

Chulalongkorn University

Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2022

การพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงด้วยหินปะชอลต์และตะกรันเหล็กสำหรับ โครงสร้างแข็งเกร็งพิเศษ

ณรงค์ชัย ยักษา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Civil Engineering Commons](#), and the [Construction Engineering and Management Commons](#)

Recommended Citation

ยักษา, ณรงค์ชัย, "การพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงด้วยหินปะชอลต์และตะกรันเหล็กสำหรับโครงสร้างแข็งเกร็งพิเศษ" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6534.
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6534>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงด้วยหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กสำหรับโครงสร้างแข็งเกร็ง
พิเศษ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of high modulus concrete with basalt and steel slag for special rigid
structures



Mr. Narongchai Paksa

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

Department of Civil Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงด้วยหินบะซอลต์และ ตะกรันเหล็กสำหรับโครงสร้างแข็งเกร็งพิเศษ |
| โดย | นายณรงค์ชัย ปึกษา |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

| | |
|---|---------------------------------|
| | คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| (ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล) | |
| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | |
| | ประธานกรรมการ |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จอห์นวิวัฒน์สกุล) | |
| | อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก |
| (ศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว) | |
| | กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ธนศรีสถิตย์) | |

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ณรงค์ชัย ปักษา : การพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงด้วยหินบะซอลต์และตะกรันเหล็ก
สำหรับโครงสร้างแข็งเกร็งพิเศษ. (Development of high modulus concrete with
basalt and steel slag for special rigid structures) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ทศพล
ปิ่นแก้ว

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคุณสมบัติโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของ
คอนกรีต เพื่อประยุกต์ใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรง (Rigidity) เป็นพิเศษ เพื่อลดการเคลื่อนตัว
ของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ โดยปรับเปลี่ยนวัสดุมวลรวมหยาบเป็นหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กจาก
เตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag) ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่าหินปูน และออกแบบส่วนผสมโดยการปรับขนาด
คละของมวลรวมหยาบ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม แล้วทำการ
ทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น จากนั้นจึงประยุกต์ใช้คอนกรีตที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติ
กับโครงสร้างเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงและผนังรับแรงเฉือนในอาคารสูงโดยการเปรียบเทียบ
ประสิทธิภาพของโครงสร้างกับคอนกรีตปกติด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง ETABS ซึ่งจากผล
การศึกษาพบว่า (1) ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นวัสดุมวลรวมหยาบที่ให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุด
การลดขนาดของมวลรวมหยาบให้อัดแน่น การลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และการเพิ่มอัตราส่วนมวลรวม
ละเอียดต่อมวลรวมสามารถช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถเพิ่มค่าโมดูลัส
ยืดหยุ่นได้ถึง 55.3 GPa คิดเป็น 47% เมื่อเทียบกับค่าจากสมการของมาตรฐาน ACI (2) เมื่อนำไป
ประยุกต์ใช้กับโครงสร้างเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงพบว่าสามารถลดระยะการเคลื่อนตัวของ
โครงสร้างได้ 23% และลดขนาดหน้าตัดโครงสร้างได้ 28% เมื่อประยุกต์ใช้กับโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน
ในอาคารสูงสามารถลดระยะการเคลื่อนตัวได้ 32% และลดความหนาได้ 49% ดังนั้นการประยุกต์ใช้
คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจึงเป็นอีกทางเลือกในการลดระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่อาจมี
ประสิทธิภาพและคุ้มค่ากว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดโครงสร้างหรือใช้คอนกรีตกำลังสูง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170446521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD:

Narongchai Paksa : Development of high modulus concrete with basalt and steel slag for special rigid structures. Advisor: Prof. TOSPOL PINKAEW, Ph.D.

The objective of this research is to develop the properties of the elastic modulus of concrete for application in structures that require special rigidity to minimize the displacement of the structure under load. The coarse aggregates were substituted with basalt and EAF slag, which both have better mechanical properties than limestone. And the mixture was designed by adjusting the size of coarse aggregates, the water-cement ratio, and the fine aggregate-aggregate ratio. Many samples of the mixture were tested for compressive strength and elastic modulus. Then the obtained test results were applied to the high-speed rail project's pier structure and the high-rise building's shear wall. The structures were modeled by ETABS program to compare their performances using conventional concrete and high modulus concrete. From the results of this study, it was found that (1) EAF-Slag was the coarse aggregate giving the highest elastic modulus. Adjusting the gradation of the coarse aggregate, reducing the water-to-cement ratio, and adjusting the fine aggregate-to-aggregate ratio can significantly increase the elastic modulus of concrete. which can increase the elastic modulus up to 55.3 GPa or 47% higher compared to the value from the ACI standard equation (2) It was also found that applying high-modulus concrete to pier structure can minimize the displacement of the structure by 23% and the cross-sectional area of the structure by 28%. When applied to shear wall structures, a 32% reduction in roof displacement and a 49% reduction in wall thickness. Therefore, the application of high-modulus concrete may be an effective and economic alternative to minimize the displacement of the structure than increasing the cross-sectional area of the structure or using conventional high-strength concrete.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงไปด้วยดี เนื่องจากความกรุณาของ ศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาแนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาเสนอแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ นาย ฐิติภูมิ พัวจินดาเนตร และ นาย ณัฐดนัย อมรปฏิเวธ สำหรับข้อเสนอในการใช้โปรแกรม ETABS และนาย วรากร อัมรักษา สำหรับข้อเสนอในการปฏิบัติการทดสอบคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง (High modulus concrete) ที่ทำให้การทดสอบและวิเคราะห์ผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปด้วยดี

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สำหรับการสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการนำเสนอผลงานในการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ

ณรงค์ชัย ปึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| | ค |
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูป..... | ฐ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ..... | 2 |
| บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม..... | 3 |
| 2.1 คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง..... | 3 |
| 2.1.1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น..... | 3 |
| 2.1.2 โมดูลัสยืดหยุ่นในโครงสร้างคอนกรีต..... | 9 |
| 2.2 มวลรวมหยาบ..... | 12 |
| 2.2.1 บทนำ..... | 12 |
| 2.2.2 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ..... | 21 |
| 2.2.3 หินบะซอลต์..... | 27 |

| | |
|--|-----|
| 2.2.4 ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า..... | 35 |
| บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย | 52 |
| 3.1 โมดูลสียึดหุ่่นของคอนกรีต..... | 52 |
| 3.2 วัสดุมวลรวม..... | 53 |
| 3.3 การผลิตตัวอย่างคอนกรีต | 56 |
| 3.4 ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าโมดูลสียึดหุ่่นของคอนกรีต | 57 |
| 3.4.1 ประเภทของวัสดุมวลรวมหยาบ | 57 |
| 3.4.2 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมหยาบ..... | 57 |
| 3.4.3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์..... | 58 |
| 3.4.4 อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม..... | 59 |
| 3.5 การทดสอบกำลังอัดและโมดูลสียึดหุ่่นของคอนกรีต..... | 60 |
| 3.6 ประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง | 63 |
| บทที่ 4 การพัฒนาคอนกรีตโมดูลสียึดหุ่่นสูง..... | 65 |
| 4.1 ขนาดคละอัดแน่น | 65 |
| 4.2 การปรับปรุงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์..... | 75 |
| 4.3 ผลการเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบ..... | 81 |
| 4.4 ผลการปรับปรุงอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม..... | 86 |
| 4.5 ผลการปรับปรุงส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตมีค่าโมดูลสียึดหุ่่นสูง..... | 91 |
| บทที่ 5 ประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลสียึดหุ่่นสูงในการวิเคราะห์โครงสร้าง | 96 |
| 5.1 การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลสียึดหุ่่นสูงกับโครงสร้างเสาตอม่อโครงการรถไฟ | |
| ความเร็วสูง | 96 |
| 5.1.1 โครงสร้างเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค | 96 |
| 5.1.2 การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลสียึดหุ่่นสูงกับโครงสร้างเสาตอม่อ | 103 |

| | |
|--|-----|
| 5.1.3 การลดขนาดหน้าตัดโครงสร้างเสาตอม่อหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง | 105 |
| 5.2 การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกับโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนในอาคารสูงชะลูด | 111 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย | 124 |
| 6.1 การพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง | 124 |
| 6.2 งานวิจัยในอนาคต | 126 |
| บรรณานุกรม | 127 |
| ประวัติผู้เขียน | 131 |



สารบัญตาราง

หน้า

| | |
|---|----|
| ตารางที่ 1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยประมาณของคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่างกัน (Shetty, 2019)..... | 7 |
| ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานของหินแต่ละประเภท (Neville, 1995)..... | 13 |
| ตารางที่ 3 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมวลรวม (Sengul และคณะ, 2013) | 14 |
| ตารางที่ 4 ผลทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนประเภทมวลรวม (Zhou และคณะ, 1995) | 16 |
| ตารางที่ 5 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุคอนกรีต 7, 14, 28 และ 56 วัน | 17 |
| ตารางที่ 6 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ระดับกำลังออกแบบ 50 MPa (P.Ramteja, 2016)..... | 27 |
| ตารางที่ 7 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ระดับกำลังออกแบบ 60 MPa (P.Ramteja, 2016)..... | 28 |
| ตารางที่ 8 กำลังรับแรงดึงคอนกรีตที่ใช้ระดับกำลังออกแบบ 50 MPa (P.Ramteja, 2016) | 28 |
| ตารางที่ 9 กำลังรับแรงดึงคอนกรีตที่ใช้ระดับกำลังออกแบบ 60 MPa (P.Ramteja, 2016) | 28 |
| ตารางที่ 10 คุณสมบัติเบื้องต้นของหินบะซอลต์และหินปูน (Hamadallah Mohammad Al-Baijat, 2008) | 29 |
| ตารางที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์ (Hamadallah Mohammad Al-Baijat, 2008) | 30 |
| ตารางที่ 12 ผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดของคอนกรีต (Hamadallah Mohammad Al-Baijat, 2008) | 31 |
| ตารางที่ 13 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระดับกำลังออกแบบ 40 MPa ที่อายุ 7 วัน (Kishore และคณะ, 2015) | 32 |
| ตารางที่ 14 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระดับกำลังออกแบบ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน (Kishore และคณะ, 2015) | 33 |
| ตารางที่ 15 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระดับกำลังออกแบบ 50 MPa ที่อายุ 7 วัน (Kishore และคณะ, 2015) | 33 |

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 16 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระดับกำลังออกแบบ 50 MPa ที่อายุ 28 วัน (Kishore และคณะ, 2015) | 33 |
| ตารางที่ 17 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก (Coppola และคณะ, 2016)..... | 37 |
| ตารางที่ 18 คุณสมบัติเบื้องต้นของมวลรวมที่ใช้ในการทดลอง (Faleschini และคณะ, 2016) | 39 |
| ตารางที่ 19 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (Faleschini และคณะ, 2016)..... | 40 |
| ตารางที่ 20 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็ก (Faleschini และคณะ, 2016) | 41 |
| ตารางที่ 21 คุณสมบัติเบื้องต้นของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย (González-Ortega และคณะ, 2019)..... | 42 |
| ตารางที่ 22 ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย (González-Ortega และคณะ, 2019)..... | 42 |
| ตารางที่ 23 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต (González-Ortega และคณะ, 2019) ... | 43 |
| ตารางที่ 24 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย (Faleschini และคณะ, 2015)..... | 47 |
| ตารางที่ 25 ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย (Faleschini และคณะ, 2015)..... | 47 |
| ตารางที่ 26 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว (Faleschini และคณะ, 2015) | 49 |
| ตารางที่ 27 มาตรฐานการทดสอบคอนกรีตและวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย | 55 |
| ตารางที่ 28 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย | 56 |
| ตารางที่ 29 ส่วนผสมและตัวแปรที่ใช้เปรียบเทียบทั้งหมดในงานวิจัย | 60 |
| ตารางที่ 30 ผลการทดลองหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุด | 65 |
| ตารางที่ 31 ส่วนผสมคอนกรีตเพื่อใช้เปรียบเทียบขนาดคละของมวลรวมหยาบ | 72 |
| ตารางที่ 32 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเพื่อเปรียบเทียบขนาดคละของมวลรวมหยาบ | 73 |
| ตารางที่ 33 ส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.40 และ 0.43 | 76 |
| ตารางที่ 34 ส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.34 และ 0.38 | 76 |
| ตารางที่ 35 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อปรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ | 77 |

| | |
|---|-----|
| ตารางที่ 36 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อปรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ | 78 |
| ตารางที่ 37 ส่วนผสมคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบ | 81 |
| ตารางที่ 38 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบ | 83 |
| ตารางที่ 39 ส่วนผสมคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม | 86 |
| ตารางที่ 40 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม | 87 |
| ตารางที่ 41 ส่วนผสมคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนขนาดผลของมวลรวมหยาบ | 89 |
| ตารางที่ 42 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนขนาดผลของมวลรวมหยาบ | 90 |
| ตารางที่ 43 ส่วนผสมคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และยี่หื้อปูนซีเมนต์ | 92 |
| ตารางที่ 44 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ปรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และยี่หื้อปูนซีเมนต์ | 93 |
| ตารางที่ 45 ปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างเสาตอม่อ | 99 |
| ตารางที่ 46 คุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างเสาตอม่อ (การรถไฟแห่งประเทศไทย 2561) | 101 |
| ตารางที่ 47 ความเค้นสูงสุดและความเค้นที่ยอมให้ของโครงสร้างเสาตอม่อ (การรถไฟแห่งประเทศไทย 2561) | 101 |
| ตารางที่ 48 ประเภทของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเสาตอม่อ (การรถไฟแห่งประเทศไทย 2561) | 102 |
| ตารางที่ 49 ค่าความแข็งแรงและเกณฑ์ตามมาตรฐานของโครงสร้างเสาตอม่อแต่ละความสูง (การรถไฟแห่งประเทศไทย 2561) | 102 |
| ตารางที่ 50 ค่าระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาและเกณฑ์ตามมาตรฐานของเสาตอม่อแต่ละความสูง (การรถไฟแห่งประเทศไทย 2561) | 103 |
| ตารางที่ 51 แรงเทียบเท่าที่กระทำบริเวณหัวเสาของโครงสร้างเสาตอม่อ | 103 |

| | |
|--|-----|
| ตารางที่ 52 ค่าการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาและความแข็งแรงของโครงสร้างเมื่อประยุกต์ใช้คอนกรีต โมดูลัสยืดหยุ่นสูง | 104 |
| ตารางที่ 53 ความแข็งแรงของโครงสร้างเสาก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง | 105 |
| ตารางที่ 54 ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาของโครงสร้างเสาดมก่อนและหลังการประยุกต์ใช้ คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง..... | 105 |
| ตารางที่ 55 ระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเสาดมภายหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัส ยืดหยุ่นสูงและลดขนาดหน้าตัด | 106 |
| ตารางที่ 56 การลดขนาดหน้าตัดและปริมาณคอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างเสาดม..... | 106 |
| ตารางที่ 57 การลดปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างเสาดม..... | 107 |
| ตารางที่ 58 ราคาวัสดุโครงสร้างเสาดมก่อนการลดขนาดหน้าตัด | 109 |
| ตารางที่ 59 ราคาวัสดุโครงสร้างเสาดมหลังการลดขนาดหน้าตัด | 109 |
| ตารางที่ 60 ราคาคอนกรีตและเหล็กเสริมต่อตันที่ลดลงเมื่อลดขนาดหน้าตัดโครงสร้างเสาดม..... | 110 |
| ตารางที่ 61 ปริมาตรและน้ำหนักของโครงสร้างเสาดม..... | 111 |
| ตารางที่ 62 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีตที่ใช้ในอาคารตัวอย่าง | 114 |
| ตารางที่ 63 แรงลมสถิติเทียบเท่าที่วิกฤตที่สุด สำหรับสภาวะใช้งานของอาคารตัวอย่าง (รายงานการ ประเมินแรงลม ม.ธรรมศาสตร์ พ.ศ.2562)..... | 114 |
| ตารางที่ 64 ผลการลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนก่อนการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัส ยืดหยุ่นสูง | 117 |
| ตารางที่ 65 ผลการลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัส ยืดหยุ่นสูง | 120 |
| ตารางที่ 66 ปริมาณคอนกรีตและราคาคอนกรีตของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน..... | 122 |
| ตารางที่ 67 ปริมาตรและน้ำหนักของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน | 122 |

สารบัญรูป

หน้า

| | |
|--|----|
| รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างกัน (Shetty, 2019) | 4 |
| รูปที่ 2 รูปแบบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Shetty, 2019)..... | 4 |
| รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเนื้อซีเมนต์ มวลรวมและคอนกรีต (Shetty, 2019)..... | 6 |
| รูปที่ 4 กำลังของคอนกรีตในความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและอัตราส่วนความเค้นกับกำลังอัด ประลัย (Shetty, 2019) | 6 |
| รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของความชื้น สัดส่วนผสมและอายุคอนกรีตต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของคอนกรีต (Shetty, 2019)..... | 7 |
| รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้กรวดและดินเหนียวเป็นวัสดุมวลรวม (Shetty, 2019)..... | 8 |
| รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีต (Fan, 2017)..... | 10 |
| รูปที่ 8 ขนาดอนุภาคของมวลรวมหยาบ 2 ประเภท (Fan, 2017) | 10 |
| รูปที่ 9 หินบดละเอียดและทรายแม่น้ำที่ใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียด (Fan, 2017)..... | 11 |
| รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความเครียดของเสา (Hamadallah Al-Baijat และคณะ, 2013) | 11 |
| รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการโก่งตัวของเสา (Hamadallah Al-Baijat และคณะ, 2013) | 12 |
| รูปที่ 12 การเกิดรอยร้าวในเนื้อคอนกรีตทั่วไป (a) และคอนกรีตกำลังสูง (b) (Sengul และคณะ, 2013) | 14 |
| รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและอายุของคอนกรีต (Beushausen และคณะ, 2015) | 18 |
| รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหินแต่ละประเภท (Piasta และคณะ, 2017) | 19 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 15 กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของหินแต่ละประเภท (Piasta และคณะ, 2017)..... | 19 |
| รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้หินแต่ละประเภท (Piasta และคณะ, 2017) | 21 |
| รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและปริมาตรของมวลรวมในส่วนผสม (Cho และคณะ, 2000) | 23 |
| รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและโมดูลัสความเค้น (Haque และคณะ, 2012) | 24 |
| รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบและการรวมกันของโมดูลัสความเค้น (Haque และคณะ, 2012) | 24 |
| รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างและสัดส่วนความเค้นของมวลรวม (Klein และคณะ, 2020) | 25 |
| รูปที่ 21 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตที่อัดแน่นมวลรวม (Klein และคณะ, 2020) | 26 |
| รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงบิดต่อการโก่งตัวและปริมาณทดแทนหินบะซอลต์ในส่วนผสม (Hamadallah Mohammad Al-Baijat, 2008)..... | 31 |
| รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวและสัดส่วนทดแทนของหินบะซอลต์ | 34 |
| รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัดส่วนทดแทนของหินบะซอลต์ (Kishore และคณะ, 2015) | 35 |
| รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวและสัดส่วนทดแทนของหินบะซอลต์ (Kishore และคณะ, 2015) | 35 |
| รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการใช้ตะกรันเหล็กทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติและสัดส่วนเบี่ยงเบนประสิทธิภาพ (Coppola และคณะ, 2016)..... | 38 |
| รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและระยะเวลา (Coppola และคณะ, 2016) | 38 |
| รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและปริมาณอากาศในเนื้อคอนกรีต (González-Ortega และคณะ, 2019) | 44 |
| รูปที่ 29 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำภายใต้แรงดันในแต่ละส่วนผสม (González-Ortega และคณะ, 2019) | 44 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 30 จำนวนรอยคราบที่เกิดขึ้นบนตัวอย่าง (González-Ortega และคณะ, 2019)..... | 45 |
| รูปที่ 31 รอยคราบที่เกิดขึ้นบนตัวอย่าง (González-Ortega และคณะ, 2019) | 45 |
| รูปที่ 32 การขยายตัวในตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสม (González-Ortega และคณะ, 2019) | 46 |
| รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างคอนกรีตต่อระยะเวลาการทดสอบ (González-Ortega และคณะ, 2019)..... | 46 |
| รูปที่ 34 กำลังรับแรงอัด (แกนตั้งฝั่งซ้าย) และกำลังรับแรงดึง (แกนตั้งฝั่งขวา) ของคอนกรีตแต่ละส่วนผสม (Faleschin และคณะ., 2015)..... | 49 |
| รูปที่ 35 การวิบัติของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ (Faleschini และคณะ, 2015) | 50 |
| รูปที่ 36 แบบจำลองโครงสร้างภายในเนื้อคอนกรีต | 53 |
| รูปที่ 37 แบบจำลองวัสดุมวลรวมหยาบในคอนกรีตภายใต้แรงกระทำ | 53 |
| รูปที่ 38 วัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย | 54 |
| รูปที่ 39 ตัวอย่างคอนกรีตหลังผสมเสร็จ | 57 |
| รูปที่ 40 รูปแบบการทดลองหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุด | 58 |
| รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตทั่วไปที่อายุ 28 วัน | 59 |
| รูปที่ 42 ปรับระดับหน้าตัดรับแรงของตัวอย่างด้วยก้ามะถัน | 61 |
| รูปที่ 43 การติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะการหดตัวของคอนกรีตเพื่อทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น..... | 61 |
| รูปที่ 44 โมดูลัสซีแคนท์ (Secant modulus) | 62 |
| รูปที่ 45 การติดตั้งเครื่องมือวัดระยะการหดตัวของคอนกรีต | 62 |
| รูปที่ 46 การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต..... | 63 |
| รูปที่ 47 แบบผังสะพานโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค ช่วงกรุงเทพมหานคร-นครราชสีมา | 63 |
| รูปที่ 48 แบบแปลนของอาคารตัวอย่าง | 64 |
| รูปที่ 49 ผลการทดลองหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุดของมวลรวมหยาบ | 68 |
| รูปที่ 50 ขนาดคละที่อัดแน่นที่สุดของบะซอลต์และตะกรันเหล็ก | 69 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 51 การทดลองคละขนาดที่อัดแน่นที่สุดของวัสดุมวลรวมหยาบ | 69 |
| รูปที่ 52 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัย | 70 |
| รูปที่ 53 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมหยาบที่ใช้ในงานวิจัย..... | 71 |
| รูปที่ 54 ปริมาตรมวลรวมหยาบต่อปริมาตรคอนกรีตของส่วนผสม BS-01 และ BS-02..... | 72 |
| รูปที่ 55 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบขนาดคละของมวลรวมหยาบ | 74 |
| รูปที่ 56 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบขนาดคละของมวลรวมหยาบ | 75 |
| รูปที่ 57 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม BS-03 และ BS-04 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน..... | 79 |
| รูปที่ 58 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม BS-03 และ BS-04 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน..... | 79 |
| รูปที่ 59 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม BS-01 และ BS-05 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน..... | 80 |
| รูปที่ 60 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม BS-01 และ BS-05 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน..... | 80 |
| รูปที่ 61 หน่วยน้ำหนักของส่วนผสม LS-01, BS-05 และ EAF-01 | 84 |
| รูปที่ 62 ผลการทดสอบกำลังอัดส่วนผสม LS-01, BS-05 และ EAF-01 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน..... | 85 |
| รูปที่ 63 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นส่วนผสม LS-01, BS-05 และ EAF-01 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน..... | 85 |
| รูปที่ 64 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม EAF-01 และ EAF-02 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน | 88 |
| รูปที่ 65 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม EAF-01 และ EAF-02 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน | 88 |
| รูปที่ 66 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม EAF-03 และ EAF-04 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน | 90 |
| รูปที่ 67 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม EAF-03 และ EAF-04 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน | 91 |
| รูปที่ 68 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม EAF-01, EAF-05 และ EAF-06 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน | 93 |
| รูปที่ 69 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม EAF-01, EAF-05 และ EAF-06 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน | 94 |

| | |
|--|-----|
| รูปที่ 70 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากสมการตามมาตรฐาน ACI..... | 94 |
| รูปที่ 71 แบบโครงสร้างเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค..... | 97 |
| รูปที่ 72 แบบหน้าตัดเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค | 97 |
| รูปที่ 73 แบบเหล็กเสริมหน้าตัดเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค..... | 98 |
| รูปที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่อค่าการเคลื่อนตัวของเสาตอม่อในแบบจำลองเบื้องต้น | 99 |
| รูปที่ 75 แบบจำลองเสาตอม่อในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง..... | 100 |
| รูปที่ 76 ขนาดหน้าตัดโครงสร้างเสาตอม่อก่อนและหลังการลดขนาด | 107 |
| รูปที่ 77 แผนภูมิกำลังรับแรงดัดของโครงสร้างเสาตอม่อ..... | 108 |
| รูปที่ 78 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างเสาตอม่อ | 108 |
| รูปที่ 79 แบบด้านหน้าของอาคารตัวอย่าง | 112 |
| รูปที่ 80 แบบด้านข้างของอาคารตัวอย่าง | 112 |
| รูปที่ 81 แบบแปลนของอาคารตัวอย่าง | 113 |
| รูปที่ 82 แบบจำลองของอาคารตัวอย่างในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง | 115 |
| รูปที่ 83 แบบจำลองโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนของอาคารตัวอย่าง | 116 |
| รูปที่ 84 ผลการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของอาคารตัวอย่าง (ผนังรับแรงเฉือนหนา 40 ซม.).... | 116 |
| รูปที่ 85 ผลการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของอาคารตัวอย่าง (ผนังรับแรงเฉือนหนา 105 ซม.). | 117 |
| รูปที่ 86 ผลการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของอาคารตัวอย่างหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง (ผนังรับแรงเฉือนหนา 105 ซม.)..... | 118 |
| รูปที่ 87 ผลการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของอาคารตัวอย่างก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง | 119 |
| รูปที่ 88 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคา | 121 |

รูปที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาแน่นที่สุดของโครงสร้างผนังรับแรง
เฉือนที่ทำให้ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน 121



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การขยายตัวของอุตสาหกรรมก่อสร้างของไทยในปัจจุบันเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว โดยจะเห็นได้จากการก่อสร้างโครงการสาธารณูปโภคและอาคารสูงขนาดใหญ่จำนวนมาก ส่งผลให้งานด้านวิศวกรรมโยธาเข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเพื่อส่งเสริมการเติบโตของประเทศ

คอนกรีตเทคโนโลยีมีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาอย่างรวดเร็วนับตั้งแต่การค้นพบและเป็นวัสดุที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างกว้างขวาง เนื่องจากคอนกรีตมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น ความสามารถในการหล่อ ความประหยัด ความทนทาน และความสามารถด้านการเคลื่อนตัวของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ ซึ่งมีความเหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแกร่งมากเป็นพิเศษ เช่น เสาตอม่อของโครงการรถไฟความเร็วสูงที่ต้องออกแบบให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ต่ำมากภายใต้แรงเบรกและแรงเครื่องของขบวนรถไฟ หรือผนังรับแรงเฉือนในอาคารสูงชะลูดที่ต้องออกแบบให้มีการเคลื่อนตัวภายใต้แรงลมและแรงแผ่นดินไหวที่ต่ำกว่าเกณฑ์ตามมาตรฐาน เป็นต้น ซึ่งในกรณีดังกล่าวอาจพบว่าคุณสมบัติโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของคอนกรีตจะมีความสำคัญมากกว่ากำลังของคอนกรีต ดังนั้นการพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง จึงจำเป็นสำหรับโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแกร่งมากเป็นพิเศษ เพื่อควบคุมการเคลื่อนตัวให้ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด

คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วย มวลรวมซึ่งจะถูกเติมด้วย ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ในช่องว่างระหว่างมวลรวมเพื่อยึดติดมวลรวมเข้าด้วยกัน มีเนื้อไม่สม่ำเสมอ เปราะ และพฤติกรรมจะแปรผันตามแรงที่มากระทำ ตัวแปรที่ส่งผลสำคัญต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคือ เนื้อซีเมนต์ รอยต่อระหว่างซีเมนต์กับมวลรวมและมวลรวม โดยประมาณ 75% ของปริมาตรคอนกรีตเป็นปริมาตรของมวลรวม คุณสมบัติของมวลรวมจึงมีผลกระทบอย่างมากต่อสมรรถนะของคอนกรีต ดังนั้นการพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจึงมักมุ่งเน้นการปรับปรุงสัดส่วนผสม ขนาดคละและคุณสมบัติของมวลรวมในคอนกรีต

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่ทำมาจากซีเมนต์นั้นมีความซับซ้อนเนื่องจากโครงสร้างในวัสดุไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อที่จะคาดการณ์พฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้แรงกระทำนั้นจะต้องใช้ความเข้าใจในผลกระทบของประเภทมวลรวม ขนาดของมวลรวม และปริมาตรของมวลรวม ซึ่งคุณสมบัติของมวลรวมหยาบที่สูงขึ้นจะส่งผลให้กำลังของคอนกรีตและโมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้นตามไปด้วย

หินบะซอลต์ (Basalt) เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของลาวา (Lava) พบได้ในหลายประเทศทั่วโลก ส่วนใหญ่สีดำหรือดำเขียว ซึ่งจะถูกนำมาใช้เป็นมวลรวมในการผลิตคอนกรีตเนื่องจากมี เนื้อแน่น แข็ง และมีคุณสมบัติที่ดีกว่าหินปูน โดยมีอยู่มากมายตามธรรมชาติและราคาไม่แพง

นอกจากนั้นงานวิจัยในอดีต ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้มวลรวมรีไซเคิลจากอุตสาหกรรมโลหะในการผลิตคอนกรีต ซึ่งตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF Slag) คือผลพลอยได้จากการผลิตเหล็ก ปริมาณมหาศาลของตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากและเสี่ยงประมาณมหาศาลในการกำจัด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาการใช้ตะกรันเหล็กโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตคอนกรีต เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลที่สูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ

การศึกษานี้จะมุ่งเน้นในการพัฒนาคอนกรีตให้ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงขึ้น โดยการออกแบบปรับปรุงส่วนผสมคอนกรีต ด้วยมวลรวมหยาบประเภทหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการควบคุมการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงมากเป็นพิเศษอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาคอนกรีตให้ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงขึ้น เมื่อแทนที่มวลรวมหยาบด้วยหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า
- 1.2.2 เพื่อศึกษาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อแทนที่มวลรวมหยาบด้วยหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ กรณีนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างเสาตอม่อของโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูงและโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนในอาคารสูง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ใช้หินบะซอลต์ 2 แหล่ง จากโรงโม่หินในภาคอีสาน
- 1.3.2 ใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า จากโรงหลอมเหล็กในภาคตะวันออก
- 1.3.3 พิจารณาโครงสร้างเสาตอม่อในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าความเร็วสูงเชื่อมโยงภูมิภาค ช่วงกรุงเทพมหานคร-นครราชสีมา และโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนในอาคารชุดพักอาศัยตัวอย่างเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสำหรับโครงสร้างแข็งแรงพิเศษ
- 1.4.2 ทราบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อปรับเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบ
- 1.4.3 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในโครงการก่อสร้าง

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

2.1.1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

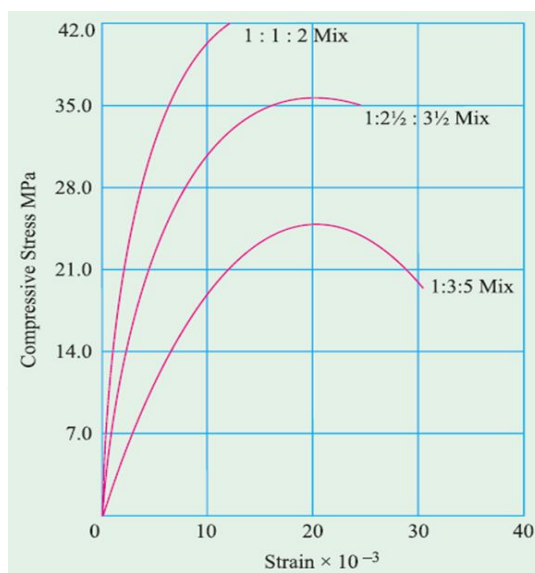
ในทางทฤษฎีนั้น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมักถูกตั้งสมมติฐานว่าเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น สามารถยืดหดได้ เป็นเนื้อเดียวกันและมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Shetty, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับกฎของฮุค (Hooke's law) แต่ในความเป็นจริงแล้ว พฤติกรรมของคอนกรีตไม่ได้เป็นดังที่ตั้งสมมติฐานไว้ทั้งหมด เพราะคอนกรีตนั้นไม่ใช่วัสดุที่ยืดหยุ่นได้อย่างสมบูรณ์ คอนกรีตจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อถูกแรงภายนอกกระทำ แต่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างนั้นมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น ขนาดของแรงที่กระทำ ความเร็วของแรงที่กระทำ และระยะเวลาที่แรงนั้นกระทำกับคอนกรีต ความรู้ในเรื่องการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคอนกรีตนั้นมีความสำคัญมากในการนำไปคำนวณการเคลื่อนตัวและออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยจะเกี่ยวข้องกับการคำนวณปริมาณเหล็กและการคำนวณความเค้นของโครงสร้างอีกด้วย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีสมมติฐานว่ารอยต่อระหว่างเหล็กและเนื้อคอนกรีตจะยึดเกาะติดกันอย่างสมบูรณ์และอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะเรียกว่า อัตราส่วนโมดูลาร์ (Modular ratio) ดังนั้นความแม่นยำในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น โดยปกติจะขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของคอนกรีตเนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กสามารถกำหนดได้อย่างแม่นยำกว่า ประกอบกับการเสริมเหล็กในโครงสร้างทั่วไปมักมีเหล็กในปริมาณที่ไม่มาก ทำให้พฤติกรรมการยืดหดและการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างโดยรวม ถูกควบคุมโดยคุณสมบัติของคอนกรีตเป็นหลัก

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสามารถหาได้จากตัวอย่างรูปทรงกระบอกหรือลูกบาศก์ภายใต้แรงอัดที่กระทำตามแนวแกน โดยจะวัดค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างจากเครื่องมือวัดแล้วหารด้วยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนที่จะถูกแรงกระทำ จะได้ ค่าความเครียด (Strain) และจะได้ค่าความเค้น (Stress) ที่กระทำ จากสัดส่วนของแรงที่กระทำกับพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นคือสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นต่อความเครียด

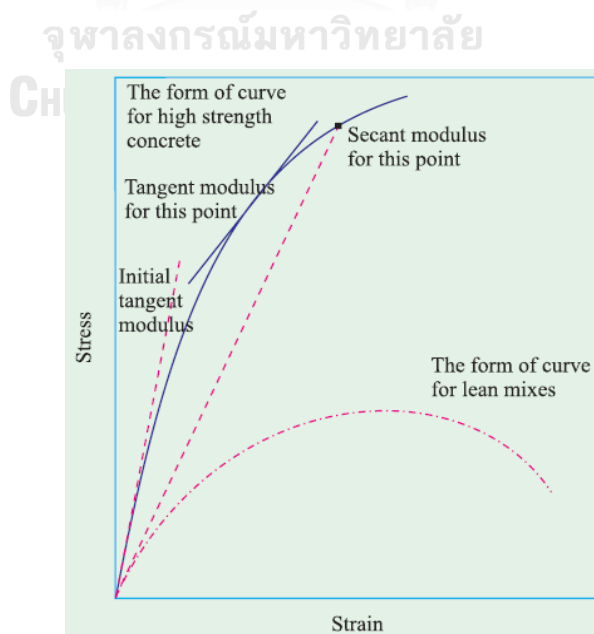
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สามารถหาได้จากการให้แรงกระทำจริงกับตัวอย่างเรียกว่า โมดูลัสยืดหยุ่นแบบสถิต (Static modulus of elasticity) เมื่อมีความเค้นสูงขึ้น คอนกรีตจะสูญเสียพฤติกรรมที่เป็นวัสดุยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม ในช่วงความเค้น 10-15% ของค่าความเค้นสูงสุด กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีความโค้งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยยัง

มีลักษณะคล้ายเส้นตรงอยู่ แต่หากเพิ่มความเค้นสูงขึ้น กราฟจะเริ่มมีลักษณะเป็นเส้นโค้งมากขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมต่างกัน (Shetty, 2019)

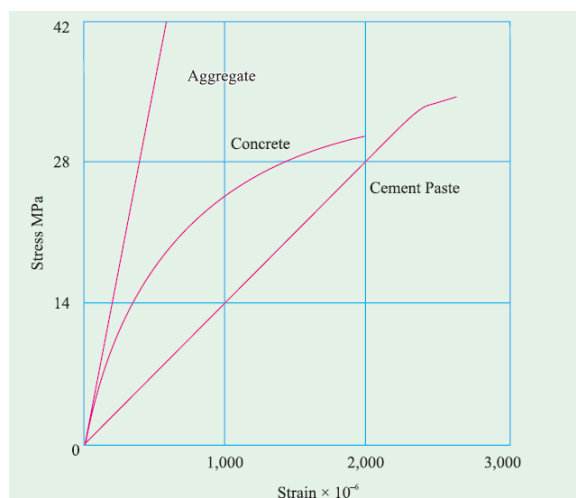
ด้วยพฤติกรรมที่ซับซ้อนของคอนกรีตดังกล่าว ทำให้ยากในการกำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอาจมีความยุ่งยาก ดังเช่นในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมดูลัสยืดหยุ่นอาจถูกกำหนดค่าในรูปแบบที่แตกต่าง



รูปที่ 2 รูปแบบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Shetty, 2019)

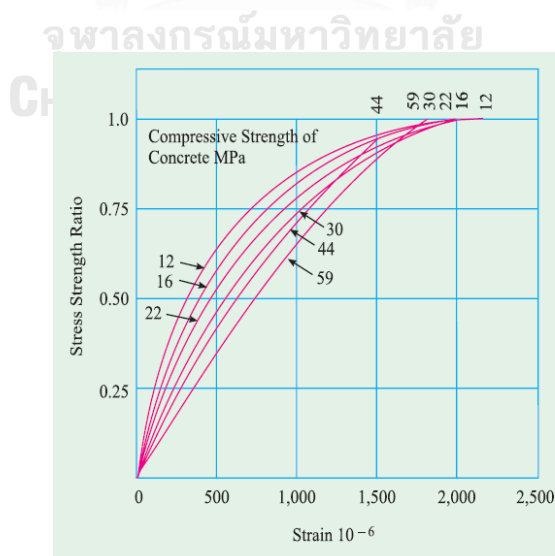
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนั้น มักจะประมาณโดยสมมุติให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นเส้นตรง ถึงแม้ว่าในคอนกรีตจะไม่มีส่วนของกราฟที่เป็นเส้นตรงเลย แต่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอาจหาได้จากเส้นสัมผัสกราฟที่ลากมาจากจุดกำเนิด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หามาจากวิธีนี้จะเรียกว่า โมดูลัสสัมผัสเบื้องต้น (Initial tangent modulus) ซึ่งสามารถให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุดแต่เฉพาะที่ช่วงความเค้นน้อยมากเท่านั้น และหากลากเส้นสัมผัสที่จุดใดจุดหนึ่งในกราฟ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้ก็จะเรียกว่า โมดูลัสสัมผัส (Tangent modulus) แต่โมดูลัสสัมผัสจะไม่สามารถให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงความเป็นจริงในช่วงความเค้นมากขึ้นหรือลดลงมาจากจุดที่เส้นสัมผัสได้ กล่าวได้ว่าโมดูลัสสัมผัสจะให้ค่าที่ใกล้เคียงความจริงเฉพาะที่ระดับความเค้นเดียวกับที่เส้นสัมผัสเท่านั้น อีกวิธีคือการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากความชันของเส้นที่ลากจากจุดกำเนิดไปถึงจุดที่อ้างอิง ซึ่งเรียกค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนั้นว่า โมดูลัสซีแคนท์ (Secant modulus) หรืออาจหาได้จากความชันของเส้นตรงที่ลากระหว่างจุดอ้างอิงสองจุดบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด หรือเรียกอีกชื่อว่า โมดูลัสคอร์ด (Chord modulus) โดยทั่วไปในทางปฏิบัติส่วนใหญ่จะใช้โมดูลัสซีแคนท์ ซึ่งยังไม่มีมาตรฐานในการหาโมดูลัสซีแคนท์ที่กำหนดอย่างชัดเจน โดยส่วนใหญ่จะหาที่ค่าความเค้น 3 – 14 MPa หรือที่ค่าความเค้นเท่ากับ 15%, 25%, 30% หรือ 40% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่งค่าโมดูลัสซีแคนท์นั้นจะลดลงเมื่อความเค้นมากขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของมวลรวมเพียงอย่างเดียวจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเนื้อซีเมนต์ (Cement paste) แต่ความสัมพันธ์เดียวกันนี้ของคอนกรีตมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเนื่องจากการรวมกันระหว่างเส้นความสัมพันธ์ของมวลรวมและเนื้อซีเมนต์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการพัฒนาของรอยร้าวขนาดเล็กในส่วนที่เป็นรอยต่อระหว่างมวลรวมและเนื้อซีเมนต์ (Interface transition zone) เนื่องจากการวิบัติของพันธะในช่วงรอยต่อเกิดขึ้นเร็วในระหว่างการเพิ่มขึ้นของความเค้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจึงเริ่มโค้งอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเนื้อซีเมนต์ มวลรวมและคอนกรีต (Shetty, 2019)

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นค่าความเครียดของคอนกรีตที่มีกำลังต่างกัน โดยจะถูกนำมาเขียนกราฟโดยมีอีกแกนเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นและกำลังอัดประลัย (Stress-strength ratio) จะเห็นว่าที่อัตราส่วนความเค้นและกำลังอัดประลัยเดียวกัน คอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่ามีความเครียดที่มากกว่า ในทางกลับกัน กราฟชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตกำลังสูงมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มากกว่า จึงสามารถอธิบายได้ว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูงกว่าจะมีเนื้อที่แข็งแรงมากกว่าและมีค่าความเครียดที่น้อยกว่าภายใต้ระดับความเค้นเดียวกัน และในตารางที่ 1 จะแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยประมาณของคอนกรีตที่มีกำลังต่างกัน



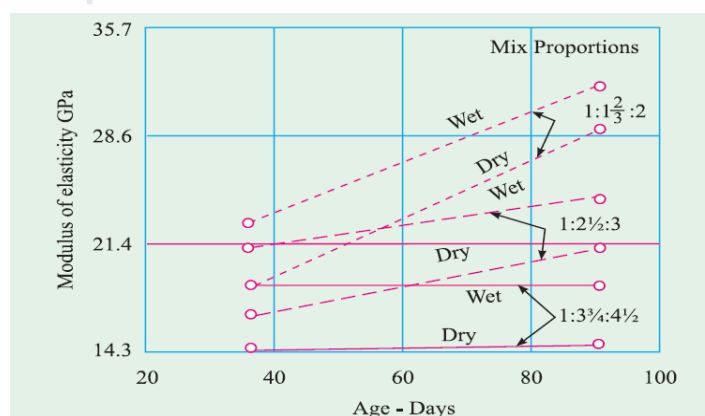
รูปที่ 4 กำลังของคอนกรีตในความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและอัตราส่วนความเค้นกับกำลังอัดประลัย (Shetty, 2019)

ตารางที่ 1 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยประมาณของคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่างกัน (Shetty, 2019)

| Average compressive strength cubes (MPa) | Modulus of Elasticity (GPa) |
|---|--------------------------------|
| 21 | 21.4 |
| 28 | 28.5 |
| 35 | 32.1 |
| 42 | 35.7 |
| 56 | 42.9 |
| 70 | 46.4 |

อย่างที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ หนึ่งในตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตคือ กำลังของคอนกรีต และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นยังขึ้นอยู่กับความชื้นของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความชื้นมาก จะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มากกว่าคอนกรีตที่แห้งอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งตรงกันข้ามกับคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตที่คอนกรีตแห้งจะมีกำลังมากกว่าคอนกรีตที่ชื้น เหตุผลที่คอนกรีตชื้นให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มากกว่า เนื่องจากในระดับความเค้นเดียวกันคอนกรีตชื้นจะมีค่าความเครียดที่น้อยกว่าคอนกรีตแห้งเนื่องมาจากมีน้ำในเนื้อคอนกรีตที่ช่วยดูดซับแรง รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของความชื้นต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับอัตราส่วนผสมและอายุของคอนกรีต ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมที่มีปริมาณมวลรวมน้อยและคอนกรีตที่อายุมากกว่าจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มากกว่า และยืนยันได้ว่าคอนกรีตที่มีกำลังมากกว่าจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

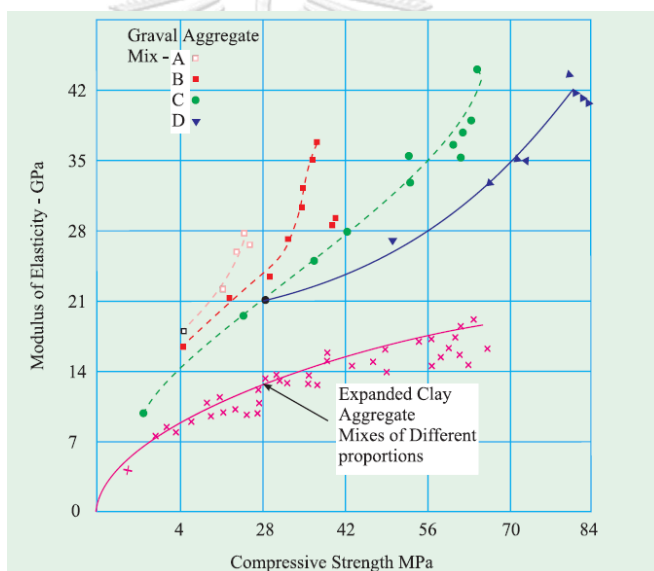


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของความชื้น อัตราส่วนผสมและอายุคอนกรีตต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Shetty, 2019)

คุณภาพและปริมาณของมวลรวมก็จัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่ส่งผลกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต กำลังของมวลรวมนั้นไม่ได้ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่กลับส่งผลอย่างมากกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ดังรูปที่ 6 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมคือ E_a และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเนื้อซีเมนต์คือ E_p ดังนั้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะสามารถประมาณได้ตามสมการที่ 2.1

$$\frac{1}{E} = \frac{V_p}{E_p} + \frac{V_a}{E_a} \quad (2.1)$$

เมื่อ V_p และ V_a คือปริมาตรของเนื้อซีเมนต์และมวลรวมตามลำดับ



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้กรวดและดินเหนียวเป็นวัสดุมวลรวม (Shetty, 2019)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาส่วนใหญ่จะมีค่าระหว่าง 40 – 80 % ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทั่วไปที่กำลังเท่ากัน แม้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเนื้อซีเมนต์และมวลรวมเบาจะมีความแตกต่างเล็กน้อย แต่สัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาจะส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดน้อยลง

