

## สมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์

บุรฉัตร ฉัตรวีระ<sup>1\*</sup>

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

เรวัตต์ หน่ยมี<sup>2</sup>

วิทยาลัยเทคนิคนครนายก ต.ท่าช้าง อ.เมือง จ.นครนายก 26000

และ ณิชฎฐ์ มากุล<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร อนุสาวรีย์ บางเขน กรุงเทพฯ 10220

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาคือการใช้หินฝุ่นแอนดิไซด์ (Andesite-dusty Rock (ADR)) ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา หินฝุ่นดังกล่าวถูกใช้แทนที่บางส่วนในทรายแม่น้ำและใช้เป็นมวลรวมละเอียด ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย หินฝุ่นแอนดิไซด์ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, FM) เท่ากับ 2.0, 2.5 และ 3.0 อัตราส่วนการแทนที่ของหินฝุ่นแอนดิไซด์ในทรายแม่น้ำโดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และแฉ่ำลอย) เท่ากับ 0.52 สมบัติเชิงกายภาพที่ทำการศึกษาประกอบคือ หน่วยน้ำหนัก ค่าการยุบตัวแบบไหลตัวได้ ปริมาณอากาศ ระยะเวลาการก่อตัว สมบัติเชิงกลคือ กำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่น

จากผลทดสอบพบว่า หินฝุ่นแอนดิไซด์มีซิลิโคนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลักอนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมผิวเรียบและขรุขระ ในขณะที่มีขนาดละเอียดในรูปของร้อยละผ่านตะแกรงมีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตล่างตามมาตรฐาน ASTM C33 สำหรับคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์พบว่า โมดูลัสความละเอียด (FM) ของหินฝุ่นแอนดิไซด์ที่เพิ่มขึ้นจาก 2.0 ไปเป็น 2.5 มีผลต่อปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับค่าการก่อตัวที่มีค่าลดลงเมื่อโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ไปเป็น 2.5 และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้นไปเป็น 3.0 ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาที่ผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0 และแทนที่ในทรายแม่น้ำเท่ากับร้อยละ 50 โดยน้ำหนักมีค่ากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นของสูงที่สุด

**คำสำคัญ :** หินฝุ่นแอนดิไซด์ / คอนกรีตมวลเบา / สมบัติทางกล

\* Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th

<sup>1</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> อาจารย์

<sup>3</sup> อาจารย์ สาขาเทคโนโลยีการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

## Mechanical Properties of Lightweight Concrete Containing Andesite-Dusty Rock

**Burachat Chatveera<sup>1\*</sup>**

Thammasat University (Rangsit Campus) Klong 1, Klong Luang, Pathum Thani 12120

**Rewatt Naimee<sup>2</sup>**

Nakonnayok Technical College, Thachang, Muang, Nakonnayok 26000

**and Natt Makul<sup>3</sup>**

Phranakhon Rajabhat University, Anusaowaree, Bangkok, Bangkok 10220

### Abstract

This paper presented the study results of the use of andesite-dusty rock (ADR) in the production of lightweight concrete. This rock dust was used for partially replacing river sand and being used as a fine aggregate. The studied parametric included the fineness moduli (FM) of ADR (2.0, 2.5 or 3.0), and the replacement ratios of ADR in river sand by weight (0% (control), 25%, 50%, 75% and 100%) and a water-to-binder (cement and fly ash) ratio by mass ( $w/b = 0.52$ ). The tested physical properties were unit weight, flow slump, air content and setting time. The mechanical properties were compressive and splitting tensile strengths, and elastic modulus.

Through the test results, it was found that andesite-dusty rock (ADR) has silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) as a main component. Their particles have an irregular shape with smooth and rough surface. Whereas the gradation of ADR as cumulative passing percentages, they were close to the lower bound as specified in the ASTM C33 standard. Lightweight concretes mixed with ADR, the increased FM of ADR from 2.0 up to 2.5 resulted in an increase of air content. On the other hand, the setting times were decreased with increasing the FM of ADR from 2.0 up to 2.5, and they were increased with increasing the FM up to 3.0. Whereas the lightweight concrete containing ADR that having a 2.0 FM and a 50%-ADR replacement in river sand was the highest compressive and splitting tensile strengths and elastic modulus.

**Keywords :** Andesite-dusty Rock / Lightweight Concrete / Mechanical properties

---

\* Corresponding author : [cburacha@engr.tu.ac.th](mailto:cburacha@engr.tu.ac.th)

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Lecturer.

<sup>3</sup> Lecturer, Department of Construction Technology, Faculty of Industrial Technology.

## 1. บทนำ

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ (Cellular Lightweight Concrete (CLC)) เป็นระบบการผลิตคอนกรีตมวลเบาภายใต้สภาวะปกติเหมือนกับคอนกรีตปกติที่อาศัยหลักการทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเหมาะสมและมีเสถียรภาพสูงขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตด้วยการเติมสารก่อฟองอากาศ (Pre-formed Stable Foam) วิธีนี้เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยที่คุณภาพของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับวัสดุองค์ประกอบ สัดส่วนผสมชนิดของสารก่อฟองอากาศและเทคนิคการผสมที่ถูกต้องเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาซึ่งเป็นการลดน้ำหนักของโครงสร้างลง รับกำลังได้อย่างเพียงพอ การดูดซึมน้ำต่ำ การติดตั้งด้วยการตอกตะปูและการฝังฟูกสามารถทำได้ง่าย เป็นต้น จากข้อดีดังกล่าวทำให้คอนกรีตมวลเบาได้รับความนิยมสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ภายใต้ข้อจำกัดทางด้านวัสดุตั้งเดิมที่ใช้อยู่ซึ่งโดยปกติจะเลือกใช้จากปูนซีเมนต์และทรายทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาวิจัยวัสดุทดแทนที่สามารถจัดหาได้ง่ายที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาได้ [1-3] ดังมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์วัสดุประกอบโซลเจลในงานคอนกรีตมวลเบา อาทิเช่น การนำหินฝุ่นมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน [4-8] แก้วลอย [9] แก้วชานอ้อยผสมหินฝุ่นโดโลไมท์ [10] เป็นต้น แต่ในความเป็นจริงได้มีบางอุตสาหกรรมซึ่งผลิตมวลรวมเพื่อใช้ในงานคอนกรีตโครงสร้างที่จะต้องทำการบดย่อยอยู่เป็นประจำและได้หินฝุ่นออกมาเป็นผลพลอยได้ในปริมาณมากดังเช่น การผลิตมวลรวมประเภทหินแอนดิไซต์ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุทางเลือกอีกชนิดหนึ่ง

โดยธรรมชาติแล้วหินแอนดิไซต์เป็นหินอัคนีที่มีผลึกแร่ขนาดเล็กสี่เหลี่ยม เกิดจากหินหนืดเย็นตัวบนพื้นผิวโลก ประกอบด้วยแร่ที่สำคัญคือ แร่แพลจีโอเคลสเฟลด์สปาร์ และแร่สีเข้มพวกฮอร์นเบลนด์ ไพรอกซีน และไบโอไทต์พบได้ในแถบจังหวัดสระบุรี ที่จะมีความใกล้เคียงกับทรายแม่น้ำจึงได้มีแนวคิดในการนำหินฝุ่นแอนดิไซต์ดังกล่าวไปทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นตามมาตรฐานการทดสอบที่ใช้กับมวลรวมละเอียดสำหรับคอนกรีต [11]

พบว่า หินฝุ่นมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, FM) เท่ากับ 3.15 ค่าความถ่วงจำเพาะปรากฏเท่ากับ 2.67 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.57 และหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,492 กก./ม.<sup>3</sup> และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำแล้วมีความใกล้เคียงกันมาก จึงได้มีการนำหินฝุ่นมาใช้แทนที่ทรายแม่น้ำในการผลิตคอนกรีตขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาใช้ในงานคอนกรีตกลับเกิดปัญหาระหว่างขั้นตอนการผสมคือ คอนกรีตผสมหินฝุ่นค่อนข้างแห้งเกินไปทำให้มวลรวมคลุกเคล้าเข้ากันได้ยากส่งผลให้ต้องใช้ น้ำในปริมาณที่มากกว่าที่ใช้กับการผสมคอนกรีตมวลเบาปกติ [12] จึงต้องมีการประยุกต์ใช้สารผสมเพิ่มเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การนำหินฝุ่นแอนดิไซต์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการบดย่อยหินมาทำการศึกษาเพื่อหาวิธีการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่เหมาะสม พร้อมทั้งแก้ปัญหาส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นด้วยการใช้สารผสมเพิ่มซึ่งได้แก่ แก้วลอยร่วมกับสารก่อฟองอากาศ และพิจารณาผลกระทบดังกล่าวที่มีต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาที่ผลิตขึ้น

