

นวัตกรรมการนฤตบลิอกมวลงเบอปานกลาง



กลวัชร ณวดีนชานนท์

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ตุลาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

นวัตกรรมการคอนกรีตบล็อกลมวลเบาปานกลาง



กลวัชร ณวัฒน์ชานนท์

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ตุลาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

THE INNOVATIVE MODERATE LIGHTWEIGHT CONCRETE BLOCK



A Thesis Submitted to University of Phayao  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Master of Engineering in Civil Engineering  
October 2021  
Copyright 2021 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

นวัตกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลาง

ของ กุลวัชร ฅนวัฒน์ชานนท์

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนากร ภูเงินข้า)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

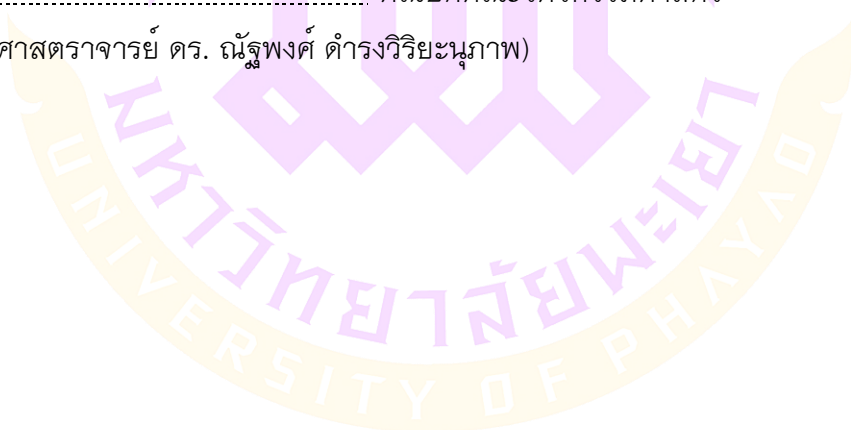
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)



**เรื่อง:** นวัตกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลาง  
**ผู้วิจัย:** กลวัชร ฌวัฒน์ชานนท์, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2564  
**อาจารย์ที่ปรึกษา:** รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุกาฬ  
**คำสำคัญ:** คอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลาง, หินฟูน, กำลังรับแรงอัด, การดูดซึมน้ำ, ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

#### บทคัดย่อ

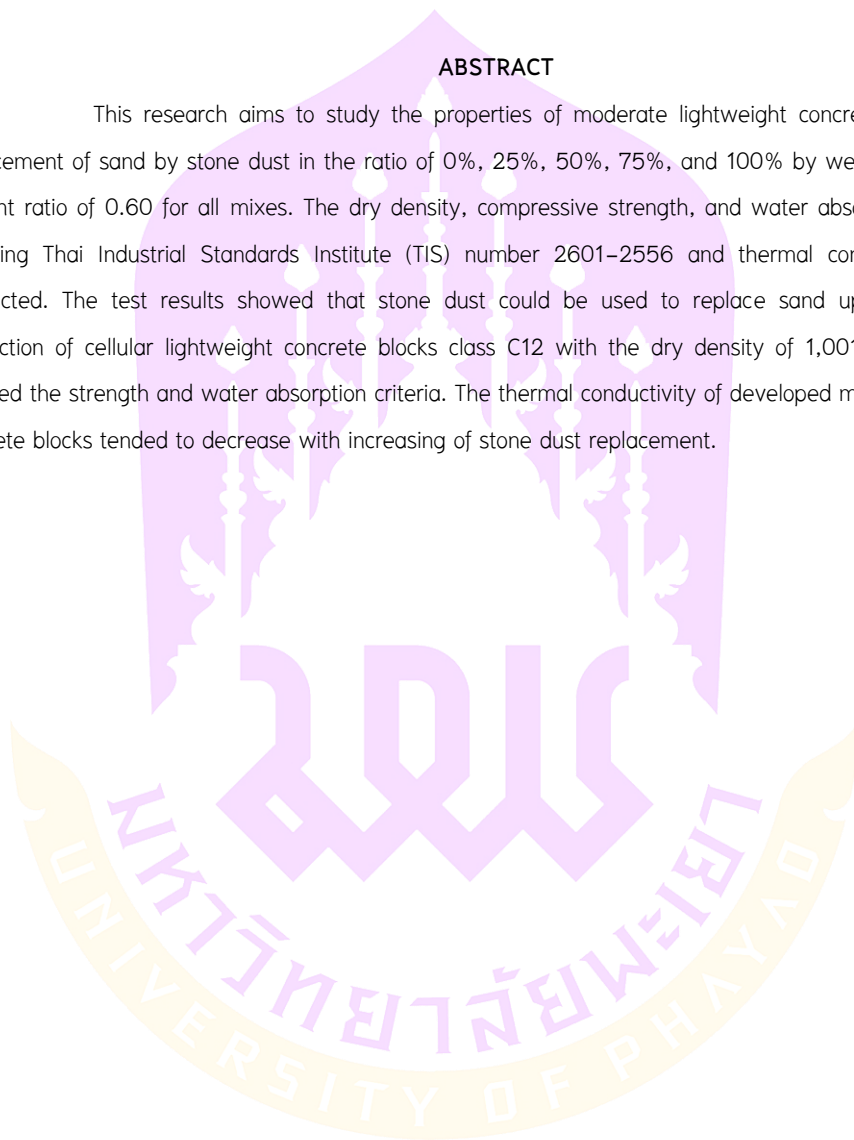
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเต็มพองอากาศ ซึ่งได้จากการนำเอาหินฟูนซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้แทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 75 100 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าคงที่เท่ากับ 0.60 และศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางได้แก่ ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง กำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ ซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 และทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน จากการทดสอบพบว่าสามารถใช้หินฟูนแทนที่ทรายได้สูงสุดถึงร้อยละ 100 ในการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเต็มพองอากาศ ชนิด C12 ที่ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง 1,001-1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.2601-2556 และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายด้วยหินฟูน



**Title:** THE INNOVATIVE MODERATE LIGHTWEIGHT CONCRETE BLOCK  
**Author:** Konlawat Nawatchanon, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2021  
**Advisor:** Associate Professor Dr. Nattapong Damrongwiriyanupap  
**Keywords:** Moderate lightweight concrete block, Stone dust, Compressive strength, Water absorption, Thermal conductivity

#### ABSTRACT

This research aims to study the properties of moderate lightweight concrete blocks with the replacement of sand by stone dust in the ratio of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% by weight with the water cement ratio of 0.60 for all mixes. The dry density, compressive strength, and water absorption were tested following Thai Industrial Standards Institute (TIS) number 2601-2556 and thermal conductivity was also conducted. The test results showed that stone dust could be used to replace sand up to 100% for the production of cellular lightweight concrete blocks class C12 with the dry density of 1,001–1,200 kg/m<sup>3</sup> that satisfied the strength and water absorption criteria. The thermal conductivity of developed moderate lightweight concrete blocks tended to decrease with increasing of stone dust replacement.



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุกาฬ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสแก่ข้าพเจ้าในด้านการศึกษา คอยให้ความรู้ แนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ทั้งในส่วนของการศึกษาและการดำเนินชีวิต คอยดูแลเอาใจใส่ และคอยสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง จนเป็นผลทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน อาจารย์และประธานหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้เล็งเห็นความสำคัญและให้ความกรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และเป็นที่ปรึกษา ให้ความรู้ พร้อมทั้งแนะนำแนวทางต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนากร ภูเงินขำ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมให้ความรู้ คำแนะนำ คอยให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางการแก้ไขต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ รวมไปถึงวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ จากห้องปฏิบัติการทดสอบ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในระหว่างการดำเนินงานตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังสำคัญให้โอกาสในการศึกษา คอยให้กำลังใจ คำแนะนำ เป็นที่ปรึกษาในเรื่องต่างๆ สนับสนุนส่งเสริมในทุกๆ เรื่องตลอดการทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์นี้ทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดความสำเร็จ และหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขออภัยไว้แต่เพียงผู้เดียว



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ที่มาและความสำคัญของการศึกษา.....	1
วัตถุประสงค์ .....	3
ขอบเขตการวิจัย .....	3
ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
คอนกรีตมวลเบา .....	6
คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศหรือระบบเซลลูโลส (Cellular lightweight concrete, CLC) .....	14
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของคอนกรีตมวลเบา .....	19
การหัดตัวแบบแห้ง.....	23
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการหัดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบา.....	34
หินฟูน .....	34
คุณสมบัติของหินฟูนและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ใช้หินฟูนเป็นส่วนผสม.....	54

บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย .....	56
วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	56
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	58
การเตรียมสารเคมีตัวอย่าง .....	66
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ .....	68
การวิเคราะห์ขนาดผลของมวลรวมละเอียด .....	68
ส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่างทดสอบ .....	69
สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวอย่างทดสอบ .....	69
อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกมวลเบา .....	69
วิธีการและขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ .....	71
การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบา.....	72
วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบสำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบา.....	78
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	79
คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ.....	79
สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวอย่างทดสอบ .....	80
คุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ .....	81
ผลการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบสำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบา.....	91
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	93
บรรณานุกรม .....	99
ภาคผนวก .....	106
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง การดูดซึมน้ำและการนำความร้อน.....	107
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	114
ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดสอบ.....	117



## สารบัญตาราง

## หน้า

ตาราง 1 การจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามประเภทการใช้งาน .....	7
ตาราง 2 ประเภทและคุณสมบัติของมวลรวมเบา.....	8
ตาราง 3 ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่างๆ.....	33
ตาราง 4 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C136 .....	68
ตาราง 5 ส่วนผสมความหนาแน่นที่ใช้ออกแบบ 801-900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร .....	70
ตาราง 6 ส่วนผสมความหนาแน่นที่ใช้ออกแบบ 901-1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร .....	70
ตาราง 7 ส่วนผสมความหนาแน่นที่ใช้ออกแบบ 1,001-1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร .....	71
ตาราง 8 เกณฑ์มาตรฐานความหนาแน่นเชิงปริมาตร.....	72
ตาราง 9 เกณฑ์มาตรฐานความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา .....	73
ตาราง 10 เกณฑ์มาตรฐานอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกมวลเบา .....	75
ตาราง 11 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ .....	79
ตาราง 12 ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในแต่ละชนิดและอายุการบ่ม และสัดส่วนการแทนที่หินฝุ่นในทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา .....	81
ตาราง 13 ผลการทดสอบกำลังอัดในแต่ละชนิดและอายุการบ่ม และสัดส่วนการแทนที่หินฝุ่นในทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา .....	83
ตาราง 14 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในแต่ละชนิดและอายุการบ่ม และสัดส่วนการแทนที่หินฝุ่นในทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา .....	85
ตาราง 15 ผลการทดสอบการนำความร้อนในแต่ละชนิดและอายุการบ่ม และสัดส่วนการแทนที่หินฝุ่นในทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา .....	87
ตาราง 16 วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาปานกลางแบบ CLC .....	92
ตาราง 17 การวิเคราะห์ขนาดของมวลรวมละเอียดโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง (ทรายละเอียด) .....	114

ตาราง 18 การวิเคราะห์ขนาดของมวลรวมละเอียดโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง (หินฝุ่นสภาพตามเป็นจริง) .....	115
ตาราง 19 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมรวมละเอียด (ทรายละเอียด) .....	116
ตาราง 20 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมรวมละเอียด (หินฝุ่นสภาพตามเป็นจริง).....	116
ตาราง 21 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1000-0G.....	118
ตาราง 22 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1000-25G.....	120
ตาราง 23 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1000-50G.....	122
ตาราง 24 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1000-75G .....	124
ตาราง 25 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1000-100G .....	126
ตาราง 26 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1100-0G .....	128
ตาราง 27 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1100-25G.....	130
ตาราง 28 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1100-50G .....	132
ตาราง 29 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1100-75G .....	134
ตาราง 30 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1100-100G.....	136
ตาราง 31 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1200-0G.....	138
ตาราง 32 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1200-25G.....	140
ตาราง 33 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1200-50G.....	142
ตาราง 34 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1200-75G .....	144
ตาราง 35 บันทึกรายข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1200-100G .....	146
ตาราง 36 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C9-OMS100S.....	148
ตาราง 37 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C9-25MS75S.....	148
ตาราง 38 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C9-50S50MS .....	149

ตาราง 39	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C9-75MS25S .....	149
ตาราง 40	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C9-100MS0S .....	150
ตาราง 41	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C10-0MS100S .....	150
ตาราง 42	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C10-25MS75S .....	151
ตาราง 43	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C10-50MS50S .....	151
ตาราง 44	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C10-75MS25S .....	152
ตาราง 45	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C10-100MS0S .....	152
ตาราง 46	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C12-0MS100S .....	153
ตาราง 47	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C12-25MS75S .....	153
ตาราง 48	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C12-50MS50S .....	154
ตาราง 49	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C12-75MS25S .....	154
ตาราง 50	ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง C12-100MS0S .....	155



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ตัวอย่าง Vermiculite.....	9
ภาพ 2 ตัวอย่าง Expanded clay aggregate .....	10
ภาพ 3 ตัวอย่าง Expanded shale aggregate .....	11
ภาพ 4 ตัวอย่าง Sintered fly ash.....	12
ภาพ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำยาสร้างฟองอากาศ.....	15
ภาพ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นแห้ง .....	16
ภาพ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแห้งกับอายุของคอนกรีต .....	22
ภาพ 8 ภาพขยายการแตกร้าวผ่านโครงสร้าง C-S-H และ .....	23
ภาพ 9 การเกิด Drying Shrinkage Crack ของคอนกรีตโครงสร้างพื้น.....	24
ภาพ 10 การระเหยของน้ำในช่องว่าง Capillary.....	25
ภาพ 11 แรงดึง Capillary ทำให้คอนกรีตหดตัว .....	25
ภาพ 12 กลไกการเกิดการแตกร้าวจากการยึดรั้งภายใน (เหล็กเสริม).....	26
ภาพ 13 การเกิดการแตกร้าวจากการยึดรั้งภายในของโครงสร้างคอนกรีตคานลึก.....	26
ภาพ 14 กลไกการเกิดการแตกร้าวจากการยึดรั้งภายนอก .....	27
ภาพ 15 การแตกร้าวของคอนกรีตจากการยึดรั้งภายนอก.....	27
ภาพ 16 การหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ .....	28
ภาพ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของมวลรวมกับการหดตัว .....	30
ภาพ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและการหดตัวแบบแห้ง.....	31
ภาพ 19 การเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างที่การบ่มแตกต่างกัน.....	32
ภาพ 20 แผนภาพแสดงขั้นตอนการย่อยหินและผสมหิน.....	37
ภาพ 21 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคทรายและหินฝุ่นจากการทดสอบด้วยกล้อง .....	38

ภาพ 22 ขนาดคละของทรายบก (Pit Sand) กับหินฝุ่น (Quarry waste fine aggregate).....	40
ภาพ 23 ขนาดของอนุภาคของฝุ่นหินปูน (Limestone powder) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) และฝุ่นหินแกรนิต (Granite fines).....	41
ภาพ 24 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค (a) ฝุ่นหินแกรนิต (b) ฝุ่นหินปูน .....	42
ภาพ 25 อิทธิพลของปริมาณส่วนละเอียด (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด 75 $\mu\text{m}$ ) ที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตกำลังอัดต่ำ (a) และคอนกรีตกำลังอัดสูง (b) .....	46
ภาพ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความลึกจากการซึมผ่านของน้ำ.....	48
ภาพ 27 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมทรายปกติ (Natural Sand concrete, NSC) กับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่น (Quarry Rock Dust concrete, QRDC) .....	49
ภาพ 28 อิทธิพลของปริมาณส่วนละเอียด (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด 75 $\mu\text{m}$ ) .....	50
ภาพ 29 การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตจากการนำตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่น (Quarry Rock Dust concrete, QRDC) กับคอนกรีตที่ใช้ทราย .....	51
ภาพ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมด.....	52
ภาพ 31 หินฝุ่น .....	57
ภาพ 32 ทรายละเอียด .....	57
ภาพ 33 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 .....	58
ภาพ 34 ชุดเครื่องทำโฟมและอัดอากาศ.....	59
ภาพ 35 น้ำยาสร้างโฟม (Foaming agent) .....	59
ภาพ 36 ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดและการดูดซึมน้ำ .....	60
ภาพ 37 โมผสมคอนกรีต .....	60
ภาพ 38 เครื่องชั่งดิจิตอล มีความละเอียด 0.001 กิโลกรัม .....	61
ภาพ 39 ตู้อบปรับอุณหภูมิ.....	61
ภาพ 40 ชุดทดสอบค่าการนำความร้อน .....	62
ภาพ 41 แบบหล่อตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตร และแบบหล่อตัวอย่างการทดสอบนำความร้อนทรงกระบอกขนาด $\varnothing 10 \times 20$ เซนติเมตร .....	62

ภาพ 42 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	63
ภาพ 43 ฟิล์มพลาสติกหุ้ม .....	63
ภาพ 44 เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ .....	64
ภาพ 45 เครื่องมือทดสอบหาค่าการยืดหดตัวของคอนกรีต (Length Comparators) .....	64
ภาพ 46 แบบหล่อตัวอย่างการทดสอบหัดตัวขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร .....	65
ภาพ 47 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Drying Shrinkage Testing Chamber) .....	65
ภาพ 48 น้ำยาโฟม (Forming agent) กับน้ำ .....	66
ภาพ 49 ผสมน้ำยาโฟม (Forming agent) กับน้ำ .....	67
ภาพ 50 เทน้ำยาโฟมที่เตรียมไว้ลงในเครื่องกำเนิดฟองอากาศเพื่อทำให้เกิดโฟม .....	67
ภาพ 51 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	74
ภาพ 52 การทดสอบค่าการนำความร้อน .....	76
ภาพ 53 ตัวอย่างการวัดการหดตัวแบบแห้ง (1) .....	77
ภาพ 54 ตัวอย่างการวัดการหดตัวแบบแห้ง (2) .....	77
ภาพ 55 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Percent passing ของหินฝุ่น .....	80
ภาพ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับร้อยละหินฝุ่นแทนที่ทรายละเอียด .....	82
ภาพ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับร้อยละหินฝุ่นแทนที่ทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกลมมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศ .....	84
ภาพ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับร้อยละหินฝุ่นแทนที่ทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกลมมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศ .....	86
ภาพ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับร้อยละหินฝุ่นแทนที่ทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกลมมวลเบาแบบเต็มฟองอากาศ .....	88
ภาพ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมคอนกรีตเซลลูโลสตามชนิด โดยแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นตามอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน กับร้อยละการหดตัวแบบแห้ง .....	90
ภาพ 61 เตรียมแบบหล่อคอนกรีต .....	107
ภาพ 62 เตรียมน้ำยาสร้างโฟมผสมในเครื่องกำเนิดโฟม .....	107

ภาพ 63 ผสมส่วนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องมือ.....	108
ภาพ 64 บ่มคอนกรีตด้วยใช้พลาสติกหุ้ม เมื่อครบตามอายุที่กำหนดแล้ว.....	108
ภาพ 65 ทดสอบกำลังอัด.....	109
ภาพ 66 นำไปแช่น้ำเพื่อทดสอบหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำ .....	109
ภาพ 67 เจาะคอนกรีตเพื่อนำไปทดสอบการนำความร้อน.....	110
ภาพ 68 เคลือบเซมด้วย Thermal compound และใส่เซมลงในตัวอย่างทดสอบ.....	110
ภาพ 69 บันทึกผลการทดสอบ .....	111
ภาพ 70 เทคอนกรีตมวลเบาลงตัวอย่างการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง .....	112
ภาพ 71 ตั้งค่าอุณหภูมิและความชื้นตามมาตรฐาน ASTM C157.....	112
ภาพ 72 เก็บตัวอย่างใส่ตู้บ่มเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้น.....	113
ภาพ 73 การบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น .....	113
ภาพ 74 ตัวอย่างการวัดการหดตัวแบบแห้ง .....	114



## บทที่ 1

### บทนำ

#### ที่มาและความสำคัญของการศึกษา

คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเซลลูลาร์ (Cellular lightweight concrete) หรือ คอนกรีตโฟม (Foam concrete) เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการก่อสร้างในปัจจุบัน โดยมีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตหรือวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่นำมาใช้ในการก่อสร้างทั่วไป เช่น อิฐมวลเบา คอนกรีตบล็อก ระบบการผลิตคอนกรีตมวลเบาเป็นการผลิตที่ทำให้เกิดฟองอากาศภายในเนื้อคอนกรีตให้มีขนาดเหมาะสม เสถียรภาพสูงโดยการเติมสารก่อฟองอากาศ หรือโฟมอากาศ (Foaming agent) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบิวของอนุภาคที่มักจะรวมตัวกันอยู่ระหว่างผิวหน้าและอากาศ ทำให้แรงตึงผิวลดลง ก่อให้เกิดฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.25 – 1 มม. กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยมีวิธีการผลิต คือ ผสมน้ำยาลงในถังอัดอากาศในอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วฉีดโฟมออกมาผสมกับปูนซีเมนต์ น้ำและทราย โดยไม่มีส่วนผสมของมวลรวมหยาบ ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต เมื่อคอนกรีตแห้งตัวแล้ว จะพบว่า มีฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อคอนกรีต จึงทำให้น้ำหนักเบา ช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างลง โดยคุณภาพที่ดีจะขึ้นอยู่กับวัสดุ สัดส่วนในการผสม ชนิดของสารก่อฟองอากาศ และเทคนิคในการผสม (Chi J.M, Huang R, Yang C.C, and Chang J.J, 2003) อีกทั้งคอนกรีตมวลเบา ยังมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนและดูดซับเสียงได้ดี เนื่องจากเนื้อคอนกรีตมวลเบา มีโพรงอากาศขนาดเล็กจำนวนมากกระจายอย่างสม่ำเสมอ จึงทำให้มีการดูดซับความร้อนได้ไม่ดี หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกมวลเบานั้นมีค่าได้ตั้งแต่ 400 ไปจนถึง 1,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีกำลังอัดอยู่ประมาณ 10 – 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามประเภทการใช้งาน (กฤษณ์ กิ่งโก้, 2552) คอนกรีตมวลเบานิยมนำไปใช้ในการก่อสร้างตั้งแต่ทำเป็นฉนวนกันความร้อน ตลอดจนถึงเป็นชั้นส่วนโครงสร้าง เช่น พื้น เสา คาน ผนัง และฐานราก โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดน้ำหนักของอาคาร ทำให้ประหยัดต้นทุนโดยรวม และมีความคงทนอยู่ในระดับที่ดี

อย่างไรก็ตามในท้องตลาดของวัสดุก่อทั่วไป เช่น อิฐบล็อกหรือคอนกรีตบล็อก ที่นิยมนำมาใช้ในการก่อสร้าง เป็นวัสดุที่มีราคาสูง เหมาะกับงานที่ต้องควบคุมค่าใช้จ่าย แต่ข้อเสียคือ มีหน่วยน้ำหนักที่มาก โดยประมาณ 1,500 – 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีผลทำให้

น้ำหนักของอาคารเพิ่มมากขึ้น และวัสดุก่ออีกแบบ คือ คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ที่มีหน่วยน้ำหนักประมาณ 600 - 1,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยส่วนใหญ่ นิยมนำมาใช้ในการก่อสร้างผนัง ในอาคารหรือบ้านที่ต้องการความเย็นสบาย และเก็บเสียงได้ดี แต่ข้อเสีย คือ มีราคาที่สูงกว่าอิฐบล็อกหรือคอนกรีตบล็อกชนิดอื่น ๆ คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ที่มีหน่วยน้ำหนักและมีราคาอยู่ระหว่างอิฐบล็อกหรือคอนกรีตบล็อกกับคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยเรียกว่า คอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลาง จึงเกิดขึ้น เพื่อเป็นตัวเลือกในการใช้งานต่อไป

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตวัสดุก่อสร้างมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น เพื่อให้วัสดุก่อสร้างมีราคาถูกลง จึงทำให้มีนักวิจัยจำนวนมากพยายามนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ หิน และทราย เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต ต้นทุนการก่อสร้าง และยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการที่นำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่า หินฝุ่น ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งของผลผลิตพลอยได้จากอุตสาหกรรมการไม่หินนั้น สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนได้เช่นกัน แต่จะใช้ทดแทนมวลรวมละเอียดหรือทราย เพราะเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert material) ที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยาจากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมในการใช้งานหินฝุ่น พบว่า หินฝุ่นมีขนาดใกล้เคียงกับทราย แต่มีความแข็งแรงเทียบเท่ากับหิน ซึ่งมีขนาดรูปร่างเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (Khamput, 2006) และหินฝุ่นเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้ประโยชน์น้อย โดยส่วนใหญ่หินฝุ่นจะถูกนำไปเป็นส่วนผสมของหินคลุกสำหรับรองพื้นทางในงานถนนลาดยางหรือเป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตบล็อก แต่ปริมาณการนำหินฝุ่นไปใช้งานก็ยังน้อยกว่าปริมาณหินฝุ่นที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการไม่หิน ผลจากการใช้ประโยชน์ได้น้อยนั้นทำให้ต้นทุนของหินฝุ่นมีราคาค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับต้นทุนของทราย หากนำหินฝุ่นมาใช้ทดแทนทรายซึ่งเป็นมวลรวมละเอียดได้ ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับหินฝุ่นอีกด้วย

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ในการศึกษาวิจัยคุณสมบัติในการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเติมฟองอากาศโดยใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายละเอียด เพราะหินฝุ่นมีราคาถูกกว่าทราย ทำให้ใช้ทรายซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติน้อยลง มีส่วนช่วยลดต้นทุนในการผลิตและเพิ่มมูลค่าให้กับหินฝุ่น ซึ่งหินฝุ่นจะทำให้บล็อกแข็งขึ้น หนักขึ้น แต่จะไม่หนักเท่าคอนกรีตบล็อกทั่วไป และผู้วิจัยมีความประสงค์ที่จะทำคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลาง

แบบเติมฟองอากาศที่ผลิตได้มี ขนาด กำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิดไม่รับน้ำหนัก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556) เพื่อใช้ในการประกอบการพิจารณาเป็นอีกทางเลือกในการใช้วัสดุทดแทนในการผลิตวัสดุก่อสร้าง นำทรัพยากรหินฝุ่นซึ่งถือเป็นวัสดุเหลือใช้มาสร้างให้เกิดคุณค่า ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และสร้างนวัตกรรมให้แก่คอนกรีตบล็อกมวลเบาต่อไป

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ของหินฝุ่นในทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเติมฟองอากาศ
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติในด้านของกำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเติมฟองอากาศที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายเป็นมวลรวมละเอียด
3. เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเติมฟองอากาศที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายเป็นมวลรวมละเอียด เทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิดไม่รับน้ำหนัก (มอก. 2601 – 2556)
4. เพื่อศึกษาการหดตัวแบบแห้งของของคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเติมฟองอากาศที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายเป็นมวลรวมละเอียด

### ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเติมฟองอากาศที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดตามลำดับ มีการใช้อัตราส่วนต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.6 ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน และ 28 วัน โดยออกแบบที่ความหนาแน่นในช่วง 801-900, 901-1000 และ 1,100 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ
2. ศึกษาคุณสมบัติในด้านของกำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเติมฟองอากาศที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายเป็นมวลรวมละเอียด

3. ศึกษาการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตบล็อกลมมวลเบาปานกลางแบบเต็ม  
พองอากาศที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายเป็นมวลรวมละเอียด

#### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการผลิตคอนกรีตบล็อกลมมวลเบาแบบเต็มพองอากาศที่ใช้หินปูนแทนที่  
ทรายเป็นมวลรวมละเอียด

2. ทราบถึงผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกลมมวลเบาปานกลางแบบเต็ม  
พองอากาศที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายเป็นมวลรวมละเอียด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงาน  
ก่อสร้างได้ในอนาคต

3. คอนกรีตบล็อกลมมวลเบาปานกลางแบบเต็มพองอากาศที่ผลิตได้ มีกำลังอัด และ  
อัตราการดูดซึมน้ำผ่านตามมาตรฐาน เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม  
ชั้นส่วนคอนกรีตบล็อกลมมวลเบาแบบเต็มพองอากาศชนิดไม่รับน้ำหนักแล้ว

4. เป็นแนวทางในการนำใช้หินปูนซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นภาระในการกำจัดทิ้งมาใช้ให้เกิด  
ประโยชน์ แทนการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติ และยังช่วยลดปัญหามลพิษด้าน  
สิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

5. หินปูนจะสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้ เนื่องจากมีราคาต้นทุนที่ถูกกว่า  
ทรายละเอียด

6. เป็นทางเลือกใหม่ ๆ ให้แก่ผู้ที่สนใจในการผลิตบล็อกลมมวลเบาปานกลางแบบเต็ม  
พองอากาศที่มีหน่วยน้ำหนักและราคาที่อยู่ระหว่างอิฐบล็อกทั่วไปที่มีราคาต่ำแต่มีหน่วย  
น้ำหนักมาก กับคอนกรีตบล็อกลมมวลเบาแบบเต็มพองอากาศที่มีหน่วยน้ำหนักเบา แต่มีราคาสูง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยนวัตกรรมคอนกรีตมวลเบาปานกลางฉบับนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งหัวข้อในการศึกษา โดยมีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. คอนกรีตมวลเบา
2. คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศหรือระบบเซลล์ลูล่า (Cellular lightweight concrete, CLC)
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของคอนกรีตมวลเบา
4. หินฟูน
5. คุณสมบัติของหินฟูนและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ใช้หินฟูนเป็นส่วนผสม

#### คอนกรีตมวลเบา

ปัจจุบันคอนกรีตมวลเบา เป็นวัสดุที่นิยมสำหรับการก่อสร้าง และรู้จักกันอย่างแพร่หลาย เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักที่เบา ทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักลดลง เป็นฉนวนกันไฟ ต้านทานความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป ทั้งประหยัดเวลาในการก่อสร้างอีกด้วย จึงทำให้ได้รับการยอมรับและได้รับความนิยมในงานก่อสร้างอย่างมาก

คอนกรีตมวลเบา (Lightweight concrete) คือ คอนกรีตที่มีค่าหน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นประมาณ 400–1,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีกำลังอัดประมาณ 10 ถึง 450 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (กฤษณ์ กิ่งโก้, 2552) คอนกรีตมวลเบาเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไปจะมีหน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นน้อยกว่า ซึ่งคอนกรีตทั่วไปมีหน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นประมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (สำเร็จ รักซ้อน, 2555) สามารถแบ่งคอนกรีตมวลเบาได้ตามชนิดของวัสดุที่ใช้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete) คอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียด (Non – fines concrete) และคอนกรีตเติมฟองอากาศหรือโฟมคอนกรีต (Form or aerated concrete) อย่างไรก็ตาม

ยังมีการจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามประเภทการใช้งานออกเป็น 3 ประเภท คือ คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structural lightweight concrete) คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อ (Masonry concrete) และคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉนวนกันความร้อน (Insulating concrete) ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 การจำแนกคอนกรีตมวลเบาตามประเภทการใช้งาน

ประเภท	กำลังอัดทรง ลูกบาศก์ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)	หน่วยน้ำหนักแห้ง (กก./ลบ.ม.)
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structural lightweight concrete) ASTM C330	> 170	< 1,850 หรือ 1,440–1,800
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อ (Masonry concrete) ASTM C331	34–170	800–1,440
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉนวนกันความร้อน (Insulating concrete) ASTM C332	7–34	240–800

ที่มา : ชัชวาล เศรษฐบุตร์, 2536

1. คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight aggregate concrete) เป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีการผสมด้วยมวลรวมเบาขนาดเล็กและใหญ่ มวลรวมเบาที่มีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 600–1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเทียบกับมวลรวมปกติที่มีหน่วยน้ำหนักประมาณ 1,100–1,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งคุณสมบัติของมวลรวมแต่ละชนิดดังแสดงในตาราง 2 และคอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบาสามารถจำแนกออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ, มวลรวมเบาที่ได้จากขบวนการผลิต, มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ และมวลรวมที่ได้จากของเสียจากการผลิต (ชัชวาล เศรษฐบุตร์, 2536)

ตาราง 2 ประเภทและคุณสมบัติของมวลรวมเบา

วัสดุ	หน่วยน้ำหนัก		หน่วยน้ำหนัก		การดูด ซีเมนต์
	มวลรวมเบา (กก./ลบ.ม.)	แหล่งกำเนิด	คอนกรีต (กก./ลบ.ม.)	กำลังอัดทรง ลูกบาศก์ (กก./ตร.ซม.)	
Expanded clay, Expanded slate	50–1,050	ทำจากวัสดุธรรมชาติ	1,100–1,850	180–450	5–25
Foamed slag	650–900	สังเคราะห์	1,100–1,850	180–450	5–25
Sintered PFA	600–1,000	สังเคราะห์	1,350–1,900	180–450	14–24
Vermiculite	65–200	ทำจากวัสดุธรรมชาติ	400–950	8–35	20–35
Perlite	65–200	ทำจากวัสดุธรรมชาติ	550–800	7–42	10–15
Pumice	–	ธรรมชาติ	800–130	50–60	สูงมาก
Crushed Stone	1,450–1,750	ธรรมชาติ	2,250–2,400	240–550	0.5–2.0

ที่มา : ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536

1) มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ หินแร่ธรรมชาติ เช่น Vermiculite, Perlite, Pumice, Volcanic, Cinders และ Scoria หลังภูเขาไฟระเบิด จะเกิดลาวาภูเขาไฟที่พองตัวตามธรรมชาติ ทำให้เกิดหินแร่ธรรมชาตินี้ขึ้น เนื่องจากมวลรวมชนิดนี้มีอยู่อย่างจำกัด จึงไม่ค่อยนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรม และยังให้กำลังอัดที่ไม่สูงมากนัก อีกทั้งยังมีการดูดซีเมนต์มากอีกด้วย ตัวอย่างมวลรวมเบานี้ดังแสดงในภาพ 1



ภาพ 1 ตัวอย่าง Vermiculite

ที่มา : <https://spanish.alibaba.com/product-detail/expanded-vermiculite-powder-used-for-glass-fiber-vermiculite-cloth-50040926027.html>

2) มวลรวมเบาจากขบวนการผลิต เป็นมวลรวมเบาที่ใช้ในอุตสาหกรรมมากที่สุด เช่น การเผาดินบางประเภท ถ้ำหนักที่ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ Expanded clay aggregate, Expanded shale aggregate และ Sintered fly ash (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536)

#### 2.1) Expanded clay aggregate

ได้มาจากการผลิตโดยนำดินซึ่งขุดจากแหล่งที่มีองค์ประกอบทางเคมีพิเศษ และนำไปผสมกับสารที่ทำให้เกิดฟองเป็นเม็ดเล็กๆ มวลรวมนี้มักนำไปผสมเป็นฉนวนกันความร้อน และเหมาะสำหรับงานก่อสร้างที่มีความหนาแน่นประมาณ 1,300 - 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ลักษณะของมวลเบาชนิดนี้จะมีผิวเรียบและปิด ภายในคล้ายรูผึ้งไม้เชื่อมต่อกันใน ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 ตัวอย่าง Expanded clay aggregate

ที่มา : [https://en.wikipedia.org/wiki/Expanded\\_clay\\_aggregate](https://en.wikipedia.org/wiki/Expanded_clay_aggregate)