อุณหภูมิในการบ่มจะส่งผลต่อกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิปกติเล็กน้อยและจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกำลังอัด แต่การทดสอบกำลังรับแรงดึงทำได้ยาก

กว่ามากและการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตยังสามารถหาได้จากตัวอย่างคานคอนกรีต ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการกดตัวอย่างทรงกระบอก

2.1.2 โมดูลัสยืดหยุ่นในโครงสร้างคอนกรีต

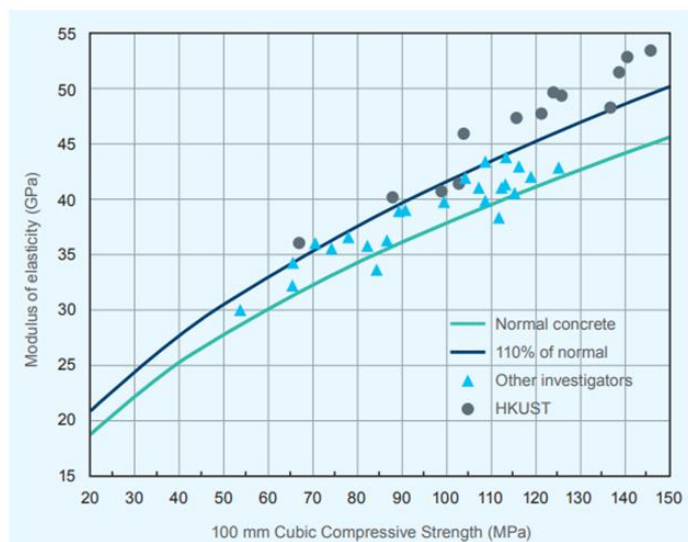
คอนกรีตถูกใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันและได้รับความนิยมมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็ก ซึ่งลดลงตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เพราะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีข้อได้เปรียบหลายประการ ทั้งด้านคุณสมบัติเชิงกล ความสามารถในการทำงานรวมไปถึงความประหยัด

Fan (2017) ได้ศึกษาและพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงเพื่อใช้ในโครงสร้างอาคารสูงชะลูดเพื่อจะลดผลจากแรงกระทำด้านข้าง เนื่องจากผลของแรงลมและแรงแผ่นดินไหว ซึ่งในกรณีนี้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีความสำคัญมากกว่ากำลังรับแรงอัด ในมุมมองของวิศวกรโครงสร้าง เมื่อต้องออกแบบโครงสร้างที่การเปลี่ยนรูปร่างของโครงสร้างกลายมาเป็นข้อจำกัดหลักในการออกแบบแทนความสามารถด้านกำลังในการรับแรง การใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจึงมีประสิทธิภาพมากกว่าการเพิ่มขนาดของหน้าตัดโครงสร้างในการจำกัดการเคลื่อนตัว อีกทั้งยังสามารถเพิ่มพื้นที่ใช้สอย ประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างและวัสดุก่อสร้างได้อีกด้วย

การศึกษาและพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทำโดยการทดลองปรับเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด เพราะมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ขนาดของมวลรวมก็มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยเช่นกัน ดังนั้นมวลรวมหยาบทั้ง 2 ประเภทได้แก่ หินแกรนิต (Granite rock) และหินภูเขาไฟ (Volcanic rock) จึงถูกนำมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ โดยหินแต่ละประเภทจะใช้ 2 ขนาด ได้แก่ 10 มม. และ 20 มม. ส่วนมวลรวมละเอียดจะใช้ 2 ประเภท รวมไปถึงการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียด และอัตราส่วนของมวลรวมต่อซีเมนต์ ซึ่งทั้งหมดนี้จะถูกนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น การหดตัว การคืบ และการดัดในตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ผลการศึกษาพบว่า สามารถพัฒนาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้จนถึง 53.5 GPa ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) ได้ถึง 20% เมื่อเทียบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตปกติจากสมการในมาตรฐาน ในระดับกำลังของคอนกรีตเดียวกัน และจากการทดสอบพบว่าประเภทของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดส่งผลอย่างมากกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแต่กลับไม่ส่งผลกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 7 โดย HKUST คือคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง ประเภทของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุดนั้นคือ หินภูเขาไฟและทรายแม่น้ำ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่น้อยจะให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงขึ้น ขนาดของมวลรวมละเอียดต้องมีขนาดละเอียดที่ดี และอัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อซีเมนต์ต้องไม่มากเกินไป เพื่อให้มีปริมาณซีเมนต์เฟสที่

เพียงพอในการเติมเต็มและประสานมวลรวมเข้าด้วยกัน รูปที่ 8 และ 9 แสดงอนุภาคของวัสดุมวลรวมหยาบและวัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการทดลอง ตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดของคอนกรีต (Fan, 2017)

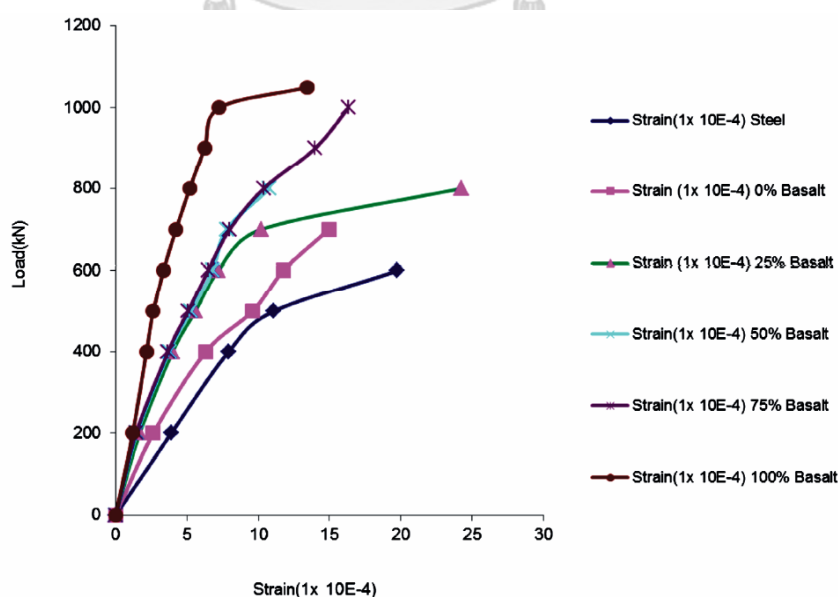


รูปที่ 8 ขนาดอนุภาคของมวลรวมหยาบ 2 ประเภท (Fan, 2017)

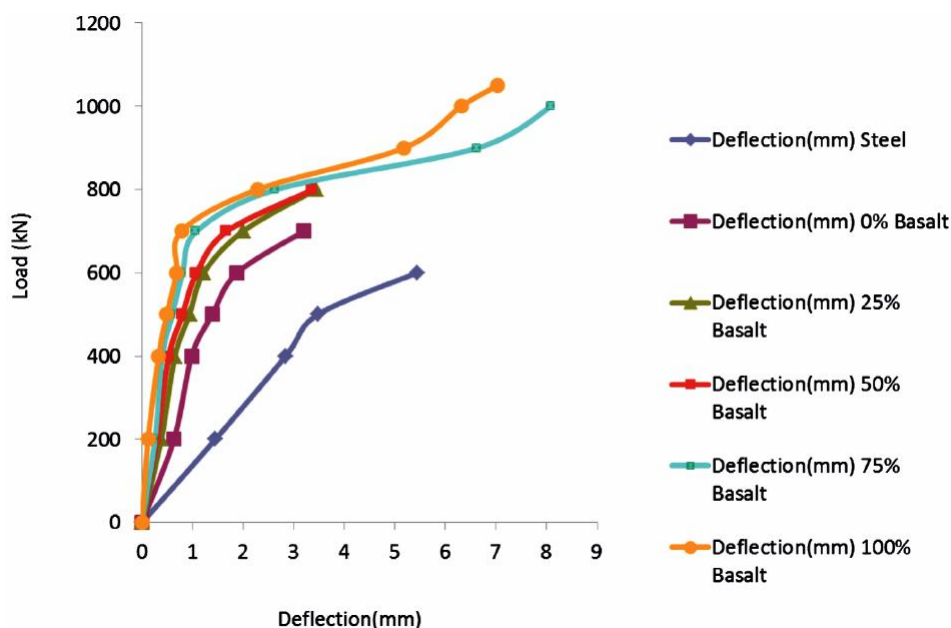


รูปที่ 9 หินบดละเอียดและทรายแม่น้ำที่ใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียด (Fan, 2017)

Hamadallah Al-Baijat และคณะ (2013) ได้ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเสาเหล็กรูปพรรณประกอบ (Composite steel-concrete columns) เพื่อพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบทดแทนหินปูน โดยที่ปริมาตรในการทดแทนคือ 25 %, 50%, 75%, และ 100% โดยให้เสาที่ผสมโดยใช้หินปูนทั้งหมดเป็นตัวควบคุม หลังจากการทดลอง ผลการทดลองบ่งชี้ว่ากำลังรับแรงอัดของเสาเพิ่มมากขึ้น ตามสัดส่วนหินบะซอลต์ที่ใช้ผสมคอนกรีตทดแทนหินปูนรวมถึงความเครียดที่ลดลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10 นอกจากนั้นยังพบว่าการโก่งตัวของเสา ลดลงตามปริมาณของหินบะซอลต์ที่ใช้ทดแทนหินปูน ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยจะลดลงประมาณ 60% เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลของหินบะซอลต์ที่ดีกว่าหินปูน จึงทำให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตดีขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความเครียดของเสา (Hamadallah Al-Baijat และคณะ, 2013)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการโก่งตัวของเสา (Hamadallah Al-Baijat และคณะ, 2013)

2.2 มวลรวมหยาบ

2.2.1 บทนำ

คอนกรีตเทคโนโลยีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องนับตั้งแต่การค้นพบ Kishore (2015) การเลือกส่วนผสมและการกำหนดงบก่อสร้างที่เหมาะสมควรสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน โดยคุณสมบัติของคอนกรีต อาทิเช่น กำลัง ความทนทานและความสามารถทำงานได้ ต้องได้ตามวัตถุประสงค์และราคาถูกที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในแง่ของการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต วัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อที่จะได้ส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมและประหยัดต้องอาศัยการทดลองเพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีคุณสมบัติตามต้องการ

ผลิตภัณฑ์คอนกรีตนั้นมีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การใช้มวลรวมจากธรรมชาติ นั้นมากขึ้นตามไปด้วย โดยเป็นที่ยอมรับกันว่ามวลรวมหยาบนั้นมีบทบาทสำคัญมากในคอนกรีต โดยปกติมวลรวมหยาบนั้นมีสัดส่วนมากกว่า 1 ใน 3 ของปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด หลายงานวิจัยได้บ่งชี้ว่าการเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบนั้นทำให้กำลังและคุณสมบัติของคอนกรีตนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติพื้นฐานของหินแต่ละประเภทที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2 คุณสมบัติพื้นฐานของหินแต่ละประเภท (Neville, 1995)

| Rock group | Crushing strength (MPa) | Abrasion value (%) | Specific gravity |
|------------|-------------------------|--------------------|------------------|
| Basalt | 200 | 17.6 | 2.8 |
| Flint | 205 | 19.2 | 2.54 |
| Gabbro | 195 | - | - |
| Granite | 185 | 18.7 | 2.69 |
| Gritstone | 220 | - | 2.82 |
| Hornfels | 340 | - | 2.82 |
| Limestone | 165 | 16.5 | 2.66 |
| Prophyry | 230 | - | 2.73 |
| Quartzite | 330 | 18.9 | 2.62 |
| Schist | 245 | - | - |

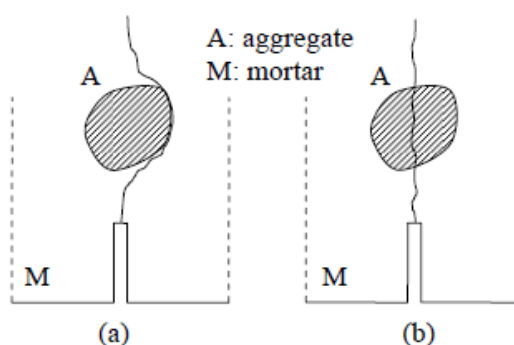
Baalbaki และคณะ (1991) เมื่อปริมาตรประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของคอนกรีตนั้นเป็น ปริมาตรของมวลรวม ทำให้คุณสมบัติของมวลรวมมีผลกระทบอย่างมากต่อสมรรถนะของโครงสร้าง คอนกรีต หลายคุณสมบัติของมวลรวม อาทิเช่น โครงสร้างผลึก คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางเคมี ความพรุนของโครงสร้าง ทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหินต้นกำเนิด คุณสมบัติทั้งหมดนี้จะส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาหลายการวิจัยได้ตรวจสอบถึงผลกระทบของประเภทมวลรวมต่อคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต พบว่าประเภทของมวลรวมส่งผลต่อคุณสมบัติและพฤติกรรมของทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตกำลังสูง

Sengul และคณะ (2013) ได้ทำการทดลองตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงอัด ซึ่งจะเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหายาบ โดยใช้ หินบะซอลต์ หินทราย หินปูนอีโอซีน (Eocene limestone) และหินปูนดีโวเนียน (Devonian limestone) ทั้งหมดจะถูกใช้ ในการผสมคอนกรีต ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3 และสำหรับแต่ละประเภทของมวลรวม ทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตกำลังสูงจะถูกผลิตขึ้น โดยมีมอร์ตาร์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน ขนาดคละและปริมาณซีเมนต์จะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่

ตารางที่ 3 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมวลรวม (Sengul และคณะ, 2013)

| Aggregate type | Compressive strength (MPa) | Modulus of elasticity (GPa) | Abrasion values (%) |
|--------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Eocene limestone | 78 | 21.5 | 28.9 |
| Devonian limestone | 121 | 74.3 | 25 |
| Sandstone | 156 | 58 | 17.8 |
| Basalt | 238 | 92.1 | 15.1 |

จากผลการทดสอบพบว่า การเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตทั่วไปเพียงเล็กน้อยแต่กลับส่งผลอย่างมากต่อกำลังของคอนกรีตกำลังสูง โดยหินบะซอลต์และหินปูนดีโวเนียน ให้กำลังคอนกรีตที่สูงที่สุดและมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากคอนกรีตทั่วไปรอยร้าวจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและเนื้อซีเมนต์ แตกต่างจากคอนกรีตกำลังสูงที่รอยร้าวมักจะเกิดขึ้นที่มวลรวมหยาบ ดังที่แสดงในรูปที่ 12 ซึ่งจากข้อมูลสามารถกล่าวได้ว่ามวลรวมที่มีกำลังสูงจะส่งผลให้คอนกรีตกำลังสูงตามไปด้วย หินบะซอลต์และหินปูนดีโวเนียนยังให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับมวลรวมหยาบประเภทอื่น โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนประเภทของมวลรวมจะเห็นผลในคอนกรีตทั่วไปเพียงเล็กน้อย แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในคอนกรีตกำลังสูง เนื่องจากในคอนกรีตกำลังสูง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมหยาบและมอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงกัน การวิบัติจึงมักเกิดขึ้นที่มวลรวมหยาบ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าประเภทของมวลรวมหยาบมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต



รูปที่ 12 การเกิดรอยร้าวในเนื้อคอนกรีตทั่วไป (a) และคอนกรีตกำลังสูง (b) (Sengul และคณะ, 2013)

Zhou และคณะ (1995) ได้ทำการทดสอบและพบว่าโดยปกติโมดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับกำลังของคอนกรีต แต่จะเพิ่มขึ้นน้อยลงเมื่อกำลังคอนกรีตมากกว่า 50 MPa เช่น เมื่อเพิ่มกำลังของคอนกรีตจาก 50 MPa ไปถึง 100 MPa ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอาจเพิ่มขึ้นเพียง 20% เท่านั้น เมื่อใช้มวลรวมชนิดเดียวกันและปริมาณเท่ากัน โดยประเภทและปริมาตรของมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมจะส่งผลอย่างมากกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและการพัฒนาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามอายุคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อใช้มวลรวมที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะน้อยตามไปด้วย แต่เมื่อใช้มวลรวมที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงมากเกินไปเมื่อเทียบกับโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์ จะส่งผลให้แรงกระทำไปที่เนื้อซีเมนต์และบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อซีเมนต์กับมวลรวม ซึ่งทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตน้อยกว่าการใช้มวลรวมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อย จึงได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่น้อย และควบคุมส่วนผสมของมอร์ตาร์ให้เหมือนกันในทุกส่วนผสม แล้วจะทดสอบโดยการเปลี่ยนประเภทของมวลรวม 6 ประเภท ได้แก่ ดินเหนียวเผา ฝักลอย หินปูน กรวด แก้ว เหล็ก และมอร์ตาร์ โดยจะควบคุมปริมาตรของมวลรวมให้เท่ากันทุกส่วนผสม หลังจากนั้นจึงนำมาทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุคอนกรีต 7, 28 และ 91 วัน

จากผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก กำลังของคอนกรีตและโมดูลัสยืดหยุ่นแบบพลศาสตร์ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4 สังเกตได้ว่าประเภทและปริมาตรของมวลรวมที่ใช้ในส่วนผสมส่งผลอย่างมากกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและการพัฒนาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามอายุคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 7 วัน ให้ค่าสูงถึง 95% ของโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 28 วัน การใช้ดินเหนียวเผาเป็นวัสดุมวลรวมหยาบพบว่าให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยที่สุด ซึ่งน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์เพียงอย่างเดียวและการใช้เหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุด แต่เหล็กกลับส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูน แก้ว หรือแม้กระทั่งมอร์ตาร์เพียงอย่างเดียว เนื่องจากเหล็กมีกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นแตกต่างกับมอร์ตาร์อย่างมาก เมื่อถูกแรงกระทำจึงส่งผลให้ความเค้นกระทำไปที่รอยต่อ ทำให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้นอย่างรวดเร็วและวิบัติที่บริเวณรอยต่อในที่สุด ส่งผลให้ได้กำลังของคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมที่มีความแข็งแรงต่ำกว่า และเมื่อใช้วัสดุมวลรวมที่มีความพรุนมากจะส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4 ผลทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนประเภทมวลรวม (Zhou และคณะ, 1995)

| Material type | Nominal Density (kg/m ³) | Measured dynamic modulus (GPa) at age (day) | | | | Compressive strength (MPa) at age (day) | | |
|------------------|--------------------------------------|---|------|------|------|---|----|-----|
| | | 7 | 28 | 56 | 91 | 7 | 28 | 91 |
| | 28 days | 7 | 28 | 56 | 91 | 7 | 28 | 91 |
| Mortar | 2,290 | 38 | 40.8 | 41.3 | 41.5 | 70 | 91 | - |
| Expanded clay | 1,540 | 17.9 | 18.6 | 18.8 | 18.9 | - | 28 | 29 |
| Sintered fly ash | 1,990 | 28.8 | 30.2 | 30.6 | 30.8 | - | 74 | 77 |
| Limestone | 2,430 | 46.6 | 49.5 | 50 | 50.3 | 68 | 91 | - |
| Gravel | 2,460 | 48.8 | 51.3 | 51.6 | 51.7 | 68 | 88 | - |
| Glass | 2,390 | 51.2 | 52.8 | 53.1 | 53.4 | - | 96 | 105 |
| Steel | 4,620 | 66.8 | 69.9 | 70.4 | 70.9 | - | 83 | - |

dos Santos และคณะ (2017) ได้ทำการทดสอบโดยใช้คอนกรีตที่มีกำลัง 20, 30 และ 40 MPa มาผลิตโดยใช้มวลรวมหยาบ 2 ประเภทคือ หินบะซอลต์จาก 2 แหล่งหินและหินโดโลไมต์ (Dolomite) หลังจากการทดสอบตัวอย่างทรงกระบอกจำนวน 459 ตัวอย่าง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะถูกนำไปเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามมาตรฐาน

จากผลการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากส่วนผสมที่ใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบให้ค่ามากกว่าคอนกรีตที่ใช้หินโดโลไมต์ และการเพิ่มกำลังของคอนกรีตสามารถเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้มากกว่าการเปลี่ยนประเภทของมวลรวม ดังผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 5 ซึ่ง C คือ กำลังของคอนกรีตและ BA กับ DO แทนคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์และหินโดโลไมต์ ตามลำดับ เมื่อลองนำผลของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการทดสอบเทียบกับสูตรคำนวณโมดูลัสยืดหยุ่นจากมาตรฐานพบว่าสมการจาก FIB (International Federation for Structural Concrete) ให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

ตารางที่ 5 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุคอนกรีต 7, 14, 28 และ 56 วัน
(dos Santos และคณะ, 2017)

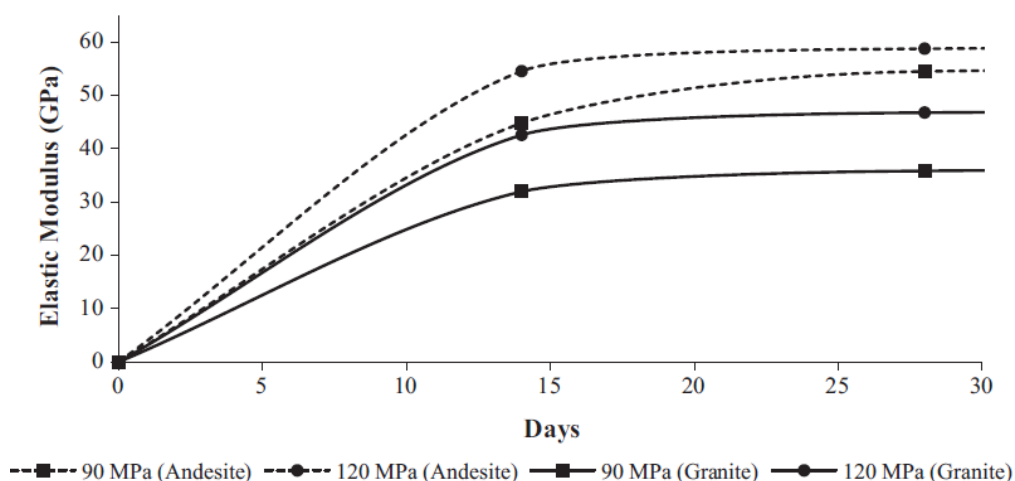
| Concrete mix | Elastic modulus (GPa) | | | |
|--------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| | 7 days | 14 days | 28 days | 56 days |
| C20-BA-1 | 31.3 | 32.4 | 35.06 | 37.77 |
| C30-BA-1 | 38.39 | 39.47 | 40.96 | 43.65 |
| C40-BA-1 | 46.72 | 46.13 | 52.8 | 52.73 |
| C20-DO-2 | 36.35 | 36.98 | 37.24 | 37.68 |
| C30-DO-2 | 40.08 | 39.9 | 41.5 | 42 |
| C40-DO-2 | 48.97 | 48.53 | 52.45 | 53.38 |
| C20-BA-3 | 36.5 | 42.32 | 42.38 | 43.02 |
| C30-BA-3 | 40.65 | 42.35 | 43.17 | 46.4 |
| C40-BA-3 | 45.26 | 45.72 | 53.7 | 56.72 |

Beushausen และคณะ (2015) ได้ทำการทดลองโดยใช้มวลรวมหยาบ 2 ประเภทคือ หินแอนดีไซต์ (Andesite) และหินแกรนิต (Granite) เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ เพื่อทดสอบหาค่ากำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูง โดยจะใช้คอนกรีตที่มีกำลังตั้งแต่ 30 MPa ถึง 120 MPa

จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้หินแอนดีไซต์มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตทั้งที่คอนกรีตกำลัง 90 MPa และ 120 MPa ดังแสดงในรูปที่ 13 แต่กำลังของคอนกรีตที่ใช้หินแอนดีไซต์กลับได้ค่าที่น้อยกว่า เนื่องจากรอยต่อระหว่างหินและเนื้อซีเมนต์ที่ไม่แข็งแรง ทำให้คอนกรีตวิบัติก่อนที่บริเวณรอยต่อ และอิทธิพลของความแข็งแรงของมวลรวมต่อกำลังของคอนกรีตไม่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจนในคอนกรีตกำลังสูง เนื่องจากกำลังของมวลรวมกลายเป็นตัวแปรที่สำคัญแทน และความเค้นที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของมวลรวมจะถูกชดเชยบางส่วนจากการเพิ่มขึ้นของกำลังคอนกรีตเนื่องจากกำลังของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมทั้ง 2 ประเภท พบว่าได้ผลใกล้เคียงกัน เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง รวมไปถึงกำลังของรอยต่อใกล้เคียงกัน

อิทธิพลของความแข็งแรงของมวลรวมนั้น ส่งผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอย่างลึกซึ้ง เพราะว่าการทดลองนี้ควบคุมกำลังของรอยต่อและเนื้อซีเมนต์ให้เหมือนกันในทุกส่วนผสม จึงสามารถสรุปได้ว่าความแข็งแรงของมวลรวมสามารถเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้และหินที่มีความแข็งแรงมากกว่าอย่างหินแอนดีไซต์ให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่สูงกว่าหินแกรนิตในทุกส่วนผสมและ

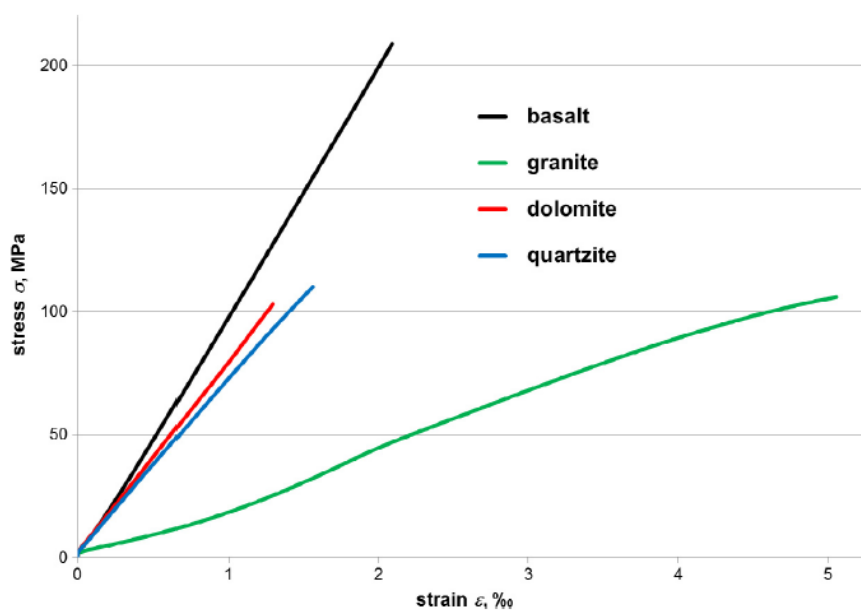
อิทธิพลของความแข็งแรงของมวลรวมจะสามารถพัฒนาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัดในคอนกรีตอายุไม่เกิน 14 วันเท่านั้น



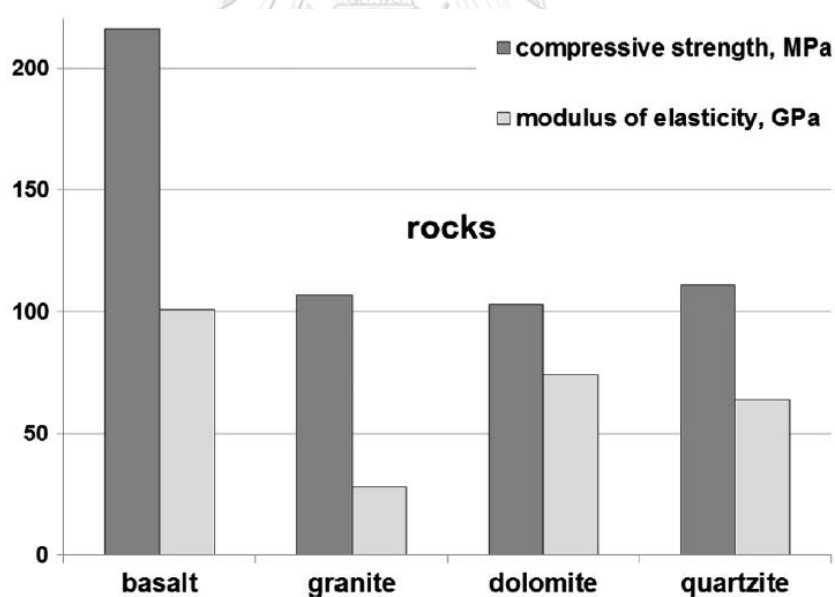
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและอายุของคอนกรีต (Beushausen และคณะ, 2015)

Piasta และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาโดยใช้มวลรวม 5 ประเภท ได้แก่ หินบะซอลต์ หินแกรนิต แร่โดโลไมต์ หินควอร์ตไซต์และหินกรวด มาผลิตคอนกรีตจำนวน 20 ตัวอย่างทั้งคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตสมรรถนะสูง เพื่อสังเกตผลกระทบจากการเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบต่อคุณสมบัติและพฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด องค์ประกอบทางแร่ของหิน โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึง จะถูกหาจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7, 0.58, 0.45 และ 0.28

จากผลการทดลองบ่งชี้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนประเภทของมวลรวมนั้นขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุมวลรวม ซึ่งมาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางแร่ของหินต้นกำเนิด ดังในรูปที่ 14 และ 15 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหินแต่ละประเภทและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในแต่ละประเภทของมวลรวมหยาบ จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของหินแต่ละประเภท การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคอนกรีตและโมดูลัสยืดหยุ่นของหิน จะสังเกตได้ว่ากำลังของหินไม่ใช่ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตทั้งหมดที่ใช้แร่โดโลไมต์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงที่สุด แต่มีค่ากำลังอัดของหินต่ำที่สุด



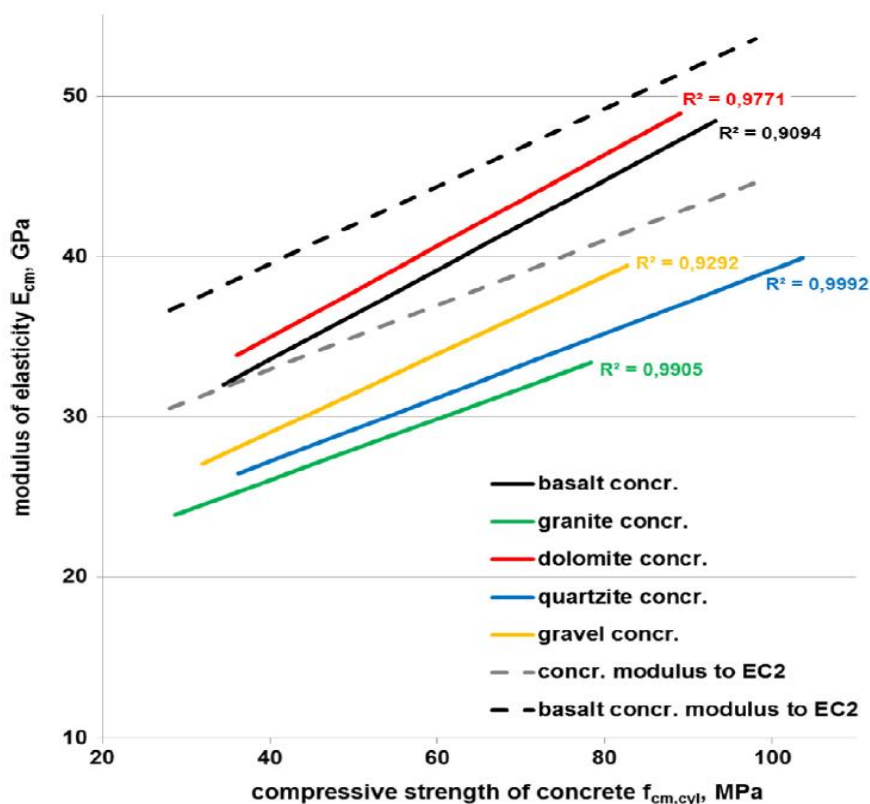
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหินแต่ละประเภท (Piasta และคณะ, 2017)



รูปที่ 15 กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของหินแต่ละประเภท (Piasta และคณะ, 2017)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบเพิ่มขึ้นดีมากแตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตที่มีโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำ เนื่องจากหินบะซอลต์มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงมากซึ่งมากกว่าหินแกรนิตประมาณ 4 เท่า จากผลการทดสอบที่กล่าวมานั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อประเมินความเหมาะสมของหินและแหล่งหินที่จะใช้ในการก่อสร้าง คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและ

องค์ประกอบทางแรงของหินควรจะถูกพิจารณา จากผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังของหินและคุณสมบัติของคอนกรีตเห็นผลไม่ชัดเจน หินบะซอลต์ที่มีกำลังสูงที่สุดไม่ได้ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงที่สุด และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้แร่โดโลไมต์ หินแกรนิตและหินควอร์ตไซต์ได้ค่าใกล้เคียงกัน ความแตกต่างระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุดและต่ำสุด รวมไปถึงค่ากำลังอัดสูงสุดและต่ำสุดแตกต่างกันอย่างมาก จึงสามารถกล่าวได้ว่ากำลังของหินไม่สามารถคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคอนกรีตที่ใช้หินนั้นเป็นมวลรวมหยาบได้ แต่ผลการเปลี่ยนรูปร่างของหิน คุณสมบัติพื้นฐานและองค์ประกอบทางแรงของหินสามารถบ่งชี้ได้ว่าวัสดุมวลรวมใดเหมาะสมในการนำมาผสมเป็นมวลรวมหยาบ ในการผลิตคอนกรีตเพื่อเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่น การเลือกประเภทของมวลรวมหยาบที่สามารถเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตสมรรถนะสูงจากการศึกษานี้พบว่า ผลการทดสอบนั้นไม่สอดคล้องกับงานวิจัยใดที่ผ่านมา เนื่องจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้ออกแบบตามสูตรมาตรฐานเพื่อทดสอบนั้นให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า ซึ่งในบางกรณีต่ำกว่าที่คำนวณจากสมการที่มาตรฐานระบุไว้มาก ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่ำที่สุดพบในคอนกรีตที่ใช้หินแกรนิตและหินควอร์ตไซต์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ ซึ่งให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าประมาณ 20% และ 15% ตามลำดับ และพบว่าคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคอนกรีตที่ดีที่สุดพบในคอนกรีตที่ใช้แร่โดโลไมต์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ ส่วนหินควอร์ตไซต์และหินแกรนิตสามารถสรุปได้ว่าไม่เหมาะในการใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ ซึ่งรูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมแต่ละประเภท โดย EC2 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณจากสมการในมาตรฐานของ Eurocode



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้หินแต่ละประเภท
(Piasta และคณะ, 2017)

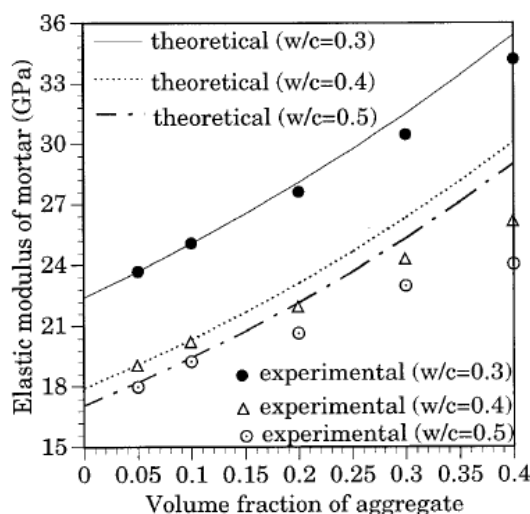
2.2.2 ขนาดผลของมวลรวมหยาบ

การคัดขนาดของมวลรวม หมายถึงการกระจายขนาดของอนุภาคมวลรวมให้มีขนาดผลที่ดี ปัจจัยที่ส่งผลต่อการคัดขนาดของมวลรวมนั้นคือการทำให้มวลรวมที่มีอนุภาคขนาดเล็กเต็มเต็มในช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมขนาดใหญ่ โดยการใช้สัดส่วนที่เหมาะสมของอนุภาค ดังนั้นส่วนผสมของมวลรวมจะถูกพัฒนาด้วยการคัดขนาด ข้อดีของการคัดขนาดมวลรวมคือการทำให้คอนกรีตมีกำลังมากขึ้นและสามารถลดปริมาณของมวลรวมละเอียดและซีเมนต์ที่ต้องใช้ เพื่อให้ได้กำลังของคอนกรีตที่ต้องการ (Neville, 1995) การคัดขนาดของมวลรวมจะแสดงในรูปของสัดส่วนน้ำหนักที่ค้างอยู่บนตะแกรงร่อนขนาดมาตรฐาน โดยขนาดของตะแกรงร่อนจะเลือกใช้ตามขนาดของมวลรวมที่ต้องการทดสอบ โดยมวลรวมหยาบจะกำหนดให้มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 4.75 มม. และมวลรวมละเอียดจะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 4.75 มม. ซึ่งเป็นขนาดช่องเปิดของตะแกรงร่อนหมายเลข 4

Islam (2005) จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ระบุไว้ว่าเมื่อปริมาณของมวลรวมได้ถูกอัดแน่นจนมีค่ามากที่สุดแล้ว จะส่งผลให้ปริมาณของเนื้อซีเมนต์ที่จะต้องใช้ในการให้มีความสามารถในการทำงานได้เพียงพอ นั้นถูกลดลงไปจนถึงค่าน้อยที่สุด โดยที่การอัดแน่นมวลรวมให้แน่นมากที่สุดสามารถทำได้โดยใช้ขนาดและสัดส่วนที่เหมาะสมของมวลรวม ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องคัดขนาดและคละมวลรวมให้เหมาะสม

วัสดุซีเมนต์เพสต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุหลายองค์ประกอบและเป็นวัสดุที่มีความพรุน การประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่ทำมาจากซีเมนต์นั้นมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากโครงสร้างขนาดเล็กในวัสดุที่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาตรของมวลรวม และปริมาตรของช่องว่างอากาศในเนื้อคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาตรของมวลรวม และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Hasselman และคณะ, 1972) โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมควรถูกตั้งสมมติฐานว่าเป็นวัสดุ 3 องค์ประกอบ ได้แก่ เนื้อซีเมนต์ มวลรวมและช่องว่าง โดยคิดปริมาตรของช่องว่างอากาศเข้าไปด้วย แต่สำหรับส่วนผสมที่มีสัดส่วนปริมาตรของมวลร่วมน้อย พบว่าปริมาตรของช่องว่างอากาศค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปริมาตรขององค์ประกอบอย่างอื่น ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์โดยตั้งสมมติฐานว่าวัสดุมี 2 องค์ประกอบได้

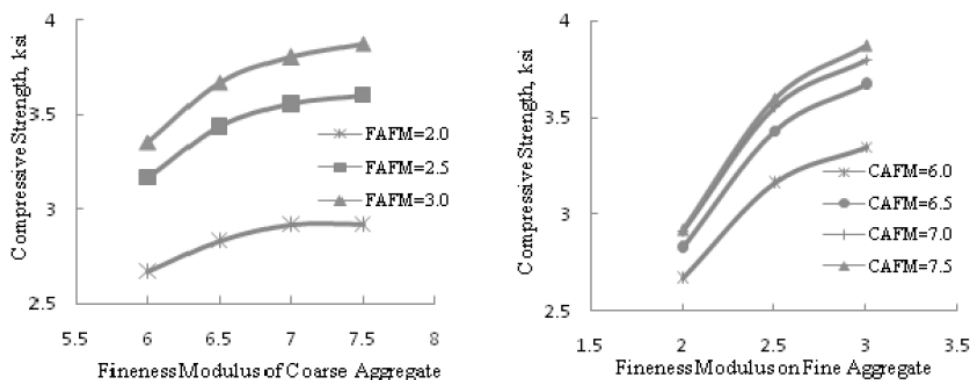
Cho และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาและแสดงให้เห็นว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้รับอิทธิพลมาจากคุณสมบัติการยืดหดและสัดส่วนปริมาตรของมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและปริมาตรของมวลรวมในส่วนผสม ผลกระทบจากสัดส่วนปริมาตรของมวลรวม อัตราส่วนช่องว่างและโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์จะถูกทดสอบ โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอก ที่มีสัดส่วนปริมาตรของมวลรวมละเอียดต่อปริมาตรของปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกันและใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 3 ค่า ได้แก่ 0.3, 0.4, และ 0.5 จะถูกหล่อขึ้นมาเพื่อทดสอบ รวมไปถึงแบบจำลองสำหรับวัสดุ 3 องค์ประกอบ จะถูกใช้เพื่อคาดการณ์ปริมาตรช่องว่างทั้งหมด ภายหลังจากการทดลอง พบว่าเมื่อใช้สัดส่วนปริมาตรของมวลรวมในส่วนผสมที่สูง โมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละองค์ประกอบควรถูกวิเคราะห์และรวมปริมาตรของช่องว่างอากาศในวัสดุผสมเข้าไปด้วย แต่สำหรับส่วนผสมที่มีปริมาตรสัดส่วนของมวลร่วมน้อยจะทำให้ปริมาตรของช่องว่างค่อนข้างน้อย ดังนั้น การตั้งสมมติฐานว่าคอนกรีตเป็นวัสดุ 2 องค์ประกอบจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุผสมมากกว่า



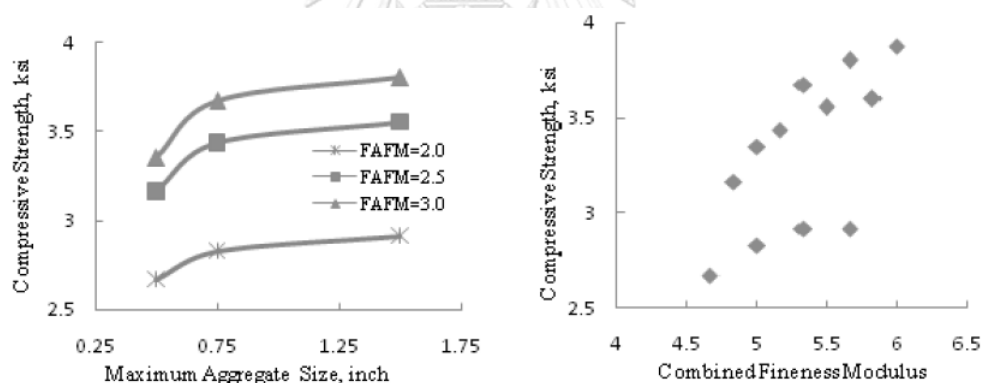
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและปริมาตรของมวลรวมในส่วนผสม (Cho และคณะ, 2000)

Haque และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาขนาดผลของมวลรวมโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังคอนกรีต จากการปรับเปลี่ยนค่าโมดูลัสความละเอียด (Modulus of fineness) ของมวลรวม โดยจะปรับเปลี่ยนขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบและโมดูลัสความละเอียดของทั้งวัสดุมวลรวมหยาบและวัสดุมวลรวมละเอียด รวมไปถึงวิเคราะห์ผลของการกระจายขนาดของอนุภาคทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตรวมถึงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ด้วยเช่นกัน อัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์นั้นจะถูกควบคุมไว้ให้คงที่และจะวัดค่ากำลังของคอนกรีตที่ 28 วันเท่านั้นเพื่อประเมินผล โดยทรายธรรมชาติจะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดและหินก้อน (Stone chips) ถูกใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ ก่อนที่จะหล่อตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมด 12 ชุด ทั้ง 12 ชุดเป็นตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ซึ่งจะถูกผสมโดยใช้ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดในสัดส่วนที่แตกต่างกันไประหว่าง 2, 2.5 และ 3 ส่วนมวลรวมหยาบจะใช้มวลรวมหยาบที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ระหว่าง 6, 6.5, 7 และ 7.5 และใช้ขนาดมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดขนาด 1.5 นิ้ว จากผลการทดลองในรูปที่ 18 จะสังเกตได้ว่าการกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าโมดูลัสความละเอียดของทั้งวัสดุมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยค่ากำลังของคอนกรีตที่สูงที่สุด พบในคอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมละเอียดที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 3 และวัสดุมวลรวมหยาบที่มีค่าโมดูลัสความละเอียด 7.5 ด้วยอัตราส่วนผสม 1:2:4 และจากรูปที่ 19 พบว่าการกำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบคือ 1.5 นิ้ว และกำลังคอนกรีตไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์กับการรวมกันของโมดูลัสความละเอียดระหว่างมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด จากผลการทดสอบสามารถระบุได้ว่ากำลังของคอนกรีตได้รับอิทธิพลเป็นอย่างมากจากการกระจายขนาดของมวลรวมเช่นเดียวกับโมดูลัสความ

ละเอียด ค่ากำลังอัดที่น้อยที่สุดถูกพบในคอนกรีตที่มีโมดูลัสความละเอียดของวัสดุมวลรวมละเอียด และวัสดุมวลรวมหยาบเท่ากับ 2 และ 6 ตามลำดับ จึงสามารถกล่าวได้ว่ากำลังของคอนกรีตได้รับอิทธิพลมาจากโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม แต่ไม่ขึ้นอยู่กับการรวมกันของโมดูลัสความละเอียดระหว่างมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและโมดูลัสความละเอียด (Haque และคณะ, 2012)

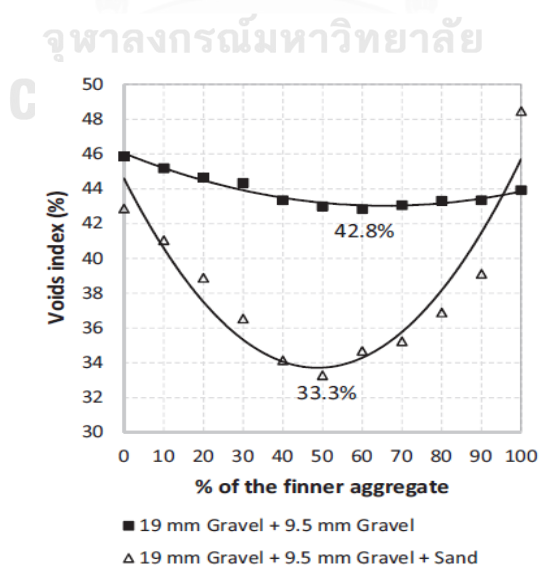


รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบและการรวมกันของโมดูลัสความละเอียด (Haque และคณะ, 2012)

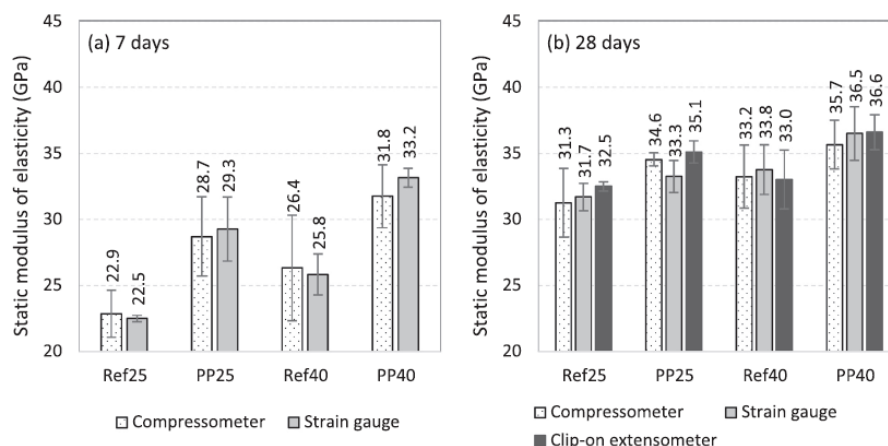
ดังนั้นวิธีอัดแน่นนี้จะกระจายความละเอียด (particle size distribution) ของมวลรวมให้เหมาะสมที่สุด ทำให้สามารถลดปริมาตรของช่องว่างให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต วิธีอัดแน่นนี้สามารถประยุกต์ใช้กับซีเมนต์เมื่อต้องผสมกับสารผสมเพิ่มในเนื้อซีเมนต์ หรือสามารถมุ่งเน้นไปด้านการกระจายความละเอียด จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถกระจายความละเอียดได้ โดยการใช้น้ำและรูปร่างของมวลรวมที่เหมาะสมรวมกับการหาวิธีอัดแน่น เพื่อที่จะได้ปริมาณมวลรวมในเนื้อคอนกรีตมากที่สุด และจะต้องรู้ปริมาณของช่องว่างระหว่างมวลรวมที่จะถูกเติมให้เต็มด้วยมอร์ตาร์

การลดปริมาณการใช้ซีเมนต์มีความสำคัญและจำเป็นอย่างมากเนื่องจากการผลิตซีเมนต์นั้นส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอันเป็นผลมาจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากในกระบวนการผลิต งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงการอัดแน่นของมวลรวมส่งผลให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการพัฒนาการกระจายความละเอียดมีความสำคัญและยังสามารถลดปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการใช้ในส่วนผสมได้ แต่ยังคงได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

Klein และคณะ (2020) จึงได้ทำการทดสอบกับคอนกรีตที่มีกำลัง 25 MPa และ 40 MPa ซึ่งจากผลการทดลองอัดแน่นมวลรวม พบว่าขนาดและสัดส่วนของมวลรวมที่อัดแน่นที่สุดคือขนาด 19 มม. ปริมาตร 20% ขนาด 9.5 มม. ปริมาตร 30% และทรายอีก 50% ทำให้มีความหนาแน่นการอัด (Packing density) เท่ากับ 0.667 หรือมีจำนวนช่องว่างเพียงแค่ 33.3% เท่านั้น ดังรูปที่ 20 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของช่องว่างและสัดส่วนความละเอียดของมวลรวม และยังสามารถลดปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมได้ถึง 12% และ 4% ที่กำลังคอนกรีต 25 MPa และ 40 MPa ตามลำดับ แต่กำลังของคอนกรีตยังคงเท่าเดิม โดยที่ไม่ได้เติมสารผสมเพิ่ม ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 21% และ 8% ที่อายุคอนกรีต 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 21 โดยที่ Ref คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาดเดียวและ PP คือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีการกระจายขนาด และยังสังเกตได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นที่อายุคอนกรีต 7 วัน มากกว่า 28 วัน เนื่องจากการใช้วิธีการอัดแน่นมวลรวมนั้น จะช่วยพัฒนากำลังให้เพิ่มขึ้นเร็วจากการปรับปรุงกระบวนการไฮเดรชัน (Hydration process) ในคอนกรีต



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนช่องว่างและสัดส่วนความละเอียดของมวลรวม (Klein และคณะ, 2020)



รูปที่ 21 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตที่อัดแน่นมวลรวม (Klein และคณะ, 2020)

Angulo และคณะ (2020) การศึกษานี้ทำให้การเลือกมวลรวมหยาบจากธรรมชาติสำหรับการทดลองในคอนกรีตกำลังสูง เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงได้ทำการศึกษากำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของอนุภาคมวลรวมที่เหมาะสมกับคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้ขั้นตอนที่ง่ายและรวดเร็วในการหาความเป็นไปได้ของการกระจายตัว กำลังรับแรงดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นของอนุภาคของวัสดุมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ หินแกรนิตและหินปูน หลังจากนั้นจึงประยุกต์ใช้กับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 9.5 มม. ถึง 25 มม.

จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงดึงของหินแกรนิตและหินปูนแปรผันระหว่าง 6 ถึง 8 เท่าและมีช่วงกำลังอยู่ระหว่าง 3 ถึง 22 MPa ในมวลรวมทั้ง 2 ประเภท ตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงดึงต่ำกว่า 5 MPa ถือว่าเป็นค่าที่ต่ำมาก ซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อศักยภาพของคอนกรีตกำลังสูง โดยมวลรวมหินแกรนิตมีกำลังที่สูงมากกว่าหินปูน อย่างไรก็ตาม ค่าหินแกรนิตจะมีความแปรปรวนมากกว่าหินปูนและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหินแกรนิตจะสูงกว่าหินปูน ซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ระหว่าง 18-78 GPa สำหรับหินแกรนิต และ 18 ถึง 66 GPa สำหรับหินปูน โดยจะขึ้นอยู่กับว่าโครงสร้างองค์ประกอบของคอนกรีตนั้นเป็นอย่างไร กำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวมส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

2.2.3 หินบะซอลต์

P.Ramteja (2016) ใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมหายาบในการผสมคอนกรีตเพื่อที่จะให้คอนกรีตได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ การศึกษานี้ใช้ปริมาณสัดส่วนของหินบะซอลต์ที่แตกต่างกันโดยจะเพิ่มขึ้นทีละ 25% เพื่อทดแทนในส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตไว้ที่ 50 MPa และ 60 MPa หลังจากนั้นจึงจะทดสอบกำลังอัดและกำลังรับแรงดึง ที่ตัวอย่างคอนกรีตอายุ 3, 7, 28, และ 56 วัน

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวมหายาบในการผลิตคอนกรีตอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมจะต้องถูกปรับปรุง เนื่องจากคุณสมบัติของหินบะซอลต์ที่แตกต่างจากหินปูน และผลการทดลองบ่งชี้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของหินบะซอลต์ในส่วนผสมจะทำให้กำลังอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ในทุกอายุของคอนกรีต ทั้งในคอนกรีตกำลัง 50 MPa และ 60 MPa ดังในตารางที่ 6 และ ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ระดับกำลัง 50 MPa และ 60 MPa ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 8 และ ตารางที่ 9 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ระดับกำลัง 50 MPa และ 60 MPa ตามลำดับ รวมถึงความสามารถทำงานได้ที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูน ซึ่งนำไปสู่การลดลงของค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง แต่ยังคงผลิตคอนกรีตได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการ เนื่องจากหินบะซอลต์เป็นมวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไป จึงทำให้มีราคาถูก ทำให้มีความคุ้มค่าที่จะใช้หินบะซอลต์ในการผลิตคอนกรีตแทนหินปูน ซึ่งจากการทดลองพบอีกว่าสำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังอัด 50 MPa กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์จะเพิ่มขึ้นประมาณ 25.21% และกำลังรับแรงดึงจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10.5% และสำหรับส่วนผสมที่มีระดับกำลัง 60 MPa พบว่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 6.46% และ 4.62% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหายาบ

ตารางที่ 6 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ระดับกำลังออกแบบ 50 MPa (P.Ramteja, 2016)

| Specimen No. | Curing days | Compressive strength (N/mm ²) | | | | |
|--------------|-------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | 3 | 29.81 | 33.39 | 36.1 | 39.88 | 42.18 |
| 2 | 7 | 40.86 | 41.58 | 42.35 | 43.09 | 45.3 |
| 3 | 28 | 60.75 | 63.46 | 64.94 | 65.56 | 66.33 |
| 4 | 56 | 62.01 | 64.72 | 66.2 | 66.82 | 69.79 |

ตารางที่ 7 กำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ระดับกำลังออกแบบ 60 MPa (P.Ramteja, 2016)

| Specimen No. | Curing days | Compressive strength (N/mm ²) | | | | |
|--------------|-------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | 3 | 34.63 | 36.5 | 37.44 | 39.88 | 43.84 |
| 2 | 7 | 45.58 | 48.48 | 49.23 | 51.02 | 53.62 |
| 3 | 28 | 68.84 | 70.06 | 74.58 | 76.08 | 79.59 |
| 4 | 56 | 72.2 | 73.39 | 76 | 79.35 | 79.98 |

ตารางที่ 8 กำลังรับแรงดึงคอนกรีตที่ใช้ระดับกำลังออกแบบ 50 MPa (P.Ramteja, 2016)

| Specimen No. | Curing days | Spilt tensile strength (N/mm ²) | | | | |
|--------------|-------------|---|------|------|------|------|
| | | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | 3 | 3.21 | 3.81 | 4.55 | 5.83 | 6.64 |
| 2 | 7 | 4.21 | 4.81 | 5.56 | 6.83 | 7.36 |

ตารางที่ 9 กำลังรับแรงดึงคอนกรีตที่ใช้ระดับกำลังออกแบบ 60 MPa (P.Ramteja, 2016)

| Specimen No. | Curing days | Spilt tensile strength (N/mm ²) | | | | |
|--------------|-------------|---|------|------|------|------|
| | | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | 3 | 3.43 | 3.88 | 4.55 | 6 | 6.64 |
| 2 | 7 | 4.38 | 5 | 5.72 | 6.83 | 7.58 |
| 3 | 28 | 5 | 5.66 | 6.62 | 7.86 | 8.53 |
| 4 | 56 | 5.77 | 6.62 | 7.68 | 8.49 | 9.16 |

Hamadallah Mohammad Al-Baijat (2008) ได้ทำการศึกษาโดยนำหินบะซอลต์จาก จอร์แดนมาทำการทดสอบคุณสมบัติของมวลรวมเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้หินปูน (Limestone) พบว่าหินบะซอลต์มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่มากกว่าหินปูน และยังมีค่าการดูดซึม (Absorption) และค่าการสึกกร่อน (Abrasion) ที่น้อยกว่าหินปูน ดังที่แสดงในตารางที่ 10 ซึ่งแสดง คุณสมบัติของหินบะซอลต์และหินปูน และตารางที่ 11 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์

จากการเปรียบเทียบเห็นได้ชัดว่า หินบะซอลต์มีความเหมาะสมและมีแนวโน้มที่จะปรับปรุง คุณสมบัติของคอนกรีตได้ จึงได้ทำการทดลองโดยการแทนหินปูนด้วยหินบะซอลต์เพื่อใช้เป็นวัสดุมวล รวมหยาบในการผสมคอนกรีต แล้วจึงทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีต โดยแต่ละส่วนผสม

จะแทนที่หินปูนด้วยหินบะซอลต์เป็นปริมาตร 25%, 50%, 75% และ 100% ส่วนมอร์ตาร์จะถูกควบคุมให้เหมือนกันในทุกส่วนผสม

ตารางที่ 10 คุณสมบัติเบื้องต้นของหินบะซอลต์และหินปูน (Hamadallah Mohammad Al-Baijat, 2008)

| Aggregate Property | Basalt (Fine) | Basalt (Coarse) | Limestone (Fine) | Limestone (Coarse) |
|-----------------------------|---------------|-----------------|------------------|--------------------|
| Specific gravity (Apparent) | 2.943 | 2.917 | 2.673 | 2.626 |
| Specific gravity (SSD) | 2.843 | 2.814 | 2.605 | 2.552 |
| Specific gravity (Dry) | 2.791 | 2.765 | 2.558 | 2.508 |
| Absorption (%) | 1.854 | 1.763 | 2.7 | 3.8 |
| Abrasion (%) | 25.9 | 24.4 | 35 | 34.8 |

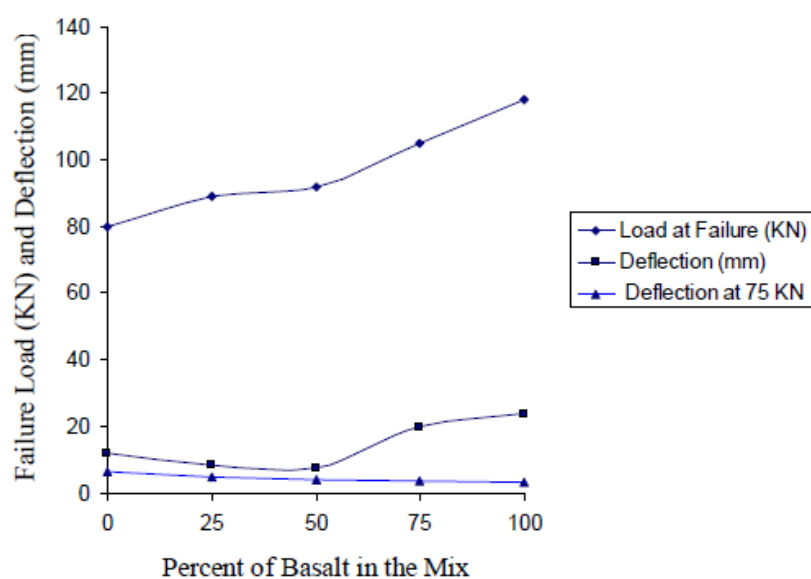
ตารางที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์ (Hamadallah Mohammad Al-Baijat, 2008)

| | |
|--------------------------------|--------|
| CO ₂ | 1 |
| Na ₂ O | 2.97 |
| MgO | 8.56 |
| Al ₂ O ₃ | 14.3 |
| SiO ₂ | 45.9 |
| P ₂ O ₅ | 0.372 |
| SO ₃ | 0 |
| Cl | 0 |
| K ₂ O | 0.861 |
| CaO | 11.1 |
| TiO ₂ | 2.25 |
| MnO | 0.174 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.22 |
| SrO | 0 |
| SUM | 99.687 |

หลังจากทดลองใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีตแทนหินปูน จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่า ค่ากำลังรับแรงอัด ค่ากำลังรับแรงดึง ค่าโมดูลัสการแตกหัก จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนหินบะซอลต์ที่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้หินปูนเพียงอย่างเดียว ซึ่งตารางที่ 12 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตเมื่อทดแทนหินบะซอลต์ด้วยหินปูน เนื่องจากหินบะซอลต์นั้นมีเนื้อแน่น ทนทานมากกว่าและการดูดซึมน้ำน้อยกว่าหินปูน และยังพบว่าการใช้หินบะซอลต์แทนหินปูนช่วยลดความพรุนและการนำความร้อนของคอนกรีตได้ โดยคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์แทนหินปูนในปริมาตรของมวลรวมทั้งหมดจะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นถึง 65% และกำลังรับแรงดึงสูงขึ้นถึง 61% ในขณะที่กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น 57% ความพรุนและการนำความร้อนของคอนกรีตลดลง 28% และ 31% ตามลำดับ ในตัวอย่างคานคอนกรีตซึ่งถูกนำไปทดสอบด้วยเช่นกัน พบว่าค่าการโก่งตัวของคานคอนกรีตลดน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณของหินบะซอลต์ในส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 22 จึงสามารถสรุปได้ว่า การใช้หินบะซอลต์ในการผลิตคอนกรีตแทนหินปูนสามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้ ไม่ว่าจะเป็นกำลังหรือโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดัดสูงสุดของคอนกรีต (Hamadallah Mohammad Al-Baijat, 2008)

| % Basalt | Failure load (kN) | Average Compressive Strength (MPa) |
|----------|-------------------|------------------------------------|
| 0 | 560.5 | 24.91 |
| 25 | 635 | 28.22 |
| 50 | 792.5 | 35.22 |
| 75 | 852.5 | 37.89 |
| 100 | 925 | 41.11 |



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงวิบัติต่อการโก่งตัวและปริมาณทดแทนหินปะชอลต์ในส่วนผสม (Hamadallah Mohammad Al-Baijat, 2008)

Kishore และคณะ (2015) ทำการศึกษาโดยมีจุดประสงค์ที่จะตรวจสอบความเป็นไปได้ในการใช้หินปะชอลต์เป็นวัสดุผสมรวมหยาบในการผลิตคอนกรีต คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในงานวิศวกรรม การเพิ่มหรือแทนที่องค์ประกอบในวัสดุนั้นส่งผลให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปด้วย งานวิจัยจำนวนมากได้ดำเนินการเพื่อวิจัยวัสดุที่มีความทนทานมากขึ้น ระยะเวลาการใช้งานยาวนานขึ้นเนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตส่วนใหญ่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อม

แบบพลศาสตร์ ดังนั้นจึงได้ศึกษาและทดสอบถึงผลกระทบและประสิทธิภาพของการใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมหายาบในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อทดแทนการใช้หินปูน โดยจะเพิ่มสัดส่วนของหินบะซอลต์ส่วนผสมละ 25% ตั้งแต่ 0% จนถึง 100% ซึ่งจะใช้กำลังคอนกรีตที่ออกแบบไว้ 2 ส่วนผสม เพื่อเปรียบเทียบกันได้แก่คอนกรีตกำลัง 40 MPa และ 50 MPa หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบในห้องปฏิบัติการและทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุคอนกรีต 7 วัน และ 28 วัน รวมไปถึงความสามารถในการทำงาน นอกจากนี้คุณสมบัติของหินแต่ละแหล่งจะถูกพิจารณาโดยการทดสอบหาค่าการสึกกร่อน ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมหายาบและวัสดุมวลรวมละเอียด จากการทดสอบพบว่าคุณสมบัติของส่วนผสมนั้นจะถูกพัฒนาขึ้นเมื่อใช้หินบะซอลต์เป็นหนึ่งในองค์ประกอบของส่วนผสมคอนกรีต และสังเกตได้ว่าค่ากำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณของหินบะซอลต์ในคอนกรีต เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมเพียงอย่างเดียว ทั้งในคอนกรีตอายุ 7 และ 28 วัน ดังที่แสดงในตารางที่ 13 และ 14 คือผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีกำลังออกแบบ 40 MPa ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ และที่แสดงในตารางที่ 15 และ 16 คือผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีกำลังออกแบบ 50 MPa ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ เนื่องจากหินบะซอลต์มีเนื้อที่แน่น ความทนทาน และดูดซึมน้ำน้อยกว่าเมื่อเทียบกับหินปูน และยังทำให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานที่สูงขึ้น ตามปริมาณของหินบะซอลต์ในส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 23 กล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของหินบะซอลต์ในส่วนผสมคอนกรีตจะสามารถลดค่าใช้จ่ายและค่าแรงงานในการก่อสร้างได้ เนื่องจากหินบะซอลต์เป็นมวลรวมจากธรรมชาติซึ่งมีอยู่มากมายและราคาถูก แต่ทำให้กำลังของคอนกรีตที่สูงขึ้น ดังนั้นการใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวมหายาบในการผลิตคอนกรีตจึงมีความคุ้มค่า

ตารางที่ 13 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระดับกำลังออกแบบ 40 MPa ที่อายุ 7 วัน (Kishore และคณะ, 2015)

| Specimen No. | Compressive strength (N/mm ²) | | | | |
|--------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | 32 | 34.66 | 38.66 | 41.33 | 42.66 |
| 2 | 33.33 | 35.55 | 39.55 | 40.88 | 43.11 |
| 3 | 30.22 | 33.77 | 39.11 | 40.44 | 41.77 |

ตารางที่ 14 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระดับกำลังออกแบบ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน (Kishore และคณะ, 2015)

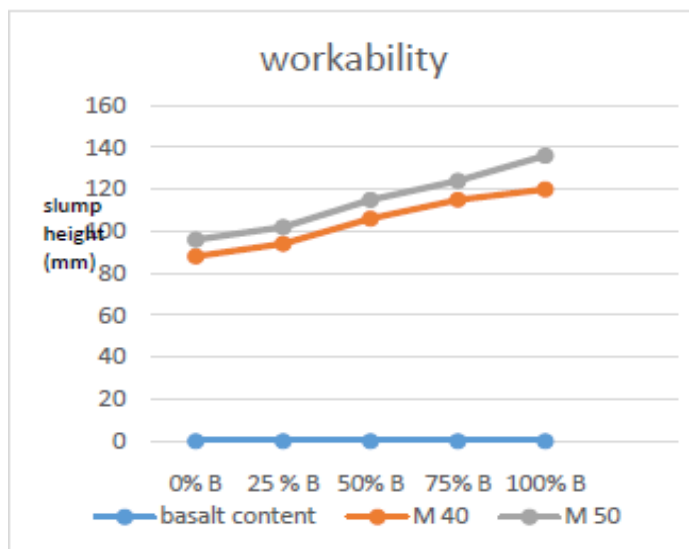
| Specimen No. | Compressive strength (N/mm ²) | | | | |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | 51.11 | 52.44 | 57.77 | 58.66 | 62.22 |
| 2 | 51.55 | 53.33 | 55.55 | 60.44 | 61.33 |
| 3 | 52.44 | 53.77 | 56.88 | 59.11 | 62.66 |

ตารางที่ 15 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระดับกำลังออกแบบ 50 MPa ที่อายุ 7 วัน (Kishore และคณะ, 2015)

| Specimen No. | Compressive strength (N/mm ²) | | | | |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | 39.11 | 40.88 | 41.77 | 45.33 | 46.22 |
| 2 | 41.33 | 39.55 | 43.55 | 44.88 | 45.77 |
| 3 | 40.44 | 41.33 | 42.66 | 44.44 | 44.88 |

ตารางที่ 16 กำลังอัดของคอนกรีตที่ระดับกำลังออกแบบ 50 MPa ที่อายุ 28 วัน (Kishore และคณะ, 2015)

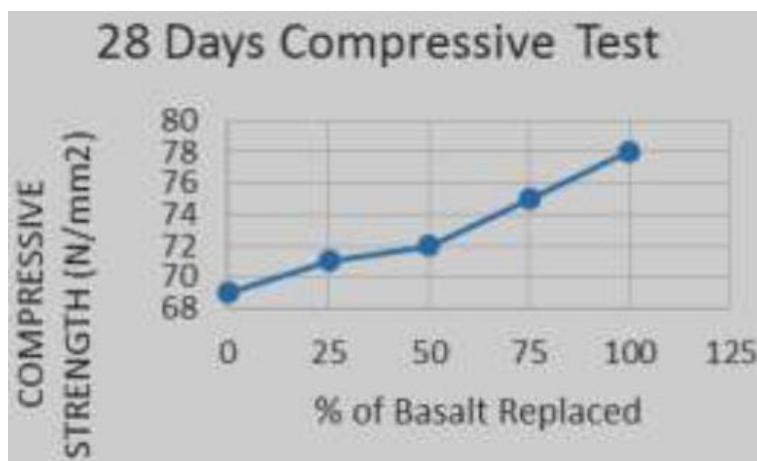
| Specimen No. | Compressive strength (N/mm ²) | | | | |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | 61.33 | 64 | 66.22 | 68.44 | 72 |
| 2 | 62.22 | 64.88 | 67.55 | 66.22 | 71.11 |
| 3 | 63.11 | 63.11 | 66.66 | 67.55 | 72.44 |



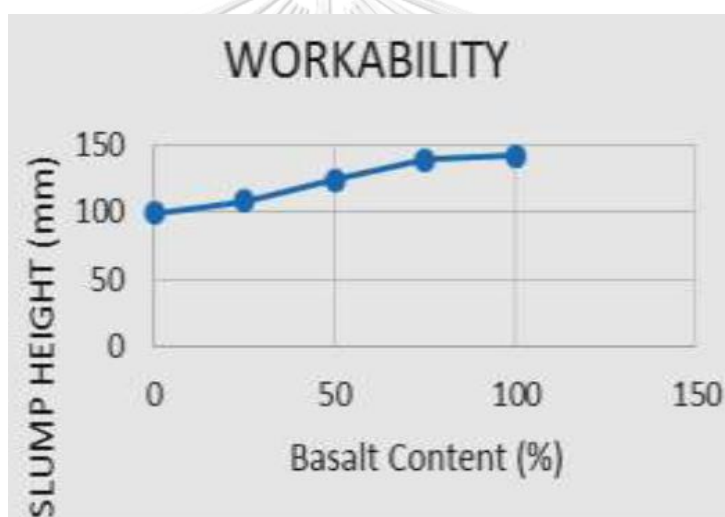
รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวและสัดส่วนทดแทนของหินบะซอลต์
(Kishore และคณะ, 2015)

หลังจากนั้นจึงศึกษาการใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงโดยจะใช้ทดแทนหินปูนในสัดส่วนปริมาตรที่เพิ่มขึ้นส่วนผสมละ 25% ตามปริมาตร ตั้งแต่ 0% ถึง 100% โดยคอนกรีตที่ใช้ทดสอบจะออกแบบให้มีกำลังอัด 60 MPa ค่ากำลังของคอนกรีตและความสามารถในการทำงานได้จะถูกทดสอบ นอกจากนี้คุณภาพของแหล่งหินบะซอลต์จะถูกพิจารณาโดยการทดสอบค่าการสึกกร่อน ค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดก็จะถูกทดสอบด้วยเช่นกัน

จากผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการใช้หินบะซอลต์เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น และพบว่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของหินบะซอลต์ในส่วนผสมคอนกรีต เมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ใช้เพียงหินปูนเพียงอย่างเดียวเป็นวัสดุมวลรวม ดังรูปที่ 24 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัดส่วนทดแทนของหินบะซอลต์ ซึ่งกำลังอัดมีค่าสูงขึ้นประมาณ 16% ถึง 20% รวมไปถึงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตที่ดีขึ้น ตามปริมาณของหินบะซอลต์ที่ใช้ทดแทนหินปูน ดังที่แสดงผลการทดลองในรูปที่ 25 เนื่องจากหินบะซอลต์มีคุณสมบัติที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับหินปูน อาทิเช่น ความหนาแน่นและความทนทานที่สูงกว่า ดูดซึมน้ำน้อยกว่า และกำลังรับแรงที่ดีกว่า



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัดส่วนทดแทนของหินปะชอลต์ (Kishore และคณะ, 2015)



รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวและสัดส่วนทดแทนของหินปะชอลต์ (Kishore และคณะ, 2015)

2.2.4 ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า

ทุกวันนี้วัสดุมวลรวมธรรมชาติและซีเมนต์คือ 2 องค์ประกอบของคอนกรีตที่ถูกมองว่าเป็นปัญหาจากมุมมองของนักพัฒนาอย่างยั่งยืน และการใช้วัสดุมวลรวมจากธรรมชาติ ส่งผลกระทบต่อทรัพยากรด้านธรณีวิทยา ซึ่งพบว่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด การมุ่งเน้นเรื่องการใช้วัสดุมวลรวมที่สามารถทดแทนวัสดุมวลรวมจากธรรมชาติ นำไปสู่การใช้วัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม เพื่อใช้ในการผลิตคอนกรีต ดังนั้นความทนทานและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุทดแทนจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก รวมไปถึงคุณสมบัติด้านเคมีและด้านกายภาพของวัสดุทดแทนควรจะถูกพิจารณาอย่างจริงจังเพื่อใช้ในการผลิตคอนกรีต

ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Granulated blast furnace slag) คือวัสดุผลพลอยได้ที่สำคัญในอุตสาหกรรมเหล็ก ซึ่งมีปริมาณประมาณ 0.23 ตันต่อเหล็กหล่อ 1 ตัน และมีปริมาณประมาณ 0.1 ถึง 0.2 ตันต่อเหล็กกล้า (Steel) 1 ตัน และปริมาณมหาศาลของตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากเช่นเดียวกันและเสียงบประมาณจำนวนมากเพื่อกำจัด เพื่อเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม จึงมีความจำเป็นที่จะพัฒนาการใช้ตะกรันเหล็ก ซึ่งได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กมาใช้ในการก่อสร้าง

การใช้ตะกรันเหล็กในอุตสาหกรรมการก่อสร้างนั้นมีมานานแล้ว ตั้งแต่ที่โรมันใช้ตะกรันเหล็กบดละเอียดเพื่อสร้างถนน ตะกรันเหล็กมีประโยชน์อย่างมากในฐานะมวลรวมเนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่สูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติอย่างมาก ไม่กี่ปีที่ผ่านมาประมาณ 60% ของตะกรันเตาถลุงถูกใช้ในการผลิตซีเมนต์และคอนกรีต และประมาณ 24% ใช้ในการก่อสร้างถนน ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ผ่านมาศึกษาเกี่ยวกับการใช้ตะกรันเหล็กผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในงานก่อสร้างถนน แต่มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหายาปในงานอุตสาหกรรมคอนกรีต (Al-Zaid และคณะ, 1997) ตะกรันเตาถลุงจะถูกใช้เพื่อแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติในงานผลิตคอนกรีต ด้วยขนาดคละหลายขนาด เช่นเดียวกับมวลรวมจากธรรมชาติ โดยผลจากการบดก้อนตะกรันขนาดใหญ่และร้อนผ่านตะแกรงขนาดมาตรฐาน การใช้ตะกรันเหล็กเพื่อทดแทนวัสดุมวลรวมจากธรรมชาตินอกจากจะลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตแล้วยังสามารถช่วยกำจัดตะกรันเหล็กที่เหลือจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก ซึ่งมีปริมาณมหาศาล ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีรูปร่างเรียบ มีมุมแหลมและมีผิวขรุขระคล้ายรังผึ้ง ซึ่งคุณลักษณะแบบนี้สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการผสานกับวัสดุประสานได้เป็นอย่างดี

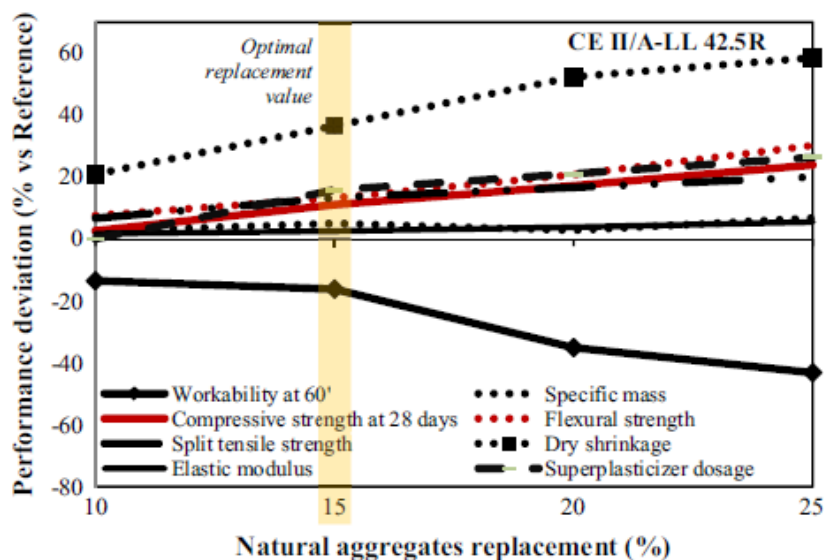
Anastasiou และคณะ (2006) ได้ประเมินคุณสมบัติที่แตกต่างกันของตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้าและวัสดุมวลรวมจากธรรมชาติ จากการศึกษาสรุปได้ว่า วัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเหล่านี้มีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติเป็นอย่างมาก แต่ปัจจัยหลักที่เป็นอันตรายในการใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมในปริมาณมากในคอนกรีต คือตะกรันเหล็กมีแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์จำนวนมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวของตะกรันเหล็กและอาจกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ดังนั้นการใช้ตะกรันเหล็กจึงต้องทำการดูแล ปรับสภาพตะกรันเหล็กก่อนนำมาใช้ เพื่อทำให้การขยายตัวของออกไซด์นั้นลดลง

Coppola และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษการใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเพื่อที่จะใช้ทดแทนวัสดุมวลรวมจากธรรมชาติในการผลิตคอนกรีต โดยจะทดแทนตะกรันเหล็กในส่วนผสม 10%, 15%, 20% และ 25% ตามสัดส่วนน้ำหนักและจะพิจารณาขนาดของตะกรันเหล็ก 3 ขนาด ตะกรันเหล็กมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 17 เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต ทั้งกำลังอัด กำลังรับแรงดึง และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต แล้วจึง

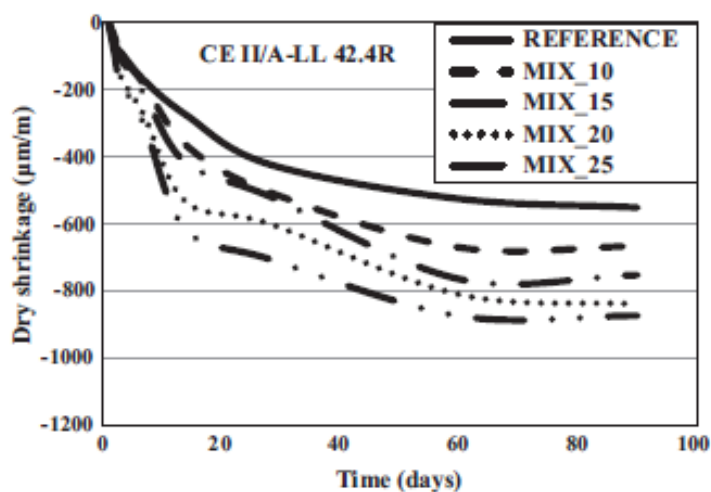
จะประเมินการหดตัวแบบแห้งของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ซึ่งจากผลการทดลองในรูปที่ 26 จะสังเกตได้ว่าคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตเพิ่มขึ้น สอดคล้องไปกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกรันเหล็กในส่วนผสม แต่พบว่าปริมาณมากที่สุดที่เหมาะสมในการทดแทนวัสดุมวลรวมจากธรรมชาติด้วยตะกรันเหล็กควรทดแทนในปริมาตรประมาณ 15% เท่านั้น เนื่องจากความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของตะกรันเหล็กในส่วนผสม ซึ่งความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารลดน้ำพิเศษที่ใช้และค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ต้องการ นอกจากความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตจะลดลงเมื่อปริมาตรของตะกรันเหล็กในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น ตะกรันเหล็กที่มีความละเอียดมาก ยังส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้นตามไปด้วย เป็นผลมาจากที่ตะกรันเหล็กนั้น มีน้ำหนักมากกว่ามวลรวมจากธรรมชาติทั่วไป ซึ่งส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังอัดสูงมากขึ้น ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้ง พบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบจะหดตัวมากกว่าคอนกรีตทั่วไป ดังผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 27 ซึ่ง MIX_10, MIX_15, MIX_20 และ MIX_25 คือ ส่วนผสมที่ทดแทนปริมาณตะกรันเหล็กในส่วนผสม 10%, 15%, 20% และ 25% ตามลำดับ

ตารางที่ 17 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก (Coppola และคณะ, 2016)

| Principal constituents (% by weight) | | Element traces (mg/kg) | |
|--------------------------------------|-----------|------------------------|----------------|
| CaO | 25 - 30 | As | < 15 |
| CaO _{free} | 0 - 4 | Cd | < 30 |
| SiO ₂ | 8 - 18 | Cr _{total} | 5,000 – 20,000 |
| Al ₂ O ₃ | 3 - 10 | Cu | < 300 |
| MgO | 2 - 9 | Hg | < 0.5 |
| Fe _{total} | 20 - 30 | Ni | < 70 |
| Mn _{total} | 2 - 8 | Pb | < 90 |
| CaO/SiO ₂ | 1.7 - 4.0 | Zn | < 900 |



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการใช้ตะกรันเหล็กทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติและสัดส่วน
เบี่ยงเบนประสิทธิภาพ (Coppola และคณะ, 2016)



รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและระยะเวลา (Coppola และคณะ, 2016)

ดังนั้นการใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าในการผลิตคอนกรีต จึงจะถูกจำกัดด้วยความหนาแน่นที่มากขึ้นและความไวของการเกิดรอยร้าว ถึงแม้ว่าจะมีโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงมากกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป แต่มีเปอร์เซ็นต์การทดแทนเหมาะสมที่ต่ำเพียง 15% เท่านั้น ทุกวันนี้มีการใช้ตะกรันเหล็กในการผสมกับวัสดุบิทูมินัส (Bituminous) สำหรับการก่อสร้างถนนเนื่องจากมีต้นทุนถูก ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ตะกรันเหล็กเพื่อทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติเป็นวัสดุมวลรวมหายาบในคอนกรีต ซึ่งเป็นกระบวนการรีไซเคิลที่น่าสนใจสำหรับอุตสาหกรรมเหล็ก

Faleschini และคณะ (2016) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace Slag, EAF) มาใช้ทดแทนวัสดุมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ หลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้ชี้ให้เห็นว่าตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีคุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางแร่ และองค์ประกอบทางเคมีที่ดี เหมาะสมสำหรับใช้ในงานวิศวกรรมโยธา และตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีคุณสมบัติทางกลที่สูงมาก จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นมวลรวมในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง (High performance concrete) เป็นอย่างมาก ในการทดสอบนี้จะใช้คอนกรีต 4 ส่วนผสม โดยทุกส่วนผสมจะใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นมวลรวมหยาบและจะปรับเปลี่ยนสัดส่วนของซีเมนต์โดยเพิ่มซิลิกาฟุ่ม ซึ่งตารางที่ 18 จะแสดงรูปร่างลักษณะ ขนาด ความหนาแน่นและค่าการดูดซึ่มของมวลรวมที่ใช้ในการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ และส่วนผสมทั้ง 4 ส่วนผสมจะแสดงในตารางที่ 19 โดย w แทนน้ำ c แทนปูนซีเมนต์ SP แทนสารลดน้ำพิเศษ และ SF แทนซิลิกาฟุ่ม ซึ่งส่วนผสมจะออกแบบให้กำลังคอนกรีตอยู่ในช่วงระหว่าง 50 MPa ถึง 70 MPa

ตารางที่ 18 คุณสมบัติเบื้องต้นของมวลรวมที่ใช้ในการทดลอง (Faleschini และคณะ, 2016)

| Aggregate | EAF slag | NA-Sand | NA-Gravel |
|---------------------------------------|---------------|----------|-----------|
| Size (mm) | 4-16 | 0-4 | 4-16 |
| Apparent density (kg/m ³) | 3,854 | 2,704 | 2,700 |
| Water absorption (%) | 0.95 | 1.18 | 1.04 |
| Shape | Sharp-pointed | Roundish | Roundish |

ตารางที่ 19 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (Faleschini และคณะ, 2016)

| MIX | Mix C | Mix E1 | Mix E2 | Mix E-SF |
|---------------------------------|-------|--------|--------|----------|
| Cement (kg/m ³) | 400 | 400 | 350 | 400 |
| SF (kg/m ³) | - | - | - | 60 |
| Water (kg/m ³) | 160 | 160 | 140 | 184 |
| w/(c+SF) | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Coarse NA (kg/m ³) | 1,008 | - | - | - |
| Coarse EAF (kg/m ³) | - | 1,408 | 1,476 | 1,370 |
| Fine NA (kg/m ³) | 832 | 832 | 872 | 810 |
| SP (%) | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |

จากผลการทดสอบในตารางที่ 20 จะเห็นว่าขณะที่เป็นคอนกรีตสด คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 21% เนื่องจากตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีความหนาแน่นกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ จึงทำให้มีความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะที่มาก ส่วนค่าการยุบตัวของ Mix E1 และ Mix E2 น้อยกว่าส่วนผสมอื่น เนื่องจากมีส่วนผสมของมวลรวมมากกว่า สังเกตได้ว่า Mix E-SF ค่าการยุบตัวเท่ากับคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากมีส่วนผสมปริมาตรน้ำมากกว่า Mix E1 และ Mix E2 ส่วนค่ากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มากที่สุดคือ Mix E1 ซึ่งเป็นสัดส่วนเดียวกันกับ Mix C และ Mix E-SF แต่ส่วนผสมทั้ง 2 ให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่า Mix E1 เนื่องจาก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูงทำให้กำลังรับแรงอัดน้อยลงและพบว่ากำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นหลังจากที่ใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า เนื่องจากผิวของตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีความขรุขระ จึงช่วยปรับปรุงกำลังบริเวณรอยต่อให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และเนื่องจากตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีกำลังที่สูง จึงทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย รวมไปถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นด้วยเช่นกัน เนื่องจากตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีสมบัติเชิงกลที่ดี ทำให้ช่วยพัฒนาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จากผลการทดสอบทั้งหมดจึงสามารถสรุปได้ว่า การใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นมวลรวมหยาบสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้ และเนื่องจากเป็นวัสดุรีไซเคิลจึงช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็ก (Faleschini และคณะ, 2016)

| Concrete properties | Mix C | Mix E1 | Mix E2 | Mix E-SF |
|--|-------|--------|--------|----------|
| Fresh concrete properties | | | | |
| Density (kg/m ³) | 2,477 | 2,935 | 3,007 | 2,777 |
| Slump mm) | 210 | 170 | 160 | 210 |
| Hardened concrete properties - 7 days | | | | |
| Density (kg/m ³) | 2,470 | 2,890 | 2,982 | 2,765 |
| f _{cm,cube} (MPa) | 45.7 | 69.05 | 60.6 | 54.6 |
| Hardened concrete properties - 28 days | | | | |
| Density (kg/m ³) | 2,510 | 2,930 | 2,967 | 2,790 |
| f _{cm,cube} (MPa) | 56.4 | 76.4 | 73.9 | 65 |
| f _{ctm} (MPa) | 4.5 | 5.65 | 5.37 | 4.65 |
| E _{cm} (GPa) | 38.5 | 49.5 | 49.2 | 45.5 |

González-Ortega และคณะ (2019) ได้ศึกษาโดยการใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นวัสดุมวลรวมหยาบเพื่อประเมินเสถียรภาพ ความทนทาน และการปนเปื้อนของคอนกรีต เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบเป็นหินปูนและแร่แบไรต์ (Barite) ซึ่งแร่แบไรต์มีน้ำหนักที่ใกล้เคียงกับตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่มีน้ำหนักมาก โดยคุณสมบัติเบื้องต้นของมวลรวม แสดงอยู่ในตารางที่ 21 จากนั้นจะนำมาผลิตคอนกรีต การทดลองครั้งนี้ใช้ส่วนผสมทั้งหมด 12 ส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 22 โดย S คือซิลิกา L คือหินปูน และ EAF คือตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า จากนั้นจึงทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานเมื่อเป็นคอนกรีตสดและหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว หลังจากนั้นจะทดสอบการซึมผ่านของน้ำภายใต้แรงดันด้วยวิธีแบบอ้อม ทดสอบอุณหภูมิสูงต่ำสลับกัน และทดสอบสภาวะเปียกสลับแห้ง ก่อนที่จะนำไปทดสอบอิทธิพลของสภาพแวดล้อมที่ส่งผลกับคอนกรีตเพื่อประเมินความทนทานเป็นระยะเวลา 3 ปี โดยจะแยกการทดสอบออกเป็น 2 ช่วง คือการทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตและคุณสมบัติด้านเสถียรภาพความทนทาน

ตารางที่ 21 คุณสมบัติเบื้องต้นของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย (González-Ortega และคณะ, 2019)

| Aggregate type | | Size (mm) | Density (kg/m ³) | Water absorption (%) | Abrasion (%) |
|---------------------|---------------|-----------|------------------------------|----------------------|--------------|
| Fine aggregate | Silica | 0-2 | 2,600 | 1.3 | - |
| | Limestone | 0-2 | 2,680 | 0.89 | - |
| EAF slag aggregate | Fine fraction | 0-6.3 | 3,310 | 2.47 | 20 |
| | Fine gravel | 6.3-12.5 | 3,570 | 0.81 | - |
| | Gravel | 12.5-20 | 3,530 | 1.18 | - |
| Limestone aggregate | Fine fraction | 0-4 | 2,690 | 0.9 | 30 |
| | Fine gravel | 4-10 | 2,640 | 0.74 | - |
| | Gravel | 10-20 | 2,600 | 0.91 | - |
| Barite aggregate | - | 0-20 | 4,410 | 0.3 | 40 |

ตารางที่ 22 ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย (González-Ortega และคณะ, 2019)

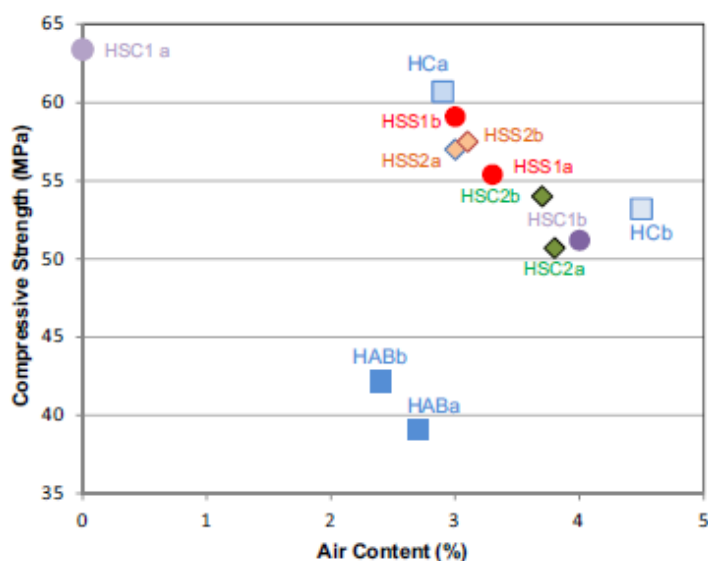
| Mix design | HSS1 | HSS2 | HSC1 | HSC2 | HC | HAB |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | a/b | a/b | a/b | a/b | a/b | a/b |
| Fine aggregate | 295 (S) | 295 (S) | 300 (L) | 300 (L) | - | - |
| | 1,130 (EAF) | 1,130 (EAF) | 1,130 (EAF) | 1,130 (EAF) | 1,003 (L) | - |
| Coarse aggregate | 136 (EAF) | 300 (EAF) | 136 (EAF) | 300 (EAF) | 165 (L) | - |
| | 831 (EAF) | 667 (EAF) | 831 (EAF) | 667 (EAF) | 773 (L) | - |
| Barite | - | - | - | - | - | 3,204 |
| Cement | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 |
| SP | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.83 |
| Water | 153/153 | 143/150 | 140/133 | 140/146 | 145/155 | 140/123 |
| PF | 1.93/2.75 | 1.93/2.75 | 1.93/2.75 | 1.93/2.75 | 1.93/1.93 | 1.93/1.93 |
| Total (kg/m ³) | 2,822/2,823 | 2,813/2,820 | 2,815/2,809 | 2,815/2,822 | 2,364/2,374 | 3,622/3,605 |

จากการทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตในตารางที่ 23 พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตจากหินปูนและแร่แบไรต์ เนื่องจากมีค่าการดูดซึมน้ำที่มากกว่า จากค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กมีความหนาแน่นมากกว่า คอนกรีตที่ใช้หินปูนประมาณ 20% แต่น้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้แร่แบไรต์ประมาณ 17% ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของมวลรวมแต่ละประเภท ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกัน ใน

ส่วนผสมของตะกรันเหล็กและหินปูน ส่วนแร่แบไรท์พบว่าได้กำลังอัดที่น้อยที่สุด ซึ่งน้อยกว่าส่วนผสมที่ใช้หินปูนประมาณ 38% เนื่องจากแร่แบไรท์มีน้ำหนักที่มากเมื่อเทียบกับเนื้อซีเมนต์ทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว และส่วนผสม HSC1a ให้กำลังอัดที่สูงที่สุด ถึงแม้ส่วนผสม HSC1b จะมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่น้อยกว่า แต่เนื่องจากมีปริมาณอากาศในคอนกรีตที่มาก จึงทำให้มีกำลังที่น้อยกว่าดังรูปที่ 28 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตและปริมาณโพรงอากาศ ส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงประเภทของมวลรวมอย่างมาก จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนและแร่แบไรท์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ 13% และ 66% ตามลำดับ ถึงแม้ตะกรันเหล็กจะมีความพรุนที่มากกว่าหินปูน แต่จากการทดสอบพบว่าตะกรันเหล็กมีความแข็งมากกว่าหินปูนถึง 40% ทำให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูน ส่วนแร่แบไรท์ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าส่วนผสมอื่นอย่างมากเป็นเพราะว่าช่วงรอยต่อในคอนกรีตที่ใช้แร่แบไรท์มีกำลังต่ำและผานกันไม่ดีเท่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กและหินปูน จากการนำไปทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope)

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต (González-Ortega และคณะ, 2019)

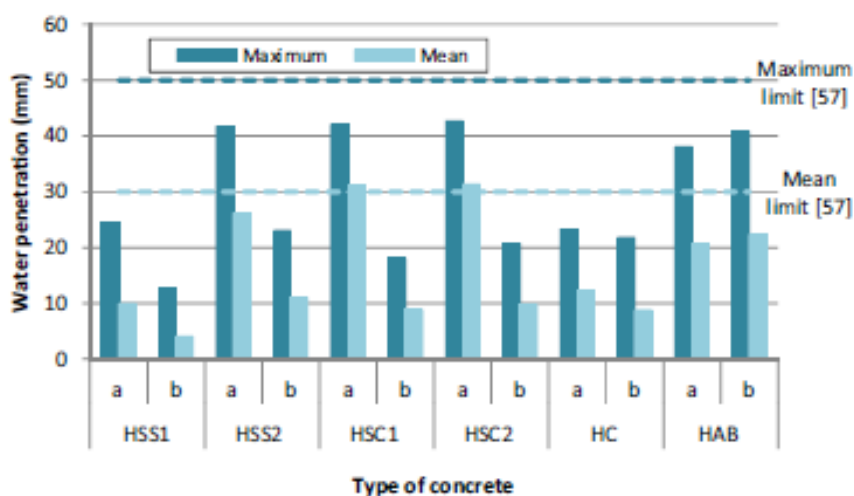
| Basic properties | HSS1 | HSS2 | HSC1 | HSC2 | HC | HAB |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | a/b | a/b | a/b | a/b | a/b | a/b |
| Workability (cm) | 2/2 | 2/1 | 0.5/5 | 6/4 | 3/7 | 9/9 |
| Air content (%) | 3.3/3 | 3/3.1 | 0/4 | 3.8/3.7 | 2.9/4.5 | 2.7/2.4 |
| Density (kg/m ³) | 2,853/2,869 | 2,851/2,863 | 2,872/2,819 | 2,799/2,737 | 2,388/2,350 | 3,420/3,418 |
| Compressive Strength (MPa) | 55.4/59.1 | 57/57.5 | 63.1/51.2 | 50.7/54 | 60.7/53.2 | 39.1/42.2 |
| Elastic modulus (GPa) | 43.1/46.1 | 43.7/45.2 | 48.3/43.1 | 43.2/44.9 | 40.9/38.2 | 26/27.8 |



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและปริมาณอากาศในเนื้อคอนกรีต (González-Ortega และคณะ, 2019)

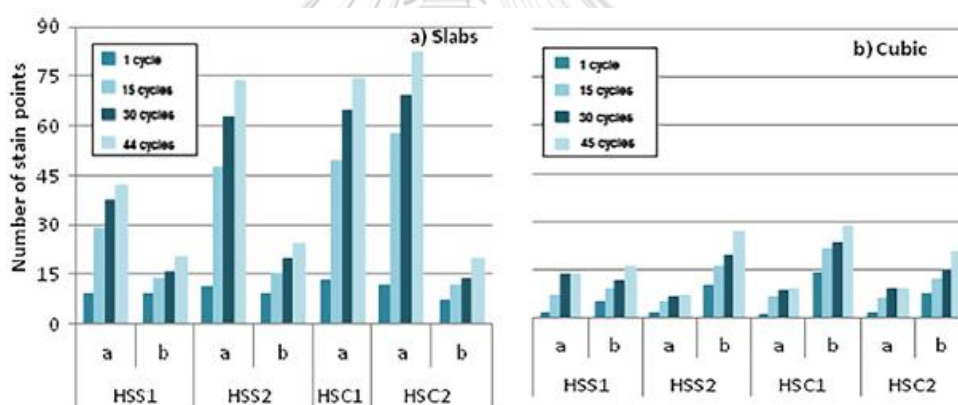
หลังจากนั้นจึงทดสอบคุณสมบัติด้านเสถียรภาพและความทนทาน จากการทดสอบการซึมผ่านของน้ำภายใต้แรงดัน ซึ่งผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 29 พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนมีค่าการซึมผ่านของน้ำภายใต้แรงดันน้อยที่สุดและคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กมีค่าการซึมผ่านของน้ำภายใต้แรงดันมากที่สุด เนื่องจากอนุภาคของตะกรันเหล็กที่มีลักษณะพรุน และถึงแม้แร่แบไรท์จะมีความพรุนที่น้อย แต่ด้วยคุณภาพบริเวณรอยต่อที่ต่ำ จึงทำให้การซึมผ่านของน้ำมีค่าใกล้เคียงกับตะกรันเหล็กที่มีอนุภาคพรุน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

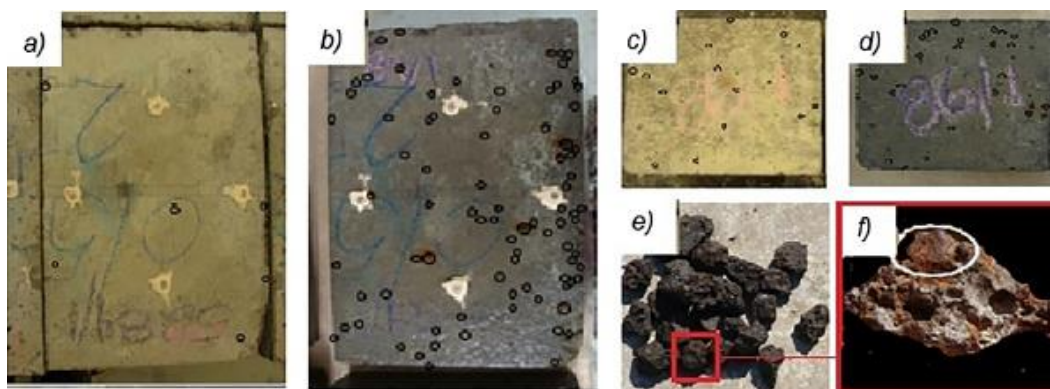


รูปที่ 29 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำภายใต้แรงดันในแต่ละส่วนผสม (González-Ortega และคณะ, 2019)

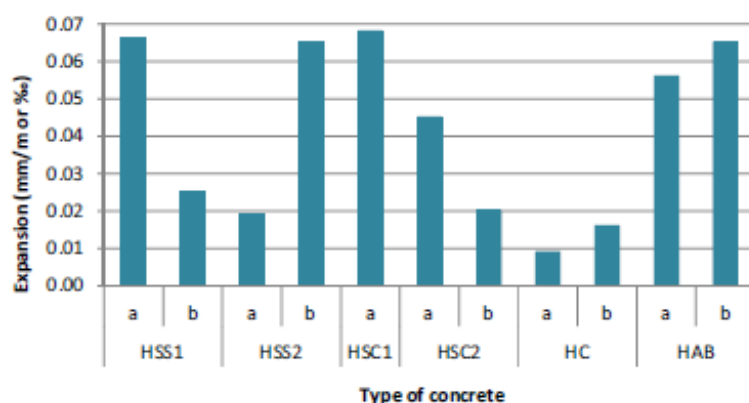
จากการทดสอบคอนกรีตในสภาวะเปียกสลับแห้งโดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตแผ่นและตัวอย่างทรงลูกบาศก์ได้ผลดังในรูปที่ 30 จะแสดงผลเป็นจำนวนคราบที่ขึ้นบนตัวอย่าง ซึ่งเกิดจากตะกรันเหล็ก โดยอนุภาคเหล็กที่สึกกร่อนของตะกรันเหล็กจะเคลื่อนย้ายมาอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างคอนกรีต ทำให้มีจุดคราบหลายจุดบริเวณตัวอย่าง ดังแสดงในรูป 31 แสดงจำนวนจุดคราบของตัวอย่างคอนกรีตแบบแผ่น (a และ b) และทรงลูกบาศก์ (c และ d) รวมไปถึงคราบที่เกิดขึ้นบนอนุภาคของตะกรันเหล็ก (e และ f) ซึ่งคราบเหล่านี้ไม่เกิดกับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หินปูนและแร่แบไรท์ อาจทำให้ไม่เหมาะกับโครงสร้างที่ต้องการความสวยงาม โดยจะขึ้นอยู่กับความแปรปรวนของความชื้น และได้วัดหาการขยายตัวของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนมีการขยายตัวเฉลี่ยประมาณ 0.012% คอนกรีตที่ใช้แร่แบไรท์มีการขยายตัวเฉลี่ยประมาณ 0.06% และคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กมีการขยายตัวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.019% ถึง 0.068% โดยการขยายตัวของแต่ละส่วนผสมจะแสดงในรูปที่ 32 ซึ่งเป็นการขยายตัวที่เกิดจากการผ่านสภาวะเปียกสลับแห้งระหว่าง 15 ถึง 44 รอบ



รูปที่ 30 จำนวนรอยคราบที่เกิดขึ้นบนตัวอย่าง (González-Ortega และคณะ, 2019)

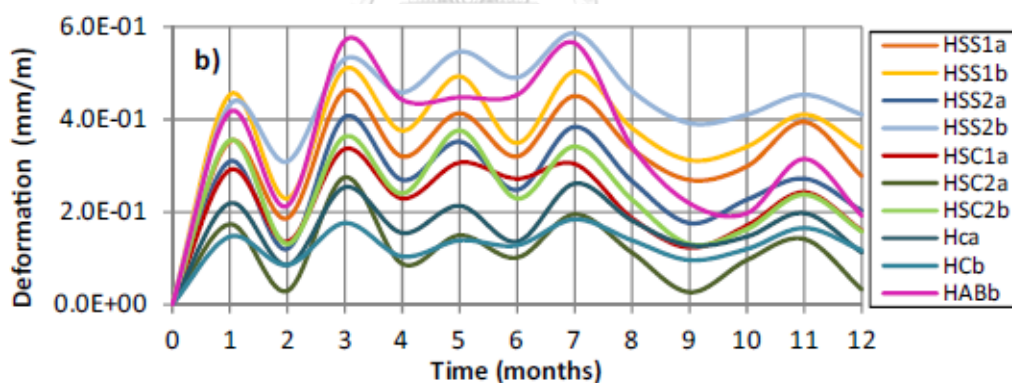


รูปที่ 31 รอยคราบที่เกิดขึ้นบนตัวอย่าง (González-Ortega และคณะ, 2019)



รูปที่ 32 การขยายตัวในตัวอย่างคอนกรีตแต่ละส่วนผสม (González-Ortega และคณะ, 2019)

หลังจากได้ทดสอบสถานะเปียกสลับแห้งแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำมาประเมินเสถียรภาพภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปิดโล่ง พบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเกิดการขยายตัวมากกว่าคอนกรีตทั่วไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 33 และจากการทดสอบความทนทานต่ออนุมูลสูงต่ำสลับกันพบว่า คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กได้ผลเหมือนกับคอนกรีตทั่วไปและไม่มีสัญญาณการเกิดรอยร้าว ส่วนคอนกรีตแบบไรท์พบว่าเกิดรอยร้าวขนาดเล็กขึ้น



รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างคอนกรีตต่อระยะเวลาการทดสอบ (González-Ortega และคณะ, 2019)

Faleschini และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาการใช้ตะกรันเหล็กผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูง โดยใช้พื้นฐานจากงานวิจัยที่ผ่านมา คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติของโครงสร้างระดับจุลภาคและการใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นมวลรวมในการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงจะถูกทดลอง รวมไปถึงการประเมินผลของคลอไรด์ (Chloride) ในเนื้อคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาความรู้เกี่ยวกับตะกรันเหล็ก ความทนทาน และโดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตสมรรถนะสูงที่ใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นวัสดุมวลรวม และทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและกำลัง

รับแรงดึง โมดูลัสยืดหยุ่น ความทนทาน และการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยจะเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้หินกรวดเป็นวัสดุมวลรวม และสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคในคอนกรีตแต่ละประเภท ซึ่งจะถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยสมบัติทางกายภาพของมวลรวมและส่วนผสมที่ใช้แสดงในตารางที่ 24 และ 25ตามลำดับและจะออกแบบกำลังคอนกรีตไว้ที่ 50 MPa – 60 MPa

ตารางที่ 24 คุณสมบัติของมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย (Faleschini และคณะ, 2015)

| Aggregate properties | EAf slag | NA sand | NA gravel |
|---------------------------------------|---------------|----------|-----------|
| Size (mm) | 4-16 | 0-4 | 4-16 |
| Apparent density (kg/m ³) | 3,854 | 2,704 | 2,700 |
| Water absorption | 0.95 | 1.18 | 1.04 |
| Shape | Sharp-pointed | Roundish | Roundish |
| Los angeles loss (%) | <20 | - | 18 |

ตารางที่ 25 ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย (Faleschini และคณะ, 2015)

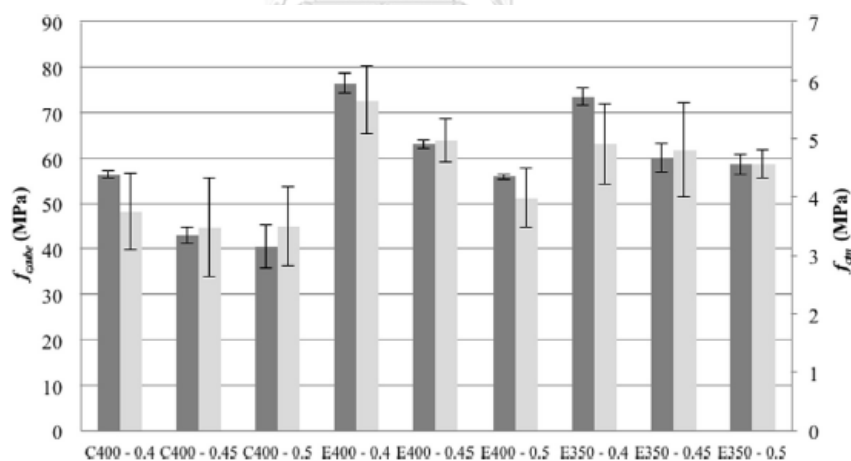
| Mix | w/c | Water (kg) | Cement (kg) | NA sand (kg) | NA gravel (kg) | EAf slag (kg) | WRA (%) |
|------------------------|------|------------|-------------|--------------|----------------|---------------|---------|
| Conventional concretes | | | | | | | |
| C400-0.4 | 0.4 | 160 | 400 | 836 | 1,020 | - | 1.2 |
| C400-0.45 | 0.45 | 180 | 400 | 812 | 992 | - | 1 |
| C400-0.5 | 0.5 | 200 | 400 | 789 | 963 | - | 0.8 |
| EAf-concretes | | | | | | | |
| E400-0.4 | 0.4 | 160 | 400 | 1,020 | - | 1,190 | 1.45 |
| E400-0.45 | 0.45 | 180 | 400 | 994 | - | 1,148 | 1.2 |
| E400-0.5 | 0.5 | 200 | 400 | 965 | - | 1,115 | 1 |
| E350-0.4 | 0.4 | 140 | 350 | 1,067 | - | 1,245 | 1.2 |
| E350-0.45 | 0.45 | 157.5 | 350 | 1,029 | - | 1,200 | 1 |
| E350-0.5 | 0.5 | 175 | 350 | 1,014 | - | 1,171 | 0.8 |

หลังจากการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีต ได้ผลดังตารางที่ 26 ซึ่งแสดงผลการวัดความหนาแน่นของคอนกรีต ค่าการยุบตัว กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้หินกรวดในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กมีค่ามากกว่าส่วนผสมที่ใช้หินกรวดทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 ก็ตาม รูปที่ 34 แสดงกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต โดยแต่ละส่วนผสมจะทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง ซึ่งกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อทดแทนตะกรันเหล็กแทนหินกรวด เนื่องจากผิวที่หยาบและขรุขระ อนุภาคมีความพรุนทำให้ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและเนื้อซีเมนต์ให้ดีขึ้น ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กก็ถูกพัฒนาด้วยเช่นกัน เนื่องจากกำลังและความหนาแน่นของอนุภาคของตะกรันเหล็กที่มากกว่าเมื่อเทียบกับหินกรวด

ผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นวัสดุมวลรวม สามารถพัฒนากำลังและความทนทานของคอนกรีตโดยไม่ใช้สารผสมเพิ่มและใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูงมากกว่า 0.4 ส่วนกำลังอัด กำลังรับแรงดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากรูปร่างและพื้นผิวของตะกรันเหล็กมีความสำคัญในการช่วย พัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์มากกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในงานคอนกรีต โดยเฉพาะงานที่ต้องใช้คอนกรีตความหนาแน่นสูง

ตารางที่ 26 คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว
(Faleschini และคณะ, 2015)

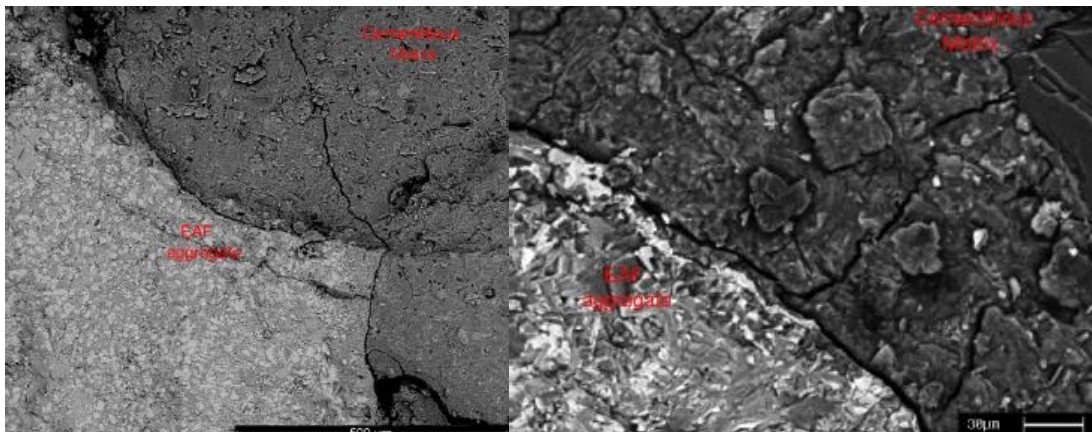
| Mix | Fresh concrete | | Harddened concrete | | | |
|------------------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| | Density (kg/m ³) | Slump (cm) | Density (kg/m ³) | $f_{cm,cube}$ (MPa) | f_{ctm} (MPa) | E_{cm} (GPa) |
| Conventional concretes | | | | | | |
| C400-0.4 | 2,447 | 21 | 2,466 | 56.39 | 3.75 | 40.01 |
| C400-0.45 | 2,388 | 18 | 2,369 | 42.86 | 3.47 | 31.55 |
| C400-0.5 | 2,394 | 21 | 2,394 | 40.55 | 3.49 | 33.95 |
| EAF-concretes | | | | | | |
| E400-0.4 | 2,835 | 17 | 2,833 | 76.43 | 5.65 | 49.5 |
| E400-0.45 | 2,795 | 21 | 2,850 | 63.07 | 4.98 | 48.42 |
| E400-0.5 | 2,751 | 21 | 2,733 | 55.89 | 3.99 | 45.31 |
| E350-0.4 | 2,846 | 17 | 2,854 | 73.44 | 4.91 | 49.29 |
| E350-0.45 | 2,758 | 18 | 2,765 | 60.16 | 4.81 | 48.42 |
| E350-0.5 | 2,751 | 21 | 2,767 | 58.68 | 4.56 | 47.81 |



รูปที่ 34 กำลังรับแรงอัด (แกนตั้งฝั่งซ้าย) และกำลังรับแรงดึง (แกนตั้งฝั่งขวา) ของคอนกรีตแต่ละส่วนผสม (Faleschini และคณะ, 2015)

หลังจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หินปูน การวิบัติจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและเนื้อซีเมนต์ในทุกส่วนผสม แต่ในคอนกรีตที่ใช้ตะกั่วเหล็ก พบว่าส่วนใหญ่คอนกรีตจะวิบัติที่เนื้อซีเมนต์ไม่ใช่มวลรวมและบางตัวอย่างวิบัติที่บริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและเนื้อซีเมนต์ ดังในรูปที่ 35 ซึ่งแสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่

นำมาใช้วิเคราะห์การวิบัติของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ จึงสามารถกล่าวได้ว่า ตะกรันเหล็กช่วยพัฒนาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและเนื้อซีเมนต์ อีกทั้งตะกรันเหล็กมีคุณสมบัติทางกลที่ดีมากกว่าเมื่อเทียบกับหินปูน จากการทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ พบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กได้ผลไม่ต่างจากคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ



รูปที่ 35 การวิบัติของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ (Faleschini และคณะ, 2015)

(Pellegrino et al., 2013) การศึกษาครั้งนี้มี 5 ส่วนผสมที่ใช้มวลรวมรีไซเคิลและ 1 ส่วนผสมที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ถูกผลิตขึ้นโดยมีจุดประสงค์ในการศึกษาอย่างละเอียดในด้านคุณสมบัติทางกลและเคมี รวมไปถึงมุมมองด้านความมั่นคงทนทาน และความเป็นไปได้ในการใช้มวลรวมรีไซเคิลแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติ และหาอัตราส่วนปริมาณในการทดแทนที่เหมาะสมที่สุด โดยคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพหลัก เช่นกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต รวมไปถึงกราฟขนาดคละของฟูลเลอร์ (Fuller's ideal grading curve) ก็จะถูกวิเคราะห์และทดสอบด้วยเช่นกัน การทดสอบความทนทานเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของส่วนผสมคอนกรีตเมื่อสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่อันตรายเช่นน้ำค้างแข็งและความชื้น เมื่อต้องเผชิญสภาพแวดล้อมแบบเปิดโล่ง อีกทั้งการวิเคราะห์ทางเคมีและโครงสร้างระดับจุลภาคจะถูกวิเคราะห์

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ายิ่งอัตราการทดแทนของตะกรันเหล็กมีมาก ความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตจะมากขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางกลับกันเมื่อทดแทนตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมละเอียด คุณสมบัติของคอนกรีตจะดีขึ้นต่อเมื่อทดแทนในอัตราส่วนที่น้อยเท่านั้น และจากการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในตะกรันเหล็กมีปริมาณจำกัด ซึ่งสามารถปรับสภาพก่อนนำไปใช้และไม่ได้จำกัดความสามารถด้านความทนทานของคอนกรีตเนื่องจากตะกรันเหล็กมีเสถียรภาพในโครงสร้าง การใส่ตะกรันเหล็กมีผลกระทบ

เชิงลบต่อความสามารถในการทำงานของคอนกรีตเมื่อใช้ทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติในอัตราส่วนที่สูงเกิน 50% นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของความถ่วงจำเพาะในคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กทดแทนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบช่วยเพิ่มกำลังอัดและกำลังรับแรงดึงรวมไปถึงโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ ในทางกลับกันผลของการทดแทนตะกรันเหล็กในวัสดุมวลรวมละเอียด พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงประมาณ 7% เมื่อเทียบกับการใช้มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ และเมื่อทดสอบถึงอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กมีผลคล้ายกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ การทดสอบกำลังอัดพบว่า คอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมละเอียด จะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นประมาณ 2% เท่านั้น แต่เมื่อใช้ตะกรันเหล็กทดแทนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบกลับทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นถึง 8% ซึ่งมากกว่าการทดแทนเป็นวัสดุมวลรวมละเอียด ทั้งส่วนผสมทั่วไปและส่วนผสมที่ใช้ตะกรันเหล็กพบว่ามีกำลังต่ำลงเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแห้งและเปียกสลับกัน ซึ่งส่วนผสมที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติกำลังจะลดลงประมาณ 15% และคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กกำลังจะลดลงประมาณ 22% โครงสร้างผลึกของตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่ามีโครงสร้างทางแร่ที่มีความซับซ้อน ซึ่งดูเหมือนว่าจะช่วยปรับปรุงด้านเสถียรภาพของวัสดุ นอกจากนี้ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเกี่ยวกับโครงสร้างทางเคมีและแร่วิทยาในตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบความทนทานของคอนกรีต

บทที่ 3

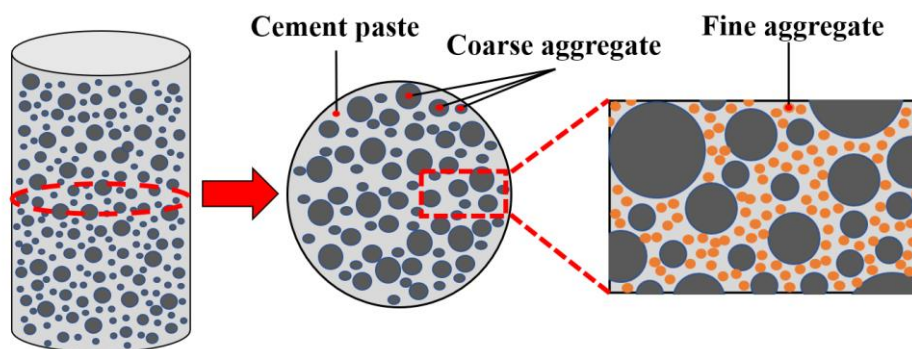
ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

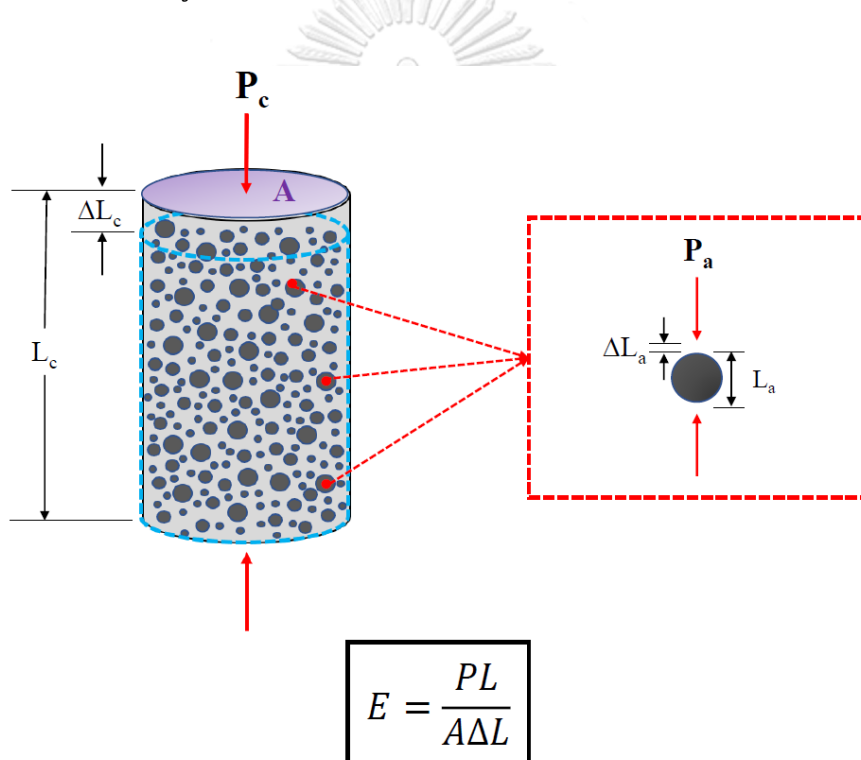
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของงานวิจัยที่ได้ศึกษาจากบทก่อนหน้า สามารถสรุปได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสามารถพัฒนาให้สูงขึ้นได้ โดยขึ้นอยู่กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้เป็นหลัก ทั้งซีเมนต์เพสต์ วัสดุมวลรวมละเอียดและวัสดุมวลรวมหยาบ โดยวัสดุมวลรวมหยาบเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมากที่สุด ไม่ว่าจะเป็น ประเภท ขนาดคละ หรือ ปริมาตรของมวลรวมหยาบที่ใช้ในส่วนผสม เนื่องจากวัสดุมวลรวมหยาบมีปริมาตรในส่วนผสมเยอะ และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าทั้งซีเมนต์เพสต์และวัสดุมวลรวมละเอียด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุมวลรวมหยาบจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ก็ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตด้วยเช่นกัน เนื่องจากการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะทำให้ปริมาณโพรงอากาศในเนื้อคอนกรีตลดลง ทำให้มีเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่แข็งแรงขึ้นในการยึดอนุภาคมวลรวมเข้าด้วยกัน รวมไปถึงอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม การใช้อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมที่เหมาะสมจะทำให้มีอนุภาคมวลรวมขนาดเล็กไปเติมในช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมหยาบ ส่งผลให้แรงที่กระทำต่อคอนกรีตสามารถส่งผ่านมวลรวมในเนื้อคอนกรีตได้อย่างต่อเนื่อง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจึงถูกพัฒนา ดังที่แสดงในรูปที่ 36 ซึ่งแสดงแบบจำลองวัสดุในเนื้อคอนกรีต จะเห็นได้ว่าในเนื้อคอนกรีตนั้น จะประกอบด้วยมวลรวมหยาบหลายขนาดและมีวัสดุมวลรวมละเอียดทำหน้าที่เติมเต็มช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบ ส่วนซีเมนต์เพสต์จะทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคมวลรวมเข้าด้วยกันให้เป็นเนื้อเดียว

จากรูปที่ 37 ซึ่งแสดงแบบจำลองของวัสดุมวลรวมหยาบภายใต้แรงกระทำ จะเห็นว่าเมื่อมีแรงกระทำต่อคอนกรีต วัสดุมวลรวมหยาบจะทำหน้าที่รับและส่งต่อแรงภายในเนื้อคอนกรีตเป็นหลัก เนื่องจากวัสดุมวลรวมหยาบนั้นมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าซีเมนต์เพสต์และทราย ขนาดคละของมวลรวมหยาบก็ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเช่นเดียวกัน เมื่อใช้ขนาดคละของมวลรวมหยาบที่อัดแน่นกันมากขึ้น ช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบจะลดลง ทำให้แรงที่กระทำสามารถส่งผ่านระหว่างมวลรวมหยาบได้อย่างต่อเนื่องและมีปริมาตรของมวลรวมหยาบที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในส่วนผสมมากขึ้น จะทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย รวมไปถึงปริมาตรซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการในส่วนผสมก็จะลดลงด้วยเช่นกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะทำการพัฒนาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตโดยมุ่งเน้นการปรับเปลี่ยนประเภทและขนาดคละของมวลรวมเป็นหลัก รวมไปถึงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดก็จะถูกปรับปรุงให้เหมาะสมด้วยเช่นกัน



รูปที่ 36 แบบจำลองโครงสร้างภายในเนื้อคอนกรีต



รูปที่ 37 แบบจำลองวัสดุรวมหยาบในคอนกรีตภายใต้แรงกระทำ

3.2 วัสดุรวมรวม

การวิจัยจะศึกษาและพัฒนาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยการใช้หินบะซอลต์และตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นวัสดุรวมรวมหยาบเพื่อทดแทนและเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้หินปูน การศึกษานี้จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน ที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C150 ในรูปที่ 38 แสดงวัสดุรวมรวมที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ทหยา

แม่น้ำใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียด โดยมีขนาดอนุภาคไม่เกิน 4.75 มม. หินปูนใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบในส่วนผสมตั้งต้น เพื่อเปรียบเทียบกับหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า โดยหินปูนที่ใช้ในการศึกษาจะมีขนาดอนุภาคระหว่าง 6.3 - 19 มม. หินบะซอลต์ที่ใช้นำมาจากโรงโม่หินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 2 แหล่ง มีสีเทาและดำ รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ขนาดอนุภาคระหว่าง 9.5 - 19 มม. และตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้า นำมาจากโรงหลอมเหล็กในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีสีเทาและดำ รูปร่างไม่สม่ำเสมอ ลักษณะมีรูพรุนเล็กน้อย ขนาดอนุภาคระหว่าง 9.5 - 19 มม. และตารางที่ 27 จะแสดงมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบวัสดุมวลรวมและคอนกรีต การศึกษานี้จะใช้สารลดน้ำพิเศษโพลีคาร์บอกซิเลต (Polycarboxylate) ในส่วนผสม เพื่อช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการเทได้ดีขึ้นและช่วยลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต



รูปที่ 38 วัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 27 มาตรฐานการทดสอบคอนกรีตและวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย

| คุณสมบัติที่ทดสอบ | มาตรฐานการทดสอบ |
|-----------------------------|-----------------|
| ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ | ASTM C127 |
| ความหนาแน่นของมวลรวมหยาบ | ASTM C29 |
| การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ | ASTM C127 |
| การผลิตและการบ่มคอนกรีต | ASTM C192 |
| ขนาดผลของมวลรวม | ASTM C136 |
| การยุบตัวของคอนกรีต | ASTM C143 |
| กำลังอัดของคอนกรีต | ASTM C39 |
| โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต | ASTM C469 |

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม ซึ่งแสดงในตารางที่ 28 พบว่าตะกรันเหล็กมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีตมากที่สุด เนื่องจากมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงมากที่สุดถึง 3.43 รองลงมาเป็นหินบะซอลต์ทั้งสองแหล่ง ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.78 และ 2.62 สุดท้ายคือหินปูนที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.7 ส่วนทรายแม่น้ำที่ใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.57 ค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงส่งผลให้ตะกรันเหล็กมีความหนาแน่นมากที่สุดถึง 2,101 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติที่มีค่าความหนาแน่นเพียง 1,600 ถึง 1,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเท่านั้น และตะกรันเหล็กยังมีการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งมีค่าเพียง 0.39% และผลการทดสอบคุณสมบัติของหินบะซอลต์ พบว่าหินบะซอลต์ทั้ง 2 แหล่ง มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน แต่หินบะซอลต์จากแหล่ง YL มีคุณสมบัติที่ดีกว่าหินบะซอลต์จากแหล่ง SR เล็กน้อย โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นที่มากกว่า รวมไปถึงมีการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่า ในการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกใช้หินบะซอลต์จากแหล่ง YL มาผลิตคอนกรีต

ตารางที่ 28 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย

| Physical properties | EAFF Slag | Basalt YL | Basalt SR | Limestone | River sand |
|------------------------------|-----------|--------------|--------------|-----------|------------|
| Size (mm) | 9.5 - 19 | 9.5 - 25 | 9.5 - 25 | 6.3 - 19 | < 4.75 |
| Specific gravity | 3.43 | 2.78 | 2.62 | 2.7 | 2.57 |
| Density (kg/m ³) | 2,101.18 | 1,657.26 | 1,625.49 | 1,621 | 1,664 |
| Water Absorbion (%) | 0.39 | 1.33 | 1.58 | 0.6 | 0.72 |
| Shape | Irregular | Angular | Angular | Angular | Roundish |

3.3 การผลิตตัวอย่างคอนกรีต

การผลิตคอนกรีตที่ใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษานี้จะผสมตามมาตรฐาน ASTM C192 โดยการผสมจะใส่ ปูนซีเมนต์ ทราย และหินลงในโม เพื่อผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นจึงเติมน้ำที่ผสมสารลดน้ำพิเศษลงไปเพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้และเริ่มจับเวลา 3 นาที พัก 3 นาที เพื่อตรวจสอบว่ามีส่วนผสมติดตามขอบโมหรือเครื่องผสมมีปัญหาหรือไม่ เนื่องจากมวลรวมหยาบที่ใช้มีความแข็งและหนักกว่าหินปูนมาก ก่อนจะผสมต่ออีก 2 นาที โดยก่อนที่จะเริ่มผสม มวลรวมทั้งหมดจะอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) เมื่อผสมเสร็จ คอนกรีตสดจะถูกทดสอบหาค่าการยุบตัวตามมาตรฐาน ASTM C143 หลังจากนั้นจะนำไปเข้าแบบหล่อและคลุมผิวคอนกรีตด้วยพลาสติกใสบริเวณส่วนที่สัมผัสอากาศ เพื่อรักษาความชื้นของตัวอย่าง โดยรูปที่ 39 จะแสดงตัวอย่างหลังเข้าแบบ หลังจากนั้น 24 ชม. ตัวอย่างจะถูกถอดแบบและนำไปบ่มในห้องบ่ม โดยจะควบคุมระดับความชื้นไว้ที่ 100% และใช้อุณหภูมิห้องในการบ่ม จนกว่าจะถึงเวลาทดสอบ



รูปที่ 39 ตัวอย่างคอนกรีตหลังผสมเสร็จ

3.4 ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

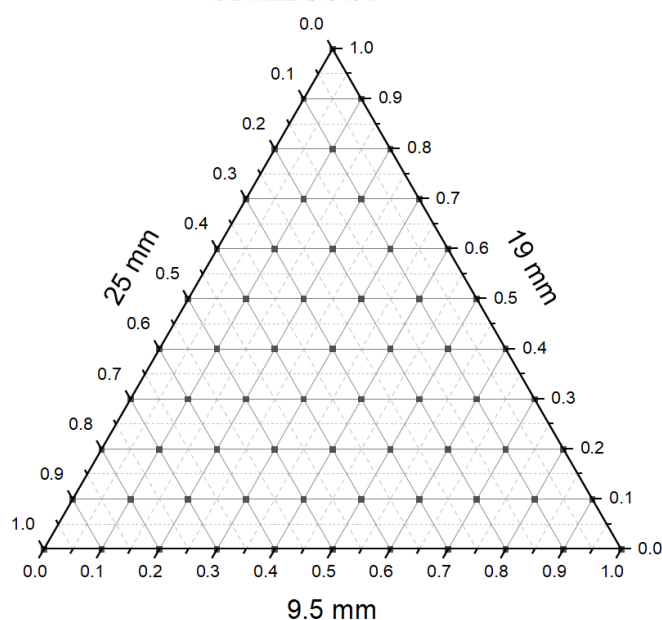
3.4.1 ประเภทของวัสดุมวลรวมหยาบ

ในการศึกษานี้จะใช้หินบะซอลต์และตะกรันเหล็กเพื่อทดแทนหินปูนในการผลิตคอนกรีต โดยจะทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบ ทั้งค่าการยุบตัว หน่วยน้ำหนัก กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยจะทดสอบคอนกรีตที่อายุ 14 วัน และ 28 วัน วัสดุหินปูน หินบะซอลต์และตะกรันเหล็กจะถูกใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบในปริมาณที่เท่ากัน และใช้ทรายแม่น้ำเป็นวัสดุมวลรวมละเอียด กำหนดให้อัตราส่วนปูนซีเมนต์และน้ำเท่ากัน หรือกล่าวได้ว่ามอร์ตาร์จะถูกควบคุมให้เหมือนกันในทุกส่วนผสม สารลดน้ำพิเศษจะถูกใช้เพื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อเพิ่มกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต รวมไปถึงเพิ่มค่าการยุบตัวของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้มากขึ้น

3.4.2 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมหยาบ

เนื่องจากมวลรวมที่ใช้มีขนาดคละที่ต่างกัน การหาขนาดคละที่เหมาะสมนั้นจึงมีความจำเป็น โดยจะช่วยลดช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบในเนื้อคอนกรีต ด้วยการให้อนุภาคขนาดเล็กไปเติมในช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุด ลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ต้องการในส่วนผสมและปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่การลดต้นทุนในการก่อสร้าง การทดลองจึงถูกออกแบบโดยการใช้ถังเหล็กขนาดความจุ 7 ลิตร นำมาใส่มวลรวมหยาบแล้วอัดแน่นโดยการกระทุ้งด้วยแท่งเหล็ก 3 ชั้น ก่อนจะนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อทดลองหาน้ำหนักมากที่สุดที่มวลรวมหยาบสามารถอัดเข้าไปได้ มวลรวมหยาบที่ใช้ทดสอบทั้งหมดจะถูกนำไปเข้าตู้อบเป็นเวลา 24 ชม. ก่อนจะ

นำมาทดสอบ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักเนื่องจากปริมาณน้ำในมวลรวม และจะทำการทดลองโดยใช้มวลรวมหยาบ 3 ขนาด คือ ขนาด 9.5 มม. 19 มม. และ 25 มม. หลังจากนั้นจะปรับเปลี่ยนปริมาตรของมวลรวมแต่ละขนาด คละกันโดยเพิ่มลดครั้งละ 10% ของปริมาตรมวลรวมหยาบ ซึ่งแบบทดลองการคละทั้งหมด 66 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 40 จะถูกทดลอง โดยแต่ละแบบจะทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะถูกนำมาวาดเส้นระดับในกราฟสามเหลี่ยม ซึ่งจะแสดงปริมาตรของมวลรวมแต่ละขนาดต่อปริมาตรของมวลรวมทั้งหมดในส่วนผสม และทั้ง 3 ด้านของกราฟจะแสดงขนาดอนุภาคของมวลรวมทั้ง 3 ขนาด ซึ่งหลังจากได้เส้นระดับของกราฟ จะสามารถหาจุดที่มวลรวมสามารถอัดแน่นได้มากที่สุด



รูปที่ 40 รูปแบบการทดลองหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุด

3.4.3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

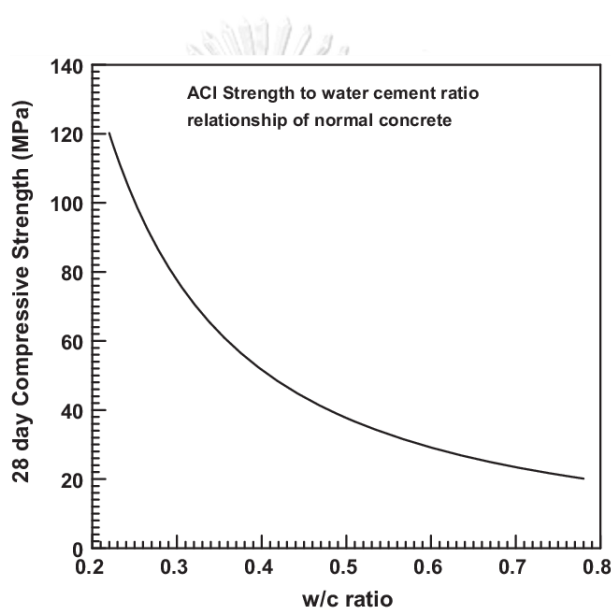
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อกำลังของคอนกรีต เมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงจะทำให้กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่น้อยลงจะช่วยลดปริมาณโพรงอากาศในเนื้อคอนกรีต ในรูปที่ 41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคอนกรีตทั่วไปและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ซึ่งจะเห็นว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แปรผกผันกับกำลังของคอนกรีต จากสมการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ ACI ดังแสดงในสมการที่ 3.1 พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังของคอนกรีตจะทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงสามารถกล่าวได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั้นแปรผกผันกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเช่นเดียวกับกำลังอัดของคอนกรีต

ในการศึกษานี้จึงได้พัฒนาคอนกรีตโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในคอนกรีต เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไป ทั้งกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต รวมไปถึงค่าการยุบตัวและหน่วยน้ำหนักก็จะถูกทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับเช่นกัน

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (3.1)$$

เมื่อ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)

f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)



รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตทั่วไปที่อายุ 28 วัน

3.4.4 อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า สัดส่วนของวัสดุมวลรวมละเอียดในส่วนผสมก็ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตด้วยเช่นกัน การใช้สัดส่วนมวลรวมละเอียดที่เหมาะสมจะช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุมวลรวมหยาบ ทำให้มวลรวมอัดแน่นกันมากขึ้น การส่งผ่านของแรงในเนื้อคอนกรีตจึงต่อเนื่องยิ่งขึ้น ดังนั้นในการศึกษานี้ จะทำการวิเคราะห์อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม โดยจะทำการทดลองเพิ่มอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมในส่วนผสม เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตเมื่อส่วนผสมมีอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมที่ต่างกัน โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าการยุบตัว กำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่คอนกรีตอายุ 14 วัน

จากตัวแปรทั้งหมดที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ดังที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้ออกแบบส่วนผสมโดยการปรับตัวแปรและจะเปรียบเทียบโดยใช้ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยตารางที่ 29 จะแสดงส่วนผสมทั้งหมดที่ใช้ในการพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง เพื่อให้ได้ค่าที่สูงที่สุด ก่อนจะนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงมากเป็นพิเศษต่อไป

ตารางที่ 29 ส่วนผสมและตัวแปรที่ใช้เปรียบเทียบทั้งหมดในงานวิจัย

| ลำดับ | ชื่อส่วนผสม | ตัวแปรที่ใช้เปรียบเทียบ |
|-------|----------------------|---|
| 1 | BS-01,BS-02 | ขนาดผลของมวลรวมหยาบ |
| 2 | BS-03,BS-04 | อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ |
| 3 | BS-01,BS-05 | อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ |
| 4 | LS-01,BS-05,EAF-01 | ประเภทของมวลรวมหยาบ |
| 5 | EAF-01,EAF-02 | อัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม |
| 6 | EAF-03,EAF-04 | ขนาดผลของมวลรวมหยาบ |
| 7 | EAF-01,EAF-05,EAF-06 | อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และยี่ห้อน้ำซีเมนต์ |