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้

1. ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. หินฝุ่นแอนดิไซต์ จาก จ.สระบุรี
3. น้ำที่ผสม ใช้น้ำประปา
4. ทรายที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 [13]
5. แก้วลอยประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [14]
6. สารก่อฟองอากาศ

### 2.2 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบ

สัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา

สัญลักษณ์	ค่าโมดูลัสความ ละเอียด (FM)	ปริมาณหินปูน แอนติไซด์แทนที่ ปริมาณทราย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (กก./ม. <sup>3</sup> )	เถ้าลอย (กก./ม. <sup>3</sup> )	น้ำ (กก./ม. <sup>3</sup> )	ทราย (กก./ม. <sup>3</sup> )	หินปูน แอนติไซด์ (กก./ม. <sup>3</sup> )	สารเคมี ผสมเพิ่ม (ลิตร)
A0FM2.0 <sup>[1]</sup>	2.0	0	603	38	332	867	0	9.2
A25FM2.0	2.0	25	603	38	332	650.25	216.75	9.2
A50FM2.0	2.0	50	603	38	332	433.50	433.50	9.2
A75FM2.0	2.0	75	603	38	332	216.75	650.25	9.2
A100FM2.0	2.0	100	603	38	332	0	867	9.2

หมายเหตุ <sup>[1]</sup> สัญลักษณ์ AXFMY คือ A หินปูนแอนติไซด์, X ปริมาณหินปูนแอนติไซด์แทนที่ปริมาณทราย (ร้อยละโดยน้ำหนัก),

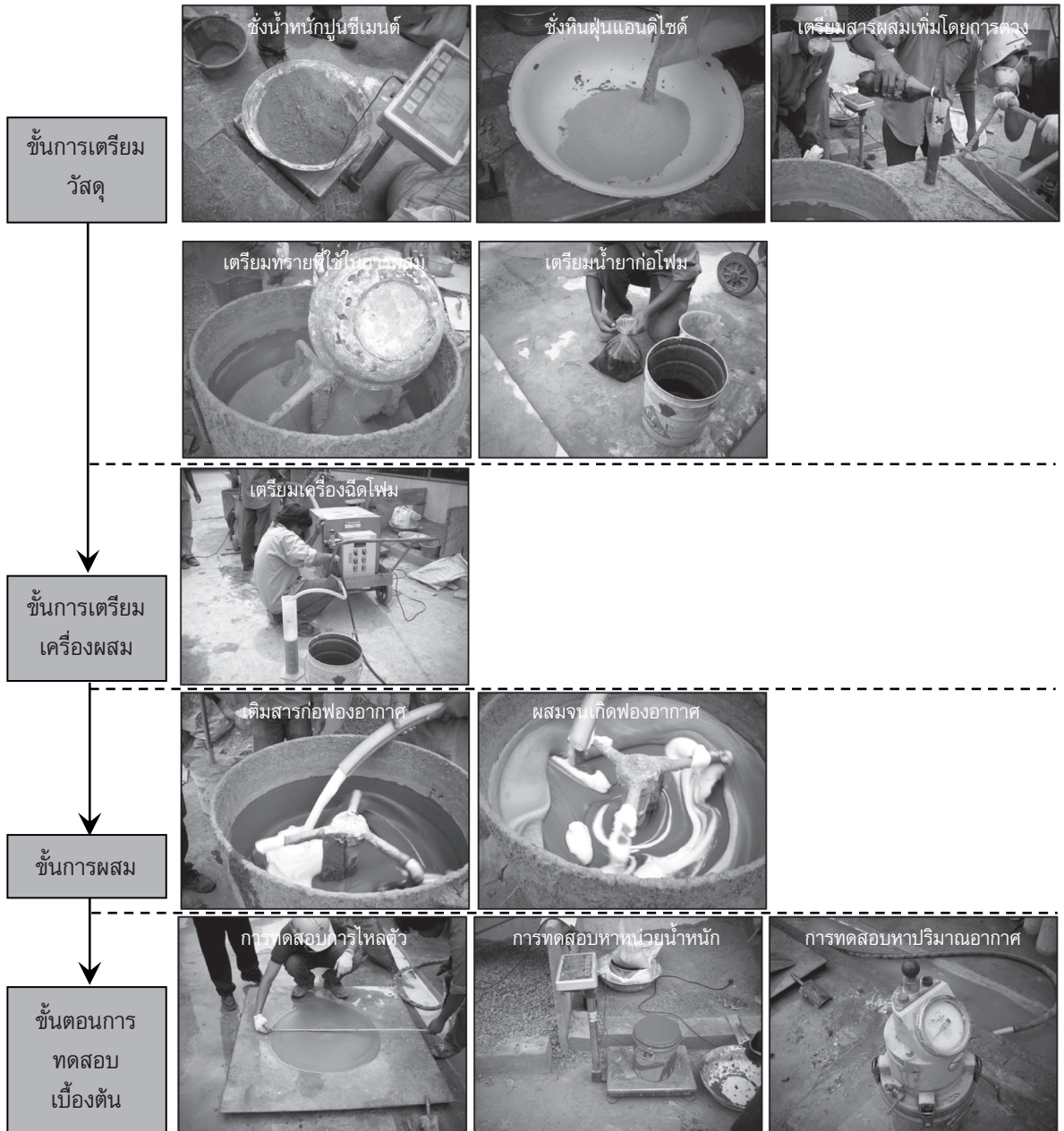
FM ค่าโมดูลัสความละเอียด และ Y ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0, 2.5 และ 3.0

<sup>[2]</sup> ค่าโมดูลัสความละเอียดที่ 2.5 และ 3.0 จะใช้ปริมาณสัดส่วนผสมเหมือนกันกับค่า 2.0

### 2.3 กระบวนการขึ้นรูปของคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบามีขั้นตอนการผสมดังแสดงในรูปที่ 1 กล่าวคือ เริ่มจากการนำองค์ประกอบมาทำการผสมแห้งให้เข้ากันก่อน จากนั้นเติมน้ำในปริมาณที่กำหนด (ในที่นี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และ

เถ้าลอย) (w/b) เท่ากับ 0.52) จากนั้นจึงเติมสารก่อฟองอากาศแล้วจึงทำการผสมจนฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอ หลังจากผสมเสร็จจึงเทลงในแบบหล่อตามมาตรฐาน



รูปที่ 1 การเตรียมวัสดุ กระบวนการผสมและทดสอบสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตมวลเบา

## 2.4 วิธีการทดสอบ

### 2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ

องค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) และสมบัติทางกายภาพของหินปูนแอนไฮไดรต์ได้แก่ ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้

ปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำ ส่วนลักษณะของอนุภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

### 2.4.2 การทดสอบสมบัติของคอนกรีต

การเตรียมชิ้นทดสอบ ทำโดยตัดชิ้นตัวอย่างให้

มีขนาด 100 มม. x 100 มม. โดยมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน  $\pm 1$  มม. จากนั้นทำการอบแห้งขึ้นทดสอบในตู้อบจนน้ำหนักที่คงที่เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง แล้วจึงแช่ขึ้นทดสอบในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วยกออก ใช้ผ้าชุบเช็ดที่ผิวภายใน 3 นาที

สมบัติของคอนกรีตมวลเบาได้แก่ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM C138 [15] ค่าการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1611 [16] ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C403 [17] โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C469 [18] กำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 สูง 30 ซม. โดยทำการหล่อ 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งลัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นทำการบ่มในน้ำจนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 3, 7, 28, 60, 90 และ 120 วัน ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก (Splitting Tensile Test) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM

