบ่ม 28 วัน จะมีรูโพรงมาก (รูปที่ 4.19 ก) เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น 56 วัน พบว่าการประสานของเนื้อคอนกรีตลดลงมากยิ่งขึ้น (รูปที่ 4.20 ข)

ดังนั้นการใช้เศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเพื่อผสมคอนกรีตส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นคอนกรีต ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Farrell et al. (1999) โดยใช้ผงอิฐดินเผาแทนที่ปูนซีเมนต์สำหรับผสมมอร์ตาร์ พบว่าน้ำหนักของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณการแทนที่ของผงอิฐดินเผาที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การใช้ปฏิกิริยาส่วนผสมที่ต่างกัน โดยลดปริมาณมวลรวมละเอียดลงจะทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นลดลงเช่นกัน เนื่องจากมวลรวมละเอียดไม่สามารถแทรกรูโพรงระหว่างหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายได้อย่างทั่วถึง ทำให้เกิดโพรงภายในคอนกรีตส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง อีกทั้งการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้นจะทำคอนกรีตมีรูโพรงเพิ่มมากขึ้นได้เช่นกัน โดยคอนกรีตที่ผลิตได้สามารถจัดเป็นคอนกรีตชนิดกึ่งมวลเบา (Semi-lightweight Concrete) ถึงคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปซึ่งมีความหนาแน่นอยู่ที่ 1,800 ถึง 2,400 กก./ลบ.ม. กำลังอัดไม่ต่ำกว่า 120 กก./ตร.ซม. (วินิต, 2539)

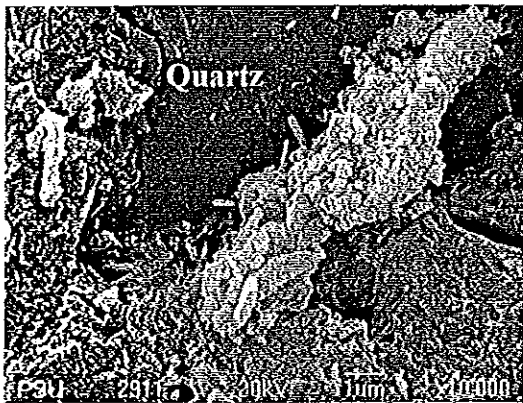


ก)

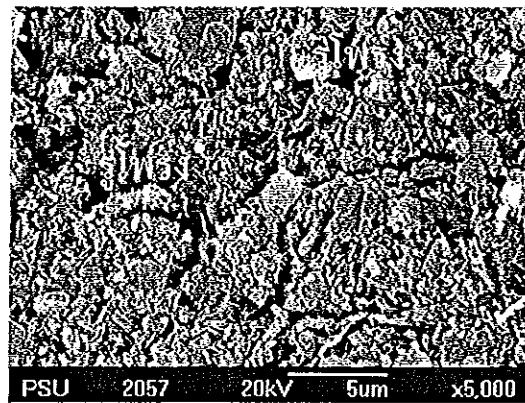


ข)

รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตไม่เติมผงอิฐดินเผา ที่  $w/b = 0.55$  ก) อายุบ่ม 28 วัน และ ข) อายุบ่ม 56 วัน

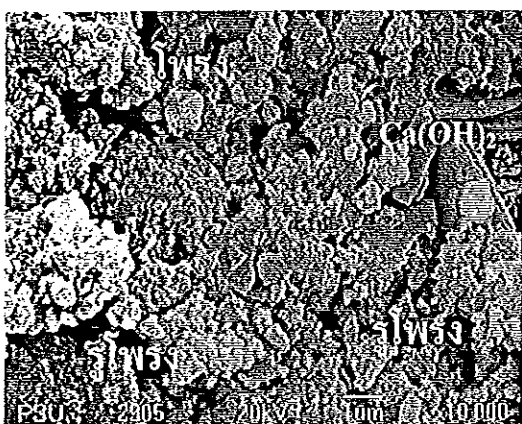


ก)

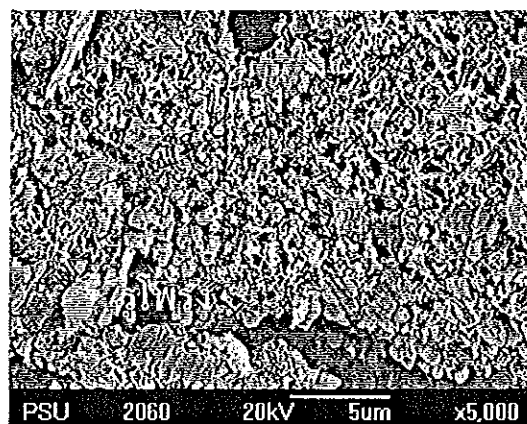


ข)

รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเติมผงอิฐดินเผาร้อยละ 30 ที่  $w/b = 0.55$  ก) อายุบ่ม 28วัน และ ข) อายุบ่ม 56 วัน



ก)

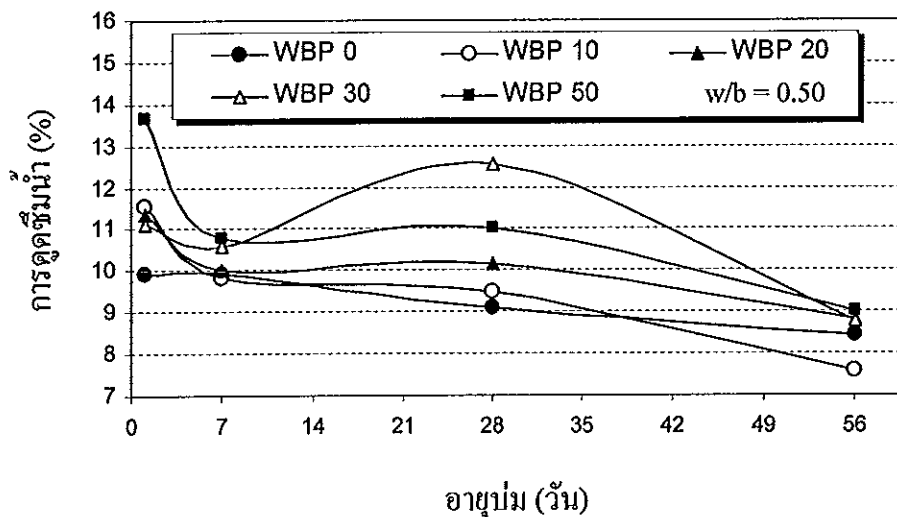


ข)

รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตเติมผงอิฐดินเผาร้อยละ 50 ที่  $w/b = 0.55$  ก) อายุบ่ม 28วัน และ ข) อายุบ่ม 56 วัน

#### 4.7 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

ผลทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่อายุบ่ม 7 28 และ 56 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ตามลำดับ ได้ค่าดูดซึมน้ำที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าร้อยละ 9.10 9.49 10.13 12.57 และ 11.03 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 56 วัน มีค่าร้อยละ 8.43 7.59 8.83 8.75 และ 9.00 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.21

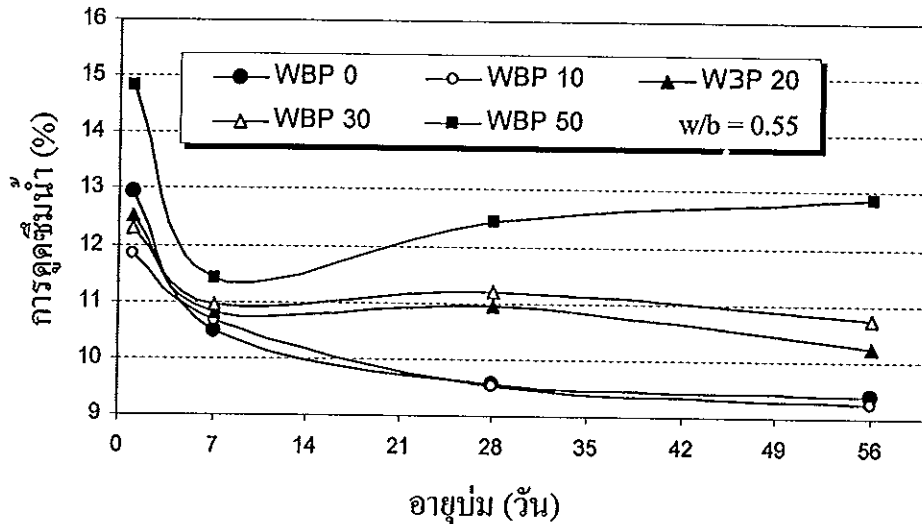


รูปที่ 4.21 อิทธิพลของอายุบ่มต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ w/b = 0.50

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์โดยเฉพาะที่อายุบ่ม 28 วัน การดูดซึมน้ำของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ได้อย่างช้าๆ และเมื่อเพิ่มปริมาณเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบมากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง คอนกรีตมีรูโพรงมากขึ้น น้ำสามารถซึมผ่านรูโพรงเนื้อคอนกรีตได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออายุบ่มคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นถึง 56 วัน ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) ช่วยอุดช่องว่างรูโพรงของเนื้อคอนกรีตมากขึ้น ทำให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตลดลง

จากผลทดสอบการดูดซึมน้ำโดยใช้ปริมาตรส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ได้ค่าดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าร้อยละ 9.57 9.52 10.96 11.21

และ 12.45 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 56 วัน มีค่าดูดซึมน้ำร้อยละ 9.39 9.23 10.24 10.75 และ 12.86 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 อิทธิพลของอายุบ่มต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.55$

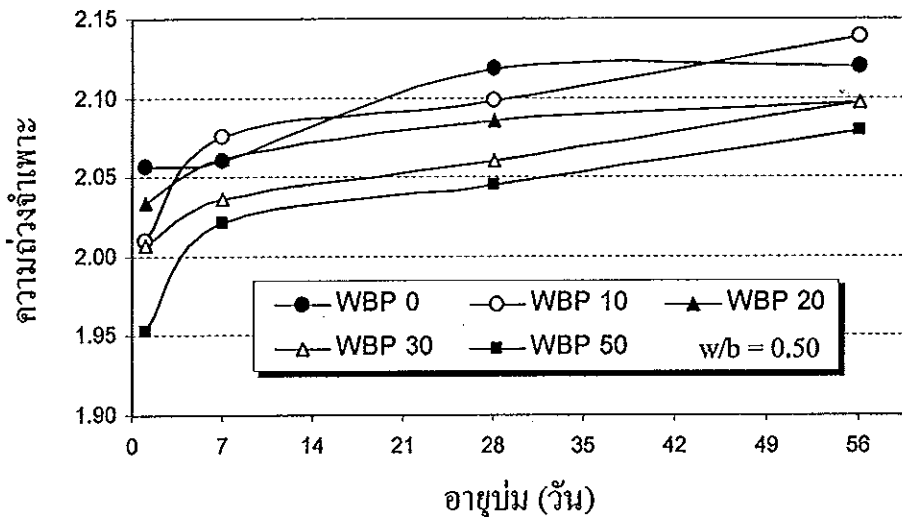
พบว่าอายุบ่มคอนกรีตที่ 56 วัน การดูดซึมน้ำน้อยกว่าอายุบ่มที่ 28 วัน เล็กน้อย (WBP 0, WBP 10, WBP 20 และ WBP 30) เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนน้ำมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีปริมาณน้ำที่เหลือจากกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินาไตรออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) อยู่อย่างอิสระ ส่งผลให้การพัฒนาของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) น้อยลง นอกจากนี้เมื่อใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก 50% จะทำให้ซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมินาไตรออกไซด์อยู่อย่างอิสระเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดช่องว่างของคอนกรีตมากขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำมากขึ้นตามไปด้วย

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.50 และ 0.55 มีค่าการดูดซึมน้ำที่อายุบ่ม 28 วัน อยู่ระหว่างร้อยละ 9.10 - 11.03 และ 9.57 - 12.45 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ตะกรันภูเขาไฟเป็นมวลรวมหยาบและปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายดูดซึมน้ำน้อยกว่าคอนกรีตมวลเบาตะกรันภูเขาไฟที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 13.39 ถึง 21.50 (Demirdag and Gunduz, 2006) เนื่องจากหินตะกรันภูเขาไฟมีรูโพรงมากกว่าหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ดังนั้นทำให้คอนกรีตมีรูโพรงมากกว่าคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ทำให้สามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่า



#### 4.8 ความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

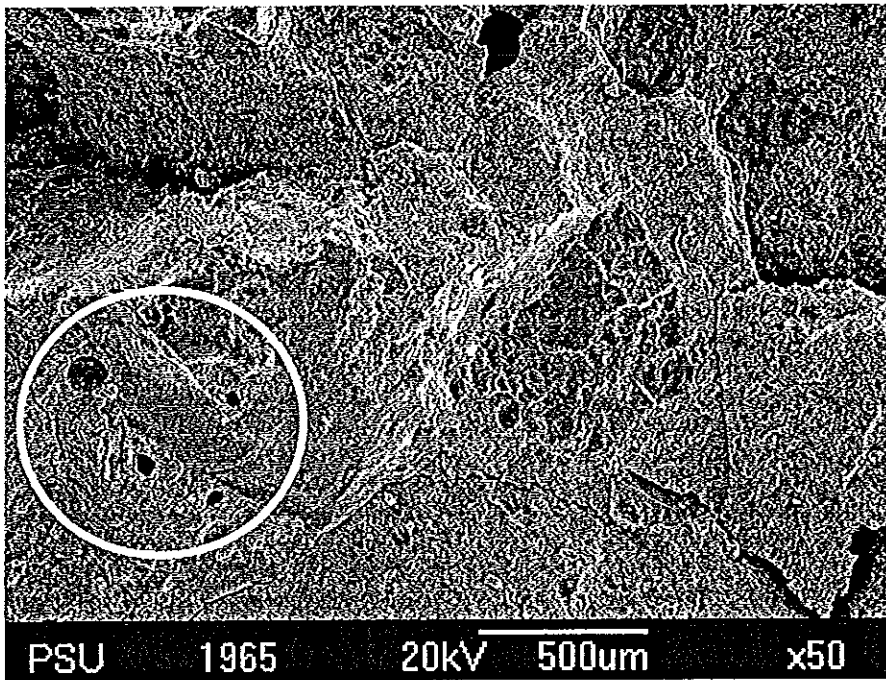
จากผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะของคอนกรีต โดยใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.23



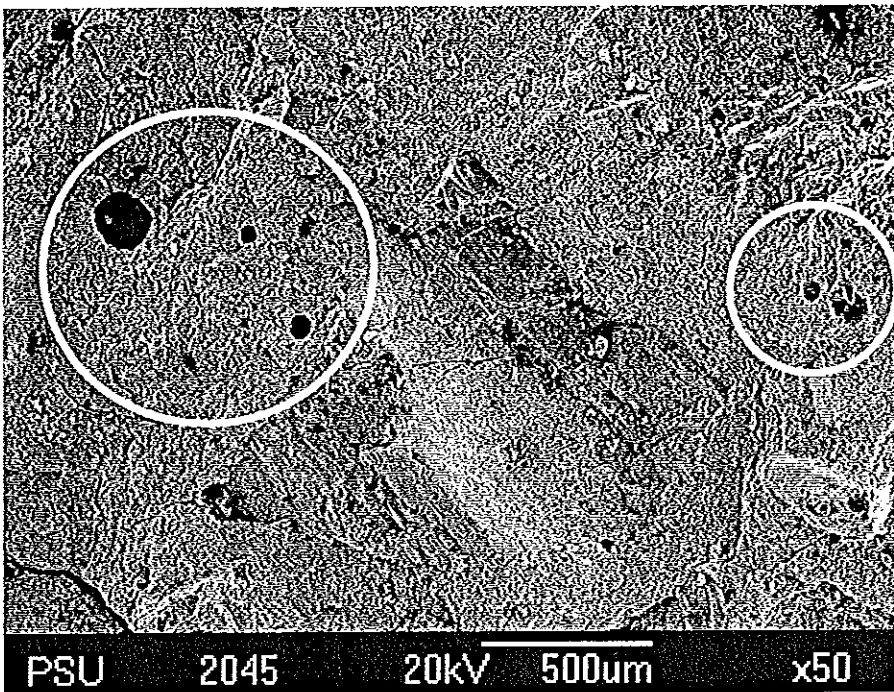
รูปที่ 4.23 อิทธิพลของอายุบ่มต่อความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.50$

ความถ่วงจำเพาะคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 2.11, 2.09, 2.08, 2.06 และ 2.04 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 56 วัน มีค่า 2.12, 2.13, 2.09, 2.09 และ 2.07 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะที่อายุบ่ม 28 วัน สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงความถ่วงจำเพาะที่ลดลงได้อย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเศษอิฐดินเผาบดละเอียดทำให้คอนกรีตมีรูโพรงเพิ่มขึ้น ความถ่วงจำเพาะโดยรวมของคอนกรีตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุบ่ม 28 วัน ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากคอนกรีตมีรูโพรงมากขึ้นนั่นเอง (รูปที่ 4.21) อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาบ่มคอนกรีตมากขึ้น ความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และปฏิกิริยาระหว่างเศษอิฐดินเผาบดละเอียดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตเกิดรูโพรงลดน้อยลง

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเปรียบเทียบกันระหว่างคอนกรีตที่ไม่เติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดและเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 (รูปที่ 4.24) พบว่าการแทนที่เศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 จะทำให้คอนกรีตเกิดรูโพรงมาก ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบความถ่วงจำเพาะที่ลดลง



ก)

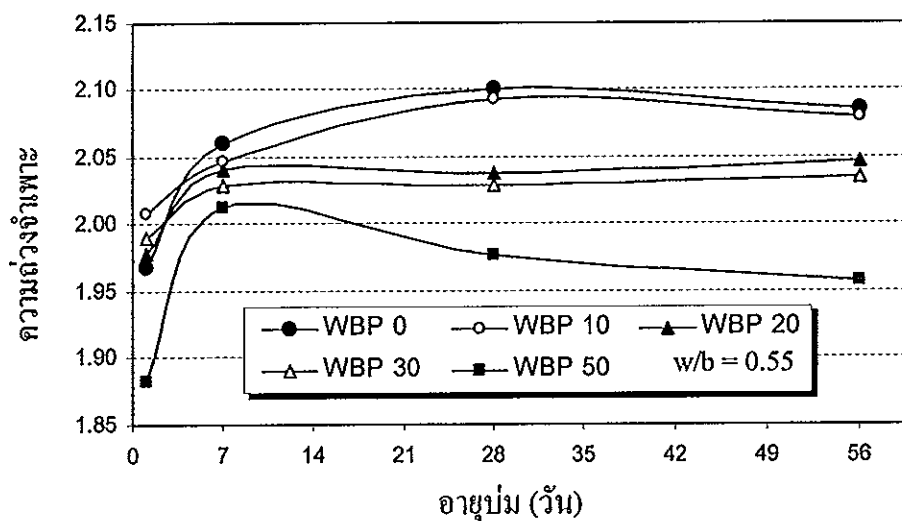


ข)

รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของรูโพรงคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.50$  อายุป่ม 56 วัน ก) ไม่เติมผงอิฐดินเผา (WBP 0) และ ข) แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 (WBP 50)

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเปรียบเทียบกับระหว่างคอนกรีตที่ไม่เติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดและเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 (รูปที่ 4.24) พบว่าการแทนที่เศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 จะทำให้คอนกรีตเกิดรูโพรงมาก ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบความถ่วงจำเพาะที่ลดลง

ผลทดสอบความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตโดยใช้ปริมาตรส่วนผสมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 พบว่าความถ่วงจำเพาะที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 2.10 2.09 2.03 2.02 และ 1.97 ตามลำดับ และที่อายุบ่ม 56 วัน มีค่า 2.08 2.07 2.04 2.03 และ 1.95 ตามลำดับ (รูปที่ 4.24)

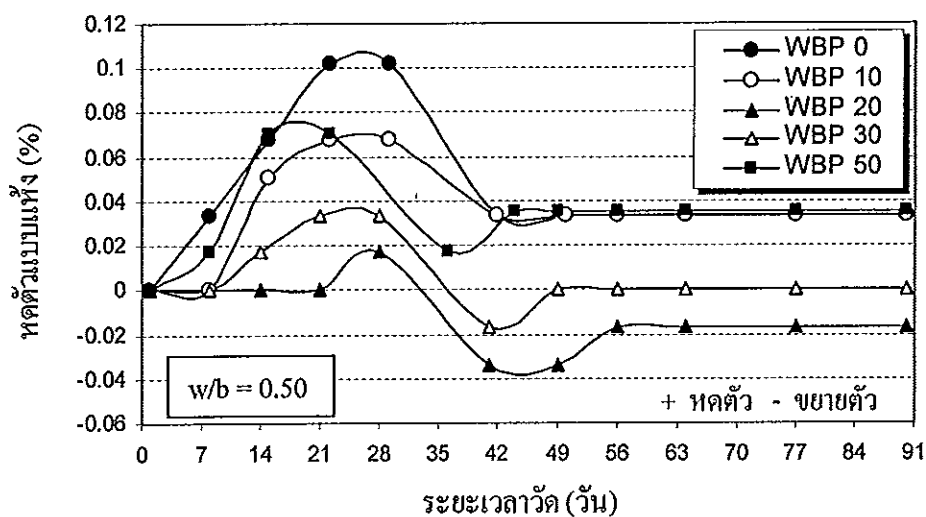


รูปที่ 4.25 อิทธิพลของอายุบ่มต่อความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.55$

จากผลทดสอบเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้นจะทำให้ความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตลดลง เนื่องจากทำให้คอนกรีตเกิดรูโพรงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักร้อยละ 50 ทำให้ความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตลดลงอย่างมาก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tommy et al. (2007) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากขึ้น ( $w/c = 0.48$ ) ทำให้เกิดรูโพรงภายในเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้ปริมาณมวลละเอียดผสมคอนกรีตที่น้อยลง ส่งผลให้มวลรวมละเอียดแทรกช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้น้อยลง ส่งผลกระทบต่อความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตให้ลดลงได้

#### 4.9 การหดและขยายตัวแบบแห้งของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

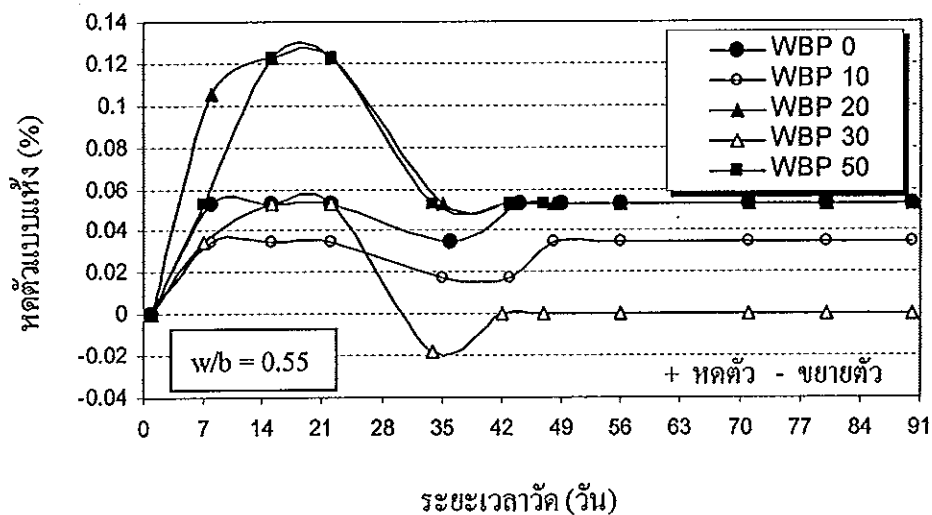
ผลทดสอบการหดและขยายตัวแบบแห้งของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย โดยใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกจะทดสอบเป็นระยะเวลา 0 - 42 วัน โดยวางก้อนตัวอย่างคอนกรีตไว้ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทปกติ พบว่าการหดและขยายตัวแบบแห้งของคอนกรีตจะแปรผันตามสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวัน ซึ่งได้ผลการหดตัวสูงสุดของแต่ละอัตราส่วนที่ร้อยละ 0.11 0.06 0.01 0.03 และ 0.07 ตามลำดับ และขยายตัวเมื่อแทนที่เศษอิฐดินเผาเคลือบร้อยละ 20 และ 30 อยู่ที่ร้อยละ 0.03 และ 0.01 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 อิทธิพลของอายุต่อการหดและขยายตัวแบบแห้งของก้อนตัวอย่างคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.50$

ช่วงที่สองนำก้อนตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ (อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 65%) เป็นระยะเวลา 43 ถึง 90 วัน พบว่าคอนกรีตแทนที่เศษอิฐดินเผาเคลือบร้อยละ 0 10 และ 50 มีการหดตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 0.034 - 0.035 เมื่อใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบร้อยละ 30 พบว่าสามารถช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้ดีไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด (รูปที่ 4.26) นอกจากนี้การใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบร้อยละ 20 ทำให้คอนกรีตที่อายุ 90 วัน ขยายตัวถึงร้อยละ 0.017

ผลทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตโดยใช้ปฏิกิริยาส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ดังแสดงในรูปที่ 4.27 มีการหดตัวสูงสุดของแต่ละอัตราส่วนที่ระยะเวลา 0 - 42 วัน ที่ 0.05% 0.03% 0.12% 0.05% และ 0.12% ตามลำดับ และขยายตัวเมื่อแทนที่เศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบร้อยละ 30 ที่ 0.01% นอกจากนี้เมื่อนำก้อนตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ (อุณหภูมิ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65%) เป็นเวลา 43 - 90 วัน พบว่ามีการหดและขยายตัวอยู่ระหว่าง 0.00% ถึง 0.05% ซึ่งคอนกรีตที่ใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 20 และ 50 มีการหดตัวมากที่สุดถึง 0.05% และการใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบร้อยละ 30 สามารถช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้ดีไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด (รูปที่ 4.27)

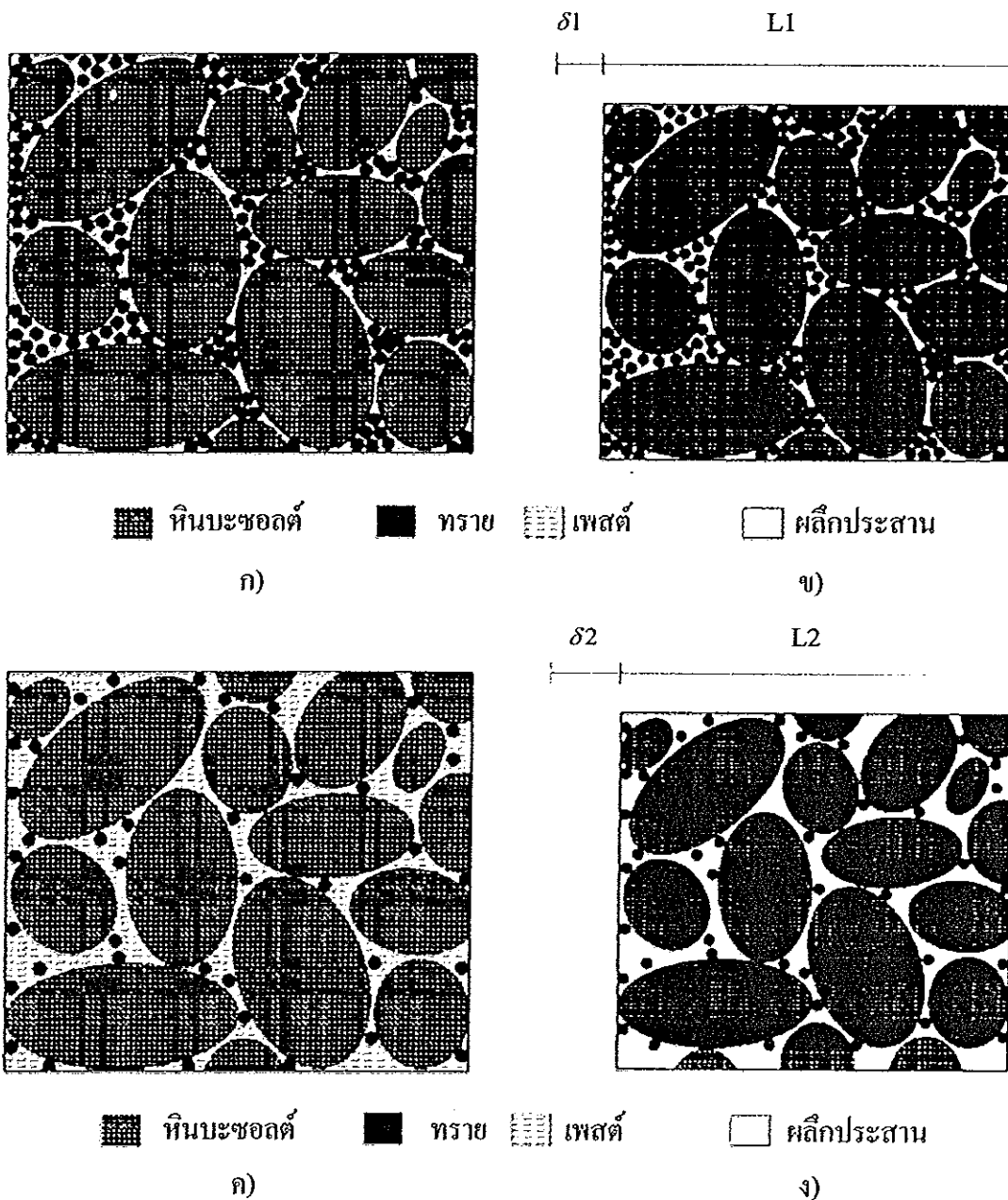


รูปที่ 4.27 อิทธิพลของอายุต่อการหดและขยายตัวแบบแห้งของก้อนตัวอย่างคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.55$