3.5 การทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ในการศึกษานี้จะประเมินกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอก ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. จะถูกหล่อขึ้นส่วนผสมละ 8 ตัวอย่าง ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง โดยก่อนจะทำการทดสอบ หน้าตัดรับแรงของตัวอย่างจะถูกปรับระดับให้เสมอกันโดยการใช้ก้ามถันเคลื่อนที่หน้าตัดตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 42 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469 โดยก่อนจะทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะการหดตัวของคอนกรีต (Compressometer) ไว้ที่ตัวอย่าง โดยที่อุปกรณ์จะมีหัววัดระยะการหดตัวของตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 43 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน



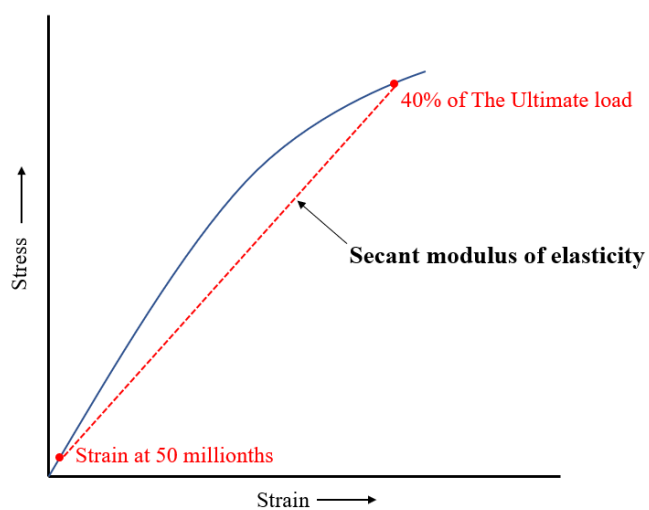
รูปที่ 42 ปรับระดับหน้าตัดรับแรงของตัวอย่างด้วยก้ามเขน



รูปที่ 43 การติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะการหดตัวของคอนกรีตเพื่อทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ โมดูลัสซีแคนท์ (Secant modulus) ดังที่แสดงในรูปที่ 44 ในการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ซึ่งหาได้จากการนำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบมาหาค่าความชันของกราฟจากจุดอ้างอิงทั้ง 2 จุด โดยจุดแรกคือจุดที่ความเครียดเท่ากับ 0.00005 หรือ 50 microstrain เพื่อลดความคลาดเคลื่อนเมื่อเริ่มให้แรงกระทำต่อตัวอย่างคอนกรีต และจุดที่ 2 คือจุดที่แรงกระทำเท่ากับ 40% ของแรงประลัย ซึ่งเป็นจุดก่อนที่กราฟจะเริ่มโค้ง โดยการหาโมดูลัสซีแคนท์จากทั้ง 2 จุดนี้ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C469 หลังจากนั้นจะทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ดังในแสดงรูปที่ 45 และ 46 ซึ่งแสดงการติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น



รูปที่ 44 โมดูลัสซีแคนท์ (Secant modulus)



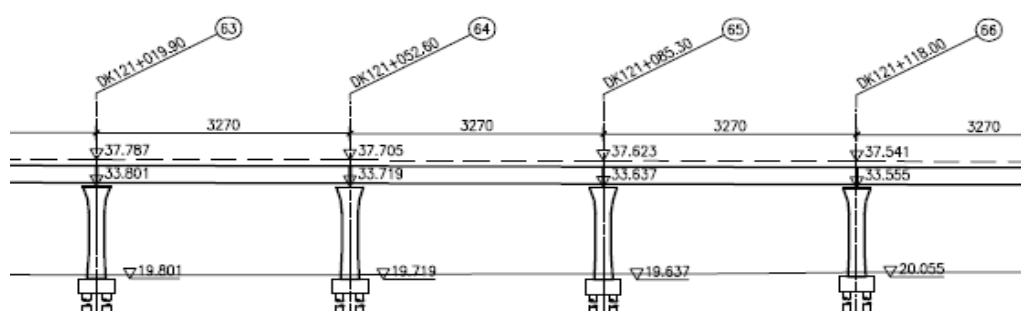
รูปที่ 45 การติดตั้งเครื่องมือวัดระยะการหดตัวของคอนกรีต



รูปที่ 46 การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

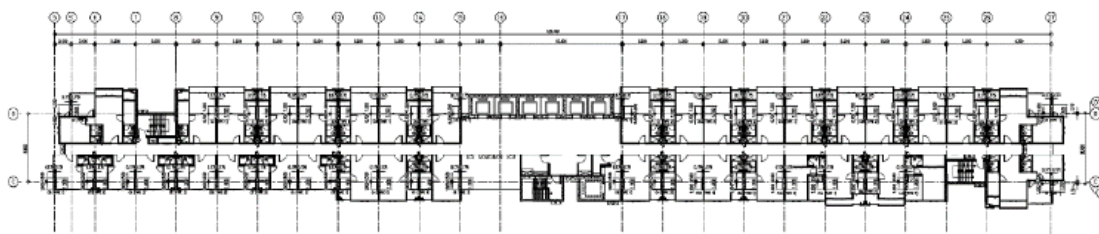
3.6 ประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง

ในการศึกษานี้ จะนำคอนกรีตที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุดที่ได้พัฒนาจากการทดลองก่อนหน้านี้ มาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างเสาต่อม่อโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูงเชื่อมโยงภูมิภาค ช่วงกรุงเทพมหานคร-นครราชสีมา โดยมีระยะทางรวมทั้งสิ้น 251 กม. ประกอบไปด้วยช่วงที่เป็นสะพานและช่วงที่เป็นพื้นถนน ซึ่งแบบผังสะพานแสดงในรูปที่ 47



รูปที่ 47 แบบผังสะพานโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค ช่วงกรุงเทพมหานคร-นครราชสีมา

หลังจากนั้นจะประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของอาคารสูง 42 ชั้น โดยแบบแปลนของอาคารจะแสดงในรูปที่ 48 ซึ่งทั้ง 2 โครงสร้างจะใช้แบบจำลองโครงสร้างในโปรแกรม SAP2000 และ ETABS เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและข้อได้เปรียบของการใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง



รูปที่ 48 แบบแปลนของอาคารตัวอย่าง

ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าการออกแบบทั้ง 2 โครงสร้างถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขเกี่ยวกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างมากกว่าเงื่อนไขด้านกำลัง ทำให้ต้องใช้ขนาดโครงสร้างที่ใหญ่กว่าปกติเพื่อควบคุมการเคลื่อนตัวให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจึงอาจเป็นประโยชน์กว่าการใช้คอนกรีตปกติ เมื่อต้องประยุกต์ใช้กับโครงสร้างเสาต่อม่อและผนังรับแรงเฉือน ซึ่งถือว่าเป็นโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงอย่างมาก

บทที่ 4

การพัฒนาคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

4.1 ขนาดคละอัดแน่น

จากการทดลองเพื่อหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุดของมวลรวมหยาบได้ผลดังตารางที่ 30 และกราฟเส้นระดับการอัดแน่นแสดงในรูปที่ 49 โดยแสดงเป็นสัดส่วนของมวลรวมหยาบต่อปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด จากการใช้มวลรวมหยาบขนาด 9.5 มม. 19 มม. และ 25 มม. จะสังเกตเห็นได้ว่า ปริมาตรมากที่สุดและน้อยที่สุดของมวลรวมหยาบที่อัดแน่นได้คือ 63% และ 52% ตามลำดับ และการใช้ขนาดของมวลรวมหยาบเพียงขนาดเดียวไม่ว่าจะเป็นขนาดเล็กหรือใหญ่ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมากกว่าการคละขนาด โดยการใช่มวลรวมขนาด 9.5 มม. เพียงขนาดเดียว ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมากที่สุด ประมาณ 48% เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กและใช้เพียงขนาดเดียว จะทำให้ขาดอนุภาคที่เล็กกว่าไปเติมในช่องว่าง และผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการคละขนาดของมวลรวมหยาบมีอิทธิพลต่อการอัดแน่นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากรูปร่างของอนุภาคมวลรวมมีเหลี่ยมมุม สามารถอัดแน่นได้ดีมากกว่าอนุภาคทรงกลมอยู่แล้ว การคละขนาดในการทดลองนี้จึงเห็นผลต่างน้อยกว่าการใช่มวลรวมที่มีอนุภาคเป็นทรงกลม อีกทั้งขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการวิจัยนั้น มีขนาดใกล้เคียงกันทำให้ไม่มีอนุภาคขนาดเล็กที่จะไปเติมในช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมขนาดใหญ่ได้เท่ากับการใช่มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน การวิจัยนี้จึงจะใช้หินบะชอลต์ขนาด 25 มม. สัดส่วน 60% ขนาด 19 มม. สัดส่วน 10% และขนาด 9.5 มม. สัดส่วน 30% ของปริมาตรมวลรวมหยาบทั้งหมด ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สามารถอัดแน่นได้ถึง 63% และใช้ตะกรันเหล็กขนาด 19 มม. สัดส่วน 60% และ 9.5 มม. สัดส่วน 40% ของปริมาตรมวลรวมหยาบทั้งหมด ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สามารถอัดแน่นได้ถึง 58% ดังแสดงในรูปที่ 50 และภาพการทดลองหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุดแสดงในรูปที่ 51

ตารางที่ 30 ผลการทดลองหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุด

| Volume of 9.5 mm (X-Axis) | Volume of 19 mm (Y-Axis) | Volume of 25 mm (Z-Axis) | Volume fraction |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 0 | 0 | 1 | 0.58 |
| 0.1 | 0 | 0.9 | 0.6 |
| 0.2 | 0 | 0.8 | 0.62 |
| 0.3 | 0 | 0.7 | 0.61 |

ตารางที่ 30 ผลการทดลองหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุด (ต่อ)

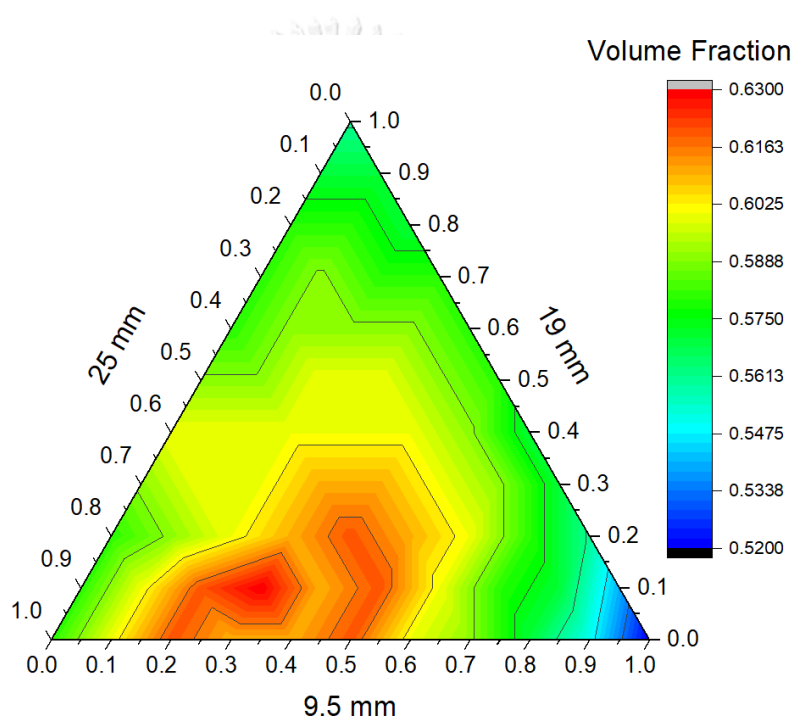
| Volume of 9.5 mm (X-Axis) | Volume of 19 mm (Y-Axis) | Volume of 25 mm (Z-Axis) | Volume fraction |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 0.4 | 0 | 0.6 | 0.61 |
| 0.5 | 0 | 0.5 | 0.62 |
| 0.6 | 0 | 0.4 | 0.6 |
| 0.7 | 0 | 0.3 | 0.59 |
| 0.8 | 0 | 0.2 | 0.57 |
| 0.9 | 0 | 0.1 | 0.55 |
| 1 | 0 | 0 | 0.52 |
| 0 | 0.1 | 0.9 | 0.58 |
| 0.1 | 0.1 | 0.8 | 0.6 |
| 0.2 | 0.1 | 0.7 | 0.62 |
| 0.3 | 0.1 | 0.6 | 0.63 |
| 0.4 | 0.1 | 0.5 | 0.61 |
| 0.5 | 0.1 | 0.4 | 0.62 |
| 0.6 | 0.1 | 0.3 | 0.6 |
| 0.7 | 0.1 | 0.2 | 0.58 |
| 0.8 | 0.1 | 0.1 | 0.57 |
| 0.9 | 0.1 | 0 | 0.54 |
| 0 | 0.2 | 0.8 | 0.58 |
| 0.1 | 0.2 | 0.7 | 0.59 |
| 0.2 | 0.2 | 0.6 | 0.6 |
| 0.3 | 0.2 | 0.5 | 0.61 |
| 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.62 |
| 0.5 | 0.2 | 0.3 | 0.61 |
| 0.6 | 0.2 | 0.2 | 0.6 |
| 0.7 | 0.2 | 0.1 | 0.58 |
| 0.8 | 0.2 | 0 | 0.56 |
| 0 | 0.3 | 0.7 | 0.59 |
| 0.1 | 0.3 | 0.6 | 0.6 |
| 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.6 |

ตารางที่ 30 ผลการทดลองหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุด (ต่อ)

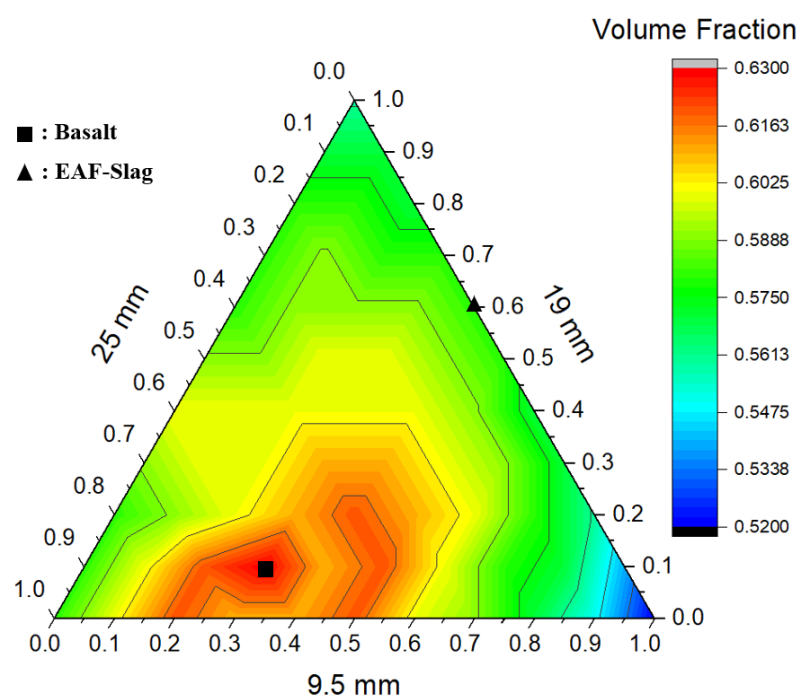
| Volume of 9.5 mm (X-Axis) | Volume of 19 mm (Y-Axis) | Volume of 25 mm (Z-Axis) | Volume fraction |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.61 |
| 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.61 |
| 0.5 | 0.3 | 0.2 | 0.6 |
| 0.6 | 0.3 | 0.1 | 0.59 |
| 0.7 | 0.3 | 0 | 0.57 |
| 0 | 0.4 | 0.6 | 0.6 |
| 0.1 | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.6 |
| 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.6 |
| 0.4 | 0.4 | 0.2 | 0.6 |
| 0.5 | 0.4 | 0.1 | 0.59 |
| 0.6 | 0.4 | 0 | 0.57 |
| 0 | 0.5 | 0.5 | 0.59 |
| 0.1 | 0.5 | 0.4 | 0.59 |
| 0.2 | 0.5 | 0.3 | 0.6 |
| 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0.6 |
| 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.59 |
| 0.5 | 0.5 | 0 | 0.58 |
| 0 | 0.6 | 0.4 | 0.58 |
| 0.1 | 0.6 | 0.3 | 0.59 |
| 0.2 | 0.6 | 0.2 | 0.59 |
| 0.3 | 0.6 | 0.1 | 0.59 |
| 0.4 | 0.6 | 0 | 0.58 |
| 0 | 0.7 | 0.3 | 0.58 |
| 0.1 | 0.7 | 0.2 | 0.59 |
| 0.2 | 0.7 | 0.1 | 0.58 |
| 0.3 | 0.7 | 0 | 0.58 |
| 0 | 0.8 | 0.2 | 0.58 |
| 0.1 | 0.8 | 0.1 | 0.58 |

ตารางที่ 30 ผลการทดลองหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุด (ต่อ)

| Volume of 9.5 mm (X-Axis) | Volume of 19 mm (Y-Axis) | Volume of 25 mm (Z-Axis) | Volume fraction |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 0.2 | 0.8 | 0 | 0.57 |
| 0 | 0.9 | 0.1 | 0.57 |
| 0.1 | 0.9 | 0 | 0.57 |
| 0 | 1 | 0 | 0.56 |



รูปที่ 49 ผลการทดลองหาขนาดคละที่อัดแน่นที่สุดของมวลรวมหยาบ

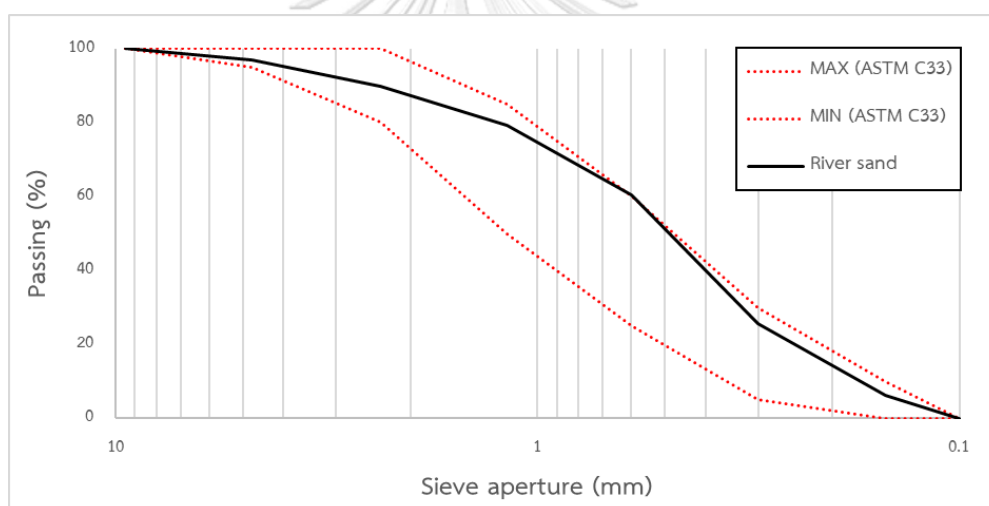


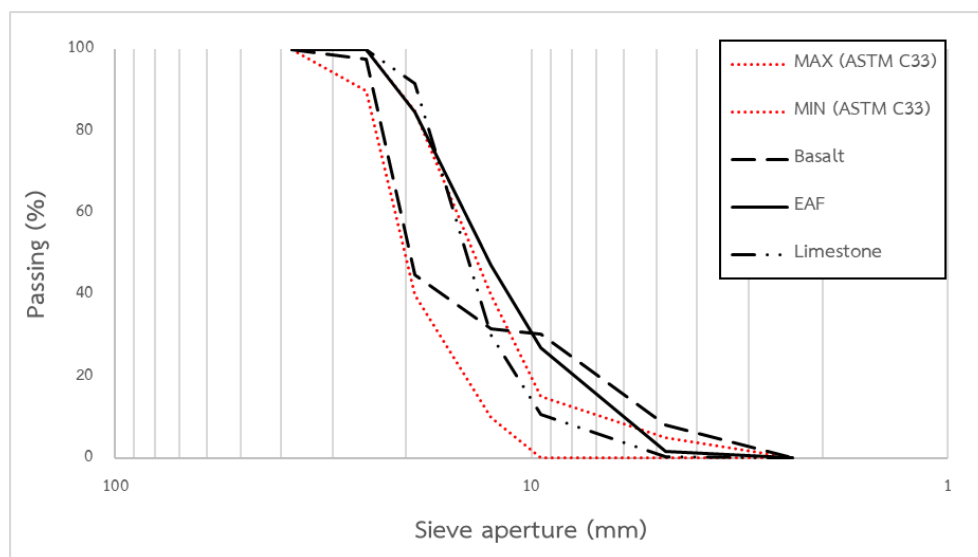
รูปที่ 50 ขนาดคละที่อัดแน่นที่สุดของปะชอลต์และตะกรันเหล็ก



รูปที่ 51 การทดลองคละขนาดที่อัดแน่นที่สุดของวัสดุมวลรวมหยาบ

ภายหลังจากการคละขนาดเพื่อให้ได้ขนาดคละที่อัดแน่นที่สุดแล้วนั้น จะทำการตรวจสอบขนาดคละของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C136 ซึ่งได้ผลการทดสอบดังในรูปที่ 52 ซึ่งแสดงกราฟขนาดคละของทรายแม่น้ำและรูปที่ 53 แสดงขนาดคละของวัสดุมวลรวมหยาบ ได้แก่ หินปูน หินบะซอลต์และตะกรันเหล็ก โดยกราฟขนาดคละของทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะถูกเทียบด้วยค่าขนาดคละที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ASTM C33 ซึ่งพบว่าทรายแม่น้ำที่ถูกใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดได้ผลอยู่ในขอบเขตตามที่มาตรฐานกำหนด ส่วนวัสดุมวลรวมหยาบทั้ง 3 ประเภทมีการคละขนาดที่ไม่อยู่ในขอบเขตตามมาตรฐาน แต่เป็นขนาดคละที่ได้ผลจากการทดลองแล้วว่าเป็นขนาดคละที่มวลรวมหยาบสามารถอัดแน่นได้มากที่สุด โดยขนาดคละของทั้งหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กจะถูกปรับปรุงด้วยผลจากการทดลอง เพื่อลดปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการใช้ในส่วนผสมและเพิ่มปริมาตรของมวลรวมในส่วนผสม ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามวลรวมเหล่านี้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ ส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตพัฒนาขึ้นได้



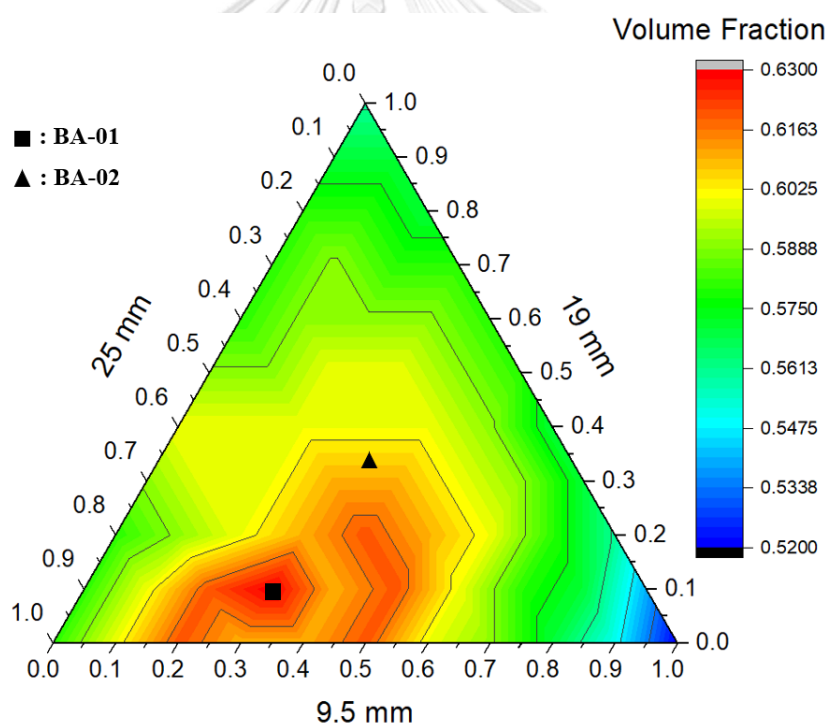


รูปที่ 53 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมหยาบที่ใช้ในงานวิจัย

หลังจากนั้นจะเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ปรับการคละขนาดของมวลรวม โดยการ ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจำนวน 2 ส่วนผสม และจะทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของ คอนกรีตที่อายุ 14 วัน และ 28 วัน ชุดละ 8 ตัวอย่าง โดยส่วนผสมทั้ง 2 จะแสดงในตารางที่ 31 ใน การทดสอบนี้จะใช้หินบะซอลต์ 3 ขนาดเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ โดยมีขนาด 25 มม. 19 มม. และ 9.5 มม. ส่วนผสม BS-01 คือส่วนผสมตั้งต้นที่ได้นำผลจากการทดสอบหาขนาดคละที่อัดแน่นมากที่สุดมา ประยุกต์ใช้ โดยใช้มวลรวมหยาบอนุภาคขนาด 25 มม. เป็นปริมาตร 60% ของปริมาตรมวลรวม ทั้งหมด มวลรวมหยาบอนุภาคขนาด 19 มม. เป็นปริมาตร 10% ของปริมาตรมวลรวมทั้งหมด และใช้ มวลรวมหยาบอนุภาคขนาด 9.5 มม. เป็นปริมาตร 30% ของปริมาตรมวลรวมทั้งหมด ซึ่งเป็นขนาด คละที่สามารถอัดแน่นได้ 63% เพื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม BS-02 ซึ่งจะแบ่งปริมาตรของมวลรวม แต่ละขนาดให้เท่ากัน โดยจะใช้ปริมาตร 33.3% ทั้ง 3 ขนาด เป็นขนาดคละที่สามารถอัดแน่นได้ 60% กราฟระดับของปริมาตรมวลรวมหยาบต่อปริมาตรคอนกรีตของทั้ง 2 ส่วนผสมจะแสดงในรูปที่ 54 และมอร์ตาร์ของทั้ง 2 ส่วนผสมจะถูกควบคุมให้เหมือนกัน ซึ่งจากผลการทดสอบหาค่าการยุบตัว พบว่าทั้ง 2 ส่วนผสมมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 16 ซม. เท่ากันทั้ง 2 ส่วนผสม จึงกล่าวได้ว่าขนาดคละที่ อัดแน่นต่างกันเล็กน้อย ไม่ส่งผลต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ตารางที่ 31 ส่วนผสมคอนกรีตเพื่อใช้เปรียบเทียบขนาดผลของมวลรวมหยาบ

| Mix No. | BS-01 | BS-02 |
|------------------------------------|-------|-------|
| Cement (kg/m ³) | 534 | 534 |
| Water (kg/m ³) | 202.9 | 202.9 |
| River Sand (kg/m ³) | 538.1 | 538.1 |
| 25 mm Basalt (kg/m ³) | 734.6 | 408.1 |
| 19 mm Basalt (kg/m ³) | 122.4 | 408.1 |
| 9.5 mm Basalt (kg/m ³) | 367.3 | 408.1 |
| SP (%) | 0.5 | 0.5 |
| Slump (cm) | 16 | 16 |
| w/c ratio | 0.38 | 0.38 |



รูปที่ 54 ปริมาตรมวลรวมหยาบต่อปริมาตรคอนกรีตของส่วนผสม BS-01 และ BS-02

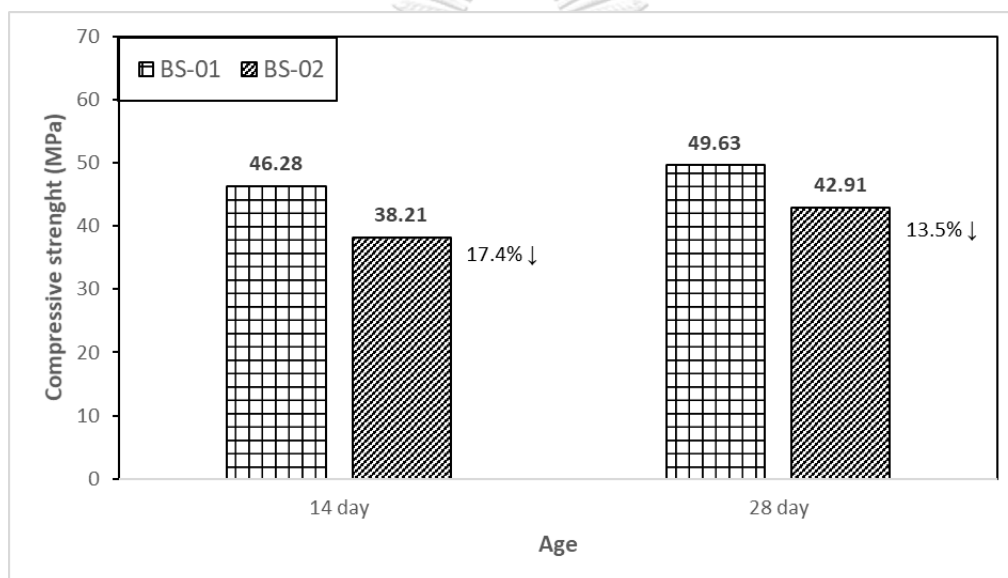
ตารางที่ 32 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเพื่อเปรียบเทียบขนาดผลของมวลรวมหยาบ

| Mix No. | Average Unit weight | Age | F_c' | Average F_c' | SD of F_c' | E | Average E | SD of E |
|---------|---------------------|-----|--------|----------------|--------------|-------|-----------|---------|
| | kg/m ³ | | MPa | MPa | MPa | GPa | GPa | GPa |
| BS-01 | 2,410 | 14 | 48.87 | 46.28 | 2.54 | 36.34 | 35.81 | 0.43 |
| | | | 42.84 | | | 35.81 | | |
| | | | 47.14 | | | 35.29 | | |
| | | 28 | 51.43 | 49.63 | 1.83 | 32.48 | 32.40 | 0.43 |
| | | | 47.12 | | | 31.84 | | |
| | | | 50.34 | | | 32.89 | | |
| BS-02 | 2,410 | 14 | 35.96 | 38.21 | 1.69 | 36.30 | 35.77 | 0.45 |
| | | | 40.05 | | | 35.80 | | |
| | | | 38.62 | | | 35.20 | | |
| | | 28 | 44.16 | 42.91 | 1.55 | 32.18 | 32.29 | 0.41 |
| | | | 40.72 | | | 31.84 | | |
| | | | 43.84 | | | 32.84 | | |

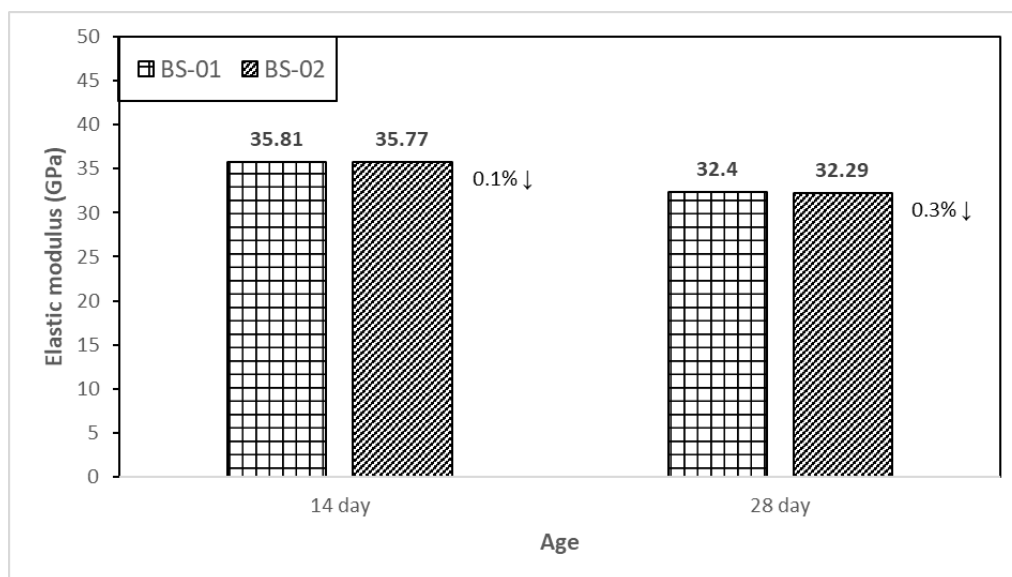
จากการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ 32 พบว่าทั้ง 2 ส่วนผสมมีหน่วยน้ำหนักที่เท่ากัน จากการทดสอบกำลังอัดพบว่าส่วนผสมคอนกรีต BS-01 ที่ถูกปรับปรุงขนาดผลของมวลรวมหยาบให้อัดแน่น โดยมีสัดส่วนปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อปริมาตรคอนกรีตทั้งหมดเท่ากับ 63% ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังที่สูงกว่าส่วนผสม BS-02 ที่ใช้การลดขนาดโดยการแบ่งปริมาตรมวลรวมที่ใช้ให้เท่ากันทั้ง 3 ขนาดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่วนผสม BS-02 จะมีสัดส่วนปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อปริมาตรคอนกรีต 60% ดังที่แสดงในรูปที่ 55 โดยส่วนผสม BS-01 มีกำลังอัดมากกว่าทั้งคอนกรีตอายุ 14 วัน และ 28 วัน โดยกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 14 วัน เพิ่มขึ้นประมาณ 21.1% และที่ 28 วัน เพิ่มขึ้นประมาณ 15.7% เนื่องจากปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมหยาบลดลง โพร่งในเนื้อคอนกรีตจึงลดลงตามไปด้วย ทำให้แรงที่กระทำส่งผ่านมวลรวมหยาบได้ต่อเนื่องขึ้น ซึ่งมวลรวมหยาบเหล่านี้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ กำลังอัดของคอนกรีตจึงพัฒนา และเนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวมา การพัฒนากำลังของซีเมนต์เพสต์ตามอายุของ

คอนกรีตจึงส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อย เนื่องจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกำลังอัด ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะพัฒนาถึงแค่อายุ 14 วันเท่านั้น อย่างที่แสดงในรูปที่ 56 ซึ่งผลการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุคอนกรีต 28 วันลดลง อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างคอนกรีตหรือการทดสอบ อย่างไรก็ตาม ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นหลังอายุคอนกรีต 14 วันนั้นจะไม่พัฒนาเหมือนกำลังอัดของคอนกรีต

จากผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตพบว่าทั้ง 2 ส่วนผสมมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ใกล้เคียงกัน ทั้งคอนกรีตอายุ 14 วัน และ 28 วัน จึงสามารถกล่าวได้ว่าขนาดผลของมวลรวมหยาบนั้น ส่งผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น แต่แทบไม่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต



รูปที่ 55 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบขนาดผลของมวลรวมหยาบ



รูปที่ 56 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบขนาดผลของมวลรวมหยาบ

4.2 การปรับปรุงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ในการศึกษานี้จะทำการปรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสม โดยจะใช้ทั้งหมด 4 ส่วนผสมและเปรียบเทียบเป็นคู่ คู่แรกได้แก่ส่วนผสม BS-03 เปรียบเทียบกับส่วนผสม BS-04 ดังแสดงในตารางที่ 33 โดยส่วนผสม BS-04 จะถูกลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จาก 0.43 เหลือ 0.40 และทั้ง 2 ส่วนผสมใช้มอร์ตาร์เดียวกัน มวลรวมหยาบที่ใช้ในคู่นี้ยังไม่ได้คัดขนาดให้อัดแน่นสูงสุดตามผลการทดลองก่อนหน้านี้ ส่วนผสมคู่ที่ 2 จะเปรียบเทียบส่วนผสม BS-01 กับส่วนผสม BS-05 ดังแสดงในตารางที่ 34 โดยทั้ง 2 ส่วนผสมมีสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์แบบเดียวกันเช่นเดียวกับคู่แรก มวลรวมหยาบที่ใช้ได้ถูกคัดขนาดมวลรวมให้อัดแน่นที่สุดตามที่ได้ทดลองมาก่อนหน้า และทั้ง 2 ส่วนผสมนี้จะใช้สารลดน้ำพิเศษเป็นปริมาตร 0.5% ของน้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะถูกลดลงจาก 0.38 เหลือ 0.34 หลังจากผสมพบว่าส่วนผสม BS-03 มีค่าการยุบตัวถึง 12 ซม. แต่ส่วนผสม BS-04 มีค่าการยุบตัวเพียง 6 ซม. เมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จาก 0.43 เหลือ 0.40 ทำให้ส่วนผสมนี้มีค่าการยุบตัวต่างกันถึง 6 ซม. และหลังจากผสมส่วนผสมคู่ที่ 2 พบว่าส่วนผสม BS-01 มีค่าการยุบตัวถึง 16 ซม. แต่ส่วนผสม BS-05 มีค่าการยุบตัวเพียง 3.5 ซม. ทำให้ส่วนผสมนี้มีค่าการยุบตัวต่างกันถึง 12.5 ซม. เมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จาก 0.38 เหลือ 0.34 จึงสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แปรผันตรงกับค่าการยุบตัวของคอนกรีตและยิ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อย ผลกระทบต่อค่าการยุบตัวยิ่งมากขึ้นกว่าส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูง

ตารางที่ 33 ส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.40 และ 0.43

| Mix No. | BS-03 | BS-04 |
|------------------------------------|-------|-------|
| Cement (kg/m ³) | 461.6 | 461.6 |
| Water (kg/m ³) | 198.5 | 186 |
| River Sand (kg/m ³) | 576.2 | 576.2 |
| 25 mm Basalt (kg/m ³) | 399.2 | 399.2 |
| 19 mm Basalt (kg/m ³) | 399.2 | 399.2 |
| 9.5 mm Basalt (kg/m ³) | 399.2 | 399.2 |
| SP (%) | 0 | 0 |
| Slump (cm) | 12 | 6 |
| w/c ratio | 0.43 | 0.40 |

ตารางที่ 34 ส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.34 และ 0.38

| Mix No. | BS-01 | BS-05 |
|------------------------------------|-------|-------|
| Cement (kg/m ³) | 534 | 534 |
| Water (kg/m ³) | 202.9 | 181.6 |
| River Sand (kg/m ³) | 538.1 | 538.1 |
| 25 mm Basalt (kg/m ³) | 734.6 | 734.6 |
| 19 mm Basalt (kg/m ³) | 122.4 | 122.4 |
| 9.5 mm Basalt (kg/m ³) | 367.3 | 367.3 |
| SP (%) | 0.5 | 0.5 |
| Slump (cm) | 16 | 3.5 |
| w/c ratio | 0.38 | 0.34 |

จากการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสมทั้ง 4 ส่วนผสมที่อายุคอนกรีต 14 วัน และ 28 วัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 35 และ 36 หลังจากเปรียบเทียบผลการทดสอบของส่วนผสม BS-03 และส่วนผสม BS-04 พบว่าส่วนผสม BS-04 ที่ได้ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จาก 0.43 เหลือ 0.40 มีกำลังอัดที่สูงขึ้นทั้งในคอนกรีตอายุ 14 วัน และ 28 วัน โดยที่คอนกรีตอายุ 14 วัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 23.5% และที่คอนกรีตอายุ 28 วัน มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 18.5% ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม BS-04 ได้ผลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันในทั้ง 2 อายุคอนกรีต แต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่คอนกรีตอายุ 14 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น 1.8% และคอนกรีตอายุ

28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น 1.7% โดยกราฟแสดงผลการทดสอบกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทั้ง 2 ส่วนผสมจะแสดงในรูปที่ 57 และ 58

ตารางที่ 35 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อปรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

| Mix No. | Average Unit weight | Age | F_c' | Average F_c' | SD of F_c' | E | Average E | SD of E |
|---------|---------------------|-----|--------|----------------|--------------|-------|-----------|---------|
| | kg/m ³ | | MPa | MPa | MPa | GPa | GPa | GPa |
| BS-03 | 2,431 | 14 | 35.45 | 31.82 | 2.58 | 37.34 | 35.64 | 1.30 |
| | | | 30.37 | | | 35.39 | | |
| | | | 29.65 | | | 34.18 | | |
| | | 28 | 34.71 | 36.76 | 1.54 | 38.1 | 34.73 | 2.58 |
| | | | 38.42 | | | 31.84 | | |
| | | | 37.16 | | | 34.24 | | |
| BS-04 | 2,410 | 14 | 37.15 | 39.29 | 1.69 | 37.6 | 36.29 | 1.15 |
| | | | 39.45 | | | 34.8 | | |
| | | | 41.28 | | | 36.48 | | |
| | | 28 | 45.73 | 43.57 | 1.87 | 35.3 | 35.32 | 0.44 |
| | | | 41.18 | | | 35.86 | | |
| | | | 43.81 | | | 34.79 | | |

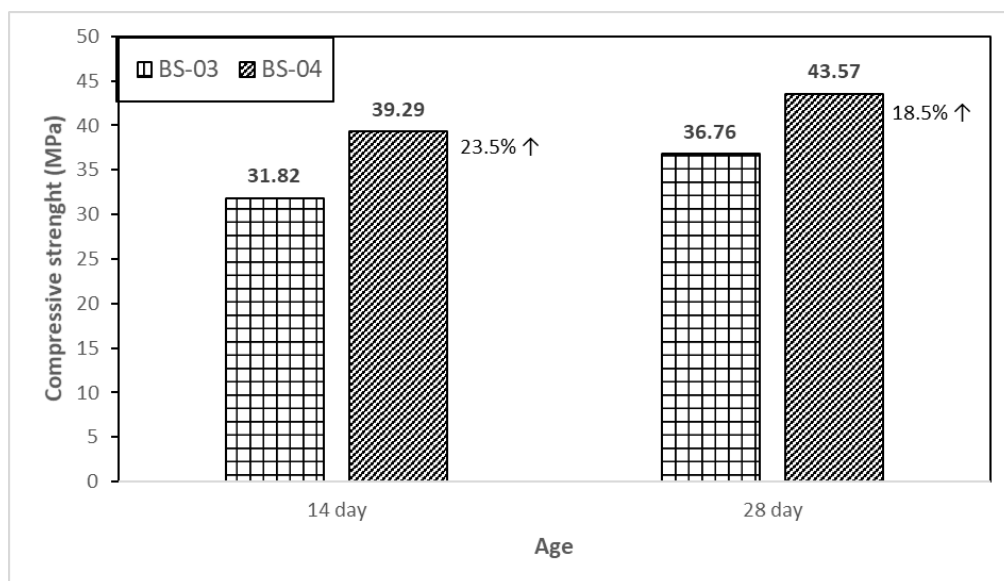
จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบของส่วนผสม BS-01 และส่วนผสม BS-05 พบว่าส่วนผสม BS-05 มีทั้งกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าส่วนผสม BS-01 ทั้งในคอนกรีตอายุ 14 วันและ 28 วัน โดยกำลังอัดมีค่าสูงขึ้น 5.7% และ 11.4% ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน ตามลำดับ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงขึ้น 11.4% และ 17.9% ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยกราฟแสดงผลการทดสอบกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแสดงในรูปที่ 59 และ 60

ตารางที่ 36 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อปรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

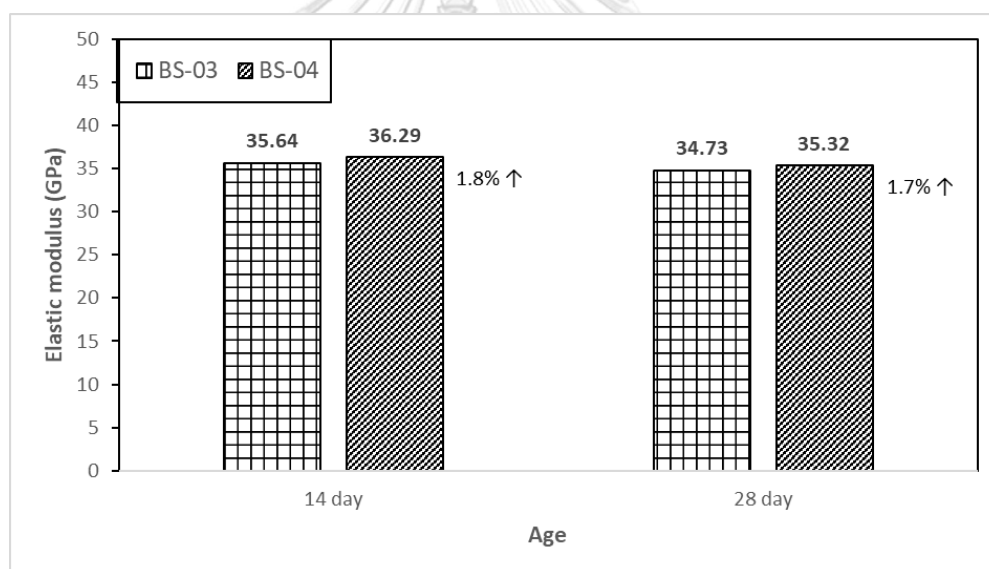
| Mix No. | Average Unit weight | Age | F_c' | Average F_c' | SD of F_c' | E | Average E | SD of E |
|---------|---------------------|-----|--------|----------------|--------------|-------|-----------|---------|
| | kg/m ³ | | MPa | MPa | MPa | GPa | GPa | GPa |
| BS-01 | 2,410 | 14 | 48.87 | 46.28 | 2.54 | 36.34 | 35.81 | 0.43 |
| | | | 42.84 | | | 35.81 | | |
| | | | 47.14 | | | 35.29 | | |
| | | 28 | 51.43 | 49.63 | 1.83 | 32.48 | 32.40 | 0.43 |
| | | | 47.12 | | | 31.84 | | |
| | | | 50.34 | | | 32.89 | | |
| BS-05 | 2,386 | 14 | 49.48 | 48.91 | 1.33 | 33.94 | 38.57 | 3.91 |
| | | | 47.08 | | | 38.27 | | |
| | | | 50.18 | | | 43.51 | | |
| | | 28 | 57.18 | 55.29 | 1.89 | 31.79 | 38.20 | 4.76 |
| | | | 56 | | | 43.18 | | |
| | | | 52.71 | | | 39.62 | | |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