C39 [19] และ ASTM C496 [20] ตามลำดับ

### 3. ผลการทดสอบและวิจารณ์

#### 3.1 สมบัติพื้นฐานของหินปูนแอนดิไซต์

##### 3.1.1 องค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย และหินปูนแอนดิไซต์ แสดงในตารางที่ 2 โดยพบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในขณะที่เถ้าลอยและหินปูนแอนดิไซต์มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ร้อยละ 42.10 และ 56.72 ตามลำดับ

สำหรับสมบัติทางกายภาพของหินปูนแอนดิไซต์พบว่า ค่าร้อยละของการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition, LOI) มีค่าสูงถึงร้อยละ 10.06 ในขณะที่ความชื้นมีค่าร้อยละ 0.05 โดยจะเห็นได้ว่าค่าร้อยละของร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (LOI) ที่สูงเกิดจากการสลายตัวสารประกอบจำพวกแคลเซียม (Decalcination) ที่อุณหภูมิมากกว่า 870 องศาเซลเซียส

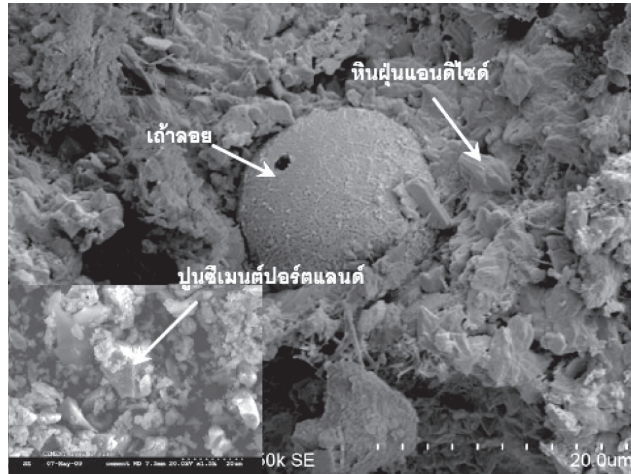
ตารางที่ 2 องค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย และหินปูนแอนดิไซต์

องค์ประกอบเคมี (ร้อยละโดยมวล)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	หินปูนแอนดิไซต์
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	20.34	42.10	56.72
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.59	21.80	16.66
ไอรอนออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.26	11.22	3.72
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	64.78	13.56	8.90
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.43	2.41	2.78
โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	0.45	1.38	0.99
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)	0.17	2.90	3.83
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	2.48	1.88	0.02
สมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย	หินปูนแอนดิไซต์
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้	1.51	2.44	10.06
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.02	1.50	0.05
ความถ่วงจำเพาะ	3.13	2.13	2.67
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	-	1.45	0.57

**3.1.2 ลักษณะของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
เม็ดลอย และหินฝุ่นแอนดิไซต์**

ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เม็ดลอย และหินฝุ่นแอนดิไซต์แสดงในรูปที่ 2 พบว่าอนุภาค

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และหินฝุ่นแอนดิไซต์ค่อนข้างมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมมีทั้งผิวเรียบและบางส่วนผิวขรุขระ แต่อนุภาคเม็ดลอยมีลักษณะทรงกลมและมีผิวเรียบ

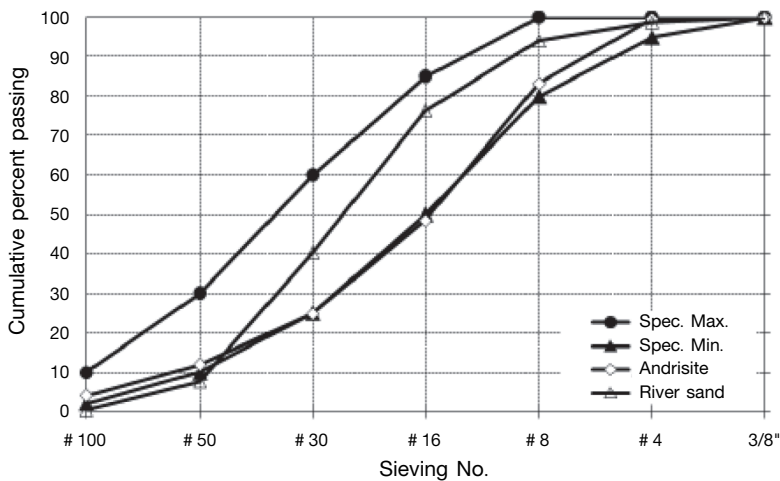


**รูปที่ 2** ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เม็ดลอย และหินฝุ่นแอนดิไซต์ ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า

**3.1.3 การกระจายขนาดคละของหินฝุ่นแอนดิไซต์**

จากรูปที่ 3 พบว่า ร้อยละผ่านสะสมของหินฝุ่นแอนดิไซต์มีค่าใกล้เคียงกับขอบเขตล่างตามมาตรฐาน ASTM C33 [13] แต่อย่างไรก็ตามในช่วงตะแกรงร่อนขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 50 หินฝุ่นแอนดิไซต์มีร้อยละสะสม

ผ่านต่ำกว่าทรายแม่น้ำ ในขณะที่ขนาดตะแกรงเล็กกว่าเบอร์ 50 หินฝุ่นแอนดิไซต์มีร้อยละสะสมผ่านมากกว่า ดังนั้นหินฝุ่นแอนดิไซต์จึงสามารถแทรกตัว (Filling) เข้าระหว่างช่องว่างภายในอนุภาคทรายแม่น้ำได้



**รูปที่ 3** ร้อยละสะสมของอนุภาคหินฝุ่นแอนดิไซต์และทรายแม่น้ำเปรียบเทียบกับขอบเขตบนและล่างตามมาตรฐาน ASTM C33 [13]

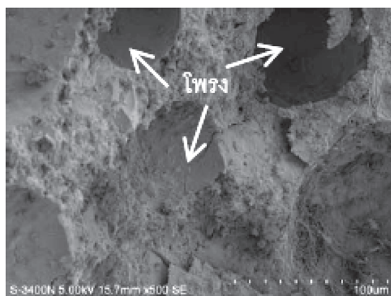
### 3.2 สมบัติทางกายภาพของคอนกรีตผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์

#### 3.2.1 ลักษณะโครงสร้างภายใน

ลักษณะโครงสร้างภายในของคอนกรีตมวลเบาล้วนแสดงในรูปที่ 4 พบว่า โครงสร้างภายในคอนกรีตมวลเบาล้วนที่อายุ 91 วัน มีโพรงอากาศทั้งทรงกลมและทรงรีกระจายตัวอยู่ (รูปที่ 4 (ก)) โดยมีเอ็ทริงโกท์เกิดขึ้นในปริมาณมากที่บริเวณผนังภายในโพรง (รูปที่ 4 (ข)) เนื่องจากมีที่ว่างและความดันภายในโพรงต่ำกว่าภายในเนื้อเพสต์ นอกจากนี้ลักษณะของเอ็ทริงโกท์จะเป็นแบบเข็ม (Needle-like shape) เนื่องจากในโพรงมีที่ว่างพอให้การก่อตัวในแนวตั้งฉากกับผิวโพรงภายใน [21] ส่วนเนื้อของเพสต์ (รูปที่ 4 (ค)) พบแผ่นของแคลเซียม

ซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) อยู่ นอกจากนั้นที่บริเวณอนุภาคเถ้าลอยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานิคมีรอยต่อ (Interfacial Transition Zone, ITZ) ขนาดประมาณ 2-4 ไมโครเมตรปรากฏอยู่

สำหรับโครงสร้างภายในคอนกรีตมวลเบาที่ผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์แสดงในรูปที่ 5 พบว่า โครงสร้างที่มีลักษณะเดียวกันกับคอนกรีตมวลเบาล้วน แต่จะเห็นว่าโครงสร้างภายในคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์มีความกว้างของ ITZ มากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กรณีคอนกรีตซึ่งมีหินฝุ่นแอนดิไซด์ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด (FM) เท่ากับ 3.0 และมีอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 50 เป็นส่วนประกอบ โดยที่อายุคอนกรีต 91 วัน ความกว้างของ ITZ อยู่ที่ประมาณ 5 - 10 ไมโครเมตร เป็นต้น