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบก้อนตัวอย่างคอนกรีต โดยใช้ปฏิกิริยาส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น จะส่งผลกระทบต่อหดและขยายตัวของคอนกรีตมากขึ้น มีน้ำส่วนเกินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้น้ำอยู่อย่างอิสระแทรกอยู่ระหว่างมวลรวมผสมคอนกรีต อีกทั้งปริมาณมวลรวมละเอียดที่ลดลงไม่สามารถแทรกช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบได้อย่างทั่วถึง ส่งผลให้เกิดการหดตัวมากกว่าคอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมละเอียดแทรกช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบได้อย่างทั่วถึง (รูปที่ 4.28)

เมื่อคอนกรีตอยู่ในห้องที่มีสภาพอากาศเปลี่ยนแปลง พบว่าคอนกรีตแทนที่เศษอิฐดินเผาเคลือบ 50% เกิดการหดตัวผันแปรตามสภาพอากาศมากที่สุด อย่างไรก็ตามจาก

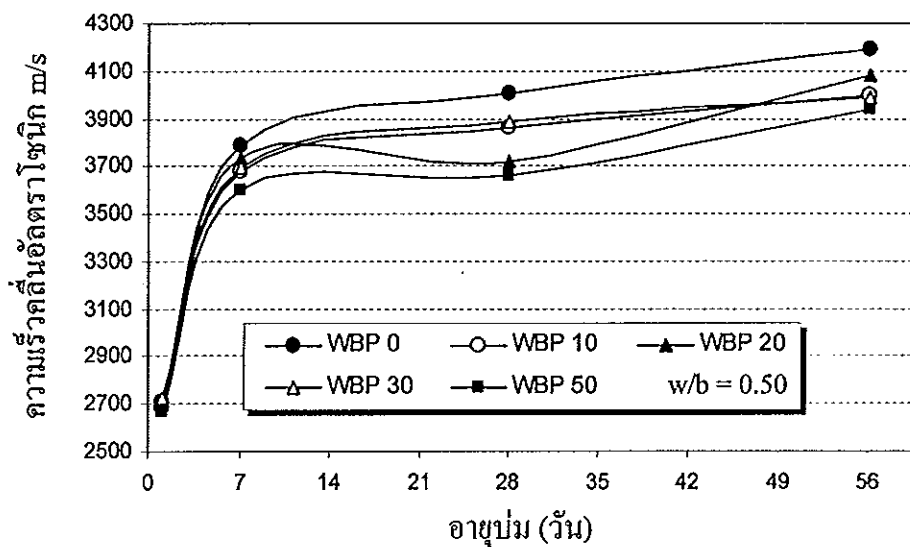
ผลทดสอบทั้งสองอัตราส่วน พบว่าการใช้เศษอิฐดินเผาละเอียดร้อยละ 30 สามารถช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้อย่างดีไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พรนราชนันท์ และ คนุพล (2552) แทนด้วยเถ้าแกลบ 30% และ Farrell et al. (1999) ที่แทนด้วยผงอิฐ 30% สามารถช่วยลดการขยายตัวของคอนกรีตและมอร์ตาร์ได้อย่างดี



รูปที่ 4.28 ภาพร่างการหดตัวแบบแห้งขององค์ประกอบคอนกรีตบะชอลเนื้อโพรงข่าย ก) คอนกรีตก่อนการหดตัว ( $w/b = 0.50$ ) ข) คอนกรีตหดตัวน้อยเนื่องจากทรายแทรกช่องว่างได้ทั่วถึง ( $w/b = 0.50$ ) ค) คอนกรีตก่อนการหดตัว ( $w/b = 0.55$ ) และ ง) คอนกรีตหดตัวมากเนื่องจากทรายแทรกช่องว่างน้อยเกินไป ( $w/b = 0.55$ )

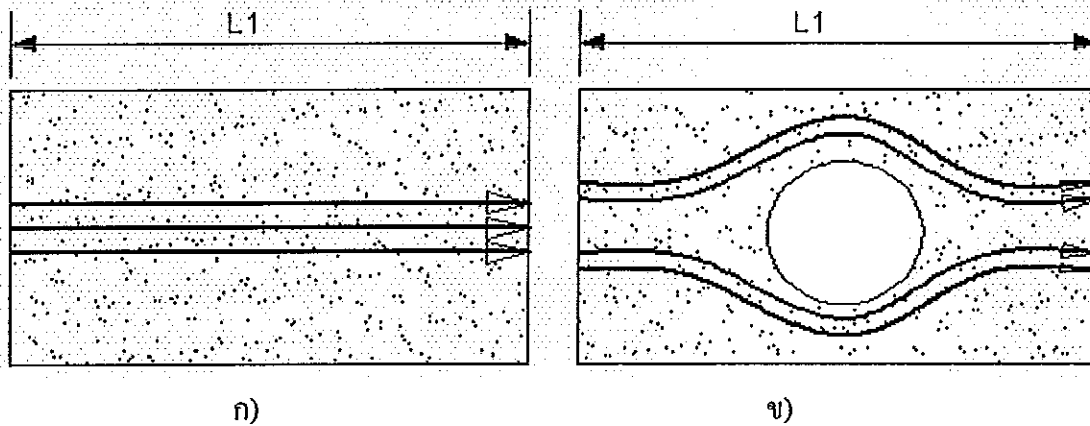
#### 4.10 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

ผลการทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ที่อายุบ่ม 1 7 28 และ 56 วัน ตามลำดับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ได้ผลทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 4005 3867 3721 3892 และ 3664 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

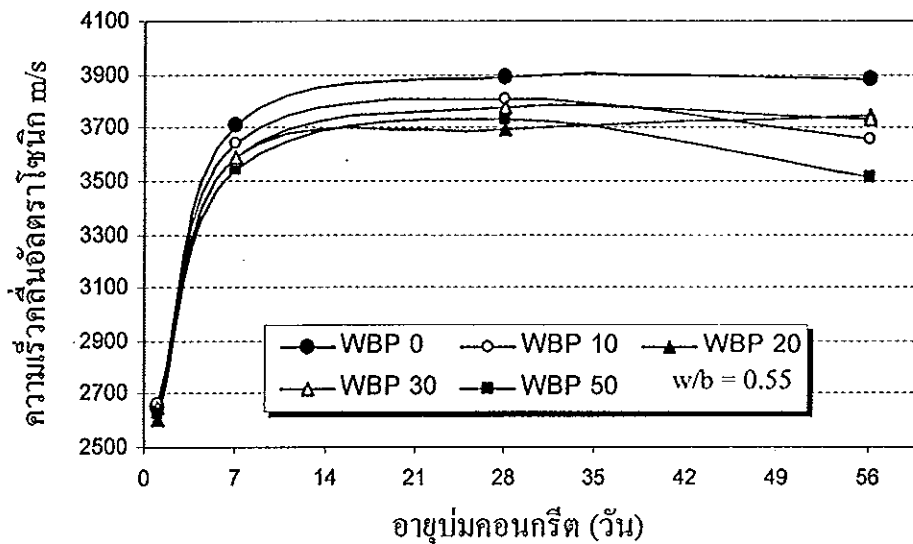


รูปที่ 4.29 อิทธิพลของอายุบ่มต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย โดยใช้  $w/b = 0.50$

จากผลทดสอบบ่งชี้ว่าเมื่อใช้ผงอิฐดินเผาแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านคอนกรีตลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณเศษอิฐดินเผาเคลือบเพิ่มขึ้น ทำให้คอนกรีตเกิดรูโพรงเพิ่มขึ้น คลื่นอัลตราโซนิคต้องเดินทางอ้อมโพรงอากาศมากขึ้น ดังนั้นจึงใช้เวลาเดินทางมากกว่าคอนกรีตที่มีรูโพรงน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และเมื่ออายุบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้นถึง 56 วัน พบว่าการใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ทุกอัตราส่วนผสมมีความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคผ่านคอนกรีตเพิ่มขึ้น มีค่าอยู่ในช่วง 3935-4190 เมตร/วินาที สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang et al. (2006) และ พรนรายนต์ (2551) พบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มคอนกรีต เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และเศษอิฐดินเผาเคลือบสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ได้มากขึ้นทำให้คอนกรีตมีรูโพรงน้อยลง



รูปที่ 4.30 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ก) ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเดินทางปกติ และ ข) ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเดินทางชะงัก



รูปที่ 4.31 อิทธิพลของอายุบ่มต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย โดยใช้  $w/b = 0.55$

นอกจากนี้เมื่อใช้ปฏิภาคส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 พบว่าเมื่อเพิ่มเศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก of อายุบ่มคอนกรีตที่ 1 - 28 วัน หลังจากนั้นค่อยๆ ลดลงเมื่ออายุบ่มคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นถึง 56 วัน เกือบทุกอัตราส่วนยกเว้นการใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.30) โดยค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 3886 3807 3694 3775 และ 3731 เมตร/วินาที ตามลำดับ และเมื่ออายุบ่มถึง 56 วัน ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกได้ลดลง เนื่องจากอัตราส่วนน้ำมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีปริมาณน้ำเหลือจากกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น ดังนั้นเมื่อคอนกรีตแข็งตัวน้ำได้ระเหยออกทำให้

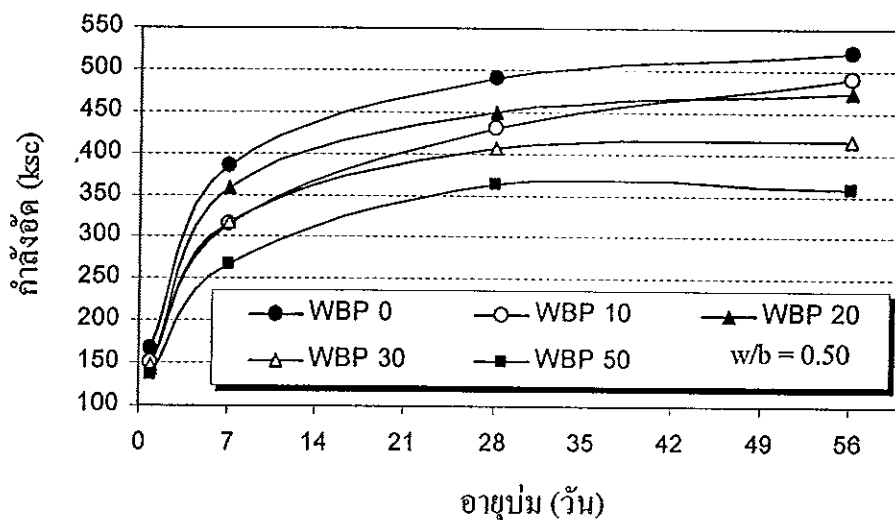


คอนกรีตเกิดรูโพรงมากขึ้น นอกจากนี้มวลรวมละเอียดที่ผสมคอนกรีตลดลงทำให้แทรกช่องว่างระหว่างมวลรวมได้ไม่ทั่วถึงก่อให้เกิดรูโพรงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tommy et al. (2007) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเกิดรูโพรงภายในคอนกรีตมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจากผลทดสอบทำให้ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตช้าลง และสอดคล้องกับงานวิจัยของวิบูลย์ และคณะ (2548) ที่พบว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยการเดินทางผ่านของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะช้ากว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นมาก ยกเว้นการใช้ผงอิฐแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และจากผลการทดสอบพบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่อายุบ่ม 56 วัน อยู่ระหว่าง 3512-3885 เมตร/วินาที

จากผลการทดสอบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตใช้ปฏิกิริยาคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55 ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่าคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายสามารถจัดอยู่ในชั้นคุณภาพดี คืออยู่ในช่วงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกระหว่าง 3500 ถึง 4500 เมตร/วินาที (Neville, 1995)

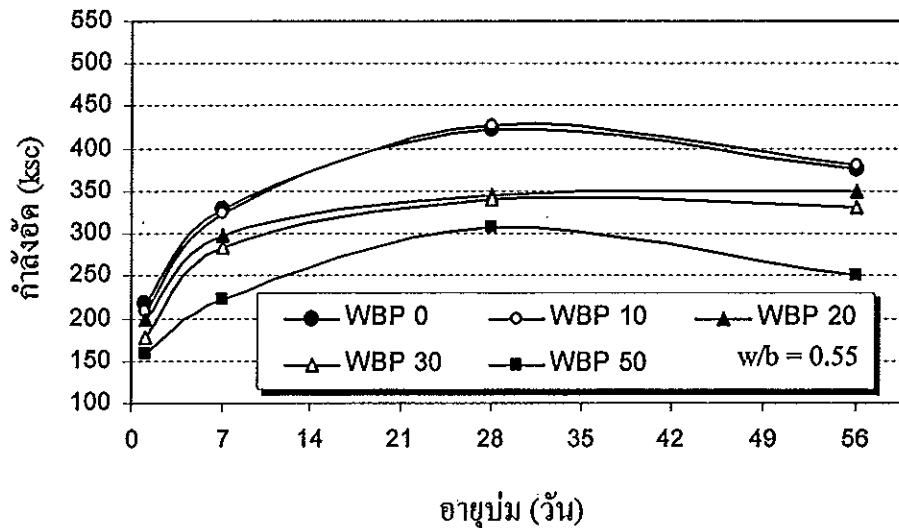
#### 4.11 กำลังอัดของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ที่อายุบ่ม 1 7 28 และ 56 วัน ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ได้กำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 490 430 449 406 และ 364 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ w/b = 0.50

กำลังอัดคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่งขายที่ปฏิกิริยาส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ได้กำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่า 424 427 345 340 และ 307 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และกำลังอัดคอนกรีตที่อายุบ่ม 56 วัน พบว่าจะลดลงเกือบทุกอัตราส่วนผสม (ยกเว้น WBP 20) ซึ่งมีกำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 251-380 กก./ตร.ซม. ดังแสดงใน รูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 อิทธิพลของอายุบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่งขายที่  $w/b = 0.55$

จากผลทดสอบกำลังอัดคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่งขายสามารถจำแนกปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่งขายได้ดังนี้

#### 4.11.1 ผลกระทบจากเศษอิฐดินเผาบดละเอียด

พบว่าเมื่อใช้เศษอิฐดินเผาบดแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เนื่องจากเศษอิฐดินเผาบดละเอียดมากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) จากกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮดรชันลดลง ทำให้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดที่เติมลงไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ลดลงจนไม่สามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mouli and Khelafi (2006) ที่พบว่าเมื่อใช้วัสดุปอซโซลานธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ผสมคอนกรีตลดลง ส่งผลกระทบต่อการศึกษาปฏิกิริยาไฮดรชันที่ลดลง ทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานได้น้อยลงและปริมาณของ CSH ลดน้อยลงตามไปด้วย ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดคอนกรีตที่ลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อบ่มคอนกรีตเพิ่ม

มากขึ้น (56 วัน) กำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นการแทนที่เศษอิฐดินเผาละเอียด 50% ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงมาก นอกจากนี้การแทนที่เศษอิฐดินเผาละเอียดร้อยละ 10 ให้กำลังอัดเป็นที่น่าพอใจมากที่สุด สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังอัดของเพสต์ (รูปที่ 4.11) พบว่าการใช้เศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ให้กำลังอัดสูงสุด ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Toledo Filho et al. (2007) พบว่าการใช้ปริมาณเศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดควรจะอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 10 ถึง 20 แต่ถึงอย่างไรไม่ควรเติมเศษอิฐดินเผาละเอียดเกินร้อยละ 30 เพราะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงมาก

#### 4.11.2 ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีปริมาณน้ำที่เหลือจากกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมากขึ้น อีกทั้งส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินาไดรอกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในเศษอิฐดินเผาละเอียดอยู่อย่างอิสระเพิ่มมากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานลดลง เมื่อคอนกรีตแข็งตัวจะทำให้เกิดรูโพรงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง อีกทั้งในส่วนของน้ำที่เหลือจากกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีมากส่งผลให้คอนกรีตเกิดรูโพรงได้เช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tommy et al. (2007) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากขึ้น ทำให้กำลังอัดลดลงและเกิดรูโพรงภายในเพสต์มากขึ้น และยังพบอีกว่าถ้าเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้กำลังอัดที่อายุปม 56 วัน ลดลงกว่ากำลังอัดที่ 28 วัน ได้เช่นกัน

#### 4.11.3 ผลกระทบจากความพรุน

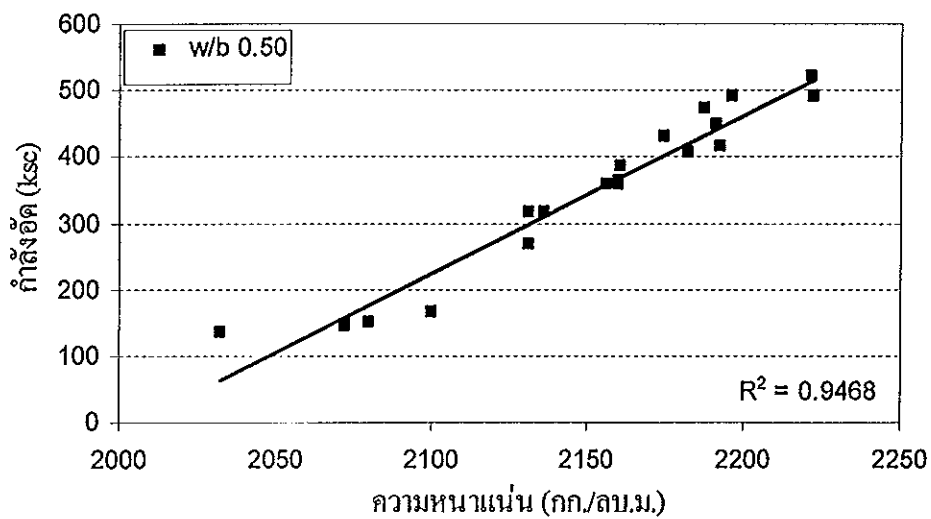
ความพรุนของคอนกรีตมีสาเหตุมาจาก 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ รูโพรงที่เกิดจากลักษณะทางกายภาพของมวลรวม เนื่องจากเนื้อหินบะซอลต์เนื้อโพรงขำมีลักษณะเป็นรูพรุน เมื่อนำไปผสมคอนกรีตจะมีโพรงอากาศที่อยู่ภายในไม่สามารถออกมาได้ อีกทั้งรูโพรงภายในเนื้อเพสต์เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ทำให้เพสต์มีรูโพรงเพิ่มขึ้นและรูโพรงระหว่างผิวสัมผัสเพสต์กับมวลรวม (Tommy et al., 2007)

ความพรุนของคอนกรีตยังส่งผลกระทบต่อความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีต และกำลังอัดทั้งสิ้น เมื่อคอนกรีตมีความพรุนมากความหนาแน่นคอนกรีตย่อมลดน้อยลง มีพื้นที่สัมผัสมากและดูดซึมน้ำได้มากขึ้น การเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิคผ่านคอนกรีตจึงช้าลง กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเนื่องจากมีพื้นที่รับแรงอัดลดลง ซึ่ง

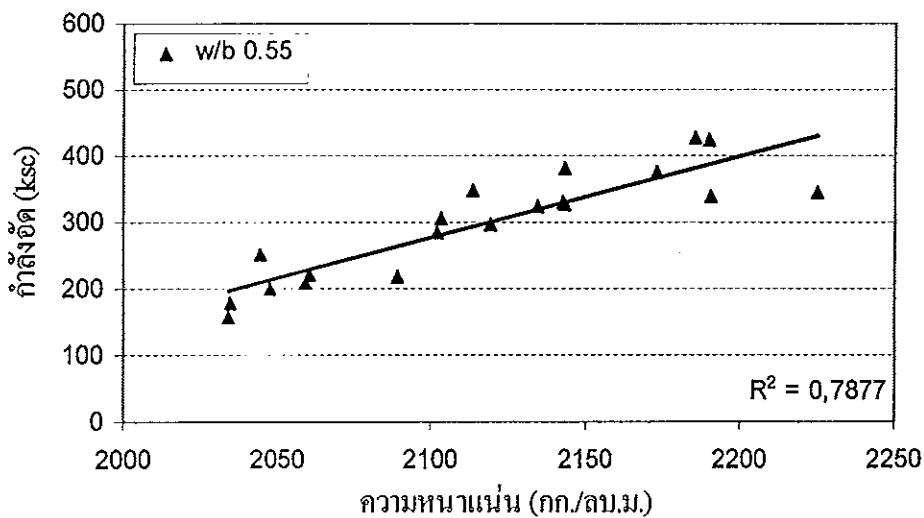
สอดคล้องกับงานวิจัยของ Farrell et al. (2001) พบว่ากำลังอัดจะมีความสัมพันธ์กับช่องว่างโดยที่โพรงภายในมอร์ต้าร์จะเป็นตัวชี้วัดกำลังอัด

#### 4.11.4 ผลกระทบจากความหนาแน่นของคอนกรีต

กำลังอัดคอนกรีตจะแปรผันตามความหนาแน่นของคอนกรีต ในกรณีที่คอนกรีตมีความหนาแน่นมากกำลังอัดของคอนกรีตก็จะมีค่ามาก ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความหนาแน่นคอนกรีตที่ w/b = 0.50



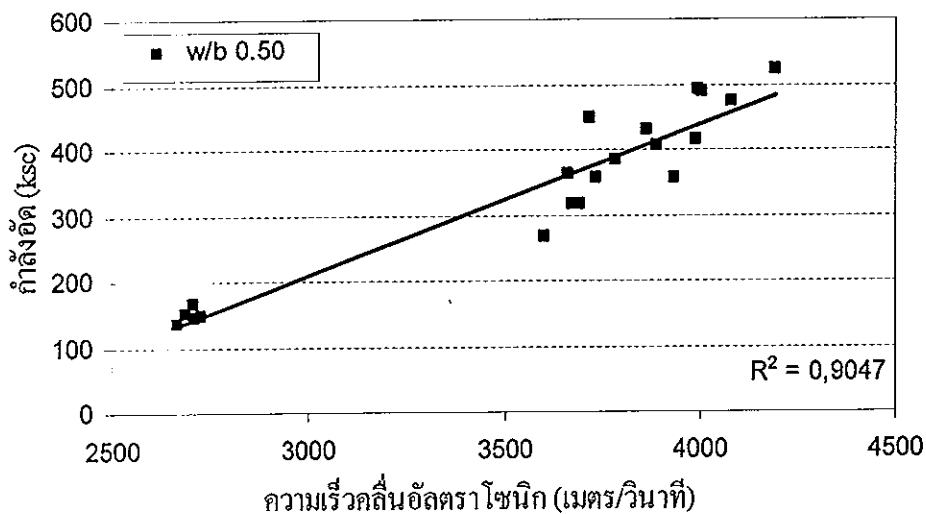
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความหนาแน่นคอนกรีตที่ w/b = 0.55

#### 4.11.5 ผลกระทบจากอายุบ่มคอนกรีต

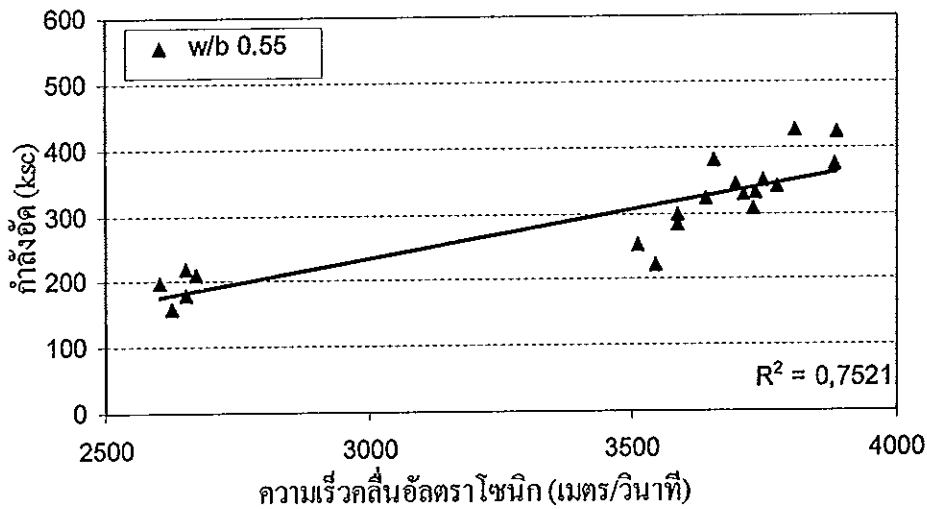
โดยทั่วไปการเพิ่มอายุบ่มคอนกรีตมากขึ้น จะส่งผลดีต่อกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากคอนกรีตได้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งในส่วนของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจาก ปูนซีเมนต์กับน้ำอย่างเฉียว และเกิดจากการทำปฏิกิริยาของเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่ทำปฏิกิริยาได้อย่างซ้ำๆ โดยได้ผลผลิตเป็นผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต (CAH) มากขึ้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักสำหรับกำลังอัดของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ดังนั้นการเพิ่มอายุบ่มคอนกรีตที่มากขึ้นย่อมส่งผลดีต่อกำลังอัดที่เพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4.32) ยกเว้นการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากถึง 0.55 ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อทำให้กำลังคอนกรีตลดลง (รูปที่ 4.33) อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55 โดยใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่ากำลังอัดคอนกรีตที่อายุบ่มที่ 28 วัน เป็นไปตามข้อกำหนดของวัสดุปอชโซลาน ASTM C 618 ซึ่งมีกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตตัวควบคุม (คอนกรีตที่ไม่เติมเศษอิฐดินเผาเคลือบ) เกินกว่าร้อยละ 75 ขึ้นไป

#### 4.11.6 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดคอนกรีตต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค

จากผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตพบว่ามีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคอย่างเห็นได้ชัด เมื่อนำผลการทดสอบทั้งสองมาวิเคราะห์เชิงสถิติ (รูปที่ 4.36 และรูปที่ 4.37)



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคที่ w/b = 0.50



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่  $w/b = 0.55$

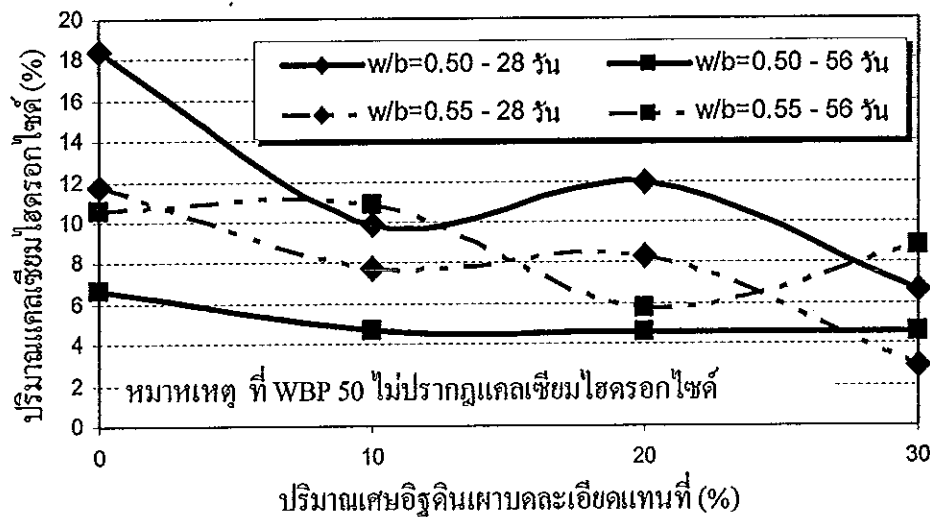
เนื่องจากความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะเดินทางผ่านวัสดุที่มีเนื้อเดียวกัน ส่งถ่ายคลื่นอัลตราโซนิกจากจุดส่งสัญญาณไปยังจุดรับสัญญาณได้เร็วกว่าวัสดุที่มีรูพรองภายใน เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิกไม่ต้องเดินทางอ้อมรูพรองทำให้คลื่นอัลตราโซนิกเดินทางเร็วขึ้น

#### 4.12 โครงสร้างจุลภาค และองค์ประกอบทางเคมีคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ใช้ปฏิภาคส่วนผสมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55 เติมเศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 10 20 30 และ 50 ตามลำดับ ที่อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน พบว่าการแทนที่เศษอิฐดินเผาละเอียดเพิ่มขึ้นจะทำให้คอนกรีตเกิดรูพรองเนื่องจากฟองอากาศเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.24) และในช่วงอายุบ่มคอนกรีต 1-28 วัน พบแอตตรึงไคต์ห่วงวงคอนกรีตอยู่ แต่เมื่ออายุบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้นถึง 56 วัน จะไม่ปรากฏชั้นแอตตรึงไคต์แต่จะพบชั้นโมโนซัลเฟตแทน (รูปที่ 4.14 ข) เนื่องจากชั้นแอตตรึงไคต์จะเปลี่ยนสภาพเป็นชั้นโมโนซัลเฟต ส่วนการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อเกิดการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และน้ำเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักต่อการเพิ่มกำลังของคอนกรีต นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้นทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของคอนกรีตไม่สมบูรณ์และทำให้เกิดรูพรองเพิ่มขึ้น