## 2.2) Expanded shale aggregate

มวลรวมเบาชนิดนี้ได้มาจากการนำดินดาน (Shale) มาผสมกับถ่านบดละเอียด จากนั้นเคลือบผิวด้วย Limestone ขนาดที่เตรียมขึ้นอยู่กับการใช้งาน และไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ในเตาเผา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะผิวเรียบ มีฟองอากาศภายใน หลังจากนั้นจะนำไปย่อยให้ได้ขนาดที่ต้องการ มวลรวมเบาชนิดนี้มีความแข็งแรงค่อนข้างสูง จึงเป็นที่นิยมใช้ผลิตคอนกรีตมวลเบา ดังแสดงในภาพ 3



ภาพ 3 ตัวอย่าง Expanded shale aggregate

ที่มา : <https://www.bigelowbrook.com/expanded-shale>

### 2.3) Sintered fly ash

มวลรวมเบาชนิดนี้เป็นการนำ Pulverized fly ash (PFA) ที่ได้มาจากการเผาไหม้ถ่านหินสมบูรณ์ และ PFA ที่เหมาะสมควรได้ค่าของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือ Loss of ignition (LOI) น้อยกว่าร้อยละ 8 ซึ่งเป็นส่วนคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้เหลืออยู่ในรูปของถ่านหินที่หมดควัน จะถูกทำให้เป็นเม็ดก่อนเผา จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นทรงกลม มีความแข็งแรงอย่างมาก ดังแสดงในภาพ 4



ภาพ 4 ตัวอย่าง Sintered fly ash

ที่มา : <http://www.brickwell.co.in/sintered-fly-ash-lightweight-aggregates-plants.htm>

3) มวลรวมเบาที่ได้จากสารอินทรีย์ เช่น ไม้ พลาสติกบางชนิด และเถาต่าง ๆ

4) มวลรวมเบาที่ได้จากของเสียจากการผลิต เช่น เถ้าหนัก (Furnace bottom ash)

จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิง

โดยคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมเบา คือ มีหน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นประมาณ 300 - 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังอัดตรงลูกบาศก์ประมาณ 4 - 480 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้ปริมาณซีเมนต์เท่ากับคอนกรีตปกติ หรือน้อยกว่าร้อยละ 70 มีความสามารถเทได้เท่ากับคอนกรีตปกติ แต่จะมีค่ายุบตัวน้อยกว่า เหมาะสำหรับนำไปทำเป็นฉนวนกันความร้อน เพราะมีการนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ สามารถทนไฟได้ดี การคืบเหมือนกับคอนกรีตทั่วไป แต่มีการดูดซึมน้ำสูง ค่า Modulus of Elasticity

ต่ำ กำลังและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตต่ำ และยังมี Tensile strain มากกว่าคอนกรีตปกติอีกด้วย

นอกจากนี้ยังมีข้อควรระวังในการใช้งาน คือ การเกิดการแยกตัว ถ้าส่วนผสมมีค่ายุบตัวมาก หรือจืดเยี้ยมากเกินไป โดยมวลรวมเบาจะลอยตัวสู่บริเวณผิว และการตกแต่งผิวทำได้ยาก เพราะมวลรวมเบามีการดูดซึมน้ำมาก ผู้ออกแบบส่วนผสมจึงควรนำปัจจัยนี้มาพิจารณาในการเลือกให้เหมาะสม ในการผสมที่ไม่ถูกวิธีหรือใช้เวลานานเกินไปอาจทำให้มวลรวมเบาแตกได้ และยังมีความทนทานต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Carbonation สูงเป็น 2 เท่าของคอนกรีตปกติ ผู้ออกแบบในงานคอนกรีตเสริมเหล็กจึงต้องระมัดระวังเรื่องการกัดกร่อนเหล็กเสริม

2. คอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียด (Non – fines concrete) เป็นคอนกรีตที่นำมวลรวมหยาบโดยที่ไม่มีส่วนผสมจากมวลรวมละเอียดมาใช้เป็นส่วนผสม ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงอากาศระหว่างมวลรวมหยาบ ส่งผลให้คอนกรีตประเภทนี้มีกำลังอัดค่อนข้างต่ำ โดยประมาณ 10 – 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หน่วยน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับขนาดคละของมวลรวมที่นำมาใช้ หินที่มีขนาดเดียวจะส่งผลให้มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าหินที่มีส่วนคละประมาณร้อยละ 10 โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่ได้จะมีหน่วยน้ำหนักประมาณ 1,600 – 1,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่ถ้าใช้มวลรวมเบาแทนก็สามารถทำให้หน่วยน้ำหนักลดลงได้เหลือประมาณ 640 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนใหญ่วัสดุมวลรวมหยาบที่นำมาใช้จะเป็นกรวดไม่ ซีเมนต์เชื้อเพลิงดินเผาพองตัว และตะกรันเผา เป็นต้น

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการให้มวลรวมเกาะกัน โดยควรอยู่ระหว่าง 0.38 – 0.52 คอนกรีตประเภทนี้มีการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป แต่การที่มีการดูดซึมน้ำสูงจึงทำให้ไม่เหมาะสำหรับทำพื้น

3. คอนกรีตเติมฟองอากาศ (Form and aerated concrete) หรือโฟมคอนกรีต เป็นระบบการผลิตคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาด้วยการผสมฟองอากาศหรือโฟมลงในเนื้อคอนกรีตทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.1 – 1 มิลลิเมตร

1) ระบบการผลิตคอนกรีตมวลเบาชนิดโฟมคอนกรีต จำแนกได้ 2 ระบบ คือ คอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลูล่า (Cellular lightweight concrete, CLC) และคอนกรีตมวลเบาแบบบ่มด้วยไอน้ำ (Autoclaved aerated concrete, AAC)

1.1) คอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลูล่า (Cellular lightweight concrete, CLC)

เป็นการผลิตโดยใช้ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ทราย น้ำ และสารทำให้เกิดฟองอากาศแบบไม่ต่อเนื่อง (Foaming agent) ส่งผลให้มีน้ำหนักเบา กันเสียงและความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ เป็นวิธีที่ง่ายทำได้โดยทั่วไป มีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก

และก่อตัวแข็งได้โดยไม่ต้องบ่มไอน้ำ จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าระบบบ่มด้วยไอน้ำ ส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุก่อ เช่น ผนังที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมากนัก

#### 1.2) คอนกรีตมวลเบาระบบบ่มด้วยไอน้ำ (Autoclaved aerated concrete, AAC)

เป็นการผลิตที่มีต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากต้องบ่มด้วยไอน้ำความดันสูง มีส่วนผสมสำคัญ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาว ททราย น้ำ ผงยิปซัม และสารผสมเพิ่มในการทำปฏิกิริยายากับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดฟองก๊าซที่มีขนาดเล็กต่อเนื่องกัน มีการดูดซึมน้ำได้ดีเมื่ออบด้วยระบบอบไอน้ำ คอนกรีตประเภทนี้จะแตกต่างกับคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC ในด้านความต่อเนื่องของฟองอากาศ ซึ่งคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC มีฟองอากาศที่ไม่ต่อเนื่องกันจึงทำให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบ AAC โดยคอนกรีตมวลเบาแบบ AAC นี้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุก่อที่ไม่ต้องรับกำลังมากนักได้เช่นเดียวกัน

#### คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศหรือระบบเซลลูล่า (Cellular lightweight concrete, CLC)

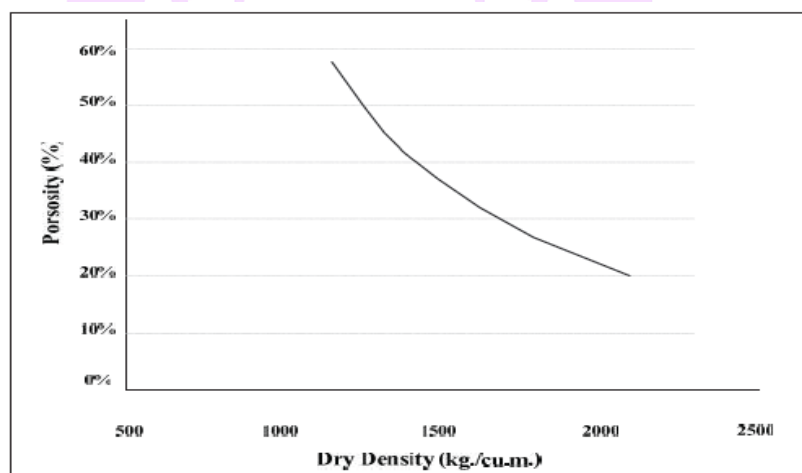
คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าหรือ CLC เป็นระบบการผลิตที่ไม่ซับซ้อน โดยการทำให้ฟองอากาศด้วยน้ำยาโฟมและน้ำในถังผลิต ผสมด้วยความดันสูงตามกำหนด จากนั้นฉีดโฟมที่ได้ผสมกับปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และทราย ทำให้เกิดฟองอากาศแบบไม่ต่อเนื่องในเนื้อคอนกรีต ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติเด่น ๆ ดังต่อไปนี้ (ปิติ สุคนธ์สุขกุล, 2555)

##### 1. หน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่น

โดยทั่วไปคอนกรีตมวลเบาจะมีหน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นประมาณ 600 – 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ปริมาณน้ำยา วัสดุผสมเพิ่ม ปริมาณและลักษณะของฟองอากาศ เป็นต้น โดยทั่วไปในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง ปริมาณน้ำที่มีจะมีปริมาณมากเกินกว่าที่จะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ให้หมดไป ซึ่งจะมีน้ำส่วนหนึ่งที่เหลืออยู่ในเนื้อคอนกรีตหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว เมื่อน้ำเหล่านี้ระเหยออกไปจะทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อคอนกรีต อย่างไรก็ตามในกรณีของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC ก็เกิดผลกระทบเช่นเดียวกัน โดยนอกเหนือจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นในช่วงของกระบวนการผลิตที่ผู้ผลิตตั้งใจให้เกิดขึ้นแล้ว ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงก็จะทำให้มีปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่เพิ่มเติมเข้าไป ซึ่งมาจากปริมาณน้ำที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนั่นเอง นอกจากนี้ประสิทธิภาพการเกิดฟองอากาศของน้ำยาส่วนมากจะแปรผันกับปริมาณน้ำที่ผสม

เข้าไปเช่นกัน โดยพบว่าในอัตราส่วนปริมาณน้ำยาที่เท่ากัน คอนกรีตมวลเบาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงจะมีปริมาตรฟองมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ

ดังนั้น การเลือกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความหนาแน่นที่ต้องการจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการผลิตคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนปริมาณน้ำยาสร้างฟองอากาศที่นิยมใช้กัน คือ ตั้งแต่ร้อยละ 0.20 แต่ไม่เกินร้อยละ 0.60 โดยน้ำหนักซีเมนต์ (ควรอ้างอิงข้อกำหนดของผู้ผลิตแต่ละรายไป) ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำยาสร้างฟองอากาศกับความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่มีลักษณะที่ผกผันกัน ดังภาพ 5 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นแห้งลดลงตามปริมาณน้ำยาที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลการวิจัยเพิ่มเติมพบว่า ในปริมาณน้ำยาที่มากกว่าร้อยละ 1 มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้หน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นเริ่มคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงหรือลดลงน้อยมาก และนอกจากนี้ในปริมาณฟองอากาศที่มากเกินไปนั้น จะทำให้เสี่ยงต่อการแยกตัวของมวลรวมละเอียดได้

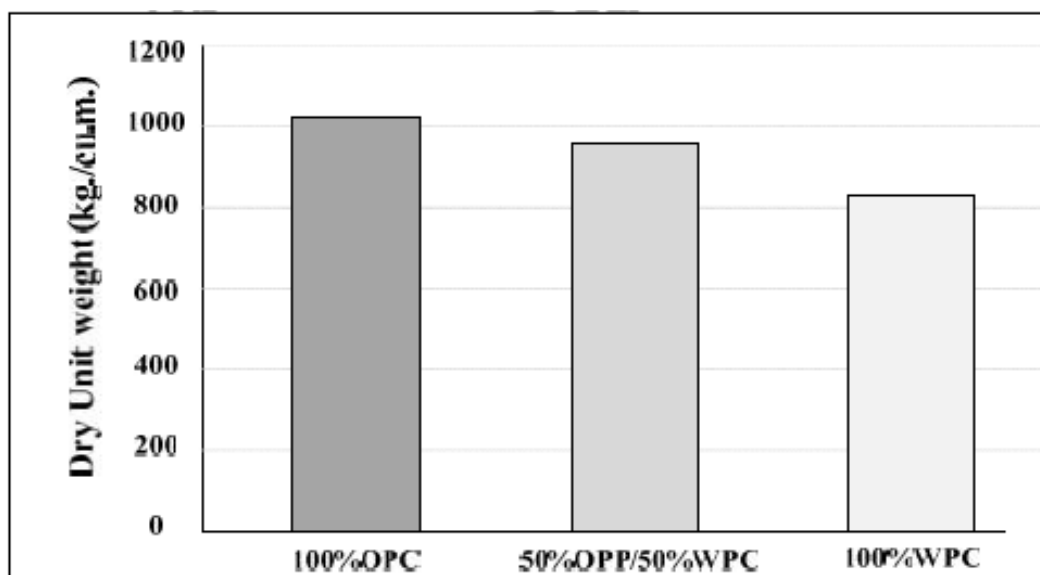


ภาพ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำยาสร้างฟองอากาศ  
กับความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบา

ที่มา : ปิติ สุคนธ์สุขกุล, 2555

ชนิดของปูนซีเมนต์ก็ส่งผลต่อหน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบา ระบบ CLC เช่นกัน ดังแสดงในภาพ 6 ในความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นแห้งกับประเภทของปูนซีเมนต์ที่ใช้ โดยเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตมวลเบาที่ผสม

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว (ปริมาณน้ำยาร้อยละ 0.6) จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นแห้งลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปกติด้วยปูนซีเมนต์ขาวเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากปริมาณออกไซด์เหล็กที่ต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ขาวเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปกติ



ภาพ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่นแห้ง กับประเภทของปูนซีเมนต์ที่ใช้ของคอนกรีตมวลเบา

ที่มา : ปิติ สุคนธ์สุขกุล, 2555

## 2. กำลังต้านทานแรงอัด

มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดนั้น ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ปริมาณและลักษณะของฟองอากาศ ความหนาแน่น วิธีทำฟองอากาศ ความชื้น และวิธีการ บ่ม เป็นต้น โดยคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ที่มีสัดส่วนปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่มาก จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าสัดส่วนที่มีปริมาณฟองอากาศขนาดเล็ก ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงอัดลดลง และความหนาแน่นแห้งจะแปรผกผันกับปริมาณฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต เมื่อมีปริมาณฟองอากาศมากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงตามไปด้วย สำหรับคอนกรีตมวลเบาระบบ CLC ในส่วนที่ไม่ได้รับน้ำหนักมากนัก จะมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดประมาณ 10 – 140 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสำหรับในส่วนโครงสร้าง จะมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดประมาณ

100 – 400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเบาระบบ CLC อาจทำให้สูงขึ้นได้ โดยการเลือกใช้วัสดุแทนมวลรวม

### 3. การดูดซึมน้ำ

การเคลื่อนที่ของน้ำในคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC สามารถเกิดขึ้นได้ 2 ทาง คือ การแพร่กระจาย และการดูดซับผ่านช่องว่างแคปิลารี โดยการแพร่กระจายจะเกิดขึ้นในสภาวะที่อากาศมีความชื้นสูงผ่านทางช่องว่างที่อยู่บนพื้นผิวด้านนอก การดูดซับจะเกิดขึ้นในกรณีคอนกรีตมีการสัมผัสกับน้ำ สำหรับค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นที่ลดลง เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาที่มีรูพรุนมาก จึงทำให้อัตราการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตธรรมดาและเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นที่ลดลง แต่สามารถใส่สารปรุงแต่งเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติได้

### 4. การหดตัวแห้ง

การหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC มีสาเหตุมาจากการสูญเสียน้ำในเนื้อคอนกรีต ส่วนใหญ่คอนกรีตมวลเบาแบบ CLC จะมีค่าการหดตัวแห้งที่สูงกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากมีรูพรุนและความชื้นภายในคอนกรีตสูง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลกระทบต่อค่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC เช่น ในกรณีลัดส่วนปูนขาวต่อปูนซีเมนต์นั้น เมื่อคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC มีการผสมปูนขาวร่วมด้วยจะมีค่าการหดตัวแห้งที่ต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ได้ผสมปูนขาว เป็นผลมาจากปูนขาวบางส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทำหน้าที่ยึดมวลรวมละเอียดที่ก่อให้เกิดการยึดรั้งภายใน ทำให้ลดการหดตัวได้ในระดับหนึ่ง และในกรณีของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC ที่มีฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากจะมีการหดตัวแห้งที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีฟองอากาศขนาดใหญ่จำนวนมาก กรณีของลักษณะการบ่มก็มีผลต่อการหดตัวแห้งเช่นกัน โดยคอนกรีตมวลเบาที่บ่มด้วยอุณหภูมิและความดันสูง จะมีค่าการหดตัวแห้งที่ต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาที่บ่มอากาศในอุณหภูมิปกติ สาเหตุของการลดลงส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการฟอर्मตัวของผลึกจำพวกโทเบอเมอไรท์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการบ่มด้วยความร้อนและความดัน การบ่มดังกล่าวจะทำให้ซีเมนต์เจล แผลงสภาพไปเป็นผลึก ซึ่งการเพิ่มของผลึกดังกล่าวนอกจากจะทำให้ค่าหดตัวลดลงถึงร้อยละ 25 – 35 นอกจากนี้ยังทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย และในคอนกรีตมวลเบาจะมีการหดตัวอยู่ที่ประมาณ 5 – 40% ซึ่งมากกว่าคอนกรีตธรรมดา จึงมีการนำเอาวัสดุจำพวกวัสดุพอลิไซลอลาน ที่ได้จากการเผาตะกั่ว มาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตคอนกรีตมวลเบาเพื่อลดการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา

#### 5. การนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณฟองอากาศภายในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีปริมาตรของรูพรุนที่สูงกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง ทำให้สามารถส่งผ่านความร้อนได้ช้ากว่า เนื่องจากความร้อนเคลื่อนที่ได้ดีกว่าในวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง จึงให้มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงเหมาะแก่การเป็นฉนวนกันความร้อน นอกจากนี้ความชื้นก็เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเช่นกัน โดยพบว่าทุก ๆ 1% ของความชื้นที่เพิ่มทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำอุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 42

#### 6. การต้านทานซัลเฟต

คอนกรีตมวลเบาไม่นิยมนำมาใช้ในงานในสภาพที่มีสารจำพวกซัลเฟตเจือปนอยู่ เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาที่มีโพรงอากาศอยู่ภายในเนื้อคอนกรีตจำนวนมาก จึงไม่สามารถทนการกัดกร่อนจากสารเคมี ความเค้นทางกายภาพ และผลกระทบที่เกิดภายนอกได้ ดังนั้นในการนำไปใช้งานควรมีการฉาบผิวเพื่อป้องกันการสึกกร่อน

#### 7. ค่าการยุบตัว

ในปริมาณความสามารถเท่าที่เท่ากัน คอนกรีตมวลเบาจะมีค่ายุบตัวน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา

#### 8. การทนไฟ

คอนกรีตมวลเบาสามารถทนไฟได้นานถึง 4 ชั่วโมง มีความต้านทานเพลิงไหม้ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา

#### 9. สัมประสิทธิ์การขยายตัว

คอนกรีตมวลเบาที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา ซึ่งมีการขยายตัวประมาณ  $7 \times 10^6$  ถึง  $14 \times 10^6$  ต่อองศาเซลเซียสเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC กับคอนกรีตธรรมดา ในกรณีที่ทำเป็นอิฐมวลเบา

#### 10. ต้นทุนการผลิตต่อหน่วย

ต้นทุนในการผลิตของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC จะประหยัดกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบ AAC มาก เนื่องจากไม่ต้องใช้พลังงาน และเครื่องจักรในขบวนการอบไอน้ำแก่คอนกรีต

ด้วยไอน้ำที่แรงดันสูงเพื่อให้คอนกรีตแข็งตัว แต่คอนกรีตมวลเบาในระบบ CLC ใช้วิธีให้คอนกรีตแข็งตัวตามธรรมชาติได้เอง ในส่วนผสมก็ไม่มีสารบดทรายให้สิ้นเปลืองพลังงาน อีกทั้งยังไม่ต้องใช้งบอะลูมิเนียมเป็นวัตถุดิบในการผลิต

#### 11. การนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน

การใช้งานคอนกรีตมวลเบาในระบบ CLC จะประหยัดต้นทุนได้ดีกว่าและสะดวกกว่าคอนกรีตมวลเบาในระบบ AAC เนื่องจากสามารถก่อฉาบได้โดยใช้ปูนก่อฉาบทั่วไป ไม่ต้องใช้ปูนฉาบชนิดพิเศษสำหรับบล็อกมวลเบาแบบมด้วยไอน้ำที่มีราคาสูงกว่าปูนก่อฉาบทั่วไปเท่านั้น และช่องว่างของโพรงอากาศในคอนกรีตมวลเบาในระบบ CLC มีรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่อง จึงทำให้น้ำซึมผ่านได้ยากกว่าคอนกรีตมวลเบาในระบบ AAC เป็นเหตุให้ผนังคอนกรีตมวลเบาในระบบ CLC มีโอกาสเป็นเชื้อราได้ยากกว่า

#### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของคอนกรีตมวลเบา

สุเมธ สันทัตวัฒนา (2553) ทำการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาในระบบ CLC จากค่าความหนาแน่นของคอนกรีต จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า คอนกรีตมวลเบาในระบบ CLC เป็นการผลิตโดยใช้น้ำยาเคมีแล้วทำให้เกิดโพรงอากาศแล้วนำไปผสมกับซีเมนต์และน้ำตามอัตราส่วนต่าง ๆ โดยทดสอบความหนาแน่นอยู่ในช่วง 600 – 1,800 กก./ลบ.ม. อัตราส่วนต่อน้ำ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.65 จากการทดลองสรุปได้ว่า กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) จะแปรผันตามค่าความหนาแน่น เมื่อค่าความหนาแน่นลดลงค่ากำลังอัดก็จะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน โดยค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา จะอยู่ในช่วง 20 – 350 กก./ตร.ซม. ค่าอัตราการดูดซึมน้ำ (Water absorption) น้ำจะแปรผกผันกับความหนาแน่น เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีช่องว่างอากาศมาก ทำให้อัตราการดูดซึมน้ำได้ดีกว่าตัวอย่างที่มีความหนาแน่นมาก โดยมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำระหว่าง 14 – 33 เปอร์เซ็นต์ อัตราการหดตัว (Autogenous shrinkage) แปรผกผันตามค่าความหนาแน่น คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีช่องว่างทำให้เกิดการหดตัวมากกว่าตัวอย่างที่มีความหนาแน่นมาก ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) แปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เนื่องจากตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มาก จะมีช่องว่างมากกว่าตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อย ทำให้การดูดซับความร้อนไว้ได้ดีกว่า

สำเร็จ รักซ้อน, วัลลภ ภูพา และปริญญา จินดาประเสริฐ (2557) ได้ศึกษานวัตกรรมการคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสด้วยการใช้วัสดุเหลือทิ้ง จากผลการศึกษาพบว่า หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าสูงส่งผลให้กำลังอัด กำลังอัดดึงแยก กำลังอัดสูงขึ้น และหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าสูงส่งผลให้อัตราการดูดซึมน้ำลดลง อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูง ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลง

ธนกร ทวีวุฒิ และนท แสงเทียน (2558) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส แปรผกผันกับปริมาณทรายที่หน่วยน้ำหนักเดียวกัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์น้อยจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์มาก และยังพบว่าหน่วยน้ำหนักออกแบบที่ 1,400 – 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า ที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 ซึ่งพฤติกรรมคล้ายคอนกรีตปกติ และยังพบอีกว่าหน่วยน้ำหนักออกแบบ 800 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 คอนกรีตจะมีกำลังรับแรงอัดต่ำ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่มีน้ำระเหยออกจากคอนกรีตเนื่องจากวิธีการบ่มแห้งในอากาศ

จากงานวิจัยของอภัย ซาภิรมย์ (2557) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผนังหล่อในที่คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า ผลการทดสอบกำลังรับอัดที่ความหนาแน่น 800 และ 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ที่ 10.89 และ 111.09 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และอัตราการดูดซึมน้ำที่ความหนาแน่น 800 และ 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถดูดซึมน้ำได้ร้อยละ 17.52 และ 10.47 ดังนั้น ความหนาแน่นน้อยสามารถรับกำลังแรงอัดได้น้อย และมีการดูดซึมน้ำมากกว่าความหนาแน่นที่มาก

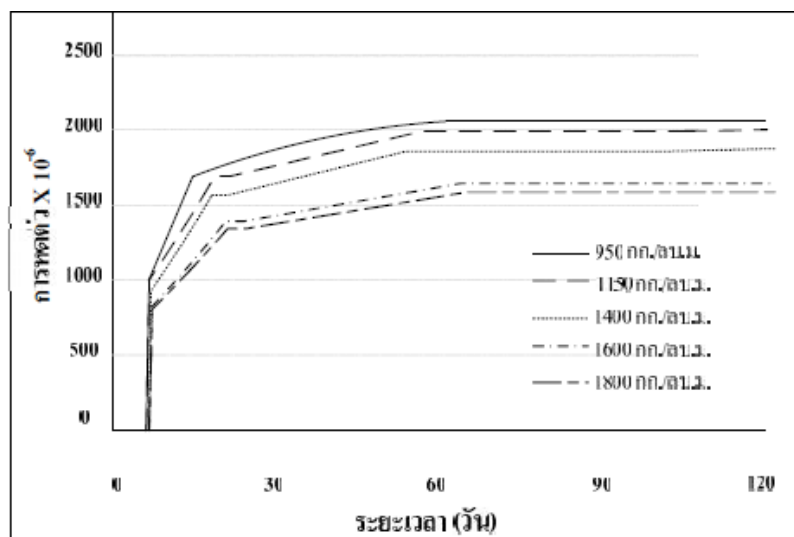
Ali A. Aliabdo et al. (2014) ได้ศึกษาการใช้วัสดุดินเหนียวบดในการผลิตคอนกรีตแบบเซลลูโลส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบในการใช้วัสดุดินเหนียวบดในการแทนที่ทราย ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกล และการวิเคราะห์โครงสร้างขนาดเล็กของคอนกรีตมวลเบา และคอนกรีตโพน จากการศึกษาดังกล่าวพบว่าที่การแทนที่ทรายด้วยวัสดุดินเหนียวบด 25% และ 50% ส่งผลให้กำลังต้านทานการรับแรงอัดลดลง เมื่อมี

การเพิ่มปริมาณอิฐดินเหนียวบดขณะที่คอนกรีตโฟมมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังพบว่าอนุภาคในตัวอย่างทดสอบไม่สม่ำเสมออีกด้วย

จากงานวิจัยของ ธนกร ทวีวุฒ และคณะ (2558) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์หาปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส จากวิธีการใช้โปรแกรม Air void analyses วิธีการคำนวณจากปริมาณส่วนผสม และวิธีการหาค่าความพรุนโดยคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตจาก ASTM C128 โดยใช้หน่วยน้ำหนักตั้งแต่ 800 – 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนน้ำปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 และอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 จากผลการศึกษาพบว่า ในทางปฏิบัติอาจเลือกใช้วิธีการหาปริมาณฟองอากาศและความถ่วงจำเพาะของคอนกรีตโดยอาศัยวิธีตาม ASTM C128 และค่าปริมาตรรวมของปูนซีเมนต์กับทราย อาจสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาคุณสมบัติอื่นของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสผสมสารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ โดย กฤษณ์ กิ่งโก้ และปริญญา จินดาประเสริฐ (2553) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์หรือสารผสมเพิ่ม ชนิด FF โดยสารนี้จะมีคุณสมบัติการลดน้ำในอัตราสูงมากถึง 35% ช่วยเร่งการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นระยะ 16 – 18 ชั่วโมง ช่วยในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดและเร่งเวลาการถอดแบบทดสอบที่ช่วงความหนาแน่น 950 – 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด กำลังต้านทานแรงดึงแยก กำลังต้านทานแรงดัด ปริมาณการดูดซึมน้ำ และการหดตัวของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ในการผสมสารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ทำให้ส่วนผสมมีความสามารถทำงานได้ดีและส่งผลให้คุณสมบัติต่าง ๆ ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ช่วยกระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์และส่วนผสมมีความสามารถทำงานได้ดีขึ้น เป็นผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ดีขึ้น ทำให้คุณสมบัติโดยรวมของคอนกรีตรวมทั้งกำลังรับแรงอัดดีขึ้น และความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแห้งกับอายุของคอนกรีตมวลเบา แสดงดังภาพ 7 ที่อายุ 120 วัน การหดตัวของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 2,080, 2,020, 1,780, 1,570 และ 1,490 ไมโครสเตรนที่หน่วยน้ำหนักคอนกรีต 950, 1,200, 1,400, 1,600 และ 1,800 กก./ม.<sup>3</sup> ตามลำดับ การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาจะลดลงเมื่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้น การหดตัวของคอนกรีตมวลเบาจะแปรผกผันกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต คือ เมื่อหน่วย

น้ำหนักของคอนกรีตเพิ่มขึ้นการหดตัวจะน้อยลง และการหดตัวมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออายุตัวอย่างมากกว่า 60 วัน



ภาพ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแห้งกับอายุของคอนกรีต

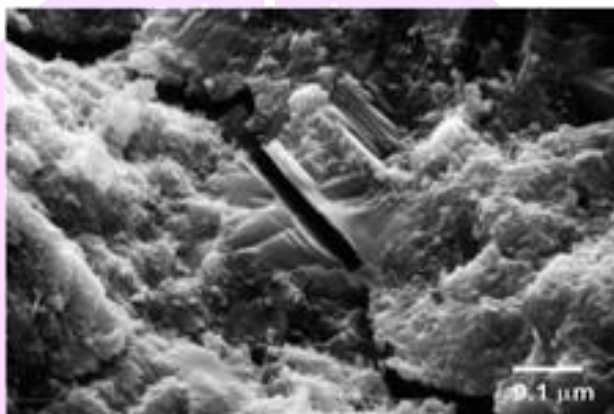
ที่มา : กฤษณ์กิ่งไก่อและ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2553

De Rose and Morris (1999) พบว่าการหดตัวมักจะเกิดขึ้นภายในช่วงอายุไม่เกิน 28 วันหรืออยู่ในช่วงของการหล่อ (casting) และปริมาณของการหดตัวแห้งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นการลดความหนาแน่นของคอนกรีต และอุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มขึ้นก็ส่งผลทำให้การหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

Chindaprasirt and Rattanasak (2011) จากผลการวิจัยพบว่า การหดตัวแห้งนั้นสามารถลดลงได้ด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยการใส่เถ้าลอยและทรายในส่วนผสม และลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้เหลือประมาณ 0.5 นอกจากนี้สารเพิ่มฟองจำพวก Glycol ยังได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อลดการหดตัวแห้งของโพลีเมอร์คอนกรีต ดังนั้น สารดังกล่าวก่อนที่จะถูกนำมาใช้ให้แน่ใจว่าสามารถเติมเต็มโพรงหรือช่องว่าง (Cavity) อย่างสมบูรณ์ได้

### การหดตัวแบบแห้ง

ปัญหารอยแตกกร้าวของคอนกรีตเป็นหนึ่งในปัญหาที่สำคัญของงานก่อสร้าง ในหลายกรณีอาจไม่ส่งผลให้การรับน้ำหนักของโครงสร้างมีปัญหา แต่ทำให้อายุการใช้งานและความคงทนของโครงสร้างลดลงอย่างมากได้ การแตกกร้าวของคอนกรีตเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ และการแตกกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตโดยเฉพาะการหดตัวแบบแห้ง ซึ่งเกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงเป็นสิ่งที่พบเห็นได้โดยทั่วไป



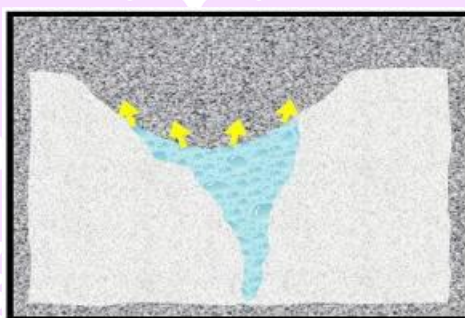
ภาพ 8 ภาพขยายการแตกกร้าวผ่านโครงสร้าง C-S-H และ  $\text{Ca(OH)}_2$  ในซีเมนต์เพส



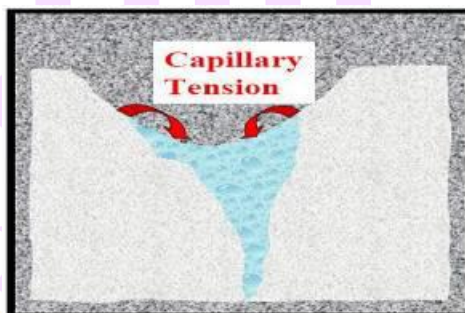
ภาพ 9 การเกิด Drying Shrinkage Crack ของคอนกรีตโครงสร้างพื้น

ที่มา : [https://cpacacademy.com/download/cpacacademy\\_com/b-p0059.pdf](https://cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/b-p0059.pdf)

การหดตัวแบบแห้งนั้นมีสาเหตุมาจากน้ำคอนกรีตที่ระเหยออกมาทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว โดยน้ำที่เติมเต็มอยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Capillary Pore) เกิดการระเหยออกเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น มีอุณหภูมิสูง หรือความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำให้เกิดแรงดึงผิวในช่องว่างคาпилลารี (Capillary Surface Tension) ส่งผลให้คอนกรีตในรอบช่องว่างเกิดการอัดตัวเข้ามาเนื่องจากสมดุลของแรง ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวนั่นเอง (วินิต ช่อวิเชียร, 2544) หากในการออกแบบไม่ได้เผื่อการหดตัวแบบแห้งอย่างเพียงพอ จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวและเกิดการปิดตัวของคอนกรีตได้



ภาพ 10 การระเหยของน้ำในช่องว่าง Capillary

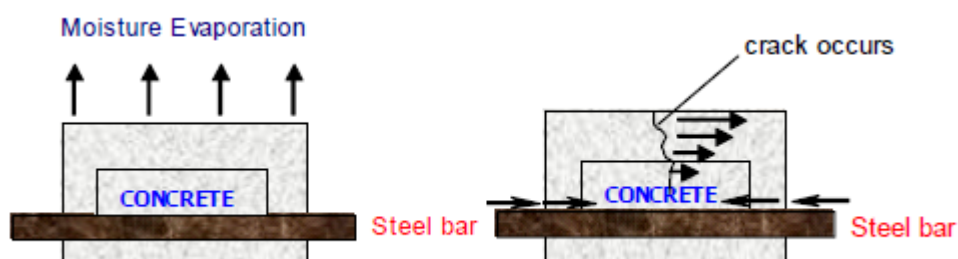


ภาพ 11 แรงดึง Capillary ทำให้คอนกรีตหดตัว

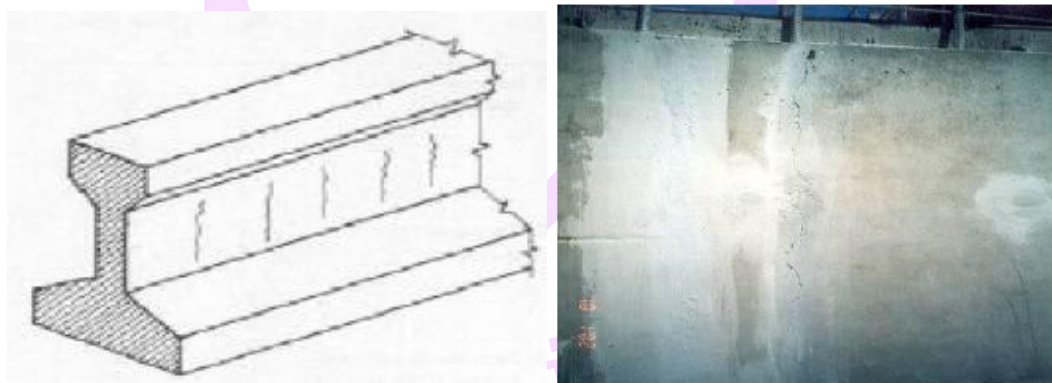
ที่มา : [https://cpacacademy.com/download/cpacacademy\\_com/b-p0059.pdf](https://cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/b-p0059.pdf)