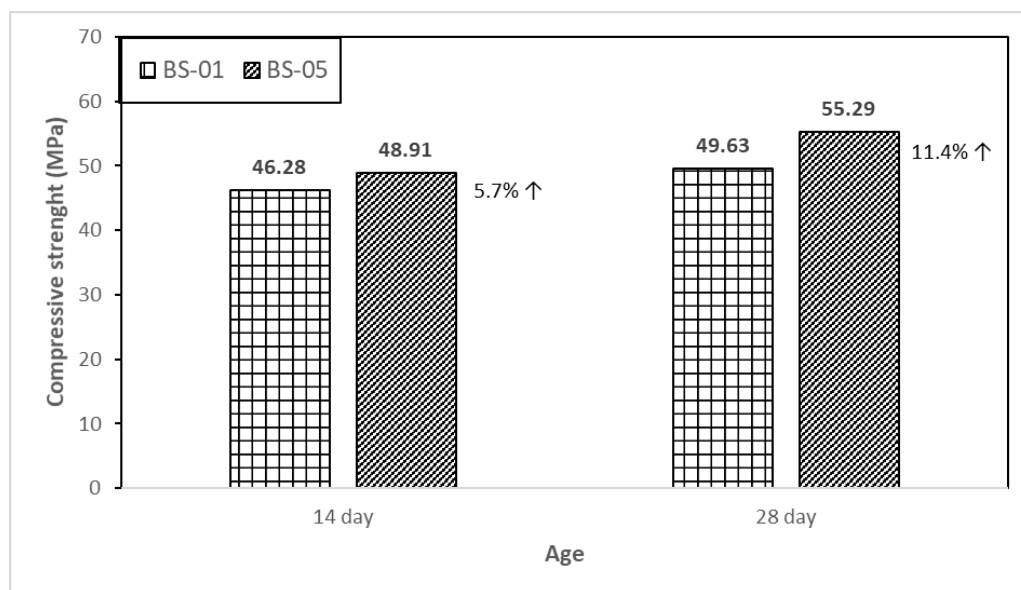
จากผลการทดสอบทั้ง 2 คู่ส่วนผสมสามารถสรุปได้ว่าทั้งกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตแปรผกผันกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เนื่องจากสัดส่วนน้ำในส่วนผสมที่น้อยลงทำให้ฟองอากาศและโพรงภายในเนื้อคอนกรีตที่เกิดจากน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลงตามไปด้วยและช่วยลดการแยกตัวระหว่างมวลรวมที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีสัดส่วนน้ำในส่วนผสมมากเกินไป ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสมและทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากกำลังของมอร์ตาร์ที่มากขึ้นช่วยให้กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เฟสดีในส่วนผสมดีขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในคอนกรีตส่งผลให้ทั้งกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เพียงแต่การเพิ่มขึ้นของโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดค่อนข้างมาก



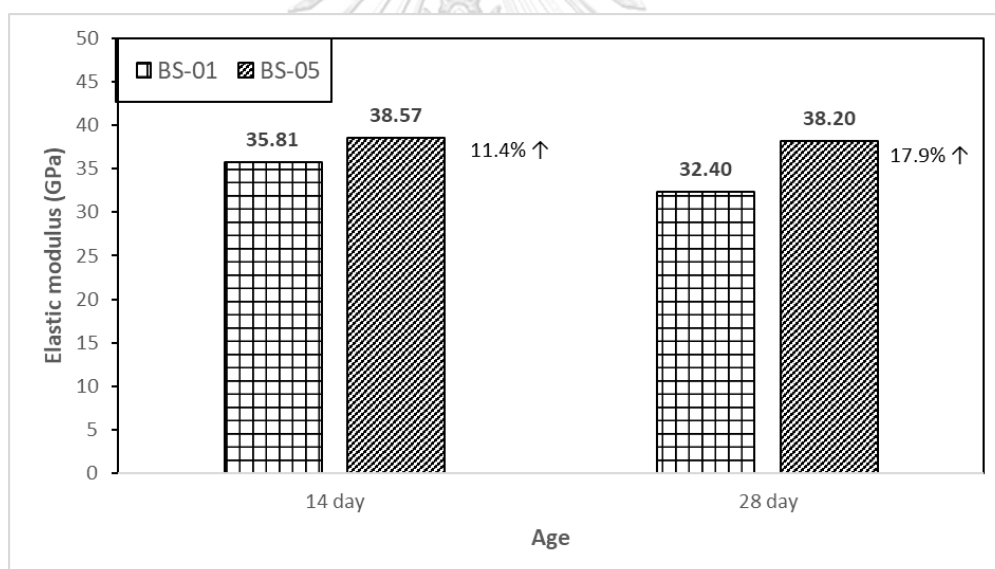
รูปที่ 57 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม BS-03 และ BS-04 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน



รูปที่ 58 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม BS-03 และ BS-04 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน



รูปที่ 59 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม BS-01 และ BS-05 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน



รูปที่ 60 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม BS-01 และ BS-05 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน

4.3 ผลการเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบ

ในการศึกษานี้จะทำการเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตได้แก่ ค่าการยุบตัว หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ในตารางที่ 37 จะแสดงส่วนผสมทั้ง 3 ที่ใช้ทดสอบ โดยส่วนผสม LS-01 จะใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ ส่วนผสม BS-05 จะใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบ และส่วนผสม EAF-01 ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ โดยทั้ง 3 ส่วนผสมจะใช้สัดส่วนมอร์ตาร์เดียวกันและใช้สารลดน้ำพิเศษเป็นปริมาตร 0.5% ของน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต โดยพิจารณาใช้ค่า w/c เท่ากับ 0.34 ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่พอสามารถทำงานได้จากผลการทดลองก่อนหน้านี้ มวลรวมหยาบแต่ละประเภทจะถูกคัดขนาดให้เหมาะสมโดยใช้ค่าจากผลการทดลองคัดขนาดที่ได้ทดลองมาก่อนหน้า ยกเว้นหินปูนเนื่องจากได้คัดขนาดมาก่อนแล้วจากแหล่งผลิต หลังจากผสมพบว่าทั้ง 3 ส่วนผสมมีค่าการยุบตัวใกล้เคียงกัน โดยส่วนผสมที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบมีค่าการยุบตัวมากที่สุดเท่ากับ 6.5 ซม. เนื่องจากขนาดคละของตะกรันเหล็กมีขนาดเล็กกว่าขนาดของมวลรวมจากธรรมชาติ ส่วนรองลงมาคือส่วนผสมที่ใช้หินปูนและหินบะซอลต์เท่ากับ 4.5 และ 3.5 ซม. ตามลำดับ

ตารางที่ 37 ส่วนผสมคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบ

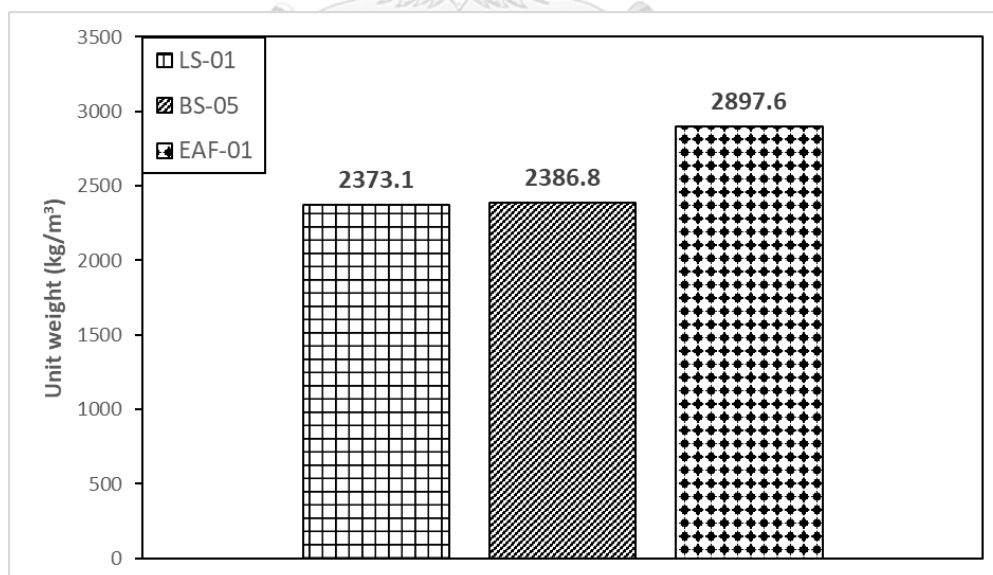
| Mix No. | LS-01 | BS-05 | EAF-01 |
|--|---------|-------|--------|
| Cement (kg/m ³) | 534 | 534 | 534 |
| Water (kg/ m ³) | 181.6 | 181.6 | 181.6 |
| River Sand (kg/ m ³) | 538.1 | 538.1 | 538.1 |
| 6.3-19 mm Limestone (kg/m ³) | 1,197.5 | | |
| 25 mm Basalt (kg/m ³) | | 734.6 | |
| 19 mm Basalt (kg/m ³) | | 122.4 | |
| 9.5 mm Basalt (kg/m ³) | | 367.3 | |
| 19 mm EAF (kg/m ³) | | | 931.32 |
| 9.5 mm EAF (kg/m ³) | | | 620.88 |
| SP (%) | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Slump (cm) | 4.5 | 3.5 | 6.5 |
| w/c ratio | 0.34 | 0.34 | 0.34 |

ผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ในส่วนผสมที่ใช้วัสดุมวลรวมหยาบแต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 38 จากผลการทดสอบพบว่าประเภทของมวลรวมหยาบมีอิทธิพลต่อทั้งกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นในคอนกรีตอายุ 14 และ 28 วัน อย่างมีนัยสำคัญ จะสังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์และตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้หินปูนอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งทั้งหมดใช้ส่วนผสมของมอร์ตาร์เดียวกัน กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางกลของหินบะซอลต์และตะกรันเหล็ก ที่มีความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นที่มากกว่าหินปูน โดยเฉพาะตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงถึง 3.43 และมีหน่วยน้ำหนักอัดแน่นสูงถึง $2,101 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งสูงกว่าวัสดุมวลรวมจากธรรมชาติอย่างชัดเจน จึงส่งผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้นตามไปด้วย โดยคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบมีค่ากำลังอัดสูงสุดถึง 59 MPa ที่คอนกรีตอายุ 28 วัน แต่ตะกรันเหล็กจะส่งผลให้คอนกรีตมีหน่วยน้ำหนักมากขึ้นถึง $2,898 \text{ kg/m}^3$ ด้วยเช่นกัน ซึ่งมากกว่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์และหินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ 21.4% และ 22.1% ตามลำดับ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมหยาบแต่ละประเภทแสดงในรูปที่ 61 รองลงมาคือคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวม จะมีกำลังอัดสูงสุดประมาณ 55.3 MPa ที่คอนกรีตอายุ 28 วันและน้อยที่สุดคือคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ ซึ่งได้กำลังอัดของคอนกรีตเพียง 42.7 MPa ที่คอนกรีตอายุ 28 วัน เท่านั้น คิดเป็นการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเมื่อแทนที่มวลรวมชนิดหินปูนด้วยหินบะซอลต์และตะกรันเหล็กเท่ากับ 29.5% และ 38.2% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 62

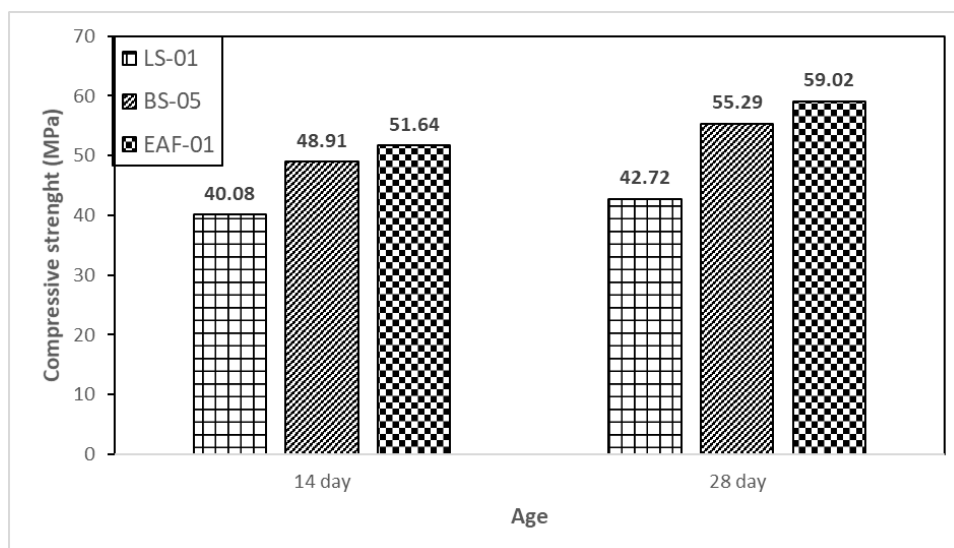
ตารางที่ 38 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อเปลี่ยนประเภทของมวลรวม
หยาบ

| Mix No. | Average Unit weight | Age | F_c' | Average F_c' | SD of F_c' | E | Average E | SD of E |
|---------|---------------------|-----|--------|----------------|--------------|-------|-----------|---------|
| | kg/m ³ | | MPa | | | GPa | | |
| LS-01 | 2,373 | 14 | 42.48 | 40.08 | 1.74 | 37.42 | 35.24 | 1.63 |
| | | | 39.32 | | | 34.81 | | |
| | | | 38.43 | | | 33.49 | | |
| | | 28 | 44.84 | 42.72 | 1.93 | 37.51 | 36.64 | 0.92 |
| | | | 40.18 | | | 37.03 | | |
| | | | 43.14 | | | 35.37 | | |
| BS-05 | 2,386 | 14 | 49.48 | 48.91 | 1.33 | 33.94 | 38.57 | 3.91 |
| | | | 47.08 | | | 38.27 | | |
| | | | 50.18 | | | 43.51 | | |
| | | 28 | 57.18 | 55.29 | 1.89 | 31.79 | 38.20 | 4.76 |
| | | | 56 | | | 43.18 | | |
| | | | 52.71 | | | 39.62 | | |
| EAF-01 | 2,897 | 14 | 50.18 | 51.64 | 1.58 | 44.81 | 43.80 | 0.78 |
| | | | 53.83 | | | 43.67 | | |
| | | | 50.91 | | | 42.92 | | |
| | | 28 | 62.27 | 59.02 | 2.71 | 42.28 | 44.60 | 1.92 |
| | | | 59.14 | | | 46.97 | | |
| | | | 55.64 | | | 44.55 | | |

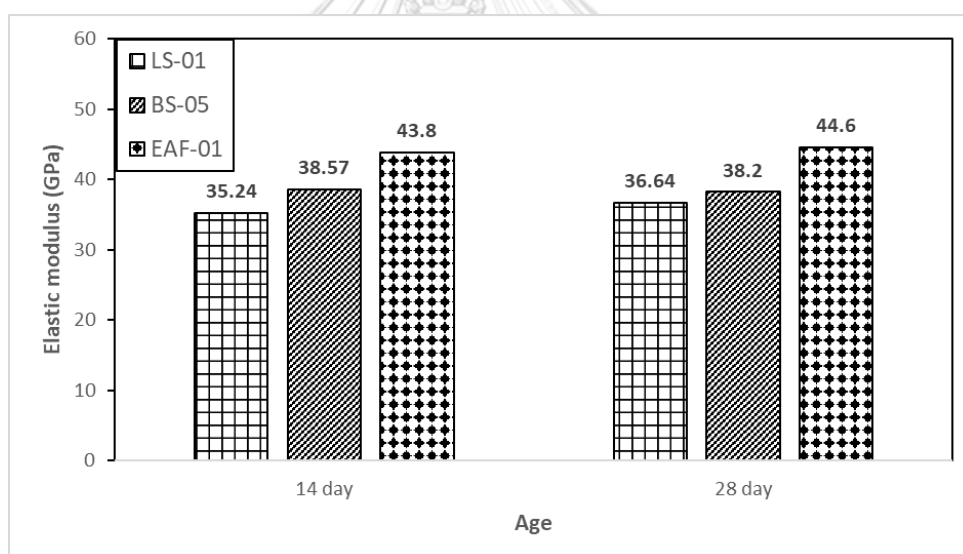
ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 63 จากผลการทดสอบบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงประเภทของมวลรวมส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตด้วยเช่นกัน โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบประเภทอื่น โดยทั้งหมดใช้ส่วนผสมของมอร์ตาร์เดียวกัน ส่วนผสมที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงถึง 44.6 GPa ที่คอนกรีตอายุ 28 วัน และคอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวมหยาบให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่น้อยที่สุดเท่ากับ 36.6 GPa ที่คอนกรีตอายุ 28 วัน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นประมาณ 22% เนื่องจากตะกรันเหล็กมีค่าความถ่วงจำเพาะและหน่วยน้ำหนักที่สูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติมากและผิวของตะกรันเหล็กมีความหยาบและขรุขระจึงช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะที่รอยต่อระหว่างมวลรวมหยาบและเนื้อซีเมนต์ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นตัวแปรสำคัญในการเพิ่มกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลต์ จากการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 38.2 GPa ที่คอนกรีตอายุ 28 วัน ซึ่งสูงกว่าคอนกรีตจากหินปูนเพียงเล็กน้อย และยังพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คอนกรีตอายุ 28 วัน พัฒนาขึ้นจากคอนกรีตอายุ 14 วันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในทุกประเภทของมวลรวม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงประเภทของวัสดุมวลรวมนั้นจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้แก่คอนกรีตด้วยคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมวลรวม ดังนั้นกำลังของซีเมนต์เพสต์ที่เพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีตจะส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 61 หน่วยน้ำหนักของส่วนผลม LS-01, BS-05 และ EAF-01



รูปที่ 62 ผลการทดสอบกำลังอัดส่วนผสม LS-01, BS-05 และ EAF-01 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน



รูปที่ 63 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นส่วนผสม LS-01, BS-05 และ EAF-01 ที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน

4.4 ผลการปรับปรุงอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม

จากผลการทดสอบที่ผ่านมาพบว่าคอนกรีตที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ ทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นกำลังอัดหรือค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุคอนกรีต 14 และ 28 วัน มีค่าใกล้เคียง จึงสามารถกล่าวได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตนั้นเริ่มหยุดพัฒนาตั้งแต่คอนกรีตอายุ 14 วัน ดังนั้นการทดลองนี้จะใช้ตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นวัสดุมวลรวมหยาบในทุกส่วนผสมและจะทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่อายุคอนกรีต 14 วัน เท่านั้น

ในการศึกษานี้จะทำการปรับอัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด โดยการเพิ่มปริมาณของทรายในส่วนผสม เพื่อทำการเปรียบเทียบกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเนื่องจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้บ่งชี้ว่าเมื่อปรับสัดส่วนมวลรวมละเอียดให้เหมาะสม จะส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นพัฒนาขึ้น โดยจะเปรียบเทียบทั้งหมด 2 ส่วนผสม ดังที่แสดงในตารางที่ 39 โดยแต่ละส่วนผสมจะกำหนดอัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมต่างกันและทุกส่วนผสมจะควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้เท่ากัน โดยส่วนผสม EAF-01 และ EAF-02 มีอัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมดเท่ากับ 0.26 และ 0.32 ตามลำดับ

ตารางที่ 39 ส่วนผสมคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม

| Mix No. | EAF-01 | EAF-02 |
|---------------------------------|--------|--------|
| Cement (kg/m ³) | 534 | 424.42 |
| Water (kg/m ³) | 181.6 | 145 |
| River Sand (kg/m ³) | 538.1 | 678.67 |
| 19 mm EAF (kg/m ³) | 931.54 | 931.54 |
| 9.5 mm EAF (kg/m ³) | 621.03 | 621.03 |
| SP (%) | 0.5 | 1.4 |
| Slump (cm) | 6.5 | 21 |
| w/c ratio | 0.34 | 0.34 |
| F. Agg./Agg. ratio | 0.26 | 0.32 |

จากผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้แสดงในตารางที่ 40 พบว่าส่วนผสม EAF-01 ซึ่งมีอัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมเท่ากับ 0.26 มีกำลังอัดของคอนกรีต 51.6 MPa และส่วนผสม EAF-02 ซึ่งมีอัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมเท่ากับ 0.32 มีกำลังอัดของคอนกรีต 45 MPa ดังที่แสดงในรูปที่ 64 จะเห็นว่าส่วนผสม EAF-01 ที่มี

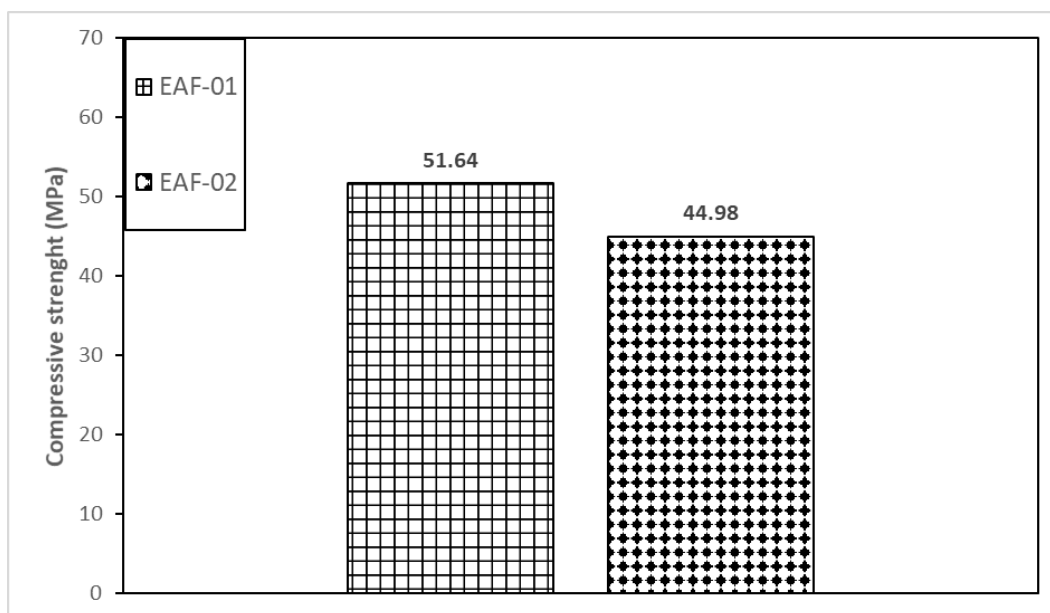
อัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมน้อยกว่า ให้กำลังอัดของคอนกรีตมากกว่าส่วนผสม EAF-02 ซึ่งมากกว่า 14.8%

เมื่อส่วนผสม EAF-01 มีอัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมน้อยกว่าส่วนผสม EAF-02 จะสามารถกล่าวได้ว่า ส่วนผสม EAF-01 มีปริมาณของซีเมนต์เพสต์มากกว่าและมีปริมาณของมวลรวมละเอียดน้อยกว่าในส่วนผสมคอนกรีต ทำให้ส่วนผสม EAF-01 มีเนื้อซีเมนต์เพสต์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลสูงกว่าทรายแม่น้ำที่ถูกใช้เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในสัดส่วนที่มากกว่า จึงส่งผลให้ส่วนผสม EAF-01 มีกำลังอัดมากกว่าส่วนผสม EAF-02

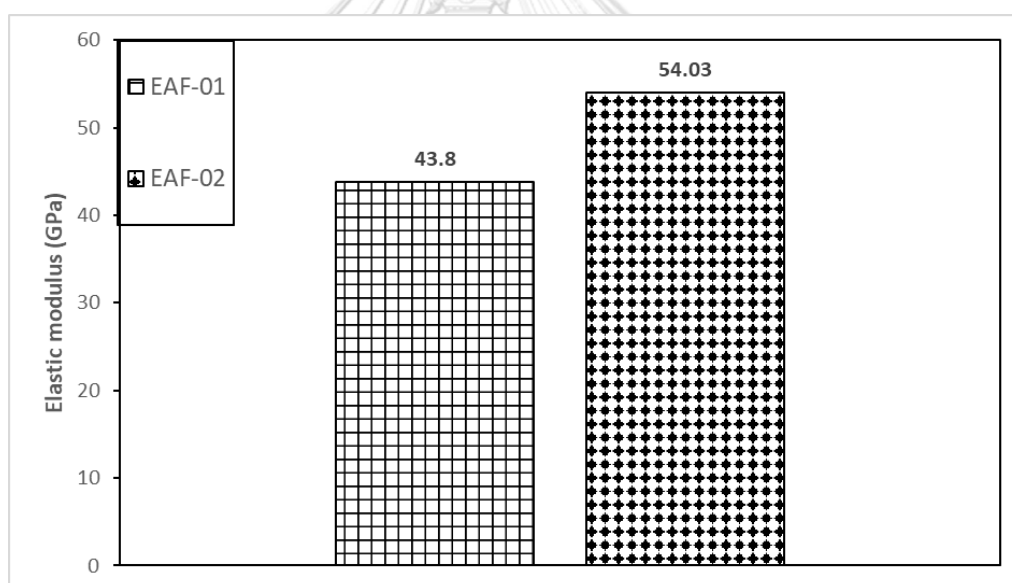
ตารางที่ 40 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม

| Mix No. | Average Unit weight | Age | F_c' | Average F_c' | SD of F_c' | E | Average E | SD of E |
|---------|---------------------|-----|--------|----------------|--------------|-------|-----------|---------|
| | kg/m ³ | | MPa | MPa | MPa | GPa | GPa | GPa |
| EAF-01 | 2,897 | 14 | 50.18 | 51.64 | 1.58 | 44.81 | 43.80 | 0.78 |
| | | | 53.83 | | | 43.67 | | |
| | | | 50.91 | | | 42.92 | | |
| EAF-02 | 2,960 | 14 | 45.252 | 44.98 | 0.63 | 56.18 | 54.03 | 2.61 |
| | | | 44.107 | | | 55.54 | | |
| | | | 45.587 | | | 50.36 | | |

จากผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แสดงในรูปที่ 65 พบว่าส่วนผสม EAF-01 ให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 43.8 GPa และส่วนผสม EAF-02 ให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 54 GPa จะเห็นว่า แม้ส่วนผสม EAF-01 จะมีปริมาณของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่าทรายแม่น้ำที่มากกว่าในส่วนผสม แต่เนื่องจากวัสดุมวลรวมละเอียดจะช่วยปรับปรุงขนาดผลของวัสดุมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตให้อัดแน่นได้ยิ่งขึ้น โดยการให้อนุภาคของมวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กไปเติมระหว่างช่องว่างของอนุภาคมวลรวมหยาบที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ส่วนผสม EAF-02 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่าส่วนผสม EAF-01 ถึง 23.3% โดยผลการทดสอบกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในการทดสอบครั้งนี้ไม่สอดคล้องกับผลของงานวิจัยที่ผ่านมา เนื่องจากผลในงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มหรือลดไปในทิศทางใด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะเพิ่มลดไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 64 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม EAF-01 และ EAF-02 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน



รูปที่ 65 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม EAF-01 และ EAF-02 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน

หลังจากนั้นจึงได้ทดลองนำ EAF-Slag มาเปลี่ยนขนาดละเอียดของมวลรวมเช่นเดียวกับหินบะซอลต์ โดยส่วนผสม EAF-03 จะใช้มวลรวมขนาด 19 มม. ปริมาตร 60% และมวลรวมขนาด 9.5 มม. ปริมาตร 40% ซึ่งเป็นสัดส่วนที่สามารถอัดแน่นได้ถึง 58% และจะเปรียบเทียบกับส่วนผสม EAF-04 ที่ใช้มวลรวมขนาด 9.5 มม. เพียงขนาดเดียว ซึ่งเป็นขนาดของมวลรวมที่สามารถอัดแน่นได้เพียง 52% น้อยที่สุดในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 41 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลกับส่วนผสมตะกรันเหล็กที่ได้ลดขนาดอัดแน่นมาแล้ว โดยส่วนผสมอื่นจะถูกควบคุมให้เหมือนกันทั้งหมด

จากผลการทดสอบวัดค่าการยุบตัวพบว่าส่วนผสม EAF-04 มีค่าการยุบตัวที่มากกว่า 4 ซม. เนื่องจากมวลรวมที่ใช้เป็นขนาดเล็กทั้งหมด จึงทำให้คอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ดีมากกว่าส่วนผสม EAF-03 ที่ใช้มวลรวมหยาบที่ละขนาดด้วยอนุภาคที่ใหญ่กว่า

ตารางที่ 41 ส่วนผสมคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนขนาดกะของมวลรวมหยาบ

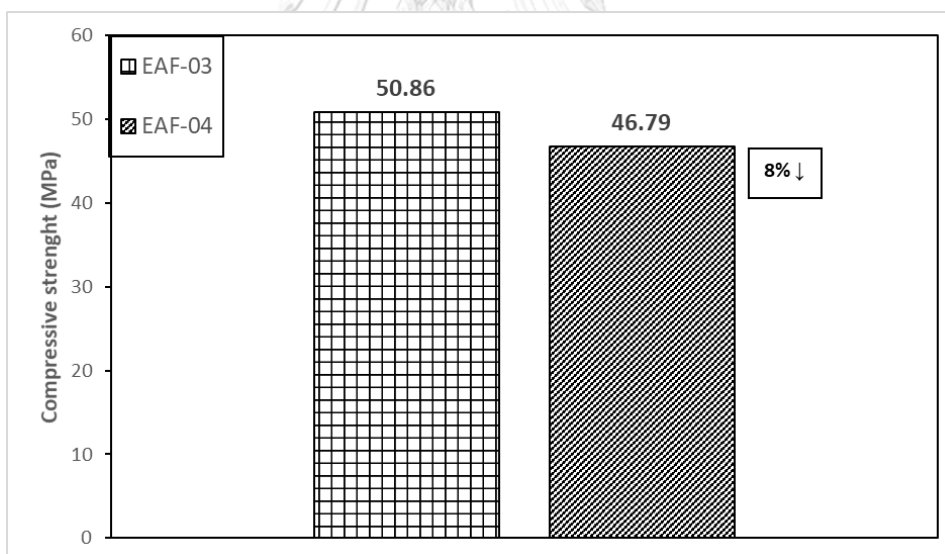
| Mix No. | EAF-03 | EAF-04 |
|---------------------------------|--------|--------|
| Cement (kg/m ³) | 430 | 430 |
| Water (kg/m ³) | 145 | 145 |
| River Sand (kg/m ³) | 555 | 555 |
| 19 mm EAF (kg/m ³) | 1,035 | 0 |
| 9.5 mm EAF (kg/m ³) | 690 | 1,725 |
| SP (%) | 1.4 | 1.4 |
| Slump (cm) | 11 | 15 |
| w/c ratio | 0.34 | 0.34 |

ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 42 พบว่าคอนกรีตตะกรันหลักที่ใช้มวลรวมขนาด 9.5 มม. เพียงขนาดเดียว ทำให้ทั้งกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยลง 8% และ 2.7% ตามลำดับ เนื่องจากส่วนผสม EAF-04 ใช้มวลรวมหยาบขนาดเล็กเพียงขนาดเดียว ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างมวลรวมในเนื้อคอนกรีตมากขึ้น บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคมวลรวมและเนื้อซีเมนต์เพสต์จึงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งรอยต่อระหว่างมวลรวมและเนื้อซีเมนต์เป็นปัจจัยหลักในการวิบัติของคอนกรีต โดยเฉพาะในกรณีที่คอนกรีตใช้มวลรวมที่มีคุณสมบัติเชิงกลสูงอย่างตะกรันหลัก จึงทำให้ส่วนผสม EAF-04 มีกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่น้อยลง อย่างที่ได้แสดงในรูปที่ 66 และ 67

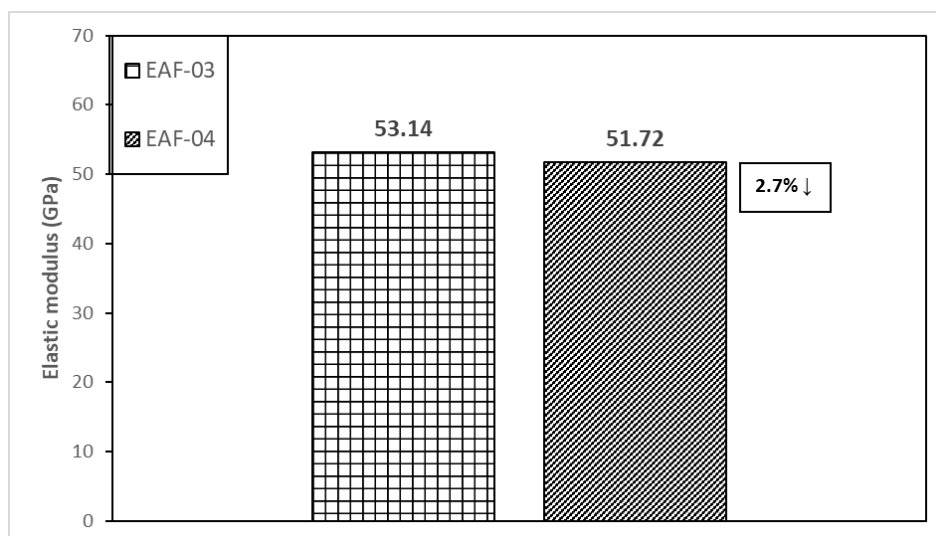
ตารางที่ 42 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนขนาดผลของมวล

รวมหยาบ

| Mix No. | Average Unit weight | Age | F_c' | Average F_c' | SD of F_c' | E | Average E | SD of E |
|---------|---------------------|-----|--------|----------------|--------------|-------|-----------|---------|
| | kg/m ³ | | MPa | | | GPa | | |
| EAF-03 | 3,043 | 14 | 57.73 | 50.86 | 5.16 | 51.19 | 53.14 | 1.97 |
| | | | 45.28 | | | 52.38 | | |
| | | | 49.58 | | | 55.84 | | |
| EAF-04 | 3,016 | 14 | 51.75 | 46.79 | 3.54 | 50.2 | 51.72 | 5.11 |
| | | | 43.71 | | | 46.37 | | |
| | | | 44.91 | | | 58.6 | | |



รูปที่ 66 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม EAF-03 และ EAF-04 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน



รูปที่ 67 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม EAF-03 และ EAF-04 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน

4.5 ผลการปรับปรุงส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

การศึกษานี้ได้ทำให้ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตให้ลดลงเหลือ 0.30 ชื่อว่า ส่วนผสม EAF-05 โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ เพื่อทดสอบหาค่ากำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและส่วนผสม EAF-06 จะใช้สัดส่วนผสมเหมือนกับส่วนผสม EAF-05 ทุกประการ แต่จะใช้ปูนซีเมนต์จากต่างผู้ผลิต เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากยี่ห้อปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ส่วนผสม EAF-01 จะใช้สารลดน้ำพิเศษเป็นปริมาณ 0.5% ของน้ำหนักวัสดุประสาน แต่ส่วนผสม EAF-05 และส่วนผสม EAF-06 จะใช้สารลดน้ำพิเศษเป็นปริมาณ 1% ของน้ำหนักวัสดุประสาน เพื่อที่จะลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้เหลือเพียง 0.30 และยังคงมีความสามารถทำงานได้เพียงพอ หลังจากทำการผสมคอนกรีตได้ทดสอบวัดค่าการยุบตัวพบว่า ส่วนผสม EAF-05 และ EAF-06 แม้จะมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่น้อยกว่า แต่ปริมาณของสารลดน้ำพิเศษที่เพิ่มขึ้น 0.5% ทำให้มีค่าการยุบตัวที่มากกว่าส่วนผสม EAF-01 ประมาณ 12 ซม. โดยส่วนผสมทั้ง 3 จะแสดงในตารางที่ 43

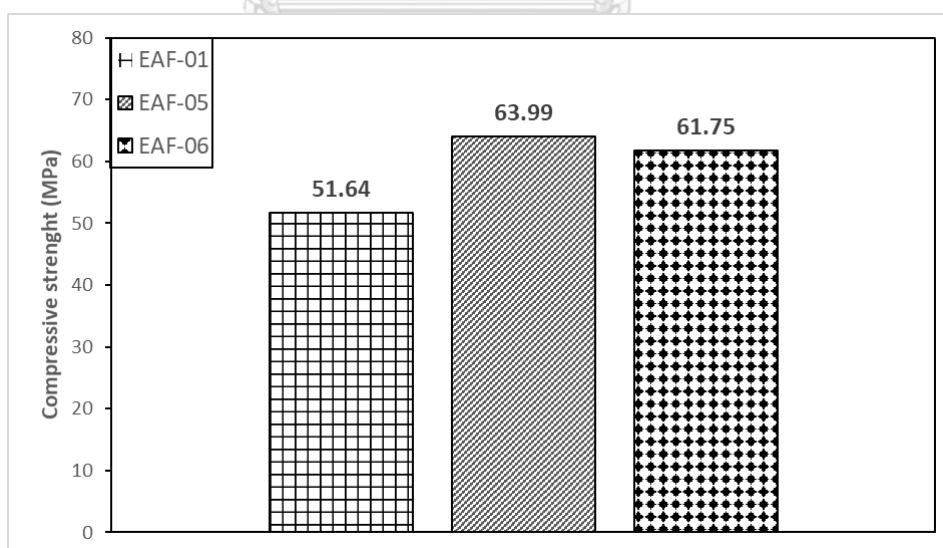
ตารางที่ 43 ส่วนผสมคอนกรีตที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และยี่หื้อปูนซีเมนต์

| Mix No. | EAF-01 | EAF-05 | EAF-06 |
|---------------------------------|--------|--------|--------|
| Cement (kg/m ³) | 534 | 545.6 | 545.6 |
| Water (kg/m ³) | 181.6 | 163.7 | 163.7 |
| River Sand (kg/m ³) | 538.1 | 515.8 | 515.8 |
| 19 mm EAF (kg/m ³) | 931.32 | 951.6 | 951.6 |
| 9.5 mm EAF (kg/m ³) | 620.88 | 634.4 | 634.4 |
| SP (%) | 0.5 | 1 | 1 |
| Slump (cm) | 6.5 | 17.5 | 19 |
| w/c ratio | 0.34 | 0.30 | 0.30 |

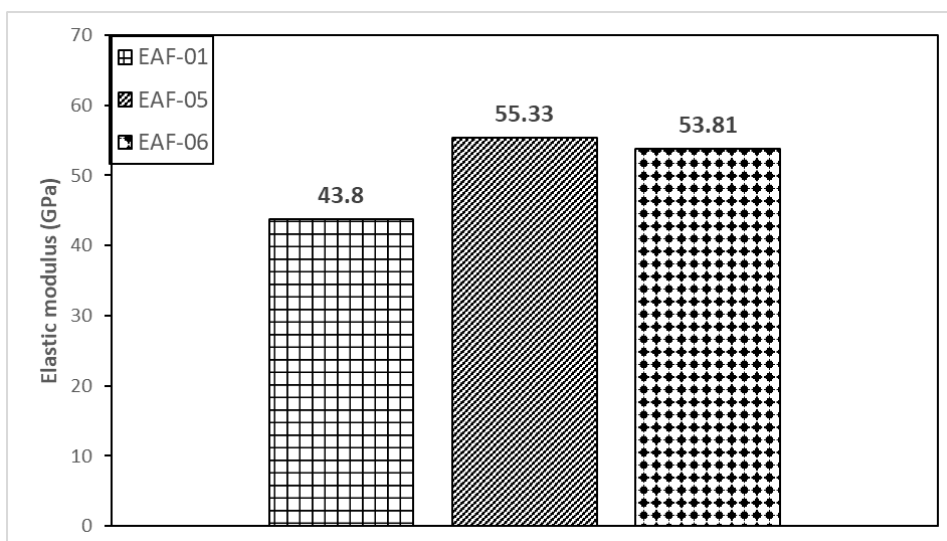
ผลการทดสอบกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตแสดงในตารางที่ 44 พบว่า ส่วนผสม EAF-05 มีกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากที่สุด เท่ากับ 64 MPa และ 55.3 GPa ตามลำดับ รองลงมาคือส่วนผสม EAF-06 มีกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 61.8 MPa และ 53.8 GPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่ายี่หื้อของปูนซีเมนต์ไม่ส่งผลต่อกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ โดยส่วนผสม EAF-05 ถือว่าเป็นส่วนผสมที่ให้คุณสมบัติดีที่สุด มีกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าส่วนผสม EAF-01 ประมาณ 24% และ 26% ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 68 และ 69 ซึ่งแสดงกำลังอัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตทั้ง 3 ส่วนผสม

ตารางที่ 44 ผลการทดสอบกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ปรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และยี่หื้อปูนซีเมนต์

| Mix No. | Average Unit weight | Age | F_c' | Average F_c' | SD of F_c' | E | Average E | SD of E |
|---------|---------------------|-----|--------|----------------|--------------|-------|-----------|---------|
| | kg/m ³ | | MPa | | | | | |
| EAF-01 | 2,898 | 14 | 50.18 | 51.64 | 1.58 | 44.81 | 43.80 | 0.78 |
| | | | 53.83 | | | 43.67 | | |
| | | | 50.91 | | | 42.92 | | |
| EAF-05 | 2,933 | 14 | 68.18 | 63.99 | 3.21 | 52.62 | 55.33 | 2.15 |
| | | | 63.38 | | | 55.48 | | |
| | | | 60.4 | | | 57.89 | | |
| EAF-06 | 2,952 | 14 | 62.18 | 61.75 | 5.10 | 53.74 | 53.81 | 1.52 |
| | | | 55.3 | | | 51.98 | | |
| | | | 67.77 | | | 55.7 | | |

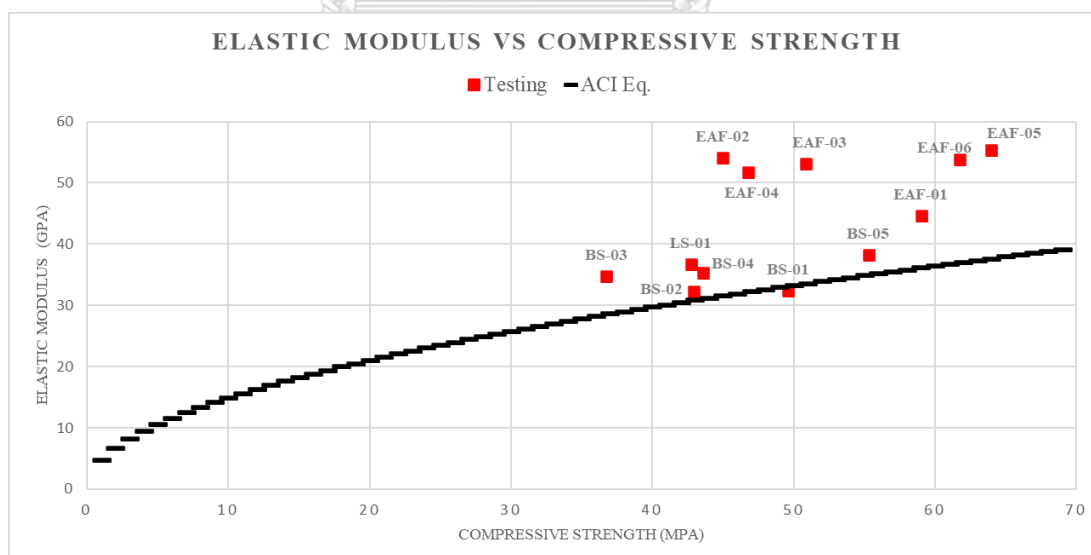


รูปที่ 68 ผลการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสม EAF-01, EAF-05 และ EAF-06 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน



รูปที่ 69 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสม EAF-01, EAF-05 และ EAF-06 ที่อายุคอนกรีต 14 วัน

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบมาทั้งหมดแล้วนั้น จะนำผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของทุกส่วนผสมมาเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากสมการการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมาตรฐาน ACI ซึ่งคือสมการที่ 3.1 ที่ได้แสดงในบทก่อนหน้า โดยผลการเปรียบเทียบจะแสดงในรูปที่ 70



รูปที่ 70 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากสมการตามมาตรฐาน ACI

จากผลในรูปที่ 70 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการทดสอบให้ค่าที่สูงกว่าค่าที่คำนวณจากสมการตามมาตรฐาน ACI ในทุกส่วนผสม โดยจะเห็นว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสมที่ใช้หินปูนและบะซอลต์เป็นวัสดุมวลรวมหยาบจะมีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่าค่าจากสมการเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของส่วนผสมที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมหยาบจะมากกว่าค่าจากสมการถึงประมาณ 30% เนื่องจากส่วนผสมที่ใช้ตะกรันเหล็กจะเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตด้วยคุณสมบัติเชิงกลของตัวตะกรันเหล็กเอง ซึ่งสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติมาก เพราะเหตุนี้ จึงกล่าวได้ว่าผลการหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากสมการของมาตรฐาน ACI ไม่สามารถประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่เปลี่ยนวัสดุมวลรวมหยาบเป็นตะกรันเหล็กได้



บทที่ 5

ประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในการวิเคราะห์โครงสร้าง

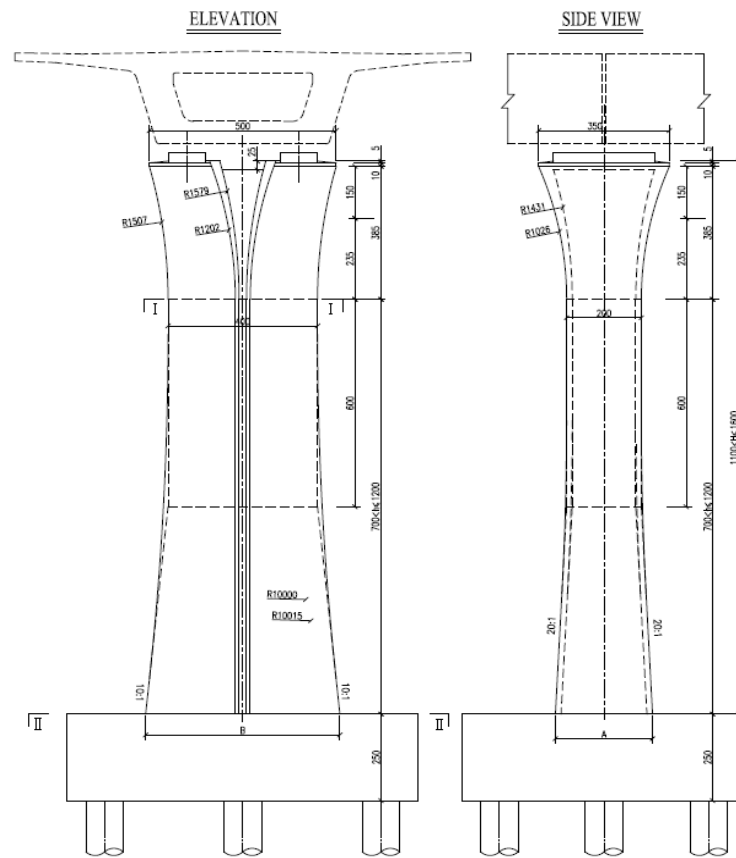
จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาครั้งนี้ ด้วยการปรับปรุงวัสดุผสมให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น พบว่าสามารถทำให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งมีผลทำให้คุณสมบัติด้านกำลังดียิ่งขึ้นด้วย แม้พบว่ามีข้อด้อยในด้านน้ำหนักต่อหน่วยที่จะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ผลการศึกษายังพบว่าการออกแบบให้ส่วนผสมคอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงนั้นสามารถทำได้ไม่ยาก เพราะไม่แปรปรวนตามสัดส่วนผสมเท่าใดนัก ทำให้สามารถนำไปใช้ผลิตจริงได้โดยสะดวก

ในการศึกษานี้จึงจะลองทำการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกับโครงสร้างที่มีแนวโน้มจะได้ประโยชน์จากการใช้คอนกรีตที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง 2 โครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาคและโครงสร้างอาคารชุดพักอาศัย

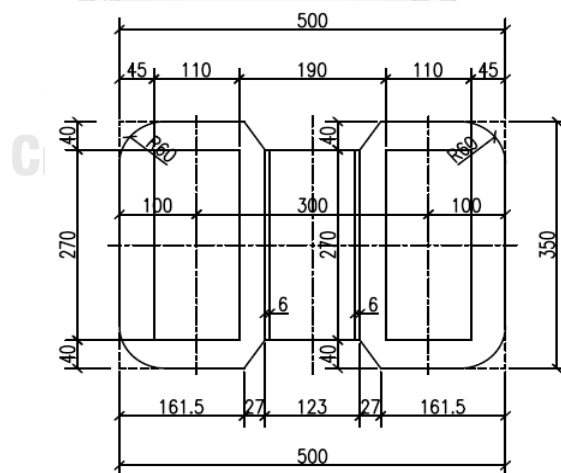
5.1 การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกับโครงสร้างเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูง

5.1.1 โครงสร้างเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค

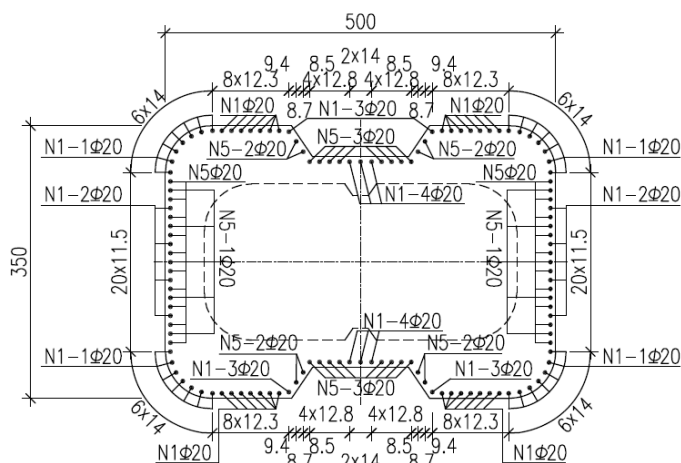
โครงสร้างเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค ช่วงกรุงเทพมหานคร-นครราชสีมา มีระยะทางรวมทั้งสิ้น 251 กม. โดยแบบโครงสร้างเสาตอม่อแสดงในรูปที่ 71 อย่างที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ หน้าตัดโครงสร้างเสาตอม่อมีขนาดกว้าง 3.5 ม. และยาว 5 ม. ดังแสดงในรูปที่ 72 และรูปที่ 73 แสดงแบบเหล็กเสริมของหน้าตัดเสา ถือว่าเป็นหน้าตัดเสาตอม่อที่มีขนาดใหญ่มาก เนื่องจากต้องควบคุมการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาให้ไม่เกินระยะตามที่เกณฑ์มาตรฐานกำหนด ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเบรก (Braking force) และแรงหนีศูนย์กลางของขบวนรถไฟ (Centrifugal force) ทำให้ในกรณีนี้ระยะในการเคลื่อนตัวของโครงสร้างกลายเป็นตัวควบคุมขนาดของโครงสร้างแทนที่กำลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในโครงสร้างเสาตอม่อจึงช่วยลดระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสา ทำให้สามารถลดขนาดหน้าตัดเสาตอม่อให้เล็กลงได้



รูปที่ 71 แบบโครงสร้างเสาต่อม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค



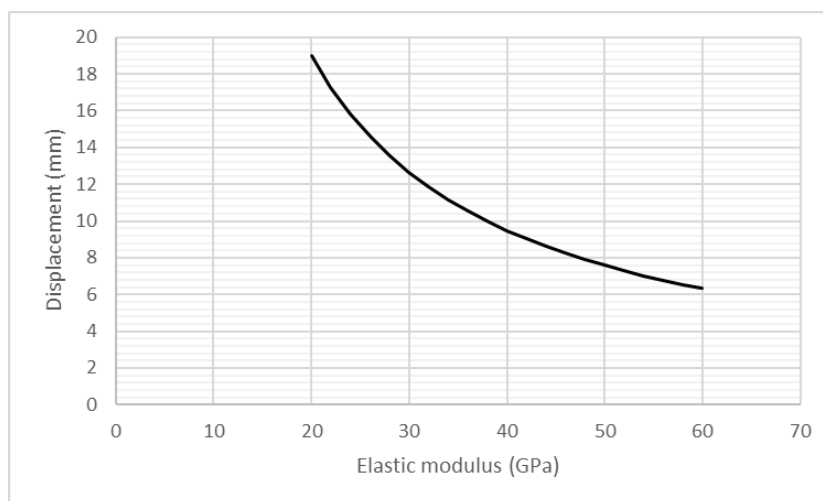
รูปที่ 72 แบบหน้าตัดเสาต่อม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค



รูปที่ 73 แบบเหล็กเสริมหน้าตัดเสาต่อม่อโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค

ในการศึกษานี้จะประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกับโครงสร้างเสาต่อม่อ ซึ่งประเภทของเสาต่อม่อที่นำมาวิเคราะห์จะเป็นโครงสร้างเสาต่อม่อที่ใช้เป็นส่วนใหญ่ในโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค ช่วงกรุงเทพมหานคร-นครราชสีมา มีความสูง 14, 15 และ 16 ม.