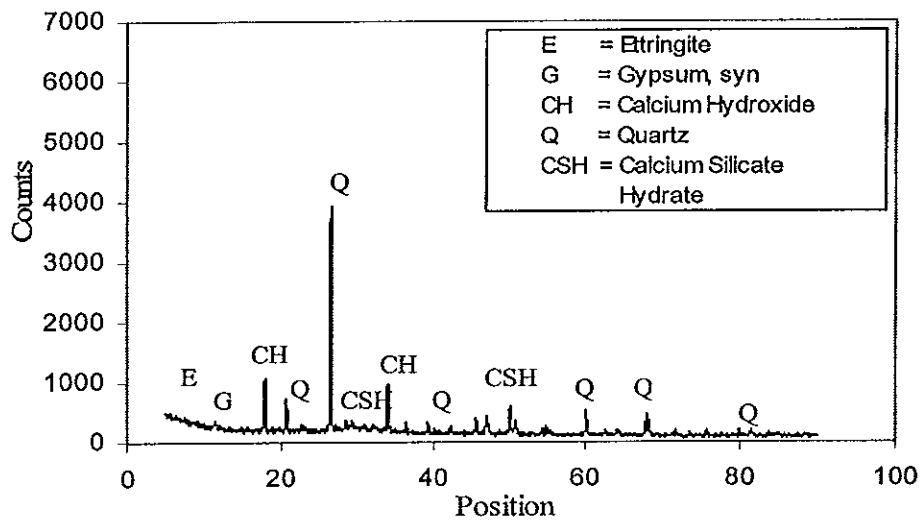
จากผลการทดสอบโดยใช้ปฏิภาคส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่อายุบ่ม 28 วัน และ 56 วัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น

ส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หรือน้ำปูนใสที่เหลือจากกระบวนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.38) นอกจากนี้ปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีตที่  $w/b = 0.50$  เมื่ออายุบ่มคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดน้อยลง เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิโคนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ เจริญวุฒิ (2546) พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลงเมื่ออายุบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้น และองค์ประกอบทางเคมีของอิฐที่นำมาใช้ก็มีส่วนเช่นกันทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้ไม่เต็มที่



รูปที่ 4.38 ความแปรปรวนของปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อใช้เศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ ( $w/b = 0.50-28$  วัน : อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ที่อายุบ่ม 28 วัน)

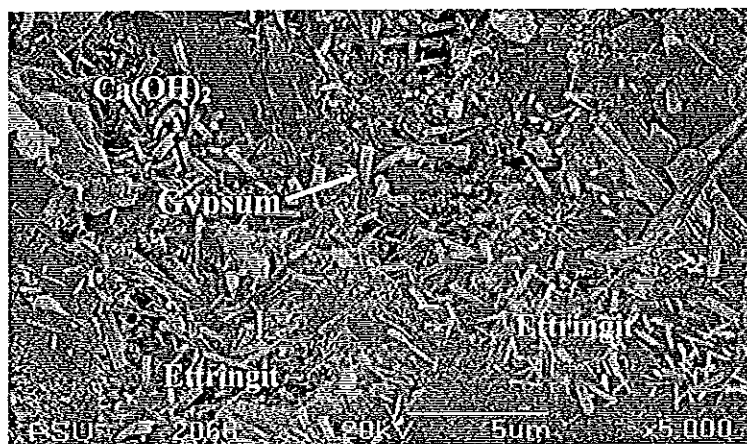
อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ( $w/b = 0.55$ ) พบว่าความแปรปรวนของความเข้มข้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไม่สอดคล้องกับผลทดสอบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ที่พบว่าอายุบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้น (56 วัน) ความเข้มข้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลง อาจจะเป็นเพราะการสุ่มเลือกตัวอย่างไปทดสอบในห้องปฏิบัติการไม่ดีพอ



ก)

ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แอดตริงไกต์ (Etringite)	20.84
ยิปซัม (Gypsum, syn)	14.14
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide)	18.46
ควอตซ์ (Quartz)	42.51
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate)	4.04

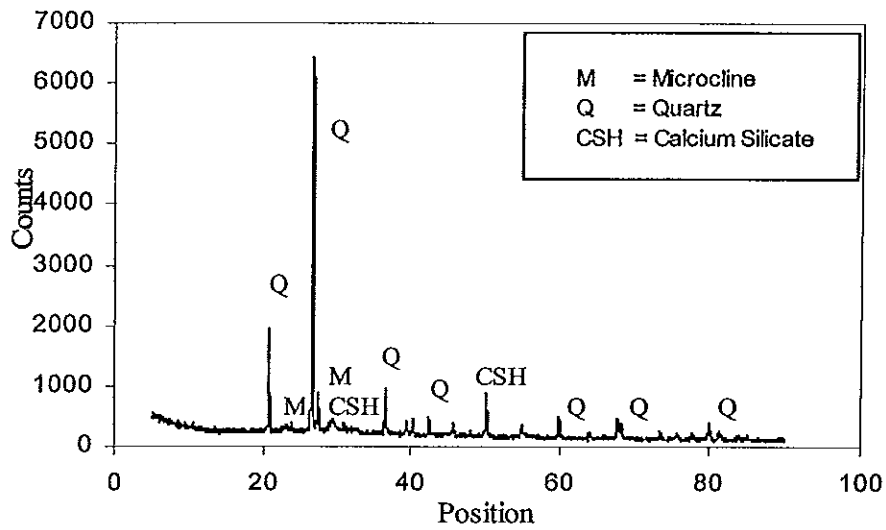
ข)



ค)

รูปที่ 4.39 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายไม่เต็มเศษอิฐดินเผาละเอียด ที่  $w/b = 0.50$  อายุป่ม 28 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตและ ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 5000 เท่า

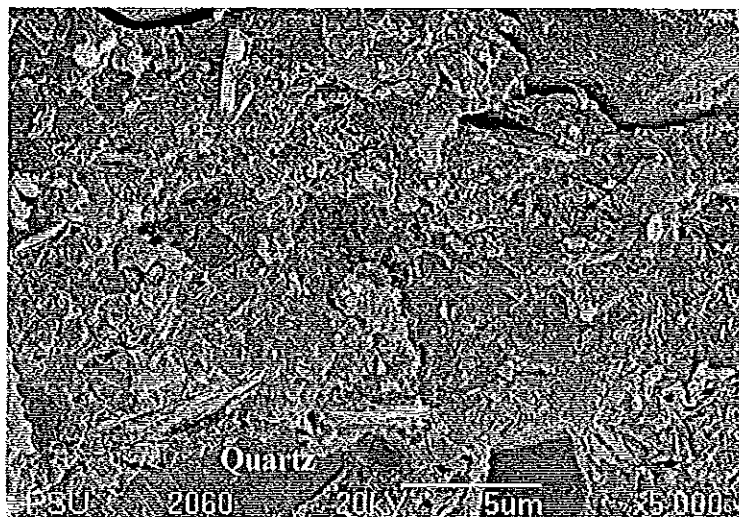




ก)

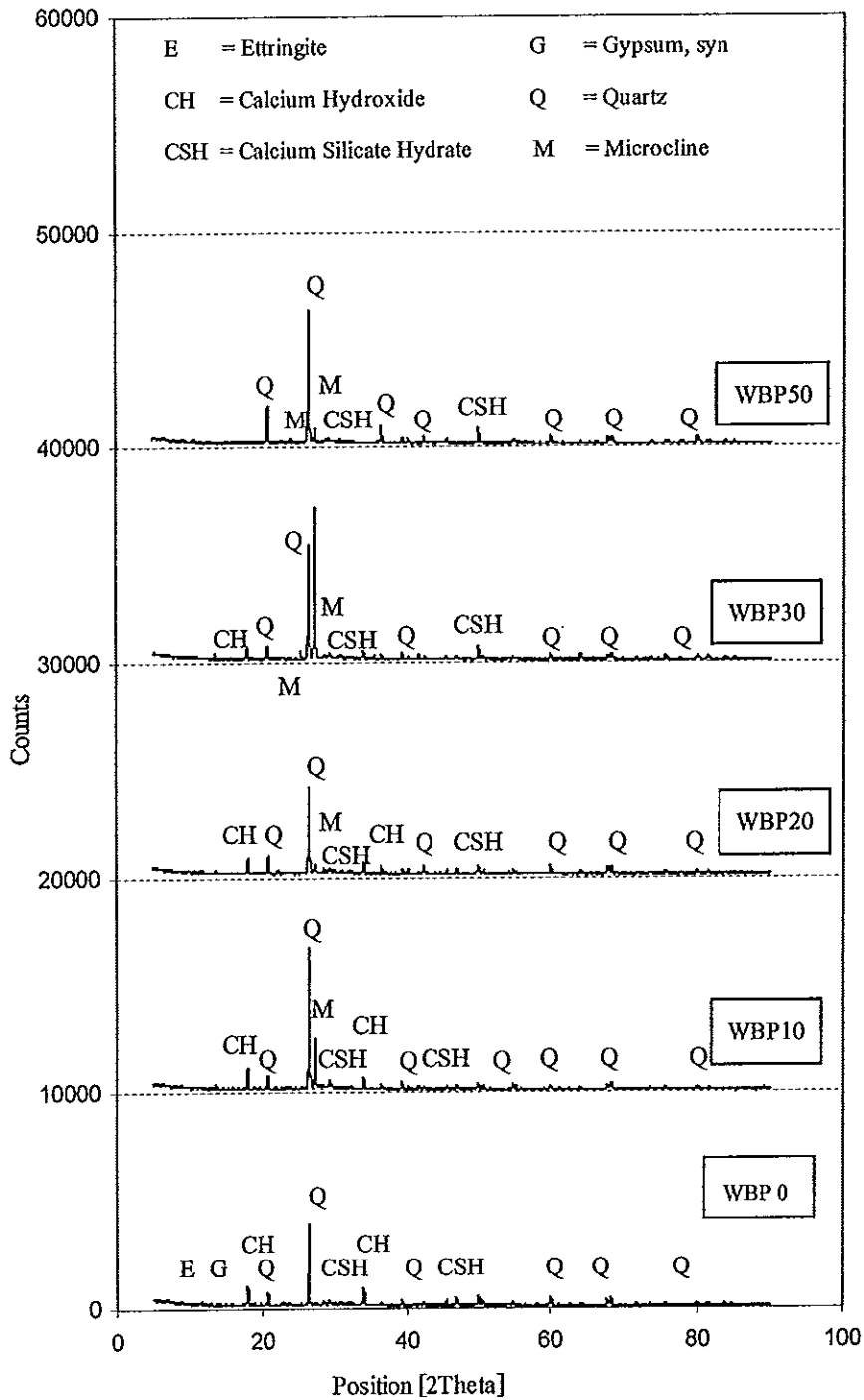
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
ไมโครไคลน์ (Microcline)	42.89
ควอตซ์	53.95
แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์	3.16
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	0

ข)

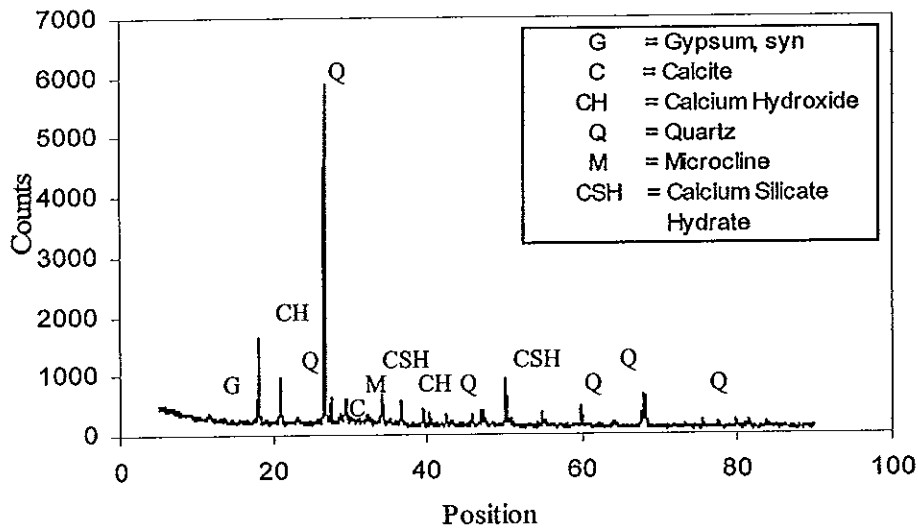


ค)

รูปที่ 4.40 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเดิมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 ที่  $w/b = 0.50$  อายุบ่ม 28 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตและ ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 5000 เท่า



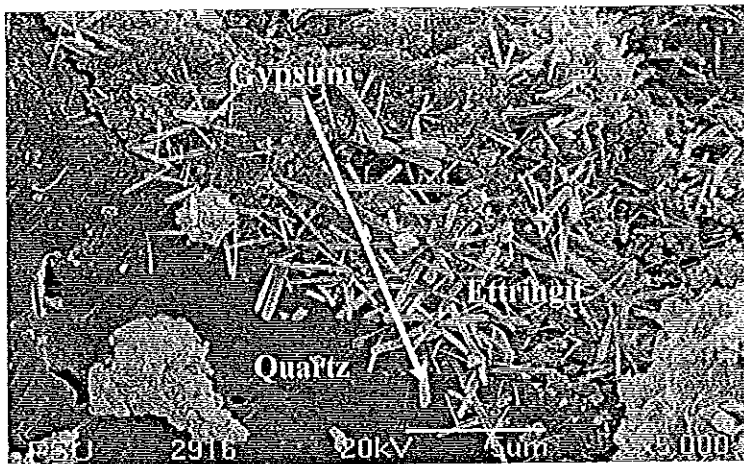
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.50$  ผสมเศษอิฐดินเผาเคลือบสีในอัตราส่วนต่างกันที่อายุบ่ม 28 วัน



ก)

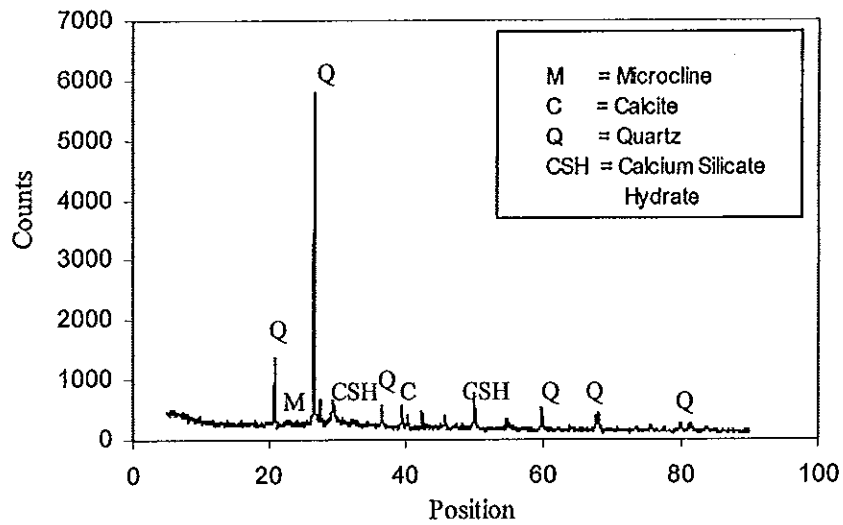
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์ (Calcite)	4.10
ฮิปซัม	6.96
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	11.75
ควอตซ์	42.06
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	5.25
ไมโครไคลน์	29.89

ข)



ค)

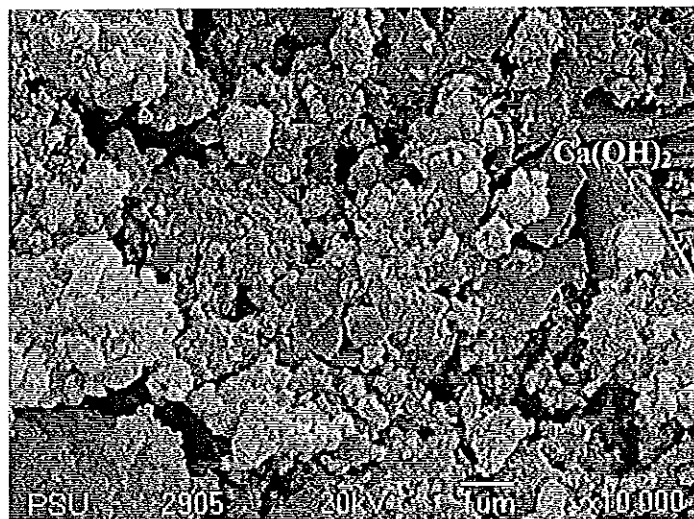
รูปที่ 4.42 คอนกรีตชะลอตัวเนื้อโพรงข่ายไม่เต็มเสขอิฐดินเผาเคลือบที่  $w/b = 0.55$  อายุปม 28 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตและ ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 5000 เท่า



ก)

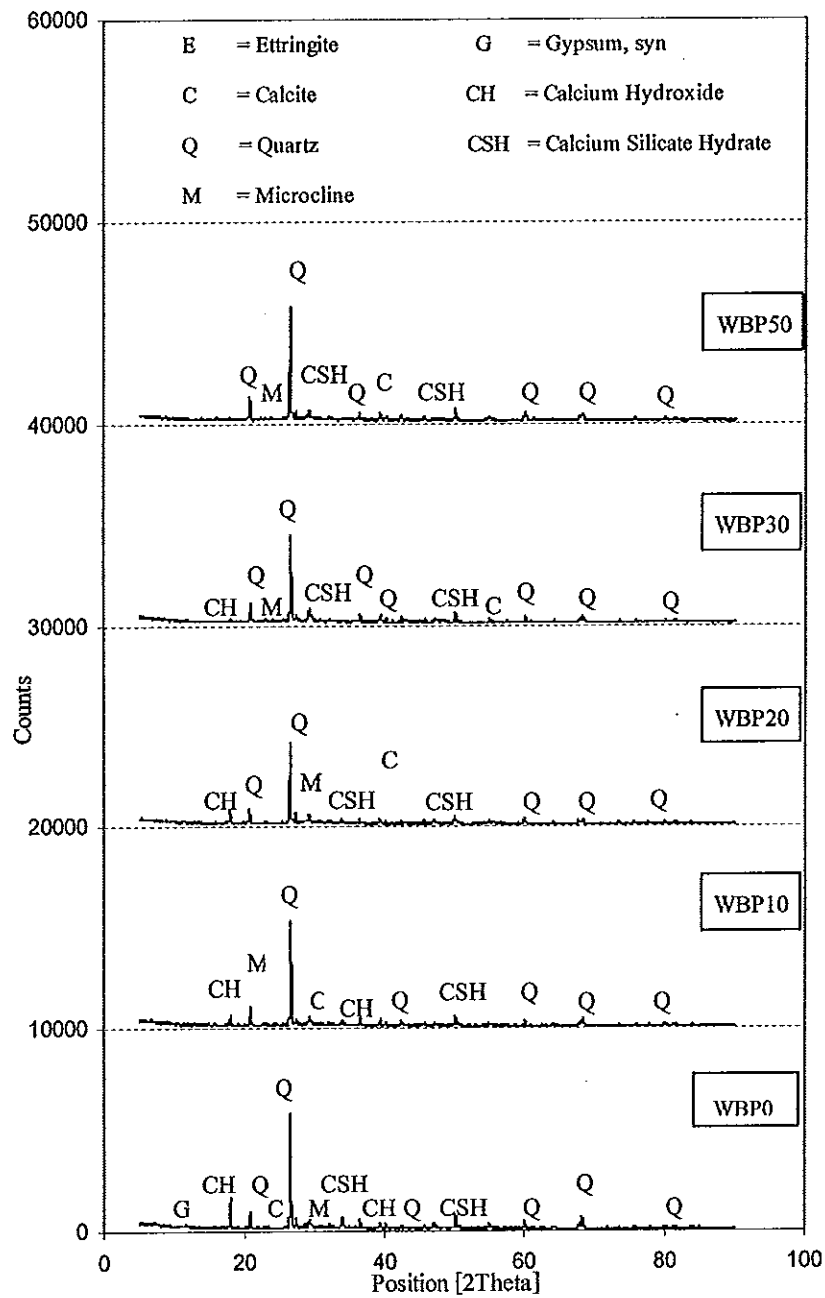
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	6.77
ควอตซ์	48.08
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	4.16
ไมโครไคลน์	40.99

ข)

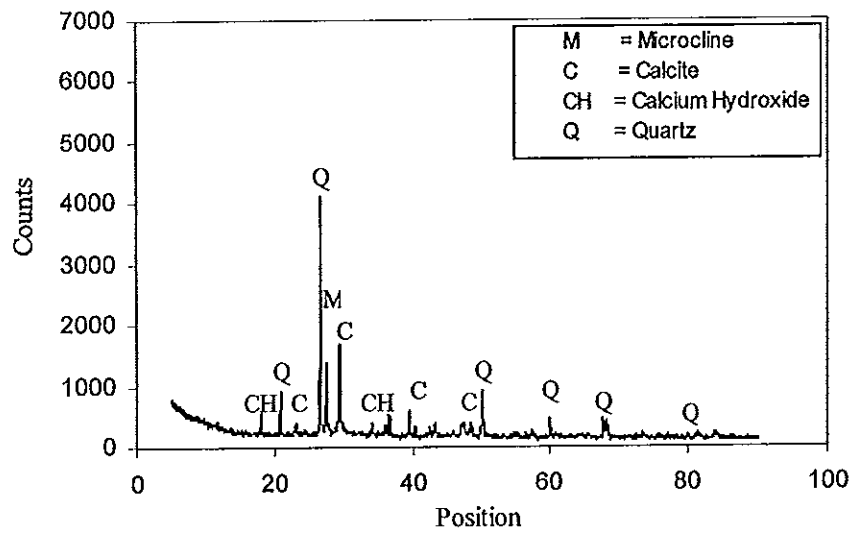


ค)

รูปที่ 4.43 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงถ่ายเต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 ที่  $w/b = 0.55$  อายุปม 28 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตและ ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 10000 เท่า



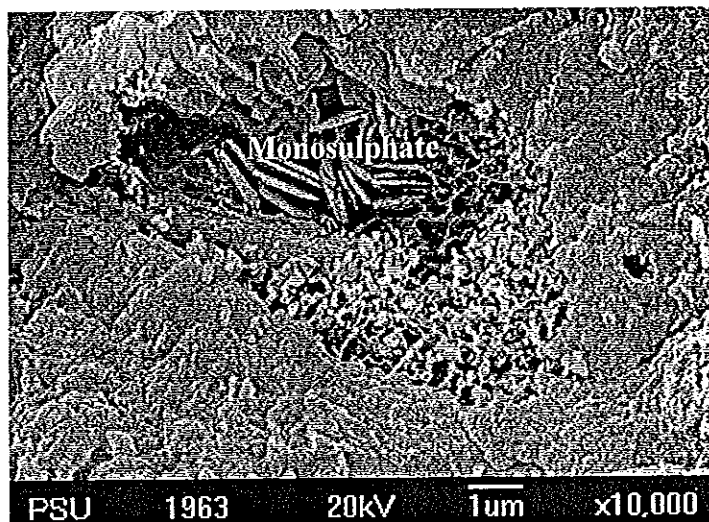
รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพรงข่ายที่  $w/b = 0.55$  ผสมเศษอิฐดินเผาเคลือบในอัตราส่วนต่างกันที่อายุบ่ม 28 วัน



ก)

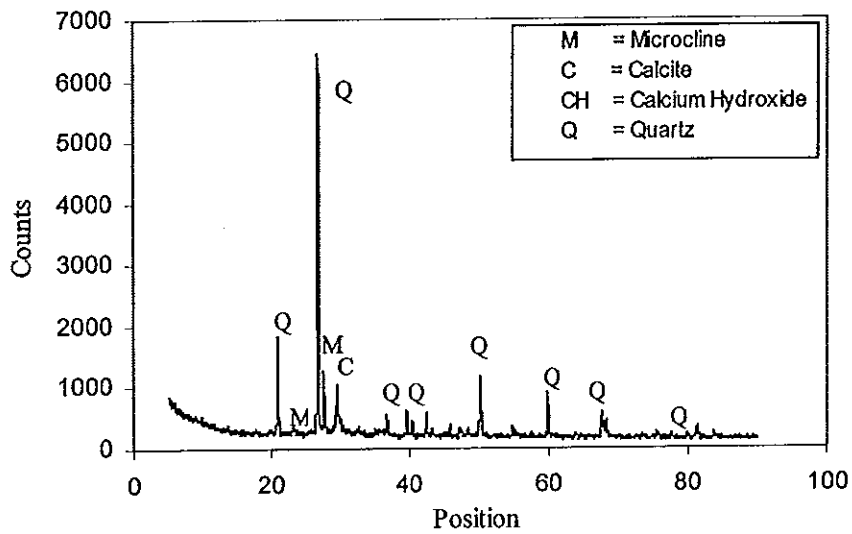
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	25.01
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	6.67
ควอตซ์	43.09
ไมโครไคลน์	25.23

ข)



ค)

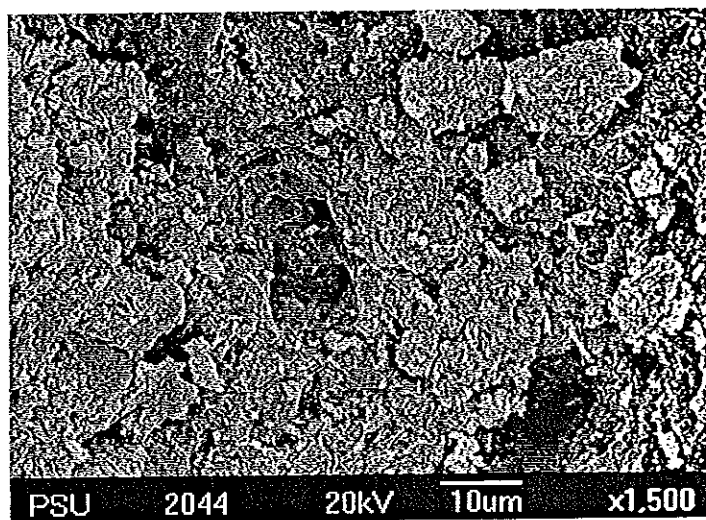
รูปที่ 4.45 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงขุ่นไม่เต็มเศษอิฐดินเผาบดละเอียดที่  $w/b = 0.50$  อายุบ่ม 56 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต และ ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 10000 เท่า



ก)

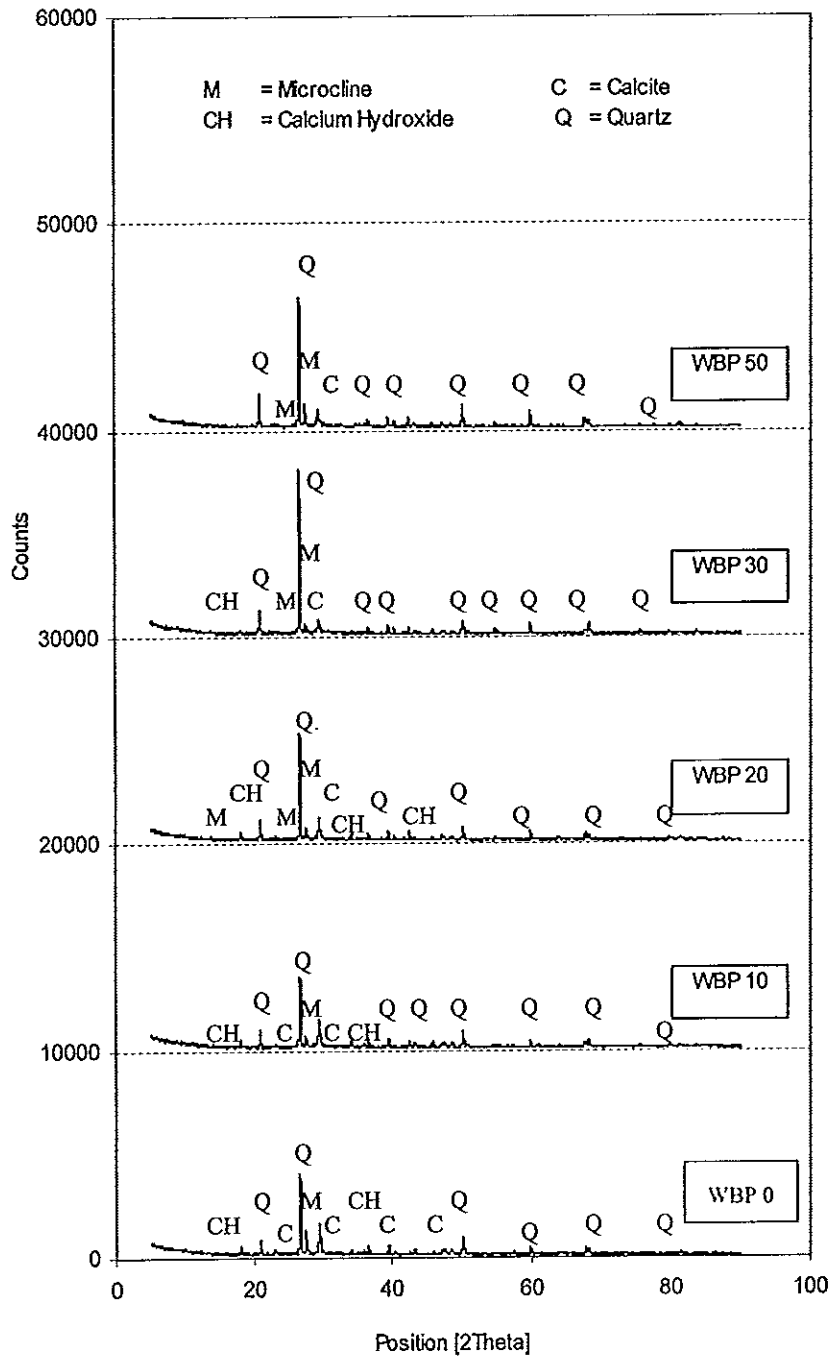
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	10.21
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	0
ควอตซ์	46.35
ไมโครไคลน์	43.44

