

การพัฒนาหนังสือจนสำเร็จรูปด้วยแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of precast insulation panels with ultra-low density concrete core



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 2019

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การพัฒนาแผนงานสำเร็จรูปด้วยแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก |
| โดย | นายวรกร อิมรักษา |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

----- คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)

----- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ รัตนศิริสถิตย์)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วรากร อิมรักษา : การพัฒนาผนังฉนวนสำเร็จรูปด้วยแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก. (Development of precast insulation panels with ultra-low density concrete core) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก โดยผนังมีวัสดุแกนกลางเป็นฉนวนทำจากคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ปิดผิวหน้าทั้ง 2 ด้านด้วยแผ่นซีเมนต์บอร์ดในลักษณะของผนังแบบแซนวิช (Sandwich panels) เพื่อให้ได้ผนังที่มีความต้านทานความร้อน ความทนไฟ และประหยัดพลังงานสูงกว่าผนังทั่วไป ในการศึกษาครั้งนี้พิจารณาแผ่นผนังขนาดความกว้าง 0.60 เมตร ความสูง 2.40 เมตร และหนา 0.12 เมตร ใช้คอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากที่มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 200 - 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การพัฒนาเริ่มจากการวิเคราะห์ออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเสริมให้แผ่นผนังสามารถทนต่อแรงกระแทกได้เพียงพอตามมาตรฐาน จึงเพิ่มการประสานระหว่างแผ่นซีเมนต์บอร์ดด้วยก้อนลูกบาศก์คอนกรีตขนาด 0.1x0.1x0.1 เมตร³ ทาปูนขาวจำนวน 6 ก้อน กระจายรอบแผ่นผนัง จากนั้นจึงผลิตแผ่นผนังต้นแบบ ผลการทดสอบหาค่าสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C518 ในห้องปฏิบัติการพบว่าแผ่นผนังที่พัฒนามีค่าสภาพการนำความร้อนอยู่ในเกณฑ์ที่ดีกว่าผนังประเภทต่างๆ ที่นิยมใช้งานในปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ผลการทดสอบความแข็งแรงของผนังตามมาตรฐาน BS 5234 ได้แก่ การทดสอบความแข็งแรงของผนังโดยใช้การกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก (Small hard body impact) และผลการทดสอบความแข็งแรงของผนังโดยใช้การกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (Large soft body impact) ก็แสดงให้เห็นว่าผนังที่พัฒนาขึ้นนี้มีความแข็งแรงในระดับ Medium duty (MD) ซึ่งเพียงพอสำหรับใช้งานเป็นผนังกั้นห้องในอาคารพักอาศัย สำนักงาน และอาคารพาณิชย์ทั่วไป

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070396721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Ultra-low density concrete, Insulation, Thermal conductivity, Wall panel, Energy impact

Warakon Imraksa : Development of precast insulation panels with ultra-low density concrete core. Advisor: Assoc. Prof. TOSPOL PINKAEW, D.Eng.

This thesis presents research on the development of prefabricated insulated walls using ultra low-density concrete cores sandwiched by two cement boards on surfaces to achieve better heat insulation, fire resistance and energy saving than other existing walls. The study considers the wall with ultra-low density concrete core having density of 200-300 kg/m³ and its dimensions of 0.60, 2.40 and 0.12 meters in width, height and thickness, respectively. The development starts from wall analysis and design by finite element model. In order to improve the wall resistance against standard impact, six concrete cubes (0.1x0.1x0.1 m³) are uniformly placed and glued between two cement boards using cement epoxy. Then the prototype of the prefabricated wall is prepared for laboratory testing. The thermal conductivity test according to ASTM C518 has significantly revealed better thermal conductivity than other existing walls. While, the testing of wall strength according to BS 5234 consisting of small hard body impact and large soft body impact have shown that the developed wall strength can be classified as Medium Duty (MD) level which is sufficient to be used as partitions in residential buildings, offices and general commercial buildings.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านายวรากร อิมรักษา ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา ให้ความรู้และคำแนะนำในการทำ
วิทยานิพนธ์นี้ จนข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำที่ดีในการ
ปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บริษัท เอ็นจีเนียร์ เอ็กซ์เพิร์ท อินเทอร์เน็ต เนชั่นแนล จำกัด ที่ช่วยให้การสนับสนุน
ทุนและอุปกรณ์การทดสอบในการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ เพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ในสาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ที่ได้ให้คำแนะนำและ
กำลังใจมาโดยตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณนายชายชาญ อิมรักษา และนางวนิดา อิมรักษา ผู้เป็นบิดาและมารดา
ของข้าพเจ้าที่ได้ส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสศึกษาเล่าเรียนและยังเป็นกำลังใจสำคัญมาโดยตลอด ด้วย
ความช่วยเหลือของทุกท่านได้มอบให้ ข้าพเจ้าจะจดจำไว้ตลอดไป และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้
จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษา และเป็นประโยชน์ต่อประเทศชาติต่อไป



วรากร อิมรักษา

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....ค | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง | ง |
| กิตติกรรมประกาศ.....จ | จ |
| สารบัญ.....ฉ | ฉ |
| บทที่ 1 บทนำ..... 1 | 1 |
| 1.1. ที่มาและความสำคัญ..... 1 | 1 |
| 1.2. วัตถุประสงค์..... 2 | 2 |
| 1.3. ขอบเขตงานวิจัย..... 2 | 2 |
| 1.4. ประโยชน์ที่ได้รับ..... 2 | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3 | 3 |
| 2.1. ผนังสำเร็จรูป..... 3 | 3 |
| 2.2. ระบบผนังคอมโพสิตแบบแกนวิซ..... 3 | 3 |
| 2.3. แผ่นวัสดุประกบของผนังแบบแกนวิซ..... 3 | 3 |
| 2.4. แกนกลางของผนังแบบแกนวิซ..... 4 | 4 |
| 2.4.1. แกนโฟม (Cellular foam)..... 4 | 4 |
| 2.4.2. แกนรังผึ้ง (Honeycomb)..... 7 | 7 |
| 2.4.3. แกนลอนลูกฟูก (Corrugated)..... 8 | 8 |
| 2.4.4. แกนท่อโลหะ (Tube-core)..... 8 | 8 |
| 2.4.5. แกนตัว Y (Y-shaped cores)..... 9 | 9 |
| 2.5. คอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก..... 10 | 10 |
| 2.6. การวิเคราะห์โครงสร้างผนังด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... 14 | 14 |