ซึ่งส่วนมากการหดตัวแบบแห้งจะเกิดขึ้นเนื่องจากการยึดรั้งของโครงสร้าง โดยจะแบ่งการยึดรั้งของโครงสร้างคอนกรีตเป็น 2 ประเภท คือ การยึดรั้งภายใน (Internal Restraint) และการยึดรั้งภายนอก (External Restraint)

1. การยึดรั้งภายใน (Internal Restraint) การยึดรั้งภายในเกิดจากการหดตัวที่ไม่เท่ากันของคอนกรีตเช่น คอนกรีตที่มีความหนาหลายๆ อัตราการสูญเสียน้ำที่ผิวนอกกับภายในคอนกรีตไม่เท่ากัน เป็นเหตุให้คอนกรีตเกิดการยึดรั้งภายในเกิดขึ้น ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในคอนกรีตและส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวในที่สุด นอกจากนี้การออกแบบเหล็กเสริมที่มีปริมาณมากเกินไปและไม่เหมาะสม ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการยึดรั้งภายในอีกด้วย



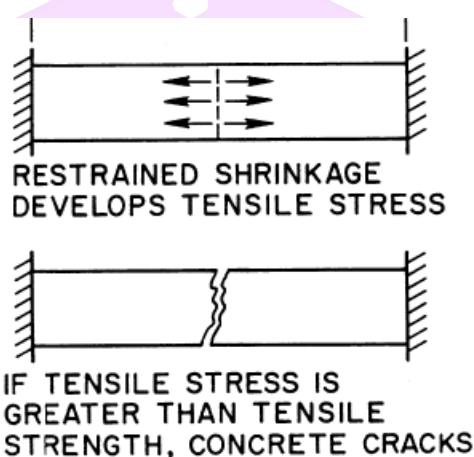
ภาพ 12 กลไกการเกิดการแตกร้าวจากการยึดรั้งภายใน (เหล็กเสริม)



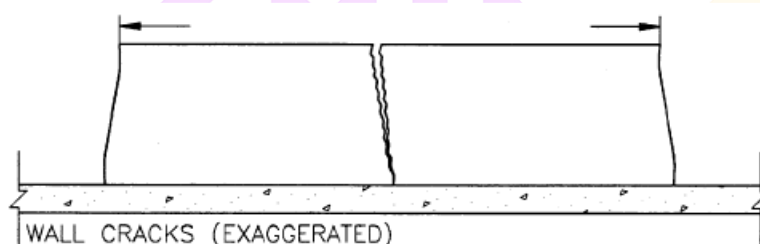
ภาพ 13 การเกิดการแตกร้าวจากการยึดรั้งภายในของโครงสร้างคอนกรีตคานเล็กและกำแพง

ที่มา : [https://cpacacademy.com/download/cpacacademy\\_com/b-p0059.pdf](https://cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/b-p0059.pdf)

2. การยึดรั้งภายนอก (External Restraint) เกิดจากการหดตัวของโครงสร้างของคอนกรีต แล้วมีการยึดหรือค้ำไว้ด้วยโครงสร้างคอนกรีตอื่นหรือโครงสร้างประเภทอื่น เช่น เหล็กรูปพรรณ โดยลักษณะการยึดรั้งประเภทนี้ ได้แก่ กำแพงคอนกรีตที่อยู่ระหว่างเสาหรือพื้นคอนกรีตที่อยู่ระหว่างคานขนาดใหญ่ เป็นต้น ซึ่งการยึดรั้งภายนอกนี้ก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้งเช่นกัน



ภาพ 14 กลไกการเกิดการแตกร้าวจากการยึดรั้งภายนอก



ภาพ 15 การแตกร้าวของคอนกรีตจากการยึดรั้งภายนอก

ที่มา : [https://cpacacademy.com/download/cpacacademy\\_com/b-p0059.pdf](https://cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/b-p0059.pdf)

ดังนั้นการเกิดการแตกร้าวเนื่องมาจากการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต จึงเกิดจากคอนกรีตหดตัวเนื่องมาจากการสูญเสียน้ำประกอบกับมีการยึดรั้งเกิดขึ้น จากกลไกดังกล่าวจะทำให้คอนกรีตเกิดหน่วยแรงดึงภายใน (Tensile Stress) เมื่อหน่วยแรงดึงภายในมากกว่า

กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Tensile Strength) จะส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเกิดขึ้น และจะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายในภายหลังได้

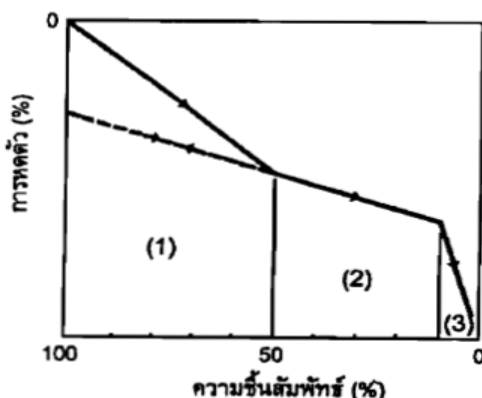
#### กลไกการหดตัวแบบแห้ง

การหดตัวของซีเมนต์เพสต์เป็นส่วนสำคัญของการหดตัวแบบแห้ง เพราะโดยทั่วไปมวลรวมจะมีการหดตัวต่ำมาก ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของซีเมนต์เพสต์กับความชื้นสัมพัทธ์ สามารถดังภาพ 16 และแบ่งได้เป็น 3 ส่วน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัยจาตุรพิทักษ์กุล, 2551) ดังนี้

1. การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 การหดตัวช่วงนี้จะเกิดจากการสูญเสียน้ำในโพรงคาปิลารีเป็นหลัก ซึ่งในช่วงแรกน้ำในโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่จะถูกขับออกมาก่อน ตามด้วยน้ำในโพรงคาปิลารีที่มีขนาดเล็กลง ทำให้น้ำที่เหลืออยู่ในโพรงเกิดแรงดึงผิวและเป็นผิวโค้ง ซึ่งมีขนาดสูงขึ้นเมื่อโพรงมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้การสูญเสียน้ำดูดซับที่อยู่ในซอกหรือโพรงขนาดจิ๋วก็มีส่วนทำให้เกิดการหดตัวเช่นกัน

2. การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 เปอร์เซ็นต์ ถึงร้อยละ 50 การหดตัวจะเกิดในอัตราต่ำกว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ถึง 50 น้ำในโพรงอากาศถูกขจัดออกและแรงดึงผิวจะหมดไป จะเกิดการสูญเสียน้ำดูดซับที่ผิวของอนุภาคเจลเป็นหลัก โดยที่ความชื้นประมาณร้อยละ 50 เป็นการหดตัวแบบคืนกลับได้ การหดตัวจากการสูญเสียน้ำอาจยังมีอยู่แต่ไม่มากนัก เมื่อความชื้นลดลงจะเกิดการสูญเสียน้ำดูดซับขั้นสุดท้าย และทำให้เกิดการหดตัวที่มากขึ้น

3. การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 เปอร์เซ็นต์ การหดตัวของซีเมนต์เพสต์เกิดขึ้นในอัตราที่สูง ซึ่งช่วงแรกเป็นแบบคืนกลับได้ แต่ถ้าสูญเสียความชื้นอย่างรุนแรงและนานพอจะทำให้เกิดการหดตัวแบบถาวรได้



ภาพ 16 การหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์

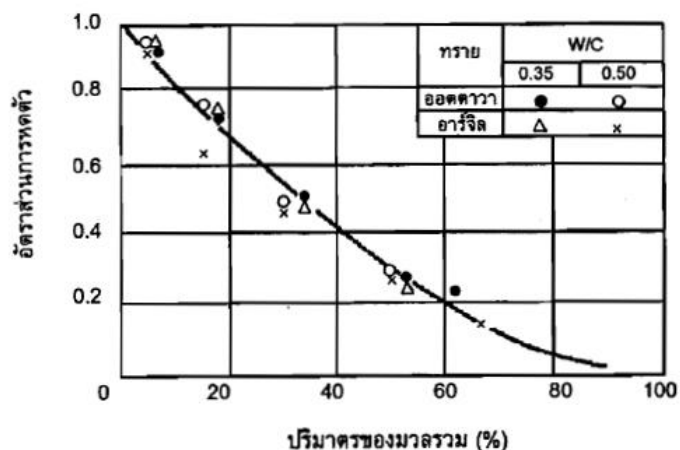
ที่มา : ปริญา จินดาประเสริฐ และชัยจาตุรพิทักษ์กุล, 2551

ปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีต

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการหดตัวของคอนกรีต ได้แก่ มวลรวม ปริมาณน้ำต่อหน่วย ปริมาตรคอนกรีต ความชื้น ขนาดรูปร่างของคอนกรีต เป็นต้น การเสริมเหล็กในคอนกรีตทำให้เกิดแรงอัดในเหล็กและแรงดึงในคอนกรีต ซึ่งสามารถช่วยลดการหดตัวได้

#### 1. มวลรวม

การเพิ่มปริมาณของมวลรวมช่วยลดปริมาณซีเมนต์เพสต์และลดการหดตัวได้อย่างดี เนื่องจากสารประกอบในเพสต์มีผลทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้งในมอร์ตาร์มากกว่าในคอนกรีต (จันทนา สุขุมานนท์ และคณะ, 2551) ดังแสดงในภาพ 17 และการหดตัวยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวมต่าง ๆ เช่น ลักษณะของผิว รูปร่าง ขนาด ขนาดคละ ปริมาณ ความพรุน กำลัง และโมดูลัสยืดหยุ่น เป็นต้น มวลรวมที่แข็งแรง ดูดซึมน้ำต่ำ และมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทำให้คอนกรีตมีการหดตัวน้อย โดยกำลังทั่วไปของมวลรวมมีค่าสูงกว่าของซีเมนต์เพสต์มาก การใช้มวลรวมที่ไม่แข็งแรงอย่างมวลรวมเบาจะทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวสูง ขณะที่หินปูนและหินอ่อนจะให้การหดตัวต่ำ และหินบะซอลต์ กรวด และแกรนิตจะเกิดการหดตัวปานกลาง ขนาดคละและขนาดวัสดุผสมจะส่งผลทางอ้อมต่อการหดตัวของคอนกรีต ในคอนกรีตที่มีขนาดคละของวัสดุผสมที่ใช้ทั่วไปจะหดตัวใกล้เคียงกัน เมื่อใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้มีการหดตัวลดลง เพราะลดการใช้ซีเมนต์เพสต์ลง รูปร่างของวัสดุผสมมีผลต่อการหดตัวเล็กน้อย มวลรวมก้อนกลมทำให้ใช้น้ำลดลงซึ่งการลดปริมาณน้ำก็ช่วยให้การหดตัวลดลงได้เช่นกัน ส่วนการใช้ปริมาณมวลรวมที่มีความละเอียดสูง หรือใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กเป็นวัสดุผสมล้วนแต่เป็นการเพิ่มการหดตัวของคอนกรีต

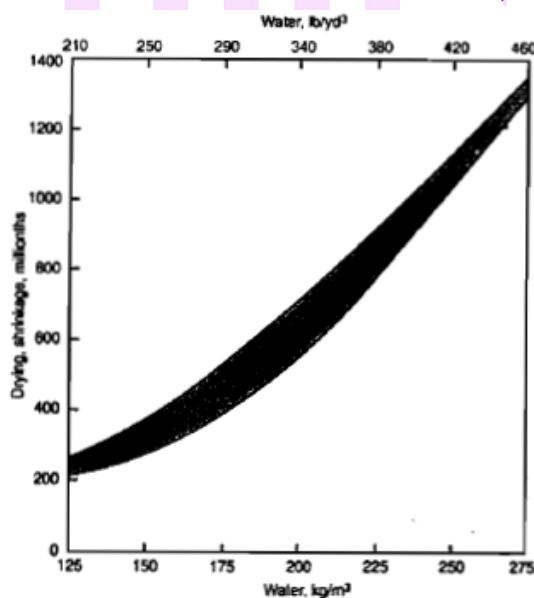


ภาพ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของมวลรวมกับการหดตัว

ที่มา : ปริญา จินดาประเสริฐ และชัยจาตุรพิทักษ์กุล, 2551

2) ปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรคอนกรีต

เป็นปัจจัยควบคุมได้และมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งที่สุด (จันทนา สุขุมานนท์ และคณะ, 2551) ดังภาพ 18 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำต่อการหดตัว ซึ่งการใช้ปริมาณน้ำน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ สามารถทำให้เกิดการหดตัวน้อยที่สุดได้

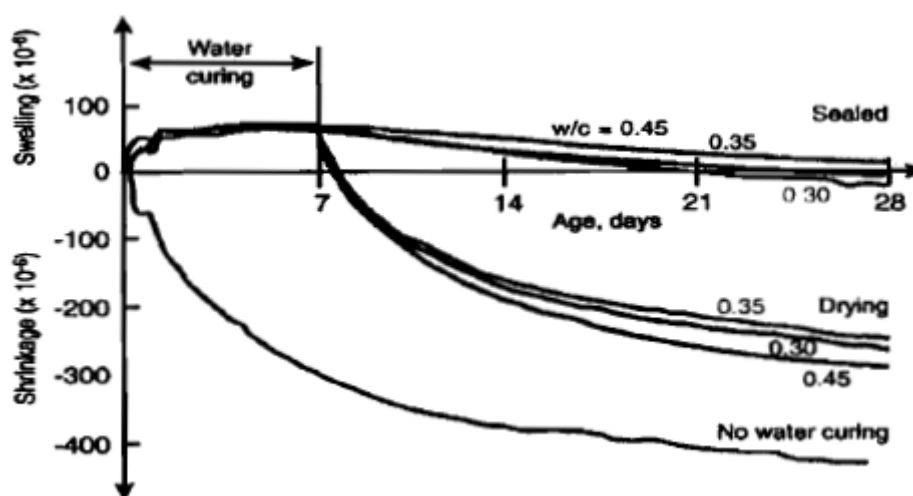


ภาพ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและการหดตัวแบบแห้ง

ที่มา : จันทนา สุขุมานนท์ และคณะ, 2551

### 3) ความชื้น

แบ่งเป็นความชื้นขณะบ่มและความชื้นของอากาศคอนกรีตแห้ง เมื่อมีการบ่มที่ดี จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มากขึ้น ส่งผลให้โพรงคาปิลลารีน้อยลงและคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น [3] จากงานวิจัยพบว่าคอนกรีตที่นำไปบ่มในน้ำ 7 วัน มีการหดตัวแบบแห้งและหดตัวด้วยตัวเองน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้บ่มในน้ำ ดังนั้นแล้วการบ่มคอนกรีตในน้ำช่วงอายุเริ่มต้นสามารถช่วยลดการหดตัวได้ (จันทนา สุขุমানนท์ และคณะ, 2551) ดังแสดงในภาพ 19



ภาพ 19 การเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างที่การบ่มแตกต่างกัน

### 4) ขนาดและรูปร่างของตัวอย่างทดสอบ

อัตราการสูญเสียน้ำของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว ถ้าพื้นที่ผิวมากทำให้เกิดการสูญเสียน้ำได้รวดเร็วขึ้น และในคอนกรีตขนาดเล็กจะสูญเสียน้ำเร็วกว่าคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะเมื่อคอนกรีตสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัว ซึ่งการหดตัวเกิดที่ผิวของคอนกรีตและขยายเข้าไปในส่วนในของคอนกรีต และจะใช้เวลานานมากถ้าเป็นคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัยจตุรพิทักษ์กุล, 2551) โดยการหดตัวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของคอนกรีต

### 5) การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตมวลเบา

โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่ทำด้วยมวลรวมน้ำหนักเบา มีค่าการหดตัวมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณร้อยละ 5 - 40 คอนกรีตมวลเบามักใช้เป็นวัสดุฉนวนเป็นวัสดุไม่ได้รับแรง

หลัก ซึ่งมักจะส่งผลต่อการวิบัติของโครงสร้าง แต่ถ้การหดตัวแห่งนี้เกิดที่โครงสร้างหลัก รับแรงก็มีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาและหาทางแก้ไข

การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตจะแปรผกผันกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตและ ปริมาณมวลรวมละเอียด ความหมายคือ การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตจะเกิดขึ้นน้อยเมื่อมี ความหนาแน่นของคอนกรีตสูงและมีปริมาณทรายมาก (Valore, J.C., 1954) วัสดุปอซโซลาน บางประเภท เช่น เถ้าลอย สามารถใส่ผสมคอนกรีตเพื่อลดการหดตัวได้ และคอนกรีตมวลเบา ที่ไม่ใช่มวลรวมเลยจะมีการหดตัวแห้งที่สูง (Kosmatka et al, 2003)

ในคอนกรีตมวลเบาที่บ่มด้วยความชื้นจะมีอัตราการหดตัวแห้งอยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.06 – 3 (N. Narayanan and K. Ramamuthy, 2000) ซึ่งการบ่มด้วยความชื้นจะทำให้เกิดการ หดตัวน้อยกว่าการบ่มคอนกรีตแห้งในอากาศ อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับปริมาณทรายที่ใช้ด้วย และในคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำจะมีค่าการหดตัวแห้งน้อยมากเมื่อเทียบกับ คอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำ ดังแสดงในตาราง 3



ตาราง 3 ค่าการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตน้ำหนักเบาชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	การหดตัวเมื่อแห้ง
คอนกรีตไร้มวลรวมละเอียด	
มวลรวมหยาบที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ	0.018
มวลรวมหยาบน้ำหนักเบา	0.025
คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา	
Expanded vermiculite	0.25–0.35
Pumice	0.04–0.10
Foamed slag	0.03–0.07
คอนกรีตฟองอากาศ (Aerated concrete)	
หล่อสำเร็จ (Precast)	0.05
หล่อในที่ (In-situ)	0.5
คอนกรีตพูน	0.1
คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส นีโอโพร์ (Neopor)	
หน่วยน้ำหนัก 1200, 1400, 1600 กก./ลบ.ม.	0.20, 0.18, 0.16
ดีคอนบล็อค คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส	
หน่วยน้ำหนัก 800–1000 กก./ลบ.ม.	0.07
คิวคอน ระบบอบไอน้ำภายใต้แรงดันสูง	
หน่วยน้ำหนัก 800 กก./ลบ.ม.	0.02
คอนกรีตธรรมดา	0.145

ที่มา : ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2536

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการหัตถ์แบบแห้งของคอนกรีตมวลเบา

สุเมธ ล้นทัตพัฒนา และคณะ (2552) จากการศึกษาการหัตถ์ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ความหนาแน่นระหว่าง 600 – 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.40, 0.50, 0.60 และ 0.65 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนักพบว่า ค่าการหัตถ์ของคอนกรีตที่ความหนาแน่นมากจะมีช่องอากาศน้อยทำให้เกิดการหัตถ์น้อยกว่าในคอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยแต่มีช่องอากาศมาก โดยค่าอัตราการหัตถ์แห้งที่ได้อยู่ระหว่าง 550 – 1,100 ไมโครสแตน

ศิวะ วาสาลา และคณะ (2551) จากการศึกษาการหัตถ์ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1,200 – 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.4 และ 0.5 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนักพบว่า การหัตถ์เพิ่มขึ้นเมื่อมอร์ตาร์อายุมากขึ้น และการหัตถ์น้อยลงเมื่อความหนาแน่นน้อยลง การหัตถ์ของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.40 มีค่าระหว่าง 432 – 492 ไมโครสแตน และการหัตถ์ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 มีค่าระหว่าง 393–649 ไมโครสแตน

อิทธิเชษฐ์ อุตะธีรวิชัย และคณะ (2552) ทำการศึกษาการหัตถ์แห้งและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ความหนาแน่นเปียกระหว่าง 800 – 1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.45 และ 0.55 และใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ 0.25:1, 0.5:1, 1:1, 2:1 และ 3:1 บ่มและทดสอบที่อายุ 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35 และ 56 วัน พบว่าการหัตถ์แห้งของคอนกรีตจะแปรผกผันกับความหนาแน่นของคอนกรีต โดยการหัตถ์จะลดลงเมื่อมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่าการหัตถ์แห้งที่ได้มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.067 – 0.252

Benjamin (1967) จากการศึกษาวิธีการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยใช้สารเคมีทำให้เกิดฟองและผสมเข้ากับคอนกรีต ได้คอนกรีตที่มีความหนาแน่นระหว่าง 790 – 950 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าการหัตถ์ที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 0.2 – 0.6 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนและมีน้ำหนักเบา

## หินผุ่่น

หิน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามสภาพการเกิด คือ หินอัคนี (Igneous rocks), หินชั้น (Sedimentary rocks) และหินแปร (Metamorphic rocks) (ชัชวาล เศรษฐบุปผู, 2536)

### 1. หินอัคนี (Igneous rocks)

เกิดมาจากการเย็นตัวของลาวา เป็นหินเก่าแก่หินชนิดนี้ในส่วนที่มีขนาดเม็ดหยาบ ซึ่งเป็นหินที่มีการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ได้แก่ หินแกรนิต ส่วนหินที่มีขนาดเม็ดละเอียด เป็นหินที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ได้แก่ หินบะซอลต์

### 2. หินชั้น (Sedimentary rocks)

เกิดมาจากการทับถมของหิน ทราย ดินตะกอน และดินเหนียว เนื่องจากแรงดันเมื่อเวลานานเข้าจะเกิดการยึดกันขึ้น แบ่งย่อยตามส่วนผสมได้ดังนี้ ได้แก่ หินชั้นที่ส่วนผสมเป็นทรายและกรวด เช่น หินกรวดมน และหินทราย เป็นต้น หินชั้นที่มีส่วนผสมละเอียด เช่น หินดินดาน, หินดินเหนียว และหินทรายแป้ง เป็นต้น และหินคาร์บอเนต เช่น หินปูน, หินโดโลไมท์ และหินชอล์ก เป็นต้น

### 3. หินแปร (Metamorphic rocks)

เกิดมาจากการแปรสภาพของหินเนื่องจากความร้อนและแรงดันที่รุนแรง เช่น หินอ่อน, หินชนวน, หินอ่อน และหินเมตาควอร์ตไซต์ เป็นต้น

ส่วนใหญ่ในประเทศไทยจะย่อยหินปูนเพื่อมาใช้ในงานก่อสร้างเพราะมีอยู่เป็นจำนวนมาก และคุณสมบัติของหินที่ใช้ในงานก่อสร้างจะต้องมีความแข็งแรง ทนทานต่อการสึกกร่อน มีความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี และมีอัตราส่วนคละที่ดี

หินผุ่่น คือ หินปูนบดหยาบ ๆ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการม่หินปูนองค์ประกอบที่สำคัญ คือ แคลเซียม ประมาณร้อยละ 30 - 35 แมกนีเซียมประมาณร้อยละ 3 - 5 และธาตุอื่น ๆ ปะปนในปริมาณเล็กน้อย คือ ฟอสฟอรัส กำมะถัน เหล็ก แมงกานีส และทองแดงสังกะสี

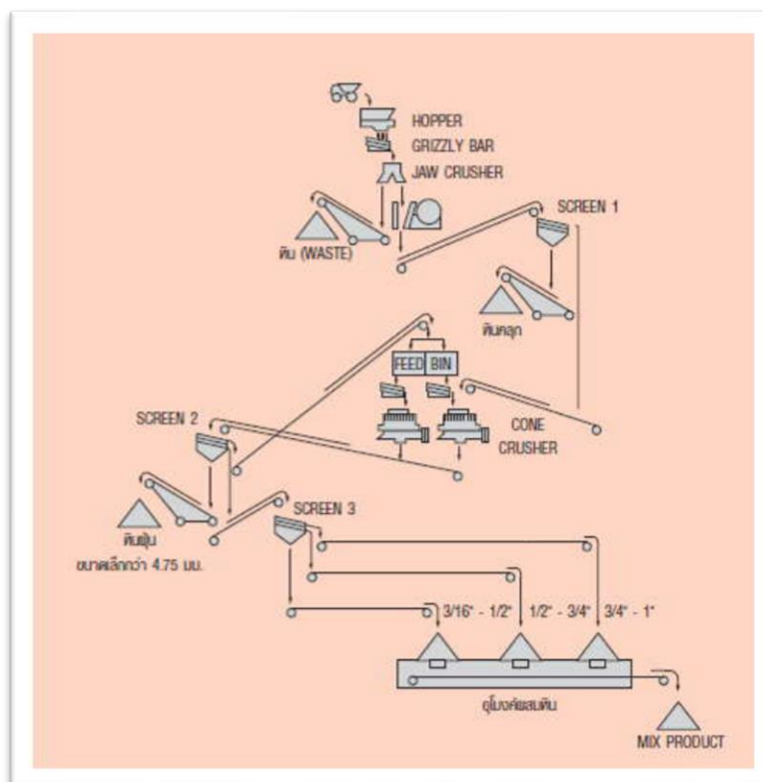
## คุณสมบัติของหินผุ่่นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยนวัตกรรมคอนกรีตบล็อกลมวลเบาปานกลางนี้ ได้ทำการศึกษาที่มาของหินผุ่่นที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการม่หิน จากการศึกษาวิจัยพบว่า การนำหินผุ่่นมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตในฐานะของมวลรวมละเอียด มีแนวโน้มที่ดี เนื่องจาก

มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับหิน แต่มีขนาดที่เล็กกว่า ที่สำคัญต้นทุนการผลิตก็มีแนวโน้มที่จะลดลงและยังมีผลพลอยได้ในการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมจากการนำหินฝุ่นมาใช้ประโยชน์อีกด้วย งานวิจัยนี้ยังศึกษาคุณสมบัติทางด้านกายภาพ การใช้หินฝุ่นในการผสมคอนกรีต เพื่อศึกษาผลกระทบต่อคอนกรีตทั้งในสภาพคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว นอกจากนี้ในด้านความทนทานของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นก็เป็นอีกประเด็นที่น่าสนใจเช่นกัน

#### 1. กระบวนการผลิตหิน

มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) คือ หินหรือกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.75 มิลลิเมตรขึ้นไปหรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 โดยกรรมวิธีการผลิตหิน ประเทศไทยส่วนใหญ่นิยมใช้หินปูนในงานก่อสร้าง เนื่องจากมีภูเขาหินปูนอยู่ทั่วประเทศ การจะนำหินตามธรรมชาติมาใช้ต้องผ่านขั้นตอนการแปรรูปซึ่งอยู่ในรูปของการย่อยและการผสมหินเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ โดยขั้นตอนแรกนำหินใหญ่ที่ได้จากเหมืองหินมาร่อนผ่านตะแกรงคัดดิน (Grizzly bar) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกก่อนที่จะนำเข้าเครื่องย่อย จากนั้นจะเริ่มทำการย่อยหินขั้นที่ 1 (Primary stage) ย่อยหินก้อนใหญ่ให้เหลือขนาด 60-90 เซนติเมตรโดยจะใช้เครื่องเป็นแบบ Jaw crusher ต่อมาจะย่อยขั้นที่ 2 (Secondary stage) เป็นการย่อยหินจากขั้นที่ 1 ให้มีขนาดเล็กลงโดยให้มีขนาดใหญ่ได้ไม่เกินขนาดใหญ่สุดที่ต้องการ หินที่ได้ในช่วงนี้จะมีขนาด 5 เซนติเมตรจนถึง หินฝุ่น ถัดมาจะทำการย่อยหินขั้นที่ 3 (Tertiary stage) เนื่องจากการย่อยหินขั้นที่ 2 ยังคงมีหินขนาดใหญ่เกินความต้องการประมาณ 20 - 30% จากนั้นจะทำการคัดแยกหิน (Screening) ด้วยตะแกรงร่อนหิน (Vibrating screen) สุดท้ายทำการผสมหิน (Blending) เพื่อให้ได้ขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C136 รายละเอียดขั้นตอนการผลิตหินแสดงดังภาพ 20 (บริษัท SCG ซีเมนต์ จำกัด, 2549)



ภาพ 20 แผนภาพแสดงขั้นตอนการย่อยหินและผสมหิน

ที่มา : บริษัท SCG ซีเมนต์ จำกัด, 2549

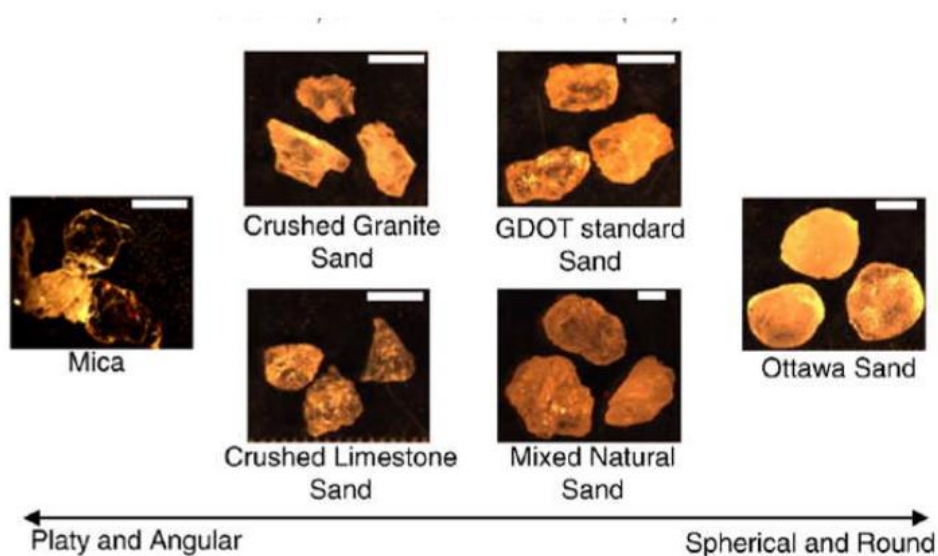
## 2. ลักษณะทางกายภาพของหินฝุ่น

สามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 แบบ คือ ขนาดและรูปร่าง, ลักษณะผิว, ขนาดคละ และส่วนละเอียด

### 2.1 ขนาดและรูปร่าง

รูปร่างของหินฝุ่นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของหินต้นกำเนิดที่นำมาบด จำนวนครั้งในการบด และในกระบวนการบดก็มีแนวโน้มทำให้อนุภาครูปร่างของหินฝุ่นเป็นเหลี่ยมมุมแบนและมีส่วนละเอียดอยู่มาก โดยจากงานวิจัยของ Cortes et al. (2008) ระบุว่าอนุภาคของส่วนละเอียดที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมจะส่งผลต่อความสามารถในการทำงาน ด้านการไหลของมอร์ต้ามากกว่าทรายที่มีลักษณะอนุภาคกลมมน สำหรับที่ปริมาณซีเมนต์เฟสค์เท่ากันหรือที่ปริมาณน้ำเท่ากัน การเพิ่มน้ำในส่วนผสมจะเป็นการปรับปรุงความสามารถในการทำงานได้ แต่เมื่อปริมาณน้ำมีมากขึ้นจะส่งผลให้กำลังอัดลดลง แม้ว่าความเป็นเหลี่ยมมุมของหินฝุ่นจะช่วยเพิ่มแรงต้านทานซึ่งกันและกันของอนุภาคภายใน และจากการทดสอบด้วยกล้อง

Optical microscopy ดังภาพ 21 โดย Cortes et al. (2008) พบว่าหินฝุ่นมีจุดเด่นในเรื่องความสม่ำเสมอและความเป็นเหลี่ยมมุมมากกว่าทราย และหินฝุ่นที่ได้จากการบดอัดด้วยหินแกรนิตมีอนุภาคที่เหลี่ยมคมกว่าหินฝุ่นที่ได้จากการบดอัดด้วยหินปูน



ภาพ 21 ลักษณะรูปร่างของอนุภาคทรายและหินฝุ่นจากการทดสอบด้วยกล้อง  
Optical microscopy

ที่มา : Cortes et al., 2008

จากงานวิจัยของ Dewar et al. (1992) พบว่าหินฝุ่นที่ถูกใช้ในคอนกรีต ถ้าปริมาณส่วนละเอียดที่เล็กกว่า  $75 \mu\text{m}$  มีลักษณะรูปร่างที่ดี (มีอนุภาคที่สม่ำเสมอและไม่เป็นเหลี่ยมมุมมากเกินไป) จะสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของคอนกรีตในเรื่องของกำลังและความสามารถในการทำงานของคอนกรีตได้ดี

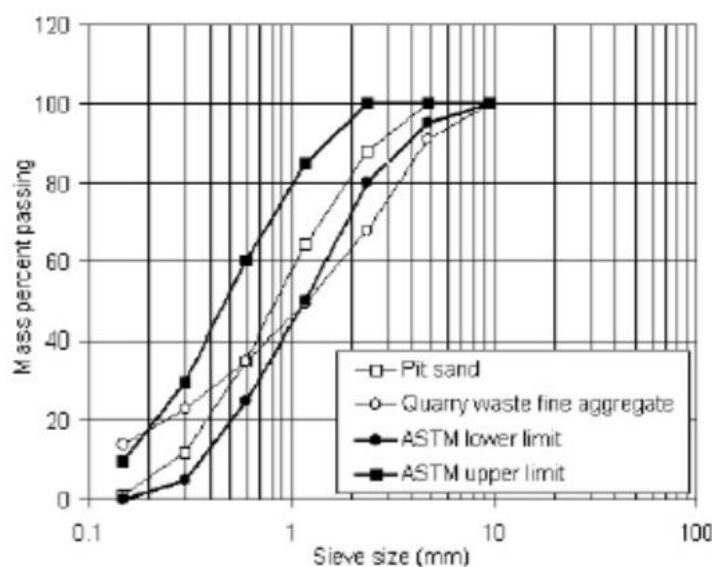
### 2.2 ลักษณะผิว

โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นเหลี่ยมและมีผิวหยาบ โดยขึ้นอยู่กับหินต้นกำเนิดที่นำมาทำการบดอัดและกระบวนการย่อย มวลรวมก้อนเหลี่ยมและผิวหยาบของมวลรวม จะมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงทำให้ความตึงผิวของซีเมนต์เพสต์ (ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ) มาเคลือบผิวมากขึ้น เช่นเดียวกับหินฝุ่นมีลักษณะผิวที่หยาบ โดยลักษณะผิวที่หยาบของหินฝุ่นจะส่งผล

ให้การยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เฟสค์มาก และทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้นด้วย (บริษัท SCG ซีเมนต์ จำกัด, 2549)

### 2.3 ขนาดคละ

หินฝุ่นโดยทั่วไปจะมีขนาดคละค่อนข้างหยาบเมื่อเทียบกับขนาดคละของทราย จากงานวิจัยของ Safiuddin et al. (2007) ดังภาพ 22 พบว่าขนาดคละหรือการกระจายตัวของอนุภาคมวลรวม จะส่งผลต่อคอนกรีตในด้านการเกาะตัวกัน ปริมาณช่องว่าง ความสามารถในการทำงาน การแยกตัว และความทนทานของคอนกรีต มวลรวมที่มีขนาดคละหยาบจะทำให้มีปริมาณช่องว่างในคอนกรีตเพิ่มขึ้น และส่งผลเสียในเรื่องความสามารถในการทำงาน กำลังและความทนทานของคอนกรีต ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณซีเมนต์เฟสค์ที่มากขึ้นในการมาเติมเต็มช่องว่างนั้น เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานและกำลังอัดเท่าเดิม (บริษัท SCG ซีเมนต์ จำกัด, 2549)