หลังจากการวิเคราะห์แบบจำลองของโครงสร้างเสาต่อม่อในเบื้องต้น พบว่าคุณสมบัติด้านกำลังของเสาต่อม่อมีค่าเกินเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดไว้อย่างมาก แต่เนื่องจากต้องควบคุมการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาให้ระยะไม่เกินตามที่มาตรฐานกำหนด จึงทำให้ต้องเพิ่มขนาดเสาต่อม่อให้มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยการเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่จะลดระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ และยังสามารถลดขนาดหน้าตัดของเสาต่อม่อให้เล็กลง ทำให้สามารถประหยัดงบการก่อสร้างได้ โดยรูปที่ 74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่อค่าการเคลื่อนตัวของเสาต่อม่อ จากกราฟพบว่าเมื่อเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างเสาต่อม่อ จะทำให้การเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาของโครงสร้างเสาต่อม่อนั้นลดลง แปรผกผันกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต



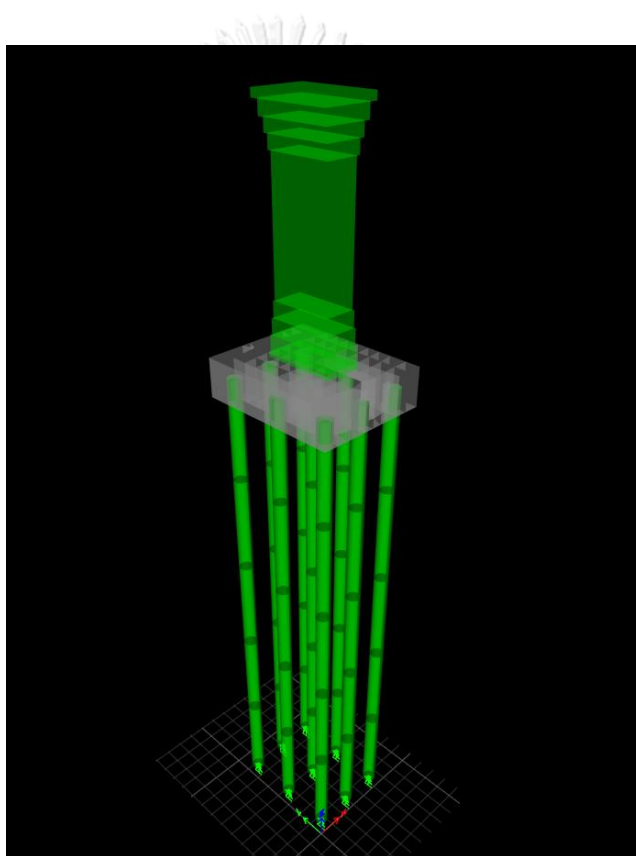
รูปที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่อค่าการเคลื่อนตัวของเสาตอม่อในแบบจำลองเบื้องต้น

จากแบบโครงสร้างเสาตอม่อที่แสดงในรูปที่ 70 และแบบเหล็กเสริมในหน้าตัดโครงสร้างเสาตอม่อในรูปที่ 72 แสดงขนาดหน้าตัดเสากว้าง 3.5 ม. และยาว 5 ม. ทำให้ต้องใช้ปริมาณคอนกรีตกริตและเหล็กเสริมเป็นจำนวนมาก ตารางที่ 45 จึงแสดงปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในการก่อสร้างเสาตอม่อ 1 ต้น โดยคำนวณจากกรณีที่โครงสร้างเสาตอม่อมีความสูง 15 ม. พบว่าในโครงสร้างเสาตอม่อใช้คอนกรีตประมาณ 143 ลูกบาศก์เมตร และเหล็กเสริมประมาณ 3.1 ตัน ซึ่งโครงการรถไฟความเร็วสูงเชื่อมโยงภูมิภาค ช่วงกรุงเทพมหานคร-นครราชสีมา มีระยะทางรวมถึง 251 กม. ส่งผลให้ทั้งโครงการต้องใช้คอนกรีตและเหล็กเสริมจำนวนมากศาลในการก่อสร้างเสาตอม่อรวมไปถึงค่าแรงงานและเวลาที่ใช้ในการก่อสร้าง

ตารางที่ 45 ปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างเสาตอม่อ

| Pier height (m) | Concrete (m ³) | Longitudinal rebars (Ton) | Stirrups (Ton) |
|--------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 15 | 143.2 | 3.1 | 0.6 |

ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลอง Finite element ในโปรแกรม ETABS เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างโดยจะใช้เป็น Line element ในการสร้างแบบจำลองเสาตอม่อ ฐานราก และ เสาเข็ม โดยจะปรับขนาดหน้าตัดแต่ละช่วงความสูงให้มีหลายขนาดเพื่อให้ใกล้เคียงกับโครงสร้างจริง ดังแสดงในรูปที่ 75 คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตที่ใช้แสดงอยู่ในตารางที่ 46 โดยใช้คุณสมบัติของ คอนกรีต C40 ในแบบจำลองโครงสร้าง ซึ่งได้จากรายงานการคำนวณของการรถไฟแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2561 และเนื่องจากในรายงานการคำนวณไม่ได้ระบุค่าโมดูลัสความเฉื่อยแบบแตกร้าวไว้ใน งานวิจัยนี้จึงสมมุติให้ค่าโมดูลัสความเฉื่อยแบบแตกร้าวมีค่า 70% ของค่าโมดูลัสความเฉื่อยแบบไม่ แตกร้าว



รูปที่ 75 แบบจำลองเสาตอม่อในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง

ตารางที่ 46 คุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างเสาตอม่อ (การรถไฟแห่งประเทศไทย 2561)

| CLASS OF CONCRETE | | C50 | C40 |
|--|---|-------|-------|
| Elastic Modulus E (MPa) | | 35500 | 34000 |
| Shear Modulus G (MPa) | | 15265 | 14620 |
| Poisson's Ratio μ | | 0.2 | 0.2 |
| Axial Compressive Strength f_c (MPa) | | 33.5 | 27.0 |
| Axial Tensile Strength f_{ct} (MPa) | | 3.10 | 2.70 |
| Allowable Stress (MPa) | Centrally Compressed | 13.4 | 10.8 |
| | Bending Compressed and Eccentrically Compressed | 16.8 | 13.5 |
| | Principal Tensile Stress with Stirrup and Diagonal Bar | 2.79 | 2.43 |
| | Principal Tensile Stress without Stirrup and Diagonal Bar | 1.03 | 0.9 |

จากการตรวจสอบกำลังของโครงสร้างเสาตอม่อพบว่ามีค่าเกินเกณฑ์ที่มาตรฐานการออกแบบของประเทศไทย (TB 10621-2014) กำหนดไว้มาก ดังที่แสดงในตารางที่ 47 และประเภทของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเสาตอม่อแสดงในตารางที่ 48 หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาด้วยโปรแกรม ETABS ทั้งที่ความสูง 14 ม. 15 ม. และ 16 ม.

ตารางที่ 47 ความเค้นสูงสุดและความเค้นที่ยอมให้ของโครงสร้างเสาตอม่อ (การรถไฟแห่งประเทศไทย 2561)

| Height of pier | Maximum concrete compressive stress (MPa) | Allowable pressure (MPa) |
|----------------|---|--------------------------|
| 14 | 3.426 | 13.5 |
| 15 | 3.166 | 13.5 |
| 16 | 2.989 | 13.5 |

ตารางที่ 48 ประเภทของแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเสาตอม่อ (การรถไฟแห่งประเทศไทย 2561)

| Classification | | Load Name |
|------------------|-----------|--|
| Main Force | Dead Load | Self-weight of structural components and auxiliary equipment Pre-applied force effect of shrinkage and creep of concrete Earth pressure Hydrostatic pressure and flotation effect of foundation displacement |
| | Live Load | Vertical static live load of train Highway live load (considered when necessary) Vertical dynamic effect of train Longitudinal horizontal force of long rail (expansion force and deflecting force) Centrifugal force Lateral Swaying Force Earth pressure due to live load Loads of walkway and handrail Aerodynamic force |
| Additional Force | | Braking force or tractive force Wind force Pressure of water flow Effect of temperature change |

ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้า โครงสร้างเสาตอม่อจะถูกกระทำด้วยแรงเบรกและแรงหนีศูนย์กลางของขบวนรถไฟในทิศทางด้านข้างทั้งแนวนานกับรางและตั้งฉากกับราง แต่เนื่องจากในรายงานการคำนวณไม่ได้แสดงแรงดังกล่าวไว้อย่างชัดเจน แต่ได้แสดงค่าระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาและค่าความแข็งแรงของโครงสร้างไว้ ดังแสดงในตารางที่ 49 และ 50 รวมไปถึงเกณฑ์การเคลื่อนตัวตามมาตรฐานการออกแบบของประเทศจีน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงจะใช้แรงเทียบเท่าที่กระทำบริเวณหัวเสาทั้ง 2 ทิศทาง โดยคำนวณจากค่าระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาและค่าความแข็งแรงของโครงสร้าง ซึ่งได้ผลการคำนวณแรงในทิศทางขนานกับรางและทิศทางตั้งฉากกับราง ในกรณีเสาสูง 14 ม. 15 ม. และ 16 ม. ดังที่แสดงในตารางที่ 51

ตารางที่ 49 ค่าความแข็งแรงและเกณฑ์ตามมาตรฐานของโครงสร้างเสาตอม่อแต่ละความสูง (การรถไฟแห่งประเทศไทย 2561)

| Height of pier | Longitudinal stiffness of pier top (kN/cm) | Transverse stiffness of pier top (kN/cm) | Longitudinal stiffness limit value (kN/cm) | Transverse stiffness limit value (kN/cm) |
|----------------|--|--|--|--|
| 14 | 636 | 1,497 | 350 | 927 |
| 15 | 570 | 1,336 | 350 | 927 |
| 16 | 516 | 1,202 | 350 | 927 |

ตารางที่ 50 ค่าระยะการเคลื่อนตัวของบริเวณหัวเสาและเกณฑ์ตามมาตรฐานของเสาตอม่อแต่ละความสูง
(การรถไฟแห่งประเทศไทย 2561)

| Height of pier | Longitudinal horizontal displacement (mm) | Transverse horizontal displacement (mm) | Longitudinal horizontal displacement limit value (mm) | Transverse horizontal displacement limit value (mm) |
|----------------|---|---|---|---|
| 14 | 6.63 | 10.14 | 12.08 | 15.75 |
| 15 | 7.35 | 11.15 | 12.08 | 15.75 |
| 16 | 8.19 | 12.15 | 12.08 | 15.75 |

ตารางที่ 51 แรงเทียบเท่าที่กระทำบริเวณหัวเสาของโครงสร้างเสาตอม่อ

| Height of pier | Longitudinal horizontal force (kN) | Transverse horizontal force (kN) |
|----------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 14 | 421.7 | 1,518 |
| 15 | 419 | 1,490 |
| 16 | 422.6 | 1,460.4 |

จากผลการวิเคราะห์กำลังของโครงสร้างเสาตอม่อ ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้า พบว่าผ่านเกินเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด โดยความเค้นสูงสุดมีค่า 3.43 MPa แต่ค่าความเค้นที่ยอมให้ของโครงสร้างเสาตอม่อสูงถึง 13.5 MPa ซึ่งความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นคิดเป็นประมาณ 25% ของความเค้นที่ยอมให้เท่านั้น เมื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของบริเวณหัวเสาพบว่าเสาตอม่อสูง 16 ม. เกิดระยะการเคลื่อนตัวมากที่สุด ซึ่งเคลื่อนตัวเป็นระยะ 8.19 มม. ในทิศทางตามแนวรางและเคลื่อนตัวเป็นระยะ 12.15 มม. ในทิศทางตั้งฉากกับแนวราง ดังนั้นระยะการเคลื่อนตัวของบริเวณหัวเสาเป็นจึงตัวควบคุมที่ส่งผลให้ต้องใช้เสาที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่ เพื่อลดการเคลื่อนตัวของบริเวณหัวเสาไม่ให้เกินเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจึงเป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพในการช่วยลดการเคลื่อนตัวของบริเวณหัวเสาและขนาดหน้าตัดของโครงสร้าง

5.1.2 การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกับโครงสร้างเสาตอม่อ

ในการศึกษานี้จะประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทดแทนคอนกรีตดั้งเดิมที่ใช้ในโครงสร้างเพื่อลดระยะการเคลื่อนตัวของบริเวณหัวเสา โดยจะเลือกใช้ส่วนผสม EAF-05 ซึ่งได้ทดสอบมาก่อนหน้าแล้วว่ามีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 55.33 GPa ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุดในงานวิจัยนี้ หลังจากนั้นจะวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง เพื่อหาระยะการเคลื่อนตัวของบริเวณหัวเสาและค่าความแข็งแรงของโครงสร้างเสาตอม่อ โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 52

ตารางที่ 52 ค่าการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาและความแข็งเกร็งของโครงสร้างเมื่อประยุกต์ใช้คอนกรีต
โมดูลัสยืดหยุ่นสูง

| Height of pier | Longitudinal stiffness of pier top (kN/cm) | Transverse stiffness of pier top (kN/cm) | Longitudinal horizontal displacement (mm) | Transverse horizontal displacement (mm) |
|----------------|--|--|---|---|
| 14 | 834 | 1,905 | 5.06 | 7.97 |
| 15 | 751 | 1,705 | 5.58 | 8.73 |
| 16 | 682 | 1,538 | 6.20 | 9.50 |

จากผลการวิเคราะห์พบว่าระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาลดลงในทุกความสูง โดยเสาต่อม่อสูง 14 ม. ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาลดลงจาก 6.63 มม. เหลือ 5.06 มม. ในทิศทางตามแนวราง คิดเป็นประมาณ 23.7% และระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาลดลงจาก 10.14 มม. เหลือ 7.97 มม. ในทิศทางตั้งฉากกับแนวราง คิดเป็นประมาณ 21.4% ในเสาต่อม่อสูง 15 ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาลดลงจาก 7.35 มม. เหลือ 5.58 มม. ในทิศทางตามแนวราง คิดเป็นประมาณ 24.1% และระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาลดลงจาก 11.15 มม. เหลือ 8.73 มม. ในทิศทางตั้งฉากกับแนวราง คิดเป็นประมาณ 21.7% และในเสาต่อม่อสูง 16 ม. ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาลดลงจาก 8.19 มม. เหลือ 6.2 มม. ในทิศทางตามแนวราง คิดเป็นประมาณ 24.3% และระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาลดลงจาก 12.15 มม. เหลือ 9.5 มม. ในทิศทางตั้งฉากกับแนวราง คิดเป็นประมาณ 21.81% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันในทุกความสูง

จากผลการวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาส่งผลให้ค่าความแข็งเกร็งของโครงสร้างเสาต่อม่อเพิ่มขึ้นในทุกความสูงเช่นกัน โดยเสาต่อม่อสูง 14 ม. ความแข็งเกร็งของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจาก 636 kN/cm เป็น 834 kN/cm ในทิศทางตามแนวราง คิดเป็นประมาณ 31.13% และความแข็งเกร็งของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจาก 1497 kN/cm เป็น 1905 kN/cm ในทิศทางตั้งฉากกับแนวราง คิดเป็นประมาณ 27.25% ในเสาต่อม่อสูง 15 ม. ความแข็งเกร็งของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจาก 570 kN/cm เป็น 751 kN/cm ในทิศทางตามแนวราง คิดเป็นประมาณ 31.75% และความแข็งเกร็งของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจาก 1336 kN/cm เป็น 1705 kN/cm ในทิศทางตั้งฉากกับแนวราง คิดเป็นประมาณ 27.62% และในเสาต่อม่อสูง 16 ม. ความแข็งเกร็งของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจาก 516 kN/cm เป็น 682 kN/cm ในทิศทางตามแนวราง คิดเป็นประมาณ 31.16% และความแข็งเกร็งของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจาก 1202 kN/cm เป็น 1538 kN/cm ในทิศทางตั้งฉากกับแนวราง คิดเป็นประมาณ 27.95% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันในทุกความสูงเช่นเดียวกันกับระยะการเคลื่อนตัว ในตารางที่ 53 และ 54 จะแสดงผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง จึงสามารถกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทดแทนคอนกรีตดั้งเดิมที่ใช้ในโครงสร้างสามารถลด

ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาและเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างเสาตอม่อได้และจะเห็นผลมากขึ้นตามความสูงของโครงสร้างเสาตอม่อที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 53 ความแข็งแรงของโครงสร้างเสา ก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

| Height of pier | Normal concrete | | High modulus concrete | |
|----------------|--|--|--|--|
| | Longitudinal stiffness of pier top (kN/cm) | Transverse stiffness of pier top (kN/cm) | Longitudinal stiffness of pier top (kN/cm) | Transverse stiffness of pier top (kN/cm) |
| 14 | 636 | 1,497 | 834 | 1,905 |
| 15 | 570 | 1,336 | 751 | 1,705 |
| 16 | 516 | 1,202 | 682 | 1,538 |

ตารางที่ 54 ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาของโครงสร้างเสาตอม่อ ก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

| Height of pier | Normal concrete | | High modulus concrete | |
|----------------|---|---|---|---|
| | Longitudinal horizontal displacement (mm) | Transverse horizontal displacement (mm) | Longitudinal horizontal displacement (mm) | Transverse horizontal displacement (mm) |
| 14 | 6.63 | 10.14 | 5.06 | 7.97 |
| 15 | 7.35 | 11.15 | 5.58 | 8.73 |
| 16 | 8.19 | 12.15 | 6.20 | 9.50 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1.3 การลดขนาดหน้าตัดโครงสร้างเสาตอม่อหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

จากผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมามีพบว่า การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสามารถลดระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาและเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างเสาตอม่อได้ โดยสามารถลดการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาได้ประมาณ 24% ในทิศทางตามแนวราบและ 22% ในทิศทางตั้งฉากกับแนวราบ และเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างได้ประมาณ 31% ในทิศทางตามแนวราบและ 22% ในทิศทางตั้งฉากกับแนวราบ เพื่อที่จะลดปริมาณวัสดุก่อสร้าง รวมไปถึงแรงงานและเวลาที่ต้องเสียไปในการก่อสร้าง ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการลดขนาดหน้าตัดเสาตอม่อทั้งด้านกว้างและด้านยาว จนกว่าโครงสร้างเสาตอม่อจะมีระยะการเคลื่อนตัวเท่าเดิมก่อนการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง โดยขนาดเดิมกว้าง 3.5 ม. และ ยาว 5 ม. ซึ่งถือว่ามีความใหญ่มากเพื่อควบคุมการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาให้ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน

ตารางที่ 55 ระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเสาตอม่อภายหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัส
ยัดหยุ่นสูงและลดขนาดหน้าตัด

| Height of pier | Concrete Cross-section Width (m) | Concrete Cross-section Depth (m) | Before Reduction | | After Reduction | |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|---|---|---|---|
| | | | Longitudinal horizontal displacement limit value (mm) | Transverse horizontal displacement limit value (mm) | Longitudinal horizontal displacement (mm) | Transverse horizontal displacement (mm) |
| 14 | 3.15 | 4.05 | 6.63 | 10.14 | 6.58 | 9.90 |
| 15 | 3.15 | 4.05 | 7.35 | 11.15 | 7.33 | 11.08 |
| 16 | 3.15 | 4.05 | 8.19 | 12.15 | 8.09 | 12.28 |

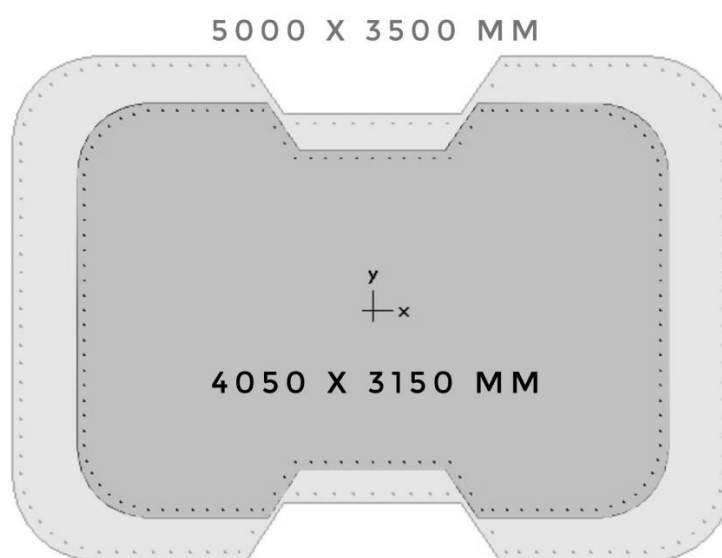
หลังจากได้ทำการลดขนาดหน้าตัด ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 55 พบว่าในเสาตอม่อทุกความสูงสามารถลดขนาดหน้าตัดโครงสร้างลงได้เหลือความกว้าง 3.15 ม. (Y-Direction) และยาว 4.05 ม. (X-Direction) แต่ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาและความแข็งแรงของโครงสร้างเสาตอม่อยังคงใกล้เคียงเดิม ส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดลดลงจากเดิมคือ 17.50 ม² เหลือ 12.7 ม² ซึ่งคิดเป็นการลดลงประมาณ 28% ปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้จึงลดลงด้วยเช่นกัน ดังที่แสดงในตารางที่ 56 โดยที่เสาตอม่อความสูง 14 ม. ปริมาณคอนกรีตลดลงจาก 131.13 ม³ เหลือ 94.53 ม³ เสาตอม่อความสูง 15 ม. ปริมาณคอนกรีตลดลงจาก 143.17 ม³ เหลือ 103.21 ม³ และเสาตอม่อความสูง 16 ม. ปริมาณคอนกรีตลดลงจาก 156.23 ม³ เหลือ 112.62 ม³ ซึ่งในเสาทุกความสูงจะใช้ปริมาณคอนกรีตลดลงประมาณ 28% และเหล็กเสริมในโครงสร้างจะถูกลดลงด้วยเช่นเดียวกัน โดยจะแสดงในตารางที่ 57 จากตารางการลดปริมาณเหล็กเสริมจะเห็นว่า เมื่อโครงสร้างเสาตอม่อถูกลดขนาดหน้าตัดลงจากการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยัดหยุ่นสูง ปริมาณเหล็กเสริมในโครงสร้างจะลดลงไปประมาณ 28% เท่ากันในทุกความสูงของโครงสร้างเสาตอม่อ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยัดหยุ่นสูงสามารถช่วยลดระยะการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาและช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างเสาตอม่อ ซึ่งนำไปสู่การลดขนาดหน้าตัดของเสาตอม่อ ทำให้ปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ลดลงตามไปด้วย โดยจะลดปริมาณวัสดุได้มากขึ้นตามความสูงของเสาตอม่อ

ตารางที่ 56 การลดขนาดหน้าตัดและปริมาณคอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างเสาตอม่อ

| Height of pier | Area of section (m ²) | Section area reduction (m ²) | Percent reduction (%) | Volume of concrete (m ³) | Concrete volume reduction (m ³) | Percent reduction (%) |
|----------------|-----------------------------------|--|-----------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|
| 14 | 17.5 | 4.88 | 27.91 | 131 | 37 | 27.91 |
| 15 | 17.5 | 4.88 | 27.91 | 143 | 40 | 27.91 |
| 16 | 17.5 | 4.88 | 27.91 | 156 | 44 | 27.91 |

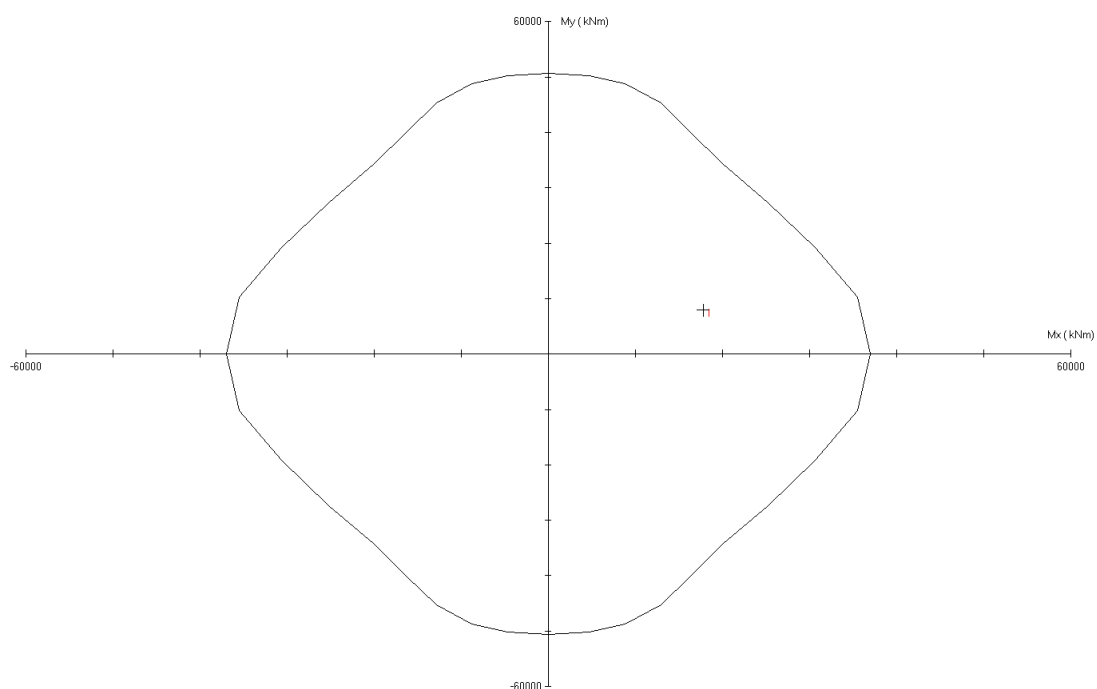
ตารางที่ 57 การลดปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างเสาตอม่อ

| Height of pier | Sectional area of rebar (mm ²) | Area reduction (mm ²) | Percent reduction (%) | Volume of rebar (m ³) | Rebar volume reduction (m ³) | Percent reduction (%) |
|----------------|--|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|-----------------------|
| 14 | 40212 | 11,176.4 | 27.79 | 0.364 | 0.102 | 27.91 |
| 15 | 40212 | 11,176.4 | 27.79 | 0.399 | 0.111 | 27.91 |
| 16 | 40212 | 11,176.4 | 27.79 | 0.437 | 0.122 | 27.91 |

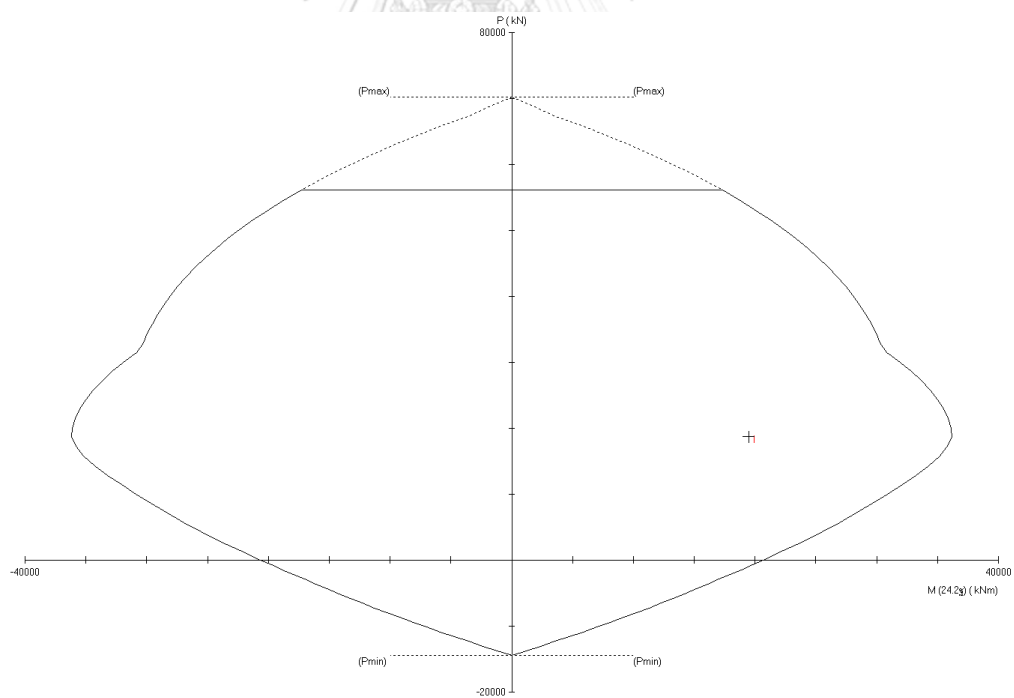


รูปที่ 76 ขนาดหน้าตัดโครงสร้างเสาตอม่อก่อนและหลังการลดขนาด

เมื่อลดขนาดหน้าตัดจนได้ขนาดที่มีค่าการเคลื่อนตัวบริเวณหัวเสาเท่าเดิมแล้ว โดยภาพขนาดหน้าตัดโครงสร้างเสาตอม่อก่อนและหลังลดจะแสดงในรูปที่ 76 หลังจากนั้นจะทำการตรวจสอบกำลังของหน้าตัดเสาตอม่อ โดยกราฟกำลังรับแรงดัดและแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของหน้าตัดจะแสดงในรูปที่ 77 และ 78 โดยใช้แรงตามที่ระบุไว้ในรายงานการคำนวณของผู้ออกแบบ ซึ่งกำหนดใช้แรงตามแนวแกนเท่ากับ 18,788.15 kN ใช้โมเมนต์รอบแกน x เท่ากับ 17,806.59 kN-m และใช้โมเมนต์รอบแกน y เท่ากับ 7,990.69 kN-m ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นในตัวโครงสร้างเสาตอม่อจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง หลังจากการวิเคราะห์พบว่าแม้จะลดขนาดหน้าตัดเสาตอม่อลง แต่ขนาดหน้าตัด กว้าง 3.15 ม. และ ยาว 4.05 ม. ยังสามารถรับแรงและโมเมนต์ได้ผ่านเกณฑ์ตามที่มาตรฐานกำหนด ทั้งนี้เพราะโครงสร้างเสาตอม่อโครงการรถไฟความเร็วสูงนั้นถูกควบคุมจากค่าการเคลื่อนตัวเป็นหลัก



รูปที่ 77 แผนภูมิกำลังรับแรงดัดของโครงสร้างเสาคอม่อ



รูปที่ 78 แผนภูมิปฏิสัมพันธ์ของโครงสร้างเสาคอม่อ

หลังจากประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงและทำการลดขนาดหน้าตัดแล้ว ในหัวข้อนี้จะทำการคำนวณราคาวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างเสาตอม่อทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยใช้ราคาวัสดุก่อสร้างจากบัญชีปริมาณงาน (Bill of quantities) เพื่อเปรียบเทียบราคาวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงเพื่อลดขนาดหน้าตัดโครงสร้างเสาตอม่อ โดยคอนกรีตดั้งเดิมกำลัง 400 ksc มีราคา 2,749 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และเหล็กเสริมมีราคา 27,455 บาทต่อตัน ซึ่งราคาวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างเสาตอม่อก่อนการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงต่อต้านแสดงในตารางที่ 58

ตารางที่ 58 ราคาวัสดุโครงสร้างเสาตอม่อก่อนการลดขนาดหน้าตัด

| Pier height (m) | Concrete volume (m ³) | Longitudinal rebars (Ton) | Concrete price (Thb) | Longitudinal rebar price (Thb) | Total price (Thb) |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------|
| 14 | 131 | 2.86 | 360,119 | 78,449 | 438,568 |
| 15 | 143 | 3.13 | 393,107 | 85,994 | 479,101 |
| 16 | 156 | 3.43 | 428,844 | 94,181 | 523,025 |

จากตารางจะเห็นว่าโครงสร้างเสาตอม่อสูง 14 ม. ใช้ปริมาณคอนกรีต 131 ม³ และใช้ปริมาณเหล็กเสริม 0.364 ม³ เป็นน้ำหนัก 2.86 ตัน เสาตอม่อสูง 15 ม. ใช้ปริมาณคอนกรีต 143 ม³ และใช้ปริมาณเหล็กเสริม 0.399 ม³ เป็นน้ำหนัก 3.13 ตัน และเสาตอม่อสูง 16 ม. ใช้ปริมาณคอนกรีต 156 ม³ และใช้ปริมาณเหล็กเสริม 0.437 ม³ เป็นน้ำหนัก 3.43 ตัน เมื่อคำนวณราคาวัสดุโครงสร้างเสาตอม่อ 1 ตัน จะใช้เงินค่าวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริม 438,568 บาท ในโครงสร้างเสาสูง 14 ม. 479,101 บาท ในโครงสร้างเสาสูง 15 ม. และ 523,025 บาท ในโครงสร้างเสาสูง 16 ม.

ตารางที่ 59 ราคาวัสดุโครงสร้างเสาตอม่อหลังการลดขนาดหน้าตัด

| Pier height (m) | Concrete volume (m ³) | Longitudinal rebars (Ton) | Concrete price (Thb) | Longitudinal rebar price (Thb) | Total price (Thb) |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------|
| 14 | 94 | 2.06 | 258,406 | 56,466 | 314,872 |
| 15 | 103 | 2.26 | 283,147 | 62,070 | 345,217 |
| 16 | 112 | 2.47 | 307,888 | 67,890 | 375,778 |

หลังจากนั้นจะคำนวณราคาวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมหลังการลดขนาดหน้าตัด โดยจะแสดงในตารางที่ 59 ซึ่งในการคำนวณราคาจะกำหนดให้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงมีราคา 3,500 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยประมาณจากราคาวัสดุที่ใช้และราคาคอนกรีตผสมเสร็จในท้องตลาด จาก

ตารางจะเห็นว่าราคาวัสดุโครงสร้างเสาต่อม่อตื้นลดลงทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ลดลง 53,102 บาท คิดเป็นการลดลง 12.1% ในโครงสร้างเสาต่อม่อสูง 14 ม. วัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ลดลง 56,531 บาท คิดเป็นการลดลง 11.8% ในโครงสร้างเสาต่อม่อสูง 15 ม. และวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ลดลง 63,135 บาท คิดเป็นการลดลง 12.1% ในโครงสร้างเสาต่อม่อสูง 16 ม. ซึ่งราคาวัสดุก่อสร้างที่ลดลงในเสาแต่ละความสูงจะแสดงในตารางที่ 60

ตารางที่ 60 ราคาคอนกรีตและเหล็กเสริมต่อตันที่ลดลงเมื่อลดขนาดหน้าตัดโครงสร้างเสาต่อม่อ

| Pier height (m) | Price difference (Thb) | Price difference (%) |
|-----------------|------------------------|----------------------|
| 14 | 123,696 | 28.2 |
| 15 | 133,884 | 27.9 |
| 16 | 147,247 | 28.2 |

หลังจากคำนวณราคาวัสดุของโครงสร้างเสาต่อม่อตื้นก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงแล้ว พบว่าราคาวัสดุลดลงไปประมาณ 12% ซึ่งในโครงการรถไฟความเร็วสูงเพื่อเชื่อมโยงภูมิภาค ช่วงกรุงเทพมหานคร-นครราชสีมา มีระยะทาง 251.4 กม. โดยมีโครงสร้างเสาต่อม่อประมาณ 6,000 ต้น เมื่อคิดราคาโครงสร้างเสาต่อม่อตลอดทั้งเส้นทางของโครงการแล้ว ก่อนการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง จะใช้วัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมเฉลี่ยประมาณ 86,000 ลูกบาศก์เมตร และ 18,840 ตัน คิดเป็นราคาเฉลี่ยรวมประมาณ 2,881 ล้านบาท ภายหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทำให้สามารถลดปริมาณวัสดุทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมเหลือเพียง 618,000 ลูกบาศก์เมตร และ 13,581 ตัน คิดเป็นราคาเฉลี่ยรวมประมาณ 2,536 ล้านบาท ทำให้ประหยัดค่าวัสดุก่อสร้างไปกว่า 346 ล้านบาท ซึ่งนับเป็นการลดปริมาณวัสดุก่อสร้างที่ใช้และนำไปสู่การประหยัดงบการก่อสร้างรวมไปถึงเวลาอย่างมหาศาล

แต่ถึงอย่างไร การใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงยังมีข้อด้อยในเรื่องน้ำหนัก เนื่องจากตะกรันเหล็กที่ถูกใช้เป็นวัสดุมวลรวมหยาบมีหน่วยน้ำหนักถึง $2,101 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมากกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติที่มีหน่วยน้ำหนักประมาณ $1,600 \text{ kg/m}^3$ เท่านั้น ทำให้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงมีหน่วยน้ำหนักสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปถึง 22% ด้วยเหตุนี้ จึงส่งผลให้ระบบฐานรากต้องรับน้ำหนักมากขึ้นและอาจต้องเพิ่มความหนาหรือจำนวนเสาเข็ม เมื่อต้องประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

อย่างไรก็ตาม ในโครงการรถไฟความเร็วสูงนี้ ข้อมูลน้ำหนักของคอนกรีตไม่ได้ระบุในรายงานการคำนวณ ในงานวิจัยนี้จึงจะคำนวณโดยการสมมุติให้คอนกรีตทั่วไปมีหน่วยน้ำหนัก $2,400 \text{ kg/m}^3$ และจากบทก่อนหน้า คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ $2,933 \text{ kg/m}^3$ ดังนั้นจึง

สามารถคำนวณน้ำหนักของโครงสร้างเสาตอม่อได้ ดังที่แสดงในตารางที่ 61 จากตารางจะเห็นว่า แม้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะมีน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตทั่วไปถึง 22% แต่เมื่อทำการลดขนาดหน้าตัดของโครงสร้างแล้ว โครงสร้างเสาตอม่อที่ประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงยังมีน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปประมาณ 12% ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบฐานรากของโครงสร้าง

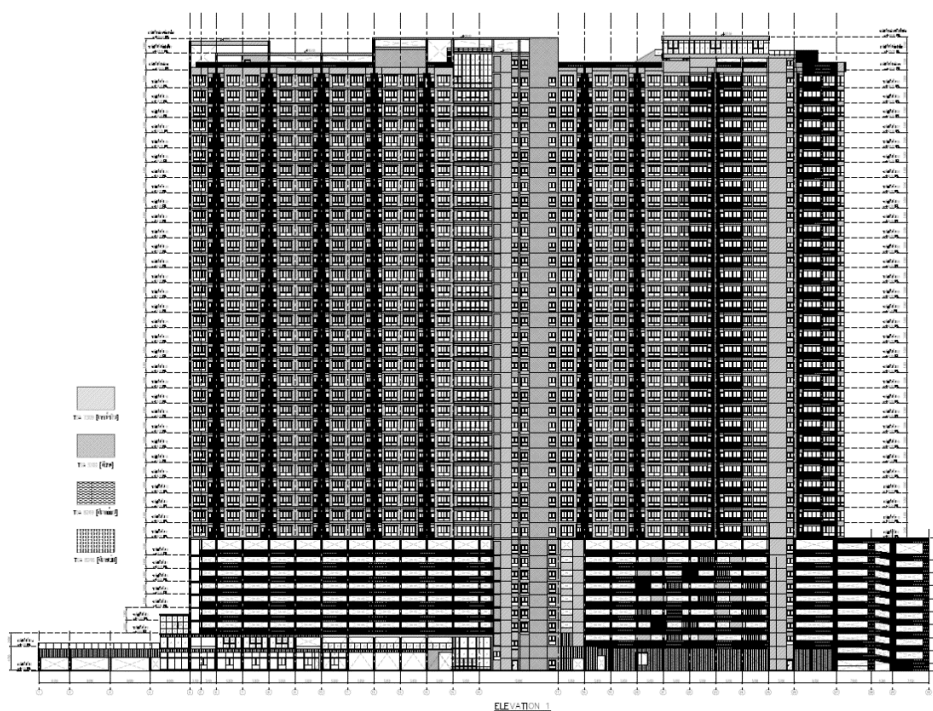
ตารางที่ 61 ปริมาตรและน้ำหนักของโครงสร้างเสาตอม่อ

| Height of pier | Normal concrete | | High modulus concrete | | Percent reduction (%) |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | Volume of concrete (m ³) | Weight of Concrete (Ton) | Volume of concrete (m ³) | Weight of Concrete (Ton) | |
| 14 | 131 | 314.4 | 94 | 275.7 | 12.3 |
| 15 | 143 | 343.2 | 103 | 302.1 | 12.0 |
| 16 | 156 | 374.4 | 112 | 328.5 | 12.2 |

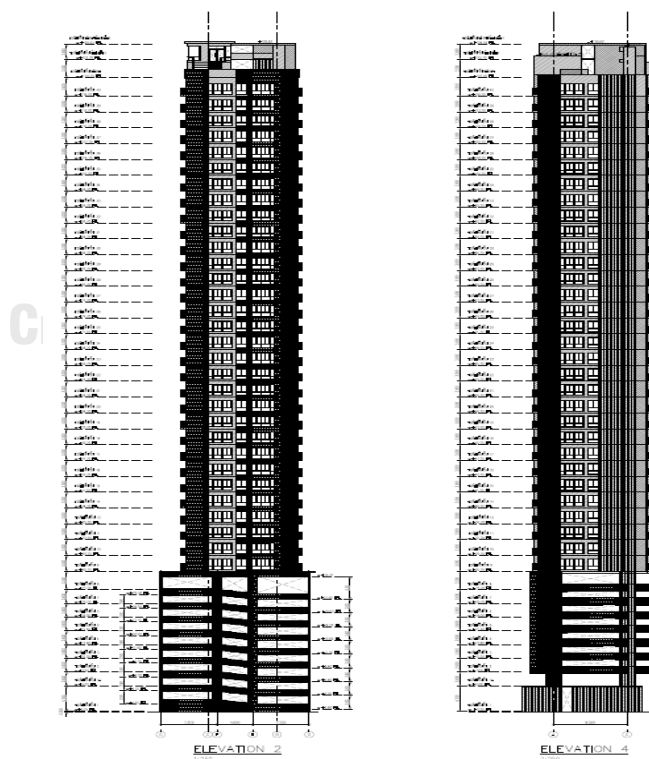
จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงเป็นพิเศษ สามารถช่วยลดระยะการเคลื่อนตัวและช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างได้เป็นอย่างดีมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สามารถลดปริมาณวัสดุก่อสร้าง แรงงาน รวมไปถึงระยะเวลาและงบประมาณในการก่อสร้างได้

5.2 การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกับโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนในอาคารสูงชะลูด

นอกจากการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกับโครงสร้างเสาตอม่อในหัวข้อก่อนหน้านี้ในการศึกษานี้จะนำคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนในอาคารสูงชะลูด 42 ชั้น โดยจะแสดงแบบของอาคารตัวอย่างในรูปที่ 79 และ 80 จากนั้นจะวิเคราะห์ด้วยการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง ETABS อย่างที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ อาคารสูงชะลูดนั้นจำเป็นจะต้องควบคุมการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาภายใต้แรงลมให้ไม่เกินเกณฑ์ตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 กำหนด เมื่อต้องการออกแบบอาคารสูงชะลูด การเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาจึงเป็นปัจจัยสำคัญเช่นเดียวกับความแข็งแรงและเสถียรภาพของโครงสร้าง ซึ่งนำไปสู่การกำหนดขนาดหน้าตัดของโครงสร้าง

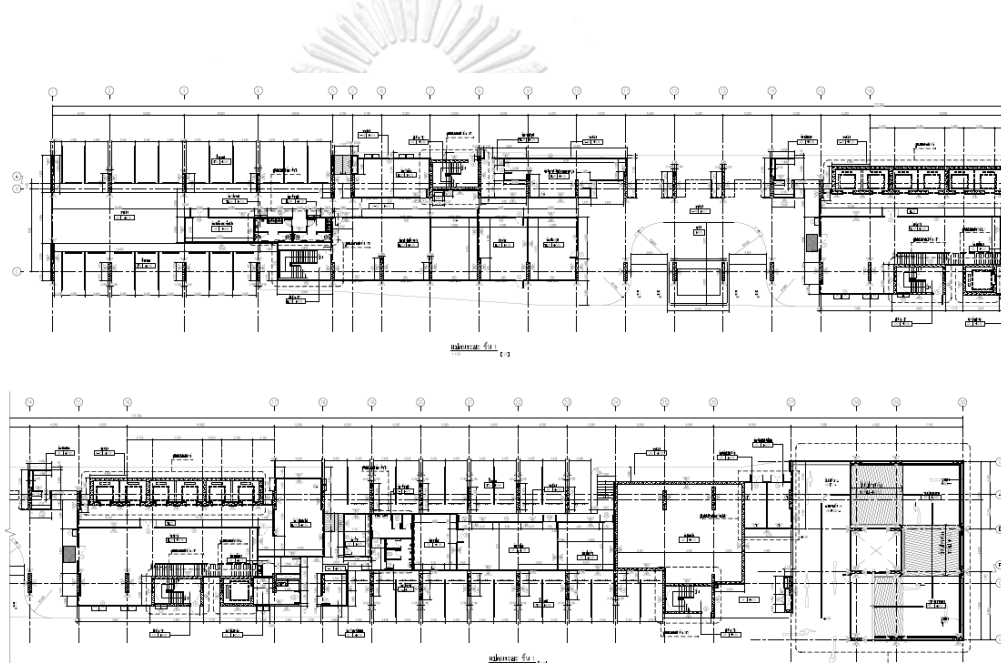


รูปที่ 79 แบบด้านหน้าของอาคารตัวอย่าง



รูปที่ 80 แบบด้านข้างของอาคารตัวอย่าง

หลังจากนั้นจะนำคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน (Shear wall) ของอาคารตัวอย่าง ซึ่งมีความสูง 42 ชั้น มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ขนาดกว้าง 14 ม. ยาว 129 ม. สูง 127 ม. โดยประมาณ เพื่อลดขนาดผนังรับแรงเฉือน ซึ่งมีความหนาเดิม 40 ซม. โดยแบบแปลนของอาคารจะแสดงอยู่ในรูปที่ 81 เนื่องจากอาคารสูงจะลดโดยมากจะมีการโก่งตัวสูง อันเนื่องมาจากแรงแผ่นดินไหว (Seismic load) และแรงลม (Wind load) ซึ่งในกรณีนี้ พบว่าเกณฑ์การเคลื่อนตัวด้านข้าง (Lateral deformation criteria) เป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบอาคารสูง เช่นเดียวกับความแข็งแรงของโครงสร้าง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการออกแบบและราคาของโครงสร้าง ดังนั้นการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคาร มากกว่าการเพิ่มขนาดหน้าตัดโครงสร้าง



รูปที่ 81 แบบแปลนของอาคารตัวอย่าง

การวิเคราะห์การโก่งตัวด้านข้างของโครงสร้างอาคาร จะใช้เกณฑ์ตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 ซึ่งได้กำหนดให้การเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคามีค่าไม่เกิน $1/500$ ของความสูงอาคาร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะควบคุมระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของโครงสร้างอาคารตัวอย่างให้มีค่าไม่เกิน 25.3 ซม.