ข)



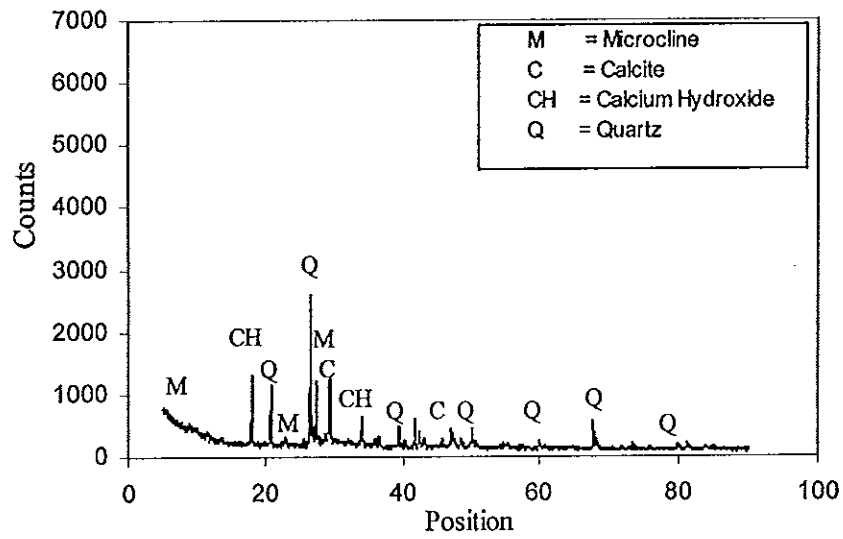
ค)

รูปที่ 4.46 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 ที่  $w/b = 0.50$  อายุบ่ม 56 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตและ ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1500 เท่า



รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.50$  ผสมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดในอัตราส่วนต่างกันในอายุบ่ม 56 วัน

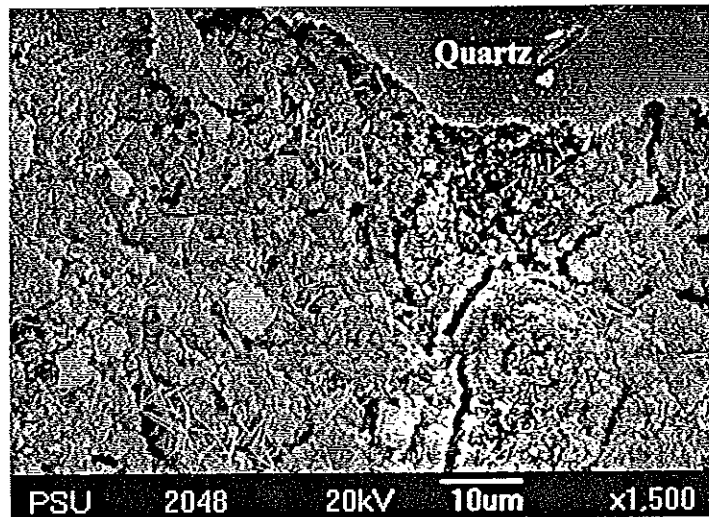




ก)

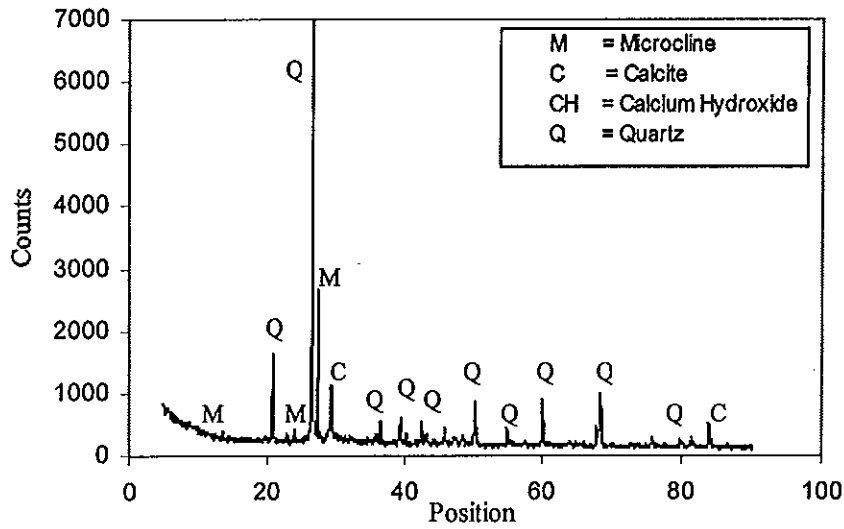
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	15.16
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	10.59
ควอตซ์	30.91
ไมโครไคลน์	43.34

ข)



ค)

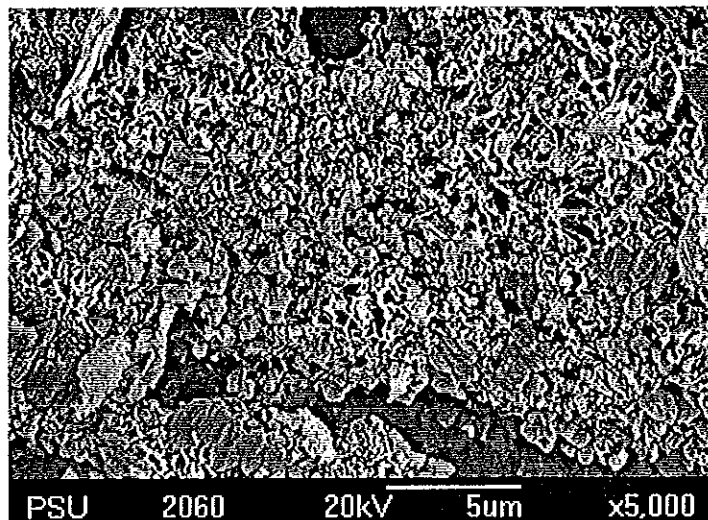
รูปที่ 4.48 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายไมเดิมเศษอิฐดินเผาเคลือบที่  $w/b = 0.55$  อายุป่ม 56 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต และ ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1500 เท่า



ก)

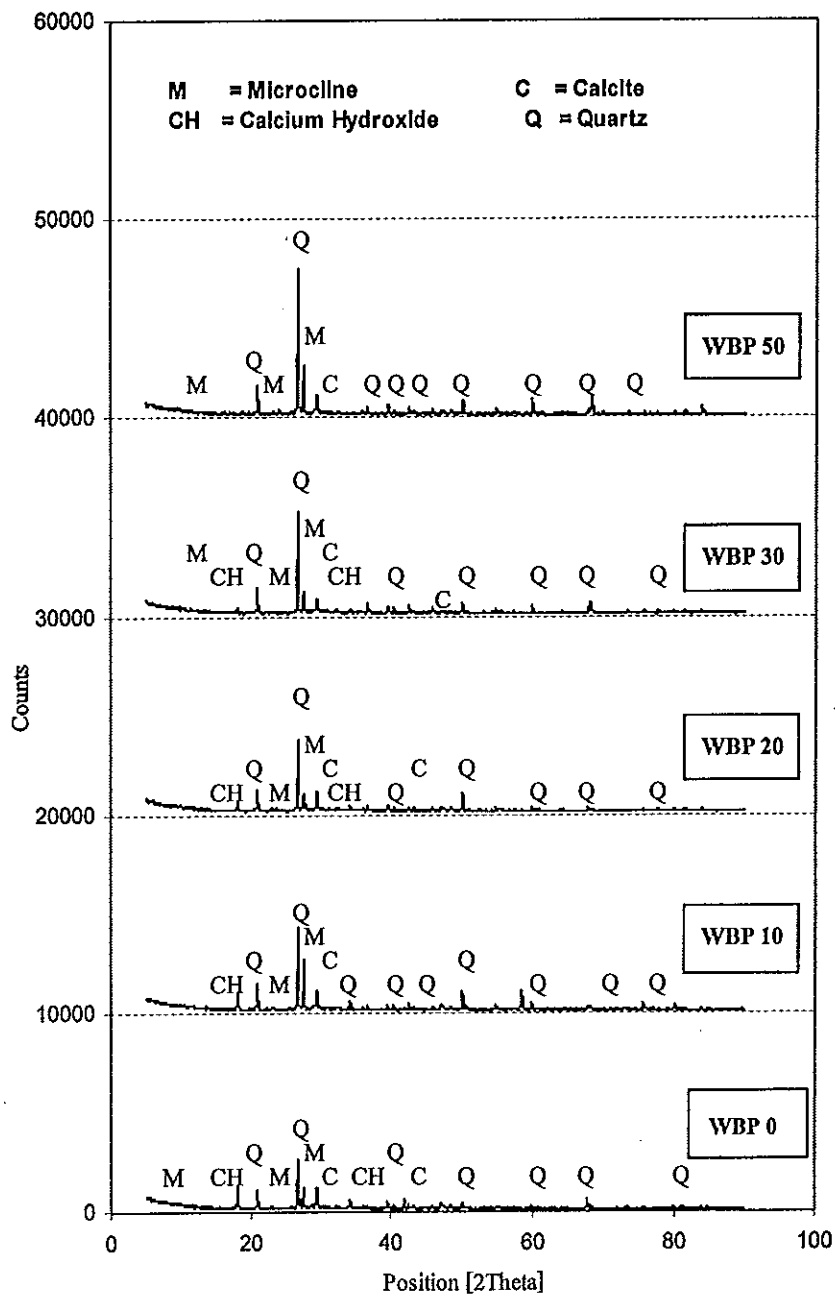
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	13.09
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	0
ควอตซ์	66.32
ไมโครไคลน์	20.59

ข)



ค)

รูปที่ 4.49 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 50 ที่  $w/b = 0.55$  อายุบ่ม 56 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตและ ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.50 เปรียบเทียบปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่ง่ายที่  $w/b = 0.55$  ผสมเศษ  
 อิฐดินเผาบดละเอียดในอัตราส่วนต่างกันที่อายุบ่ม 56 วัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลกระทบเศษอิฐดินเผาบดและอายุบ่มที่มีต่อคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายสามารถสรุปได้ดังนี้

1) เศษอิฐจากอุตสาหกรรมการผลิตอิฐดินเผาบ้านคลองแปด มีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานสามารถจัดอยู่ในประเภท Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ได้ผลทางด้านบวก คือเมื่อนำไปบดละเอียดสามารถนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานได้ ช่วยให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง โดยสามารถนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักได้ไม่เกินร้อยละ 30 ถ้าใช้มากกว่านี้จะทำให้คอนกรีตเกิดโพรงภายในเนื้อคอนกรีตอย่างมากและกำลังอัดคอนกรีตลดลงไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ASTM C 618

2) ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคสามารถบ่งชี้ถึงแนวโน้มพัฒนาการความหนาแน่นและกำลังอัดคอนกรีตได้ จากผลการทดสอบสามารถจัดคุณภาพของคอนกรีตในพจน์ของความเร็วลื่นตามยาว สามารถจัดคอนกรีตที่ผลิตอยู่ในชั้นคุณภาพดี นอกจากนี้คอนกรีตที่ผลิตได้ยังสามารถจัดอยู่ในคอนกรีตชนิดกึ่งเบาถึงคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป

3) การใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก สามารถช่วยหน่วงการก่อตัวของเพสต์ ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้ประสิทธิภาพความสามารถเทได้ของคอนกรีตลดลง นอกจากนี้การใช้เศษอิฐบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักร้อยละ 30 สามารถช่วยระงับการหดตัวของคอนกรีตได้อย่างดี

4) หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายสามารถใช้เป็นมวลรวมผสมคอนกรีตชนิดกึ่งเบาถึงคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปได้ และลดความหนาแน่นของคอนกรีตลงได้บางส่วน เนื่องจากรูโพรงของหินทำให้คอนกรีตเกิดช่องว่างภายใน

5) กำลังอัดคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นเมื่ออายุบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้น ยกเว้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากขึ้น ( $w/b = 0.55$ ) ทำให้กำลังอัดคอนกรีตที่อายุบ่ม 56 วัน ลดลงกว่าคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน นอกจากนี้การใช้เศษอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักสูงกว่าร้อยละ 30 จะทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงอย่างมาก

6) ผลการตรวจการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และ โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีต (SEM) ที่อายุบ่ม 28 และ 56 วัน พบว่ามี CSH เกิดขึ้น และปริมาณ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ลดลง ซึ่งเป็นสิ่งบ่งว่า เกิดการทำปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้น โดยเฉพาะที่ผสมเศษอิฐดินเผาละเอียดร้อยละ 10 (รูปที่ ข-1)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาผลกระทบของเศษอิฐดินเผาและอายุบ่มที่มีต่อคอนกรีตมวลรวมจาก หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย เป็นการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลและ แนวทางในการพิจารณานำเศษอิฐดินเผาและหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายมาใช้ในการก่อสร้าง ซึ่ง หากจะนำไปใช้งานจริงจะต้องพิจารณาดังนี้

1) ควรตรวจสอบความเป็นปอซโซลานของอิฐดินเผาที่นำมาใช้ผสมแทน ปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิในการเผาอิฐ เพื่อเกิดความมั่นใจได้ว่ามีสมบัติความ เป็นปอซโซลาน

2) ควรศึกษาคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่มีอายุบ่มมากกว่า 56 วัน เพิ่มเติม เพื่อดูผลกระทบของกำมะถันในหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่มีต่อการพัฒนากำลังอัด ต่อไป

3) ควรศึกษาผลกระทบการกัดกร่อนของคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อ โพรงข่ายจากน้ำเค็มและกรดว่ามีผลอย่างไรบ้าง

4) ควรศึกษาการใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ เพื่อใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ว่ามีผลต่อคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพรงข่ายอย่างไรบ้าง

### บรรณานุกรม

- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม. ปริมาณการผลิตแร่ที่สำคัญ  
จำแนกตามชนิดแร่ พ.ศ. 2547-2551. จาก <http://www.service.nso.go.th>.
- เจริญพล อินขัน และ ดนุพล ตันนโยภาส (2552). ผลกระทบของเศษอิฐดินเผาที่มีต่อสมบัติของ  
คอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา  
 แห่งชาติครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 13-15 พฤษภาคม 2552.
- เจริญพล อินขัน และ ดนุพล ตันนโยภาส (2552). อิทธิพลของสมบัติทางกายภาพและทรงสัญญาณ  
ของมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่มีต่อกำลังของคอนกรีตผสมรวมกับเศษอิฐดินเผา  
บดละเอียด. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7.  
 21-22 พฤษภาคม 2552.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร (2536). คอนกรีตเทคโนโลยี. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้างจำกัด.  
 กรุงเทพมหานคร.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร (2543). คอนกรีตเทคโนโลยี. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้างจำกัด.  
 กรุงเทพมหานคร.
- ดนุพล ตันนโยภาส, ชีรยุทธ ว่องวิริยะสกุล, วัลลภ แซ่ท้อย และ ชิตพล เอียดปาน (2551). อิทธิพล  
ของชนิดมวลรวมหยาบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต. การประชุมวิชาการทาง  
 วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 8-9 พฤษภาคม 2551, หน้า 68-73.
- ดนุพล ตันนโยภาส, พัทธา จันทร์แก้ว และวิมลรัตน์ มณีดับ (2549). พฤติกรรมของแก้วแกลบและ  
แก้วเชื้อเพลิงไฮปาล์มน้ำมันที่ผสมกันด้วยเครื่องบดแอทไตรเตอร์มีต่อน้ำปูนขึ้น. การ  
 ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11. ภูเก็ต. 19-21 เมษายน 2549 6 หน้า  
 (CD Rom)
- ดนุพล ตันนโยภาส (2553). แร่และหิน. พิมพ์ครั้งที่ 2. คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 321 หน้า.
- บริษัทบุรีรัมย์ นวัตกรรม จำกัด (2553). สารความรู้. จาก <http://www.buriramnawarat.com/saranaru.html>
- บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) (2551). INSEE Concrete Handbook คู่มืออินทรี  
คอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 3.
- พรนราชนันท์ บุญราศรี และ ดนุพล ตันนโยภาส (2552) ผลกระทบของสถานะน้ำที่มีต่อกำลังของ  
คอนกรีตมวลเบาทะเลปาล์มน้ำมันผสมแก้วแกลบ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา  
 แห่งชาติครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 13-15 พฤษภาคม 2552. หน้า 1693-  
 1698

- พรนราชน์ บุญราศรี (2551). อิทธิพลของเถ้าไยป่าล้มน้ำมันและเถ้าแกลบต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมกะลาป่าล้มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เรือโท เจริญวุฒิ ปัญญาอนุสรณ์กิจ (2546). การปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้ดินขาวสำหรับงานซ่อม. บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
- วินิต ช่อวิเชียร (2539). คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิบูลย์ วุฒินิยาม, สมชาย ลำดีรางค์กุล และ สุพจน์ ศรีนิล (2548). การเปรียบเทียบการประเมินกำลังคอนกรีตโดยคลื่นอัลตราโซนิก, ซีเมนต์แอสเมมอร์และการทดสอบแบบทำลาย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10.ชลบุรี. 2 - 4 พฤษภาคม 2548
- สันชัย อินทพิชัย และ พานิช วุฒิพฤกษ์ (2547). ปฏิวัติศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- อาปีเต็ง ฮาวา และ คนุพล ตันนโยภาส (2551). อิทธิพลของเถ้าแกลบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมพืชมิม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13. 14-16 พฤษภาคม 2551.
- อภิรักษ์ นพรัตน์ (2551). ผลกระทบของหินฝุ่นแกรนิตและเถ้าป่าล้มน้ำมันที่มีต่อกำลังอัดและความคงทนของมอร์ต้า. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Al-Rawas, A.A. and Hago, A.W. (2006). Evaluation of field and laboratory produced burnt clay pozzolans. Applied Clay Science. 31, pp. 29-35.
- ASTM C 29 (1998). Method of Test for Unit Weight of Aggregate. In Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 33 (1998). Specifications for Concrete Aggregates. In Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 128 (1998). Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. In Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 136 (1998). Method of Test for Sieve or Screen Analysis of Fine and Coarse Aggregate. In Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 143 (1998). Method of Test for Slump of Portland Cement Concrete. In Annual Book of ASTM Standards.

- ASTM C 187 (1998). Method of Test for Normal Consistency of Hydraulic Cement. In Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 191 (1998). Method of Test for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. In Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 330 (1998). Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. In Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 340 (1998). Specification for Portland-Pozzolan Cement. In Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 595 (1998). Specification for Blended Hydraulic Cement. In Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 597 (1998). Method of Test for Pulse Velocity through Concrete. In Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C 618 (1998). Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. In Annual Book of ASTM Standards.
- Baronio, G. and Bindat, L.(1997). Study of the pozzolanicity of some bricks and clays. Construction and Building Materials. Vol. 11. No.1, pp. 41-46.
- Boke, H. Akkurt, S. Ipekoglu, B. and Ugurlu, E. (2006). Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters. Cement and Concrete Research. 36, pp. 1115-1122.
- Chang, T.P. Lin, H.C. Chang, W.S. and Hsiao, J.F. (2006). Engineering Properties of Lightweight Aggregate Concrete Assessed by Stress Wave Propagation Methods. Cement Concrete Composites. 28(1), pp. 57-68.
- Cole, W.F. (1979). Dimensionally unstable grey basalt. Cement and Concrete Research. Vol. 9. Issur 4, pp. 425-430.
- Czarnecki, B. and Gillott, J.E. (1990). Effect of different admixture on the durability of silpher concrete made with different aggregate. Engineering Geology. Vol. 28. Issue1-2, pp. 105-118.
- Debieb, F. and Kenai, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. Construction and Building Materials. 22 (5), pp. 886-893



- Demirdag, S. and Gunduz, L. (2008). Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units. Construction and Building Materials. 22 (3), pp. 135-142.
- Farrell, M.O. Wild, S. and Sabir, B.B. (1999). Resistance to chemical attack of ground brick-Portland cement mortar Part I Sodium sulphate solution. Cement and Concrete Research. 29, pp. 1781-1790.
- Farrell, M.O. Wild, S. and Sabir, B.B. (2000). Resistance to chemical attack of ground brick - Portland cement mortar Part II Synthetic seawater. Cement and Concrete Research. 30, pp. 757-765.
- Farrell, M.O. Wild, S. and Sabir, B.B. (2001). Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar. Cement and Concrete Composites. 23, pp. 81-91.
- Kilic, A. Atis, C.D. Yasar, E. and Ozcan, F. (2003). High-Strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures. Cement and Concrete Research. 33 (10), pp. 1595-1599.
- Korkanc, M. and Tugrul, A. (2004). Evaluation of Selected Basalt from Nigde Turkey as Source of Concrete Aggregate. Engineering Geology. 75, pp. 291-307.
- Moullia, M. and Khelafi, H. (2006). Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. Building and Environment. doi:10.1016/j.buildenv.11.038
- Neville, A.M. (1995). Properties of concrete. 4th ed. London. Longman Group Limited. pp. 504-506.
- Nuran, A. and Mevlut, U. (2000). The use of waste ceramic tile in cement production. Cement and Concrete Research. 30, pp. 497-499.
- Poon, C.S. and Chan, D. (2006). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. Construction and Building Materials. 20, pp. 569-577.
- Sabir, B.B. Wild, S. and Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete. Review. Cement and Concrete Composites. 23(6), pp. 441-454.
- Shayan, A. and Quick, G.W. (1988). An alkali-reactive basalt from Queensland, Australia. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. Vol.10. Issue 4, pp. 209-214.
- Tasong, W.A. Cripps, J.C. and Lynsdale, C.J. (1998). Aggregate-Cement Chemical Interactions. Cement and Concrete Research. 28(7), pp. 1037-1048.

- Toledo Filho, R.D. Goncalves, J.P. Americano, B.B. and Fairbairn, E.M.R. (2007). Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil. Cement and Concrete Research. 37, pp. 1357-1365.
- Tommy, Y.Lo. Tang, W.C. and Cui, H.Z. (2007). The effects of aggregate properties on lightweight concrete. Building and Environment. 42, pp. 3025-3029.
- Topcu, I.B. (1997). Semi Lightweight Concrete Produced by Volcanic Slags. Cement and Concrete Research. 27(1), pp. 15-21.
- Turanli, L. Bektas, F. and Monteiro, P.J.M. (2003). Use of Ground Clay Brick as a Pozzolanic Material to Reduce the Alkali-Silica Reaction. Cement and Concrete Research. 1540(33), pp. 1539-1542.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุและก้อนตัวอย่างคอนกรีต

ตารางที่ ก-1 ส่วนคละมวลรวมหยาบของหินบะซอลต์เนื้อ โพร่งข่าย (Coarse Aggregate)

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักข้างบน ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ข้างบน ตะแกรง (%)	ข้างสะสม ร้อยละ (%)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรง (%)
3/4"	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	21.80	31.98	31.98	68.02
เบอร์ 4	32.76	48.06	80.04	19.96
เบอร์ 8	12.25	17.97	98.00	2.00
เบอร์ 16	1.36	2.00	100.00	0.00
PAN	0.00	0.00	-	-
รวม	68.17	100.00	310.02	-
ค่าโมดูลัสความละเอียด = $310.02/100 = 3.10$				

ตารางที่ ก-2 ส่วนคละมวลละเอียดของทรายหยาบ (Fine Aggregate)

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	น้ำหนักข้างบน ตะแกรง (กรัม)	ร้อยละที่ข้างบน ตะแกรง (%)	ข้างสะสม ร้อยละ (%)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรง (%)
เบอร์ 4	0.00	0.00	0.00	100.00
เบอร์ 8	20.94	20.00	20.00	80.00
เบอร์ 16	31.41	30.00	50.00	50.00
เบอร์ 30	26.17	25.00	75.00	25.00
เบอร์ 50	15.71	15.00	90.00	10.00
เบอร์ 100	10.47	10.00	100.00	0.00
PAN	0.00	0.00	-	-
รวม	20.94	100.00	335.00	-
ค่าโมดูลัสความละเอียด = $335.00/100 = 3.35$				

ตารางที่ ก-3 ความหนาแน่นของมวลรวมหยาบหินบะชอลต์เนื้อโพรงข่าย

การทดสอบแบบแน่น		
รายละเอียด	Mold. No.1	Mold. No.2
1. ปริมาตร (ลบ.ม.)	0.002737	0.001406
2. น้ำหนัก Mold (กก.)	2.388	1.591
3. น้ำหนัก Mold + หินบะชอลต์ (กก.)	6.383	3.635
4. น้ำหนักหินบะชอลต์ (กก.)	3.995	2.044
5. ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	1459.63	1453.77
ค่าเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	1456.70	
การทดสอบแบบหลวม		
รายละเอียด	Mold. No.1	Mold. No.2
1. ปริมาตร (ลบ.ม.)	0.002737	0.001406
2. น้ำหนัก Mold (กก.)	2.388	1.591
3. น้ำหนัก Mold + หินบะชอลต์ (กก.)	5.7495	3.294
4. น้ำหนักหินบะชอลต์ (กก.)	3.3615	1.703
5. ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	1228.17	1211.24
ค่าเฉลี่ย (กก./ลบ.ม.)	1219.70	

ตารางที่ ก-4 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินบะชอลต์เนื้อโพรงข่าย

รายละเอียด	ตัวอย่างหินบะชอลต์		เฉลี่ย
	1	2	
น้ำหนักวัสดุที่สภาพอบแห้ง (กรัม) (A)	2500	2518	-
น้ำหนักวัสดุที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (กรัม) (B)	2635	2599	-
น้ำหนักวัสดุในน้ำ (กรัม) (C)	1520	1547.6	-
ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง B/(B-C)	2.36	2.47	2.42
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (B-A)/A×100	5.40	3.22	4.30
ความถ่วงจำเพาะมวลรวมแห้ง A/(B-C)	2.24	2.39	2.32
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ A/(A-C)	2.55	2.59	2.57

ตารางที่ ก-5 ดัชนีความแบน (Flakiness Index) หินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำย

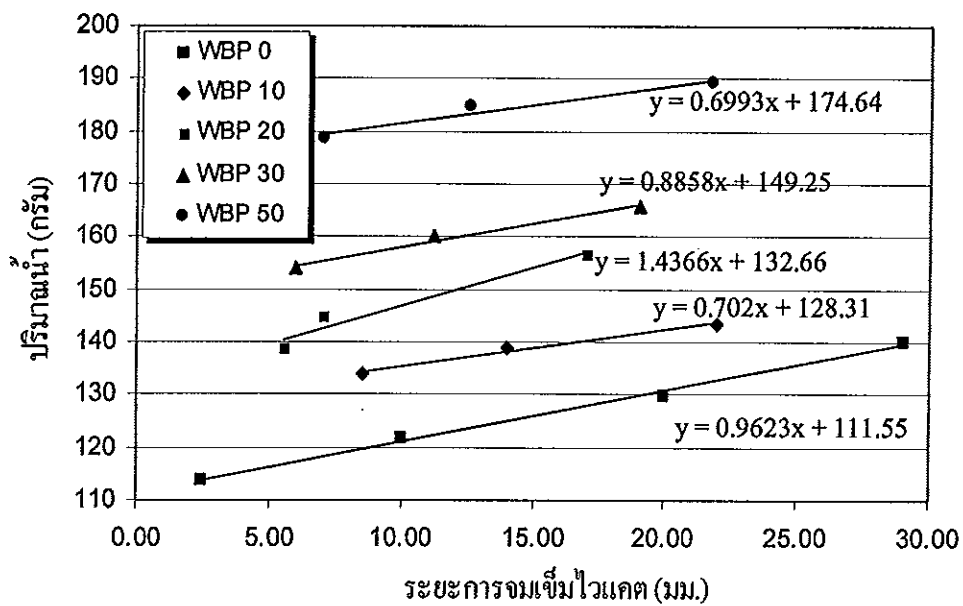
ขนาดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักทดสอบ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักทดสอบ	น้ำหนักที่ค้าง (กรัม)	น้ำหนักที่ผ่าน (กรัม)
14.00	-	-	-	-
10.00	766.88	58.08	453.97	312.91
6.3	553.56	41.92	491.22	62.34
รวม	1320.44	100.00	945.19	375.25
ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index)			28.41%	