| | |
|---|----|
| 2.7. การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของผนังด้วยวิธีหน้าตัดแปลง..... | 16 |
| 2.8. การทดสอบความแข็งแรงของผนังตามมาตรฐาน BS 5234..... | 17 |
| 2.8.1 การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก (Small Hard Body Impact)..... | 19 |
| 2.8.2 การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (Large Soft Body Impact)..... | 22 |
| 2.9. การหาค่าความเป็นฉนวน..... | 25 |
| บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย | 27 |
| 3.1. แผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก | 27 |
| 3.1.1. ส่วนประกอบและขนาดของแผ่นผนัง | 27 |
| 3.1.2. แกนกลางคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก | 28 |
| 3.1.3. คุณสมบัติของวัสดุประกอบซีเมนต์บอร์ด..... | 30 |
| 3.1.4. การประสานแผ่นซีเมนต์บอร์ด | 31 |
| 3.2. การออกแบบผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก | 32 |
| 3.3. การทดสอบกำลังรับดัด (Flexural Strength)..... | 33 |
| 3.4. การทดสอบความแข็งแรงของผนังตามมาตรฐาน BS 5234..... | 33 |
| 3.4.1. การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก (Small Hard Body Impact)..... | 33 |
| 3.4.2. การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (Large Soft Body Impact)..... | 34 |
| 3.4.3. การเตรียมการทดสอบ..... | 35 |
| 3.5. การทดสอบค่าความเป็นฉนวน..... | 42 |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน | 43 |
| 4.1. ผลการพัฒนาคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก..... | 43 |
| 4.2. ผลการทดสอบการประสานแผ่นซีเมนต์บอร์ด..... | 45 |

| | |
|--|----|
| 4.3. ผลการทดสอบเปรียบเทียบพลังงานเป็นแรงกระทำ | 47 |
| 4.4. ผลการออกแบบผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก | 51 |
| 4.5. ผลการทดสอบกำลังรับดัด (Flexural Strength) | 55 |
| 4.5.1. ขั้นตอนการประกอบแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก..... | 55 |
| 4.5.2. ผลการทดสอบ | 57 |
| 4.6. ผลการทดสอบความแข็งแรงของผนังตามมาตรฐาน BS 5234 | 58 |
| 4.6.1. การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก (Small Hard Body Impact)..... | 58 |
| 4.6.2. การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (Large Soft Body Impact)..... | 62 |
| 4.7. ผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวน | 69 |
| บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย..... | 73 |
| 5.1. การพัฒนาผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก..... | 73 |
| 5.2. ข้อเสนอแนะในการทำงาน | 75 |
| บรรณานุกรม | 76 |
| ประวัติผู้เขียน | 79 |

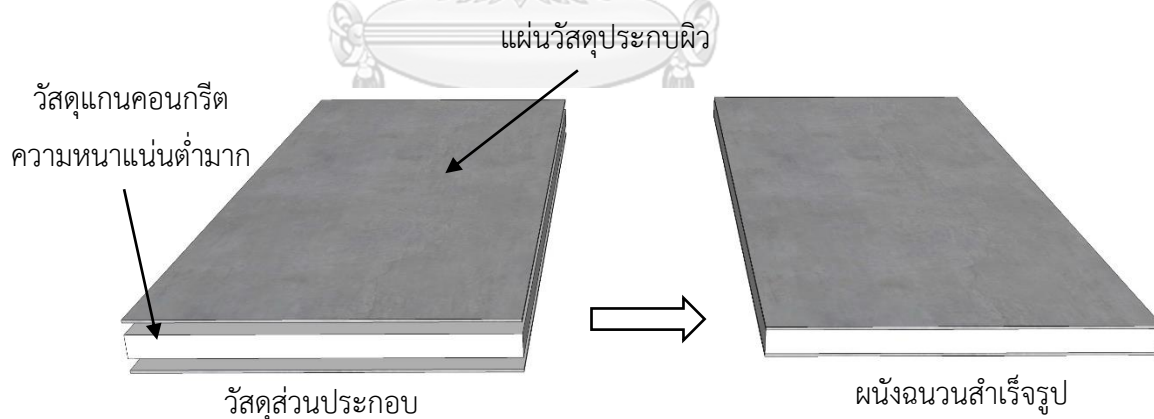
บทที่ 1

บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญ

การก่อสร้างอาคารมีปัจจัยหลายด้านที่ต้องควบคุม ทั้งในด้านต้นทุน ระยะเวลา และคุณภาพงาน โดยทั่วไปการก่อสร้างผนังอาคารมักจะใช้อิฐมวลเบา หรืออิฐบล็อก หรืออิฐมวลเบา ซึ่งมักเกิดปัญหาตามมามากมาย ทั้งระหว่างก่อสร้าง และหลังก่อสร้างแล้วเสร็จ ซึ่งใช้ระยะเวลาก่อสร้างนาน ทำให้งานล่าช้า ผนังแตกร้าวเนื่องจากควบคุมคุณภาพงานไม่ได้ และขาดแคลนแรงงานฝีมือดี

ในปัจจุบันการก่อสร้างผนังอาคารนิยมใช้ผนังสำเร็จรูปมวลเบามากขึ้น เนื่องจากสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างได้มากกว่า ใช้แรงงานน้อยลง แต่ได้ปริมาณงานที่มากขึ้น มีน้ำหนักเบา ขนส่งได้ง่าย ติดตั้งสะดวก รวดเร็ว ลดปัญหาขยะและมลพิษทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการก่อสร้าง สามารถควบคุมคุณภาพงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผนังสำเร็จรูปชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ คือ ระบบผนังแซนวิช ดังแสดงในรูปที่ 1-1 เป็นแผ่นผนังที่ประกอบขึ้นโดยใช้วัสดุชนิดเดียวกัน 2 แผ่น ประกบเข้ากันวัสดุชนิดอื่นที่แทรกอยู่ตรงกลาง เมื่อวัสดุทั้ง 3 ชั้นยึดติดกันแน่น จะทำหน้าที่รับแรงเสมือนเป็นวัสดุชิ้นเดียวกัน ซึ่งวัสดุผิวนอกจะมีผิวเรียบจึงไม่จำเป็นต้องฉาบ ระบบผนังแซนวิชยังสามารถช่วยป้องกันความร้อนได้ดี และกันเสียงได้อีกด้วย



รูปที่ 1-1 ส่วนประกอบของระบบผนังแซนวิช

ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยและการผลิตจำหน่ายเชิงพาณิชย์เกี่ยวกับผนังสำเร็จรูปแซนวิชจำนวนมาก แต่ก็ยังไม่มีงานวิจัยหรือผลิตภัณฑ์ใดที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดในด้านการทนไฟ การนำความร้อน การกันเสียงที่ดี และยังคงมีความแข็งแรงทนทานด้วย งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาและพัฒนาผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากซึ่งส่วนแกนกลางแผ่นผนังเป็นคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่นต่ำมาก โดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 200 - 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อให้

ได้คุณสมบัติการทนไฟและการเป็นฉนวนที่ดีกว่าปกติ แกนกลางนี้จะถูกปิดผิวทั้งสองด้านด้วยแผ่นซีเมนต์บอร์ด ทำให้ผิวเรียบเนียนไม่ต้องฉาบปิดผิว การศึกษาจะทำการทดสอบคุณสมบัติด้านความเป็นฉนวนที่ได้ รวมถึงคุณสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน เพื่อให้ทราบถึงระดับการประหยัดพลังงานและความแข็งแรงของแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก โดยพิจารณาให้เป็นผนังที่ติดตั้งภายในอาคาร ชนิดไม่รับน้ำหนัก (Non Load Bearing)

1.2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนารูปแบบผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก
2. เพื่อศึกษาออกแบบแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติความเป็นฉนวนของผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก
4. เพื่อทดสอบความแข็งแรงของผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