(ก) ที่กำลังขยาย 500 เท่า



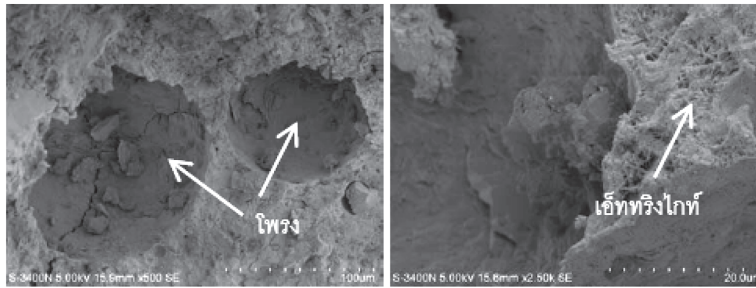
(ข) ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า



(ค) แสดงส่วนเถ้าลอย ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า

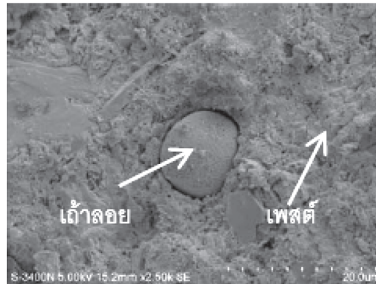
รูปที่ 4 โครงสร้างภายในคอนกรีตมวลเบาล้วนที่อายุ 91 วัน





(ก) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

(ข) ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า



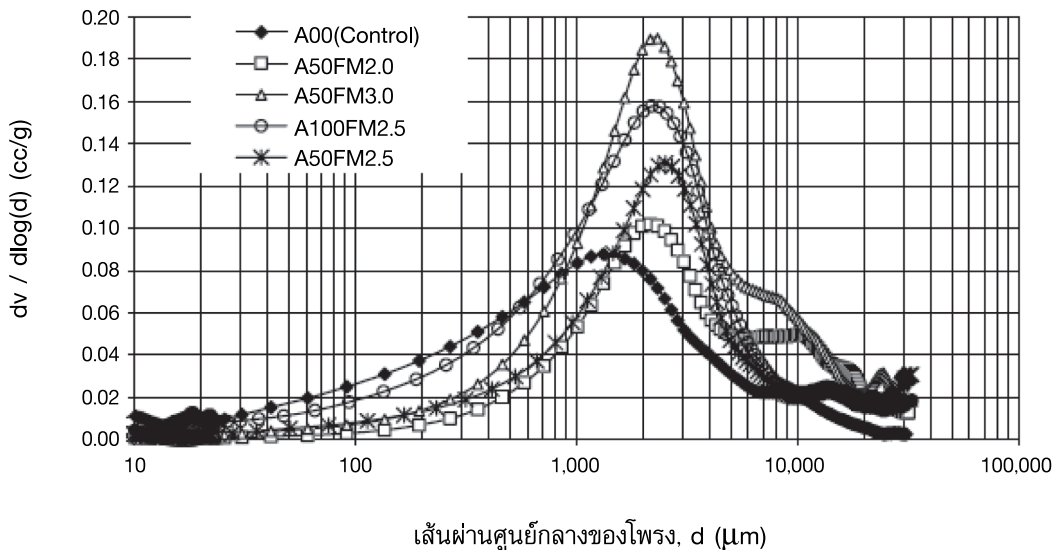
(ค) แสดงส่วนเถ้าลอย ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า

**รูปที่ 5** โครงสร้างภายในคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด (FM) เท่ากับ 3.0 และที่อัตราส่วนการแทนที่ในทรายแม่น้ำเท่ากับร้อยละ 50 ที่อายุ 91 วัน

### 3.2.2 ความพรุนโครงสร้าง

รูปที่ 6 แสดงการกระจายตัวของโพรงภายในของคอนกรีตล้วน (A00(Control)) และคอนกรีตผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์ที่อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับร้อยละ 50 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0 (A50FM2.0), ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.5 (A50FM2.5) และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.0 (A50FM3.0) และคอนกรีตผสมแอนดิไซด์ที่ร้อยละ 100 และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.5 (A100FM2.5) ที่อายุ 91 วัน พบว่า โพรงของคอนกรีตมวลเบาล้วนมีปริมาณมากกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมหิน

ฝุ่นแอนดิไซด์ในช่วงขนาด 10 ถึง 800 ไมโครเมตร ในขณะที่โพรงในช่วงขนาด 1,000 ถึง 10,000 ไมโครเมตร คอนกรีตมวลเบาล้วนมีปริมาณน้อยกว่าคอนกรีตมวลเบาที่ผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์ กล่าวคือในช่วงดังกล่าวซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณมากที่สุดทั้งในคอนกรีตมวลเบาล้วนและผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์ พบว่า ปริมาณโพรงอากาศของคอนกรีตมวลเบาที่มีสัดส่วนผสมได้แก่  $A50FM3.0 < A50FM2.5 < A100FM2.5$  ตามลำดับ ตามค่าโมดูลัสความละเอียดของหินฝุ่นแอนดิไซด์ที่สูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณโพรงอากาศเพิ่มขึ้น

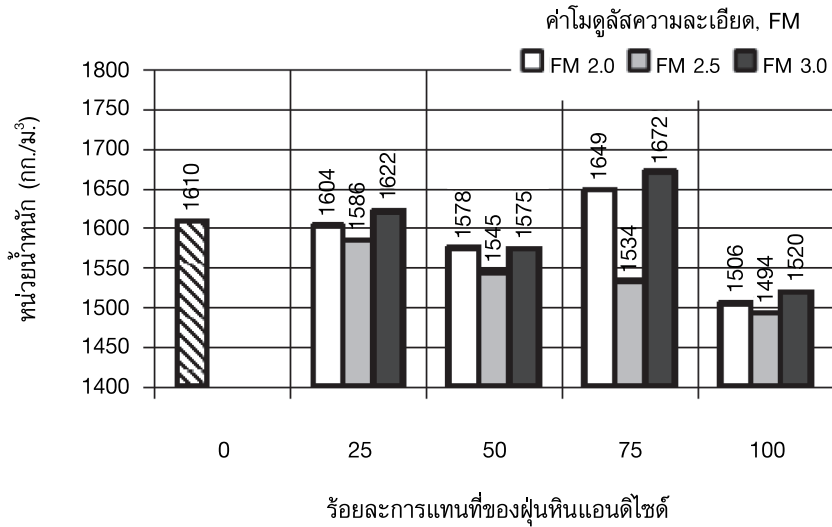


**รูปที่ 6** การกระจายตัว (Log-scale) ของโพรงของคอนกรีตล้วน (A00(Control)) คอนกรีตผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์ที่ร้อยละ 50 และมีค่าโมดูลัสความยืดเท่ากับ 2.0 (A50FM2.0), ค่าโมดูลัสความยืดเท่ากับ 2.5 (A50FM2.5) และค่าโมดูลัสความยืดเท่ากับ 3.0 (A50FM3.0) และคอนกรีตผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์ที่ร้อยละ 100 และมีค่าโมดูลัสความยืดเท่ากับ 2.5 (A100FM2.5) ที่อายุ 91 วัน

### 3.2.3 หน่วยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของโมดูลัสความละเอียดที่มีต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาพบว่า คอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักลดลงเมื่อโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ไปเป็น 2.5 และกลับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มโมดูลัสความละเอียดไปที่ 3.0 ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยการเปลี่ยนแปลง หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์มาจากสาเหตุคือ ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมที่ใช้ ร้อยละการแทนที่ของหินฝุ่นแอนดิไซด์ และค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม โดยที่ระดับการแทนที่ของหินฝุ่นแอนดิไซด์เท่ากันจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงหน่วยน้ำหนักไปในทิศทางเดียวกันยกตัวอย่างเช่น ที่ร้อยละการแทนที่ของหินฝุ่นแอนดิไซด์เท่ากับร้อยละ