ตารางที่ ก-6 ดัชนีความยาว (Elongation Index) หินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำย

ขนาดตะแกรง (มม.)	น้ำหนักทดสอบ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักทดสอบ	น้ำหนักที่ค้าง (กรัม)	น้ำหนักที่ผ่าน (กรัม)
14.00	-	-	-	-
10.00	554.79	41.90	128.56	426.23
6.3	769.27	58.10	294.01	475.26
รวม	1324.06	100.00	422.57	901.49
ค่าดัชนีความยาว (Elongation Index)			31.90%	

ตารางที่ ก-7 ทดสอบความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์ทดสอบที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผา  
บดละเอียดในอัตราส่วนต่างๆ

แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผาบดละเอียด (WBP)									
WBP 0		WBP 10		WBP 20		WBP 30		WBP 50	
น้ำ (กรัม)	จม (มม.)	น้ำ (กรัม)	จม (มม.)	น้ำ (กรัม)	จม (มม.)	น้ำ (กรัม)	จม (มม.)	น้ำ (กรัม)	จม (มม.)
113.73	2.50	133.85	8.50	156.8	17	153.98	6.00	178.79	7.00
121.93	10.00	138.85	14.00	144.85	7	160.14	11.20	184.64	12.60
129.89	20.00	143.46	22.00	138.7	5.5	165.69	19.00	189.43	21.80
139.85	29.00	-	-	-	-	-	-	-	-

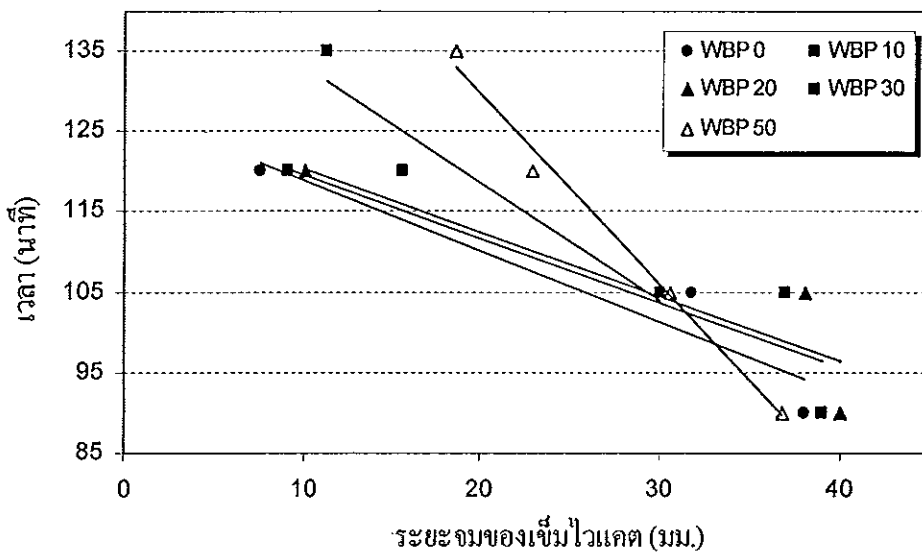


รูปที่ ก-1 ความชื้นเหลวปกติของทดสอบจากระยะจมน้ำ 10 มม. ผ่านศูนย์กลาง 10 มม. กับปริมาณ  
น้ำที่เพิ่มมากขึ้น



ตารางที่ ก-8 ความชื้นเหลือปกติของพาสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผาบดละเอียด

ปริมาณน้ำสถานะความชื้นเหลือปกติของซีเมนต์พาสต์			
น้ำที่ต้องการ (กรัม)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	เศษดินเผาบด (กรัม)	ปริมาณน้ำ (%)
121.173	500	0	24.23
135.33	500	50	27.06
147.026	500	100	29.40
158.108	500	150	31.62
181.633	500	250	36.32



รูปที่ ก-2 ระยะเวลาที่วัดตัวขึ้นต้นของพาสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผาบดละเอียด

ตารางที่ ก-9 เวลาและระยะจมของเข็มไวเคตเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผาบดละเอียด

เวลา (นาที)	ความลึกของเข็มไวเคตจมลง (มม.)				
	WBP 0	WBP 10	WBP 20	WBP 30	WBP 50
0	40	40	40	40	40
30	40	40	40	40	40
45	40	40	40	40	40
60	40	40	40	40	40
75	40	40	40	39	40
90	38	39	40	37	36.8
105	31.8	37	38	30	30.5
120	7.5	9	10	15.5	22.8
135	0.5	1	3.7	11.2	18.5

ตารางที่ ก-10 ระยะเวลาก่อตัวขึ้นต้นและขึ้นปลายของเพสต์แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐดินเผาบดละเอียด (WBP)

สภาวะก่อตัว	ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์แทนที่ด้วยเศษอิฐดินเผาบดละเอียด (นาที)				
	WBP 0	WBP 10	WBP 20	WBP 30	WBP 50
ก่อตัวขึ้นต้น	106	108	108	111	118
ก่อตัวขึ้นปลาย	138	139	148	163	195

ตารางที่ ก-11 ค่ายุบตัวของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย โดยใช้เศษอิฐแทนที่ปูนซีเมนต์และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.55

ตัวอย่างคอนกรีต	ค่ายุบตัวของคอนกรีต (ซม.)	
	w/b = 0.50	w/b = 0.55
WBP 0	11.5	17.0
WBP 10	6.0	15.0
WBP 20	4.5	13.5
WBP 30	4.0	11.5
WBP 50	3.5	9.5

ตารางที่ ก-12 ปริมาณน้ำสภาวะความชื้นเหลวปกติของเศษดี โดยใช้เศษอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนัก

ปริมาณน้ำสภาวะความชื้นเหลวปกติของเศษดี	
ปริมาณเศษอิฐดินเผาแทนที่ (%)	ปริมาณน้ำ (%)
0 (WBP 0)	24.23
10 (WBP 10)	27.06
20 (WBP 20)	29.40
30 (WBP 30)	31.62
50 (WBP 50)	36.32

ตารางที่ ก-13 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรวมของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.50$  ผสม  
เศษอิฐดินเผาบดละเอียดต่างกัน

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุบ่ม (วัน)	ความหนาแน่นรวม (กก. /ลบ.ม.)	
		$w/b = 0.50$	$w/b = 0.55$
WBP 0	0	2100	2089
	7	2161	2143
	28	2222	2190
	56	2222	2173
WBP 10	0	2080	2059
	7	2136	2135
	28	2175	2185
	56	2196	2143
WBP 20	0	2072	2047
	7	2156	2119
	28	2191	2225
	56	2188	2113
WBP 30	0	2072	2035
	7	2131	2102
	28	2182	2191
	56	2192	2143
WBP 50	0	2032	2034
	7	2131	2060
	28	2160	2103
	56	2151	2044

ตารางที่ ก-14 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่งข่ายผสมเสริมอิฐดินเผาบดละเอียด  
ต่างกัน

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุปม (วัน)	การดูดซึมน้ำ (%)	
		w/b = 0.50	w/b = 0.55
WBP 0	0	9.92	12.94
	7	9.92	10.49
	28	9.10	9.58
	56	8.43	9.39
WBP 10	0	11.56	11.83
	7	9.82	10.68
	28	9.50	9.53
	56	7.59	9.23
WBP 20	0	11.37	12.53
	7	10.02	10.82
	28	10.14	10.97
	56	8.83	10.24
WBP 30	0	11.37	12.30
	7	10.02	10.96
	28	10.14	11.21
	56	8.83	10.75
WBP 50	0	13.64	14.81
	7	10.78	11.43
	28	11.04	12.45
	56	9.01	12.87

ตารางที่ ก-15 ความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่ง่ายผสมเศษอิฐดินเผาละเอียด  
ต่างกัน

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุบ่ม (วัน)	ความถ่วงจำเพาะแห้ง	
		w/b = 0.50	w/b = 0.55
WBP 0	0	2.06	1.97
	7	2.06	2.06
	28	2.12	2.10
	56	2.12	2.09
WBP 10	0	2.01	2.01
	7	2.07	2.05
	28	2.10	2.09
	56	2.14	2.08
WBP 20	0	2.03	1.98
	7	2.06	2.04
	28	2.09	2.04
	56	2.10	2.05
WBP 30	0	2.01	1.99
	7	2.04	2.03
	28	2.06	2.03
	56	2.10	2.03
WBP 50	0	1.95	1.88
	7	2.02	2.01
	28	2.04	1.98
	56	2.08	1.96

ตารางที่ ก-16 การหดและขยายตัวแบบแห้งคอนกรีตบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำย

จำนวนวัน	การหดและขยายตัวแบบแห้ง (%) ที่ $w/b = 0.50$				
	WBP 0	WBP 10	WBP 20	WBP 30	WBP 50
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0340	0.0000	0.0000	0.0000	0.0175
15	0.0680	0.0510	0.0000	0.0170	0.0702
22	0.1019	0.0681	0.0000	0.0340	0.0702
29	0.1019	0.0681	0.0171	0.0340	0.0175
42	0.0340	0.0340	-0.0343	-0.0170	0.0351
50	0.0340	0.0340	-0.0343	0.0000	0.0351
56	0.0340	0.0340	-0.0171	0.0000	0.0351
64	0.0340	0.0340	-0.0171	0.0000	0.0351
77	0.0340	0.0340	-0.0171	0.0000	0.0351
90	0.0340	0.0340	-0.0171	0.0000	0.0351
จำนวนวัน	การหดและขยายตัวแบบแห้ง (%) ที่ $w/b = 0.55$				
	WBP 0	WBP 10	WBP 20	WBP 30	WBP 50
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0526	0.0350	0.1051	0.0350	0.0527
15	0.0526	0.0350	0.1226	0.0526	0.1229
22	0.0526	0.0350	0.1226	0.0526	0.1229
29	0.0351	0.0175	0.0525	-0.0175	0.0527
42	0.0526	0.0175	0.0525	0.0000	0.0527
50	0.0526	0.0350	0.0525	0.0000	0.0527
56	0.0526	0.0350	0.0525	0.0000	0.0527
64	0.0526	0.0350	0.0525	0.0000	0.0527
77	0.0526	0.0350	0.0525	0.0000	0.0527
90	0.0526	0.0350	0.0525	0.0000	0.0527

หมายเหตุ + การหดตัว - การขยายตัว

ตารางที่ ก-17 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกผ่านคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่  $w/b = 0.50$ 

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุบ่ม (วัน)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (เมตร/วินาที)	
		$w/b = 0.50$	$w/b = 0.55$
WBP 0	0	2708	2649
	7	3783	3710
	28	4005	3886
	56	4190	3885
WBP 10	0	2686	2668
	7	3675	3640
	28	3867	3807
	56	3998	3655
WBP 20	0	2710	2602
	7	3732	3588
	28	3721	3694
	56	4083	3747
WBP 30	0	2727	2650
	7	3694	3587
	28	3892	3775
	56	3989	3735
WBP 50	0	2666	2625
	7	3602	3545
	28	3664	3731
	56	3935	3512



ตารางที่ ก-18 กำลังอัดของคอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายโดยใช้  $w/b = 0.50$

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุปม (วัน)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	
		$w/b = 0.50$	$w/b = 0.55$
WBP 0	0	166	219
	7	384	328
	28	490	424
	56	522	374
WBP 10	0	149	209
	7	315	322
	28	430	427
	56	491	380
WBP 20	0	143	199
	7	357	297
	28	449	345
	56	474	349
WBP 30	0	148	179
	7	317	284
	28	406	340
	56	416	330
WBP 50	0	135	159
	7	267	221
	28	364	307
	56	357	251

ตารางที่ ก-19 ขนาดกะมวบรวมเบาสำหรับผสมคอนกรีตโครงสร้างตามมาตรฐาน ASTM C 330

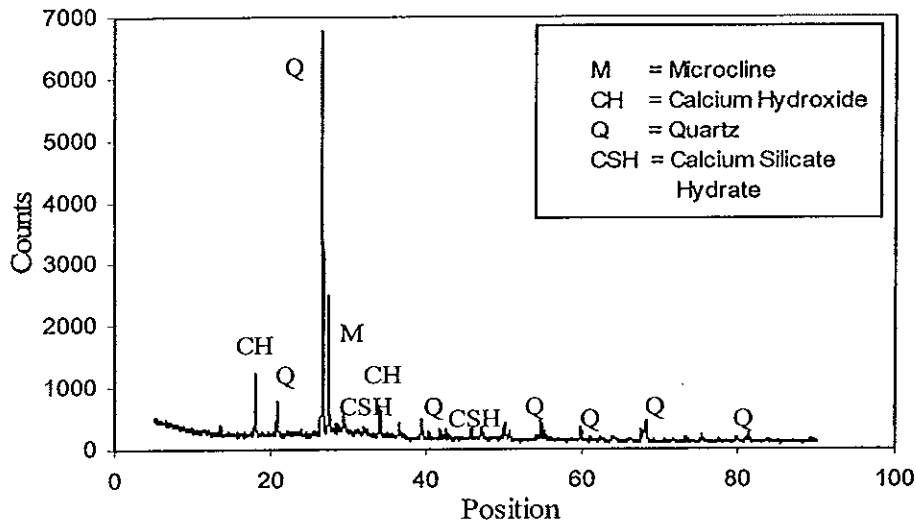
Coarse Aggregate	Passing (%)						
	1 in.	3/4 in.	1/2 in.	3/8 in.	No.4.	No.8.	No.16.
1 in. to 1/2 in.	95-100	.....	0-10	.....	.....	.....	.....
1 in. to No.4.	95-100	.....	25-60	.....	0-10	.....	.....
3/4 in. to No.4.	100	90-100	.....	20-60	0-10	.....	.....
1/2 in. to No.4.	.....	100	90-100	40-80	0-20	0-10	.....
3/8 in. to No.8.	.....	.....	100	80-100	5-40	0-20	.....

ตารางที่ ก-20 กำลังอัดของเพสต์ที่ใช้เศษอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่อายุ  
ป่ม 28 วัน

ตัวอย่างคอนกรีต	อายุป่ม (วัน)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	
		w/b = 0.50	w/b = 0.55
WBP 0	28	404	304
WBP 10	28	441	380
WBP 20	28	334	316
WBP 30	28	324	302
WBP 50	28	207	182

ภาคผนวก ข.

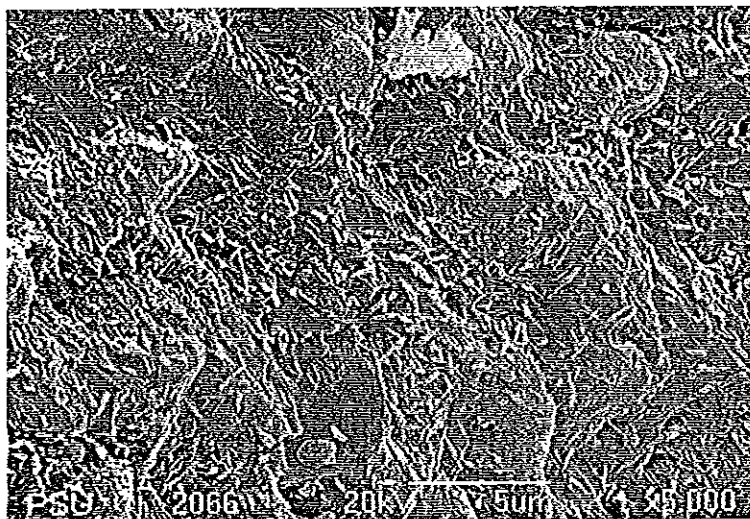
ผลการวิเคราะห์ XRD และ SEM ก้อนตัวอย่างคอนกรีต



ก)

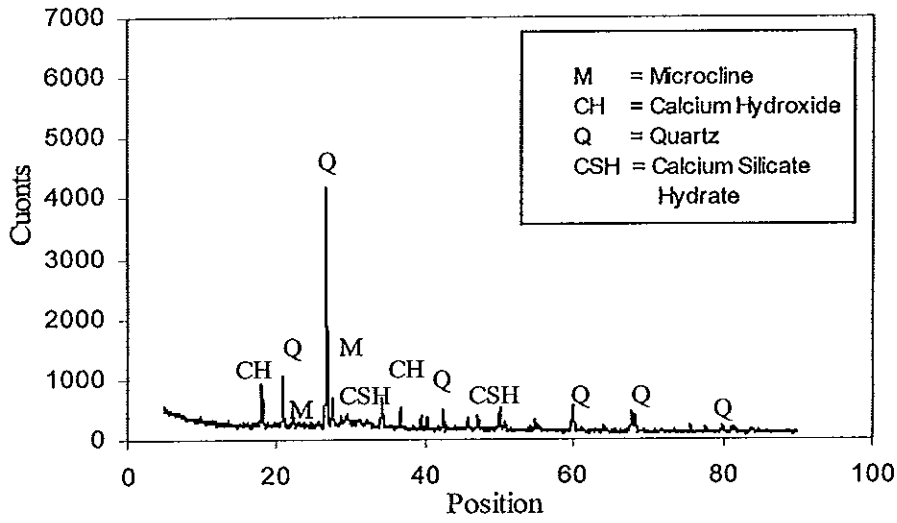
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
ไมโครไคลน์	45.57
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	9.94
ควอตซ์	42.39
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	2.10

ข)



ค)

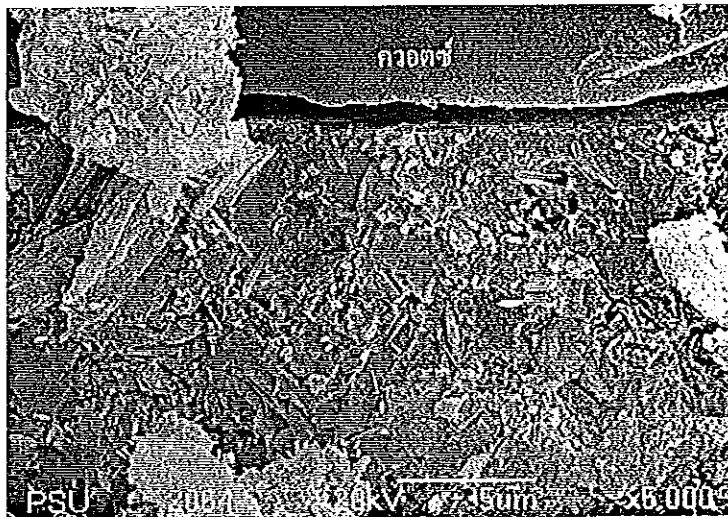
รูปที่ ข-1 ก) คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเดิมเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบร้อยละ 10 ที่ w/b = 0.50 ป่ม 28 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 5000 เท่า



ก)

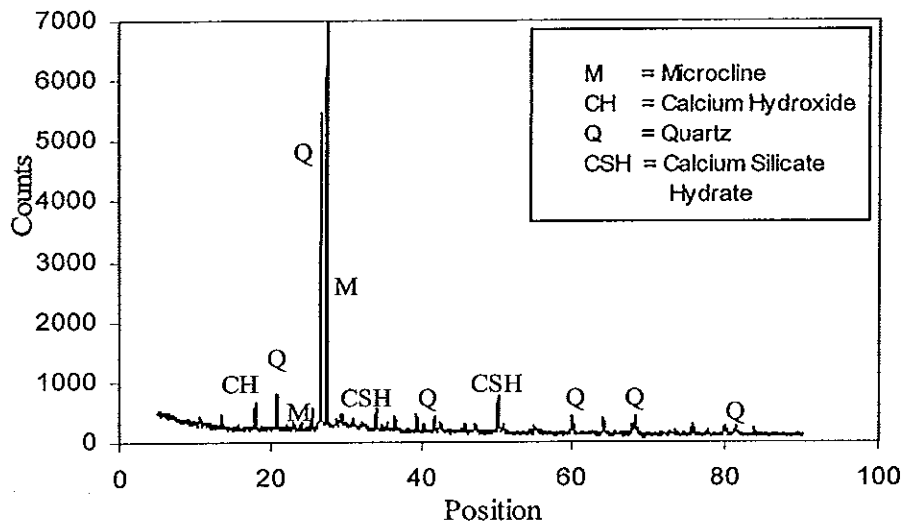
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
ไมโครไคลน์	36.97
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	11.94
ควอตซ์	46.26
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	4.83

ข)



ค)

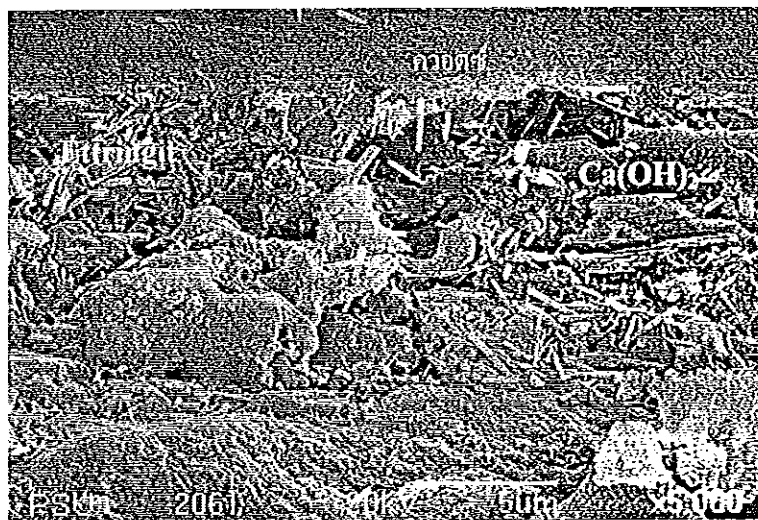
รูปที่ ข-2 คอนกรีตชะลอตัวเนื้อโพรงถ่ายเต็มเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบรอยละ 20 ที่ w/b = 0.50 บ่ม 28 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 5000 เท่า



ก)

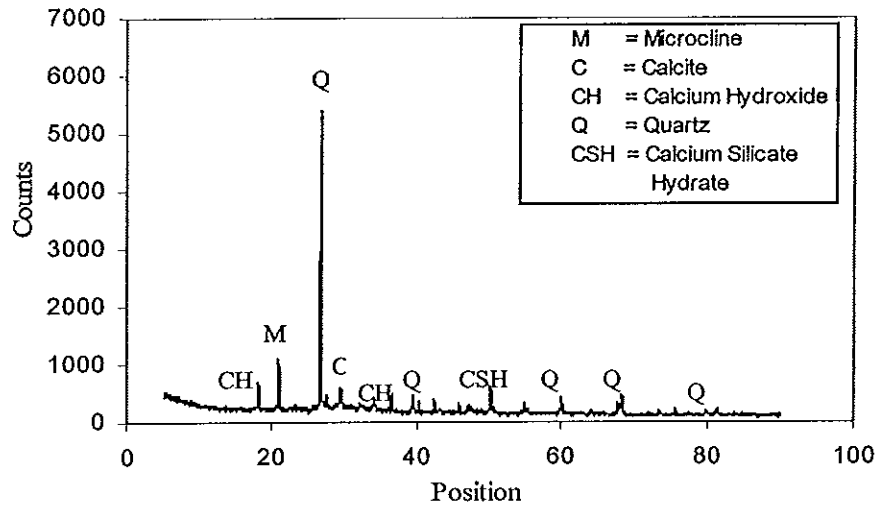
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
ไมโครไคลน์	46.25
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	6.68
ควอตซ์	43.91
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	3.16

ข)



ค)

รูปที่ ข-3 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 30 ที่ w/b = 0.50 ป่ม 28 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ก)

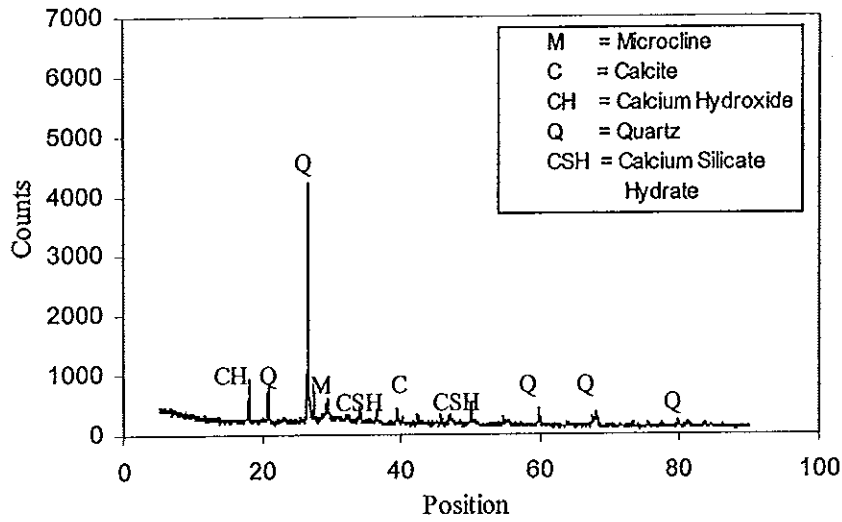
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	7.91
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	7.71
ควอตซ์	64.45
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	6.02
ไมโครไคลน์	13.91

ข)



ค)

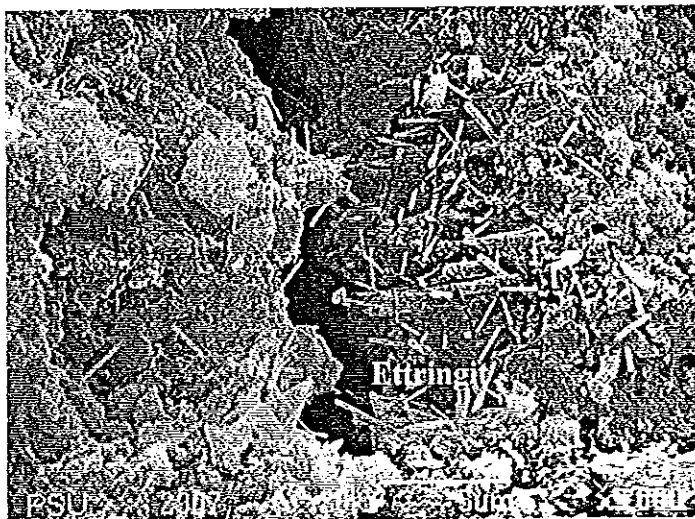
รูปที่ ข-4 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 10 ที่  $w/b = 0.55$  บ่ม 28 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 10000 เท่า



ก)

ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	5.85
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	8.37
ควอตซ์	42.16
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	5.96
ไมโครไคลน์	37.66

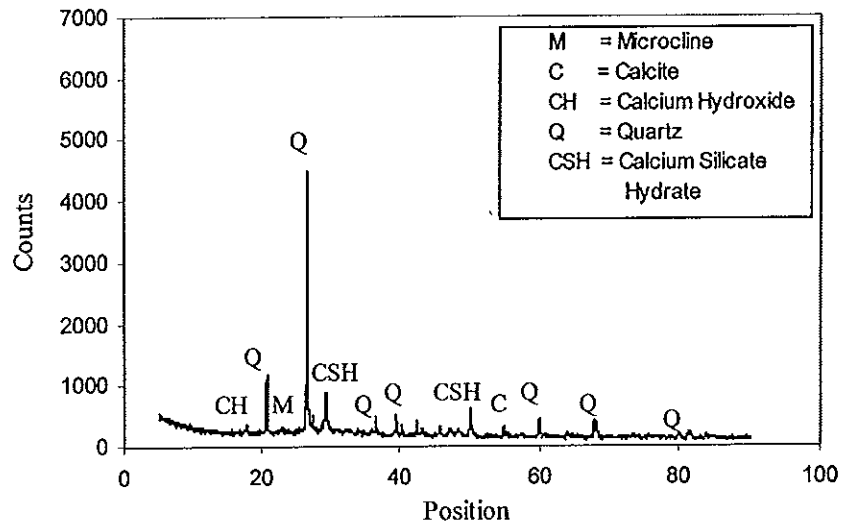
ข)



ค)

รูปที่ ข-5 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 20 ที่  $w/b = 0.55$  บ่ม 28 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 5000 เท่า

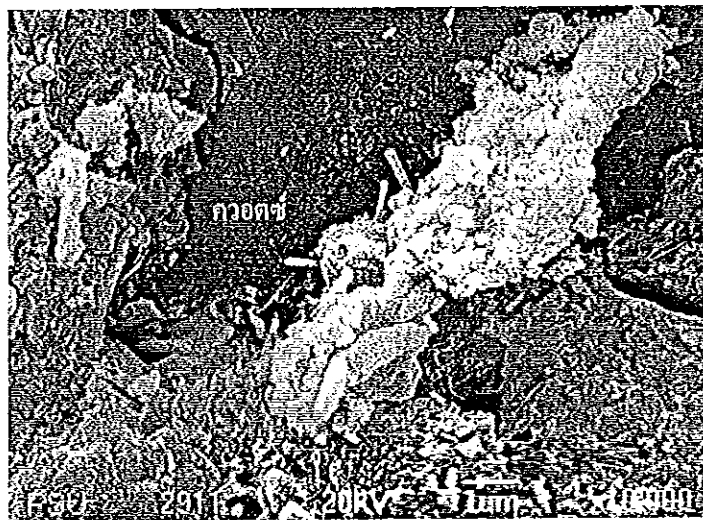




ก)