1.3. ขอบเขตงานวิจัย

1. พิจารณาแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ขนาดความหนา 10-12 เซนติเมตร ความกว้าง 60 เซนติเมตร ความสูง 240 เซนติเมตร
2. พิจารณาแผ่นผนังแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากเป็นแบบเซลล์ลู่คอนกรีตชนิดเต็มฟองอากาศ ปิดประกบผิวด้วยแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์
3. พิจารณาแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก 200 – 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นแกนฉนวนกลางแผ่นผนัง
4. พิจารณาให้เป็นผนังที่ติดตั้งภายในอาคาร ชนิดไม่รับน้ำหนัก (Non Load Bearing)

1.4. ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมความเป็นฉนวนและคุณสมบัติเชิงกลของผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก
2. รูปแบบของผนังสำเร็จรูปทางเลือกที่มีน้ำหนักเบา แข็งแรง และช่วยประหยัดการใช้พลังงานในอาคารได้ดี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีต ความหนาแน่นต่ำมาก ดังแสดงตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1. ผนังสำเร็จรูป

ผนังสำเร็จรูปแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ ผนังสำเร็จรูปแบบรับแรงและผนังสำเร็จรูปแบบไม่รับแรง

1. ผนังแบบรับแรง (Load bearing panel)

ผนังสำเร็จรูปที่ออกแบบมาเพื่อรับแรง เช่น แรงเฉือน และถ่ายแรงจากชั้นส่วนโครงสร้างไปยังชั้นส่วนโครงสร้างหนึ่ง

2. ผนังแบบไม่รับแรง (Non-load bearing panel)

ผนังสำเร็จรูปที่ออกแบบมาเพื่อรับน้ำหนักของตัวเอง และถ่ายแรงเล็กน้อย โดยต้องคำนึงถึงการใช้งานจริง เช่น แรงที่เกิดจากการชนย้าย แรงที่เกิดขึ้นขณะติดตั้ง

2.2. ระบบผนังคอมโพสิตแบบแซนวิช

จรัญพัฒน์ ภูวนันท์, (2546) ศึกษาผนังชนิด Structural Sandwich Panels (SSP) หรือ Structural Insulated Panels (SIP) ซึ่งเป็นแผ่นผนังที่ประกอบขึ้นโดยใช้วัสดุชนิดเดียวกัน 2 แผ่นประกบเข้ากับวัสดุชนิดอื่นที่แทรกอยู่ตรงกลาง เมื่อวัสดุทั้ง 3 ชั้นยึดติดกันแน่น จะทำหน้าที่รับแรงเสมือนเป็นวัสดุชิ้นเดียวกัน จึงมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น แผ่นผนังแซนวิชอาจประกอบขึ้นโดยใช้วัสดุชนิดเดียวหรือหลายชนิดก็ได้ และมีเพียงชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ หากต้องการผลิตแผ่นผนังที่มีความแข็งแรง สามารถรับแรงทางโครงสร้างได้ เรียกว่า “Structural Sandwich Panels” หากต้องการผลิตแผ่นผนังให้มีคุณสมบัติต้านทานความร้อนได้ดี เพื่อใช้ในการก่อสร้างมักให้วัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อนอยู่ตรงกลาง เรียกว่า “Structural Insulated Panels”

2.3. แผ่นวัสดุประกบของผนังแบบแซนวิช

Zenkert, (1995) เสนอแผ่นวัสดุประกบผนัง เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง สามารถรับแรงดัดแรงกด และแรงดึงได้ดี ซึ่งวัสดุประกบจะทำหน้าที่ป้องกันแรงกระแทกไม่ให้วัสดุแกนกลางเกิดความเสียหาย โดยวัสดุประกบผิวจะมีความบางแต่แข็งแรงทนทาน เช่น แผ่นไม้อัด แผ่นไม้สังเคราะห์ แผ่นยิปซัม แผ่นซีเมนต์บอร์ด เป็นต้น

2.4. แกนกลางของผนังแบบแซนวิช

Kearsley และ Mostert, (2005) พิจารณาแกนกลางระบบผนังคอมโพสิต แบบแซนวิชโดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบโครงสร้าง (Structural) เช่น แกนกลางผนังเป็นแบบแกนลอนลูกฟูก (Corrugated) และแบบที่เป็นเซลล์ (Cellular) เช่น แกนกลางผนังเป็นแบบแกนโฟม (Cellular foam) แกนรังผึ้ง (Honeycomb) เป็นต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น คือ น้ำหนักเบา มีคุณสมบัติความเป็นฉนวน และมีสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวต่ำ โดยระบบผนังแบบนี้จะถูกประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งใช้วัสดุยึดเหนี่ยว เช่น กาวอีพอกซี เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเด่นของระบบผนังนี้ คือ มีโครงสร้างเบา เนื่องจากแกนกลางเป็นวัสดุที่มีหน่วยน้ำหนักเบาและแผ่นวัสดุประกบมีความแข็งแรงสูงทำให้แผ่นวัสดุประกบรับแรงอัดและแรงดึง ส่วนแกนกลางจะรับแรงเฉือน

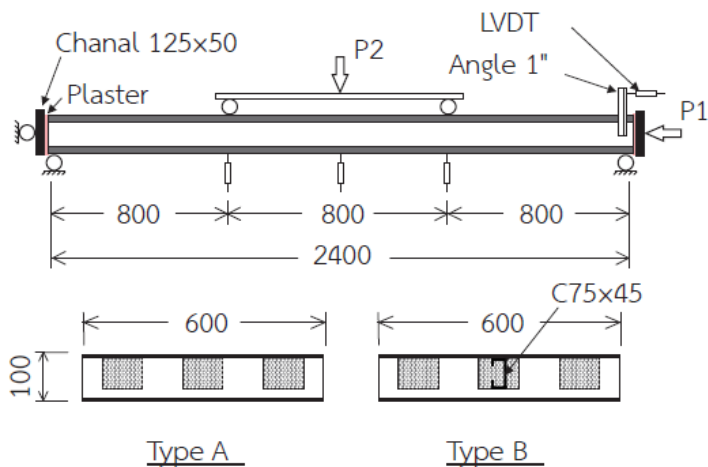
Zenkert, (1995) แกนกลางของผนังประกอบเป็นส่วนประกอบหลักที่มีความสำคัญในการพิจารณาออกแบบโครงสร้าง เนื่องจากเป็นส่วนหลักในการรับแรงเฉือน เป็นส่วนที่ช่วยกำหนดระยะห่างของวัสดุประกบ และต้องมีความแข็งแรงมากพอที่จะทำให้วัสดุประกบสามารถคงรูปอยู่ได้ ซึ่งการลดความหนาแกนกลางทำให้กำลังรับแรงดัดของโครงสร้างลดลง และเพื่อเป็นการลดน้ำหนักของโครงสร้างผนังประกอบ วัสดุแกนกลางจึงควรจะเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ

โดยวัสดุแกนกลางแผ่นผนังประกอบแซนวิชมีรูปแบบดังต่อไปนี้

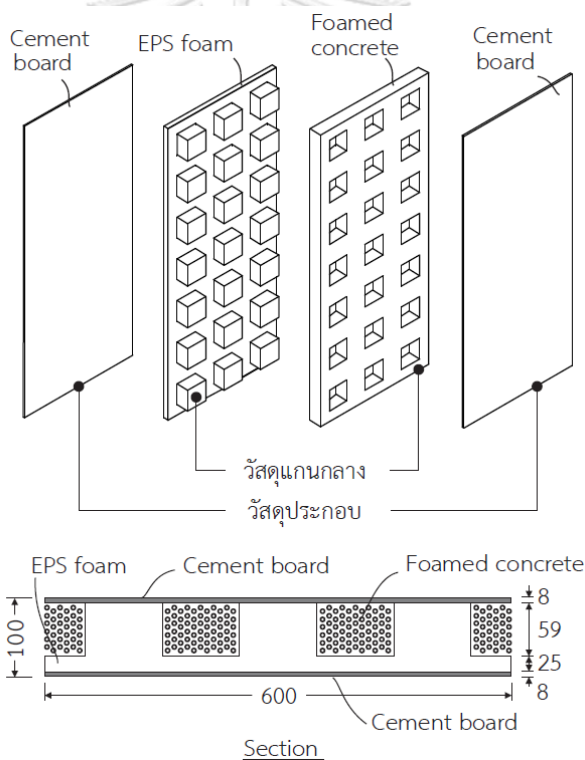
2.4.1. แกนโฟม (Cellular foam)

โฟมเป็นวัสดุแกนกลางที่มีความแข็งแรงเมื่อเทียบกับน้ำหนักตัวเอง สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำ สามารถผลิตได้จากวัสดุหลายประเภท เช่น โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane หรือ PU foam) โฟมพีวีซี (Polyvinyl Chloride หรือ PVC foam) โฟมพีเอ็มเอ (Polymethacrylimide หรือ PMI foam) โฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene หรือ PS foam)

ทงศักดิ์ อิมใจ และ จิราวัฒน์ พุ่มเกสร, (2561) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างระบบผนังคอมโพสิตแบบผสมภายใต้แรงดัดและแรงตามแนวแกน โดยทำการทดสอบแผ่นผนังคอมโพสิตแบบผสม ความกว้าง 600 มิลลิเมตร ความยาว 2,400 มิลลิเมตร จำนวน 16 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ Type A เป็นแผ่นผนังต่อเนื่อง ไม่มีโครงเหล็กแกนกลาง และ Type B เป็นการจำลองโครงสร้างช่วงผนังบริเวณรอยต่อโดยมีโครงเหล็กยึดเย็น (Cold-form Section) ขนาด C75×45 เป็นแกนกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2-1 โดยผนังทั้ง 2 ชนิด มีวัสดุแกนกลางคอนกรีตผสมเม็ดโฟมโพลียูรีเทน (Expandable Polystyrene; EPS) รูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 100×100 มิลลิเมตร หนา 59 มิลลิเมตร มีระยะห่าง 100 มิลลิเมตร อยู่บนแผ่นโฟมหนา 25 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2-2 และประกบด้านนอกด้วยแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ทั้ง 2 ด้าน ด้วยกาวเฉพาะสำหรับติดโฟม EPS เทคอนกรีตผสมเม็ดโฟมตามอัตราส่วน ลงในช่องว่างในแผ่นผนัง



รูปที่ 2-1 ชนิดของตัวอย่างทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (หน่วยมิลลิเมตร)
(ทงศักดิ์ อิมใจ และ จิราวัฒน์ พุ่มเกสร, 2561)



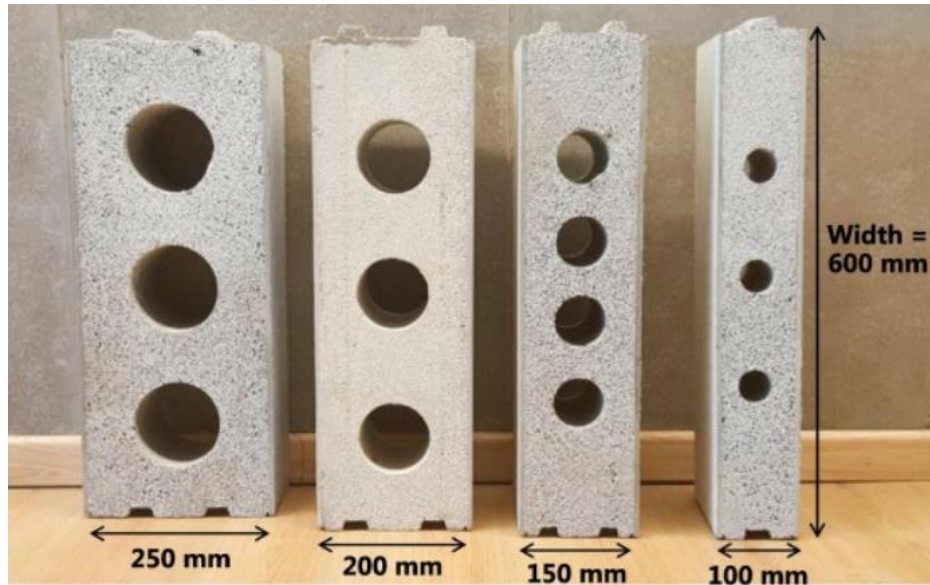
รูปที่ 2-2 รายละเอียดระบบผนังคอมโพสิตแบบผสม (หน่วยมิลลิเมตร)
(ทงศักดิ์ อิมใจ และ จิราวัฒน์ พุ่มเกสร, 2561)

ผลการทดสอบพบว่า ค่าการแอ่นตัวของผนัง Type A มีค่าสูงกว่า Type B เมื่อพิจารณาที่ค่าน้ำหนัก P2 เท่ากัน เนื่องจากผนัง Type B มีเหล็กกรีดยื่นอยู่บริเวณแกนกลาง จึงมีค่า Stiffness สูงกว่าแบบ Type A ทำให้ค่าน้ำหนักที่วิบัติของผนัง Type B มีค่าสูงกว่า Type A

ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างค่าน้ำหนักในสภาวะใช้งาน (Serviceability Load) ต่อค่าน้ำหนักสูงสุด (Ultimate Load) มีค่าเท่ากับร้อยละ 31.2 สำหรับ Type A และ ร้อยละ 36.7 สำหรับ Type B จึงกำหนดตัวคูณลดกำลังเท่ากับ 0.3 ในแผนภูมิปฏิสัมพันธ์ สำหรับการออกแบบโครงสร้างผนังคอมโพสิตเพื่อให้ผลการวิเคราะห์และออกแบบเป็นไปในเชิงอนุรักษ์