ภาพ 22 ขนาดคละของทรายบก (Pit Sand) กับหินฝุ่น (Quarry waste fine aggregate)

ที่มา : Safiuddin et al., 2007

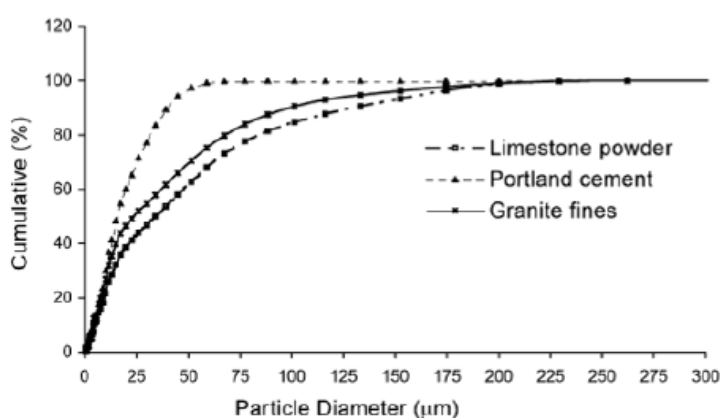
### 2.4 ส่วนละเอียด

ในช่วงของกระบวนการบดย่อยหินจะได้ส่วนละเอียด ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอน (Silt) และฝุ่น โดยตะกอน (Silt) จะมีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 60  $\mu\text{m}$  ทั้งนี้ขนาดของมวลละเอียดจะลดลงตามกระบวนการทางธรรมชาติ และมักเกิดจากการทับถมของมวลรวมตามธรรมชาติ

ในทางตรงกันข้าม ฝุ่น คือส่วนละเอียดที่เกิดจากขั้นตอนของการบดย่อยหิน ส่วนละเอียดทั้ง 2 อย่างดังกล่าว จะอยู่บริเวณผิวหน้าของมวลรวม และจะส่งผลต่อการยึดเกาะของมวลรวมกับซีเมนต์ จากมาตรฐาน BS 882 (1992) ให้ข้อจำกัดของปริมาณส่วนละเอียดในหิน หรือมวลรวมหยาบสำหรับโครงสร้างคอนกรีต อยู่ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และในหินฝุ่นอยู่ที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักส่วนใหญ่ ส่วนละเอียดของหิน หรือที่เรียกว่าฝุ่นหินจะถูกใช้ประโยชน์ในเชิงเกษตรกรรมอุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมกระดาษ ปัจจุบันฝุ่นหินได้รับความสนใจนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง โดยจะนำมาใช้ทำอิฐ และบล็อกปูผิวทาง

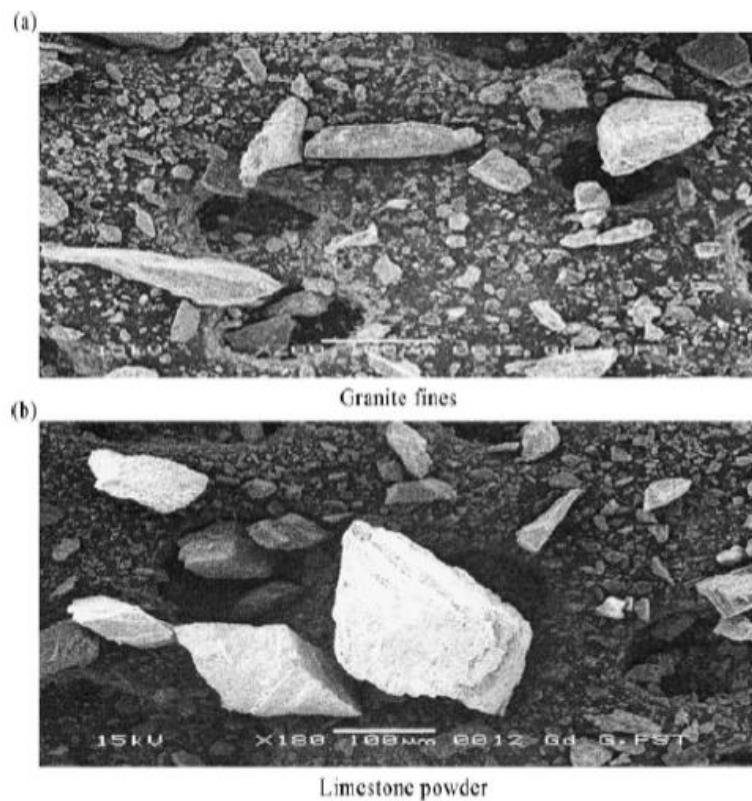
ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Ho et al. (2002) พบว่าอนุภาคของฝุ่นหินประเภทหินแกรนิต จะเล็กกว่าฝุ่นหินประเภทหินปูนดังภาพ 23 รูปร่างของฝุ่นหินแกรนิตจะมีแนวโน้มแบนและยาวมากกว่าฝุ่นหินปูนดังภาพ 24 ความแตกต่างของคุณสมบัติด้านกายภาพจะส่งผลต่อคุณสมบัติด้านการไหลของคอนกรีต และจากงานวิจัย Hudson et al. (1997) พบว่าหินฝุ่นที่มีปริมาณส่วนละเอียดขนาดเล็กกว่า  $75 \mu\text{m}$  ปริมาณร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาผสมคอนกรีตจะไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วฝุ่นหินหรือส่วนละเอียดของหินฝุ่น จะไม่ส่งผลเสียต่อคอนกรีตเหมือนกับส่วนละเอียดของทรายหรือที่เรียกว่าฝุ่นทราย ซึ่งส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบเป็นดินเหนียว



ภาพ 23 ขนาดของอนุภาคของฝุ่นหินปูน (Limestone powder) ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) และฝุ่นหินแกรนิต (Granite fines)

ที่มา : Ho et al., 2002



ภาพ 24 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค (a) ฝุ่นหินแกรนิต (b) ฝุ่นหินปูน

ที่มา : Ho et al., 2002

### 3. การใช้หินฝุ่นในการผสมคอนกรีต

การนำหินฝุ่นไปใช้ในการผสมคอนกรีตสามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 สภาพ คือ สภาพคอนกรีตสด และสภาพคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ดังนี้

#### 3.1 สภาพคอนกรีตสด

##### 1) อิทธิพลด้านความสามารถในการทำงาน

จากงานวิจัยของ Safiuddin et al. (2007) พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตด้านการไหลดีขึ้นกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายปกติ จากการทดสอบหาค่าการไหล (Slump Flow) และค่ายุบตัว (Slump) เนื่องจากการใช้หินฝุ่นจะเป็นการลดส่วนละเอียดของส่วนผสมคอนกรีต และหินฝุ่นมีความหยาบกว่าทราย ส่งผลให้พื้นที่ผิวทั้งหมดของมวลรวมลดลง ทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตลดลงตามไปด้วย

งานวิจัยของ Beixing et al. (2009) พบว่าฝุ่นหินนั้นหรือปริมาณส่วนละเอียดของหินฝุ่น มีส่วนช่วยปรับปรุงค่าการเกาะตัวและการแยกตัวในสภาพคอนกรีตสดได้ จากผลการทดลองหินฝุ่นที่มีปริมาณส่วนละเอียดร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของหินฝุ่นที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัดต่ำจะให้ค่าความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดดี ในขณะที่เดียวกันคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ต้องการให้ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดดีนั้นควรใช้หินฝุ่นในปริมาณส่วนละเอียดร้อยละ 7 ถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น

นอกจากนี้ผลงานวิจัยของ Almeida et al. (2007) พบว่าอนุภาคของปริมาณส่วนละเอียดหรือฝุ่นในช่วงร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น จะมีประโยชน์ต่อสภาพคอนกรีตสดในเรื่องความสามารถในการทำงานของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำต่ำ และขนาดคละของมวลรวมที่ดี ส่งผลต่อการเกาะตัวของคอนกรีต โดยทั่วไปฝุ่นหินจะช่วยปรับปรุงสภาพคอนกรีตสด ในเรื่องของความหนืด

ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตกำลังสูงจะดีที่สุด เมื่อมีปริมาณส่วนละเอียดในหินฝุ่นอยู่ที่ร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น โดยไม่ใช้เถ้าลอยในคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการทำงานของคอนกรีตกำลังอัดสูงที่มีการผสมเถ้าลอยจะดีที่สุดเมื่อหินฝุ่นมีปริมาณส่วนละเอียดอยู่ที่ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก แต่ถ้าหินฝุ่นมีปริมาณส่วนละเอียดสูงถึงร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้คอนกรีตกำลังอัดสูงมีความเหนียวมาก ซึ่งทำให้คอนกรีตมีการไหล (Slump flow) ที่ต่ำ ทั้งนี้จากการทดลองพบว่า เถ้าลอยสามารถช่วยปรับปรุงเรื่องความสามารถในการทำงานของคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมหินฝุ่นได้ ปริมาณส่วนละเอียดที่อยู่ในหินฝุ่นจะไม่ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของคอนกรีตกำลังอัดสูง เหตุผลหลักคือ ปริมาณส่วนละเอียดจะช่วยเพิ่มความเหนียว ซึ่งจะชดเชยกับจุดอ่อนของหินฝุ่นที่มีพื้นผิวที่ขรุขระ โดยช่วยลดแรงเสียดทานของหินและหินฝุ่น ปรับปรุงความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสด ขณะเดียวกัน ซีเมนต์ เถ้าลอย และปริมาณส่วนละเอียดที่อยู่ในหินฝุ่น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีต ทำให้ลดช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคในคอนกรีตได้ (Mingkai et al., 2008)

## 2) อิทธิพลด้านความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต

ที่ค่าความชื้นเหลวของคอนกรีตเดียวกัน มวลละเอียดที่มีอนุภาครูปร่างกลมและมน จะมีความต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่ามวลละเอียดที่มีอนุภาครูปร่างเป็นเหลี่ยมและมุม (Tasawa et al., 1989) และจากงานวิจัยการศึกษาผลกระทบของรูปร่างอนุภาคของมวลละเอียดและมวลหยาบที่ส่งผลต่อความต้องการน้ำในคอนกรีตของ Wills

et al. (1967) พบว่ารูปร่างของมวลละเอียดจะส่งผลต่อความต้องการน้ำในส่วนผสมคอนกรีต และมอร์ต้ามากกว่ามวลรวมหยาบ

### 3) อิทธิพลด้านการเฝื่อนน้ำ

หินฝุ่นที่มีดัชนีความแบนสูง ประกอบกับการแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ของอนุภาค หินฝุ่นจะมีผลต่อเรื่องการเฝื่อนของน้ำ (Safiuddin et al., 2007) และจากงานวิจัยของ Hudson et al. (1997) พบว่าการใช้หินฝุ่นที่มีปริมาณส่วนละเอียดขนาดเล็กกว่า  $75 \mu\text{m}$  ในปริมาณสูง จะช่วยลดการเฝื่อนน้ำ (Bleeding) และการแยกตัว (segregation) ของคอนกรีตได้

นอกจากนี้อนุภาครูปร่างของมวลละเอียดจะส่งผลต่อการเฝื่อนน้ำของ คอนกรีตเช่นกัน ทั้งนี้ที่ปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตเท่ากัน รูปร่างของอนุภาคของมวล ละเอียดที่กลมและมนจะมีผลทำให้คอนกรีตมีอัตราการเฝื่อนน้ำสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลละเอียด ที่มีรูปร่างอนุภาคเป็นเหลี่ยมและมุม ซึ่งเป็นผลมาจากรูปร่างที่กลมทำให้มีแรงต้านทานน้อยใน การเคลื่อนที่ของน้ำที่เฝื่อน ดังนั้นน้ำที่เฝื่อนจะไม่ถูกสะสมอยู่ข้างใต้มวลรวมแต่จะลอยขึ้นมา ด้านบนผิวคอนกรีต แต่อนุภาครูปร่างของมวลละเอียดที่มีความเป็นมุมมากขึ้น จะเกิดการ ต้านทานการไหลของปริมาณน้ำที่เฝื่อนเพิ่มขึ้น (Tasawa et al., 1989)

## 3.2 สภาพคอนกรีตแข็งตัวแล้ว

### 1) อิทธิพลด้านกำลังอัด

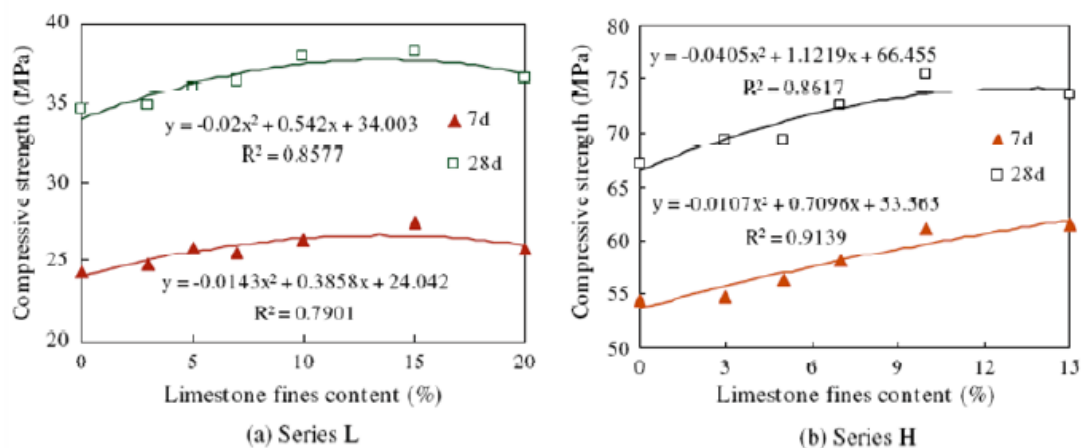
ลักษณะของอนุภาคหินฝุ่นที่มีดัชนีความแบนสูง จะส่งผลเสียต่อกำลังอัดของ คอนกรีต (Safiuddin et al., 2007) และจากงานวิจัยของ Tasawa et al. (1989) พบว่าส่วนผสม คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน คอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดที่มีรูปร่างอนุภาคกลม มน จะให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดที่มีรูปร่างอนุภาคเป็นเหลี่ยมและมุม เป็นผลมาจากมวลละเอียดที่มีรูปร่างอนุภาคกลมและมนจะมีอัตราการเฝื่อนของน้ำมากและ มีปริมาณน้ำจำนวนมากที่สะสมอยู่ใต้มวลรวมหยาบ ซึ่งทำให้ลดการยึดเกาะระหว่างมอร์ต้า กับมวลรวมหยาบ

การทดสอบส่วนผสมคอนกรีต 3 ชั้นคุณภาพ จากวิธีการออกแบบ 4 วิธี เพื่อ เปรียบเทียบส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติกับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นทดแทน ทรายธรรมชาติทั้งหมดในผลงานวิจัยของ Ilango et al. (2008) พบว่าส่วนผสมที่มีการใช้ หินฝุ่นทดแทนทรายธรรมชาติทั้งหมดในทุกวิธีการออกแบบและทุกชั้นคุณภาพให้ค่ากำลังอัด คอนกรีตที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต ทั้งที่กำลังอัดคอนกรีตที่ อายุ 7 วัน และกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยมีค่ากำลังอัดสูงชันประมาณ 10 - 15%

นอกจากนี้ค่ากำลังดัด (Flexural Strength) ของคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมหินฝุ่นทดแทนทรายยังมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายธรรมชาติเป็นส่วนผสมอีกด้วย

Mingkai et al. (2008) พบว่าคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมหินฝุ่น จะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมทรายธรรมชาติ โดยเมื่อปริมาณส่วนละเอียดของหินฝุ่นเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก กำลังอัดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าไม่ใส่เถ้าลอย กำลังอัดก็มีแนวโน้มที่จะลดลงเช่นกัน ปริมาณส่วนละเอียดที่อยู่ในหินฝุ่นจะช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมหินฝุ่นได้ แต่ถ้ามีการผสมเถ้าลอยในคอนกรีตกำลังสูง ปริมาณส่วนละเอียดที่อยู่ในหินฝุ่นจะส่งผลต่อกำลังอัดเล็กน้อย ปริมาณส่วนละเอียดของหินฝุ่นจะสามารถปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตกำลังอัดสูงได้อย่างชัดเจน เพราะว่ามีปริมาณส่วนละเอียดจะมีปฏิกิริยาของการเติมเต็มของช่องว่างในคอนกรีต และทำให้เกิดการปรับปรุงเรื่องความสามารถในการอัดแน่นของโครงสร้างคอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

การทดลองส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัดต่ำและกำลังอัดสูงโดยการใช้หินฝุ่นที่มีปริมาณส่วนละเอียด (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด  $75 \mu\text{m}$ ) ที่แตกต่างกันในผลงานวิจัยของ Beixing et al. (2009) พบว่าโดยส่วนใหญ่ผลจากการใช้ปริมาณส่วนละเอียดของหินฝุ่นที่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ในส่วนผสมคอนกรีต ดังภาพ 25 จะช่วยปรับปรุงกำลังอัดคอนกรีตให้เพิ่มขึ้นได้ โดยอนุภาคของส่วนละเอียดของหินฝุ่นจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสและทำปฏิกิริยายากับ CH และ C - S - H ในช่วงอายุไฮเดรชันเริ่มต้น และจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของเม็ดซีเมนต์โดยเฉพาะ  $\text{C}_3\text{S}$  และ Carbo aluminates คือ การประกอบเป็นรูปร่างระหว่างปฏิกิริยาระหว่างส่วนละเอียดของหินฝุ่น กับ  $\text{C}_3\text{A}$  ช่วยให้เกิดการปรับปรุงกำลังอัดในช่วงอายุเริ่มต้นและส่วนละเอียด (Micro fines) สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมและช่วยปรับปรุงทำให้คอนกรีตมีความแน่น ทั้งยังช่วยเพิ่มความแน่นของเพสต์ และช่วงรอยต่อระหว่างมวลรวมในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วอีกด้วย



ภาพ 25 อิทธิพลของปริมาณส่วนละเอียด (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด  $75 \mu\text{m}$ ) ที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตกำลังอัดต่ำ (a) และคอนกรีตกำลังอัดสูง (b)

ที่มา : Beixing et al., 2009

ส่วนละเอียดของหินที่มีอนุภาคเล็กกว่า  $75 \mu\text{m}$  ส่งผลเรื่องกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 3 วันมากกว่าปกติ เนื่องจากกลไกของ Partially Neutralization ของฝุ่นหินร่วมกับ  $\text{C}_3\text{S}$  ในปูนซีเมนต์ และกำลังอัดในช่วง 7 วัน และ 28 มีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากกลไกของการอัดตัวของอนุภาคขนาดเล็กในช่องว่างของคอนกรีต (Filler effect) และการลดการเอี่ยมภายใน (Internal Bleeding) ทำให้บริเวณรอยต่อถ่ายแรง (Transition Zone) มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานเพิ่มมากขึ้น (Jochen et al., 2005)

จากงานวิจัยของ Almeida et al. (2007) พบว่าประโยชน์จากการใช้ปริมาณส่วนละเอียดหรือฝุ่นหินในฐานะเป็นปฏิกิริยาการเติมเต็ม (Micro filler effect) ที่ปริมาณส่วนละเอียดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของมวลรวมในการผสมคอนกรีต นอกจากจะช่วยให้กำลังอัดสูงขึ้น ยังจะให้ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 14.3 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ส่วนละเอียด ทั้งนี้ในคอนกรีตที่มีปริมาณส่วนละเอียดมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของมวลรวม จะส่งผลให้กำลังอัดลดลง

## 2) อิทธิพลด้านโมดูลัสความยืดหยุ่น

Mingkai et al. (2008) พบว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตจะสูงขึ้นตามลักษณะของจำนวนมวลรวม ความหนาแน่น และกำลังอัด ทั้งนี้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

ของคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมหินฝุ่นจะลดลง เมื่อมีปริมาณส่วนละเอียดในหินฝุ่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม คอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมหินฝุ่นมีปริมาณส่วนละเอียดอยู่ปานกลาง จะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมจากทรายธรรมชาติ การเพิ่มขึ้นของปริมาณส่วนละเอียด จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณส่วนละเอียดสูงเกินไปจะไปสู่ปริมาณเพลสต์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย และจะส่งผลให้โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังอัดสูงมีค่าลดลง

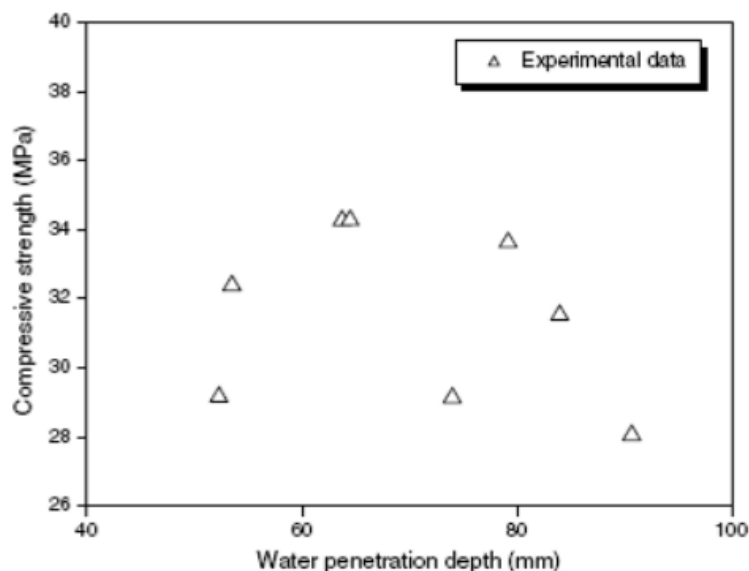
คอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดที่มีรูปร่างอนุภาคกลมและมน จะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมและมุม ที่กำลังอัดเดียวกัน ทั้งนี้เป็นผลจากคอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมและมุม มีสัดส่วนของแข็งต่อปริมาตรต่ำกว่าการใช้มวลละเอียดที่มีรูปร่างอนุภาคกลมและมน ทำให้มีปริมาณเพลสต์มาก และมีการเข้มน้ำเกิดขึ้นมาก ทำให้มีปริมาณน้ำสูงขึ้นในคอนกรีตและมอร์ตาร์ ดังนั้น จึงทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลละเอียดที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมและมุมนั้น มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงกว่าการใช้มวลละเอียดที่มีรูปร่างอนุภาคกลมและมน (Tasawa et al., 1989)

#### 4. ความทนทานของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสม

โดยจะแบ่งหัวข้อการศึกษาความทนทานของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสม ออกเป็น 5 หัวข้อ คือ การซึมผ่านของน้ำ การหดตัวแบบแห้ง การต้านทานต่อการขัดสี การเสื่อมสภาพจากสารซัลเฟตและกรด และการซึมผ่านของคลอไรด์

##### 4.1 การซึมผ่านของน้ำ

คอนกรีตที่มีการใช้หินฝุ่นที่มีปริมาณส่วนละเอียด (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด  $75 \mu\text{m}$ ) ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความลึกจากการซึมผ่านของน้ำต่ำกว่าคอนกรีตที่มีการใช้หินฝุ่นที่มีปริมาณส่วนละเอียด (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด  $75 \mu\text{m}$ ) ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เป็นเพราะส่วนละเอียดที่มีอนุภาคเล็กของหินฝุ่นจะไปปรับปรุงโครงสร้างรูพรุนในรอยต่อระหว่างมวลรวมกับเพลสต์ หรือที่เรียกว่า Transition Zone ส่งผลในการช่วยลดการซึมผ่านของน้ำได้ โดยความลึกของการซึมผ่านจะไม่ขึ้นกับกำลังอัด ดังภาพ 26 แต่จะขึ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของโพรงและการกระจายตัวของโพรงในคอนกรีต (Menadi et al., 2009)



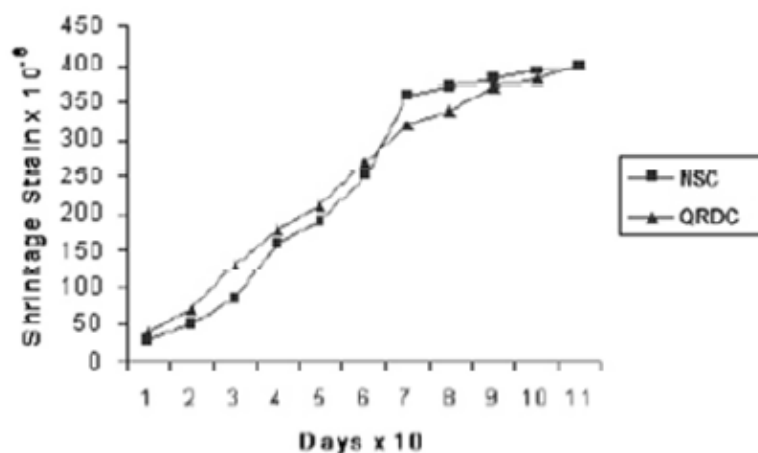
ภาพ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับความลึกจากการซึมผ่านของน้ำ

ที่มา : Menadi et al., 2009

Almeida et al. (2007) พบว่าคอนกรีตที่มีการใช้ปริมาณส่วนละเอียดหรือฝุ่นหินในสัดส่วนไม่เกิน 15% ของหินฝุ่น จะมีปริมาณของรูโพรงและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตต่ำทั้งนี้เป็นผลจากอนุภาคของส่วนละเอียดหรือฝุ่นหินที่เข้าไปอุดรูโพรงที่อยู่ในคอนกรีตที่สภาพคอนกรีตแข็งตัวแล้ว แต่ถ้าใช้ปริมาณส่วนละเอียดหรือฝุ่นหินมากกว่า 15% ของหินฝุ่น จะทำให้มีความทนทานของคอนกรีตลดลง ดังนั้นปริมาณส่วนละเอียดหรือฝุ่นหินสามารถใช้ปรับปรุงคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตได้

#### 4.2 การหดตัวแบบแห้ง

คอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นในส่วนผสมคอนกรีตจะให้ค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสมในช่วงอายุเริ่มแรก แต่ขณะเดียวกันในช่วงอายุนานขึ้นค่าการหดตัวจะใกล้เคียงกัน กับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสม ดังภาพ 27 (Ilangoana et al., 2008)



ภาพ 27 การหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมทรายปกติ (Natural Sand concrete, NSC) กับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่น (Quarry Rock Dust concrete, QRDC)

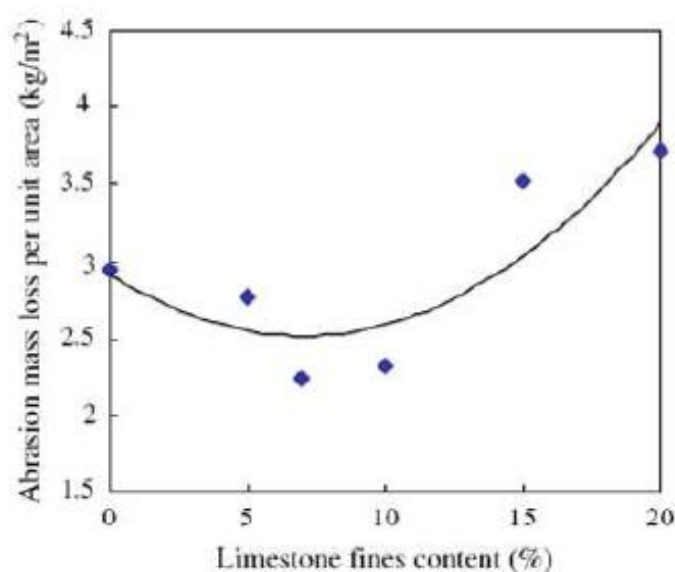
ที่มา : Ilangovana et al., 2008

ผลงานวิจัยของ Mingkai et al. (2008) พบว่าการหดตัวแบบแห้งในช่วงอายุเริ่มต้นของคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมหินฝุ่น จะมีค่ามากกว่าคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมโดยทรายธรรมชาติ เมื่อมีปริมาณส่วนละเอียดในหินฝุ่นเท่ากับหรือมากกว่าร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก แต่ในระยะยาวหลังจาก 7 วัน พบว่าคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมหินฝุ่นจะมีค่าการหดตัวเท่ากับหรือต่ำกว่าคอนกรีตกำลังอัดสูงที่ผสมโดยทรายธรรมชาติ เนื่องจากอิทธิพลของปริมาณส่วนละเอียดต่อการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตกำลังอัดสูงในแต่ละช่วงอายุพบว่า การหดตัวในช่วงอายุเริ่มต้นที่ 1 – 3 วัน เมื่อแทนที่ปริมาณส่วนละเอียดในหินฝุ่นเพิ่มขึ้นจะทำให้การหดตัวในคอนกรีตเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามค่าของการหดตัวที่อายุตั้งแต่ 7 วันขึ้นไป จะมีความแตกต่างที่เปลี่ยนไป เมื่อแทนที่ปริมาณส่วนละเอียดของหินฝุ่นเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งเพิ่มตามปริมาณส่วนละเอียดที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้าหินฝุ่นมีปริมาณส่วนละเอียดน้อยกว่าร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก การหดตัวแบบแห้งจะลดลง อาจเป็นไปได้ว่าการที่มีปริมาณส่วนละเอียดน้อย ส่วนละเอียดจะช่วยทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดขึ้นเร็วขึ้น โดยทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสดึงแคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมออกไซด์มาทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปริมาณส่วนละเอียดจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งก่อให้เกิดวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการหดตัวแบบแห้ง

ตามมา สำหรับในกรณีที่มีการแทนที่ปริมาณส่วนละเอียดของหินฝุ่นมากกว่าร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก จะส่งผลในเรื่องของการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันเล็กน้อย แต่จะมีผลในเรื่องของการเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความแน่นเพิ่มขึ้น

#### 4.3 การต้านทานต่อการขัดสี

จากผลงานวิจัย Beixing et al. (2009) ทำการศึกษาจากการใช้ส่วนละเอียดของหินฝุ่นในปริมาณสูง ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการขัดสีลดลง ดังภาพ 28 เนื่องจากอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคส่วนละเอียดจะอยู่ใกล้กับพื้นผิวคอนกรีต และจากการทดสอบความต้านทานการขัดสีของตัวอย่างคอนกรีต พบว่าถ้าใช้ส่วนละเอียดของหินฝุ่นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะมีการสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสีลดลง อย่างไรก็ตามถ้ามีการใช้ส่วนละเอียดของหินฝุ่นมากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักคอนกรีตจากการขัดสีเพิ่มขึ้น

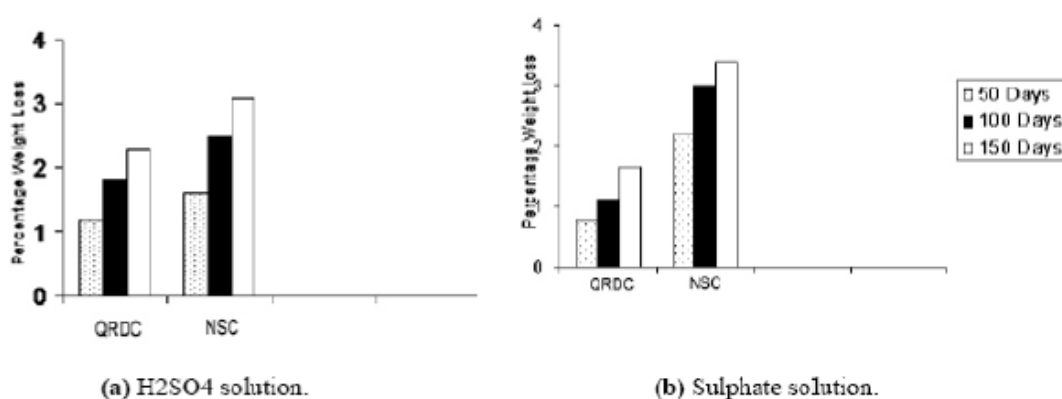


ภาพ 28 อิทธิพลของปริมาณส่วนละเอียด (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด 75  $\mu\text{m}$ ) ที่มีผลต่อการต้านทานการขัดสีที่คอนกรีตอายุ 28 วัน

ที่มา: Beixing et al., 2009

#### 4.4 การเสื่อมสภาพจากสารซัลเฟตและกรด

คอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมทดแทนทรายเป็นมวลรวมละเอียด ภายใต้สภาวะที่ต้องสัมผัสซัลเฟตและกรด จะมีความทนทานดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายผสมเป็นมวลรวมละเอียด ดังภาพ 29 (Ilangoana et al., 2008) และการทดลองการต้านทานต่อซัลเฟตของมอร์ต้าที่ใช้หินฝุ่นในส่วนผสม ในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของ Beixing et al. (2009) พบว่าหลังจากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตใช้ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 10 เดือน ให้ผลกำลังอัดแปรผันตามจำนวนส่วนละเอียดของหินฝุ่นที่ใช้ โดยมีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และการใช้ส่วนละเอียดของหินฝุ่นยังช่วยปรับปรุงให้มอร์ต้ามีความต้านทานต่อสารซัลเฟตได้ดี



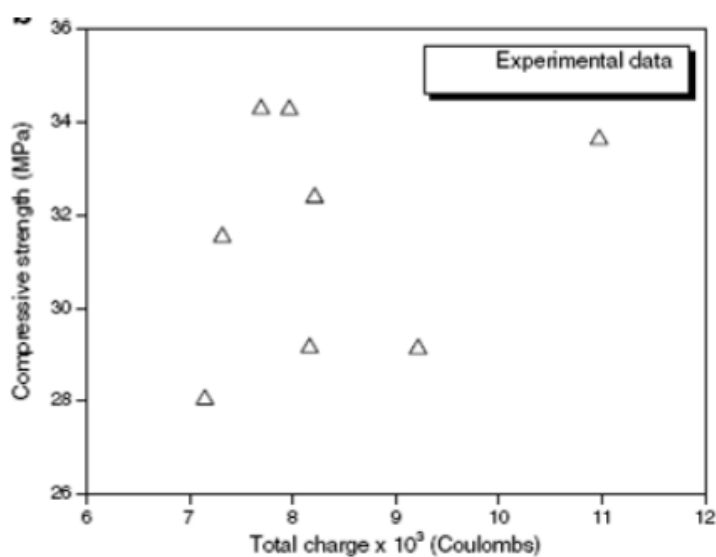
ภาพ 29 การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตจากการนำตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่น (Quarry Rock Dust concrete, QRDC) กับคอนกรีตที่ใช้ทราย (Natural Sand concrete, NSC) แช่ในสารละลาย H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และสารละลายซัลเฟต

ที่มา : Ilangoana et al., 2008

#### 4.5 การซึมผ่านคลอไรด์

ผลของการทดสอบการต้านทานการแผ่ของคลอไรด์ที่อายุคอนกรีต 90 วัน ที่ถูกวัดโดยใช้ประจุไฟฟ้าวิ่งผ่าน (Electric charge passed) ของตัวอย่างคอนกรีต โดยปริมาณ