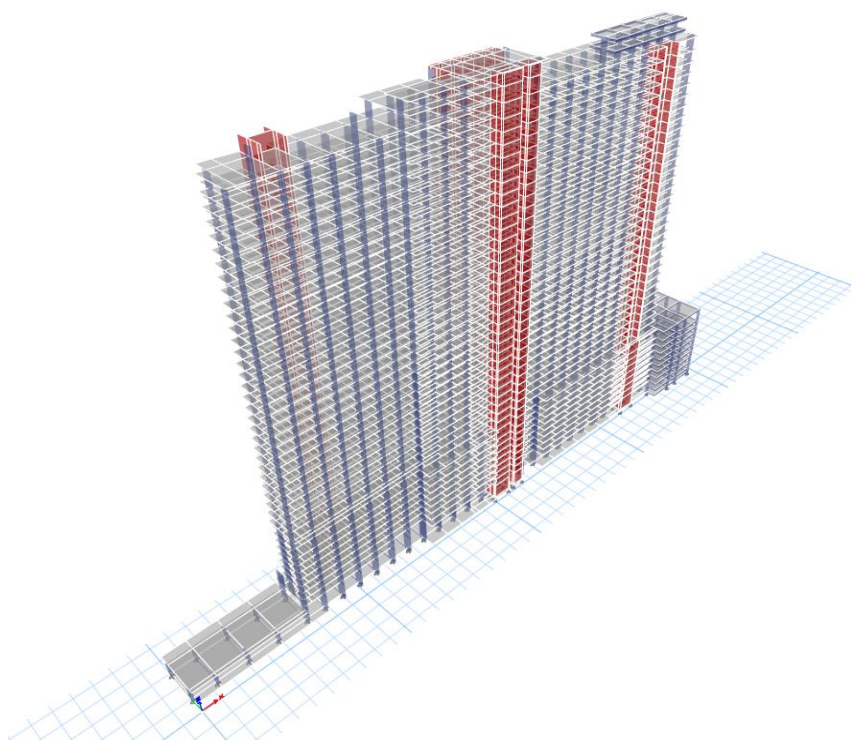
อย่างที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ แบบจำลองจะถูกใช้เพื่อการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างอาคารจะแสดงในตารางที่ 62 จากนั้นจะพิจารณาแรงลมในแต่ละทิศทางตามที่กำหนดในมาตรฐาน มยผ. 1311-50 ดังแสดงในตารางที่ 63 และแบบจำลองอาคารในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างจะแสดงอยู่ในรูปที่ 82

ตารางที่ 62 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีตที่ใช้ในอาคารตัวอย่าง

| Concrete properties | |
|------------------------------|--------|
| Density (kg/m ³) | 2400 |
| Compressive strength (ksc) | 400 |
| Elastic modulus (ksc) | 300170 |

ตารางที่ 63 แรงลมสถิตเทียบเท่าที่วิกฤตที่สุด สำหรับสภาวะใช้งานของอาคารตัวอย่าง (รายงานการประเมินแรงลม ม.ธรรมศาสตร์ พ.ศ.2562)

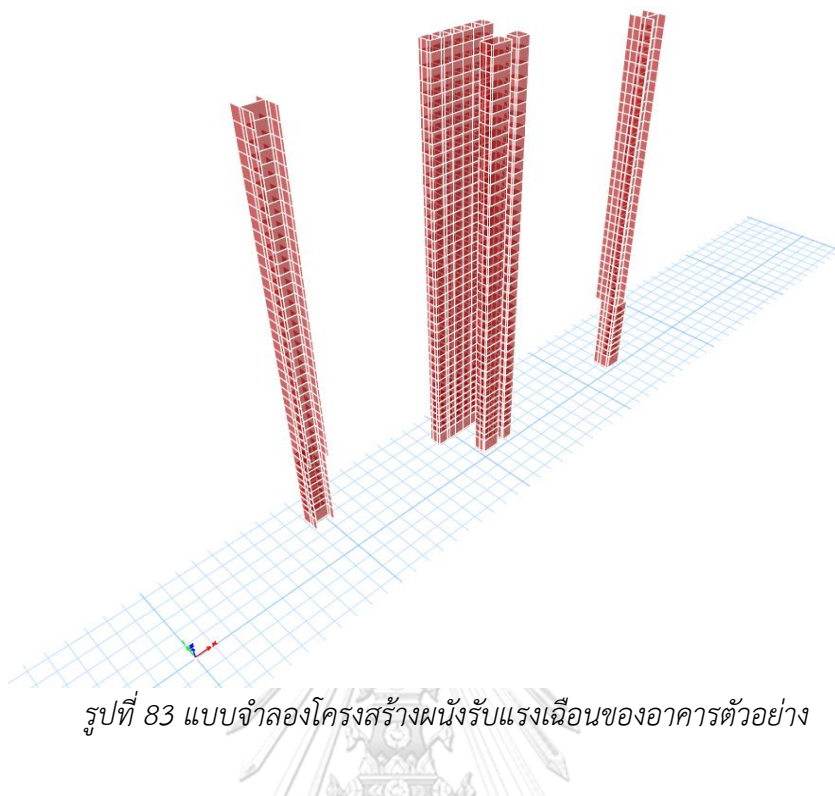
| The most critical case of Wind Load Combination for Servability (Serv_4) | | | | | | | | | |
|--|-----------|------------|---------|-----------|-------|-----------|------------|---------|-----------|
| Story | Elevation | Wind Force | | | Story | Elevation | Wind Force | | |
| | (m) | Fx (KN) | Fy (KN) | Mz (KN-m) | | (m) | Fx (KN) | Fy (KN) | Mz (KN-m) |
| 21 | 62.7 | 17.76 | -359 | 1150.24 | 42 | 126.55 | 8.88 | -168 | 497.28 |
| 20 | 59.7 | 16.65 | -345 | 607.6 | 41 | 123.8 | 10.73 | -194 | 554.68 |
| 19 | 56.7 | 15.54 | -331 | 559.44 | 40 | 120.2 | 37 | -629 | 1940.68 |
| 18 | 53.7 | 14.43 | -316 | 511 | 39 | 116.7 | 38.48 | -590 | 1927.8 |
| 17 | 50.7 | 13.32 | -302 | 463.68 | 38 | 113.7 | 37 | -575 | 1882.72 |
| 16 | 47.7 | 12.58 | -288 | 416.36 | 37 | 110.7 | 35.89 | -565 | 1851.64 |
| 15 | 44.7 | 11.47 | -274 | 368.76 | 36 | 107.7 | 34.78 | -554 | 1820.56 |
| 14 | 41.7 | 10.36 | -260 | 323.96 | 35 | 104.7 | 33.67 | -542 | 1782.2 |
| 13 | 38.7 | 9.25 | -246 | 279.72 | 34 | 101.7 | 32.56 | -531 | 1750.84 |
| 12 | 35.7 | 8.51 | -232 | 238.56 | 33 | 98.7 | 31.45 | -519 | 1712.2 |
| 11 | 32.7 | 7.77 | -218 | 48.16 | 32 | 95.7 | 30.34 | -507 | 1673.56 |
| 10 | 29.7 | 6.66 | -205 | 164.64 | 31 | 92.7 | 29.23 | -495 | 1627.92 |
| 9 | 26.7 | 7.4 | -252 | 232.96 | 30 | 89.7 | 27.01 | -482 | 1589 |
| 8 | 23.2 | 5.18 | -178 | 161.28 | 29 | 86.7 | 25.9 | -469 | 1543.08 |
| 7 | 20.6 | 4.44 | -162 | 126.56 | 28 | 83.7 | 24.79 | -456 | 1497.16 |
| 6 | 18 | 3.7 | -150 | 98.84 | 27 | 80.7 | 23.68 | -443 | 1450.96 |
| 5 | 15.4 | 3.33 | -138 | 74.76 | 26 | 77.7 | 22.57 | -429 | 1404.76 |
| 4 | 12.8 | 2.96 | -125 | 53.2 | 25 | 74.7 | 21.46 | -416 | 1352.12 |
| 3 | 10.2 | 2.22 | -111 | 40.04 | 24 | 71.7 | -29.97 | -402 | 1305.08 |
| 2 | 7.6 | 1.85 | -95 | 23.8 | 23 | 68.7 | 19.98 | -388 | 1254.12 |
| 1 | 5 | 2.59 | -137 | 20.44 | 22 | 65.7 | 18.87 | -374 | 1202.32 |



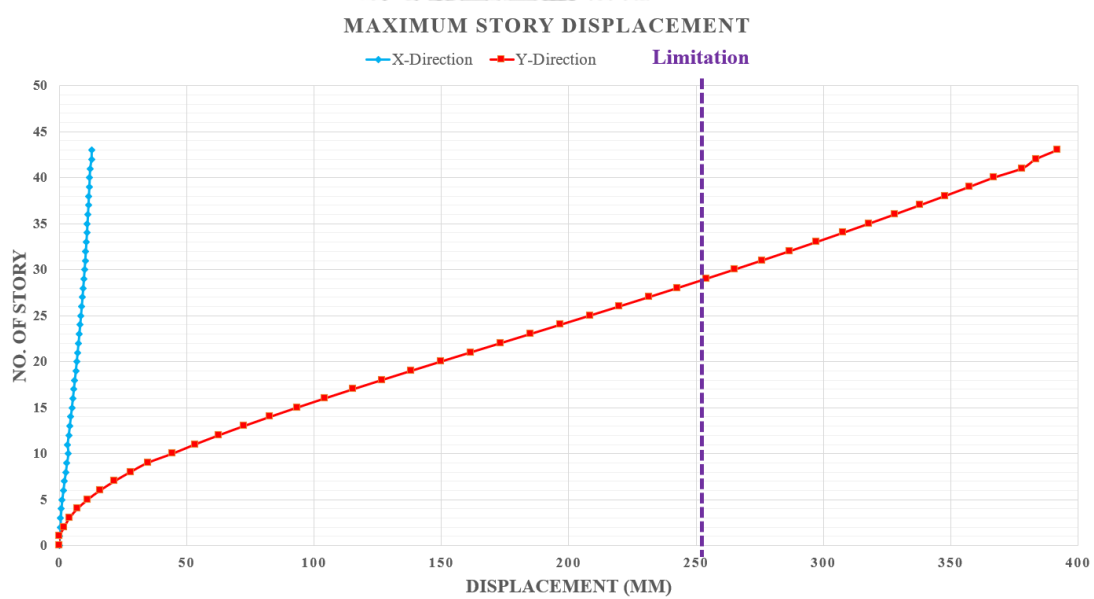
รูปที่ 82 แบบจำลองของอาคารตัวอย่างในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง

โครงสร้างผนังรับแรงเฉือนเป็นโครงสร้างสำคัญในการต้านการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างอาคารจากแรงลมที่มากระทำ ในงานวิจัยนี้จึงจะประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนเท่านั้น ซึ่งแบบจำลองโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนจะแสดงในรูปที่ 83 โครงสร้างผนังรับแรงเฉือนของอาคารนี้มีความหนา 40 ซม. แต่เมื่อประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงแล้ว จะทำให้สามารถลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนได้ ซึ่งนำไปสู่การประหยัดค่าก่อสร้างและเพิ่มพื้นที่ใช้สอยในตัวอาคาร

ดังนั้นจึงได้วิเคราะห์ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคา หลังจากการวิเคราะห์พบว่าการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของโครงสร้างที่ถูกกระทำจากแรงลมเป็นตัวควบคุมขนาดหน้าตัดของโครงสร้าง เนื่องจากกำลังของโครงสร้างและการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาจากแรงกระทำในกรณีอื่นผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานทั้งหมด โดยผลการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาจะแสดงในรูปที่ 84 ซึ่งมีระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาเท่ากับ 39.2 ซม. ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ให้ไม่เกิน 25.3 ซม. มีค่าเกินเกณฑ์ไปถึง 55% เนื่องจากแบบอาคารตัวอย่างหลังนี้ เบื้องต้นพบว่ามีปัญหาเรื่องระยะการเคลื่อนตัว ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงจะทำการเพิ่มความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนจนกว่าระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาจะผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน ก่อนที่จะประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกับโครงสร้าง



รูปที่ 83 แบบจำลองโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนของอาคารตัวอย่าง



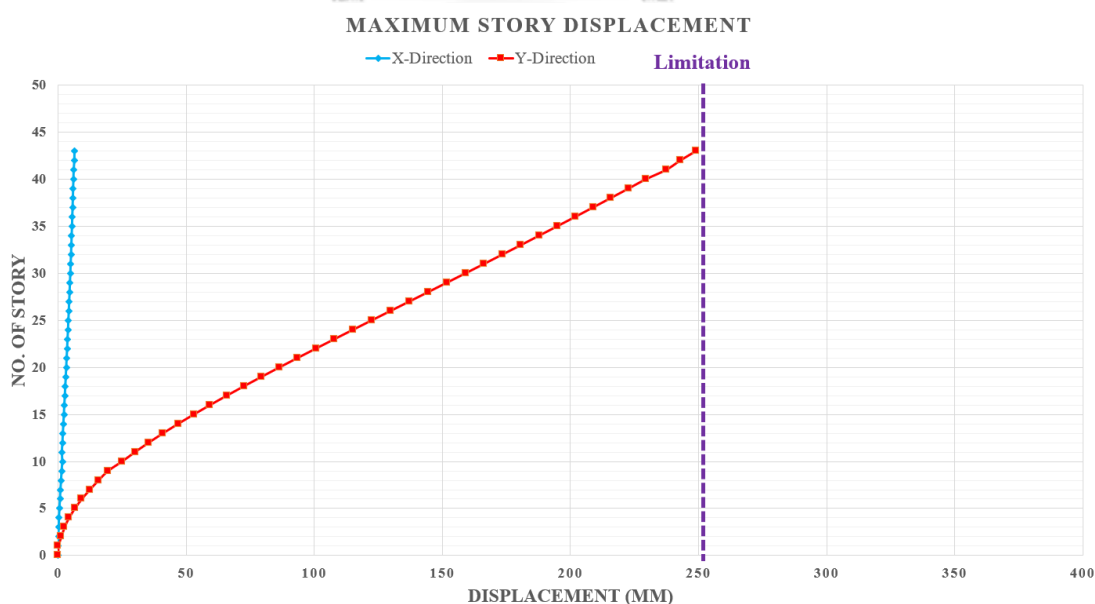
รูปที่ 84 ผลการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของอาคารตัวอย่าง (ผนังรับแรงเฉือนหนา 40 ซม.)

หลังจากการวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาพบว่ามีค่าเกินเกณฑ์ตามที่มาตรฐานกำหนด จึงจะทำการเพิ่มความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน ซึ่งผลการเพิ่มความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนแสดงอยู่ในตารางที่ 64 จะเห็นว่าต้องเพิ่มความหนาไปถึง 105 ซม. ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาถึงจะผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยมีระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาเท่ากับ 24.9 ซม. และกราฟระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของโครงสร้างอาคารที่ผนังรับแรงเฉือนมีความหนา 105 ซม. แสดงอยู่ในรูปที่ 85

ตารางที่ 64 ผลการลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนก่อนการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัส

ยึดหยุ่นสูง

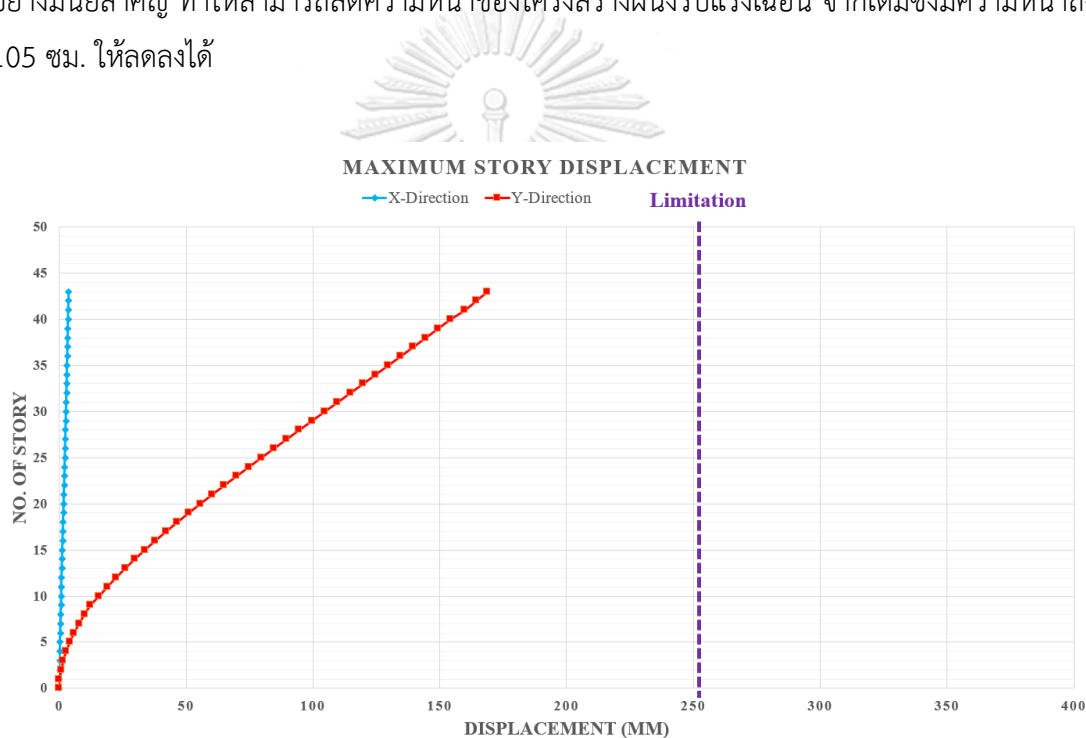
| Shear wall thickness (mm) | Roof displacement (mm) |
|---------------------------|------------------------|
| 1050 | 249.14 |
| 1000 | 255.95 |
| 900 | 270.79 |
| 800 | 287.60 |
| 700 | 306.96 |
| 600 | 329.72 |
| 500 | 357.26 |
| 400 | 392.06 |



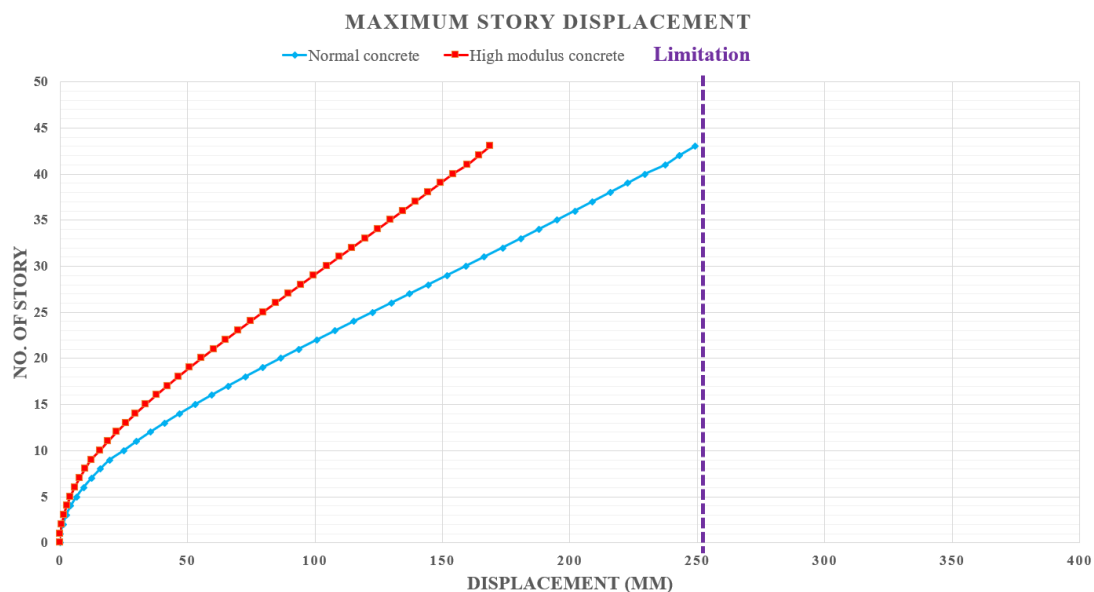
รูปที่ 85 ผลการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของอาคารตัวอย่าง (ผนังรับแรงเฉือนหนา 105 ซม.)

ในหัวข้อนี้จะประยุกต์ใช้คอนกรีตส่วนผสม EAF-05 ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 55.33 GPa ซึ่งสูงที่สุดในงานวิจัยนี้เช่นเดียวกับการประยุกต์ใช้ในโครงสร้างเสาตอม่อในหัวข้อก่อนหน้านี้ ภายหลังจากประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในผนังรับแรงเฉือน ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาจะแสดงในรูปที่ 86 พบว่าค่าการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของโครงสร้างอาคารสูงลดลงจาก 24.9 ซม. เหลือ 16.9 ซม. ลดลง 8 ซม. คิดเป็นการลดลง 32.1% และรูปที่ 87 แสดงระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาเทียบกันระหว่างก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนบ่งชี้ว่าการประยุกต์คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนสามารถช่วยลดค่าการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาได้อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สามารถลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน จากเดิมซึ่งมีความหนาถึง 105 ซม. ให้ลดลงได้



รูปที่ 86 ผลการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของอาคารตัวอย่างหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง (ผนังรับแรงเฉือนหนา 105 ซม.)



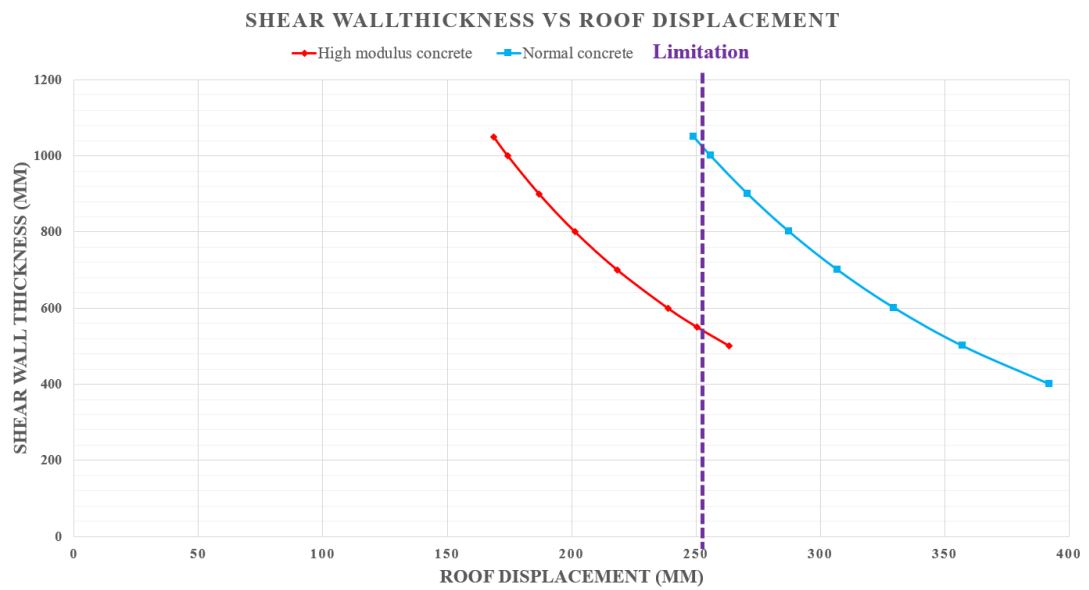
รูปที่ 87 ผลการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของอาคารตัวอย่างก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีต
โมดูลัสยืดหยุ่นสูง

หลังจากนั้นจะทำการลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน โดยจะลดความหนาของโครงสร้างจนกว่าระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาจะเท่ากับก่อนการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง ซึ่งผลการลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนแสดงในตารางที่ 65 จากการวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาพบว่าความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนแปรผกผันกับระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคา โดยเมื่อลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาจะเพิ่มขึ้นและยิ่งเพิ่มมากขึ้นเมื่อโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนมีความหนาน้อยลง

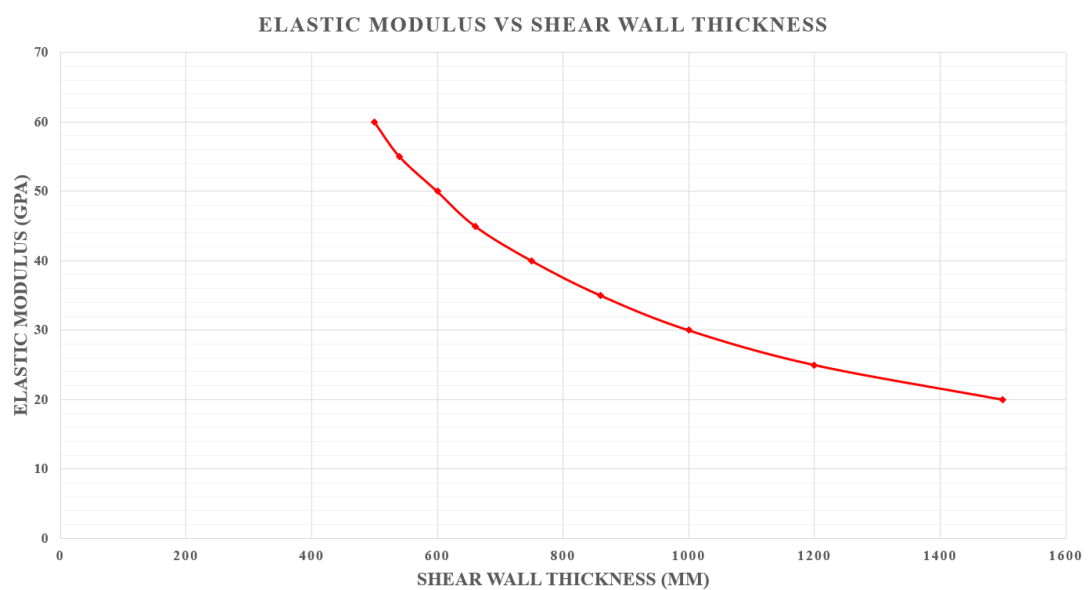
ตารางที่ 65 ผลการลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

| Shear wall thickness (mm) | Roof displacement (mm) |
|---------------------------|------------------------|
| 1050 | 168.79 |
| 1000 | 174.48 |
| 900 | 187.03 |
| 800 | 201.50 |
| 700 | 218.45 |
| 600 | 238.66 |
| 540 | 252.84 |
| 500 | 263.44 |

จากตารางจะเห็นว่าเมื่อประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะสามารถลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนได้จนถึง 54 ซม. โดยคิดเป็นการลดลง 48.6% และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผนังรับแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคา ก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงแสดงผลอยู่ในรูปที่ 88 ซึ่งมีระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาเท่ากับ 25 ซม. ซึ่งเท่ากับระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคา ก่อนการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูง ซึ่งมีระยะ 25 ซม. เช่นเดียวกัน และรูปที่ 89 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและความหนาน้อยที่สุดของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนที่ทำให้ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนช่วยในการลดระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาของอาคารตัวอย่างได้ ซึ่งนำไปสู่การลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน ส่งผลให้ปริมาณวัสดุก่อสร้างและเวลาที่ใช้ลดลง



รูปที่ 88 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนและระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคา



รูปที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาน้อยที่สุดของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนที่ทำให้ระยะการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน

หลังจากได้ประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงเพื่อลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนแล้ว ในหัวข้อนี้จะคำนวณปริมาณคอนกรีตและค่าวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน เช่นเดียวกับโครงสร้างเสาตอม่อ โดยจะใช้ราคาวัสดุเท่ากันในการคำนวณ ซึ่งคอนกรีตดั้งเดิมจะมีราคา 2,749 บาทต่อลูกบาศก์เมตรและคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะมีราคา 3,500 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณและราคาคอนกรีตของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนก่อนและหลังการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะแสดงในตารางที่ 66 จากตารางจะเห็นว่าปริมาณคอนกรีตของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนลดลงจาก 17,400 ลูกบาศก์เมตร เหลือ 8,944 ลูกบาศก์เมตร ลดลงมา 8,456 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นการลดลง 48.6% ซึ่งถือว่าเยอะมากเนื่องจากความหนาที่ลดลงไปเท่ากับเกือบครึ่งหนึ่งของความหนาเดิมและราคาวัสดุคอนกรีตในโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนลดลงจาก 47.83 ล้านบาท เหลือ 31.3 ล้านบาท ลดลงมา 16.53 ล้านบาท คิดเป็นการลดลง 34.6% จึงกล่าวได้ว่า การประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสามารถช่วยประหยัดค่าวัสดุก่อสร้าง รวมไปถึงค่าแรงและเวลาในการก่อสร้างอย่างมาก

ตารางที่ 66 ปริมาณคอนกรีตและราคาคอนกรีตของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน

| Concrete type | Total Concrete Volume (m ³) | Concrete Price (Thb/m ³) | Total Concrete Price (Thb) |
|---------------|---|--------------------------------------|----------------------------|
| Normal | 17,400 | 2,749 | 47,832,600 |
| High-E | 8,944 | 3,500 | 31,304,000 |

ในการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงกับโครงสร้างอาคารก็มีข้อด้อยเรื่องน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อย่างที่ได้กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้านี้ คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงมีหน่วยน้ำหนักสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปถึง 22% ด้วยเหตุนี้ จึงส่งผลต่อระบบฐานราก ซึ่งอาจต้องเพิ่มความหนาหรือจำนวนเสาเข็ม

ตารางที่ 67 ปริมาตรและน้ำหนักของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือน

| Concrete type | Total Concrete Volume (m ³) | Concrete Weight (Ton) | Total Concrete Weight (Ton) | Percent reduction (%) |
|---------------|---|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Normal | 17,400 | 2.4 | 41,760 | 36 |
| High-E | 8,944 | 2,933 | 26,233 | |

อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนวณน้ำหนักของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น พบว่าแม้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะมีน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตทั่วไปถึง 22% แต่เมื่อทำการลดความหนาของโครงสร้างแล้ว โครงสร้างผนังรับแรงเฉือนที่ประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงยังมีน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปถึง 37.2% ดังที่แสดงในตารางที่ 67 ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบฐานรากของโครงสร้าง

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาสามารถกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้คอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงในโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนสามารถลดการเคลื่อนตัวและเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างได้อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับโครงสร้างเสาตอม่อที่ได้วิเคราะห์มาก่อนหน้า ทำให้สามารถลดขนาดของโครงสร้างที่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่เนื่องจากต้องการจำกัดระยะการเคลื่อนตัวให้ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน ส่งผลให้ประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง รวมไปถึงเวลาและพื้นที่ใช้สอยที่จะเพิ่มขึ้นจากการลดขนาดของโครงสร้าง ซึ่งจำเป็นอย่างมากในโครงสร้างที่มีพื้นที่จำกัดอย่างอาคารสูงชะลูด



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 การพัฒนาคอนกรีตโม่ดูลัสยัดหยุ่นสูง

การศึกษานี้มุ่งหวังที่จะพัฒนาคอนกรีตโม่ดูลัสยัดหยุ่นสูง เพื่อใช้ในโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงพิเศษ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปจะมีค่าโม่ดูลัสยัดหยุ่นเพียง 20-40 GPa เท่านั้น ซึ่งอาจไม่เพียงพอเมื่อต้องนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงพิเศษ ที่กำลังของคอนกรีตไม่ได้เป็นปัจจัยควบคุมขนาดของโครงสร้าง แต่เป็นการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่เป็นตัวกำหนด จากงานวิจัยในอดีตพบว่าโม่ดูลัสยัดหยุ่นของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับค่าโม่ดูลัสยัดหยุ่นของวัสดุที่นำมาใช้และรอยต่อระหว่างวัสดุมวลรวมกับเนื้อซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงพัฒนาโดยการปรับเปลี่ยนประเภทและขนาดคละของมวลรวมหยาบ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และอัตราส่วนมวลละเอียดรวมต่อมวลรวม ปัจจัยเหล่านี้จะถูกทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีค่าโม่ดูลัสยัดหยุ่นสูงที่สุด และเมื่อได้ส่วนผสมที่เหมาะสมแล้ว จึงจะนำไปลองประยุกต์ใช้กับโครงสร้างในโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูงและโครงการอาคารสูงตัวอย่าง โดยสรุปปัจจัยสำคัญไว้ดังนี้

- 1) การคละขนาดของมวลรวมเพื่ออัดแน่น จะสามารถเพิ่มปริมาตรของมวลรวมได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากรูปร่างของอนุภาคมวลรวมมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม โดยอัดแน่นได้มากที่สุด 63% และเมื่อใช้ขนาดคละที่อัดแน่นในส่วนผสมคอนกรีตแล้ว กำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นทั้งคอนกรีตอายุ 14 และ 28 วัน แต่ค่าโม่ดูลัสยัดหยุ่นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากโม่ดูลัสยัดหยุ่นของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับโม่ดูลัสยัดหยุ่นของวัสดุมวลรวมเป็นหลัก การปรับปรุงปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเพิ่มปริมาตรของมวลรวมจึงส่งผลน้อยและทำให้ค่าโม่ดูลัสยัดหยุ่นใกล้เคียงเดิม
- 2) เมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ พบว่าทั้งกำลังอัดและโม่ดูลัสยัดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นทั้งในคอนกรีตอายุ 14 และ 28 วัน เนื่องจากเมื่อมีน้ำในส่วนผสมน้อยลง สัดส่วนน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อคอนกรีตจะลดลงตามไปด้วย ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้จะทำให้เกิดโพรงในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดและโม่ดูลัสยัดหยุ่นของคอนกรีตลดลง และการลดปริมาณน้ำลงยังช่วยลดการแยกตัวระหว่างมวลรวมหยาบและมอร์ตาร์ เมื่อกำลังของมอร์ตาร์สูงขึ้นจึงส่งผลให้กำลังอัดและโม่ดูลัสยัดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

- 3) การทดลองเปลี่ยนประเภทของมวลรวมหยาบส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญ โดยในการศึกษานี้พบว่าตะกรันเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นมวลรวมหยาบที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุด ทั้งในคอนกรีตอายุ 14 และ 28 วัน เนื่องจากตะกรันเหล็กมีความถ่วงจำเพาะสูงและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ รวมไปถึงผิวอนุภาคที่ขรุขระของตะกรันเหล็ก จะช่วยเพิ่มกำลังบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุมวลรวมหยาบและซีเมนต์เพสต์ ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น แต่จากน้ำหนักของตะกรันเหล็กที่หนักกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติทำให้น้ำหนักของคอนกรีตมากขึ้นตามไปด้วย
- 4) การปรับอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวม พบว่าเมื่อลดอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมลง จะส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาตรของซีเมนต์ที่มีกำลังสูงกว่าวัสดุมวลรวมละเอียดเพิ่มขึ้นในส่วนผสม แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมกลับส่งผลให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมที่เพิ่มขึ้น จะทำให้มีอนุภาคมวลรวมละเอียดเข้าไปเติมระหว่างอนุภาคของมวลรวมหยาบ ส่งผลให้วัสดุมวลรวมสามารถอัดแน่นกันได้ดีขึ้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจึงถูกพัฒนา และจากการทดสอบที่ผ่านพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะพัฒนาถึงคอนกรีตอายุ 14 วันเท่านั้น เพราะหลังจาก 14 วัน แม้กำลังของซีเมนต์เพสต์จะเพิ่มขึ้น แต่กำลังบริเวณรอยต่อยังคงใกล้เคียงเดิม ทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่พัฒนาขึ้น ด้วยการปรับปรุงวัสดุมวลรวมให้มีความเหมาะสมข้างต้น พบว่าสามารถทำให้คอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าสามารถพัฒนาคอนกรีตที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นถึง 55.3 GPa ซึ่งสูงกว่าค่าปกติถึง 47% ทั้งมีผลทำให้คุณสมบัติด้านกำลังดียิ่งขึ้นด้วย แม้จะมีข้อด้อยที่มีน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตปกติมาก ยิ่งไปกว่านั้นการศึกษายังพบว่าการออกแบบให้ส่วนผสมคอนกรีตมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงนั้นสามารถทำได้ไม่ยาก เพราะไม่แปรปรวนตามสัดส่วนผสมเท่าใดนัก จึงเชื่อมั่นว่าจะสามารถนำไปผลิตใช้จริงได้โดยไม่ยุ่งยาก

เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างเสาตอม่อพบว่าสามารถลดระยะการเคลื่อนตัวได้ประมาณ 23% และสามารถลดขนาดของโครงสร้างเสาตอม่อลงได้ถึง 28% หลังจากนั้นได้นำคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนในอาคารสูงชะลูด พบว่าสามารถลดค่าการเคลื่อนตัวบริเวณชั้นหลังคาได้ถึง 32% และลดความหนาของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนได้ถึง 49% จึงกล่าวได้ว่าคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างได้อย่างมี

นัยสำคัญ ซึ่งนำไปสู่ข้อได้เปรียบในการก่อสร้างหลายประการเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นการลดขนาดของโครงสร้างเพื่อเพิ่มพื้นที่ใช้สอย การประหยัดงบก่อสร้าง รวมไปถึงเวลาและแรงงานที่ใช้ในการก่อสร้าง

6.2 งานวิจัยในอนาคต

การทดลองในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้กล่าวถึงการใช้วัสดุมวลรวมละเอียด ซึ่งงานวิจัยในอดีตพบว่าจะสามารถเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยการเปลี่ยนประเภทของมวลรวมละเอียด ไม่ว่าจะเป็นวัสดุมวลรวมละเอียดจากธรรมชาติหรือมวลรวมละเอียดจากวัสดุรีไซเคิล รวมไปถึงวัสดุประสานอื่น ที่ไม่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เช่น เถ้าลอยและซิลิกาฟูม ก็พบว่าจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตได้ รวมไปถึงการเพิ่มค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยไม่เพิ่มกำลังของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้เมื่อเราเพิ่มกำลังอัดจะส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเพิ่มกำลังอัดนั้นจะต้องลดน้ำโดยใช้สารลดน้ำพิเศษที่มีราคาสูงและยากที่จะควบคุมคุณภาพของคอนกรีตให้มีความสามารถทำงานได้และมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ดังนั้นคอนกรีตโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่มีกำลังต่ำจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการพัฒนา

บรรณานุกรม

- Al-Baijat, H., et al. (2013). Comparison between Composite Column Using Limestone and Basalt Concrete.
- Al-Baijat, H. M. (2008). The use of basalt aggregates in concrete mixes in Jordan. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2(1), 63-70.
- Al-Zaid, R. Z., et al. (1997). Investigation of potential uses of electric-arc furnace dust (EAFD) in concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(2), 267-278.
- Anastasiou, E., et al. (2006). Criteria for the use of steel slag aggregates in concrete. In *Measuring, monitoring and modeling concrete properties* (pp. 419-426): Springer.
- Angulo, S. C., et al. (2020). Probability distributions of mechanical properties of natural aggregates using a simple method. *Construction and Building Materials*, 233, 117269.
- Baalbaki, W., et al. (1991). Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. *Materials Journal*, 88(5), 499-503.
- Beushausen, H., et al. (2015). The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 74, 132-139.
- Cho, S.-W., et al. (2000). Effect of aggregate volume fraction on the elastic moduli and void ratio of cement-based materials. *Journal of Marine science and Technology*, 8(1), 1-7.
- Coppola, L., et al. (2016). Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, 123, 115-119.
- dos Santos, A. C., et al. (2017). Influence of coarse aggregate on concrete's elasticity modulus. *Acta Scientiarum. Technology*, 39(1), 17-25.
- Faleschini, F., et al. (2016). Electric arc furnace slag as coarse recycled aggregate for concrete production. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(1), 44-50.
- Faleschini, F., et al. (2015). High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*, 101, 113-121.

- Fan, T. (2017). *Development of high modulus concrete for tall buildings*.
- González-Ortega, M. A., et al. (2019). Durability of concrete with electric arc furnace slag aggregate. *Construction and Building Materials*, 217, 543-556.
- Haque, M., et al. (2012). Effect of aggregate size distribution on concrete compressive strength. *SUST journal of science and technology*, 19(5), 35-39.
- Hasselman, D., et al. (1972). Elastic Behavior of Polymer-Impregnated Porous Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 55(12), 588-591.
- Islam, M. (2005). Effect of Specimen Size on the Compressive Strength of Brick Aggregate Grading, B. Sc. *Engineering Thesis, Department of Civil Engineering, Dhaka University of Engineering and Technology, Gazipur, Bangladesh*.
- Kishore, I. S., et al. (2015). Experimental study on the use of basalt aggregate in concrete mixes. *SSRG Int. J. Civ. Eng*, 2, 39-42.
- Klein, N. S., et al. (2020). Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 242, 118086.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4): Longman London.
- P.Ramteja. (2016). Basalt Aggregate as Coarse Aggregate in High Strength Concrete Mixes. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3(8).
- Pellegrino, C., et al. (2013). Properties of concretes with black/oxidizing electric arc furnace slag aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 37, 232-240.
- Piasta, W., et al. (2017). Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes. *Construction and Building Materials*, 153, 728-739.
- Sengul, O., et al. (2013). *Fracture and microstructural studies on normal and high strength concretes with different types of aggregates*. Paper presented at the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, Toledo–Spain.
- Shetty, M., et al. (2019). *Concrete Technology (Theory and Practice)*, 8e: S. Chand Publishing.
- Zhou, F., et al. (1995). Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive

strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(1), 177-186.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | ณรงค์ชัย ปักษา |
| วัน เดือน ปี เกิด | 23 มกราคม 2538 |
| สถานที่เกิด | นครราชสีมา |
| วุฒิการศึกษา | ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมโครงสร้าง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (กำลังศึกษาอยู่) |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 111/308 ม.5 ต.หนองจะบก อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 |