กิตติพันธ์ บุญโตสิตระกุล และคณะ, (2560) ได้ทำการศึกษาแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปน้ำหนักเบาจากเศษโพลีเมอร์จุกกัณฑ์ วัสดุและอุปกรณ์ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ทราฮายาบ หินก่อสร้าง หรือหินปูน ขนาด 3/8 นิ้ว น้ำประปา เศษโพลีเมอร์จุกกัณฑ์ หรือแผ่นโพลีชนิด EPS ความหนาแน่นทั่วไป 0.625 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต โดยมีขั้นตอนการผลิตผนังคอนกรีตสำเร็จรูปผสมเศษโพลีเมอร์จุกกัณฑ์เหลือทิ้งประกอบด้วย ขั้นตอนการวางและเชื่อมเหล็กเส้น เหล็กแผ่น และเหล็กฉาก ขั้นตอนการบดย่อยโพลี ขั้นตอนการผสมและเทคอนกรีตลงแบบหล่อ และขั้นตอนการบ่มผนังคอนกรีตสำเร็จรูป ซึ่งอัตราส่วนของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปผสมเศษโพลีเมอร์จุกกัณฑ์เหลือทิ้งที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วน F75 ซึ่งมีส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 : ทราฮายาบ : หินก่อสร้าง : เศษโพลี : น้ำประปา เท่ากับ 1 : 2 : 4 : 0.075 : 0.7 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่มีคุณสมบัติผ่านตามที่มาตรฐาน มอก.2226 - 2548 เรื่องแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปประเภทที่ 2 อาคารสำนักงานกำหนด ผลของการผสมเศษโพลีเมอร์จุกกัณฑ์เหลือทิ้งลงในผนังคอนกรีตสำเร็จรูป สามารถช่วยให้ความหนาแน่น น้ำหนักต่อแผ่น และสภาพการนำความร้อนมีค่าลดลง ในขณะที่ลักษณะทั่วไป ความตรง ความแข็ง ความทนการกระแทก การดูดซึมน้ำ ความต้านทานแรงอัด และความต้านทานแรงดัด มีค่าผ่านตามที่มาตรฐาน มอก.2226 - 2548 กำหนดผนังคอนกรีตสำเร็จรูปผสมเศษโพลีเมอร์จุกกัณฑ์เหลือทิ้งอัตราส่วน F75 สามารถยกโดยแรงงานคน 2 คน ติดตั้งได้โดยการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้าในบริเวณระหว่างผนังคอนกรีตสำเร็จรูปแต่ละแผ่น แล้วจึงฉาบปิดรอยเชื่อมด้วยปูนฉาบทั่วไป ได้ผนังที่มีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อน ก่อสร้างเร็ว และมั่นคงแข็งแรง โดยมีต้นทุนค่าวัสดุดิบในการขึ้นรูป เท่ากับ 264 บาทต่อตารางเมตร

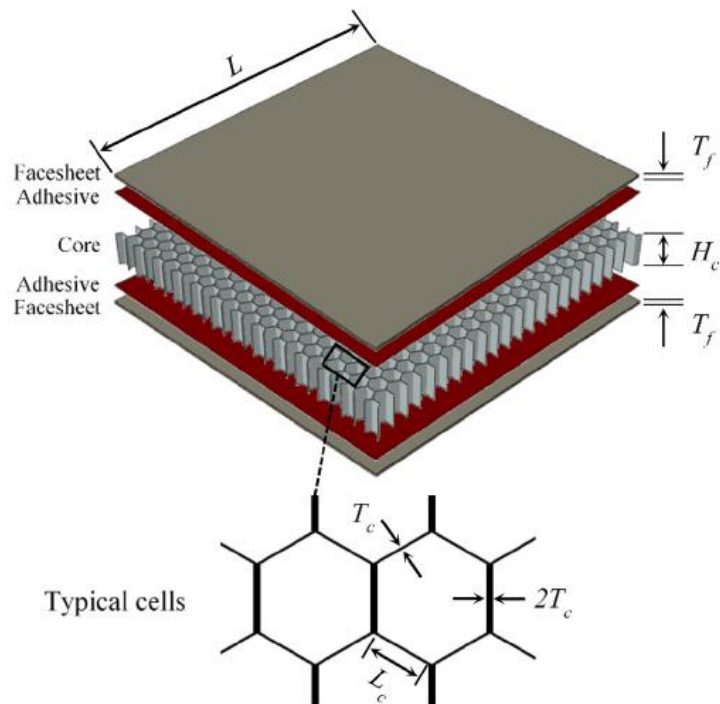
Assaad และคณะ, (2018) ได้ทำการทดสอบและสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของแผ่นผนังน้ำหนักเบาแบบแซนวิชต้านแรงลมและแรงแผ่นดินไหว โดยแผ่นผนังประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Calcium-silicate board (CSB) และ Polystyrene lightweight concrete (LWC) เป็นแกนของแผ่นแซนวิช ดังแสดงในรูปที่ 2-3 ซึ่งเน้นความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกของการเชื่อมต่อแผ่นแซนวิช ด้วยลิ้มและร่อง รวมถึงการถ่ายเทกำลังผ่านเหล็กเดือย (Steel dowels) ไปยังโครงสร้างที่มีอยู่ Polystyrene lightweight concrete มีความหนาแน่น 470 - 975 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เหล็กเส้นที่เชื่อมต่อแผ่น LWC กับโครงสร้างที่มีอยู่จะต้องอยู่ภายใต้แรงตามแนวแกนและแรงเฉือน



รูปที่ 2-3 แผ่นแซนวิชแกนโฟม LWC (Assaad และคณะ, 2018)

2.4.2. แกนรังผึ้ง (Honeycomb)

วัสดุที่มักนำมาทำเป็นแกนกลางแบบรังผึ้ง เช่น กระจาด อลูมิเนียม แก้ว ไม้อัด คาร์บอน เป็นต้น โดยนำมาทำเป็นรูปทรงคล้ายรังผึ้ง นิยมใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างผนังประกอบ มีข้อดี คือน้ำหนักเบามาก รับแรงได้ดีเมื่อเทียบกับน้ำหนักตัวเอง (Strength to weight ratio)



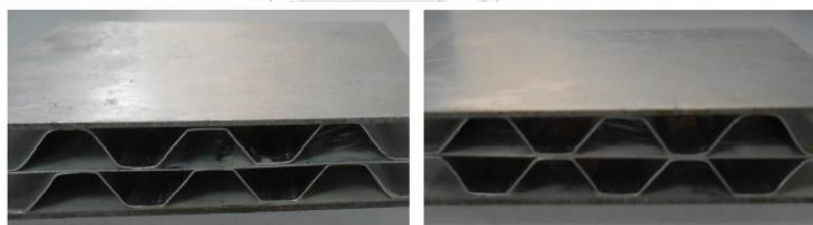
รูปที่ 2-4 ตัวอย่างแผ่นแซนวิชแกนรังผึ้ง (Wang และคณะ, 2019)

Wang และคณะ, (2019) ศึกษาโครงสร้างแซนวิชรังผึ้งซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางในสาขาวิศวกรรม เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงและมีความแข็งแรงสูง ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการต้านทานการตัดของแผ่นผนังแซนวิชแกนรังผึ้ง โดยมีแผ่นกระเบื้องเซรามิกเป็นวัสดุประกบ ผ่านการทดลองแรงตัดสามจุด โดยพบว่าแผ่นผนังแซนวิชแกนรังผึ้ง ที่มีกระเบื้องเซรามิกเป็นวัสดุประกบผิว มีความแข็งแรงและต้านทานแรงตัดได้ดีกว่าชนิดอื่นๆ