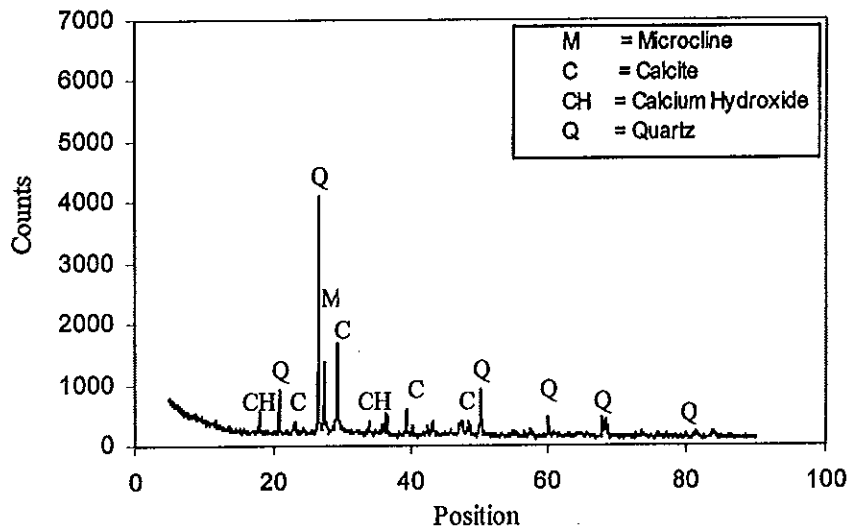
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	12.20
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	2.97
ควอตซ์	42.06
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	6.80
ไมโครไคลน์	35.97

ข)



ค)

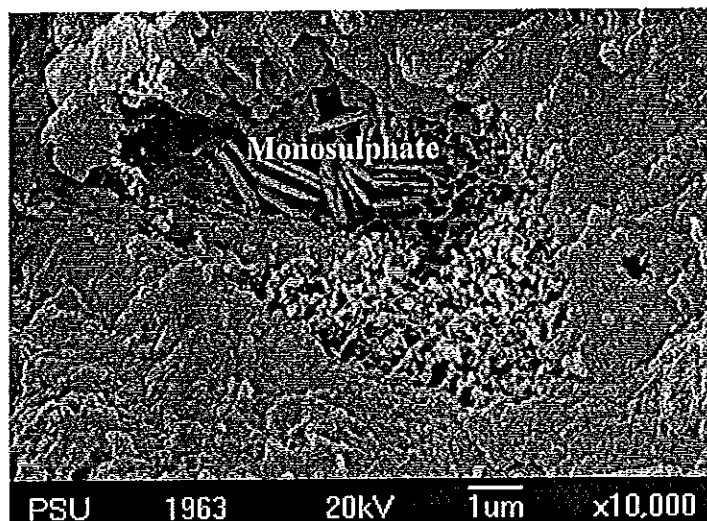
รูปที่ ข-6 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 30 ที่  $w/b = 0.55$  บ่ม 28 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 10000 เท่า



ก)

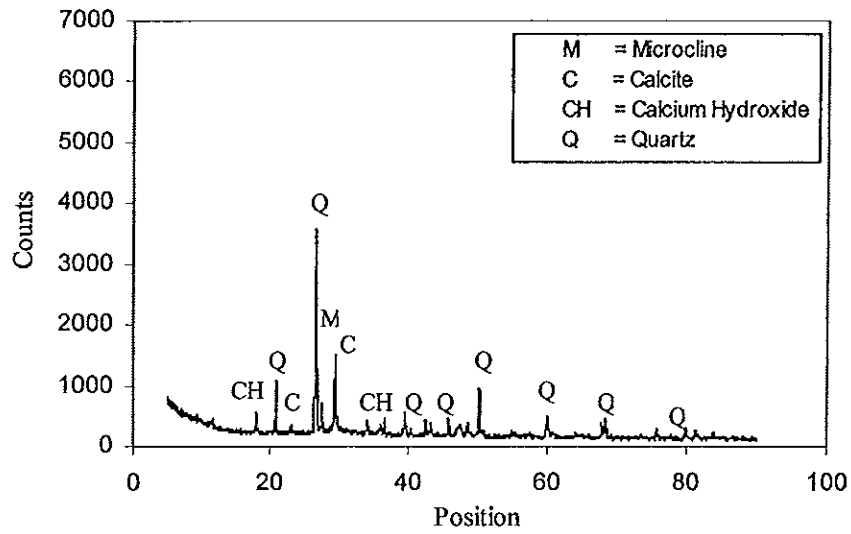
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	25.01
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	6.67
ควอตซ์	43.09
ไมโครไคลน์	25.23

ข)



ค)

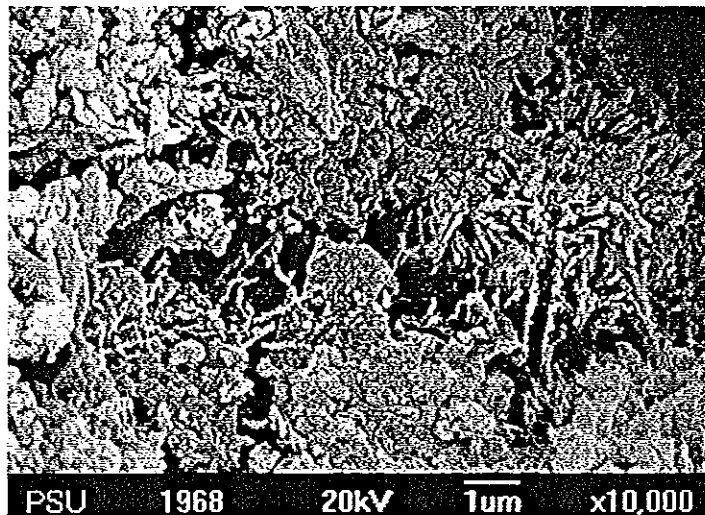
รูปที่ ข-7 กอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายไม้เติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียด ที่ w/b = 0.50 ป่ม 56วัน  
 ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต  
 ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 10000 เท่า



ก)

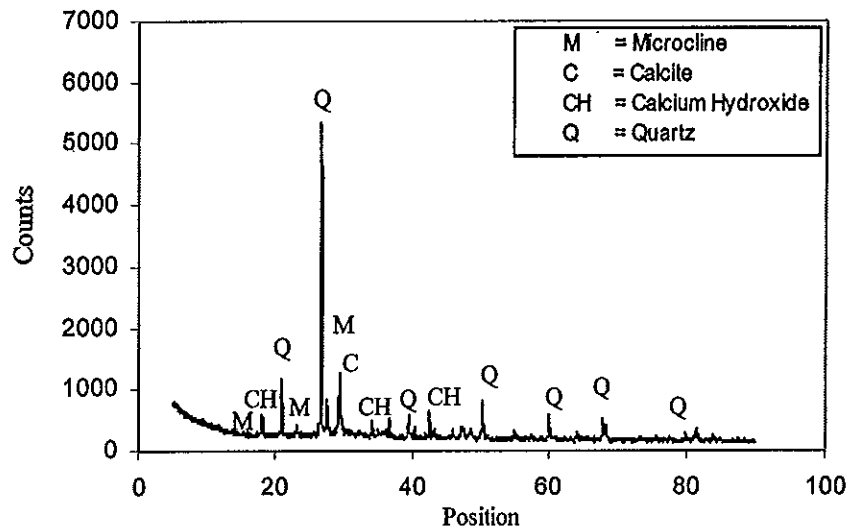
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	21.07
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	4.72
ควอตซ์	37.03
ไมโครไคลน์	37.18

ข)



ค)

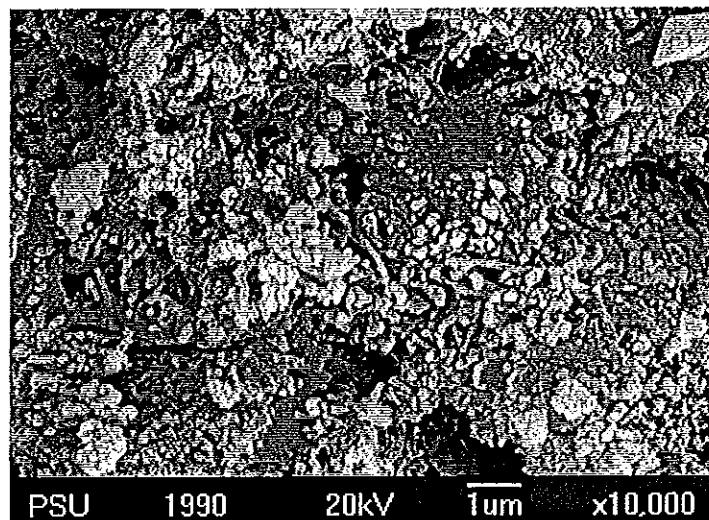
รูปที่ ข-8 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 10 ที่  $w/b = 0.50$  ป่ม 56 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 10000 เท่า



ก)

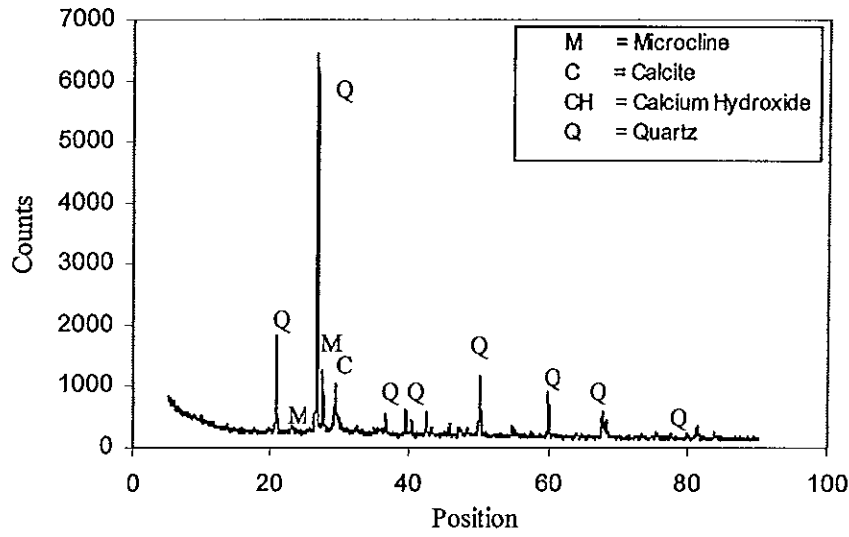
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	12.11
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	4.56
ควอตซ์	45.26
ไมโครไคลน์	38.07

ข)



ค)

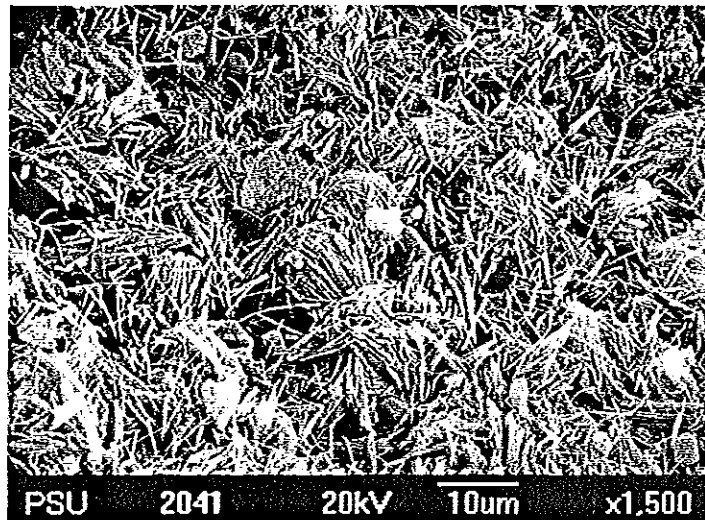
รูปที่ ข-9 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาละเอียดร้อยละ 20 ที่  $w/b = 0.50$  บ่ม 56 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 10000 เท่า



ก)

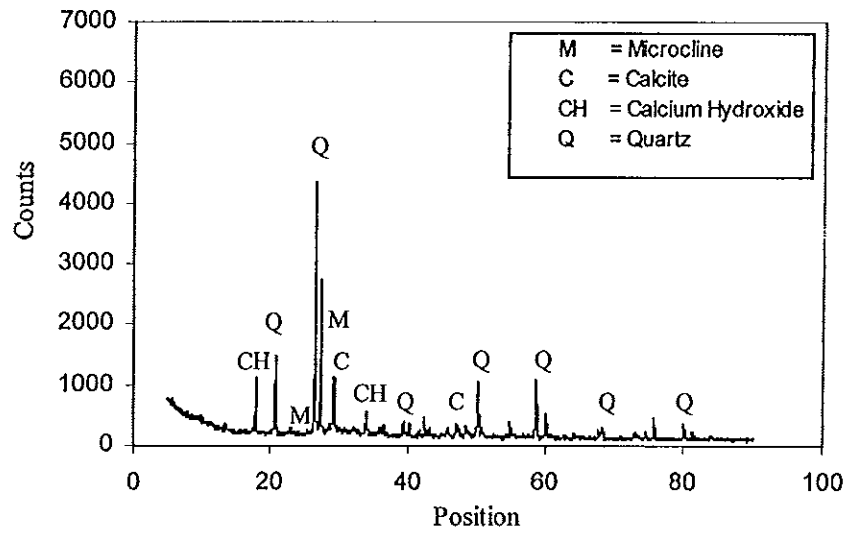
ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	9.64
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	4.56
ควอตซ์	68.97
ไมโครไคลน์	16.83

ข)



ค)

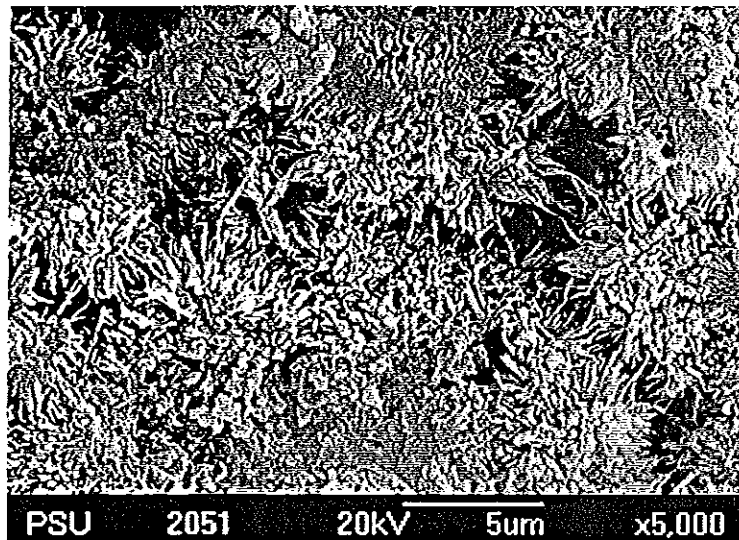
รูปที่ ข-10 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเดิมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 30 ที่  $w/b = 0.50$  บ่ม 56 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 1500 เท่า



ก)

ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	21.66
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	10.87
ควอตซ์	42.09
ไมโครไคลน์	25.38

ข)



ค)

รูปที่ ข-11 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 10 ที่  $w/b = 0.55$  บ่ม 56 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 5000 เท่า

1. บทนำ

มวลรวม (Aggregate) ที่ใช้ผสมคอนกรีตอาจจะมีทั้งเศษหินหรือกรวดซึ่งเป็นวัสดุสำคัญในงานก่อสร้างทั่วไป หินที่นิยมใช้ผสมคอนกรีตได้แก่ หินปูน (Limestone) จัดอยู่ในประเภทหินตะกอน และหินแกรนิต (Granite) จัดอยู่ในประเภทหินอัคนีเนื้อทรอปส์ เกิดจากการตกผลึกของแร่ต่างๆ ด้วยความร้อนใต้พิภพ นอกจากนี้พบว่าหินอัคนีเนื้อจืด เช่น หินบะซอลต์ (Basalt) ซึ่งหากมีลักษณะเป็นรูพรุน เรียกใหม่ว่า หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (Vesicular basalt) มีความแข็ง สีเทาแก่ จะมีแร่ธาตุที่ประกอบไปด้วย ไพรอกซีน (Pyroxene) และโอลิวีน (Olivine) ส่วนมากนำไปใช้สำหรับทำถนน ในประเทศไทยพบมากที่จังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ ศรีสะเกษ และลำปาง [2-3] ซึ่งปรากฏอยู่ในผิวของดิน ผลทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของหินบะซอลต์ที่มีองค์ประกอบและเนื้อแตกต่างกันพบว่าหินบะซอลต์โอลิวีน (Olivine) มีคุณภาพที่ดีกว่าบะซอลต์ชนิดอื่นๆ แต่ถึงอย่างไรหินบะซอลต์ส่วนมากพบว่ามีคุณภาพไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตมวลรวมหินที่น้อยสำหรับการผลิตคอนกรีต [9] นอกจากนี้พบว่ารูปร่างของมวลที่มีผิวหยาบและมีรูปร่างแบนและยาวจะต้องการปริมาณซีเมนต์ที่มากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรูปร่างกลมหรือเหลี่ยมที่ระดับความสามารถเท่าเดียวกัน[1] การนำหินบะซอลต์ไปทดสอบการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมกับน้ำปูนชั้นเปรียบเทียบกับ หินปูนทรายแก้วและหินควอร์ตไซต์พบว่าหินบะซอลต์มีการเร่งเกิดปฏิกิริยามากที่สุด [10] นอกจากนี้จากการนำตะกอนภูเขาไฟมาทดสอบพบว่าสามารถนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตทั้งมวลเบาได้อย่างปลอดภัย [11] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาการนำหินบะซอลต์ที่มีอยู่ภายในประเทศนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด นอกจากนี้การผลิตคอนกรีตในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการนำวัสดุประเภทปอซโซลานนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติของคอนกรีตให้มีคุณภาพดีขึ้นและยังถือเป็นการลดต้นทุนได้อีกทางและพบว่าวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) อาจได้มาจากธรรมชาติหรือทำเทียมขึ้นได้ซึ่งส่วนที่ทำเทียมนี้ ได้แก่ ดินเหนียวหรือดินคานาเผา โดยทั่วไปจะประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่[1] และวัสดุที่มีสมบัติการเป็นปอซโซลานที่มีอนุภาคละเอียดกว่าเมื่อผสมคอนกรีต จะให้กำลังอัดมากกว่าวัสดุปอซโซลานที่มีอนุภาคหยาบกว่า [4] หงอิฐจะมีความเป็นปอซโซลานสูงเนื่องจากประกอบด้วยแร่ดินที่มีแคลเซียมน้อย กระบวนการเผาอิฐจะทำให้เกิดปอซโซลาน เมื่อให้อุณหภูมิการเผาระหว่าง 450 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะกลายเป็น Metakaolin ตามลักษณะชนิดของดินแต่ละที่และถ้าใช้อุณหภูมิมากกว่านี้ก็จะทำให้พื้นที่ผิวลดลง [7] การใช้ผงอิฐดินเหนียวเป็นวัสดุปอซโซลานพบว่าสามารถช่วยระงับการขยายของปฏิกิริยาการเป็นต่างของสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มปริมาณผงอิฐดินเหนียวในมอร์ตาร์ที่มากขึ้น [8] ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าเศษอิฐแตกหักที่เหลือจากการกระบวนการเผาที่ทิ้งไว้

จำนวนมากก็อาจจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตคอนกรีตได้เช่นเดียวกัน

2. การดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้

หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ใช้ในการศึกษาผ่านการย่อยมาจากโรงโม่หินภายในจังหวัดบุรีรัมย์มีขนาด 2 นิ้ว ถึง 4 นิ้ว (รูปที่ 1 ก) ซึ่งเป็นหินอัคนีฟู สีเทาใตตาลเนื้อด้านในสีเทาเข้มถึงดำ เนื้อเป็นโพรง บางแห่งมีก้อนทรงมนของแร่กำมะถันอุดข้างใน ทราวยหยาบน้ำจืดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 เป็นมวลรวมละเอียด หงอิฐดินเผาบดละเอียด (GCWPCB) จากเศษอิฐของเตาเผาอิฐบ้านคลองเป็ด ตำบลกองหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (รูปที่ 1 ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ น้ำประปา



รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ ก) หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย และ ข) เศษอิฐดินเผา

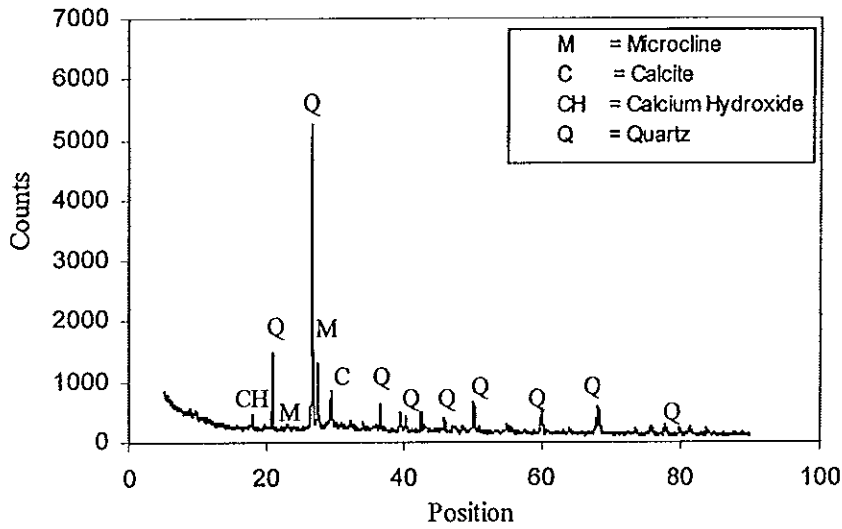
2.2 การเตรียมและอัตราส่วนผสมคอนกรีต

นำมวลรวมหินบะซอลต์ล้างให้สะอาดตากแดดให้แห้งและย่อยคัดขนาดให้ได้ตามเกณฑ์ ASTM C 330 - 77 มีขนาดอยู่ในช่วง 1.18 ถึง 12.5 มม. ด้วยเครื่องบดปากรวย (Gyratory mill) แล้วแช่น้ำ 24 ชั่วโมง ขึ้นมาเช็ดให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวแต่ผิวแห้ง ส่วนเศษอิฐดินเผาจากเตาเผาอิฐเข้าเครื่องบดด้วยลูกเหล็ก (ball mill) และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 แล้วอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและนำเข้าเครื่องบดละเอียดอีกครั้ง เลือกการออกแบบล่วงหน้าก่อนตัวอย่างคอนกรีตตามเกณฑ์ ACI 211.1-70 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ศึกษา

วัสดุผสม	ผงอิฐดินเผาแทนที่ปูนซีเมนต์ (กก./ลบ.ม.)				
	0%	10%	20%	30%	50%
หินบะซอลต์	787	787	787	787	787
ทราย	517	517	517	517	517
ปูนซีเมนต์	500	450	400	350	250
หงอิฐบด	0	50	100	150	250
น้ำ	275	275	275	275	275

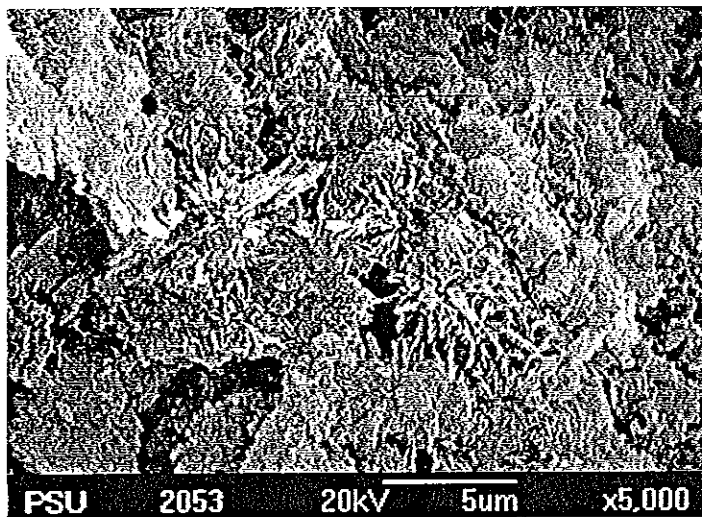
ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 คงที่ตลอดการทดสอบก่อนตัวอย่างคอนกรีตมีขนาด 10x10x10 ซม. ป่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60% เป็นเวลา 7,



ก)

ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	13.66
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	5.80
ควอตซ์	44.24
ไมโครไคลน์	36.31

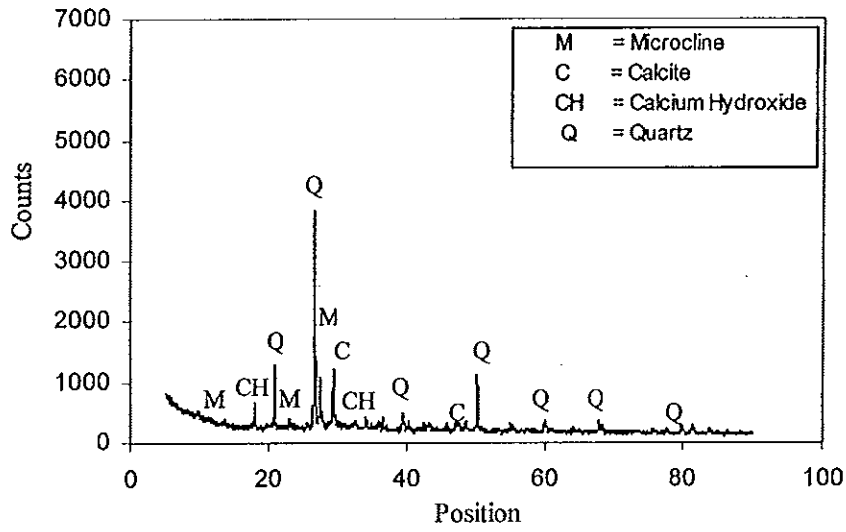
ข)



ค)

รูปที่ ข-12 คอนกรีตชะลอตัวเนื้อโพรงข่ายเดิมเสริมอิฐดินเผาเคลือบเคลือบระยะ 20 ที่ w/b = 0.55 ป่ม 56 วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 5000 เท่า

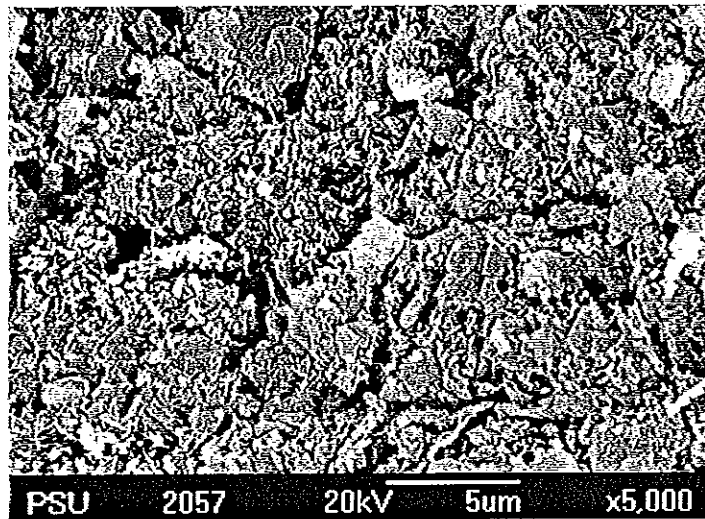




ก)

ชื่อแร่	ปริมาณ (%)
แคลไซต์	10.83
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	8.83
ควอตซ์	58.47
ไมโครไคลน์	21.86

ข)



ค)

รูปที่ ข-13 คอนกรีตบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเติมเศษอิฐดินเผาบดละเอียดร้อยละ 30 ที่ w/b = 0.55 ป่ม 56วัน ก) สเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ข) ผลคำนวณปริมาณแร่ภายในเนื้อคอนกรีต ค) ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 5000 เท่า

ภาคผนวกการเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์

การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ ก.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 21-22 พฤษภาคม 2552

อิทธิพลของสมบัติทางกายภาพและทรงสัณฐานของมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่มี  
ต่อกำลังของคอนกรีตผสมรวมกับเศษอิฐดินเผาบดละเอียด

**Influence of Physical and Geometrical Properties of Vesicular Basalt Aggregate on the  
Strength of Concrete Incorporating Ground Crushed Fired Clay Brick**

เจริญพล อินขัน<sup>1</sup> ดนุพล ตันนโยภาส<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

<sup>2</sup>หน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและวัสดุก่อสร้างนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: chareonpon\_1981@hotmail.com

Chareonpon Inkhan<sup>1</sup> Danupon Tonnayopas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

<sup>2</sup>Geotechnical and Innovative Construction Materials Research Unit, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,  
Hat Yai, Songkhla 90112

E-mail: chareonpon\_1981@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

การศึกษาครั้งนี้ใช้หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นมวลรวมหยาบและทรายเป็นมวลรวมละเอียด โดยใช้ผงอิฐดินเผาแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 ในคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ตลอดการศึกษานี้ และบ่ม 7, 28 และ 56 วัน ดำเนินการทดสอบหาความชื้นแฉะรวมถึงระยะเวลาการก่อตัวของเพสท์ จากการผสมเศษผงอิฐดินเผาบดละเอียดในคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเพื่อหาค่าความยุบตัวของคอนกรีตสด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การหดตัวแบบแห้ง ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกำลังอัด ผลจากการทดสอบเมื่อเพิ่มเศษผงอิฐดินเผาบดจะทำให้ความหนาแน่น ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและกำลังอัดลดลง กำลังอัดของคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ 28 วัน แทนที่ด้วยเศษผงอิฐดินเผาบดร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 ได้กำลังอัดที่ 424, 427, 345, 340 และ 307 กก./ซม<sup>2</sup> ตามลำดับ ผลทดสอบบ่งว่าการแทนที่ที่เป็นที่น่าพอใจอยู่ที่ร้อยละ 10 ถึง 30

**คำหลัก** มวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย, เศษอิฐดินเผาบดละเอียด กำลังอัด, อายุบ่ม, ความเร็วอัลตราโซนิก

**Abstract**

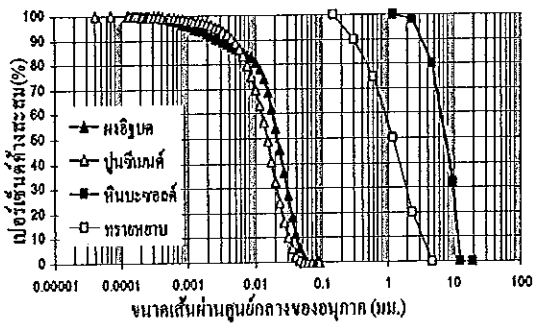
In this paper, used vesicular basalt as coarse aggregates and natural sand as fine aggregates. Use ground crushed waste fired clay brick (GCFCB) partial replacement of Portland cement Type I by weight in the proportions of 10, 20, 30 and 50% in vesicular basalt aggregate concrete (VBAC). Water-binder ratio was used constant of 0.55 throughout this study and water-cured for 7, 28 and 56 days. Tests were carried out to determine paste on normal consistency and setting time. The VBAC containing GCFCB were determined slumps, bulk density, absorption, drying shrinkage, ultrasonic velocity, SEM, XRD, and compressive strength. The experimental result indicated that VBAC with increasing of GCFCB proportions, bulk density, specific gravity, ultrasonic velocity and compressive strengths decreased. The 28-day compressive strengths of VBAC with 0, 10, 20, 30 and 50% GCWFCB were obtained 424, 427, 345, 340 and 307 ksc, respectively. The results indicated the optimal percentages of substitution lies between 10% to 30%.