ละ 25 (ทรายแม่น้ำร้อยละ 75 และหินฝุ่นแอนดิไซด์ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก) และที่ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.5 และ 3.0 จะพบว่า ยิ่งอนุภาคมีขนาดใหญ่มีผลความสามารถในการอัดแน่นต่ำแต่จะถูกชดเชยบางส่วนด้วยอนุภาคส่วนละเอียดของหินฝุ่นแอนดิไซด์ทำให้หน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อย ในขณะที่อนุภาครวมที่มีขนาดเล็กกว่าจะแทรกตัวและอัดแน่นได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามการแทนที่หินฝุ่นแอนดิไซด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อหน่วยน้ำหนักที่ลดลง โดยเฉพาะที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 50 และ 100 ซึ่งน่าจะเกิดการแตกตัวของฟองที่มากกว่าจากความเป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาคหินฝุ่นที่มากกว่าทรายแม่น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5

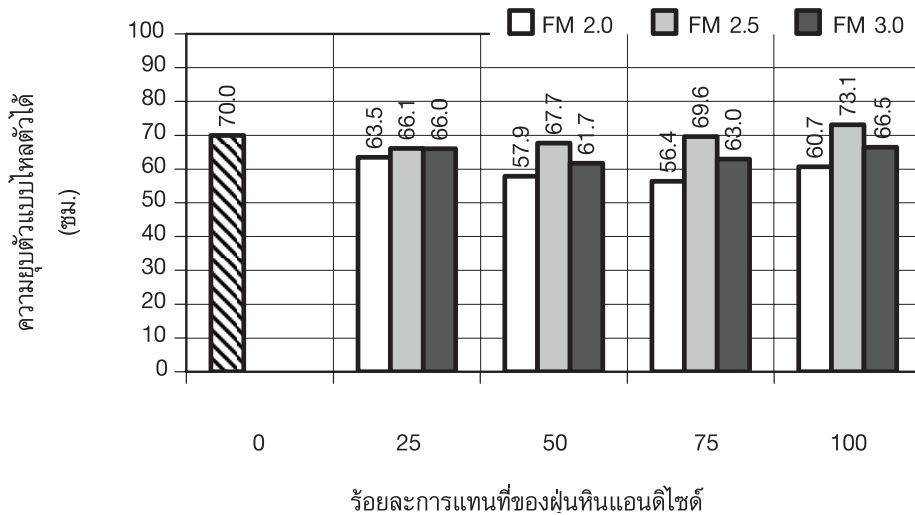


รูปที่ 7 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา

### 3.2.4 ความยวบยตัวแบบไหลตัวได้

จากในรูปที่ 8 พบว่า คอนกรีตมวลเบาผสมหิน ฟูนแอนดิไซด์มีค่าความยวบยตัวแบบไหลตัวได้ไม่แตกต่างไปจากคอนกรีตมวลเบาผสมทรายแม่น้ำล้นอย่างมี

นัยสำคัญ โดยการใช้นหินฟูนแอนดิไซด์แทนที่ในทรายแม่น้ำ ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าการไหลตัวที่ลดลง อันเนื่องมาจากความสามารถในการยึดรังฟองอากาศของอนุภาคหินฟูนแอนดิไซด์ได้มากกว่าอนุภาคทรายแม่น้ำ

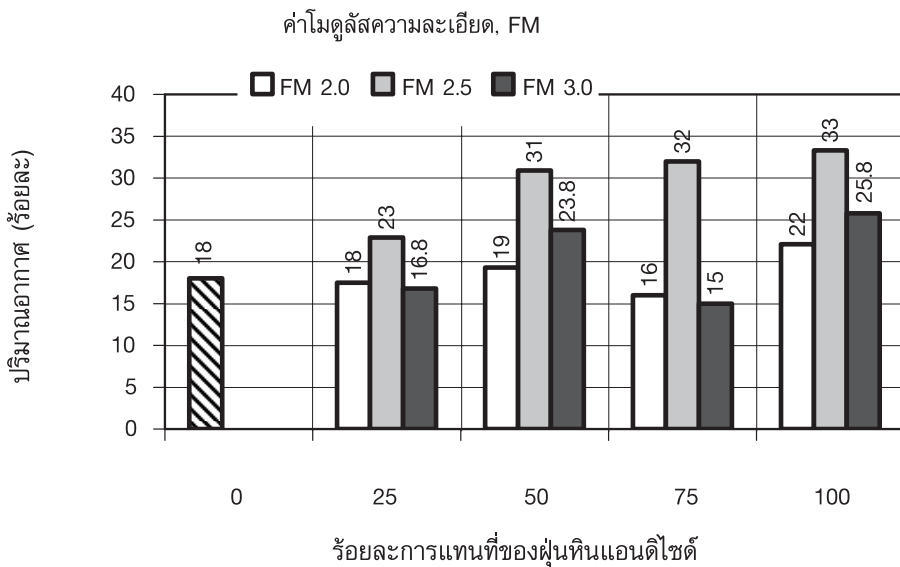


รูปที่ 8 ความยวบยตัวแบบไหลตัวได้ของคอนกรีตมวลเบา

### 3.2.5 ปริมาณอากาศ

จากรูปที่ 9 พบว่า ค่าโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ไปเป็น 2.5 มีผลต่อปริมาณอากาศของคอนกรีตมวลเบาในสภาวะสด แต่กลับมีค่าลดลงเมื่อโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 2.5 ไปเป็น 3.0 โดยผลที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่มีค่าลดลงเมื่อปริมาณอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากผลของความ

เป็นเหลี่ยมมุมของอนุภาคหินฝุ่นแอนดิไซต์ที่ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.5 มีความเป็นเหลี่ยมมนน้อยกว่าที่ 2.0 และ 3.0 ดังแสดงในรูปที่ 5 ทำให้ฟองอากาศของคอนกรีตที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0 และ 3.0 แตกตัวออก ส่งผลให้คอนกรีตที่ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.5 มีค่าที่มากกว่า

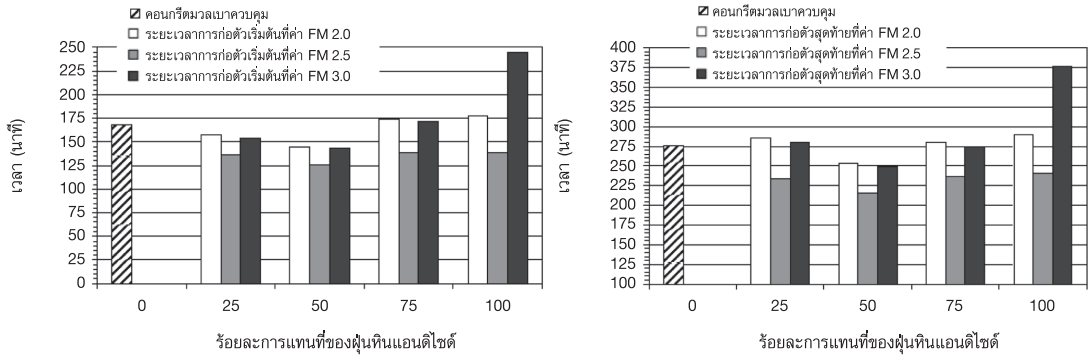


รูปที่ 9 ปริมาณอากาศของคอนกรีตมวลเบา

### 3.2.6 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมวลเบาแสดงได้ในรูปที่ 10 โดยพบว่า ค่าการก่อตัวมีค่าลดลงเมื่อโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ไปเป็น 2.5 และมีความเพิ่มขึ้นเมื่อโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 2.5 ไปเป็น 3.0 โดยหลักการความสามารถในการพัฒนาโครงสร้างของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมี ซึ่งในที่นี้คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิก แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ ( $603 \text{ กก./ม}^3$ ) และปริมาณเถ้าลอย ( $38 \text{ กก./ม}^3$ ) ในขณะที่ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.38 และปริมาณฟองอากาศที่ 9.2 ลิตรต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ

ก่อตัวจึงเกี่ยวข้องกับผลของปริมาณฟองอากาศที่มีมวลรวมละเอียดที่ไม่เท่ากัน หรือผลของน้ำยาก่อฟองอากาศที่มีพื้นที่ผิวของทรายแม่น้ำและหินฝุ่นแอนดิไซต์ไม่เท่ากัน นอกจากนั้นความละเอียดของหินฝุ่นแอนดิไซต์มีผลต่อการทำงานของสารก่อฟองอากาศด้วยเช่นกัน เนื่องจากเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณพื้นที่ผิว โดยในที่นี้ เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของหินฝุ่นแอนดิไซต์ในทรายแม่น้ำที่เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 50 ค่าการก่อตัวมีแนวโน้มลดลง แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของหินฝุ่นแอนดิไซต์เพิ่มขึ้นไปร้อยละ 100 แสดงว่าหินฝุ่นแอนดิไซต์มีผลต่อการก่อตัวน้อยในช่วงการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 50



รูปที่ 10 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตมวลเบา

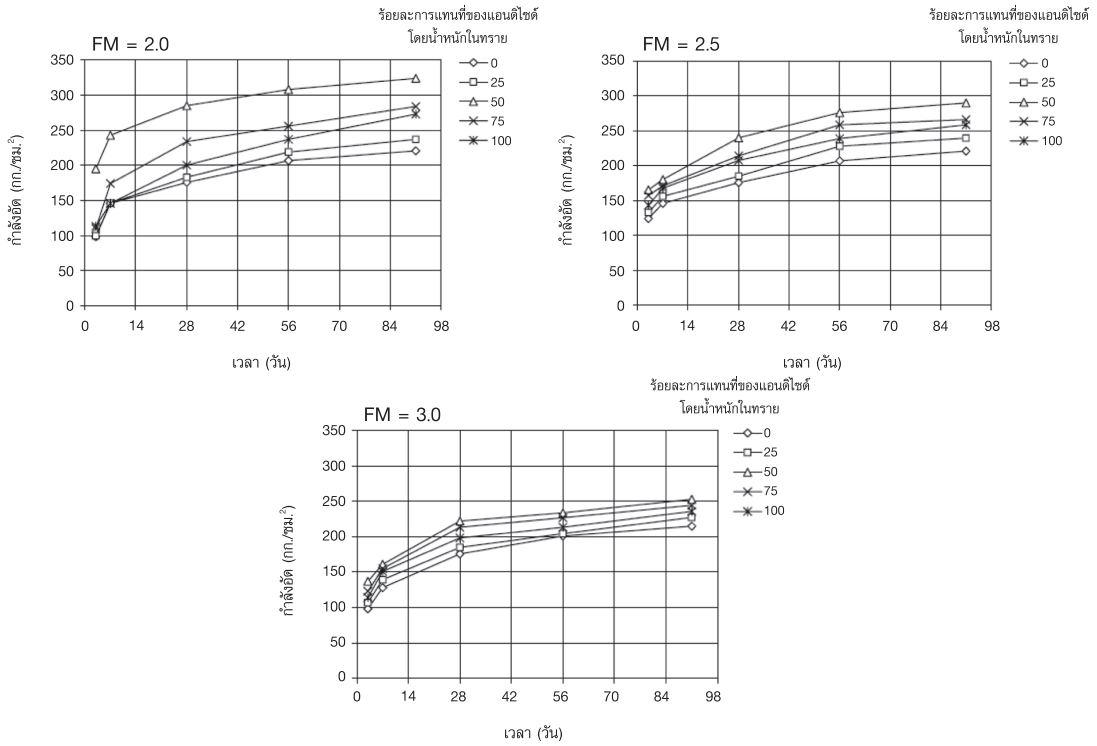
### 3.3 สมบัติทางกล

#### 3.3.1 กำลังอัด

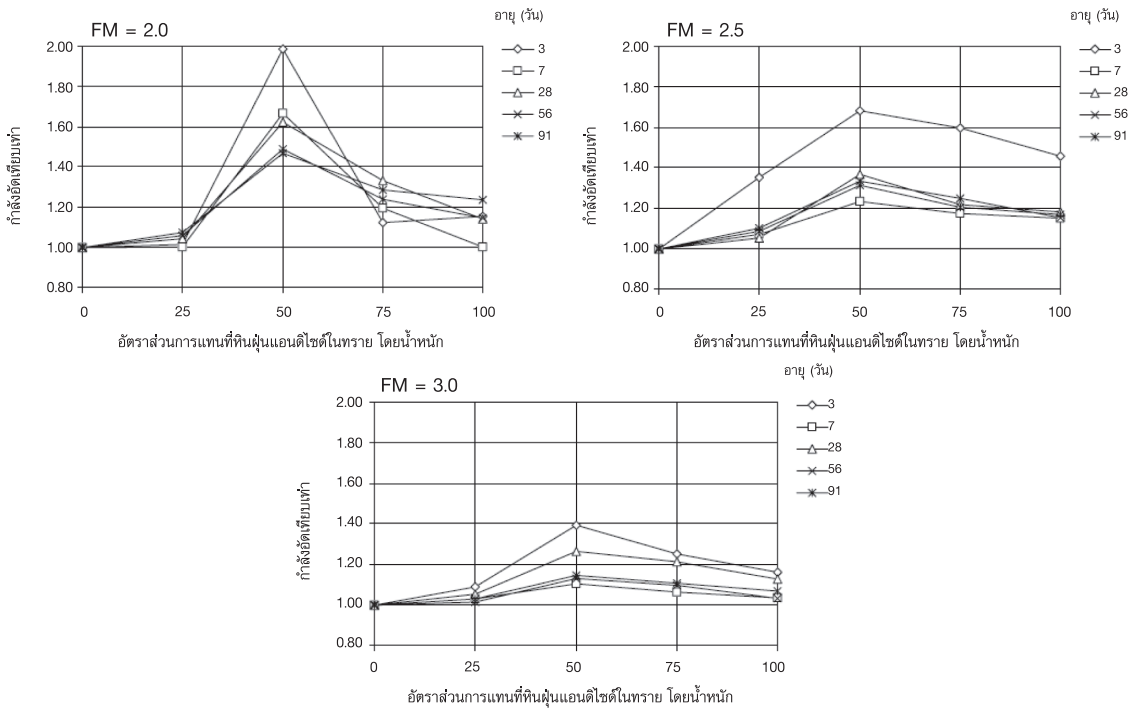
ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาล้วนและผสมหินปูนแอนดิไซด์ และกำลังอัดเทียบเท่ากับคอนกรีตมวลเบาผสมทรายแม่น้ำแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าโมดูลัสความละเอียดมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา กล่าวคือคอนกรีตที่ผสมหินปูนแอนดิไซด์ซึ่งมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0 มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหินปูนแอนดิไซด์ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดมากกว่า ทั้งนี้เพราะหินปูนแอนดิไซด์มีความละเอียดมากทำให้แทรกตัวเข้าไปในช่องว่างได้ดีซึ่งหมายถึงมีความหนาแน่นที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหินปูนแอนดิไซด์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ โดยการพัฒนากำลังอัดจะเห็นชัดเจนในช่วง 28 วันแรก โดยมีค่า

สูงสุดเมื่อคอนกรีตมีอายุที่ 28 วัน จากนั้นจะลดลงตามลำดับ ตามอัตราการปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

สำหรับผลของร้อยละการแทนที่ของหินปูนแอนดิไซด์ในทรายแม่น้ำเท่ากับร้อยละ 50 และค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0 มีผลทำให้คอนกรีตมวลเบามีกำลังอัดเพิ่มสูงสุด (ที่อายุ 91 มีค่า 324 กก./ตร.ซม.) และสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาล้วนสาเหตุสำคัญน่าจะมาจากขนาดโดยรวมของมวลรวมทั้งสองชนิด กล่าวคือ หากให้อนุภาคของทรายเป็น d1 และอนุภาคของหินปูนแอนดิไซด์เป็น d2 ค่าการอัดแน่นที่มากที่สุดของมวลรวมทั้งสองชนิด ( $\max(d1, d2)$ ) อยู่ที่อนุภาคที่มีปริมาตรสัดส่วนอย่างละครึ่ง ในขณะที่ค่าที่สูงขึ้นเช่นที่อัตราส่วนการแทนที่เท่ากับร้อยละ 100 จะส่งผลกระทบต่อ การอัดแน่นที่ลดลงทำให้ความหนาแน่นลดลงค่อนข้างมาก