2.4.3. แกนลอนลูกฟูก (Corrugated)

แกนกลางที่เป็นลอนลูกฟูก เป็นแกนกลางที่ทำจากแผ่นวัสดุแข็ง เช่น เหล็ก ไม้อัด พลาสติก เป็นต้น

Shu และคณะ, (2018) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการดูดซับพลังงานของแผ่นแซนวิชแบบแกนลูกฟูก 2 ชั้นที่มีการบีบอัดแบบกึ่งสถิติแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการบีบอัดของแผ่นแซนวิชแบบแกนลูกฟูกแบบสมมาตร (Symmetric-arranged) ดีกว่าการจัดแผ่นแซนวิชแบบลูกฟูกแบบสม่ำเสมอ (Regularly-arranged) จากการเปรียบเทียบผลการทดลองของแผ่นผนังแซนวิชทั้ง 2 แบบที่มีการจัดเรียงแตกต่างกัน พบว่าแผ่นแซนวิชลูกฟูกที่จัดวางแบบสมมาตร มีสมรรถนะในการดูดซับพลังงานที่ดีขึ้น ซึ่งมากกว่าร้อยละ 17.17 ที่ระยะห่างราว 6 มิลลิเมตร ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของขนาดและรูปร่างพบว่า มีผลอย่างมากต่อการตอบสนองต่อความล้มเหลวของโครงสร้าง



(a) regularly-arranged

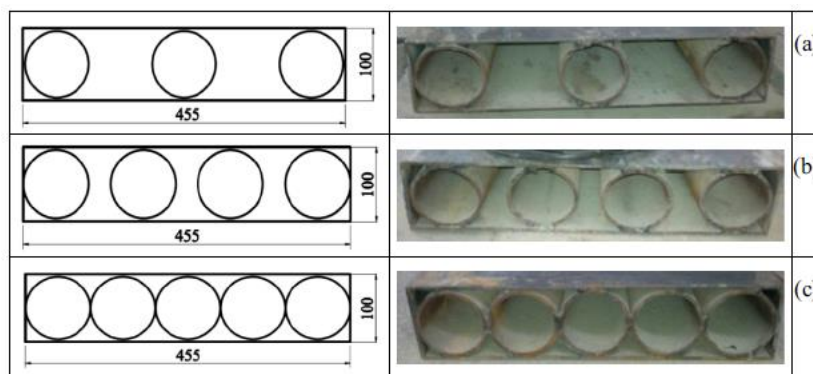
(b) symmetric-arranged

รูปที่ 2-5 แผ่นแซนวิชแกนลูกฟูก (Shu และคณะ, 2018)

2.4.4. แกนท่อโลหะ (Tube-core)

Xia และคณะ, (2016) ศึกษาแผ่นผนังแซนวิชแกนกลางถูกออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่เป็นแผ่นป้องกันการระเบิดของผนัง ท่อเหล็กมีราคาไม่แพงมากและแข็งแรง สำหรับผนังป้องกันการระเบิดและสามารถเชื่อมต่อกับแผ่นหน้าโดยการเชื่อมโลหะ การทดสอบการดัดงอสามจุดแบบคงที่ การทดสอบการระเบิดระยะใกล้และการทดสอบการระเบิดแบบสัมผัสเพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการระเบิด ในการระเบิดบริเวณใกล้ผิวหน้าสามารถช่วยลดแรงกระแทกของคลื่นกระแทกผ่านการเปลี่ยนรูปแบบและแผ่นมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานคลื่นกระแทก เมื่อสัมผัสกับการระเบิด แผ่นจะลดทอนคลื่นกระแทกผ่านท่อที่มีการกระแทกและการเอียง ความหนาที่เหมาะสมของใบหน้าด้านหน้าและผนังท่อช่วยดูดซับพลังงาน การทดสอบแสดงให้เห็นว่าแผ่นแกนกลางที่มีช่องว่างเป็น

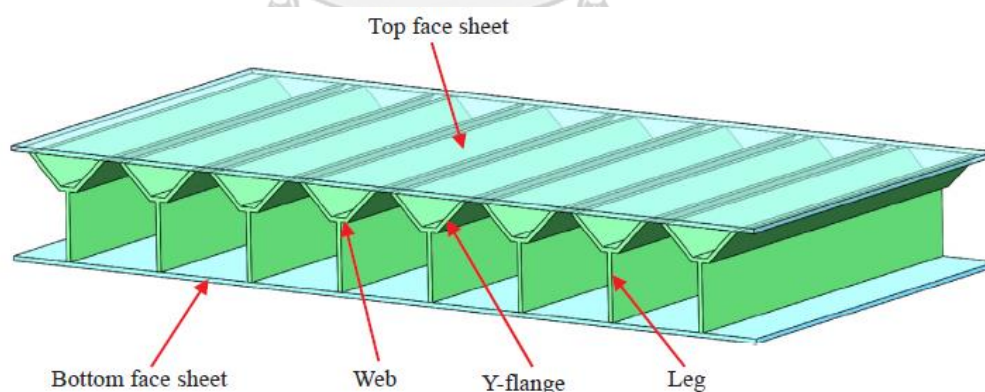
ตัวเลือกที่ดีกว่าสำหรับการระเบิดระยะใกล้ ในขณะที่แผ่นแกนหลักที่เชื่อมต่อมีข้อได้เปรียบภายใต้การระเบิดแบบสัมผัส



รูปที่ 2-6 แผ่นแกนวิชแกนท่อโลหะ (Xia และคณะ, 2016)

2.4.5. แกนตัว Y (Y-shaped cores)

Zhou และคณะ, (2018) ได้ทำการศึกษาลักษณะของอุณหภูมิต่อสมบัติเชิงกลและกลไกการแตกหักของแผ่นคอมโพสิตแกนวิชแกนรูปตัว Y ภายใต้การบีบอัดนอกระนาบ แผ่นแกนวิชคาร์บอนไฟเบอร์คอมโพสิตที่มีแกนรูปตัว Y ทำการทดสอบแรงอัดนอกระนาบของแผ่นแกนวิชคอมโพสิตทำการทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 20 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวิเคราะห์เส้นโค้งความเค้น ความเครียด โหมดความล้มเหลว และความแข็งแรงของแผ่นแกนวิชคอมโพสิตที่อุณหภูมิสูงและเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษพบว่าอุณหภูมิต่อคุณสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมการแตกหักของแผ่นแกนวิชคอมโพสิตอย่างมีนัยสำคัญ และอุณหภูมิสูงส่งผลให้กำลังอัดลดลง



รูปที่ 2-7 แผ่นแกนวิชแกนรูปตัว Y (Zhou และคณะ, 2018)

จะเห็นได้ว่าวัสดุแกนกลางแผ่นผนังประกอบแกนวิชที่กล่าวมานั้น ยังมีข้อจำกัดหรือข้อเสียในการใช้งาน เช่น ปัญหาเรื่องความชื้น ติดไฟง่าย ความหนาแน่นสูง งานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาแผ่นผนังแกนวิชสำเร็จรูปโดยใช้คอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากมาเป็นวัสดุแกนกลางแผ่นผนังประกอบ