**Keywords:** Vesicular basalt aggregate, Ground crushed fired clay brick, Compressive strength, Curing time, Ultrasonic velocity

28 และ 56 วัน การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตจะนำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดมาย่อยให้มีขนาดประมาณ 2 นิ้ว ถึง 3 นิ้ว มาทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C127-88

2.3 วิธีการทดสอบก่อนตัวอย่าง

ทดสอบสมบัติของวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต ได้แก่ ตรวจสอบขนาดผลของหินบะซอลต์โดยให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C330-77 โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136-84 ทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินบะซอลต์ตามมาตรฐาน ASTM C127-88 ทดสอบหาความหนาแน่นของหินบะซอลต์โดยเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C29-89 ทดสอบขนาดผลของทรายโดยใช้มาตรฐาน ASTM C136-84 ทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทรายยึดตามมาตรฐาน ASTM C128-88 ทดสอบค่าดัชนีความแบนและความยาวของหินบะซอลต์ตามมาตรฐาน BS 812-105.1 ทดสอบขนาดผลของปูนซีเมนต์และผงอิฐดินเผาละเอียดโดยใช้เครื่องมือ Hydro 2000MU(A) ซึ่งขนาดผลรวมผสมคอนกรีตแสดงดังใน รูปที่ 2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทั้งผงอิฐดินเผาละเอียดและเนื้อคอนกรีตโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงอิฐดินเผาละเอียดโดยใช้เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (XRF) ตรวจสอบปริมาณและชนิดแร่เกิดในคอนกรีตด้วยเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) และความพรุนของผงอิฐดินเผาละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 โดยเครื่องมือวัด Coulter SA3100 ความถ่วงจำเพาะของผงอิฐดินเผาละเอียดและปูนซีเมนต์ทดสอบตาม ASTM C340



รูปที่ 2 ขนาดผลของมวลรวมสำหรับผสมคอนกรีต

ทดสอบสมบัติของเพสต์ ได้แก่ ทดสอบความข้นเหลวปกติของวัสดุผสมผงอิฐดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ 0%, 10%, 20%, 30% และ 50% ตามมาตรฐาน ASTM C187-86 หาระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดตามมาตรฐาน ASTM C191 ทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีต (Slump test) ตามมาตรฐาน ASTM C 143-89 ทดสอบสมบัติคอนกรีตที่แข็งตัว ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM

C127-88 กำลังอัดตามเกณฑ์ ASTM C109M-01 วัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C597-97 และการหัดตัวแบบแห้งตามมาตรฐาน ASTM C596

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 สมบัติมวลรวม

คำนวณมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงชายผ่านตะแกรง 1/2" ค้างตะแกรงเบอร์ 16 มีการดูดซึมน้ำ 4.30% ความถ่วงจำเพาะอิมตัวผิวแห้ง 2.42 ความถ่วงจำเพาะแห้ง 2.32 ความถ่วงจำเพาะปรากฏ 2.57 ความหนาแน่นแบบหลวม 1219.70 กก./ลบ.ม. ความหนาแน่นแบบแน่น 1456.70 กก./ลบ.ม. ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.10 ค่าดัชนีความแบน 28.4% ค่าดัชนีความยาว 31.9% สำหรับทรายแห้งมีความถ่วงจำเพาะรวม 2.46 ดูดซึมน้ำ 1.42 ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.34 ค่ากระแทก 6.92% พื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบกึ่งปริมาณของผงอิฐดินเผาละเอียด พบว่าผงอิฐดินเผาละเอียดมีปริมาณ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> รวมกันร้อยละ 93.26% ค่า LOI เท่ากับ 1.42 % และจัดเป็นปอซโซลานประเภท N ดังแสดงในตารางที่ 2

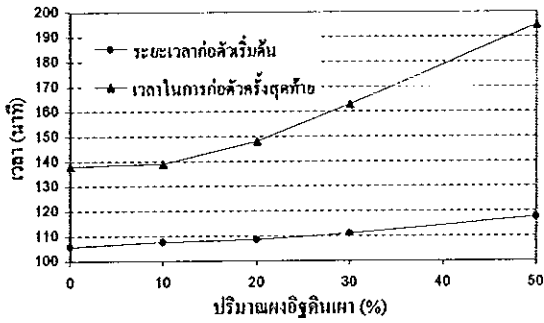
ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี	ผงอิฐ	ปูนซีเมนต์
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.20 %	3-8 %
SiO <sub>2</sub>	68.06 %	17-25 %
SO <sub>3</sub>	0.24 %	1-3 %
K <sub>2</sub> O	2.70 %	0.5-1.3 %
CaO	0.36 %	60-67 %
TiO <sub>2</sub>	1.59 %	0.1-0.4 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.00 %	0.5-6.0 %
Rb	0.30 %	-
ZrO <sub>2</sub>	0.13 %	-
LOI	1.42 %	-
ทางกายภาพ		
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม)	20.919	1.628
พื้นที่ความพรุน (ตารางเมตร/กรัม)	2.647	-
ความถ่วงจำเพาะ	2.60	3.10

3.2 ความข้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวของเพสต์

ผลทดสอบความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์โดยแทนที่ผงอิฐดินเผาละเอียดโดยน้ำหนักที่ 0%, 10%, 20%, 30% และ 50% เพสต์ต้องการปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น 24.23%, 27.06%, 29.40%, 31.62% และ 36.32% ตามลำดับ ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นพบว่าเมื่อแทนที่ผงอิฐดินเผาละเอียดในปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นต้องใช้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น 106, 108, 109, 111 และ 118 นาที

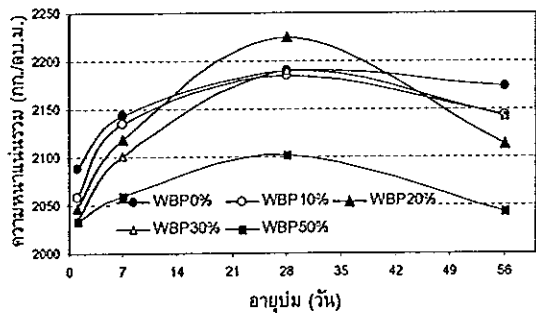
ตามลำดับ และระยะเวลาการก่อตัวขึ้นปลาย 138, 139, 148, 163 และ 195 นาที ตามลำดับ ดังแสดงใน รูปที่ 4 ดังนั้นการใช้ผงอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถช่วยหน่วงระยะเวลาการก่อตัวของเพสท์ให้ช้าลงได้



รูปที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวครั้งสุดท้ายของเพสท์เมื่อแทนที่ผงอิฐดินเผาโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

3.3 ค่ายุบตัว ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำ

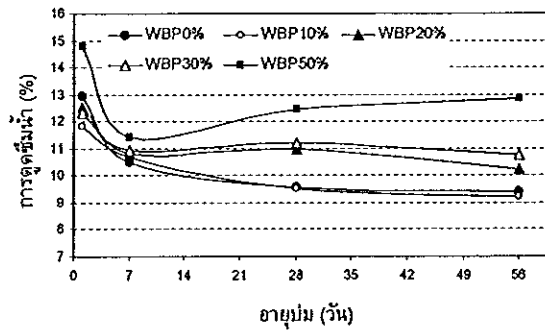
ค่ายุบตัวของคอนกรีตสแกนที่ผงอิฐดินเผาเคลือบโดยน้ำหนักที่ 0%, 10%, 20%, 30% และ 50% มีค่า 170, 150, 135, 117 และ 97 มม. ตามลำดับ ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตที่อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน จะลดลงเมื่อแทนที่ผงอิฐดินเผาเคลือบ 0%, 10%, 20%, 30% และ 50% มีค่าความหนาแน่น 2190, 2185, 2225, 2190 และ 2102 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ ดังแสดงใน รูปที่ 5 ซึ่งจัดความหนาแน่นอยู่ในช่วงชนิดกึ่งเบาถึงคอนกรีตทั่วไป [1]



รูปที่ 5 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีต่อความหนาแน่นรวมของคอนกรีต หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตที่ไม่บ่มจะอยู่ระหว่าง 2034 ถึง 2088 กก./ลบ.ม. ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับการทดสอบโดยใช้มวลรวม หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.50 ความหนาแน่น 2080 กก./ลบ.ม. [5] สังเกตว่าความหนาแน่นจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออายุบ่มที่ 28 วัน และจะลดลงเมื่ออายุมากขึ้นไปอีก ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดและการตรวจความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค ดังรูปที่ 7, 8 ซึ่งจะมีค่าลดลง และหากเปรียบเทียบกับความหนาแน่นในอากาศของ

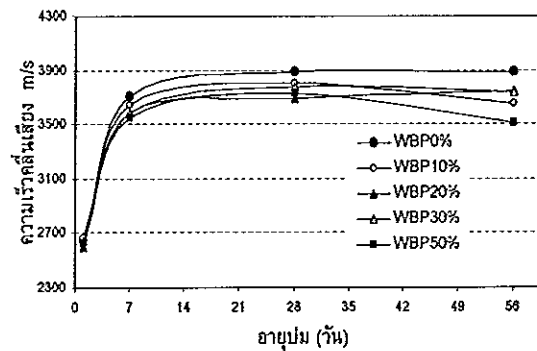
คอนกรีตตะกั่ว (scoria) ที่ 28 วัน โดยใช้ปริมาณน้ำปูนซีเมนต์ และวัสดุโพซโซลานที่เท่ากันพบว่าจะมีค่าสูงกว่าประมาณ 20% [12] ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุบ่ม 28 วัน โดยใช้ผงอิฐดินเผาเคลือบแทนที่ปูนซีเมนต์ 0%, 10%, 20%, 30% และ 50% มีค่าดูดซึมน้ำ 9.57%, 9.52%, 10.96%, 11.21% และ 12.45% ตามลำดับดังแสดงใน รูปที่ 6 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตแปรผันตามปริมาณผงอิฐดินเผาเคลือบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่ออายุบ่มมากขึ้นการดูดซึมน้ำของคอนกรีตลดลง



รูปที่ 6 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีต หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

3.4 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค

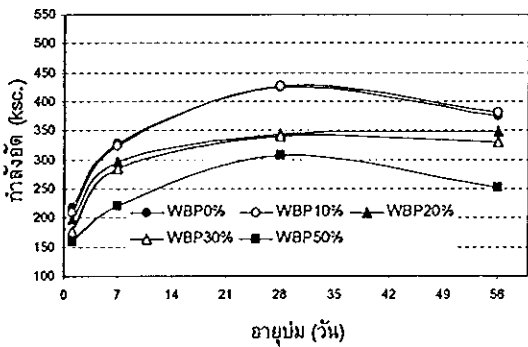
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่ผงอิฐดินเผาเคลือบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าเมื่ออายุบ่มมากขึ้นความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคจะเพิ่มขึ้นที่อายุบ่มช่วง 0 ถึง 28 วันและจะมีค่าลดลงเมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นดังแสดงใน รูปที่ 7 เมื่อแทนที่ผงอิฐดินเผาเคลือบ 0%, 10%, 20%, 30% และ 50% ความเร็วคลื่นเสียงที่อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน มีค่า 3886, 3807, 3694, 3775 และ 3731 เมตรวินาที ตามลำดับ ซึ่งสามารถจัดคุณภาพของคอนกรีตในแง่ของความเร็วคลื่นตามยาวว่าอยู่ในชั้นคุณภาพที่ดี ซึ่งอยู่ในช่วง ระหว่าง 3500 ถึง 4500 เมตรวินาที [6] นอกจากนี้สังเกตว่ามีความสอดคล้องกับความหนาแน่นรวม



รูปที่ 7 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคของคอนกรีต หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย

3.5 กำลังอัด

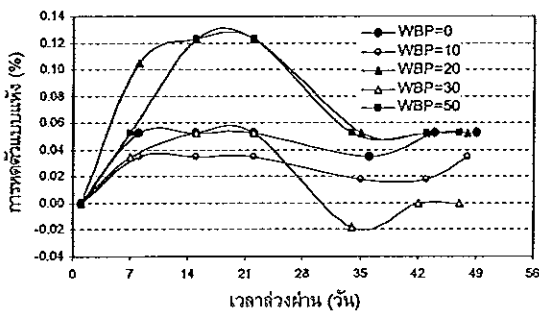
กำลังอัดคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้ผงอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ ที่อายุบ่ม 28 วันค่ากำลังอัดคอนกรีต 424, 427, 345, 340 และ 307 กก./ตร.ซม.ตามการเพิ่มปริมาณของร้อยละผงอิฐดินเผาตามลำดับ และที่ผงอิฐบด 10%, 20%, และ 30% ได้กำลังอัดเป็นไปตามข้อกำหนดของวัสดุปอซโซลานซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวควบคุมเกินกว่าร้อยละ 75 ขึ้นไป ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 8 ซึ่งมีค่าแตกต่างจากการใช้มวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงชาย โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.50 ไม่มากนัก [5] ถ้าเปรียบเทียบกับกำลังอัดคอนกรีตหินสกอเรีย (scoria) ที่ 28 วัน โดยใช้ปริมาณน้ำปูนซีเมนต์ และวัสดุปอซโซลานที่เท่ากัน พบว่ากำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตหินสกอเรียประมาณ 14% [12] แต่เมื่ออายุบ่มมากกว่า 28 วันขึ้นไปกำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลง



รูปที่ 8 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีต่อกำลังอัดของคอนกรีตหินบะซอลต์เนื้อโพรงชาย

3.6 การหดตัวแบบแห้ง

ผลทดสอบหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้ผงอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ 0%, 10%, 20%, 30% และ 50% ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทปกติเป็นเวลา ถึง 42 วัน พบว่าคอนกรีตมีการหดตัวมากที่สุด 0.12% ตามสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 9 อิทธิพลของอายุบ่มที่มีต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตหินบะซอลต์เนื้อโพรงชาย

และเมื่อนำก้อนตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ (25°C) เป็นเวลานาน 43 ถึง 62 วัน ปรากฏว่าคอนกรีตเกิดการหด 0.05%, 0.05%, 0.05%, 0.00% และ 0.05% พบว่าการแทนที่ผงอิฐดินเผา

บดละเอียดที่ 30% สามารถช่วยลดการหดตัวของคอนกรีตได้อย่างชัดเจน

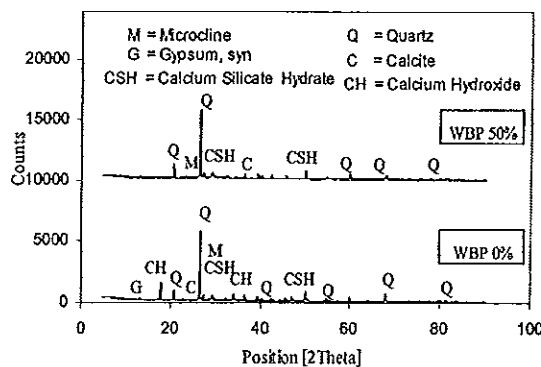
3.7 องค์ประกอบแร่และโครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจปริมาณและชนิดแร่ในคอนกรีตด้วยเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่ามีปริมาณและชนิดของแร่ดังแสดงใน ตารางที่ 3 การตรวจสอบปริมาณแร่ที่มีอยู่ในคอนกรีตพบว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมผงอิฐดินเผาจะตรวจพบแร่ยิปซัมและเมื่อผสมผงอิฐดินเผาบดละเอียดปรากฏว่าไม่พบแร่ยิปซัมผสมอยู่ ดังแสดงผลรายละเอียดในตารางที่ 3 จากการตรวจดูโครงสร้างจุลภาคของเนื้อคอนกรีต พบว่าเมื่อไม่ผสมผงอิฐดินเผาคอนกรีตปูนซีเมนต์จะพบปริมาณแร่ยิปซัมผสมอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 11 ก) เพราะยิปซัมทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับสารประกอบไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C<sub>3</sub>A) ซึ่งจะก่อให้เกิดชั้นของแอดริงโกต์ชั้น [2] ซึ่งจะไปห่อหุ้มคอนกรีตให้แข็งตัวช้าลง

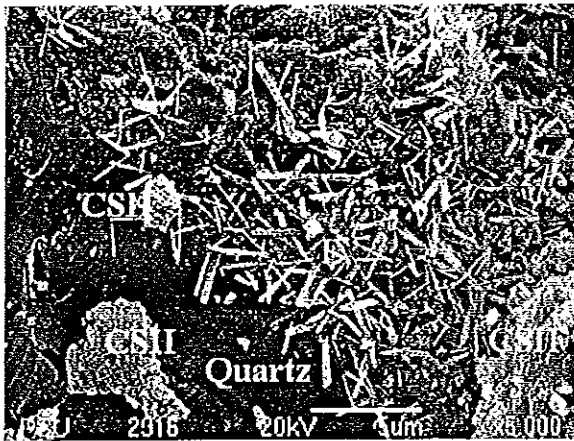
ตารางที่ 3 ชนิดและปริมาณแร่ในคอนกรีตบ่ม 28 วัน

ชนิดแร่	ปริมาณแร่ในคอนกรีต (%)				
	0%	10%	20%	30%	50%
แคลไซต์	4.10	7.91	5.85	12.20	6.77
ยิปซัม	6.96	-	-	-	-
CH	11.75	7.71	8.37	2.97	-
ควอตซ์	42.06	64.45	42.16	42.06	48.08
CSH	5.25	6.02	5.96	6.80	4.16
ไมโครไคลน์	29.88	13.91	37.66	35.97	40.99

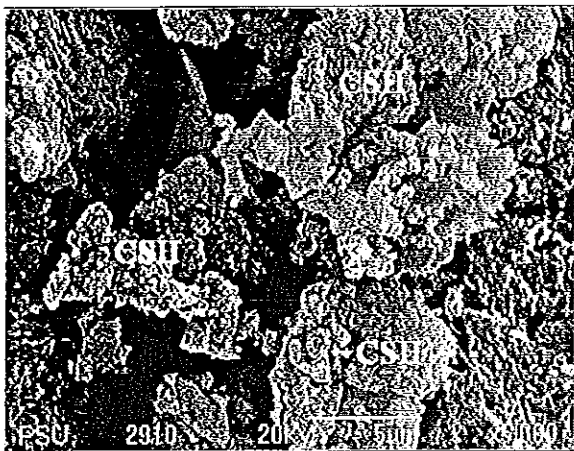
นอกจากนี้ยังพบว่าปูนซีเมนต์ได้ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ขึ้นเช่นกัน และเมื่อใช้ผงอิฐดินเผาบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์จากการตรวจปริมาณและชนิดแร่พบว่าไม่พบปริมาณของแร่ยิปซัม ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคซึ่งไม่พบแอดริงโกต์ (รูปที่ 11 ข) ดังนั้นแสดงว่าการใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมผสมในคอนกรีตสามารถช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 10 ความเข้มข้นของแร่ในคอนกรีตที่ใช้ผงอิฐแทนที่ 0% และ 50% ที่อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน



ก)



ข)

รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคกำลังขยาย 5,000 เท่า ของคอนกรีตที่  
ปอม 28 วัน แทนที่ผงอิฐดินเผาแบบละเอียด ก) 0% แอตริงโกต์ (E)  
มาก และ ข) 50%

#### 4. สรุปผล

การแทนที่ปริมาณผงอิฐร้อยละ 10, 20 และ 30 สามารถ  
นำไปใช้ผสมคอนกรีตได้ ซึ่งพบว่าช่วงระยะบ่มคอนกรีตน้อยกว่า  
ช่วงของการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตอย่างรวดเร็วใน 7 วัน เมื่อ  
เปรียบเทียบกับช่วงอายุบ่มอื่นๆ และเมื่อใช้ผงอิฐดินเผาแทนที่ใน  
ปูนซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นรวม และความเร็ว  
คลื่นอัลตราโซนิคลดลง การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ยังพบอีกว่าเมื่อใช้ผง  
อิฐดินเผาละเอียดที่ 30% สามารถช่วยลดการหดตัวของ  
คอนกรีตอย่างชะงัดและยังพบว่าผลทดสอบความเร็วคลื่นอัลตรา  
โซนิคสามารถบอกถึงแนวโน้มพัฒนาการความหนาแน่นและกำลัง  
อัดคอนกรีตตามอายุบ่มที่เพิ่มมากขึ้นได้

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชากรรม  
เหมืองแร่และวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และศูนย์เครื่องมือ  
วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และภาควิชาวิศวกรรม  
โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่ให้ความ  
อนุเคราะห์ให้มีอุปกรณ์และอนุญาตให้ใช้เครื่องมือทดสอบ รวมถึง

บริษัทบุรีรัมย์ จำกัด และโรงยอยหินภายในจังหวัดบุรีรัมย์ที่ให้  
ความอนุเคราะห์หินบะซอลต์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ และเดาเผาอิฐ  
บ้านคลองแปด อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ที่ให้ความอนุเคราะห์เศษอิฐ  
ดินเผาที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้

#### 5. บรรณานุกรม

- [1] วินิต ช่อวิเชียร, 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. ห้างหุ้นส่วน  
จำกัด ป.สัมพันธ์พาณิชย์
- [2] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2536. คอนกรีตเทคโนโลยี. บริษัท  
ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด
- [3] ดนุพล ตันนโยภาส, 2551. แนะนำศิลาบรรณนา พิมพ์ครั้งที่ 2  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 321 หน้า
- [4] ชีววัฒน์ สินศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ปริญญา จินดา  
ประเสริฐ, 2548. ผลกระทบของความละเอียดเม็ดพื้นดินต่อ  
กำลังอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงในซีเมนต์  
เพสต์. วิจัย และพัฒนา มจร., ปีที่ 28
- [5] ดนุพล ตันนโยภาส, ชีรยุทธ ว่องวิริยะสกุล วัลลภ แซ่ท้อย,  
และชิตพล เอียดปาน, 2551. อิทธิพลของชนิดมวลรวมหยาบ  
ที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต. การประชุมวิชาการทาง  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6
- [6] พรนารายณ์ บุญราศี, ดนุพล ตันนโยภาส, 2551. การปรับปรุง  
คุณภาพของคอนกรีตมวลรวมจากกะลาปาล์มน้ำมันด้วยเถ้า  
แกลบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกล การประชุมวิชา  
การทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6 มหาวิทยาลัยสงขล  
านครินทร์ 8-9 พฤษภาคม 2551 หน้า 91-96. (CD-ROM)
- [7] Boke, H., Akkurt, S., Ipekoglu, B. and Hasan, E.U. 2006.  
Characteristics of Brick Used as Aggregate in Historic  
Brick-Lime Mortars and Plasters. Cement and Concrete  
Research, 36: 1115-1122.
- [8] Turanlı, L. Bektas, F. and Monteiro, P.J.M. 2003. Use of  
Ground Clay Brick as a Pozzolanic Material to Reduce the  
Alkali-Silica Reaction. Cement and Concrete  
Research, 1540(33): 1539-1542.
- [9] Korkanc, M. and Tugrul, A. 2004. Evaluation of Selected  
Basalt from Nigde Turkey as Source of Concrete  
Aggregate, Engineering Geology, 75: 291-307.
- [10] Tasong, W.A., Cripps, J.C. and Lynsdale, C.J. 1998.  
Aggregate-Cement Chemical Interactions, Cement and  
Concrete Research, 28(7): 1037-1048.
- [11] Topcu, I.B. 1997. Semi Lightweight Concrete Produced  
by Volcanic Slags, Cement and Concrete Research,  
27(1): 15-21.
- [12] Kilic, A., Atis, C.D., Yasar, E. and Ozcan, F. 2003. High-  
Strength Lightweight Concrete Made with Scoria  
Aggregate Containing Mineral Admixtures. Cement and  
Concrete Research, 33: 1595-1599.



การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ ข.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา 13-15 พฤษภาคม 2552



ผลกระทบของเศษอิฐดินเผาบดที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย  
EFFECT OF GROUND CRUSHED WASTE FIRED CLAY BRICK ON PROPERTIES OF  
VESICULAR BASALT AGGREGATE CONCRETE

เจริญพล อินขันธ์ (Chareonpon Inkhan)<sup>1</sup>

ดนุพล ตันนโยภาส (Danupon Tonnayopas)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ chareonpon\_1981@hotmail.com

<sup>2</sup>รศ.ดร. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ danupon.i@psu.ac.th

บทคัดย่อ : ศึกษาผลกระทบของเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ผงอิฐดินเผาใช้แทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 ตลอดการศึกษานี้ ที่อายุบ่มคอนกรีต 7, 28 และ 56 วัน และดำเนินการทดสอบหาความชื้นเหลวปกติรวมถึงระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ จากการผสมเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบในคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเพื่อหาค่าความชื้นตัวของคอนกรีตสด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การหดตัวแบบแห้ง ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และกำลังอัด ผลจากการทดสอบคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายพบว่าเมื่อเพิ่มเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบทำให้สมบัติเชิงค้ำคือ ความหนาแน่น และความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกลดลง ส่วนสมบัติเชิงไม่ค้ำคือ กำลังอัดลดลง กำลังอัดที่ 28 วัน แทนที่ด้วยเศษอิฐดินเผาเคลือบเคลือบร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 ได้ค่ากำลังอัดอยู่ที่ 490, 430, 449, 406 และ 364 กก./ซม<sup>2</sup>. ตามลำดับ ผลจากการศึกษาบ่งชี้ว่าการแทนที่ที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 10 ถึง 30

ABSTRACT : An experimental study to evaluate influence of ground crushed waste fired-clay brick (GCWFCB) on properties of vesicular basalt aggregate concrete (VBAC) was investigated. VBAC containing GCWFCB used as a partial replacement of Portland cement, Type I by weight in the proportions of 10, 20, 30 and 50%. Water-binder ratio was used constant of 0.5 throughout this study and different water-cured for 7, 28 and 56 days. Tests were carried out to determine paste on normal consistency and setting time. The VBAC containing GCWFCB were determined slump, bulk density, water absorption, drying shrinkage, ultrasonic velocity, and compressive strength. The experimental result indicated that VBAC with increasing of GCWFCB proportions, bulk density, ultrasonic velocity and compressive strengths decreased. The 28-day compressive strengths of VBAC with 0, 10, 20, 30 and 50% GCWFCB were obtained 490, 430, 449, 406 and 364 ksc, respectively. The results indicated the optimal percentages of substitution lies between 10% to 30%.