รูปที่ 11 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาล้วนและผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์

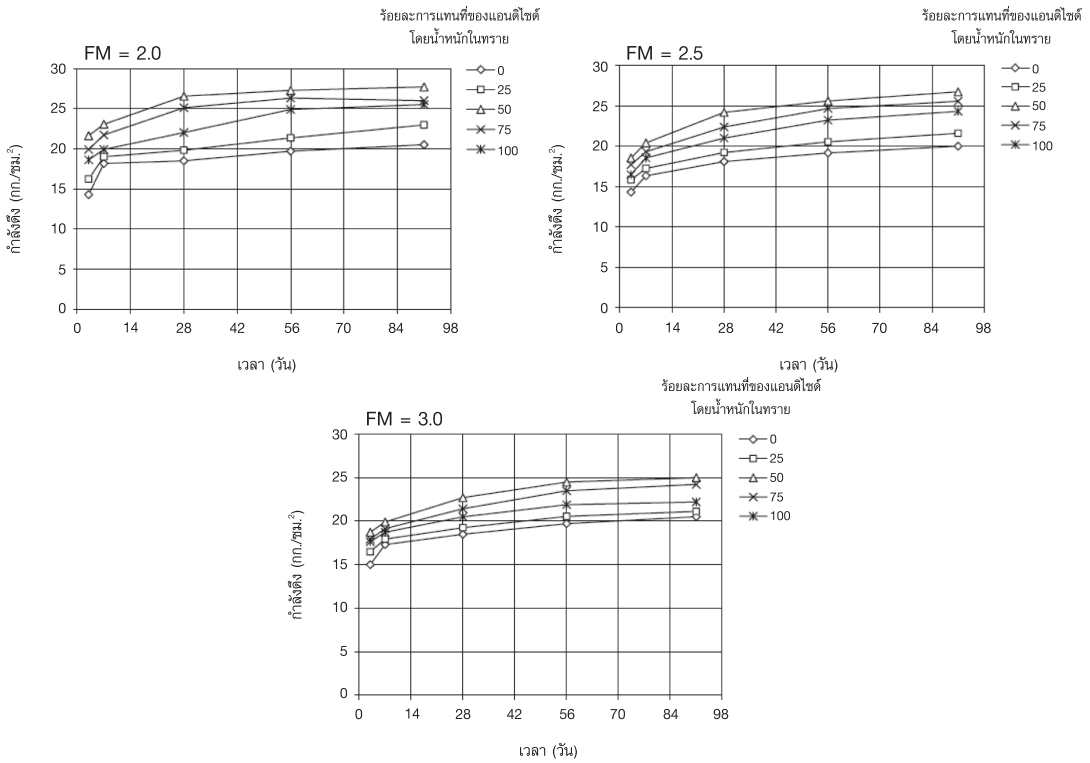


รูปที่ 12 กำลังอัดเทียบเท่าของคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์

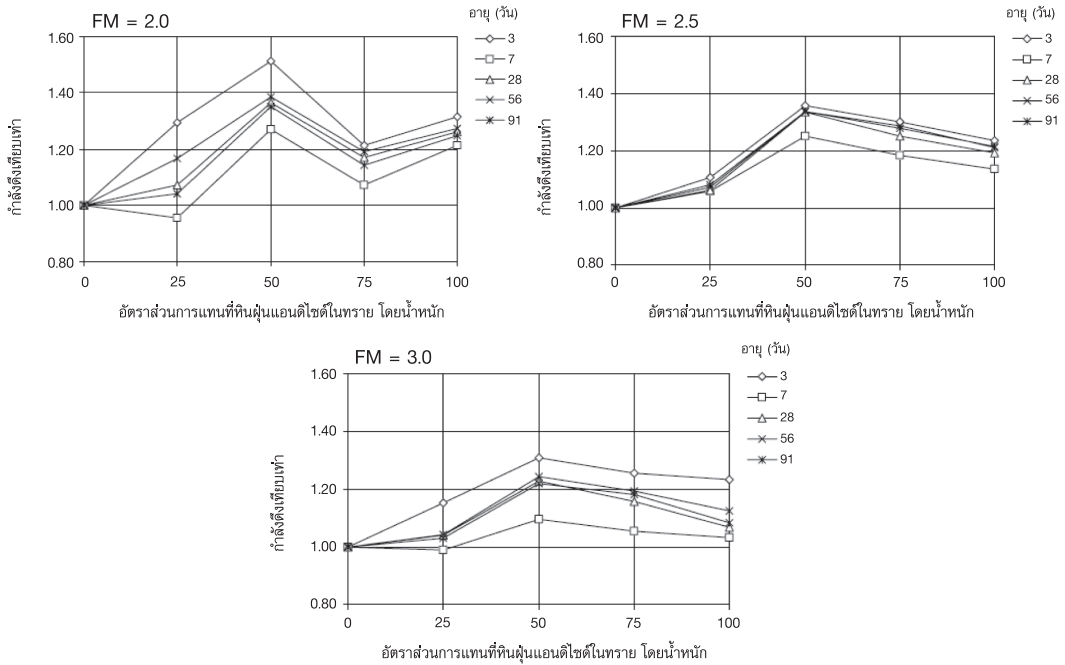
### 3.3.2 กำลังดึงแบบผ่าซีก

รูปที่ 13 พบว่า ค่ากำลังดึงของคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0, 2.5 และ 3.0 และกำลังดึงแบบผ่าซีกเทียบเท่าคอนกรีตมวลเบาล้วนในรูปที่ 14 พบว่า แนวโน้มเพิ่ม

ขึ้นของกำลังดึงมีทิศทางเดียวกันกับการพัฒนากำลังอัดในหัวข้อก่อนหน้า กล่าวคือ เมื่อร้อยละการแทนที่ของหินฝุ่นแอนดิไซด์ในทรายแม่น้ำเท่ากับร้อยละ 50 มีผลทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีกำลังดึงสูงสุดและสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมทรายแม่น้ำด้วยเช่นกัน



รูปที่ 13 กำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์



รูปที่ 14 กำลังดึงแบบผ่าซีกเทียบเท่าของคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์

### 3.3.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28, 56 และ 91 วัน แสดงในรูปที่ 15 พบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเดียวกับการพัฒนา กำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีก โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์มีค่าสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมทรายแม่น้ำ นอกจากนี้คอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่า 2.5 และ 3.0 ในขณะที่อัตราส่วนการแทนที่ของหินฝุ่นแอนดิไซต์ในทรายแม่น้ำด้วยที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงขึ้น อันอาจเนื่องมาจากความเป็นเหลี่ยมมุมของหินฝุ่นแอนดิไซต์ที่มากกว่าทรายแม่น้ำทำให้เกิดการขัดกันระหว่างอนุภาคที่ตึกกว่าซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการเสีรูปร่างที่ต่ำกว่าคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำ

## 4. สรุปผล

4.1 หินฝุ่นแอนดิไซต์มีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) เป็นองค์ประกอบหลักและมีขนาดละเอียดในรูปของร้อยละผ่าน

ละเอียดใกล้เคียงกับขอบเขตล่างตามมาตรฐาน ASTM C33 [13]

4.2 คอนกรีตมวลเบาซึ่งมีสัดส่วนของหินฝุ่นแอนดิไซต์ที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0, 2.5 และ 3.0 ค่าอัตราส่วนการแทนที่ของหินฝุ่นแอนดิไซต์ในทรายแม่น้ำที่ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย) เท่ากับ 0.52 ตามลำดับ และมีขั้นตอนการผสมขึ้นรูปตามที่แสดงดังกล่าวข้างต้น คอนกรีตมวลเบาดังกล่าวมีสมบัติเฉพาะคือ

4.2.1 คอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์ มีค่าหน่วยน้ำหนักลดลงเมื่อโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ไปเป็น 2.5 แต่กลับเพิ่มขึ้นเมื่อโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้นไปที่เท่ากับ 3.0 และการแทนที่หินฝุ่นแอนดิไซต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดลงของหน่วยน้ำหนัก