แขนวิช ด้วยความหนาแน่นของคอนกรีตที่ต่ำมากนี้ จะทำให้มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดี เช่น การนำความร้อน ทนไฟ กันเสียง เป็นต้น

2.5. คอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

Pan และคณะ, (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตโฟมมีความหนาแน่นที่ต่ำมาก อยู่ระหว่าง 150-300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยเตรียมสารเกิดฟองอากาศจะทำผ่านกระบวนการทางเคมีในห้องปฏิบัติการ ปูนปอร์ตแลนด์ธรรมดาเป็นปูนซีเมนต์ที่ถูกเลือกให้เป็นวัสดุหลักแทนการใช้ซีเมนต์พิเศษที่แข็งตัวอย่างรวดเร็ว เช่น ซัลโฟนาเลตซีเมนต์ สารเคมีและสารผสมทางกายภาพถูกนำมาใช้เพื่อการควบคุมคุณสมบัติรีโวลจี้ (Rheological) และความเร็วที่แข็งตัวของสารละลายผสมซีเมนต์สด (Fresh cement) คุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตโฟมที่แข็งตัวอายุการบ่มที่ 28 วัน จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดระหว่าง 0.33 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ถึง 1.1 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร การดูดซึมน้ำระหว่าง 6.6% ถึง 8.3% และค่าการนำความร้อนระหว่าง 0.05 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ถึง 0.07 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นอย่างเหมาะสมของ Polycarboxylate superplasticizer และการเติมผงตะกรันจากเตาเผาที่มีคุณสมบัติพิเศษ เพื่อเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงของคอนกรีตโฟมความหนาแน่นต่ำมาก การป้องกันการสูญเสียน้ำของคอนกรีตโฟมความหนาแน่นต่ำมากด้วยการเติม Styrene-acrylate emulsion ปรากฏการณ์การแตกหัก (Cracking phenomenon) ของคอนกรีตโฟม ความหนาแน่นต่ำมากสามารถควบคุมได้ด้วยผงตะกรันเตาหลอมโลหะขนาดใหญ่ 15-20% โดยเติมเส้นใยโพลีโพรพิลีน (Polypropylene fiber)

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก (Pan และคณะ, 2014)

| No. | Dry density Kg/m ³ | Compressive strength, at 28d (MPa) | Thermal conductivity, at 28d (W/m.°C) | Water absorption, at 28d (%) |
|-----|----------------------------------|--|---|------------------------------------|
| 1 | 303 | 0.79 | 0.070 | 34.4 |
| 2 | 253 | 0.67 | 0.062 | 35.5 |
| 3 | 205 | 0.56 | 0.059 | 36.2 |
| 4 | 153 | 0.41 | 0.050 | 38.2 |

Tan และคณะ, (2014) ได้ศึกษาโฟมคอนกรีตมวลเบา (ความหนาแน่นน้อยกว่า 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมเหมาะสำหรับงานด้านฉนวนกันความร้อนของผนังอาคาร ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของเถ้าลอย อัตราส่วน WC (Water Cement ratio) และสารละลายโฟม (FA : Foaming agent) มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโฟม จากการทดสอบพบว่า การเติมเถ้าลอยช่วยลดความแข็งแรงของโฟมคอนกรีตและปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในระบบโฟมคอนกรีตมวลเบาไม่ควรเกิน 45% ด้วย การเพิ่มตัวกระตุ้น เถ้าลอยทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างโฟมคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและ ปริมาณการผสมที่เหมาะสมของตัวกระตุ้นเถ้าลอย คือ 2.5% สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดของอัตราส่วน WC คือ 0.45 และ FC (Foamed concrete) ที่ผลิตตามสัดส่วนนี้มีกำลังอัดที่ค่อนข้างสูง โดยการเพิ่มปริมาณการผสมของ FA ความต้านทานแรงอัดของ FC จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดและปริมาณการผสมที่เหมาะสมของ FA ในการทดลองนี้คือ 3.5%



รูปที่ 2-8 ตัวอย่างโฟมคอนกรีต (Tan และคณะ, 2014)

Li และคณะ, (2019) คอนกรีตโฟมที่มีน้ำหนักเบาและมีเป็นฉนวนความร้อน สำหรับการใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงในอาคารสีเขียวและอาคารอนุรักษ์พลังงาน โดยจะต้องลดความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนลง (ความหนาแน่น 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการนำความร้อน 0.10 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส) โดยคอนกรีตโฟมแอโรเจล (Aerogels) ชนิดใหม่มีความหนาแน่นต่ำมาก 198 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าการนำความร้อนที่ 0.049 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส โดยการเพิ่มแอโรเจลแบบนาโนที่มีรูพรุนและซูเปอร์นาโนเข้าไปในคอนกรีตโฟม งานวิจัยนี้ได้ ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและการนำความร้อนของคอนกรีตโฟมแอโรเจล



รูปที่ 2-9 ขั้นตอนการเตรียมคอนกรีตโฟม (Li และคณะ, 2019)

Falliano และคณะ, (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโฟม โดยการทดสอบกำลังอัดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นแบบแห้ง ปริมาณน้ำ เงื่อนไขการบ่ม ชนิดของซีเมนต์ และที่สำคัญที่สุด คือ การศึกษาสารเกิดฟองอากาศที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์ โดยศึกษาตัวอย่างคอนกรีตโฟมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.3 และความหนาแน่นแบบแห้งตั้งแต่ 350 ถึง 850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ศึกษาซีเมนต์ 2 ประเภท คือ Portland CEM I 52,5 R และ Portland CEM II AL 42,5 R สารที่ทำให้เกิดฟองอากาศ 3 ชนิด คือ: 1) สารที่ทำให้เกิดฟองอากาศที่ใช้โปรตีน (Protein-based) เรียกว่า Foamin C (ชื่อเครื่องหมายการค้า) 2) สารที่ทำให้เกิดฟองอากาศที่ใช้สารสังเคราะห์ (Synthetic) ที่เรียกว่า SLS (Sodium Laureth Sulphate) ซึ่งใช้ในงานอุตสาหกรรมสบู่ 3) สารที่ทำให้เกิดฟองอากาศที่เน้นพฤติกรรมความมั่นคงกับซีเมนต์ประสานชื่อ FoamTek พบว่าสาร