ประจุไฟฟ้าวัดเป็นคูลอมบ์ (Coulombs) ตามมาตรฐาน ATM C1202 พบว่าผลของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นที่มีปริมาณส่วนละเอียดร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น จะให้ค่าประจุไฟฟ้าวิ่งผ่านสูงกว่าส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นที่มีปริมาณส่วนละเอียดร้อยละ 0 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น แสดงว่ามีการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำ ทั้งนี้จากความสัมพันธ์พบว่า ค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมด (Total charge passed) ที่วิ่งผ่านคอนกรีต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าการซึมผ่านของคลอไรด์จะไม่มีความสัมพันธ์กับกำลังอัด ดังภาพ 30 (Menadi et al., 2009)



ภาพ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับค่าประจุไฟฟ้าทั้งหมด (Total Charge passed) สำหรับตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 90 วัน

ที่มา : Menadi et al., 2009

#### 5. ผลพลอยได้จากการนำหินฝุ่นมาใช้ในงานคอนกรีต

เนื่องจากหินฝุ่นเป็นของที่เหลือจากกระบวนการโม่หิน มีการนำไปใช้ประโยชน์น้อย ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ส่วนใหญ่แล้วจะนำไปใช้ในงานก่อสร้างประเภทถนน โดยนำผสมแอสฟัลต์และถมเป็นชั้นรองพื้นทาง นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อก แต่โดยรวมแล้วยังมีการนำหินฝุ่นไปใช้งานไม่เพียงพอต่อผลผลิตที่เหลือออกมาจากการบดย่อยหินก่อสร้าง ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้โรงโม่หินในแต่ละที่ต้องทำการหาที่เก็บกองหินฝุ่น

ทิ้งไว้หลายแสนตันต่อปี โรงโม่บางแห่งมีการกองเก็บหินฝุ่นไว้นานหลายปี เนื่องจากไม่มีความต้องการจากตลาด ด้วยเหตุนี้ราคาต้นทุนค่าเนื้อของหินฝุ่นจึงถูกกว่าราคาค่าเนื้อของหินก่อสร้างเกือบร้อยละ 60 ของราคาค่าเนื้อหินก่อสร้าง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของโรงโม่หิน และเมื่อนำราคาหินฝุ่นมาเทียบกับราคาทราย พบว่าราคาค่าเนื้อของหินฝุ่นถูกกว่าราคาค่าเนื้อของทรายถึงร้อยละ 65 ของราคาค่าเนื้อทราย ดังนั้นการนำหินฝุ่นมาใช้ในการผสมคอนกรีตโดยใช้ทดแทนทรายในฐานะมวลรวมละเอียด จะส่งผลให้ต้นทุนคอนกรีตลดลงได้

หินฝุ่น ที่เหลือจากกระบวนการผลิตหิน โดยทั่วไปมีขนาดอนุภาคเทียบเท่ากับทราย แต่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับหิน โดยจะมีขนาดรูปร่างเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร จากผลงานวิจัยของ Beixing et al. (2009) พบว่า หินฝุ่นจะแตกต่างจากทรายธรรมชาติในเรื่องของอนุภาครูปร่าง พื้นผิวและขนาดคละ โดยมีปริมาณส่วนละเอียดอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงขนาด 75  $\mu\text{m}$ ) โดยทั่วไปหินฝุ่นจะมีอนุภาคขนาดเล็ก ในทางตรงกันข้ามส่วนละเอียดในทรายจะมีลักษณะเป็นดินเหนียว หรือเป็นอนุภาคที่ก่อให้เกิดอันตรายเมื่อนำมาใช้ผสมคอนกรีต ทั้งนี้หินฝุ่นถูกพิจารณาเป็นวัสดุที่ไม่มีประโยชน์ เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่สามารถกำจัดได้ การผสมคอนกรีตโดยใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมไม่เพียงแต่เป็นการลดความต้องการใช้ทรายธรรมชาติเท่านั้น แต่ยังช่วยเรื่องการรักษาสีสิ่งแวดล้อม และยังมีส่วนช่วยลดต้นทุนของคอนกรีตอีกด้วย

อนุภาคโดยปกติที่จะเรียกว่าฝุ่นนั้น จะมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 1 - 10,000  $\mu\text{m}$  หรือโดยส่วนใหญ่จะมีสัดส่วนอยู่ที่ขนาด PM - 10 (อนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10  $\mu\text{m}$  หรือน้อยกว่า) โดยฝุ่นเกิดจากการทำเหมือง, การก่อสร้าง, การทำฟาร์มปศุสัตว์ และกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง ดังนั้นจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ที่เกี่ยวกับการหายใจ (Hilary et al., 2006) จากผลการสำรวจของ Love et al. (1997) พบว่าผู้ที่รับฝุ่นผ่านระบบทางเดินหายใจ จากผู้ที่ทำงานในเมืองถ่านหิน 9 แห่งในสหราชอาณาจักร มีอาการหอบหืดและอาการหลอดลมอักเสบเรื้อรัง และจาก The International Agency for Research on Cancer, IARC (1997) พบว่าแร่ควอตซ์ในฝุ่นมีโอกาสทำให้เกิดมะเร็งได้ ถ้ามีการรับผ่านเข้าไปทางระบบทางเดินหายใจ ดังนั้น การนำหินฝุ่นมาใช้งานให้เกิดประโยชน์นอกจากจะทำให้ลดต้นทุนคอนกรีตแล้ว ยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ปัญหาสุขภาพชีวิตของชุมชนบริเวณเหมืองหิน และปัญหาฝุ่นหินจากอุตสาหกรรมโม่หินอีกด้วย

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ใช้หินปูนเป็นส่วนผสม

บุรฉัตร ฉัตรวีระ, เรวัตต์ หนายมี และณัฐ มากุล (2554) ได้ศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมหินปูนแอนดิไซต์ จากผลการศึกษาพบว่า มีค่าหน่วยน้ำหนักลดลงเมื่อโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้น และการแทนที่หินปูนแอนดิไซต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดลงของหน่วยน้ำหนัก ส่งผลให้มีค่าความยวบตัว แบบไหลตัวได้ไม่แตกต่างไปจากคอนกรีตมวลเบาผสมทรายแม่น้ำล่วน

รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์ และเอกรัตน์ รวยรวย (2555) ได้ศึกษาการใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอยถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาจากปูนอะลูมิเนียม และผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ จากผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบาผสมปูนอะลูมิเนียม คือ อัตราส่วนที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยปูนขาวและเถ้าลอยที่มีอัตราส่วน 36:65 ในปริมาณร้อยละ 75 โดยผสมกับปูนอะลูมิเนียมในปริมาณร้อยละ 20 แทนปูนขาวด้วยปูนดิบในปริมาณร้อยละ 10 ได้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 788 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งค่ากำลังอัด และค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1505 – 2541 และเมื่อทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า คอนกรีตมวลเบาที่ผลิตได้มีค่าการนำความร้อนต่ำ โดยมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.236 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน ดังนั้น สามารถที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นผนังสำหรับบ้านพักอาศัยได้

ธีระ เทพพรหม (2552) ได้ศึกษากำลังอัดคอนกรีตโดยใช้หินปูนเป็นส่วนผสมแทนทรายหยาบ กรณีศึกษา หินปูนโรงโม่หิน นราธิวาสโรงโม่หิน จากผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ผสมหินปูนจากโรงโม่หิน นราธิวาสโรงโม่หินแทนทรายหยาบในแต่ละอัตราส่วนทั้งสองค่าการออกแบบ มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 0.99 ถึง 1.07 เท่า ของคอนกรีตที่ผสมด้วยทรายหยาบจากแม่น้ำคล้ายกับเป็นมวลรวมละเอียดทั้งหมด ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น จึงถือได้ว่าหินปูนจากโรงโม่หิน นราธิวาสโรงโม่หิน สามารถใช้แทนทรายหยาบในการทำคอนกรีต โครงสร้างทั่วไปได้

จากการศึกษาการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาผสมผงปูนหินจากโรงโม่หิน โดยอภิวิชญ์ พูลสง (2556) ได้มีการนำเอาผงปูนหินมาที่ได้จากโรงโม่มาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20 และ 30 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4, 0.5 และ 0.6 ในอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่า 1:1 จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและอัตราการดูดซึมน้ำพบว่า ที่การแทนที่ของหินปูนมากจะได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลง ส่วนอัตราการดูดซึมน้ำพบว่าที่ค่าความ

หนาแน่นเพิ่มมากขึ้น จะทำให้อัตราการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากมีช่องว่างอากาศน้อย โดยอัตราการดูดซึมน้ำที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงร้อยละ 4 – 18

เนรมิตร เหลลาภา และวัจนวงศ์ กรีพละ (2558) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูโลสผสมหินฝุ่นและหินปูน จากการศึกษาพบว่า สามารถนำหินฝุ่นมาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 30 สามารถนำหินปูนมาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 20 และสามารถนำทั้งหินฝุ่นและหินปูนมาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 40 โดยส่วนผสมที่เหมาะสมคือหินฝุ่นแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 และหินปูนแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ผ่านคุณสมบัติกำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ ตลอดจนค่าการนำความร้อนมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2601 – 2556) นอกจากนี้ยังมีค่าการนำความร้อนอยู่ที่ 0.227 วัตต์/เมตร.เคลวิน และสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตได้สูงถึงร้อยละ 29 (12.42 บาท/ก้อน)

Siong Kang Lim et al. (2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ของเสียจากเหมืองหินที่มีปริมาณสูงในการผลิตคอนกรีตโฟมที่มีน้ำหนักเบา โดยการนำฝุ่นหินที่ได้จากการเจียรไนหินที่มีปริมาณมากส่งต่อสภาพแวดล้อมทั้งในและนอกสถานที่ มาใช้ประโยชน์ในการแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 75 และ 100 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.52, 0.54, 0.56 และ 0.58 ที่ความหนาแน่น  $1,300 \pm 50$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และใช้อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ / ฟิลเลอร์คงที่เท่ากับ 1 : 1 จากผลการทดสอบพบว่า การแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นส่งผลให้มีกำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทราย 100% มีโครงสร้างจุลภาคที่หนาแน่นขึ้น และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยการใช้วัสดุเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการดำเนินการทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเต็มพองอากาศ โดยใช้หินฟูนเป็นส่วนผสมแทนที่ทรายละเอียด วัสดุ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ และขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างตามมาตรฐานต่าง ๆ ซึ่งการวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาวิจัย คือ การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเต็มพองอากาศ โดยใช้หินฟูนเป็นส่วนผสมแทนที่ทรายละเอียด ซึ่งจะประกอบไปด้วยการศึกษาความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง ในช่วง 801 – 900, 901 – 1,000 และ 1,100 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และการหัดตัวแบบแห้ง

#### วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. น้ำ (Water) ใช้น้ำสะอาดที่ปราศจากสารเจือปนที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต
3. มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ใช้ทรายละเอียดร่อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐานเบอร์ 30 ค้างตะแกรงขนาดมาตรฐานเบอร์ 100
4. หินฟูน ใช้สภาพตามความเป็นจริง
5. น้ำยาโฟม (Forming agent)



ภาพ 31 หินฝุ่น



ภาพ 32 ทรายละเอียด



ภาพ 33 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ชุดเครื่องทำโฟมและอัดอากาศ
2. ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด
3. เครื่องชั่งดิจิตอล มีความละเอียด 0.001 กิโลกรัม
4. ตู้อบปรับอุณหภูมิ
5. เครื่องผสมคอนกรีต
6. แบบหล่อคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ แบบหล่อสำหรับการทดสอบกำลังอัดทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร แบบหล่อสำหรับการนำความร้อนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 x 20 เซนติเมตร และแบบหล่อสำหรับการทดสอบหาค่าการหดตัวขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร
7. เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต Controls testing machine Model A39C02
8. เครื่องมือทดสอบหาค่าการยืดหดตัวของคอนกรีต (Length Comparator) ความละเอียดที่วัดได้ 0.001 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C157
9. พลาสติกหุ้ม
10. เวอร์เนียคาลิเปอร์

11. ชุดทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ตามมาตรฐาน ASTM D5334 – 14
12. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Drying Shrinkage Testing Chamber)



ภาพ 34 ชุดเครื่องทำโฟมและอัดอากาศ



ภาพ 35 น้ำยาสร้างโฟม (Foaming agent)



ภาพ 36 ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดและการดูตซีเมนต์น้ำ



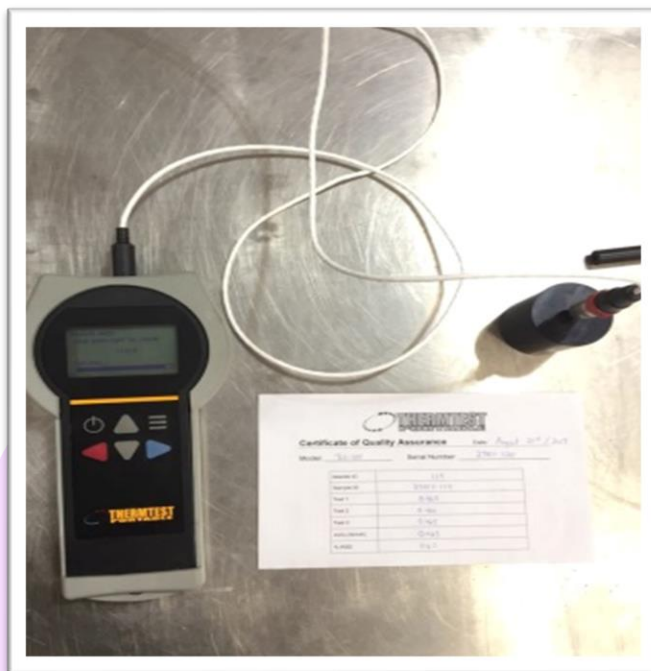
ภาพ 37 โม่ผสมคอนกรีต



ภาพ 38 เครื่องชั่งดิจิตอล มีความละเอียด 0.001 กิโลกรัม



ภาพ 39 ตู้อบปรับอุณหภูมิ



ภาพ 40 ชุดทดสอบค่าการนำความร้อน



ภาพ 41 แบบหล่อตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดทรงลูกบาศก์ขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร และแบบหล่อตัวอย่างการทดสอบนำความร้อนทรงกระบอกขนาด  $\varnothing 10 \times 20$  เซนติเมตร



ภาพ 42 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



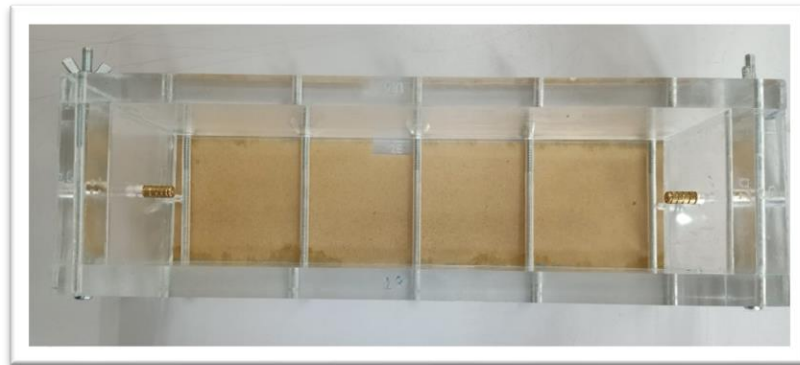
ภาพ 43 พลาสติกคลุม



ภาพ 44 เวอร์เนียคาลิปเปอร์



ภาพ 45 เครื่องมือทดสอบหาค่าการยืดหดตัวของคอนกรีต (Length Comparators)



ภาพ 46 แบบหล่อตัวอย่างการทดสอบหดตัวขนาด 7.5x7.5x28.5 เซนติเมตร



ภาพ 47 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Drying Shrinkage Testing Chamber)

## การเตรียมสารเคมีตัวอย่าง

### 1. การเตรียมน้ำยาโฟมผสมมวลเบา

น้ำยาโฟม (Forming agent) ที่ใช้ในการสร้างฟองโฟมจะใช้ในอัตราส่วนน้ำยาโฟมต่อน้ำ เท่ากับ 1:30 โดยปริมาตรทุกอัตราส่วน ซึ่งให้โฟมมีการขยายตัวประมาณ 15 เท่าที่อัตราการไหลของฟองโฟมเหลวประมาณ 4.25 ลิตรต่อวินาที

#### 1.1 ทำการเตรียมน้ำยาโฟมและน้ำ โดยชั่งในอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้



ภาพ 48 น้ำยาโฟม (Forming agent) กับน้ำ

1.2 ทำการผสมน้ำยาโฟมกับน้ำแล้วคนให้เข้ากันพอดี จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 1 นาทีเพื่อให้เกิดการเซ็ตตัวของน้ำยาโฟมกับน้ำ



ภาพ 49 ผสมน้ำยาโฟม (Forming agent) กับน้ำ

1.3 เตรียมน้ำยาโฟมเพื่อใส่ลงในเครื่องกำเนิดฟองอากาศ แล้วอัดด้วยแรงดันลมที่ได้จากปั๊มลมที่ความดัน 7 บาร์



ภาพ 50 เทน้ำยาโฟมที่เตรียมไว้ลงในเครื่องกำเนิดฟองอากาศเพื่อทำให้เกิดโฟม

### การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

การผสมตัวอย่างที่ได้ออกแบบไว้จำเป็นต้องทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่นำมาใช้ในการผสมเป็นคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลางแบบเติมฟองอากาศ ซึ่งได้แก่

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
  - ทดสอบความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐาน ASTM C188 – 95
2. หินฝุ่นและทราย
  - ทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C128
  - ทดสอบการวิเคราะห์ขนาดของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C136
3. ทรายละเอียด
  - ทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C128
  - ทดสอบการวิเคราะห์ขนาดของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C136

### การวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

มาตรฐาน ASTM C136 ได้กำหนดส่วนขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานคอนกรีตไว้ ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C136

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน (มิลลิเมตร)	ร้อยละของวัสดุที่ผ่านตะแกรง
4.75 (No.4)	95–100
2.36 (No.8)	80–100
1.18 (No.16)	50–85
0.68 (No.30)	25–60
0.30 (No.50)	5–30
0.15 (No.100)	0–10

ที่มา : ASTM C136

### ส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การวิจัยครั้งนี้จะทำการควบคุมปริมาณของเหลวต่อวัสดุตั้งต้น โดยจะกำหนดอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุตั้งต้น (w/c) เท่ากับ 0.6 และมวลรวมละเอียดที่ใช้คือทรายละเอียด โดยทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 100 หินฟุ้งตามสภาพความเป็นจริง โดยการวิจัยครั้งนี้จะทำการแทนที่ทรายด้วยหินฟุ้งในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นมวลรวมละเอียด และทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ฟิล์มพลาสติกใฝ่พันรอบตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างทดสอบให้มิดชิด ที่อายุการบ่ม 7 วัน, 28 วัน แล้วจึงนำตัวอย่างทดสอบมาทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิดไม่รับน้ำหนัก (มอก. 2601 - 2556) การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

### สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้แทนชนิดหรือช่วงของความหนาแน่นแห้งและอายุของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ดังนี้

C9 - OMS100S, C9 - 25MS75S, C9 - 50MS50S, C9 - 75MS25S, C9 - 100MS0S,  
C10 - OMS100S, C10 - 25MS75S, C10 - 50MS50S, C10 - 75MS25S, C10 - 100MS0S,  
C12 - OMS100S, C12 - 25MS75S, C12 - 50MS50S, C12 - 75MS25S และ C12 - 100MS0S

โดยที่ C9 หมายถึง ความหนาแน่นแห้งในช่วง 801 - 900 kg/m<sup>3</sup>

C10 หมายถึง ความหนาแน่นแห้งในช่วง 901 - 1,000 kg/m<sup>3</sup>

C12 หมายถึง ความหนาแน่นแห้งในช่วง 1,001 - 1,200 kg/m<sup>3</sup>

25MS75S หมายถึง อัตราส่วนวัสดุผสมหินฟุ้งต่อทรายละเอียดที่ 25:75

ตัวอย่างในการอ่านสัญลักษณ์ เช่น C9 - 25MS75S หมายถึง ส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่นแห้งในช่วง 801 - 900 kg/m<sup>3</sup> และมีอัตราส่วนวัสดุผสมหินฟุ้งต่อทรายละเอียดที่ 25:75

### อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

ปริมาณส่วนผสมในการผลิตบล็อกคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศเป็นไปตามความหนาแน่นแห้งที่ใช้ออกแบบ คือ ในช่วง 801 - 900, 901 - 1,000 และ 1,001 - 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังตาราง 5, 6 และ 7

ตาราง 5 ส่วนผสมความหนาแน่นที่ใช้ออกแบบ 801-900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ลำดับ	W/C	ส่วนผสมวัสดุ				ส่วนผสมน้ำกับ น้ำยาโฟม	
		PC (kg)	MS (kg)	S (kg)	W (kg)	Form agent (liter)	Water for mixed foam (liter)
C9-0MS100S	0.6	585.000	583.655	0.000	352.346	3.805	76.100
C9-25MS75S	0.6	585.000	437.741	144.846	352.009	3.793	75.856
C9-50S50MS	0.6	585.000	291.827	289.692	351.673	3.781	75.611
C9-75MS25S	0.6	580.000	144.667	430.824	348.334	3.736	74.722
C9-100MS0S	0.6	580.000	0.000	574.432	348.000	3.724	74.480

ตาราง 6 ส่วนผสมความหนาแน่นที่ใช้ออกแบบ 901-1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ลำดับ	W/C	ส่วนผสมวัสดุ				ส่วนผสมน้ำกับ น้ำยาโฟม	
		PC (kg)	MS (kg)	S (kg)	W (kg)	Form agent (liter)	Water for mixed with form agent (liter)
C10-0MS100S	0.6	585.000	583.655	0.000	352.346	3.100	62.003
C10-25MS75S	0.6	585.000	437.741	144.846	352.009	3.088	61.760
C10-50MS50S	0.6	585.000	291.827	289.692	351.673	3.076	61.516
C10-75MS25S	0.6	580.000	144.667	430.824	348.334	3.037	60.749
C10-100MS0S	0.6	580.000	0.000	574.432	348.000	3.025	60.508

ตาราง 7 ส่วนผสมความหนาแน่นที่ใช้ออกแบบ 1,001-1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ลำดับ	W/C	ส่วนผสมวัสดุ				ส่วนผสมน้ำกับ น้ำยาโฟม	
		PC (kg)	MS (kg)	S (kg)	W (kg)	Form agent (liter)	Water for mixed with form agent (liter)
C12-0MS100S	0.6	585.000	583.655	0.000	352.346	2.517	50.348
C12-25MS75S	0.6	585.000	437.741	144.846	352.009	2.505	50.105
C12-50MS50S	0.6	585.000	291.827	289.692	351.673	2.493	49.862
C12-75MS25S	0.6	580.000	144.667	430.824	348.334	2.460	49.195
C12-100MS0S	0.6	580.000	0.000	574.432	348.000	2.448	48.955

#### วิธีการและขั้นตอนการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

1. เตรียมตัวอย่างตามอัตราส่วนที่ออกแบบในแต่ละส่วนผสม
2. นำน้ำยาสร้างฟองอากาศที่ได้เตรียมไว้เทลงในเครื่องทำโฟมอัดอากาศ
3. ทำการผสมปูนซีเมนต์ ทรายและหินฝุ่นในเครื่องโมให้เข้ากัน ประมาณ 3 - 5 นาที แล้วจึงใส่น้ำที่เตรียมไว้ มาผสมให้เข้ากัน
4. ปรับแรงดันลมให้อยู่ในช่วง 7 บาร์ แล้วจึงฉีดน้ำยาโฟมลงในเครื่องโมจนหมด ในขณะที่ฉีดโฟมนั้นเครื่องโมผสมก็จะทำการกววนต่อไปอย่างต่อเนื่อง เมื่อสิ้นสุดการฉีดโฟมแล้วจะทำการกววนต่อเป็นเวลาอีก 1 นาที
5. เมื่อน้ำยาโฟมกับซีเมนต์เพสต์เข้ากันดีแล้ว ทำการเทคอนกรีตลงแบบหล่อตามการทดสอบที่เตรียมไว้
6. ทำการเคาะแบบ เพื่อให้คอนกรีตเข้าแบบได้ดี และแต่งผิวหน้าด้วยเกรียงให้เรียบ
7. ทิ้งไว้ประมาณ 15 - 20 นาที จึงทำการหุ้มหน้าแบบหล่อคอนกรีตด้วยฟิล์มพลาสติก
8. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ทำการแกะแบบออก ทำการหุ้มหน้าแบบหล่อคอนกรีตด้วยฟิล์มพลาสติก บ่มจนครบอายุการทดสอบ

### การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบดล็อกมวลเบา

การทดสอบหาความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง

หลังจากบ่มตัวอย่างทดสอบขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร โดยใช้พลาสติกหุ้มเมื่อตัวอย่างทดสอบอายุครบ 7 และ 28 วัน นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 5$  °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างทดสอบมาวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก สามารถคำนวณความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งของชั้นทดสอบจากสมการที่ 1 (มอก.2601 – 2556)

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
 $m$  คือ มวลของชั้นทดสอบ (กิโลกรัม)  
 $v$  คือ ปริมาตรของชั้นทดสอบ (ลูกบาศก์เมตร)

### ตาราง 8 เกณฑ์มาตรฐานความหนาแน่นเชิงปริมาตร

ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้งเฉลี่ย (kg/m <sup>3</sup> )
C6	501 ถึง 600
C7	601 ถึง 700
C8	701 ถึง 800
C9	801 ถึง 900
C10	901 ถึง 1000
C12	1001 ถึง 1200
C14	1201 ถึง 1400
C16	1401 ถึง 1600

ที่มา : มอก.2601-2556

### การทดสอบกำลังรับแรงอัด

หลังจากบ่มตัวอย่างทดสอบขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร โดยใช้ฟิล์มพลาสติกหุ้มจนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน จึงนำไปวัดขนาดพื้นที่หน้าตัดรับแรงอัดโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ จากนั้นนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดโดยเครื่องทดสอบกำลังอัด ทดสอบจนได้ค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อขึ้นทดสอบแตกเสียหาย สามารถคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดได้จากสมการที่ 2 (มอก.2601 – 2556)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

P คือ แรงอัดสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างแตกเสียหาย (กิโลกรัม)

A คือ พื้นที่รับแรงอัดของชิ้นทดสอบ (ตารางเซนติเมตร)

### ตาราง 9 เกณฑ์มาตรฐานความต้านแรงอัดของคอนกรีตบดอัดมวลเบา

ชนิด	ความต้านแรงอัด ไม่น้อยกว่า (kg/cm <sup>2</sup> )
C6	
C7	20.4
C8	
C9	
C10	25.5
C12	
C14	
C16	51.0

ที่มา : มอก.2601-2556



ภาพ 51 ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำ

หลังจากบ่มตัวอย่างทดสอบขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร โดยใช้พลาสติกหุ้ม เมื่อขึ้นทดสอบอายุครบ 7 และ 28 วัน จึงนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  จนมีน้ำหนักคงที่หรือเป็นเวลานานอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักของแต่ละตัวอย่างทดสอบ น้ำหนักที่ได้หลังจากการอบ คือน้ำหนักในสภาพแห้ง จากนั้นนำไปแช่ในน้ำสะอาดให้ผิวน้ำท่วมตัวอย่างทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการยกออก จากนั้นใช้ผ้าชุมน้ำเช็ดที่ผิวที่ละก้อนแล้วชั่งให้เสร็จภายใน 3 นาที น้ำหนักที่ได้หลังจากการแช่ในน้ำ คือน้ำหนักในสภาพเปียก สามารถคำนวณอัตราการดูดซึมน้ำคำนวณได้จากสมการที่ 3 (มอก.2601 - 2556)

$$A = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ A คือ ค่าอัตราการดูดซึมน้ำ (%)

$w_1$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างทดสอบในสภาพแห้ง (กรัม)

$w_2$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างทดสอบในสภาพเปียก (กรัม)

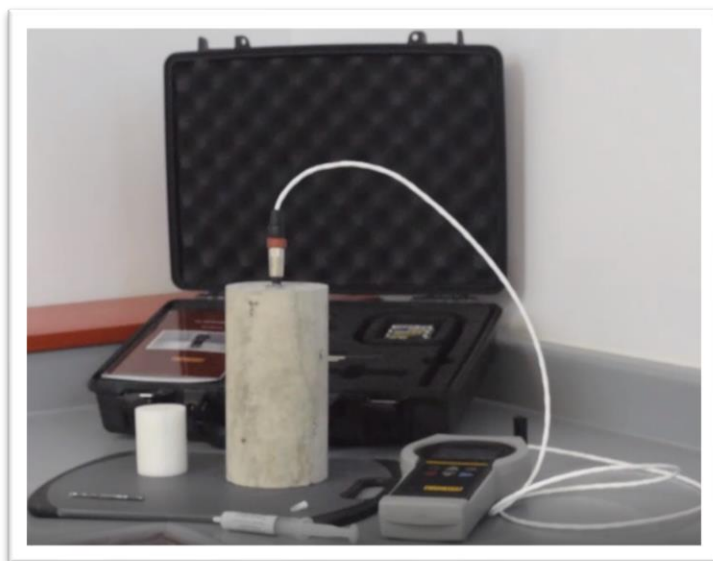
ตาราง 10 เกณฑ์มาตรฐานอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบดบล็อกมวลเบา

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

ที่มา : มอก.2601-2556

การทดสอบการนำความร้อน

หลังจากบ่มตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาด 10 x 20 เซนติเมตร โดยใช้พลาสติกหุ้ม เมื่อขึ้นทดสอบอายุครบ 7 และ 28 วัน นำไปเจาะรูด้านบนและด้านล่างด้วยสว่าน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 10 มิลลิเมตร ความลึก 50 มิลลิเมตร ทำการสอบเทียบเครื่อง Thermal conductivity ตามค่าจากคู่มือ จากนั้นเคลือบซีเมนต์ทดสอบด้วย Thermal compound (ซิลิโคนระบายความร้อน) และใส่ซีเมนต์ลงในตัวอย่างทดสอบ ใช้เครื่อง Thermal conductivity เพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยทดสอบทั้งหมด 6 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง (ASTM D5334 - 14)



ภาพ 52 การทดสอบค่าการนำความร้อน

การทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

การทดสอบการหดตัวแห้ง (Drying shrinkage) ของคอนกรีตเซลลูโลส ใช้แบบหล่อมาตรฐานขนาด  $75 \times 75 \times 285$  มิลลิเมตร พร้อมติดตั้งหัวแท่งเหล็ก (Stud) เพื่อหาค่าการหดตัวแห้งเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง ภายหลังจากอบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำแท่งโลหะความยาวมาตรฐานคงที่ (300 มิลลิเมตร) เซ็ต Zero ที่เครื่องมือทดสอบ จากนั้นนำตัวอย่างมาวัดความยาวที่เครื่องมือทดสอบ ซึ่งจะเป็นค่าความยาวเริ่มต้น จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างบ่มไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ  $23 \pm 2$  °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $50 \pm 4$  ทำการวัดความยาวของตัวอย่างทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง ตามอายุเวลา 7, 28 และ 60 วัน โดยนับจากวันที่ปล่อยให้เกิดการหดตัวแห้ง สมการสำหรับการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของแท่งตัวอย่างทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C157 มีดังนี้

$$\Delta L = \frac{L_t - L_0}{L_G} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ  $\Delta L$  คือ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความยาว ณ อายุใด ๆ

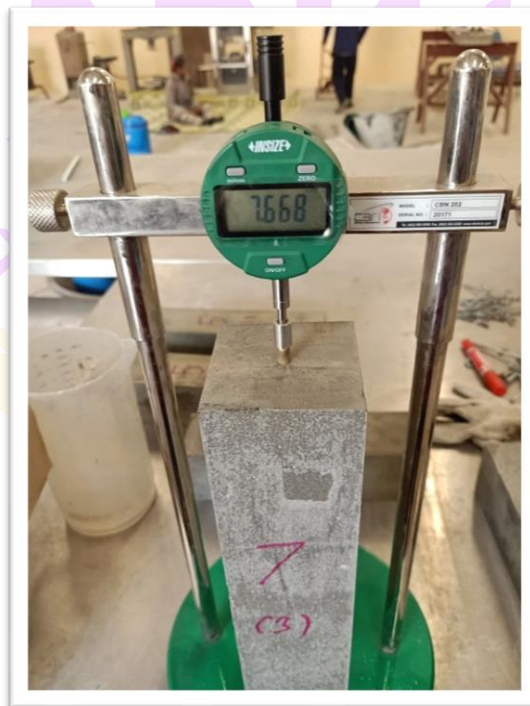
$L_t$  คือ ค่าการวัดความยาวของคอนกรีตที่อายุใด ๆ (มิลลิเมตร)

$L_0$  คือ ค่าการวัดความยาวของคอนกรีตเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

$L_G$  คือ gage length (300 มิลลิเมตร)



ภาพ 53 ตัวอย่างการวัดการหดตัวของแบบแห้ง (1)



ภาพ 54 ตัวอย่างการวัดการหดตัวของแบบแห้ง (2)

### วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบสำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบา

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบการผลิตคอนกรีตโดยใช้หินปูนทดแทนทราย นั้น ส่วนผสมที่ทำการทดลองเป็นเพียงการใช้หินปูนแทนที่ทรายโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงส่วนผสมอื่น ๆ (ปริมาณน้ำ, ปริมาณน้ำยาโฟม และปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในส่วนผสมไม่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนโดยรวมสำหรับใช้ผลิตคอนกรีตมวลเบา อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดเป็นค่าคงที่) สามารถคำนวณต้นทุนวัตถุดิบได้ ดังสมการที่ 5 (ฐิรยศ ธรรมวงษา, 2553)

$$T'_{\text{ส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลง}} = T_{\text{ทราย}} + T_{\text{หินปูน}} \quad (5)$$

เมื่อ	$T'_{\text{ส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลง}}$	คือ	ต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงต่อก่อน (บาท/ลบ.ม.)
	$T_{\text{ทราย}}$	คือ	ต้นทุนทรายต่อก่อน (บาท/ลบ.ม.)
หรือ	=		ราคาทราย (บาท/ลบ.ม.) x ปริมาณทรายที่ใช้ต่อก่อน (ลบ.ม.)
	$T_{\text{หินปูน}}$	คือ	ต้นทุนหินปูนต่อก่อน (บาท/ลบ.ม.)
หรือ	=		ราคาหินปูน (บาท/ลบ.ม.) x ปริมาณหินปูนที่ใช้ต่อก่อน (ลบ.ม.)