KEYWORDS : Ground crushed waste fired clay brick, Vesicular basalt aggregate, Curing time, Compressive strength

## 1. บทนำ

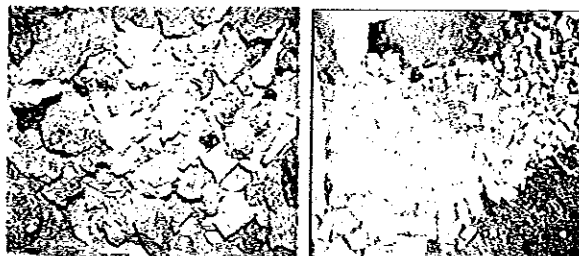
ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตคอนกรีตได้มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น มีการค้นคว้าและพัฒนาการใช้วัสดุทดแทนและนำวัสดุที่เหลือใช้มาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตทั้งในแง่ของวัสดุประสานและมวลรวมหยาบ ในส่วนของวัสดุประสานเช่น วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan) ซึ่งปกติแล้วพบว่าจะได้จากธรรมชาติหรือทำเทียมขึ้นได้ ส่วนที่ทำเทียม ได้แก่ ดินเหนียวหรือดินคานเผา โดยทั่วไปจะประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ [1] และผงอัฐิมีความเป็นพอซโซลานสูงเช่นกันเนื่องจากประกอบด้วยแร่คิงที่มี ซิลิกา อะลูมินา และเหล็กสูง กระบวนการเผาอัฐิทำให้เกิดพอซโซลาน เมื่อให้อุณหภูมิการเผาระหว่าง 450 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะกลายเป็นดินขาวแปร (Metakaolin) ตามลักษณะชนิดของดินแต่ละที่และถ้าใช้อุณหภูมิมากกว่านี้ก็จะทำให้พื้นที่ผิวลดลง [2] นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถช่วยระงับการขยายของปฏิกิริยาการเป็นค่างของสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มปริมาณผงอัฐิในเนื้อปูนซีเมนต์ผสมคอนกรีตที่มากขึ้น [3] และถ้ายังมีอนุภาคละเอียดเมื่อผสมคอนกรีต จะให้กำลังอัดมากกว่า วัสดุพอซโซลานที่มีอนุภาคหยาบกว่า [4] ดังนั้นการใช้ผงอัฐิดินเผาละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ผสมคอนกรีตก็สามารถช่วยเพิ่มการประสานและช่วยลดการขยายตัวของคอนกรีตให้ดีขึ้น ในส่วนมวลรวมหยาบ ปกตินิยมใช้ หินปูน (Limestone) และหินแกรนิต (Granite) ผสมคอนกรีต และพบว่าหินอัคนีเนื้อจุด เช่น หินบะซอลต์ (Basalt) ซึ่งหากมีลักษณะเป็นรูพรุน เรียกว่า หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (Vesicular basalt) มีความแข็ง สีเทาแก่ จะมีแร่ธาตุที่ประกอบไปด้วย ไพรอกซีน (Pyroxene) และโอลิวิน (Olivine) ส่วนมากนำไปใช้สำหรับทำถนน ในประเทศไทยพบมากที่จังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ ศรีสะเกษ และลำปาง [1] หินบะซอลต์โอลิวิน (Olivine) มีคุณภาพที่ดีกว่าบะซอลต์ชนิดอื่นๆ แต่ถึงกระนั้นหินบะซอลต์ส่วนมากที่เหมาะสมกับการผลิตมวลรวมหินที่น้อยสำหรับการผลิตคอนกรีต [5] ผลเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวม ได้แก่ หินบะซอลต์ หินปูน ทราวยแก้ว และหินควอร์ตไซต์กับน้ำปูนขึ้น พบว่าหินบะซอลต์มีการเร่งเกิดปฏิกิริยามากที่สุด [6] นอกจากนี้พบว่าสามารถนำตะกรัน

ภูเขาไฟ (scoria) มาใช้ผลิตคอนกรีตทิ้งมวลเบาได้อย่างปลอดภัยอีกด้วย [7] ดังนั้นจึงมีความคิดที่จะนำเศษอัฐิหักและหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายมาใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีตเพื่อประเมินคุณภาพที่ได้

## 2. การดำเนินการวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้

หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ผ่านการย่อยมาจากโรงโม่หินภายในจังหวัดบุรีรัมย์ มีขนาด 2 ถึง 4 นิ้ว ซึ่งเป็นหินอัคนีฟู สีเทาน้ำตาลเนื้อด้านในสีเทาเข้มถึงดำ เนื้อเป็นโพรงบางแห่งมีก้อนทรงมนของแร่กำมะถันอุกอยู่ข้างใน (ภาพที่ 1 ก)



ก) ข)

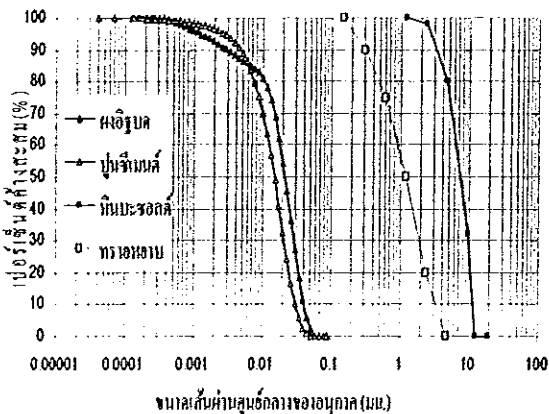
ภาพที่ 1 วัสดุที่ใช้ ก) หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ข) เศษอัฐิดินเผาที่ทิ้งจากโรงเผาอัฐิ

ทรายหยาบน้ำจืดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 เป็นมวลรวมละเอียด เศษอัฐิดินเผาละเอียด (GCWFCB) ของเตาเผาอัฐิบ้านคลองเป็ด ตำบลทองส่า อำเภอลาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (ภาพที่ 1 ข) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และน้ำประปา

### 2.2 วิธีการทดสอบก่อนตัวอย่าง

ทดสอบสมบัติวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต ได้แก่ ตรวจสอบขนาดผลของหินบะซอลต์โดยปฏิบัติตามวิธี ASTM C 330-77 ความถ่วงจำเพาะใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136-84 และการดูดซึมน้ำของหินบะซอลต์ตามมาตรฐาน ASTM C127-88 ทดสอบความหนาแน่นของหินบะซอลต์โดยเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C29-89 ทดสอบขนาดผลของทรายโดยใช้มาตรฐาน ASTM 136-84 ทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทรายตามมาตรฐาน ASTM C128-88 ทดสอบค่าดัชนีความแบนและความยาวของหินบะซอลต์ตามมาตรฐาน

BS 812-105.1 ทดสอบขนาดคละของปูนซีเมนต์และ GCWFCB โดยใช้เครื่องมือ Hydro 2000MU (A) ซึ่งขนาดคละของมวลรวมผสมคอนกรีต (ภาพที่ 2) ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทั้ง GCWFCB และเนื้อคอนกรีตโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ GCWFCB โดยใช้เครื่องมือเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (XRF)



ภาพที่ 2 ขนาดคละมวลรวมสำหรับผสมคอนกรีต

ตรวจพื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) และความพรุนของผงอิฐดินเผา บดละเอียดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 โดยเครื่องวัด Coulter SA3100 ทดสอบความถ่วงจำเพาะของ GCWFCB และปูนซีเมนต์ตามวิธี ASTM C340 ตรวจปริมาณและชนิดแร่ที่เกิดขึ้นในคอนกรีตด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ทดสอบสมบัติซีเมนต์เฟสได้แก่ ทดสอบความชื้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์ที่แทนด้วย GCWFCB โดยน้ำหนัก 0%, 10%, 20%, 30% และ 50% ตามมาตรฐาน ASTM C187-86 ทดสอบการหาระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดตามมาตรฐาน ASTM C191 ทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีต (Slump test) ตามมาตรฐาน ASTM C 143-89 ทดสอบสมบัติคอนกรีตแข็งตัว ได้แก่ ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C127-88 กำล้างอัดตามวิธี ASTM C109M-01 และวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C597-97 ทดสอบการหดตัวแบบแห้งตามมาตรฐาน ASTM C596

2.3 การเตรียมและอัตราส่วนผสมคอนกรีต

นำมวลรวมหินบะรอกคด้านล่างให้สะอาดตากแดดให้แห้งและย่อยค้อนขนาดให้ได้ตามเกณฑ์ ASTM C330-77 มีขนาดอยู่ในช่วง 1.18 ถึง 12.5 มม. ด้วยเครื่องบดปากรวย (Gyratory mill) แล้วแช่น้ำ 24 ชั่วโมง ขึ้นมาแช่คให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวแต่ผิวแห้ง ส่วน GCWFCB เข้าเครื่องบดด้วยลูกเหล็ก (ball mill) และร่อนน้ำสะอาดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (45 ไมครอน) แล้วอบที่อุณหภูมิ 110°C. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำเข้าเครื่องบดละเอียดอีกครั้ง ออกแบบหล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตตามเกณฑ์ ACI 211.1-70 ดังแสดงใน ตารางที่ 1 อัตราส่วนน้ำคือวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 คงที่ตลอดการทดสอบ ก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีขนาด 10×10×10 ซม. บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60% เป็นเวลา 7, 28 และ 56 วัน การทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตจะนำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดมาย่อยให้มีขนาดประมาณ 2-3 นิ้ว มาทดสอบตาม ASTM C127-88

ตารางที่ 1 การออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ศึกษา

วัสดุผสม	ผงอิฐดินเผาแทนที่ปูนซีเมนต์ (กก./ลบ.ม.)				
	0%	10%	20%	30%	50%
บะรอกค	787	787	787	787	787
ทราย	582	582	582	582	582
ปูนซีเมนต์	500	450	400	350	250
ผงอิฐบด	0	50	100	150	250
น้ำ	250	250	250	250	250

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 สมบัติมวลรวม

คัดขนาดมวลรวมหินบะรอกคเนื้อโพรงขำผ่านตะแกรง 1/2" ก้างตะแกรงเบอร์ 16 มีการดูดซึมน้ำ 4.30% ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง 2.42 ความถ่วงจำเพาะแห้ง 2.32 ความถ่วงจำเพาะปรากฏ 2.57 ความหนาแน่นแบบหลวม 1219.70 กก./ลบ.ม. ความหนาแน่นแบบแน่น 1456.70 กก./ลบ.ม. ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.10 ค่าดัชนีความแบน 28.4% ค่าดัชนีความยาว 31.9% ความถ่วงจำเพาะรวมทรายแห้ง 2.46 การดูดซึมน้ำ 1.42 ค่าโมดูลัสความละเอียด 3.34 ค่ากระแทก 6.10-6.92% พื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) และวิเคราะห์องค์ประกอบทาง

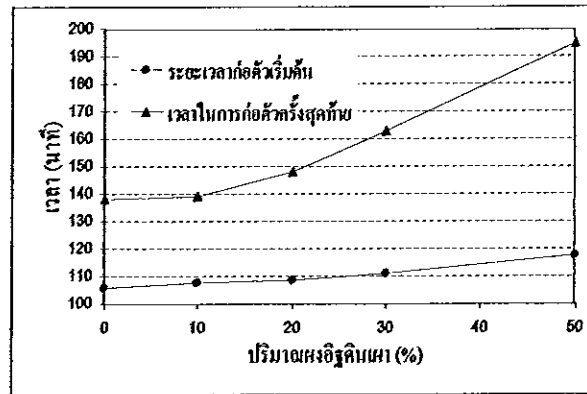
เคมีแบบกึ่งปริมาณของผงอิฐดินเผาละเอียด พบว่า GCWFCB มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  รวมกันร้อยละ 93.26% ค่า LOI เท่ากับ 1.42% และจัดเป็นปอซโซลานประเภท N ดังแสดงใน ตารางที่ 2

### 3.2 ความขึ้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวของเพสท์

ความขึ้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์แทนที่ด้วย GCWFCB โดยน้ำหนักที่ 0, 10, 20, 30 และ 50% พบว่าเพสท์ต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น 24.23, 27.06, 29.40, 31.62 และ 36.32% ตามลำดับ ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นพบว่าเมื่อแทนที่ GCWFCB ในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นต้องใช้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น 106, 108, 109, 111 และ 118 นาที ตามลำดับ และระยะเวลาการก่อตัวครั้งสุดท้าย 138, 139, 148, 163 และ 195 นาที ตามลำดับ (ภาพที่ 3) ดังนั้นการใช้ GCWFCB แทนที่ในปูนซีเมนต์ช่วยหน่วงเวลาการก่อตัวเพสท์ได้

### ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุประสาน

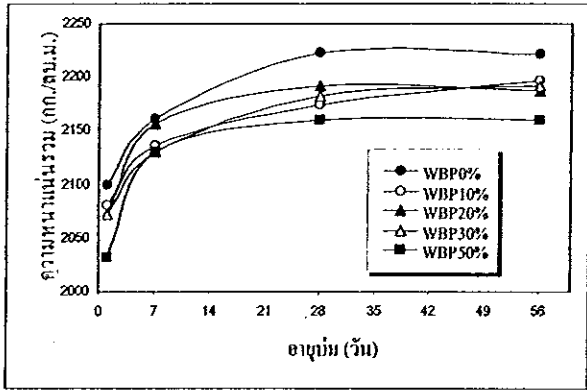
องค์ประกอบทางเคมี	ผงอิฐ	ปูนซีเมนต์
$\text{Al}_2\text{O}_3$	20.20 %	3-8 %
$\text{SiO}_2$	68.06 %	17-25 %
$\text{SO}_3$	0.24 %	1-3 %
$\text{K}_2\text{O}$	2.70 %	0.5-1.3 %
$\text{CaO}$	0.36 %	60-67 %
$\text{TiO}_2$	1.59 %	0.1-0.4 %
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.00 %	0.5-6.0 %
Rb	0.03 %	-
$\text{ZrO}_2$	0.13 %	-
LOI	1.42 %	-
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม. / ก.)	20.919	1.628
พื้นที่ความพรุน (ตร.ม. / ก.)	2.647	-
ความถ่วงจำเพาะ	2.60	3.10



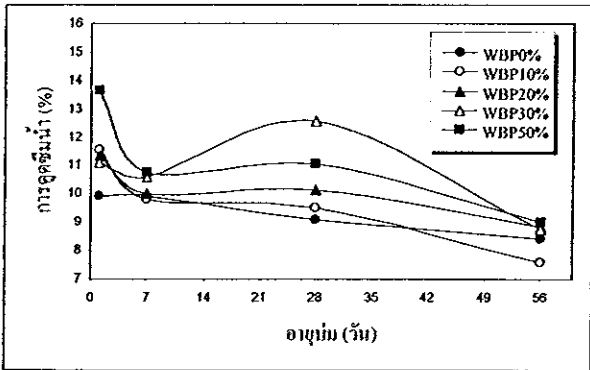
ภาพที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้นและก่อตัวครั้งสุดท้ายเพสท์เมื่อแทนที่ผงอิฐดินเผาโดยน้ำหนักรวมของปูนซีเมนต์

### 3.3 ค่ายุบตัว ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำ

ค่ายุบตัวของคอนกรีตแทนที่ด้วย GCWFCB โดยน้ำหนักรวมที่ 0, 10, 20, 30 และ 50% มีค่า 115, 90, 70, 53 และ 35 มม. ตามลำดับ ความหนาแน่นรวมของคอนกรีตที่อายุบ่มคอนกรีต 28 วัน ลดลงเมื่อแทนที่ GCWFCB ที่ 0, 10, 20, 30 และ 50% ได้ค่าความหนาแน่น 2222, 2174, 2191, 2182 และ 2160 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ ดังแสดงใน ภาพที่ 4 ความหนาแน่นคอนกรีตอายุ 1 วัน อยู่ระหว่าง 2032 ถึง 2100 กก./ลบ.ม. ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับการทดสอบของ คุณพลและคณะ [8] ที่ทดสอบคอนกรีตหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.50 ได้ความหนาแน่น 2080 กก./ลบ.ม. และถ้าเปรียบเทียบกับความหนาแน่นในอากาศของคอนกรีตตะกรันภูเขาไฟ (Scoria) ที่ 28 วัน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 โดยใช้วัสดุปอซโซลานที่เท่ากันพบว่าความหนาแน่นคอนกรีตหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายจะมีค่าสูงกว่า ประมาณ 20% [10] นอกจากนี้สังเกตว่าความหนาแน่นคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นเมื่ออายุบ่มคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัดและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค ดังแสดงในภาพที่ 6, 8 ที่มีค่าสูงขึ้น การดูดซึมน้ำที่อายุบ่ม 28 วัน โดยใช้ GCWFCB แทนที่ปูนซีเมนต์ 0, 10, 20, 30 และ 50% มีค่าดูดซึมน้ำ 9.10, 9.50, 10.10, 12.60 และ 11.0% ตามลำดับดังแสดงใน ภาพที่ 5 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตจะแปรผันตามปริมาณ GCWFCB เพิ่มขึ้นและเมื่ออายุบ่มเพิ่มมากขึ้นการดูดซึมน้ำของคอนกรีตลดลงซึ่งจะสอดคล้องกับความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นดังแสดงใน ภาพที่ 4



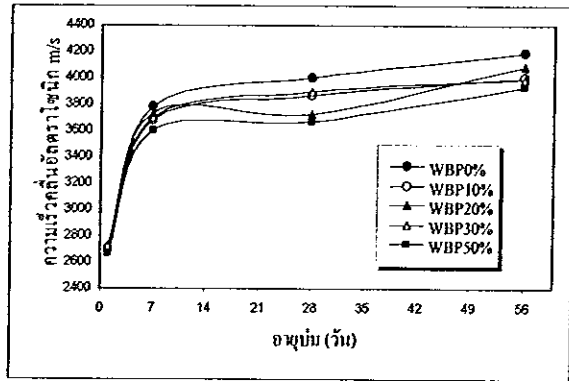
ภาพที่ 4 ความแปรปรวนของความหนาแน่นรวมของคอนกรีต หินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำยที่ผสมผงอิฐอิฐราส่วน ต่างกัน



ภาพที่ 5 ความแปรปรวนของการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำยที่ผสมผงอิฐอิฐราส่วน ต่าง

3.4 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

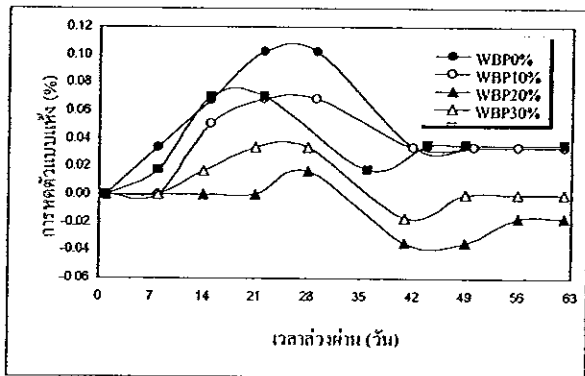
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่ GCWFCB เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าอายุปูนมากขึ้นความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีค่าเพิ่มขึ้นดัง ภาพที่ 6 เมื่อแทนที่ GCWFCB 0, 10, 20, 30 และ 50% ความเร็วคลื่นที่อายุปูนคอนกรีต 28 วัน มีค่า 4005, 3867, 3721, 3892 และ 3664 เมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งสามารถจัดคุณภาพของคอนกรีตในพจน์ของความเร็คลื่นตามยาวว่าอยู่ในชั้นคุณภาพดี คืออยู่ในช่วง 3500 ถึง 4500 เมตร/วินาที [9] และสังเกตว่าสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นและกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นดังแสดง ภาพที่ 4,8



ภาพที่ 6 ความแปรปรวนของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำยที่ผสมผงอิฐอิฐราส่วนต่างกัน

3.5 การหดตัวแบบแห้ง

ทดสอบการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้ผงอิฐดินเผา บดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ 0%, 10%, 20%, 30% และ 50% ในห้องที่มีอากาศถ่ายเทปกติเป็นเวลาถึง 42 วัน พบว่าคอนกรีตมีการหดตัวมากที่สุด 0.11% ตามสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงใน ภาพที่ 7

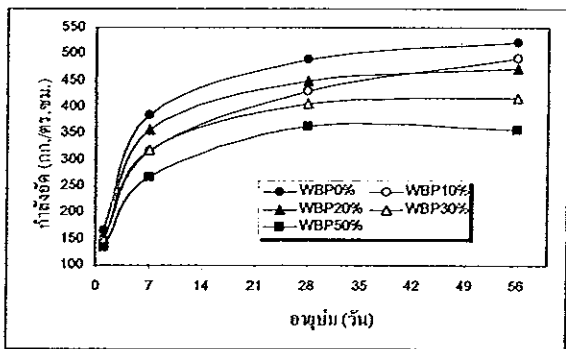


ภาพที่ 7 ความแปรปรวนของการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำยที่ผสมผงอิฐอิฐราส่วนต่างกัน

และเมื่อนำก้อนตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ (25°C) เป็นเวลา 43 ถึง 62 วัน พบว่าคอนกรีตแทนที่ผงอิฐบดร้อยละ 0, 10 และ 50 มีการหดตัวมากที่สุด 0.035% นอกจากนี้การใช้ผงอิฐบดร้อยละ 30 สามารถช่วยลดการหดตัวของคอนกรีต ได้อย่างชะงัด

3.6 กำลังอัด

กำลังอัดคอนกรีตจะลดลงเมื่อใช้ผงอิฐดินเผาบดละเอียด แทนที่ปูนซีเมนต์ที่อายุบ่ม 28 วันกำลังอัดคอนกรีต 490, 430, 449, 406 และ 364 กก./ตร.ซม. ตามการเพิ่มของผงอิฐดินเผาบดละเอียด 0, 10, 20, 30 และ 50% ดังแสดงใน ภาพที่ 8 และที่ ผงอิฐดินเผาบดละเอียด 10%, 20% และ 30% ได้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ความชื้นกำหนดของวัสดุปอซโซลานซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวควบคุมเกินกว่าร้อยละ 75 ขึ้นไป ถ้าเปรียบเทียบกับกำลังอัดคอนกรีต หินสกอเรีย (scoria) ที่ 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 และ ใช้ร้อยละปอซโซลานที่เท่ากัน พบว่ากำลังอัดหินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำยมีค่าสูงกว่าคอนกรีตหินสกอเรียประมาณ 30% [10] นอกจากนี้กำลังอัดคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อแทนที่ผงอิฐดินเผา บดละเอียดร้อยละ 10%, 20% และ 30% ที่อายุบ่มคอนกรีต เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 8 ความแปรปรวนของกำลังอัดของคอนกรีตมวลรวม หินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำยที่ผสมผงอิฐอัตราส่วน ต่างกัน

3.7 องค์ประกอบแร่และโครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจปริมาณและชนิดแร่ในคอนกรีตด้วยเครื่องมือวัด การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่ามีปริมาณและชนิดของแร่ ดังแสดงใน ตารางที่ 3 ซึ่งคอนกรีตที่ไม่ผสมผงอิฐดินเผาจะ ตรวจพบแร่ยิปซัมและเมื่อผสมผงอิฐดินเผาปรากฏว่าไม่พบ แร่ยิปซัมปรากฏอยู่ และจากการตรวจดู โครงสร้างจุลภาคของ เนื้อคอนกรีต พบว่าเมื่อไม่ผสมผงอิฐดินเผาแทนที่ ปูนซีเมนต์จะพบปริมาณแร่ยิปซัมผสมอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับการ ตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 9 ก) เพราะยิปซัมทำ ปฏิกิริยาไฮเดรชันกับสารประกอบโครแมียมอะลูมิเนียม (C<sub>3</sub>A) ซึ่งจะก่อให้เกิดแอสทริงไกต์รูปเข็มขึ้น [2] ซึ่งไปหน่วง

คอนกรีตให้แข็งตัวช้าลง นอกจากนี้ยังพบว่า การแทนที่ผงอิฐดิน เผาบดจะทำให้เนื้อคอนกรีตมีรู โพร่งมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับ ผลทดสอบความหนาแน่นที่มีค่าลดลง

ตารางที่ 3 ชนิดและปริมาณแร่ในคอนกรีตบ่ม 28 วัน

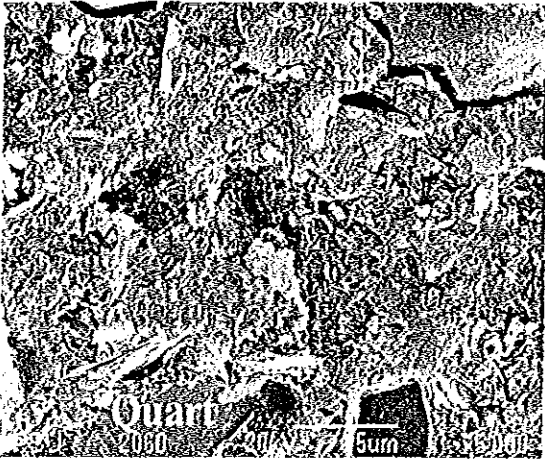
ชนิดแร่	ปริมาณแร่ในคอนกรีต (%)				
	0%	10%	20%	30%	50%
แอสทริงไกต์	20.84	-	-	-	-
แคลไซต์	-	-	-	-	-
ยิปซัม	14.14	-	-	-	-
CH	18.46	9.94	11.94	6.68	-
ควอตซ์	42.52	42.39	46.26	43.91	53.95
CSH	4.04	2.10	4.83	3.16	3.16
ไมโคร โคลน	-	45.57	36.97	46.25	42.89

4. สรุปผล

การแทนที่ปริมาณผงอิฐน้อยกว่า 30% สามารถนำไปใช้ผสม คอนกรีตหินบะซอลต์เนื้อ โพร่งขำยได้ และยังพบว่าในคอนกรีต บ่ม 7 วัน มีการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตอย่างรวดเร็วเมื่อ เปรียบกับช่วงอายุบ่มอื่น และเมื่อแทนที่ผงอิฐดินเผาในซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิ กลดลง นอกจากนี้การแทนที่ผงอิฐร้อยละ 30 สามารถช่วยลด การหดตัวของคอนกรีตได้อย่างชะงัด และยังพบว่าความเร็วคลื่นอัลตรา โซนิสามารถบ่งชี้ถึงแนวโน้มพัฒนาการความหนาแน่น และกำลังอัดคอนกรีตได้



ก)



ข)

ภาพที่ 9 ภาพถ่ายจุลทรรศน์แบบส่องกราด กำลังขยาย 5, 000 เท่า ของคอนกรีตที่บ่ม 28 วัน แทนที่ด้วย GCWFCB ก) 0% พบแอมคริงโกสต์ (E) มาก และ ข) 50% พบควอซซ์และ CSH

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัยและภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่ให้อุปกรณ์และอนุญาตให้ใช้เครื่องมือทดสอบ รวมถึงบริษัท นวัตกรรมวิจัย จำกัด และ ร้อยเอ็ดหินภายในจังหวัดบุรีรัมย์ที่ให้การสนับสนุนมวลรวมหินบะซอลต์ที่ใช้ศึกษา และเตาเผาอิฐบ้านคลองแปดที่ให้ควมอนุเคราะห์เสมือดินเผาที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้

#### 5. บรรณานุกรม

- [1] คนุพล ตันนโยภาส (2551). แนะนำศิลาบรรณนา พิมพ์ครั้งที่ 2 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 321 หน้า
- [2] Boke, H., Akkurt, S., Ipekoglu, B., and Ugurlu E. (2006). Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36 Issue 6, 1115-1122.
- [3] Turanlı, L., Bektas, F. and Monteiro, P.J.M. (2003). Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Issue 10, 1539-1542.
- [4] ชีรวัฒน์ สันศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดา ประเสริฐ, 2548. ผลกระทบของความละเอียดแก้วด้านหินต่อกำลังอัดปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงในซีเมนต์เพสต์. วิจัยและพัฒนา มจร ปีที่ 28
- [5] Korkanc, M. and Tugrul, A. (2004). Evaluation of selected basalt from Nigde Turkey as source of concrete aggregate, *Engineering Geology*, No.75, 291-307.
- [6] Tasong, W.A., Cripps, J.C. and Lynsdale, C.J. (1998). Aggregate cement chemical interactions, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, Issue 7, 1037-1048.
- [7] Topcu, I.B. (1997). Semi lightweight concrete produced by volcanic slags, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, Issue 1, 15-21.
- [8] คนุพล ตันนโยภาส, ชีรยุทธ ว่องวิริยะสกุล วัลลภ แซ่ท้อย และชิตพล เอียดปาน, (2551). อิทธิพลของชนิดมวลรวมหยาบที่มีต่อสมบัติของคอนกรีต. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6 หน้า 68-73.
- [9] พรนราชนันท์ บุญราศี และคนุพล ตันนโยภาส (2551). การปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตมวลรวมจากกะลาปาล์ม น้ำมันด้วยแก้วเคลือบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกล การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6 หน้า 91-96.
- [10] Kilic, A., Atis, C.D., Yasar, E. and Ozcan, F. (2003). High-Strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures, *Cement and Concrete Research*, 33: 1595-1599.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายเจริญพล อินขัน

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4910120007

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2547

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

ครูอัตราจ้าง วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

เจริญพล อินขัน และ คณุพล ตันนโยภาส (2552). ผลกระทบของเศษอิฐดินเผาบดที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตมวลรวมจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 13-15 พฤษภาคม 2552. หน้า 2213-2218

เจริญพล อินขัน และ คณุพล ตันนโยภาส (2552). อิทธิพลของสมบัติทางกายภาพและทรงลักษณะของมวลรวมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่มีต่อกำลังของคอนกรีตผสมรวมกับเศษอิฐดินเผาบดละเอียด. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7. 21-22 พฤษภาคม 2552. หน้า 15-20 (บทความดีเด่นประเภทการวิจัยพื้นฐาน)