4.2.2 คอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์มีความยวบตัวแบบไหลตัวได้ไม่แตกต่างไปจากคอนกรีตมวลเบาผสมทรายแม่น้ำล้วน

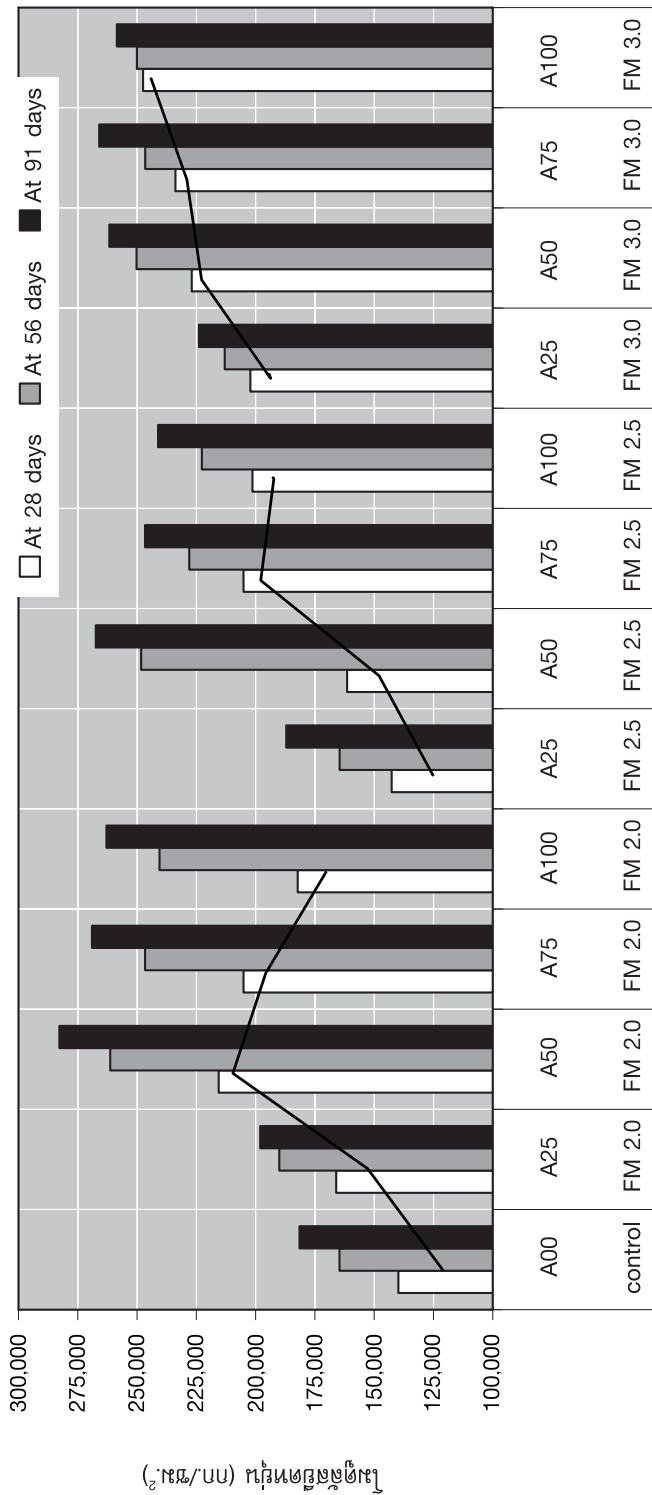
4.2.3 ปริมาณอากาศของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้นเมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ไปเป็น



2.5 แต่กลับมีค่าลดลงเมื่อค่าโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้น จาก 2.5 ไปเป็น 3.0

4.2.4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อโมดูลัสความละเอียดเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนการแทนที่ของหินฝุ่นแอนดิไซด์ในทรายแม่น้ำเพิ่มขึ้นไปถึงร้อยละ 50 มีผลต่อค่าการก่อตัวที่ลดลง แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของหินฝุ่นแอนดิไซด์เพิ่มขึ้นไปถึงร้อยละ 100

4.2.5 คอนกรีตที่ผสมหินฝุ่นแอนดิไซด์ที่มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.0, 2.5 และ 3.0 และมีการแทนที่ของหินฝุ่นแอนดิไซด์ในทรายแม่น้ำเท่ากับร้อยละ 50 มีการพัฒนากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกที่ลดลง และโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุด ในขณะที่อัตราส่วนการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 50 มีผลต่อกำลังรับแรงที่ลดลงตามลำดับ



ร้อยละการแทนที่ของทีนผู้่นแอนดิไซด์โดยน้ำหนกในทราย  
ค่าไม่ดูลัสความละเอียด (FM)

รูปที่ 15 ไม่ดูลัสยัตยของคอนกรีตมวลเบาผสมทีนผู้่นแอนดิไซด์

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินงานครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนร่วมในการสนับสนุนซึ่งได้แก่ บริษัท ทุ่งคาฮาเบอร์ จำกัด (มหาชน) อ.แก่งคอย จ.สระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์หินฟูนแอนดิไซด์สำหรับใช้ในการทดสอบ และ บริษัท อิตาเลียน-ไทย ดีเวลอปเมนต์ จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์ให้ใช้ห้องปฏิบัติการทดสอบ

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Chi J.M., Huang R., Yang C.C., and Chang J.J., 2003, "Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete", *Cement & Concrete Composites*; Vol. 25, pp. 197-205.
2. Latona, M, C., Neufeld, R., D., Vellejo, L., E., Hu, W., and Kelly, C., 1996, "Environmental impacts of autoclaved cellular concrete", *Proceedings of the 1996 ASCE National Convention*: New York, USA, pp. 57-69.
3. Manuel, M., 1990, "Autoclaved cellular concrete for residential construction", *Concrete International*, Vol. 12, No. 9, pp. 41-44.
4. Keeswadkhon, P. and Homkrajay, S., 1996, *Properties of light weight concrete*, Bachelor's Project, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. (In Thai)
5. Rojprasitporn, K., Sudkla, S., and Borirakarawin, A., 2003, "*Properties of light weight concrete mixed with micro-fibre*, Bachelor's Project, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. (In Thai)
6. Jichiyaphum, K., Sinsiri, T., and Chindaprasert, P., 2009, "Cellular-light weight concrete containing natural pozzolan", *5<sup>th</sup> Annual Concrete Conference*, Nakhon Ratchasima, MAT 129-135. (In Thai)
7. Charoensirisatien, S., Chatveera, B., and Tangtermsirikul, S., 2006, "Effect of limestone ash on properties of high-Early strength concrete",

*KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 29, pp. 375-388. (In Thai)

8. Haque M.N., Al-Khaiat H., and Kayali O., 2008, "Strength and durability of lightweight concrete, the use of natural pozzolans in lightweight concrete", *Proceedings of The International Conference on Concrete Construction*, Kingston University, London, UK, 9-10 September.
9. Neufeld, R., D., C., Vellejo, L., E., Hu, W., Latona, M, Christopher, C., and Kelly, 1994, "Properties of high fly ash content cellular concrete", *ASCE Journal of Energy Engineering*, Vol. 120, pp. 33-49.
10. Chatveera, B., Jariyateeravate, S., and Makul, N., 2008, "Properties of hollow non-load bearing and non-moisture controlling concrete block containing diatomite and sugarcane bagasse ash", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 32, pp. 59-76. (In Thai)
11. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C128 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction*, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
12. Yahia, A., Tanimura, M., and Shimoyama, Y., 2000, "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 532-539.
13. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates, *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction*, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.
14. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for

Use in Concrete, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

15. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C138 Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

16. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C1611 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, Section 4 Construction, *Annual Book of ASTM Standard*, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

17. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C403 Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, *Annual Book of ASTM Standard*, Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

18. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C469 Standard Test Method for

Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete Compression, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Annual Book of ASTM Standard, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

19. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

20. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

21. Cody, A.M., Lee, H., Cody, R.D., and Spry, P.G., 2004, "The effects of chemical environment on the nucleation, growth, and stability of ettringite  $[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 869-881.