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบของคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ได้แก่ การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียด และผลการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศตามมาตรฐาน มอก. 2601 – 2556 ได้แก่ การทดสอบความหนาแน่นแห้ง กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ การทดสอบค่าการนำความร้อน และการหดตัวแบบแห้งเพิ่มเติมอีกด้วย

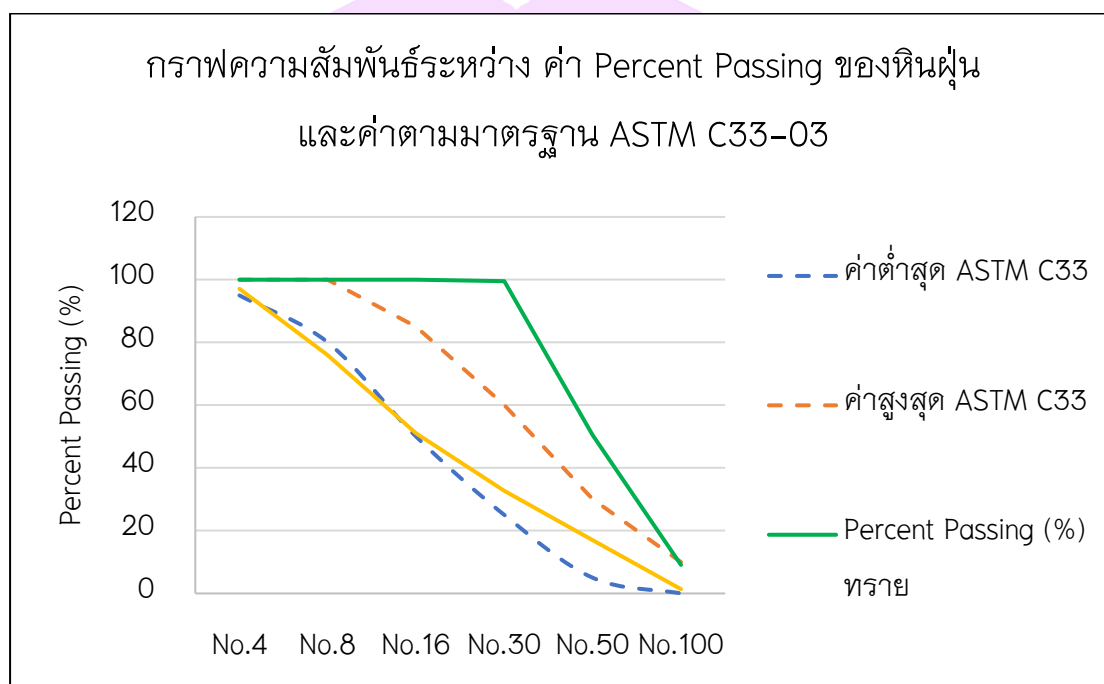
#### คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ทรายละเอียด และหินฟูน

1. การทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C188 จากผลการทดสอบพบว่า ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3.15
2. การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดน้ำของทรายละเอียดที่ทำการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 (ขนาดตะแกรง 0.68 มิลลิเมตร) ค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 (ขนาดตะแกรง 0.15 มิลลิเมตร) และหินฟูนสภาพจริง ทำการวิเคราะห์ขนาดของมวลรวมละเอียดโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงตามมาตรฐาน ASTM C136 ผลการทดสอบเป็นไปตามตาราง 11 ซึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Percent passing ของหินฟูนและค่าตามมาตรฐาน ASTM C136 ดังภาพ 55

ตาราง 11 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

วัสดุ	ความกว้างจำเพาะ	โมดูลัสความละเอียด	ร้อยละการดูดซึมน้ำ
ทรายละเอียด	2.62	1.41	0.23
หินฝุ่นสภาพจริง	2.51	3.25	0.96



ภาพ 55 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Percent passing ของหินฝุ่น และค่าตามมาตรฐานงานคอนกรีต ASTM C33

#### สัญลักษณ์ที่ใช้แทนตัวอย่างทดสอบ

งานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้แทนชนิดหรือช่วงของความหนาแน่นแห้งและอายุของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ดังนี้

C9 – 7D, C9 – 28D, C10 – 7D, C10 – 28D, C12 – 7D และ C12 – 28D

โดยที่ C9 หมายถึง ความหนาแน่นแห้งในช่วง 801 – 900 kg/m<sup>3</sup>

C10 หมายถึง ความหนาแน่นแห้งในช่วง 901 – 1,000 kg/m<sup>3</sup>

C12 หมายถึง ความหนาแน่นแห้งในช่วง 1,001 – 1,200 kg/m<sup>3</sup>

7D และ 28D หมายถึง ที่อายุการบ่ม 7 วันและ 28 วัน

ตัวอย่างในการอ่านสัญลักษณ์ เช่น C9 – 7D หมายถึง ตัวอย่างของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ความหนาแน่นแห้งในช่วง 801 – 900 kg/m<sup>3</sup> และมีอายุการบ่ม 7 วัน

### คุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

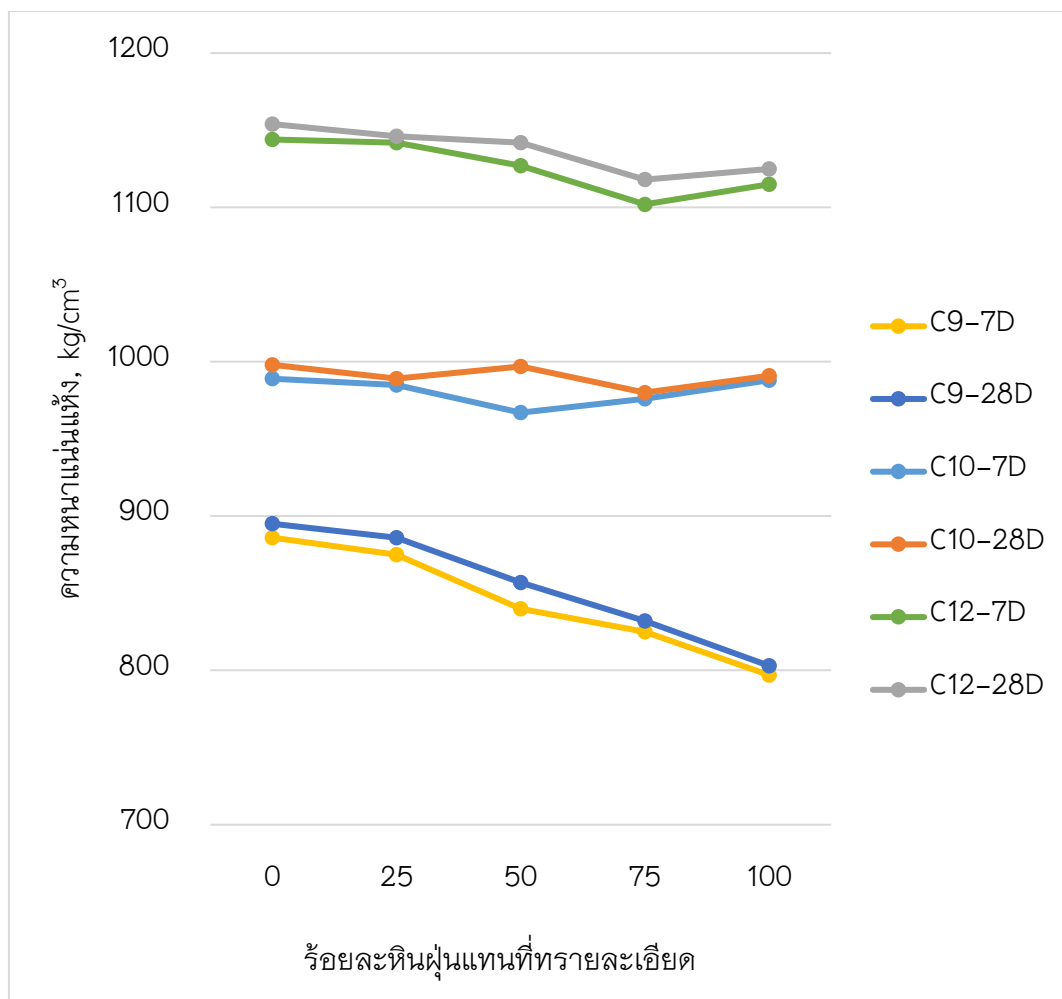
จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ หินปูน และทรายละเอียด เมื่อนำวัสดุต่าง ๆ มาผสมในอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ และทำการบ่มโดยใช้พลาสติกหุ้มเป็นเวลา 7 วัน และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศตามมาตรฐาน มอก.2601 – 2556 ได้แก่ การทดสอบความหนาแน่นแห้ง กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ การทดสอบค่าการนำความร้อน และการหดตัวแบบแห้งเป็นไปดังนี้

#### 1. ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้ง

ในการทดสอบความหนาแน่นแห้งจะทำการทดสอบคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 28 วัน ซึ่งจากผลการทดสอบเป็นไปดังตาราง 12

ตาราง 12 ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในแต่ละชนิดและอายุการบ่ม และสัดส่วนการแทนที่หินปูนในทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

ชนิดและอายุบ่ม	ความหนาแน่นแห้ง (kg/m <sup>3</sup> ) และสัดส่วนการแทนที่หินปูนในทรายละเอียด				
	0%	25%	50%	75%	100%
C9-7D	886	875	840	825	797
C9-28D	895	886	857	832	813
C10-7D	989	985	967	976	988
C10-28D	998	989	977	980	991
C12-7D	1,144	1,142	1,127	1,102	1,115
C12-28D	1,154	1,146	1,142	1,118	1,125



ภาพ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับร้อยละหินปูนแทนที่ที่ทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับร้อยละหินปูนแทนที่ที่ทรายละเอียดในภาพ 56 พบว่า ความหนาแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีอายุการบ่มเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่มีการแทนที่ของหินปูนในทรายละเอียดเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ความหนาแน่นแห้งที่อายุ 28 วัน สามารถแบ่งตามชนิดของความหนาแน่นแห้งในแต่ละช่วงได้ ดังนี้ ในช่วงความหนาแน่นแห้ง 801 – 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 2601 – 2556 คือ คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่จัดอยู่ในชนิด C9 (ตาราง 8) ค่าความหนาแน่นแห้งในช่วง 901 – 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 2601 – 2556 คือ คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ซึ่งจัดอยู่ในชนิด C10 (ตาราง 8) และค่าความหนาแน่นแห้งในช่วง 1,001 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งตาม

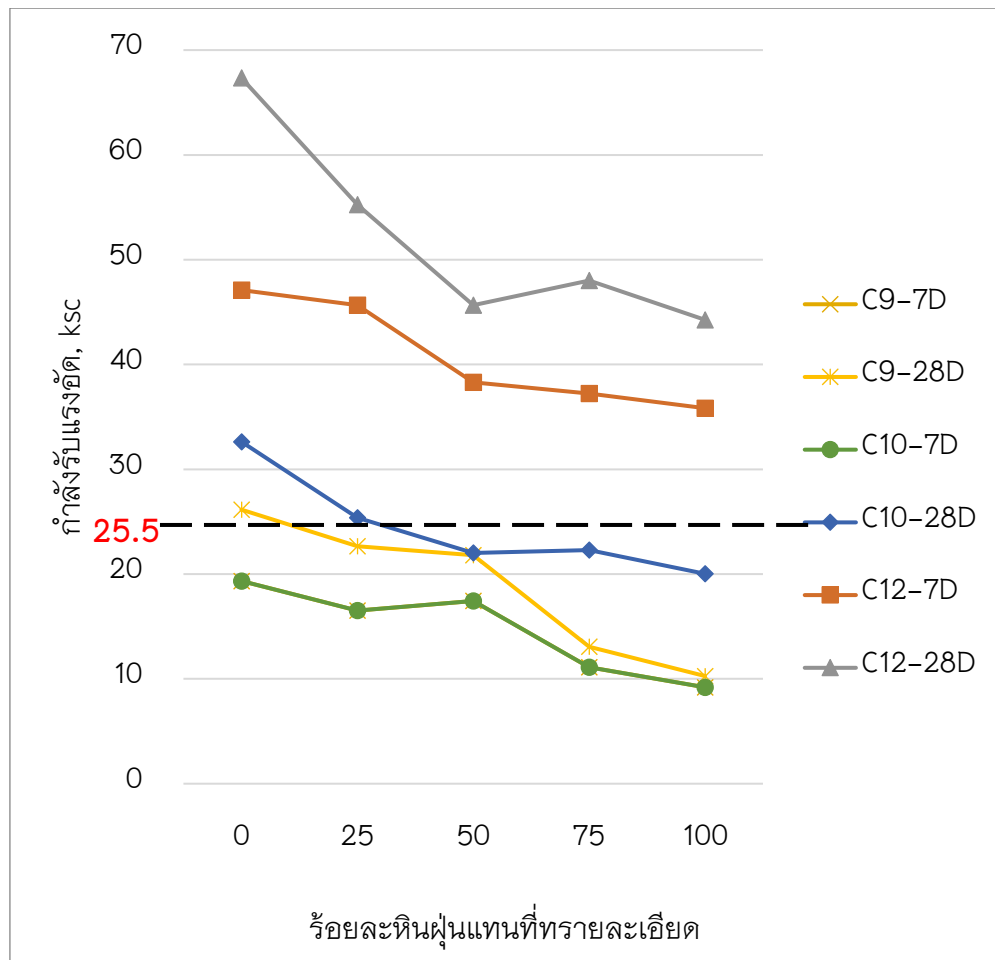
มาตรฐาน มอก.2601 – 2556 คือ คอนกรีตบดล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ซึ่งจัดอยู่ในชนิด C12 (ตาราง 8)

## 2. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดจะทำการทดสอบคอนกรีตบดล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ผสมหินปูนแทนทรายละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 28 วัน ซึ่งผลการทดสอบได้ค่ากำลังรับแรงอัดเป็นไปตามตาราง 13

ตาราง 13 ผลการทดสอบกำลังอัดในแต่ละชนิดและอายุการบ่ม และสัดส่วนการแทนที่หินปูนในทรายละเอียดของคอนกรีตบดล็อกมวลเบา

ชนิดและอายุบ่ม	กำลังอัด (kg/cm <sup>2</sup> ) และสัดส่วนการแทนที่หินปูนในทรายละเอียด				
	0%	25%	50%	75%	100%
C9-7D	19.34	16.51	17.42	11.10	9.20
C9-28D	26.15	22.67	21.80	13.07	10.27
C10-7D	19.34	16.51	17.42	11.10	9.20
C10-28D	32.63	25.38	22.03	22.28	20.03
C12-7D	47.10	45.65	38.31	37.23	35.83
C12-28D	67.34	55.24	45.65	48.00	44.26



ภาพ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับร้อยละหินปูนแทนที่ทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

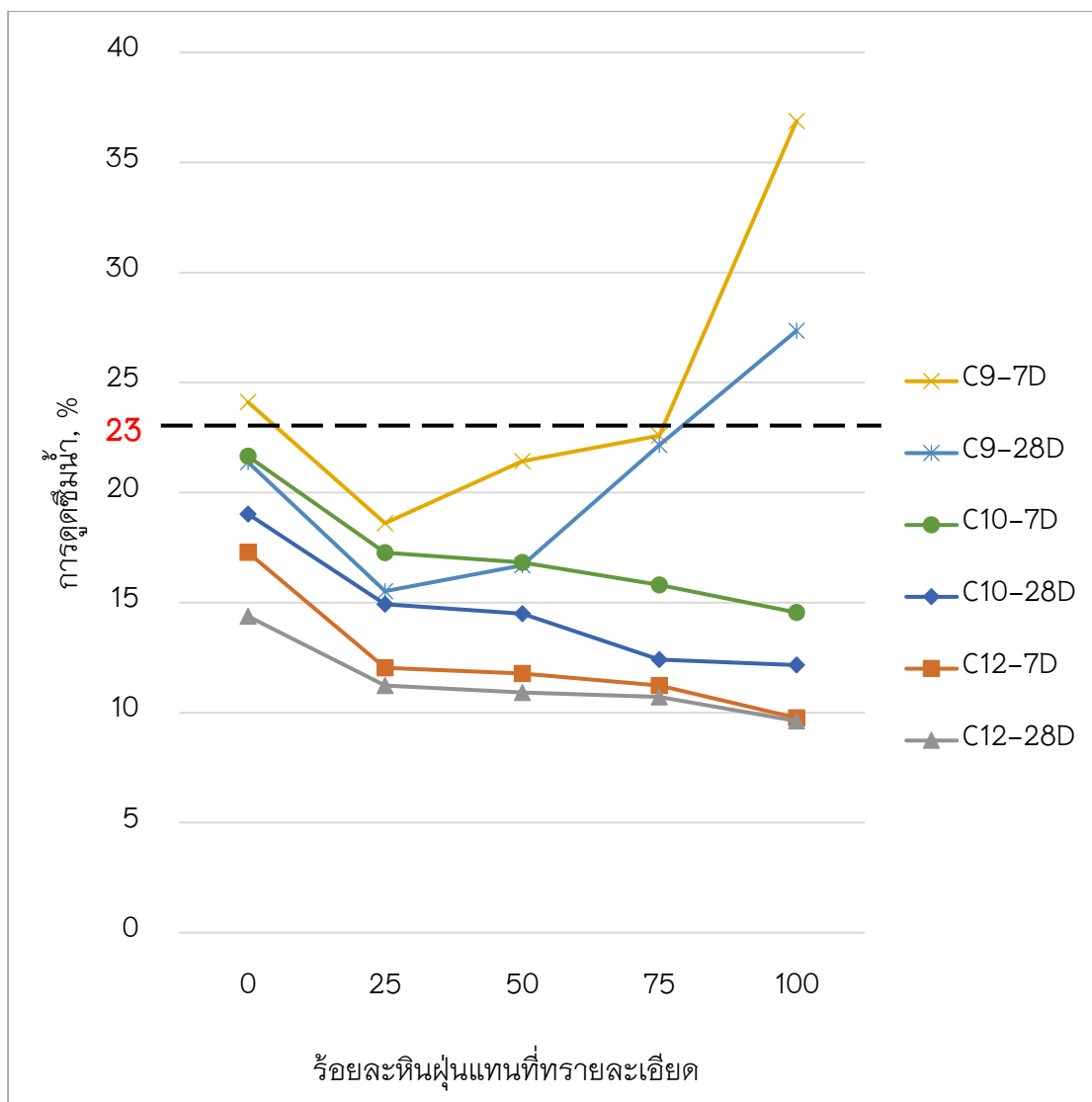
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงในความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับร้อยละหินปูนแทนที่ในทรายละเอียดดังภาพ 57 พบว่า การพัฒนากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มมากขึ้นตามอายุของคอนกรีตบล็อกมวลเบา และกำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อมีปริมาณการแทนของหินปูนในทรายละเอียดเพิ่มมากขึ้น โดยกำลังรับแรงอัดที่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601 - 2556 คือ คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ซึ่งจัดอยู่ในชนิด C12 (ความหนาแน่นแห้ง 1,001 - 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ในทุกร้อยละหินปูนแทนที่ในทรายละเอียด ซึ่งตามมาตรฐานได้กำหนดให้กำลังอัดที่ต้องไม่น้อยกว่า 25.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

## 2. ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ จะทำการทดสอบคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเต็ม ฟองอากาศที่ผสมหินปูนแทนทรายละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดย น้ำหนัก ที่อายุการบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 28 วัน ซึ่งผลการทดสอบได้ค่าการดูดซึมน้ำ เป็นไปดังตาราง 14

ตาราง 14 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำในแต่ละชนิดและอายุการบ่ม และสัดส่วนการ แทนที่หินปูนในทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบา

ชนิดและอายุบ่ม	การดูดซึมน้ำ (%) และสัดส่วนการแทนที่หินปูนในทรายละเอียด				
	0%	25%	50%	75%	100%
C9-7D	24.11	18.61	21.43	22.59	36.88
C9-28D	21.38	15.52	16.69	22.16	27.35
C10-7D	21.65	17.27	16.83	15.80	14.55
C10-28D	19.03	14.93	14.49	12.41	12.16
C12-7D	17.28	12.03	11.78	11.23	9.76
C12-28D	14.38	11.23	10.91	10.71	9.62



ภาพ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับร้อยละหินปูนแทนที่ทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำแสดงในความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซึมน้ำกับร้อยละของหินปูนแทนที่ในทรายละเอียดดังภาพ 58 พบว่า การดูดซึมน้ำจะลดลงตามอายุของคอนกรีตบล็อกที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการดูดซึมน้ำที่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556 ซึ่งกำหนดให้การดูดซึมน้ำที่ได้ต้องไม่มากกว่าร้อยละ 23 โดยคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C9 (ความหนาแน่นแห้ง 801 – 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตั้งแต่ร้อยละการแทนที่หินปูนในทรายละเอียดที่ 0, 25, 50 และ 75

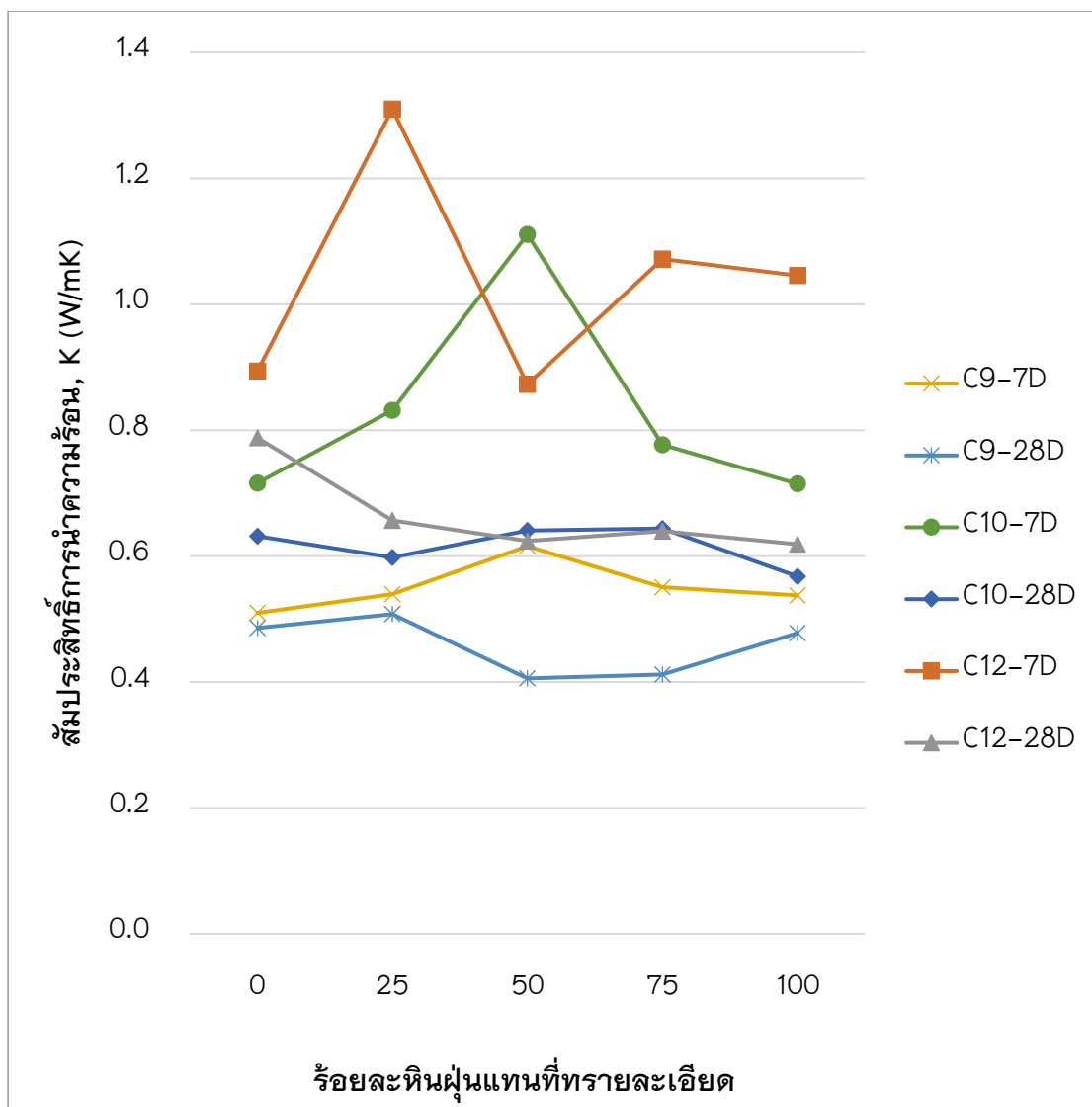
ยกเว้นการแทนที่ที่ร้อยละ 100 และผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบดบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C10 และ C12 (ตาราง 8) พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อมีการแทนที่หินปูนในทรายละเอียดเพิ่มมากขึ้น และมีการดูดซึมน้ำผ่านตามมาตรฐานในทุกๆร้อยละการแทนที่หินปูนในทรายละเอียด

### 3. ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน

ในการทดสอบการการนำความร้อน จะทำการทดสอบคอนกรีตบดบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่ผสมหินปูนแทนทรายละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน และ 28 วัน ซึ่งผลการทดสอบได้ค่าการนำความร้อนเป็นไปดังตาราง 15

ตาราง 15 ผลการทดสอบการนำความร้อนในแต่ละชนิดและอายุการบ่ม และสัดส่วนการแทนที่หินปูนในทรายละเอียดของคอนกรีตบดบล็อกมวลเบา

ชนิดและอายุบ่ม	การนำความร้อน, K และสัดส่วนการแทนที่หินปูนในทรายละเอียด				
	0%	25%	50%	75%	100%
C9-7D	0.510	0.540	0.616	0.551	0.538
C9-28D	0.486	0.508	0.406	0.412	0.478
C10-7D	0.716	0.832	1.111	0.777	0.715
C10-28D	0.632	0.598	0.641	0.644	0.568
C12-7D	0.894	1.310	0.873	1.072	1.046
C12-28D	0.788	0.657	0.624	0.640	0.619



ภาพ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนกับร้อยละหินปูนแทนที่ทรายละเอียดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

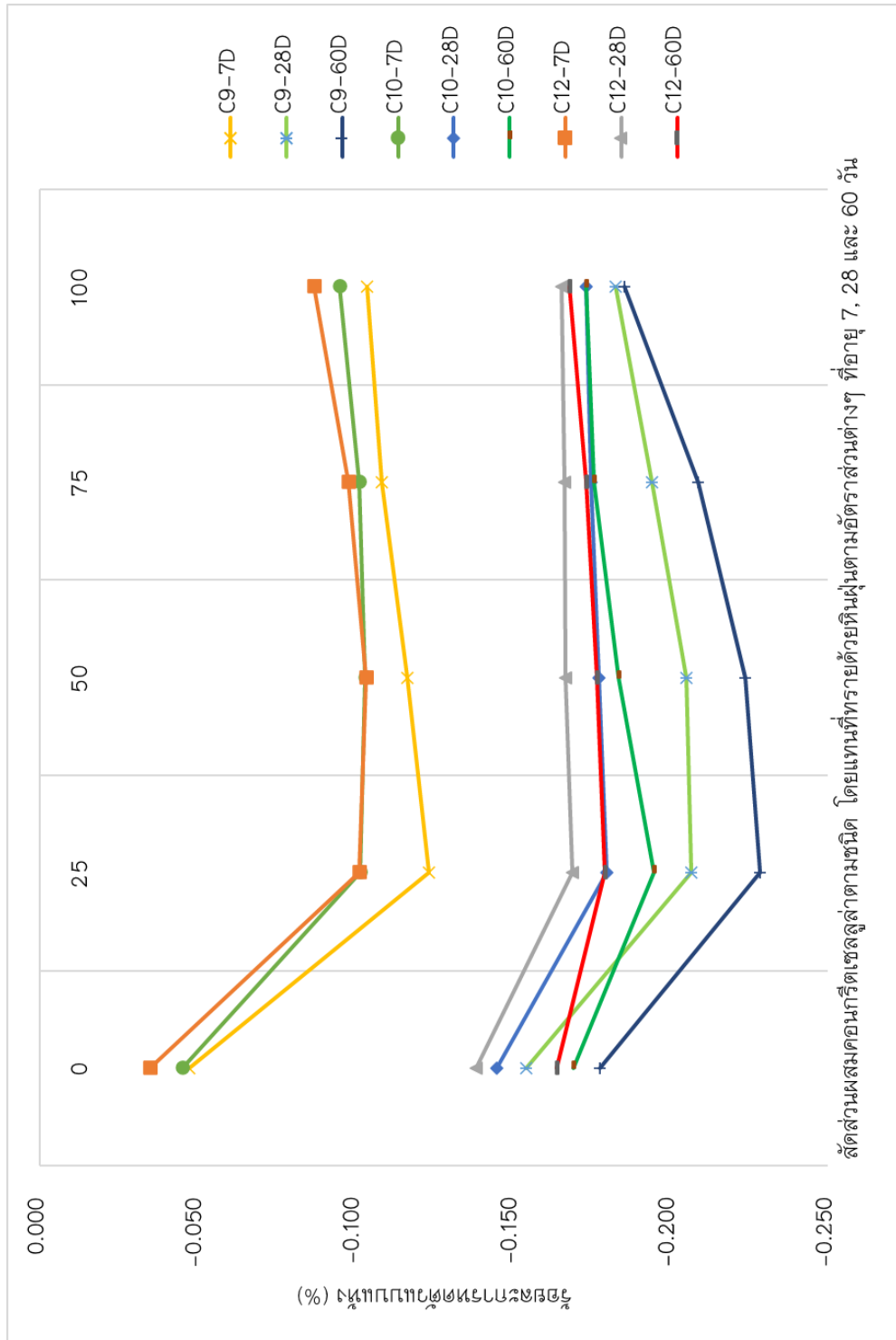
ผลจากการทดสอบการนำความร้อนแสดงในความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำความร้อนกับร้อยละหินปูนแทนที่ทรายละเอียดดังภาพ 59 ของค่าความหนาแน่นแห้งในแต่ละชนิด พบว่า คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C9 (ความหนาแน่นแห้ง 801 – 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีค่าการนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.406 – 0.508 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C10 (ความหนาแน่นแห้ง 901 – 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีค่าการนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.568 – 0.644

วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน และคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 (ความหนาแน่นแห้ง 1,001 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) พบว่าการนำความร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.619 – 0.788 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะมีค่ามากขึ้นตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงตามอายุการบ่ม นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มที่ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะลดลงตามปริมาณการแทนที่หินปูนในทรายละเอียดอีกด้วย

#### 4. ผลการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง

ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้งจะทำการทดสอบคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก หล่อตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อคอนกรีตขนาด 7.5 x 7.5 x 28.5 เซนติเมตร และใส่แท่งโลหะทองเหลือง (Stud) บ่มคอนกรีตเป็นระยะเวลา 7, 28 และ 60 วัน จากนั้นทำการวัดผลการทดสอบตามอายุการบ่ม ซึ่งจากผลการทดสอบเป็นไปดังตามตาราง 16

ชนิดและอายุการบ่ม	ร้อยละการแทนที่ทรายละเอียดด้วยหินปูน				
	0%	25%	50%	75%	100%
C9-7D	-0.047	-0.123	-0.117	-0.109	-0.104
C9-28D	-0.154	-0.207	-0.205	-0.194	-0.183
C9-60D	-0.178	-0.229	-0.224	-0.209	-0.186
C10-7D	-0.045	-0.102	-0.103	-0.101	-0.095
C10-28D	-0.145	-0.180	-0.178	-0.175	-0.173
C10-60D	-0.169	-0.195	-0.184	-0.176	-0.173
C12-7D	-0.035	-0.101	-0.104	-0.098	-0.087
C12-28D	-0.138	-0.169	-0.167	-0.166	-0.165
C12-60D	-0.164	-0.179	-0.177	-0.173	-0.168



ภาพ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมคอนกรีตเซลลูโลสตามชนิด โดยแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นตามอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน กับร้อยละการหดตัวแบบแห้ง

ผลจากการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง แสดงในความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมคอนกรีตเซลลูโลสตามชนิด โดยแทนที่ทรายด้วยหินปูนตามอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน กับร้อยละการหดตัวแบบแห้งดังภาพ 60 ของค่าความหนาแน่นแห้งในแต่ละชนิด พบว่าคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C9 (ความหนาแน่นแห้ง 801 – 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีค่าการหดตัวแบบแห้งอยู่ระหว่างร้อยละ 0.178 – 0.186 คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C10 (ความหนาแน่นแห้ง 901 – 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีค่าการหดตัวแบบแห้งอยู่ระหว่างร้อยละ 0.169 – 0.173 และคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 (ความหนาแน่นแห้ง 1,001 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) พบว่า มีค่าการหดตัวแบบแห้งอยู่ระหว่างร้อยละ 0.164 – 0.168 จะเห็นได้ว่าการหดตัวแบบแห้งจะมีค่าลดลงตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น และค่าการหดตัวแบบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีอายุการบ่มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นส่วนผสมคอนกรีตจะให้ค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วนเป็นส่วนผสมในช่วงอายุเริ่มแรก แต่ขณะเดียวกันในช่วงอายุมากขึ้นค่าการหดตัวจะใกล้เคียงกันกับคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วนเป็นส่วนผสม

#### ผลการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบสำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบา

สูตรส่วนผสมที่นำมาวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบนั้น จะใช้สูตรส่วนผสมชนิด C12 (ความหนาแน่นที่ 1,001 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ผ่านตามมาตรฐาน มอก. 2601 – 2556 และสามารถนำมาใช้ผลิตได้จริงมาพิจารณาเท่านั้น โดยสูตรส่วนผสมที่จะนำมาพิจารณา ได้แก่ C12 – 100S0MS, C12 – 75S25MS, C12 – 50S50MS, C12 – 25S75MS และ 12 – 0S100MS โดยหินปูนและทรายละเอียด ราคาต่อลูกบาศก์เมตร จากราคาพาณิชย์ จังหวัดพะเยา เดือนเมษายน พ.ศ. 2564 เพื่อหาต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงของส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ สามารถคำนวณเพื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบได้ ดังตาราง 16

ตาราง 16 วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาปานกลางแบบ CLC

ส่วนผสม	ปริมาณ ทรายต่อ ก้อน (ลบ.ม.)	ราคา/ลบ.ม.	T <sub>ทรายต่อก้อน</sub> (บาท)	ปริมาณ หินปูนต่อ ก้อน (ลบ.ม.)	ราคา/ลบ.ม.	T <sub>หินปูนต่อก้อน</sub> (บาท)	T <sub>ส่วนผสมที่ เปลี่ยนแปลงต่อก้อน</sub> (บาท)
C12-100S0MS	0.0019	758.570	1.419	-	420.560	0.0000	1.419
C12-75S25MS	0.0014	758.570	1.065	0.0005	420.560	0.2039	1.268
C12-50S50MS	0.0009	758.570	0.710	0.0010	420.560	0.4077	1.117
C12-25S75MS	0.0005	758.570	0.352	0.0014	420.560	0.6064	0.958
C12-0S100MS	0.0000	758.570	-	0.0019	420.560	0.8085	0.808

ที่มาราคา ทรายละเอียดและหินปูน : ราคาพาณิชย์จังหวัดพะเยา เมษายน พ.ศ.2564

จากตาราง 16 วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาปานกลางแบบ CLC พบว่า ส่วนผสมที่มีต้นทุนถูกที่สุดในการผลิต เมื่อเทียบกับสูตรส่วนผสมอื่น ๆ ทั้งหมด คือ C12 - 0S100MS หรือ คอนกรีตบล็อกมวลเบาที่มีความหนาแน่นระหว่าง 1,001 - 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดที่ร้อยละ 100 ซึ่งมีต้นทุนของมวลรวมละเอียดอยู่ที่ 0.808 บาทต่อก้อน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ทรายละเอียดโดยไม่ใช้หินปูนเลย โดยมีต้นทุนของมวลรวมละเอียดอยู่ที่ 1.419 บาทต่อก้อน โดยมีต้นทุนต่อก้อนต่างกันอยู่ที่  $1.419 - 0.808 = 0.601$  บาทต่อก้อน

## บทที่ 5

### สรุปและขอเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะของงานวิจัยเรื่อง นวัตกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาปานกลาง โดยผลการสรุปดังกล่าวจะเป็นไปในลักษณะการเปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีการแทนที่ทรายด้วยหินปูนเพื่อใช้เป็นมวลรวมละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ เทียบกับคุณสมบัติของคุณสมบัติของตัวอย่างควบคุมที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสม โดยมีวัตถุประสงค์คือ ต้องการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการที่จะนำหินปูนที่เหลือจากกระบวนการรีไซเคิลมาใช้ร่วมกับทรายเพื่อใช้เป็นมวลรวมละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยการหาปริมาณการแทนที่ทรายด้วยหินปูนที่เหมาะสมที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ซึ่งจะเป็นอีกผลงานวิจัยหนึ่งที่จะช่วยสนับสนุนหรือเป็นฐานข้อมูลในการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์ร่วมกับทรัพยากรธรรมชาติ เพื่อลดปริมาณการใช้ทรัพยากร ธรรมชาติให้น้อยลงได้ และงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลในด้านของความหนาแน่นแห้ง กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ เพื่อนำมาเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิดไม่รับน้ำหนัก (มอก. 2601 - 2556) ได้ นอกจากนี้ยังเพิ่มการทดสอบการหดตัวแบบแห้งเพื่อใช้เป็นข้อมูลเพิ่มเติมในงานวิจัยอีกด้วย

จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศในด้านของความหนาแน่นแห้ง กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ พบว่า ความหนาแน่นแห้งและการพัฒนา กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มมากขึ้นตามอายุของคอนกรีตบล็อกมวลเบา และจะมีค่าความหนาแน่นแห้งและการพัฒนา กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อมีปริมาณการแทนที่ของหินปูนในทรายละเอียดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณส่วนละเอียดที่อยู่ในหินปูน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีต ทำให้ลดช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคในคอนกรีตได้ (Mingkai et al., 2008) ทำให้คอนกรีตมีความแน่นขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามหินปูนที่ใช้เป็นหินปูนตามสภาพความเป็นจริงซึ่งไม่มีการคัดขนาดก่อนมาทำการผสม จึงมีขนาดละเอียดค่อนข้างหยาบ ซึ่งทำให้มีปริมาณช่องว่างในเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลเสียทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง กำลังรับแรงอัดที่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก.2601-2556 คือ คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ซึ่งจัดอยู่

ในชนิด C12 (ความหนาแน่นแห้ง 1,001–1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ในทุกร้อยละหินฝุ่น แทนที่ในทรายละเอียด ซึ่งตามมาตรฐานได้กำหนดให้กำลังอัดที่ได้อัดไม่น้อยกว่า 25.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ในด้านอัตราการดูดซึมน้ำจะลดลงตามอายุของคอนกรีตบดบล็อก เนื่องจากเมื่ออายุเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งการดูดซึมน้ำแปรผันตรงกับความหนาแน่น โดยคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีช่องว่างอากาศมาก ทำให้อัตราการดูดซึมน้ำได้ต่ำกว่าตัวอย่างที่มีความหนาแน่นมาก และเมื่อมีการแทนที่หินฝุ่นในทรายละเอียดเพิ่มมากขึ้น การดูดซึมน้ำจะลดน้อยลง ทั้งนี้เป็นเพราะส่วนละเอียดที่มีอนุภาคเล็กของหินฝุ่นจะไปปรับปรุงโครงสร้างรูพรุนในรอยต่อระหว่างมวลรวมกับเพลสต์ หรือที่เรียกว่า Transition Zone ส่งผลในการช่วยลดการซึมผ่านของน้ำได้ โดยความลึกของการซึมผ่านจะไม่ขึ้นกับกำลังอัด แต่จะขึ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของโพรงและการกระจายตัวของโพรงในคอนกรีต (Menadi et al., 2009) โดยอัตราการดูดซึมน้ำที่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก.2601 – 2556 ซึ่งกำหนดให้การดูดซึมน้ำที่ได้อัดไม่มากกว่าร้อยละ 23 เป็นคอนกรีตบดบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ ชนิด C9 (ความหนาแน่นแห้ง 801 – 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ตั้งแต่ร้อยละการแทนที่หินฝุ่นในทรายละเอียดที่ 0, 25, 50 และ 75 ยกเว้นการแทนที่ที่ร้อยละ 100 และผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบดบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C10 (ความหนาแน่นแห้ง 901 – 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และ C12 (ความหนาแน่นแห้ง 1,001 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีการดูดซึมน้ำผ่านตามมาตรฐานในทุกร้อยละการแทนที่หินฝุ่นในทรายละเอียด ซึ่งในส่วนผสมอื่น ๆ ที่มีการดูดซึมน้ำไม่ผ่านตามมาตรฐานนั้น เนื่องจากหินฝุ่นมีขนาดคละค่อนข้างหยาบ ซึ่งโดยปกตินั้นคอนกรีตมวลเบา CLC จะแข็งแรงได้ด้วยซีเมนต์เพลสต์ มวลรวมที่มีขนาดคละหยาบจะทำให้มีปริมาณช่องว่างในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณซีเมนต์เพลสต์ที่มากขึ้นในการมาเติมเต็มช่องว่างนั้น

ในส่วนของการนำความร้อนของคอนกรีตบดบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ พบว่า สัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะมีความมากขึ้นตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณฟองอากาศภายในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีปริมาตรของรูพรุนที่สูงกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง ทำให้สามารถส่งผ่านความร้อนได้ช้ากว่า เนื่องจากความร้อนเคลื่อนที่ได้ดีกว่าในวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง จึงให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ค่อนข้างต่ำและมีแนวโน้มที่ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะลดลงตามปริมาณการแทนที่

หินฝุ่นในทรายละเอียด เป็นผลเนื่องมาจากหินฝุ่นที่ใช้มีขนาดคละค่อนข้างหยาบ จึงทำให้มีปริมาณช่องว่างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงได้ โดยคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C9 (ความหนาแน่นแห้ง 801 – 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีค่าการนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.406 – 0.508 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C10 (ความหนาแน่นแห้ง 901 – 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีค่าการนำความร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.568 – 0.644 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน และคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 (ความหนาแน่นแห้ง 1,001 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีค่าการนำความร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.619 – 0.788 วัตต์ต่อเมตร - เคลวิน

ในด้านการหัดตัวแบบแห้งของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ พบว่าค่าการหัดตัวแบบแห้งจะมีค่าลดลงตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณรูพรุนและความชื้นลดลงจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น และค่าการหัดตัวแบบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการบ่มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในส่วนผสมที่ใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมคอนกรีตจะให้ค่าการหัดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วนเป็นส่วนผสมในช่วงอายุเริ่มแรก แต่ขณะเดียวกันในช่วงอายุนานขึ้นค่าการหัดตัวจะใกล้เคียงกันกับคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วนเป็นส่วนผสม โดยส่วนละเอียดของหินฝุ่นจะช่วยทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดขึ้นเร็วขึ้น โดยทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสดึงแคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมออกไซด์มาทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปริมาณส่วนละเอียดจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งก่อให้เกิดวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีปริมาณส่วนละเอียดของหินฝุ่นมากเกินไป ส่วนละเอียดที่เหลือจะไปลดปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งในคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC ที่มีฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก จะมีการหัดตัวแห้งที่สูงกว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีฟองอากาศขนาดใหญ่จำนวนมาก ทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ทรายด้วยหินฝุ่นมีค่าการหัดตัวแบบแห้งมากกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ได้ใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมเล็กน้อย

ด้านต้นทุนวัตถุดิบต่อก้อนก็เช่นกัน ในส่วนผสมที่มีต้นทุนถูกที่สุดในการผลิตเมื่อเทียบกับสูตรส่วนผสมอื่นๆ ทั้งหมด คือ C12 - OS100MS หรือ คอนกรีตบล็อกมวลเบาที่มีความหนาแน่นระหว่าง 1,001 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายละเอียดที่ร้อยละ 100 ซึ่งมีต้นทุนของมวลรวมละเอียดอยู่ที่ 0.808 บาทต่อก้อน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ทรายละเอียดโดยไม่ใช้หินฝุ่นเลย โดยมีต้นทุนของมวลรวมละเอียดอยู่ที่ 1.419 บาทต่อก้อน โดยมีต้นทุนต่อก้อนต่างกันอยู่ที่  $1.419 - 0.808 = 0.601$  บาทต่อก้อน

และสุดท้ายเนื่องจากการวิจัยนี้ได้ใช้หินฝุ่นตามสภาพจริงที่ไม่ได้ผ่านการคัดขนาด ทำให้มีปริมาณฝุ่นหินผสมอยู่ และจากการวิจัยที่ผ่านมา นั้น ฝุ่นหินหรือปริมาณส่วนละเอียดของหินฝุ่นร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น ที่ใช้ในส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัดต่ำ จะให้ค่าความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดดี ในขณะที่เดียวกันคอนกรีตกำลังอัดสูง ที่ต้องการให้ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดดีนั้นควรใช้หินฝุ่นในปริมาณส่วนละเอียดร้อยละ 7 ถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น (Beixing et al., 2009) และอนุภาคของปริมาณส่วนละเอียดหรือฝุ่น ในช่วงร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น มีส่วนช่วยปรับปรุงค่าการเกาะตัวและการแยกตัวในสภาพคอนกรีตสดได้ ทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำต่ำ และขนาดคละของมวลรวมที่ดี โดยทั่วไปฝุ่นหินจะช่วยปรับปรุงสภาพคอนกรีตสดในเรื่องของความหนืด และในคอนกรีตที่มีการใช้ปริมาณส่วนละเอียดหรือฝุ่นหินในสัดส่วนไม่เกิน 15% ของหินฝุ่น จะมีปริมาตรของรูโพรงและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตต่ำ ทั้งนี้เป็นผลจากอนุภาคของส่วนละเอียดหรือฝุ่นหินที่เข้าไปอุดรูโพรงที่อยู่ในคอนกรีตที่สภาพคอนกรีตแข็งตัวแล้ว แต่ถ้าใช้ปริมาณส่วนละเอียดหรือฝุ่นหินมากกว่า 15% ของหินฝุ่น จะทำให้มีความทนทานของคอนกรีตลดลง ดังนั้นปริมาณส่วนละเอียดหรือฝุ่นหินสามารถใช้ปรับปรุงคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตได้ (Almeida et al., 2007) และฝุ่นหินในฐานะเป็นปฏิริยาการเติมเต็ม (Micro filler effect) ที่ปริมาณส่วนละเอียดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของมวลรวมในการผสมคอนกรีต นอกจากจะช่วยให้กำลังอัดสูงขึ้น ยังจะให้ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 14.3 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้ส่วนละเอียด ทั้งนี้ในคอนกรีตที่มีปริมาณส่วนละเอียดมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของมวลรวม จะส่งผลให้กำลังอัดลดลง (Almeida et al., 2007) และสุดท้ายอนุภาคโดยปกติที่จะเรียกว่าฝุ่นนั้น จะมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 1-10,000  $\mu\text{m}$  หรือโดยส่วนใหญ่จะมีสัดส่วนอยู่ที่ขนาด PM - 10 (อนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10  $\mu\text{m}$  หรือน้อยกว่า) โดยฝุ่นเกิดจากการทำเหมือง, การก่อสร้าง, การทำฟาร์มปศุสัตว์ และกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง ดังนั้นจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ (Hilary et al., 2006) จากผลการสำรวจของ Love et al. (1997) พบว่าผู้ที่รับฝุ่นผ่านระบบทางเดินหายใจ จากผู้ที่ทำงานในเหมืองถ่านหิน 9 แห่งในสหราชอาณาจักร มีอาการหอบหืดและอาการหลอดลมอักเสบเรื้อรัง และจาก The International Agency for Research on Cancer, IARC (1997) พบว่าแร่ควอตซ์ในฝุ่นมีโอกาสทำให้เกิดมะเร็งได้ ถ้ามีการรับผ่านเข้าไปทางระบบทางเดินหายใจ ดังนั้น การนำฝุ่นหินมาใช้งานให้เกิดประโยชน์นอกจากจะทำให้ลดต้นทุนคอนกรีตแล้ว ยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ปัญหามลพิษทางอากาศของชุมชนบริเวณเหมืองหิน และปัญหาฝุ่นหินจากอุตสาหกรรมไม่หินอีกด้วย

ดังนั้นจากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า หินฝุ่นสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตบล็อกลมวลเบาแบบเติมฟองอากาศได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยสามารถใช้ข้อมูลจากผลการวิจัยนี้เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการตัดสินใจที่จะเลือกใช้ส่วนผสมต่าง ๆ เพื่อให้ได้งานที่ดีมีคุณภาพและผ่านมาตรฐานหรือข้อกำหนดของงานประเภทนั้น ๆ และสามารถใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายได้สูงสุดถึงร้อยละ 100 ในการผลิตคอนกรีตบล็อกลมวลเบาปานกลางแบบเติมฟองอากาศ ชนิด C12 ที่ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง 1,001 – 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีกำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 25.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และการดูดซึมน้ำไม่มากกว่าร้อยละ 23 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 2601 – 2556 ซึ่งถือว่าผลการทดสอบดังกล่าวผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานและอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำมาผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตเนื่องจากหินฝุ่นจะมีราคาต้นทุนที่ถูกกว่าทรายละเอียด สามารถใช้ส่วนผสม C12 – OS100MS ซึ่งเป็นต้นทุนวัตถุดิบที่ถูกที่สุดเพื่อนำมาผลิตคอนกรีตบล็อกลมวลเบาปานกลางแบบ CLC ได้ และในด้านการนำความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาที่มีค่าการนำความร้อนค่อนข้างสูง ส่งผ่านความร้อนได้ดี โดยในเวลากลางวันจะร้อน กลางคืนจะเย็น และกับอิฐมวลเบาที่มีค่าการนำความร้อนต่ำส่งถ่ายความร้อนได้ไม่ดี ในเวลากลางวันจะเย็น กลางคืนจะร้อน จึงทำให้เครื่องปรับอากาศทำงานหนัก แต่กับคอนกรีตบล็อกลมวลเบาปานกลางนั้น ซึ่งมีข้อดีในด้านการนำความร้อนปานกลางส่งผลให้แอร์ไม่ทำงานหนักมาก ทั้งในเวลากลางวันและเวลากลางคืน จึงทำให้ช่วยประหยัดค่าไฟ และในด้านการหดตัวแบบแห้งที่เกิดขึ้นก็มีค่าไม่สูงมาก ซึ่งอาจจะเป็นอีกทางเลือกใหม่ ๆ ให้แก่ผู้ที่สนใจในการนำข้อมูลวิจัยไปใช้ในการพัฒนาและผลิตบล็อกลมวลเบาปานกลางแบบเติมฟองอากาศที่มีหน่วยน้ำหนักและราคาที่อยู่ระหว่างอิฐบล็อกทั่วไปที่มีราคาต่ำแต่มีหน่วยน้ำหนักมาก กับคอนกรีตบล็อกลมวลเบาแบบเติมฟองอากาศที่มีหน่วยน้ำหนักเบาแต่มีราคาที่สูง นอกจากนี้ยังนำหินฝุ่นซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นภาระในการกำจัดทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ แทนการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติ ซึ่งมีส่วนช่วยลดปัญหามลพิษด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย และสร้างนวัตกรรมใหม่ ๆ ให้แก่คอนกรีตบล็อกลมวลเบาต่อไป

### ข้อเสนอแนะ

ควรทดลองนำหินฝุ่นมาร้อนตะแกรงเพื่อคัดขนาดก่อนการผสม ว่าผลจะเป็นอย่างไร เมื่อเปรียบเทียบกับการนำหินฝุ่นที่ไม่ได้ร้อนผ่านตะแกรงมาผสม ทดลองปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อวัสดุผสม หรือใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์อื่น ๆ และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงความทนทานของคอนกรีตบล็อกลมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยใช้หินฝุ่นแทนที่

ทราย ในด้านต่าง ๆ เช่น การทนไฟ การหดตัวแบบแห้ง เป็นต้น เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งาน ในการก่อสร้างอาคาร และเพื่อใช้เป็นข้อมูลเสริมเพิ่มเติมในการประกอบการตัดสินใจแก่ ผู้ที่สนใจหรือผู้ที่เกี่ยวข้องในธุรกิจภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้างต่อไปในอนาคต



บรรณานุกรม



## บรรณานุกรม

- กฤษณ์ กิ่งโก้. (2552). **คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสผสมสารซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- จันทนา สุขุมาพันธ์ และคณะ. (2551). **อินทรีย์คอนกรีต** (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ : บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน).
- ฐิรยศ ธรรมวงษา. (2553). **การใช้หินฝุ่นสำหรับการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ**. โครงการเปิดสอนหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมภาคพิเศษ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุต. (2536). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ: เดอะพรีนท์ อินเตอร์เนชั่นแนล.
- ชนกร ทวีวุฒิ และนท แสงเทียน. (2558). **กำลังรับแรงอัดและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี.
- ชนกร ทวีวุฒิ และคณะ. (2558). **ปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส**. **วิศวกรรมลาดกระบัง**, 4(2), 67-72.
- ธีระ เทพพรหม. การศึกษากำลังอัดคอนกรีตโดยใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมแทนทรายหยาบกรณีศึกษา หินฝุ่นโรงโม่หิน นราธิวาสโรงโม่หิน. **วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์**, 1(2).
- เนรมิตร เหลลาภา และวัจน์วงศ์ กรีพละ. (2558). **การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสผสมหินฝุ่นและหินปูน**. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20**.
- บริษัท SCG ซีเมนต์ จำกัด. (2549). **ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน**. บริษัท SCG ซีเมนต์ จำกัด. กรุงเทพฯ.
- บุรฉัตร นัฏริวิระ และคณะ. (2554). **สมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนติไซด์**. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร**. 34(4).
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2551). **ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต** (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย.

- ปิติ สุคนธ์สุขกุล. (2555). **คอนกรีตพิเศษ** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- พัชรพล โพธิ์ศรี. (2552). **การศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มวลเบาแบบเซลลูโลสสำหรับงานโครงสร้าง**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก. 2601-2556. **สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม**, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัฒน์ และเอกรัตน์ รวยรวย. (2555). การใช้ปูนขาวผสมเถ้าลอยถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาจากปูนอะลูมิเนียมและผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ KKU**, 39(2), 139-145.
- วินิต ช่อวิเชียร . (2544). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. กรุงเทพมหานคร : ป. สัมพันธ์พาณิชย์.
- ลำเรียง รักซ้อน. (2555). **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีกำลังและหน่วยแรงใช้งาน** (พิมพ์ครั้งที่ 5). นนทบุรี: แองเกิ้ล ออฟไซ.
- ลำเรียง รักซ้อน, วัลลภ ภูผา และปริญญา จินดาประเสริฐ (2557). **นวัตกรรมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสด้วยการใช้วัสดุเหลือทิ้ง**. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพฯ.
- สุเมธ สันต์วัฒน์ และคณะ. (2552). การวัดค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC จากค่าความหนาแน่นของคอนกรีต. **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5**. 56-57.
- สุเมธ สันต์วัฒน์ และคณะ. (2554). **การทำนายคุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตมวลเบาแบบ CLC จากค่าความหนาแน่นของคอนกรีต**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- คิระ วาสาลา และคณะ. (2551). อิทธิพลของ Foaming Agent ระบบ CLC ที่มีผลต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวในคอนกรีตเสริมเหล็ก. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13**. 128-129.

- อิทธิไชยสิทธิ์ อุตะธีรวิชัย และคณะ. (2552). การหัดตัวแห้งและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส. **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5**. 84–85.
- อภัย ชามิรมย์. (2557). การศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของผนังหล่อในที่คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- อภิวิชญ์ พูลสง. (2556). การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาผสมผงฝุ่นหินจากโรงโม่หิน. **วารสารวิจัยสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก**, 6(1).
- Ali A. Aliabdo et al. (2014). Utilization of crushed clay brick in cellular concrete production. **Alexandria Engineering Journal**, 53, 119–130.
- Almeida, N., Branco, F., and J.R. Santos. (2007). Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. **Building and Environment**, 42(2):810–819.
- Almeida, N., Branco, F., Santos, J.R. and J.D. Brito. (2007). High-performance concrete with recycled stone slurry. **Cement and Concrete Research**, 37(2), 210–220.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C136–96a. (2001). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. **Annual Book of ASTM Standards**, 4(2), 78–82.
- American Society for Testing and Materials, ASTM C188–95. (2001). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. **Annual Book of ASTM Standards**, 4(1), 179–180.
- American Standard of Testing Material International. (2014). **Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure ASTM D5334–14**. Retrieved October 10, 2018, from <https://www.astm.org/Standards/D5334.htm>
- American Society for Testing and Materials, ASTM C 1202–94. (1994). Standard method for electrical indication of concretes ability to resist chloride-ion penetration. **Annual book of ASTM standards**, Philadelphia, USA.

- Beixing, L., Jiliang, W. and Z. Mingkai. (2009). Effect of limestone fines content in manufactured sand on durability of low- and high-strength concretes. **Construction and Building Materials**, 23(8), 2846–2850.
- Chi, J.M., Huang, R., Yang, C.C., and J.J. Chang. (2003). Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. **Cement & Concrete Composites**, 25, 197–205.
- Chindapasirt, P. and Rattanasak U. (2011). Shrinkage behaviour of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash. **Materials and Design**, 32(2): 723–727.
- Cortes, D.D., Kim, H.K., Palomino, A.M. and J.C. Santamarina. (2008). Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands. **Cement and Concrete Research**, 38, 1142–1147.
- De Rose and Morris (1999). The influence of the mix design on the properties of micro-cellular concrete. **Thomas Telford Publishing**, R. K. D. a. N. A. Henderson.
- Dewar, J.D. and R. Anderson. (1993). **Manual of Ready-Mixed Concrete**. 2nd ed. Blackie Academic and Professional, London.
- Ho, D.W.S., Sheinn, A.M.M., C.C. Ng and C.T. Tam. (2002). The use of quarry dust for SCC applications. **Cement and Concrete Research**, 32, 505–511.
- Hudson, B. (1997). Manufactured Sand: Destroying Some Myths. **Quarry**, 5(11), 58–63.
- Ilango, R., N. Mahendran and K. Nagamanib. (2008). Strength and durability properties of concrete containing quarry rock dust as fine aggregate. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, 3, 20–26.
- International Agency for Research on Cancer. (1997). Silica, Some Silicates, Coal Dust and para-Aramid Fibrils **IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Roles to Humans**, Lyon, France.
- Khamput, P. (2006). A Study of compressive strength of concrete used quarry dust to replace sand, 108–110. In **Proceeding Technology and Innovation for**

**Sustainable Development Conference**, 25–29 January 2006, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand.

Kosmatka, Steven H., and Panarese, William C. (2003). **Design and Control of Concrete Mixtures EB001** (14<sup>th</sup> edition). Illinois, USA : Portland Cement Association.

N. Narayanan, K. Ramamurthy. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, 22, 321–329.

Love, R.G., B.G. Miller, S.K. Groat, S. Hagen, H.A. Cowie, P.P. Johnson, P.A. Hutchison and C.A. Soutar. (1997). Respiratory health effects of open cast coalmining: a cross sectional study of current workers. **Occupational and Environmental Medicine**, 54, 416–423.

Manuel, M. (1990). Autoclaved cellular concrete for residential construction. **Concrete International**, 12(9), 41–44.

Menadi, B., S. Kenai, J. Khatib and A.A. Mokhtar. (2009). Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand. **Construction and Building Materials**, 23, 625–633.

Mingkai, Z., W. Jiliang, Z. Lide and H. Tusheng. (2008). Effects of manufactured-sand on dry shrinkage and creep of high-strength concrete. **Journal of Wuhan University of Technology Mate**, 23: 249–253.

Safiuddin, Md., Raman, S.N. and M.F.M. Zain. (2007). Utilization of quarry waste fine aggregate in concrete mixtures. **Journal of Applied Sciences Research**, 3(3), 202–208.

Siong Kang Lim et al. (2017). Utilizing high volumes quarry wastes in the production of lightweight foamed concrete. **Construction and Building Materials**, 151, 441–448.

Tasawa, E., Y. Asuo and N. Naoki. (1989). The influence of differences in fine aggregate particle shape on various properties of concrete. **Annual Collection of Concrete Engineering Research Papers and Reports**. 1003.

Wills, M.H. (1967). How aggregate particle shape influences concrete mixing water requirement and strength. **Journal Materials**, 2(4), 843–865.





ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยพะเยา

UNIVERSITY OF PHAYAO

ภาคผนวก ก ตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพ  
แห้ง การดูดซึมน้ำและการนำความร้อน



ภาพ 61 เตรียมแบบหล่อคอนกรีต



ภาพ 62 เตรียมน้ำยาสร้างโพมผสมในเครื่องกำเนิดโพม



ภาพ 63 ผสมส่วนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องไม้



ภาพ 64 บ่มคอนกรีตด้วยพลาสติกหุ้ม เมื่อครบตามอายุที่กำหนดแล้ว  
จึงจะนำมาวัดขนาดเพื่อนำไปทดสอบ



ภาพ 65 ทดสอบกำลังอัด



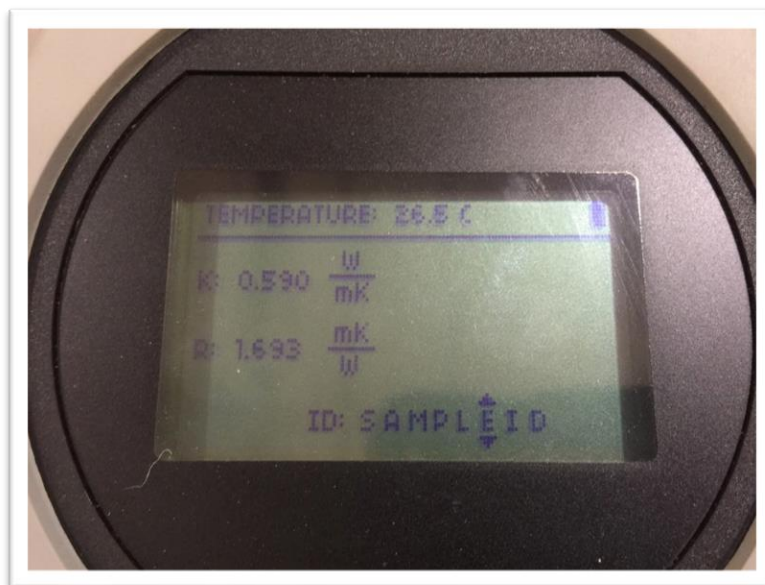
ภาพ 66 นำไปแช่น้ำเพื่อทดสอบหาค่าอัตราการดูดซึมน้ำ



ภาพ 67 เจาะคอนกรีตเพื่อนำไปทดสอบการนำความร้อน



ภาพ 68 เคลือบเข็มด้วย Thermal compound และใส่เข็มลงในตัวอย่างทดสอบ



ภาพ 69 บันทึกผลการทดสอบ



ภาพ 70 เทคนิคการเตรียมตัวอย่างการทดสอบการหดตัวของคอนกรีตมวลเบา



ภาพ 71 ตั้งค่าอุณหภูมิและความชื้นตามมาตรฐาน ASTM C157



ภาพ 72 เก็บตัวอย่างใส่ตู้บ่มเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้น



ภาพ 73 การบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น



ภาพ 74 ตัวอย่างการวัดการหดตัวแบบแห้ง

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ตาราง 17 การวิเคราะห์ขนาดของมวลรวมละเอียดโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง (ทรายละเอียด)

ตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (มม.)	น้ำหนักตะแกรง (ก.)	ตะแกรง + ทราย (ก.)	น้ำหนักค้าง (ก.)	ร้อยละค้าง (%)	ร้อยละค้างสะสม	ร้อยละผ่านสะสม
เบอร์ 4	4.75	457.50	457.50	0.00	0.00	0.00	100.00
เบอร์ 8	2.36	407.70	407.70	0.00	0.00	0.00	100.00
เบอร์ 16	1.18	592.50	592.50	0.00	0.00	0.00	100.00
เบอร์ 30	0.60	324.40	326.70	2.30	0.46	0.46	99.54
เบอร์ 50	0.30	292.70	537.70	245.00	49.04	49.50	50.50
เบอร์ 100	0.15	277.70	484.60	206.90	41.41	90.91	9.09
ถาดรอง	-	252.90	298.30	45.40	9.09	100.00	0.00
		น้ำหนักมวลรวมละเอียด (ก.)		499.60	รวม	140.87	
		โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ				1.41	

ตาราง 18 การวิเคราะห์ขนาดของมวลรวมละเอียดโดยวิธีการร่อนผ่านตะแกรง (หินฝุ่น  
สภาพตามเป็นจริง)

ตะแกรง	ขนาด ช่องเปิด (มม.)	น้ำหนัก ตะแกรง (ก.)	ตะแกรง + ทราย (ก.)	น้ำหนัก ค้าง (ก.)	ร้อยละค้าง (%)	ร้อยละค้าง สะสม	ร้อยละ ผ่าน สะสม
3/8 นิ้ว	9.50	443.10	443.10	0.00	0.00	0.00	100.00
เบอร์ 4	4.75	446.7	461.3	14.6	2.92	2.92	97.08
เบอร์ 8	2.36	407.6	513.1	105.5	21.1	24.02	75.98
เบอร์ 16	1.18	355.1	479.8	124.7	24.94	48.96	51.04
เบอร์ 30	0.60	324.1	415.7	91.6	18.32	67.28	32.72
เบอร์ 50	0.25	287.6	366.5	78.9	15.78	83.06	16.94
เบอร์ 100	0.15	277.3	355.2	77.9	15.58	98.64	1.36
ถาดรอง	-	252.3	253.2	0.9	0.18	-	0
		น้ำหนักมวลรวมละเอียด (ก.)		500.0	รวม	324.88	
		โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ				3.25	

ตาราง 19 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมรวมละเอียด  
(ทรายละเอียด)

	จำนวนครั้ง	1	2
น้ำหนักของทรายหลังจากอบแห้ง (ก.)		474.8	483.2
น้ำหนักของขวดแก้วพิกโนมิเตอร์ที่ใส่น้ำจนถึงขีดที่กำหนด (ก.)		653.4	653.5
น้ำหนักของขวดแก้วพิกโนมิเตอร์ที่ใส่ทรายและน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (ก.)		948	953.3
น้ำหนักของทรายที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (ก.)		476	484.2
ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity)		2.62	2.62
ความถ่วงจำเพาะรวม-อิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity, SSD)		2.62	2.63
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity)		2.63	2.63
ร้อยละการดูดน้ำของทราย (Absorption) (%)		0.25	0.21
ความถ่วงจำเพาะรวม-อิ่มตัวผิวแห้ง เฉลี่ย			2.62
ร้อยละการดูดน้ำของทราย เฉลี่ย (%)			0.23

ตาราง 20 การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมรวมละเอียด  
(หินฝุ่นสภาพตามเป็นจริง)

	จำนวนครั้ง	1	2
น้ำหนักของหินฝุ่นหลังจากอบแห้ง (ก.)		496.4	495.6
น้ำหนักของขวดแก้วพิกโนมิเตอร์ที่ใส่น้ำจนถึงขีดที่กำหนด (ก.)		653.9	652.5
น้ำหนักของขวดแก้วพิกโนมิเตอร์ที่ใส่หินฝุ่นและน้ำจนถึงขีดที่กำหนด (ก.)		967.4	965.0
น้ำหนักของหินฝุ่นที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (ก.)		501.2	500.3
ความถ่วงจำเพาะรวม (Bulk specific gravity)		2.64	2.64
ความถ่วงจำเพาะรวม-อิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk specific gravity, SSD)		2.67	2.66
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent specific gravity)		2.71	2.71
ร้อยละการดูดน้ำของหินฝุ่น (Absorption) (%)		0.97	0.95
ความถ่วงจำเพาะรวม-อิ่มตัวผิวแห้ง เฉลี่ย			2.67
ร้อยละการดูดน้ำของหินฝุ่น เฉลี่ย (%)			0.96

ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดสอบ

ตาราง 21 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1000-0G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่

ออกแบบ 1000 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก้อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	อัตรา แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	กว้าง	สูง	น้ำหนักรวม	น้ำหนักรวม	น้ำหนักรวม	น้ำหนักรวม					
1	15.08	15.00	15.00	-	-	-	-	-	4.34	-	-	19.19
2	15.16	15.09	15.04	3.011	15.10	15.09	15.00	3.703	-	22.98	881	-
3	15.06	15.00	15.06	-	-	-	-	-	4.37	-	-	19.34
4	15.06	15.07	15.00	-	-	-	-	-	4.42	-	-	19.48
5	14.98	15.06	15.13	2.981	14.94	15.00	15.08	3.7094	-	24.46	882	-
6	15.08	15.06	15.01	3.021	15.00	15.00	14.98	3.773	-	24.89	896	-
เฉลี่ย										24.11	886	19.34

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก้อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	อัตรา แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	กว้าง	สูง	น้ำหนักรวม	น้ำหนักรวม	น้ำหนักรวม	น้ำหนักรวม					
7	15.1	15.1	15	-	-	-	-	-	5.46	-	-	24.07
8	14.9	15.1	15.08	-	-	-	-	-	6.36	-	-	28.32
9	15.1	15.1	14.97	-	-	-	-	-	5.91	-	-	26.04
10	15.1	14.8	15.1	3.015	15.07	14.7	15.11	3.72	-	23.37	901	-
11	15	15	15.11	3.024	15.08	15.04	15.06	3.685	-	21.86	885	-
12	15.1	15	15.12	3.063	15	15.05	15.11	3.684	-	20.27	898	-
เฉลี่ย										21.83	895	26.15

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.544	2.103
	2	0.530	2.074
	3	0.509	2.102
	4	0.455	2.063
	5	0.498	1.986
	6	0.522	2.003
	เฉลี่ย	0.510	2.055

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.475	1.836
	2	0.482	1.884
	3	0.475	1.963
	4	0.484	2.193
	5	0.503	2.012
	6	0.499	1.924
	เฉลี่ย	0.486	1.969

## ตาราง 22 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1000-25G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1000 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนบด (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูด ซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ขนาดก่อนบด หนึ่ง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สอง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สาม (ซม.)	น้ำหนัก หลังอบ (กก.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบหนึ่ง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบสอง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบสาม (ซม.)					
1	15.02	15.06	15.12	-	-	-	-	-	3.62	-	-	16.00
2	15.08	15.08	15.11	-	-	-	-	-	3.78	-	-	16.62
3	15.03	15.11	15.11	-	-	-	-	-	3.84	-	-	16.91
4	3.407	3.407	3.407	2.980	15.03	15.15	15.16	3.739	-	25.47	863	-
5	3.017	3.017	3.017	3.017	14.89	15.01	15.98	3.405	-	12.86	845	-
6	3.347	3.347	3.347	3.132	15.09	15.00	15.09	3.680	-	17.51	917	-
เฉลี่ย										18.61	875	16.51

## 2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนบด (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ขนาดก่อนบด หนึ่ง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สอง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สาม (ซม.)	น้ำหนัก หลังอบ (กก.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบหนึ่ง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบสอง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบสาม (ซม.)					
7	15.04	15.05	15.04	-	-	-	-	-	5.54	-	-	24.48
8	15.02	15	15.09	-	-	-	-	-	4.73	-	-	20.99
9	15.09	15.15	14.98	-	-	-	-	-	5.15	-	-	22.53
10	15.11	14.99	15.04	3.042	15.11	14.99	15.04	3.506	-	15.25	893	-
11	14.98	14.98	15.09	2.975	14.98	14.98	15.09	3.445	-	15.8	879	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
เฉลี่ย										15.52	886	22.67

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.484	2.063
	2	0.601	1.661
	3	0.535	1.868
	4	0.503	1.986
	5	0.616	1.621
	6	0.499	2.003
	เฉลี่ย	0.540	1.867

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.489	2.042
	2	0.523	1.903
	3	0.523	1.912
	4	0.516	1.938
	5	0.502	1.992
	6	0.496	2.016
	เฉลี่ย	0.508	1.967

ตาราง 233 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1000-50G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1000 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนบด (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูด ซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ขนาดก่อนบด หนึ่ง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สอง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สาม (ซม.)	น้ำหนัก หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบ หนึ่ง (ซม.)	ขนาดหลังอบ สอง (ซม.)	ขนาดหลังอบ สาม (ซม.)					
1	14.99	15.22	15.25	2.874	14.98	15.19	15.17	3.505	-	21.94	833	-
2	15.03	14.96	15.09	2.858	15.04	14.96	15.01	3.479	-	21.75	846	-
3	14.98	15.1	15.2	-	-	-	-	-	3.95	-	-	17.46
4	14.98	15.13	15	-	-	-	-	-	3.83	-	-	16.9
5	15.06	15.07	15.2	-	-	-	-	-	4.06	-	-	17.89
6	14.96	15.09	15.15	2.87	15.11	14.95	15.08	3.461	-	20.6	842	-
เฉลี่ย										21.43	840	17.42

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนบด (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ขนาดก่อนบด หนึ่ง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สอง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สาม (ซม.)	น้ำหนัก หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบ หนึ่ง (ซม.)	ขนาดหลังอบ สอง (ซม.)	ขนาดหลังอบ สาม (ซม.)					
7	15.05	15	15.13	-	-	-	-	-	5.74	-	-	25.43
8	15.1	15.1	15.1	3.023	15.09	15.14	15.6	3.535	-	16.94	848	-
9	14.78	15.2	15.15	2.981	15.15	15.18	15.14	3.48	-	16.74	856	-
10	15	15	15.1	2.976	15	15.16	15.1	3.464	-	16.4	867	-
11	14.96	15	15	-	-	-	-	-	4.4	-	-	19.61
12	14.98	15.1	15.1	-	-	-	-	-	4.61	-	-	20.38
เฉลี่ย										16.69	857	21.8

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.634	1.575
	2	0.585	1.708
	3	0.626	1.595
	4	0.602	1.66
	5	0.616	1.622
	6	0.63	1.585
	เฉลี่ย	0.616	1.624

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.411	2.263
	2	0.374	2.670
	3	0.461	2.168
	4	0.376	2.658
	5	0.385	2.645
	6	0.426	2.238
	เฉลี่ย	0.406	2.440

### ตาราง 244 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1000-75G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1000 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	อัตรา แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	กว้าง	สูง	หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบแห้ง (ซม.)							
1	15.02	15.00	15.15	-	-	-	-	-	3.400	-	-	15.09
2	14.89	15.00	15.12	-	-	-	-	-	2.100	-	-	9.40
3	14.96	15.02	15.08	2.871	14.96	15.02	15.08	3.483	-	21.32	847	-
4	14.94	15.06	15.10	-	-	-	-	-	1.980	-	-	8.80
5	14.93	15.10	15.05	2.783	14.93	15.10	15.05	3.457	-	24.24	820	-
6	14.97	15.05	15.12	2.750	14.97	15.05	15.12	3.360	-	22.20	807	-
เฉลี่ย										22.59	825	11.10

### 2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	อัตรา แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	กว้าง	สูง	หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบแห้ง (ซม.)							
7	15.06	15.10	15.00	2.788	15.02	15.10	15.00	3.464	-	24.25	820	-
8	14.94	14.93	14.99	2.804	14.94	14.93	14.98	3.459	-	23.36	839	-
9	14.89	15.10	15.10	-	-	-	-	-	2.84	-	-	12.63
10	14.89	15.06	15.06	-	-	-	-	-	3.01	-	-	13.42
11	15.06	15.15	15.07	-	-	-	-	-	3.00	-	-	13.15
12	15.00	15.17	15.00	2.836	15.00	15.05	14.98	3.371	-	18.87	839	-
เฉลี่ย										22.16	832	13.07

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.528	1.891
	2	0.541	1.846
	3	0.55	1.816
	4	0.576	1.735
	5	0.537	1.861
	6	0.572	1.746
	เฉลี่ย	0.551	1.816

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.378	2.639
	2	0.434	2.302
	3	0.381	2.620
	4	0.454	2.201
	5	0.384	2.625
	6	0.438	2.256
	เฉลี่ย	0.412	2.441

ตาราง 255 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1000-100G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่  
ออกแบบ 1000 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7  
วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก		น้ำหนัก			แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ความยาว	ความกว้าง	ความสูง	หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบแห้ง (ซม.)	หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	ความยาว	ความกว้าง				
1	15.06	15.16	15.21	2.868	15.12	15.02	15.11	3.824	-	33.32	836	-
2	15.16	15.03	15.15	2.604	15.11	15.01	15.13	3.657	-	40.44	759	-
3	14.95	15.01	15.05	-	-	-	-	-	1.92	-	-	8.56
4	15.00	14.98	15.03	-	-	-	-	-	2.21	-	-	9.84
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				เฉลี่ย						36.88	797	9.20

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ  
28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก		น้ำหนัก			แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ความยาว	ความกว้าง	ความสูง	หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบแห้ง (ซม.)	หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	ความยาว	ความกว้าง				
7	14.97	15.00	15.10	-	-	-	-	-	1.95	-	-	8.68
8	15.10	15.07	15.10	2.777	15.01	15.07	15.10	3.536	-	27.35	813	-
9	15.07	14.98	15.14	-	-	-	-	-	2.38	-	-	10.54
10	14.96	15.10	15.00	-	-	-	-	-	2.62	-	-	11.60
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				เฉลี่ย						27.35	813	10.27

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.595	1.679
	2	0.463	2.164
	3	0.602	1.658
	4	0.471	2.12
	5	0.596	1.675
	6	0.498	2.005
	เฉลี่ย	0.538	1.884

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.426	2.345
	2	0.515	1.940
	3	0.446	2.239
	4	0.523	1.887
	5	0.501	1.987
	6	0.458	2.135
	เฉลี่ย	0.478	2.089

ตาราง 266 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1100-0G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1100 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนบด (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ขนาดก่อนบด ทั้ง (ซม.)	ขนาดก่อนบด ข้าง (ซม.)	ขนาดก่อนบด หน้า (ซม.)	น้ำหนัก หลังอบ (กก.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบ ทั้ง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบ ข้าง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบ หน้า (ซม.)					
1	15.08	15.10	15.00	-	-	-	-	-	5.33	-	-	23.41
2	14.98	15.00	15.12	3.219	14.98	15.00	15.08	3.989	-	23.92	950	-
3	15.00	14.96	15.10	-	-	-	-	-	5.93	-	-	26.43
4	15.12	14.99	15.20	3.338	15.08	14.98	14.10	4.039	-	21.00	1048	-
5	15.00	15.10	15.07	-	-	-	-	-	5.56	-	-	24.55
6	15.00	15.10	15.09	3.281	14.95	15.06	15.04	3.938	-	20.02	969	-
เฉลี่ย										21.65	989	24.79

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนบด (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ขนาดก่อนบด ทั้ง (ซม.)	ขนาดก่อนบด ข้าง (ซม.)	ขนาดก่อนบด หน้า (ซม.)	น้ำหนัก หลังอบ (กก.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบ ทั้ง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบ ข้าง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบ หน้า (ซม.)					
7	15.17	15.02	15.10	3.358	14.91	15.20	15.11	4.002	-	19.18	981	-
8	15.10	14.92	15.13	3.457	15.01	14.95	15.16	4.118	-	19.12	1016	-
9	14.96	15.27	15.24	3.354	15.00	15.07	14.90	3.984	-	18.78	996	-
10	14.92	15.22	15.17	-	-	-	-	-	7.46	-	-	32.85
11	15.08	14.96	15.17	-	-	-	-	-	7.16	-	-	31.74
12	15.05	15.15	14.91	-	-	-	-	-	7.59	-	-	33.29
เฉลี่ย										19.03	998	32.63

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.665	1.502
	2	0.717	1.393
	3	0.703	1.421
	4	0.777	1.286
	5	0.716	1.396
	6	0.720	1.405
	เฉลี่ย	0.716	1.401

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.559	1.786
	2	0.687	1.454
	3	0.598	1.670
	4	0.673	1.483
	5	0.598	1.671
	6	0.677	1.475
	เฉลี่ย	0.632	1.590

ตาราง 277 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1100-25G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1100 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	หลัง	หนา	หน้า	หลัง	หนา	หน้า					
1	15.10	15.19	15.20	-	-	-	-	-	4.29	-	-	18.69
2	15.07	14.99	15.07	-	-	-	-	-	5.90	-	-	26.12
3	15.07	15.07	15.09	3.338	15.03	15.05	15.08	3.934	-	17.86	979	-
4	15.09	15.19	15.22	3.409	15.06	15.21	15.02	3.978	-	16.69	991	-
5	14.96	15.12	15.20	-	-	-	-	-	4.36	-	-	19.28
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				เฉลี่ย						17.27	985	21.36

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	หลัง	หนา	หน้า	หลัง	หนา	หน้า					
7	15.26	15.17	15.05	-	-	-	-	-	6.54	-	-	28.25
8	15.13	15.23	15.00	-	-	-	-	-	5.39	-	-	23.39
9	15.03	15.21	15.12	-	-	-	-	-	5.94	-	-	25.98
10	15.07	15.25	15.05	3.427	15.03	15.08	15.09	3.897	-	13.70	1002	-
11	15.14	14.96	15.17	3.514	15.13	15.06	15.06	3.925	-	11.69	1024	-
12	15.00	15.13	15.23	3.245	15.01	15.22	15.11	3.875	-	19.41	940	-
				เฉลี่ย						14.93	989	25.88

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.716	1.395
	2	0.827	1.207
	3	0.797	1.253
	4	0.986	1.047
	5	0.839	1.197
	6	0.829	1.205
	เฉลี่ย	0.832	1.217

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.581	1.719
	2	0.535	1.867
	3	0.604	1.655
	4	0.586	1.704
	5	0.642	1.555
	6	0.639	1.563
	เฉลี่ย	0.598	1.677

ตาราง 288 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1100-50G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1100 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	หลัง	หนา	หน้า	หลัง	หนา	หน้า					
1	15.13	14.98	15.25	-	-	-	-	-	4.50	-	-	19.85
2	15.11	15.11	15.24	3.342	15.10	15.03	15.04	3.893	-	16.49	979	-
3	15.02	15.00	15.15	-	-	-	-	-	4.40	-	-	19.53
4	15.15	15.07	15.07	3.310	15.11	15.06	15.05	3.842	-	16.07	967	-
5	15.00	15.20	15.14	-	-	-	-	-	4.77	-	-	20.92
6	15.06	15.14	15.17	3.285	15.05	15.10	15.14	3.874	-	17.93	955	-
เฉลี่ย										16.83	967	20.10

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	หลัง	หนา	หน้า	หลัง	หนา	หน้า					
7	15.17	15.01	15.10	-	-	-	-	-	5.56	-	-	24.42
8	15.14	15.20	14.97	-	-	-	-	-	4.82	-	-	20.94
9	15.21	15.03	15.07	-	-	-	-	-	4.74	-	-	20.73
10	15.17	15.10	15.07	3.389	15.06	15.11	15.08	3.837	-	13.21	988	-
11	15.20	15.06	15.03	3.329	15.06	15.00	15.06	3.821	-	14.77	979	-
12	15.40	15.00	15.09	3.348	15.00	15.34	15.07	3.866	-	15.48	965	-
เฉลี่ย										14.49	977	22.03

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	1.178	0.848
	2	0.906	1.102
	3	1.133	0.882
	4	1.133	0.882
	5	1.203	0.830
	6	1.115	0.911
	เฉลี่ย	1.111	0.909

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.609	1.641
	2	0.595	1.678
	3	0.649	1.538
	4	0.651	1.534
	5	0.687	1.455
	6	0.655	1.525
	เฉลี่ย	0.641	1.562

ตาราง 299 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1100-75G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1100 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	หลัง	หนา	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง					
1	14.97	15.12	15.20	-	-	-	-	-	3.82	-	-	16.88
2	15.20	15.03	15.23	-	-	-	-	-	3.78	-	-	16.55
3	15.07	15.00	15.13	-	-	-	-	-	3.89	-	-	17.21
4	15.10	15.05	15.17	3.394	14.99	15.04	15.17	3.801	-	11.99	992	-
5	15.13	15.13	15.20	3.320	15.02	15.11	15.18	3.776	-	13.75	964	-
6	14.94	15.14	15.11	3.281	14.95	14.98	15.08	3.756	-	14.47	972	-
เฉลี่ย										13.40	976	16.88

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	หลัง	หนา	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง					
7	15.03	15.05	15.06	-	-	-	-	-	5.09	-	-	22.50
8	15.01	15.20	15.08	-	-	-	-	-	4.66	-	-	20.42
9	15.15	15.19	14.98	-	-	-	-	-	5.50	-	-	23.90
10	15.03	15.02	14.99	3.387	15.12	15.08	15.19	3.812	-	12.53	978	-
11	14.84	14.99	15.13	3.367	15.00	15.02	15.08	3.798	-	12.80	991	-
12	14.98	15.19	15.13	3.377	15.01	15.26	15.18	3.779	-	11.90	971	-
เฉลี่ย										12.41	980	22.28

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	1.287	0.776
	2	0.614	1.774
	3	0.698	1.496
	4	0.663	1.604
	5	0.699	1.498
	6	0.698	1.516
	เฉลี่ย	0.777	1.444

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.623	1.603
	2	0.614	1.628
	3	0.667	1.498
	4	0.655	1.525
	5	0.659	1.515
	6	0.648	1.541
	เฉลี่ย	0.644	1.552

ตาราง 30 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1100-100G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่  
ออกแบบ 1100 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7  
วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก้อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	หลัง	หน้า	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง					
1	15.00	15.14	15.15	-	-	-	-	-	3.50	-	-	15.41
2	15.08	15.08	15.11	-	-	-	-	-	3.31	-	-	14.56
3	15.14	15.13	15.15	-	-	-	-	-	4.08	-	-	17.81
4	15.00	15.12	15.16	3.398	14.98	15.13	15.01	3.967	-	16.75	999	-
5	15.00	15.19	15.20	3.363	14.99	15.09	15.11	3.808	-	13.23	984	-
6	14.99	15.09	15.09	3.328	14.94	15.07	15.08	3.819	-	14.75	980	-
เฉลี่ย										14.91	988	15.93

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ  
28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก้อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	หลัง	หน้า	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง					
7	15.05	15.26	15.11	-	-	-	-	-	4.57	-	-	19.90
8	15.10	15.15	14.96	-	-	-	-	-	4.30	-	-	18.80
9	14.98	15.11	15.28	-	-	-	-	-	4.84	-	-	21.38
10	15.15	15.12	15.03	3.376	15.17	15.17	15.17	3.788	-	12.19	967	-
11	15.05	15.19	15.14	3.464	15.11	15.02	15.05	3.859	-	11.40	1014	-
12	15.08	15.20	15.05	3.405	14.99	15.19	15.09	3.817	-	12.10	991	-
เฉลี่ย										11.90	991	20.03

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.517	1.932
	2	0.61	1.637
	3	0.813	1.229
	4	0.921	1.084
	5	0.720	1.452
	6	0.711	1.471
	เฉลี่ย	0.715	1.468

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.579	1.724
	2	0.555	1.799
	3	0.576	1.736
	4	0.580	1.724
	5	0.563	1.776
	6	0.554	1.805
	เฉลี่ย	0.568	1.761

### ตาราง 31 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1200-0G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1200 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก้อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	กว้าง	สูง	หลังอบ	ขนาดหลังอบแห้ง (ซม.)							
1	15.11	15.02	14.98	-	-	-	-	-	12.15	-	-	53.54
2	15.15	15.04	15.06	4.091	15.10	15.04	15.04	4.835	-	18.19	1150	-
3	15.05	15.06	15.02	4.312	15.04	15.06	15.00	4.951	-	14.82	1146	-
4	15.19	15.05	15.11	-	-	-	-	-	9.20	-	-	40.24
5	14.91	15.13	15.06	4.296	15.11	15.00	15.00	4.867	-	13.29	1137	-
6	15.01	14.90	15.11	-	-	-	-	-	10.63	-	-	47.53
				เฉลี่ย						15.43	1144	47.10

### 2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก้อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	กว้าง	สูง	หลังอบ	ขนาดหลังอบแห้ง (ซม.)							
7	14.99	15.09	15.00	-	-	-	-	-	14.17	-	-	62.64
8	15.13	14.99	14.95	-	-	-	-	-	14.57	-	-	64.24
9	15.08	14.88	14.94	-	-	-	-	-	16.86	-	-	75.14
10	15.00	15.03	15.09	4.210	15.00	15.05	15.05	4.815	-	14.38	1150	-
11	15.13	15.13	15.08	4.207	15.13	15.13	15.10	4.808	-	14.28	1161	-
12	14.96	14.96	15.11	4.139	14.98	14.99	14.13	4.738	-	14.47	1151	-
				เฉลี่ย						14.38	1154	67.34

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.708	1.411
	2	0.942	1.06
	3	0.828	1.206
	4	1.099	0.909
	5	0.833	1.175
	6	0.956	0.952
	เฉลี่ย	0.894	1.119

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.731	1.367
	2	0.840	1.233
	3	0.812	1.232
	4	0.754	1.326
	5	0.804	1.244
	6	0.787	1.271
	เฉลี่ย	0.788	1.279

ตาราง 32 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1200-25G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1200 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนบด (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ขนาดก่อนบด หนึ่ง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สอง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สาม (ซม.)	น้ำหนัก หลังอบ (กก.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบหนึ่ง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบสอง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบสาม (ซม.)					
1	15.07	15.05	14.98	-	-	-	-	-	10.65	-	-	46.96
2	15.10	15.18	15.10	-	-	-	-	-	10.26	-	-	44.76
3	15.10	15.15	15.10	-	-	-	-	-	10.35	-	-	45.24
4	15.10	15.10	15.05	4.223	15.12	15.05	15.02	4.723	-	11.85	1135	-
5	15.10	15.07	15.09	4.217	15.10	15.10	15.08	4.741	-	12.42	1127	-
6	15.08	15.10	14.96	4.293	15.00	15.11	15.00	4.801	-	11.83	1163	-
เฉลี่ย										12.03	1142	45.65

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนบด (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ขนาดก่อนบด หนึ่ง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สอง (ซม.)	ขนาดก่อนบด สาม (ซม.)	น้ำหนัก หลังอบ (กก.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบหนึ่ง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบสอง (ซม.)	น้ำหนัก ขนาดหลังอบสาม (ซม.)					
7	15.17	15.08	15.06	-	-	-	-	-	11.61	-	-	50.75
8	15.04	14.99	15.08	-	-	-	-	-	13.59	-	-	60.28
9	15.07	15.08	15.04	-	-	-	-	-	12.43	-	-	54.70
10	15.10	15.04	15.11	4.233	15.06	15.03	15.10	4.769	-	12.66	1139	-
11	15.15	15.16	15.22	4.240	15.13	15.15	15.03	4.691	-	10.63	1131	-
12	15.05	15.11	15.14	4.316	15.05	15.10	14.96	4.766	-	10.42	1170	-
เฉลี่ย										11.23	1146	55.24

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	1.321	0.756
	2	1.138	0.878
	3	1.421	0.703
	4	1.358	0.703
	5	1.315	0.768
	6	1.305	0.774
	เฉลี่ย	1.310	0.764

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.748	1.336
	2	0.581	1.719
	3	0.745	1.340
	4	0.555	1.801
	5	0.648	1.645
	6	0.665	1.612
	เฉลี่ย	0.657	1.576

ตาราง 33 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1200-50G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1200 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนบด (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ขนาดก่อนบด	ขนาดก่อนบด	ขนาดก่อนบด	หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบ	ขนาดหลังอบ	ขนาดหลังอบ					
1	15.20	15.23	15.12	-	-	-	-	-	8.77	-	-	37.88
2	15.08	15.26	15.10	-	-	-	-	-	8.78	-	-	38.15
3	15.19	15.28	15.20	-	-	-	-	-	9.03	-	-	38.91
4	15.15	15.02	15.23	3.984	15.24	15.00	15.21	4.391	-	10.22	1146	-
5	15.03	15.18	15.14	3.878	15.00	15.28	15.16	4.353	-	12.26	1116	-
6	14.96	15.06	15.05	3.795	15.06	15.06	14.97	4.283	-	12.85	1118	-
เฉลี่ย										11.78	1127	38.31

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนบด (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	ขนาดก่อนบด	ขนาดก่อนบด	ขนาดก่อนบด	หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบ	ขนาดหลังอบ	ขนาดหลังอบ					
7	15.07	15.05	15.11	-	-	-	-	-	10.92	-	-	48.15
8	15.13	15.02	15.08	-	-	-	-	-	10.27	-	-	45.19
9	15.11	15.24	15.25	-	-	-	-	-	10.04	-	-	43.60
10	15.07	15.07	15.04	3.856	15.05	15.02	15.04	4.293	-	11.34	1134	-
11	15.05	15.11	15.04	3.873	15.03	15.09	15.00	4.287	-	10.70	1138	-
12	15.02	15.20	15.15	3.938	15.01	15.09	15.08	4.359	-	10.69	1153	-
เฉลี่ย										10.91	1142	45.65

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.835	1.245
	2	0.886	1.134
	3	0.875	1.156
	4	0.912	0.955
	5	0.855	1.123
	6	0.873	1.268
	เฉลี่ย	0.873	1.147

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.570	1.752
	2	0.670	1.491
	3	0.586	1.706
	4	0.668	1.494
	5	0.627	1.612
	6	0.621	1.634
	เฉลี่ย	0.624	1.615

ตาราง 34 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1200-75G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่ออกแบบ 1200 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	กว้าง	สูง	หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบแห้ง (ซม.)	หน้า	กว้าง					
1	15.10	15.14	15.02	-	-	-	-	-	7.74	-	-	33.86
2	15.10	15.08	14.98	-	-	-	-	-	9.65	-	-	42.38
3	15.14	15.05	15.10	-	-	-	-	-	8.08	-	-	35.46
4	15.10	15.18	15.05	4.010	15.07	15.00	15.06	4.573	-	14.05	1078	-
5	15.02	15.03	15.05	4.007	15.01	15.00	15.10	4.491	-	12.08	1079	-
6	15.10	15.10	15.18	4.290	15.06	15.11	15.07	4.614	-	7.55	1151	-
เฉลี่ย										11.23	1102	37.23

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก่อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	กว้าง	สูง	หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบแห้ง (ซม.)	หน้า	กว้าง					
7	15.04	14.92	15.06	-	-	-	-	-	11.35	-	-	50.58
8	14.99	15.00	15.15	-	-	-	-	-	11.12	-	-	49.46
9	15.01	15.06	15.13	-	-	-	-	-	9.94	-	-	43.97
10	15.05	15.04	15.07	4.079	15.05	15.09	15.07	4.568	-	11.98	1092	-
11	15.03	15.07	15.09	4.198	15.05	14.93	15.09	4.609	-	9.79	1138	-
12	15.12	15.01	15.08	4.184	15.09	14.96	15.14	4.617	-	10.35	1124	-
เฉลี่ย										10.71	1118	48.00

## 3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	1.087	0.919
	2	1.073	0.919
	3	1.134	0.881
	4	0.994	1.005
	5	1.044	1.114
	6	1.102	1.056
	เฉลี่ย	1.072	0.982

## 4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.627	1.593
	2	0.620	1.611
	3	0.688	1.453
	4	0.625	1.598
	5	0.655	1.425
	6	0.623	1.596
	เฉลี่ย	0.640	1.546

ตาราง 35 บันทึกข้อมูลการทดสอบตัวอย่าง CLC1200-100G

รายละเอียด : ใช้หินปูนแทนที่ทรายละเอียดร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก (ความหนาแน่นที่  
ออกแบบ 1200 กก./ลบ.ม)

ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ 7  
วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก้อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	กว้าง	สูง	หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบแห้ง (ซม.)							
1	15.10	15.02	15.06	-	-	-	-	-	8.40	-	-	37.04
2	15.14	15.10	15.06	-	-	-	-	-	7.90	-	-	34.56
3	15.05	15.01	15.06	-	-	-	-	-	8.11	-	-	35.90
4	15.16	15.14	15.06	4.190	15.00	14.95	15.16	4.592	-	9.60	1132	-
5	15.21	15.00	14.89	3.997	15.09	14.87	15.00	4.45	-	11.33	1088	-
6	15.10	15.15	15.04	4.201	15.10	15.00	15.16	4.552	-	8.35	1124	-
เฉลี่ย										9.76	1115	35.83

2. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร กำลังรับแรงอัด และอัตราการดูดซึมน้ำ (อายุ  
28 วัน)

ตัวอย่าง	ขนาดก้อนอบแห้ง (ซม.)			น้ำหนัก				น้ำหนัก หลังจาก แช่น้ำ 24 ชม. (กก.)	แรงอัด (ตัน)	อัตรา การ ดูดซึมน้ำ (%)	ความ หนาแน่น แห้ง (กก./ลบ. ม.)	กำลังอัด (กก./ตร. ซม.)
	หน้า	กว้าง	สูง	หลังอบ (กก.)	ขนาดหลังอบแห้ง (ซม.)							
7	15.08	15.21	15.06	-	-	-	-	-	9.64	-	-	42.03
8	15.04	15.98	15.05	-	-	-	-	-	11.72	-	-	48.76
9	15.10	15.06	15.01	-	-	-	-	-	9.55	-	-	42.00
10	15.02	15.12	15.20	4.222	15.14	15.00	15.17	4.626	-	9.58	1125	-
11	15.09	15.07	15.03	4.193	15.12	15.11	15.05	4.586	-	9.38	1119	-
12	15.25	15.00	15.01	4.264	15.24	14.98	15.18	4.687	-	9.92	1130	-
เฉลี่ย										9.62	1125	44.26

3. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 7 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
13	1	0.991	1.008
	2	1.030	0.97
	3	1.092	0.915
	4	1.070	0.934
	5	1.078	
	6	1.012	
	เฉลี่ย	1.046	0.957

4. ข้อมูลการทดสอบค่าการนำความร้อน (อายุ 28 วัน)

ตัวอย่างที่	ทดสอบครั้งที่	K	R
14	1	0.579	1.724
	2	0.618	1.617
	3	0.607	1.644
	4	0.672	1.486
	5	0.624	
	6	0.615	
	เฉลี่ย	0.619	1.618

ตาราง 36 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C9-0MS100S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
				7		28		60	
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละการ หดตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละการ หดตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละการ หดตัว
C9-0MS100S	300	299.860	300	-0.140	-0.047				
	300	299.856	300	-0.144	-0.048				
	300	299.857	300	-0.143	-0.048				
	300	299.534	300			-0.466	-0.155		
	300	299.527	300			-0.473	-0.158		
	300	299.550	300			-0.450	-0.150		
	300	299.465	300					-0.535	-0.178
	300	299.448	300					-0.552	-0.184
	300	299.487	300					-0.513	-0.171
สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา					-0.047		-0.154		-0.178

ตาราง 37 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C9-25MS75S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
				7		28		60	
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละการ หดตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละการ หดตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละการ หดตัว
C9-25MS75S	300	299.631	300	-0.369	-0.123				
	300	299.640	300	-0.360	-0.120				
	300	299.619	300	-0.381	-0.127				
	300	299.375	300			-0.625	-0.208		
	300	299.384	300			-0.616	-0.205		
	300	299.381	300			-0.619	-0.206		
	300	299.314	300					-0.686	-0.229
	300	299.305	300					-0.695	-0.232
	300	299.324	300					-0.676	-0.225
สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา					-0.123		-0.207		-0.229

ตาราง 38 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C9-50S50MS

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	7		28		60	
				L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหดตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหดตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหดตัว
C9-50S50MS	300	299.651	300	-0.349	-0.116				
	300	299.640	300	-0.360	-0.120				
	300	299.659	300	-0.341	-0.114				
	300	299.401	300			-0.599	-0.200		
	300	299.389	300			-0.611	-0.204		
	300	299.363	300			-0.637	-0.212		
	300	299.339	300					-0.661	-0.220
	300	299.332	300					-0.668	-0.223
	300	299.314	300					-0.686	-0.229
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา				-0.117		-0.205		-0.224

ตาราง 39 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C9-75MS25S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	7		28		60	
				L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหดตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหดตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหดตัว
C9-75MS25S	300	299.556	300	-0.444	-0.148				
	300	299.748	300	-0.252	-0.084				
	300	299.719	300	-0.281	-0.094				
	300	299.304	300			-0.696	-0.232		
	300	299.506	300			-0.494	-0.165		
	300	299.443	300			-0.557	-0.186		
	300	299.276	300					-0.724	-0.241
	300	299.454	300					-0.546	-0.182
	300	299.390	300					-0.610	-0.203
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา				-0.109		-0.194		-0.209

ตาราง 40 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C9-100MSOS

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
				7		28		60	
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหดตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหดตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหดตัว
C9-100MSOS	300	299.690	300	-0.310	-0.103				
	300	299.691	300	-0.309	-0.103				
	300	299.683	300	-0.317	-0.106				
	300	299.451	300			-0.549	-0.183		
	300	299.458	300			-0.542	-0.181		
	300	299.447	300			-0.553	-0.184		
	300	299.442	300					-0.558	-0.186
	300	299.440	300					-0.560	-0.187
	300	299.448	300					-0.552	-0.184
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา				-0.104		-0.183		-0.186

ตาราง 411 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C10-0MS100S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
				7		28		60	
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว
C10-0MS100S	300	299.855	300	-0.145	-0.048				
	300	299.858	300	-0.142	-0.047				
	300	299.879	300	-0.121	-0.040				
	300	299.548	300			-0.452	-0.151		
	300	299.572	300			-0.428	-0.143		
	300	299.574	300			-0.426	-0.142		
	300	299.476	300					-0.524	-0.175
	300	299.494	300					-0.506	-0.169
	300	299.505	300					-0.495	-0.165
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา				-0.045		-0.145		-0.169

ตาราง 42 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C10-25MS75S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	7		28		60	
				L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว
C10-25MS75S	300	299.708	300	-0.292	-0.097				
	300	299.711	300	-0.289	-0.096				
	300	299.666	300	-0.334	-0.111				
	300	299.475	300			-0.525	-0.175		
	300	299.463	300			-0.537	-0.179		
	300	299.444	300			-0.556	-0.185		
	300	299.431	300					-0.569	-0.190
	300	299.423	300					-0.577	-0.192
	300	299.391	300					-0.609	-0.203
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา				-0.102		-0.180		-0.195

ตาราง 43 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C10-50MS50S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	7		28		60	
				L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว
C10-50MS50S	300	299.652	300	-0.348	-0.116				
	300	299.734	300	-0.266	-0.089				
	300	299.686	300	-0.314	-0.105				
	300	299.470	300			-0.530	-0.177		
	300	299.474	300			-0.526	-0.175		
	300	299.458	300			-0.542	-0.181		
	300	299.451	300					-0.549	-0.183
	300	299.441	300					-0.559	-0.186
	300	299.454	300					-0.546	-0.182
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา				-0.103		-0.178		-0.184

ตาราง 44 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C10-75MS25S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว						
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	7		28		60		
				L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	
C10-75MS25S	300	299.710	300	-0.290	-0.097					
	300	299.698	300	-0.302	-0.101					
	300	299.680	300	-0.320	-0.107					
	300	299.476	300			-0.524	-0.175			
	300	299.480	300			-0.520	-0.173			
	300	299.469	300			-0.531	-0.177			
	300	299.461	300					-0.539	-0.180	
	300	299.480	300					-0.520	-0.173	
	300	299.476	300					-0.524	-0.175	
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา					-0.101		-0.175		-0.176

ตาราง 45 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C10-100MS0S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว						
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	7		28		60		
				L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	
C10-100MS0S	300	299.721	300	-0.279	-0.093					
	300	299.714	300	-0.286	-0.095					
	300	299.709	300	-0.291	-0.097					
	300	299.486	300			-0.514	-0.171			
	300	299.495	300			-0.505	-0.168			
	300	299.458	300			-0.542	-0.181			
	300	299.475	300					-0.525	-0.175	
	300	299.485	300					-0.515	-0.172	
	300	299.481	300					-0.519	-0.173	
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา					-0.095		-0.173		-0.173

ตาราง 46 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C12-OMS100S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
				7	28		60		
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว
C12-OMS100S	300	299.898	300	-0.102	-0.034				
	300	299.904	300	-0.096	-0.032				
	300	299.884	300	-0.116	-0.039				
	300	299.587	300			-0.413	-0.138		
	300	299.549	300			-0.451	-0.150		
	300	299.619	300			-0.381	-0.127		
	300	299.504	300					-0.496	-0.165
	300	299.490	300					-0.510	-0.170
	300	299.531	300					-0.469	-0.156
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา				-0.035		-0.138		-0.164

ตาราง 47 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C12-25MS75S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
				7	28		60		
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว
C12-25MS75S	300	299.710	300	-0.290	-0.097				
	300	299.698	300	-0.302	-0.101				
	300	299.680	300	-0.320	-0.107				
	300	299.493	300			-0.507	-0.169		
	300	299.484	300			-0.516	-0.172		
	300	299.501	300			-0.499	-0.166		
	300	299.470	300					-0.530	-0.177
	300	299.451	300					-0.549	-0.183
	300	299.465	300					-0.535	-0.178
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา				-0.101		-0.169		-0.179

ตาราง 48 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C12-50MS50S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	7		28		60	
				L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว
C12-50MS50S	300	299.709	300	-0.291	-0.097				
	300	299.730	300	-0.270	-0.090				
	300	299.629	300	-0.371	-0.124				
	300	299.492	300			-0.508	-0.169		
	300	299.507	300			-0.493	-0.164		
	300	299.501	300			-0.499	-0.166		
	300	299.443	300					-0.557	-0.186
	300	299.490	300					-0.510	-0.170
	300	299.475	300					-0.525	-0.175
สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา					-0.104		-0.167		-0.177

ตาราง 49 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C12-75MS25S

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	7		28		60	
				L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว
C12-75MS25S	300	299.747	300	-0.253	-0.084				
	300	299.759	300	-0.241	-0.080				
	300	299.614	300	-0.386	-0.129				
	300	299.504	300			-0.496	-0.165		
	300	299.497	300			-0.503	-0.168		
	300	299.501	300			-0.499	-0.166		
	300	299.485	300					-0.515	-0.172
	300	299.474	300					-0.526	-0.175
	300	299.481	300					-0.519	-0.173
สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา					-0.098		-0.166		-0.173

ตาราง 50 ตารางบันทึกผลการทดสอบการหดตัวของแบบแห้ง C12-100MSOS

ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (มม.)			ระยะเวลา(วัน) และร้อยละการหดตัว					
				7	28		60		
	เริ่มต้น (L <sub>0</sub> )	หดตัว (L <sub>t</sub> )	มาตรฐาน (L <sub>G</sub> )	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว	L <sub>t</sub> -L <sub>0</sub> (มม.)	ร้อยละ การหด ตัว
C12-100MSOS	300	299.739	300	-0.261	-0.087				
	300	299.751	300	-0.249	-0.083				
	300	299.727	300	-0.273	-0.091				
	300	299.493	300			-0.507	-0.169		
	300	299.507	300			-0.493	-0.164		
	300	299.511	300			-0.489	-0.163		
	300	299.489	300					-0.511	-0.170
	300	299.491	300					-0.509	-0.170
	300	299.507	300					-0.493	-0.164
	สรุปร้อยละหดตัวตามอายุเวลา				-0.087		-0.165		-0.168



ประวัติผู้วิจัย



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	กลวัชร ฌวัฒน์ชานนท์
วัน เดือน ปี เกิด	28 กรกฎาคม 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2559 วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	139/1 หมู่ 2 ตำบลท้ายเกาะ อำเภอสามโคก จังหวัดปทุมธานี 12160
ผลงานตีพิมพ์	ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ กลวัชร ฌวัฒน์ชานนท์, ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ, สุริยาวัช ปรอ้าย และอภิชาติ บั๊กกล้า. (10-12 กรกฎาคม 2562). นวัตกรรมคอนกรีต ปลีอกมวลงเบาปานกลาง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24 (MAT หน้า 872-877). อุตรธานี