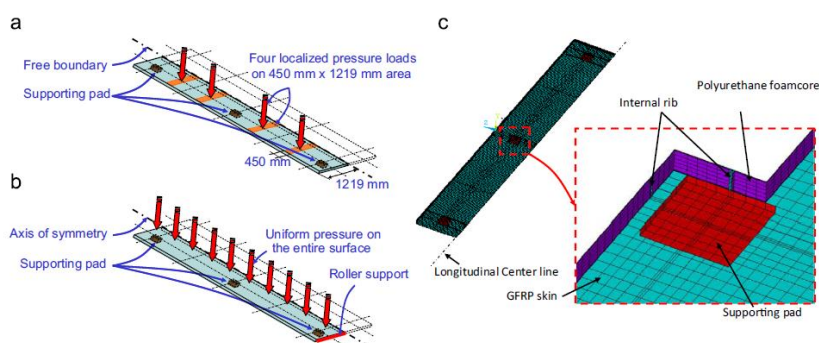
ที่ทำให้เกิดฟองอากาศที่ใช้โปรตีนเป็นส่วนประกอบทำให้มีกำลังอัดที่สูงกว่าสารที่ทำให้เกิดฟองอากาศที่ใช้สารสังเคราะห์ แต่สารที่ทำให้เกิดฟองอากาศที่ใช้สารสังเคราะห์เมื่อผสมเป็นคอนกรีตโพนแล้วมีความเสถียรมากกว่าสารที่ทำให้เกิดฟองอากาศที่ใช้โปรตีน และเงื่อนไขการบ่ม 3 แบบ คือ การบ่มในน้ำที่ 30 องศาเซลเซียส การบ่มด้วยแผ่นกระดาษแก้วหรือพลาสติกใสที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และการบ่มในอากาศที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม พบว่าการบ่มด้วยแผ่นกระดาษแก้วหรือพลาสติกใสที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมให้กำลังอัดที่สูง ในขณะที่การบ่มในอากาศที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมให้กำลังอัดแย่ที่สุด และจากการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จาก 0.3 เป็น 0.5 ส่งผลให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงลดลง



รูปที่ 2-10 การเตรียมคอนกรีตและระยะการหล่อในรูปทรงลูกบาศก์ (Falliano และคณะ, 2018)

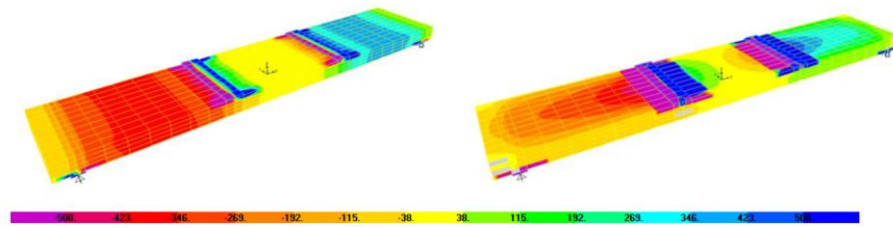
2.6. การวิเคราะห์โครงสร้างผนังด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Sharaf และ Fam, (2013) ได้ศึกษาการทดสอบและการวิเคราะห์องค์ประกอบของพฤติกรรมการดัดงอของแผ่นผนังแขวนวิชนวนคอนกรีตพร้อมตัวเชื่อมต่อแรงเฉือนแผ่นเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ โดยแผ่นผนังแขวนวิชประกอบไปด้วยใยแก้วโพลีเมอร์ (Woven glass fiber reinforced polymer : GFRP) และแกนกลางเป็นโฟมโพลียูรีเทน ซึ่งมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีมาก ถูกออกแบบมาเพื่อต้านทานแรงลม แบบจำลอง 3 มิติ ได้มีการพัฒนาสำหรับแผ่นขนาดใหญ่ที่ทดสอบภายใต้การให้น้ำหนักตามขวาง การจำลองสำหรับวัสดุที่ไม่เชิงเส้น สิ่งที่สำคัญ คือ แกนกลางโพลียูรีเทนที่อ่อนนุ่ม และวัสดุประกบภายใต้การรับแรงเฉือน กับความไม่เชิงเส้นทางเรขาคณิตในการลดความหนาแผ่น แบบจำลองจะแสดงโหมดความเสถียรและความล้มเหลวของวัสดุ การย่นและการบีบอัดที่ผิว โดยใช้โปรแกรม ANSYS ในการสร้างแบบจำลอง



รูปที่ 2-11 ตัวอย่างการจำลองโครงสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์ (Sharaf & Fam, 2013)

Avó de Almeida, (2009) ได้ศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างของแผ่นแขวนวิชคอมโพสิต สำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยศึกษาแผ่นแขวนวิชคอมโพสิต 2 ประเภท ด้วย Glass fiber reinforced polymers (GFRP) เป็นวัสดุประกบ และแกนกลางทำจาก 1) โฟมโพลียูรีเทนแข็ง 2) วัสดุแกนโพลีโพรพิลีนรั้งผึ้ง ทำการประเมินการรับกำลังของแผ่นแขวนวิช GFRP แล้วทำการเสริมกำลัง GFRP ไปยังขอบด้านข้างตามแนวยาวของแผ่นทั้ง 2 ประเภท ทำการทดสอบแบบไดนามิกเพื่อกำหนดและเปรียบเทียบพฤติกรรมแบบไดนามิก การศึกษาการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของแกนแขวนวิชโพลียูรีเทนโฟมแบบแข็ง มีเพื่อพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขอย่างง่ายที่สามารถจำลองพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นแขวนวิชที่จุดรับแรงและขีดจำกัดสูงสุดซึ่งเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบเพิ่มเติมในรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกัน ซึ่งโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติได้รับการพัฒนาด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ SAP2000 (รุ่น 11.07) เนื่องจากความยากในการสร้างโมเดลวัสดุแกนโพลีโพรพิลีนรั้งผึ้ง (เนื่องจากทั้งรูปทรงเรขาคณิตและพฤติกรรมแอนไอโซทรอปิก) และจากข้อจำกัดด้านเวลา จึงมีเพียงแผ่นโฟมแกนกลางของ โฟมโพลียูรีเทนแข็งเท่านั้น



รูปที่ 2-12 แบบจำลองแรงเค้นในแผ่นแซนวิชโฟมโพลียูรีเทนแข็ง
แบบมาตรฐาน(ซ่าย) แบบเสริมGFRP(ขวา) (Avó de Almeida, 2009)



2.7. การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของผนังด้วยวิธีหน้าตัดแปลง

(Hibbeler, 2014) การแปลงหน้าตัดของแผ่นวัสดุประกอบแซนวิชที่เป็นแกนฉนวนคอนกรีต ความหนาแน่นต่ำมากด้วยการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น เพื่อแปลงหน้าตัดประกอบเหล่านั้นให้เป็นหน้าตัดวัสดุชนิดเดียว

$$n = \frac{E_1}{E_2} \quad (2-1)$$

เมื่อ n = แฟคเตอร์การแปลงหน้าตัดวัสดุ

E = โมดูลัสอีลาสติก (GPa)

$$b_2 = nb_1$$

เมื่อ b = ความกว้างของหน้าตัด (mm)

การหาค่าโมเมนต์อินเนอร์เซียจะหาได้จากสมการที่ 2-2 โดยจะหาจากหน้าตัดของรูปที่แปลงหน้าตัดแล้ว

$$I_{total} = \sum(\bar{I}_i + A_i d_i^2) \quad (2-2)$$

เมื่อ \bar{I}_i = โมเมนต์อินเนอร์เซียของแต่ละชั้นส่วน (mm⁴)

A_i = พื้นที่ของแต่ละชั้นส่วน (mm²)

d_i = ระยะจากจุดศูนย์กลางของชั้นส่วนย่อยถึงแกนสะเทินของหน้าตัด (mm)

$$\bar{I} = \frac{1}{12} b h^3 \quad (2-3)$$

เมื่อ b = ความกว้างของชั้นส่วนย่อย (mm)

h = ความสูงของชั้นส่วนย่อย (mm)

การคำนวณความเค้นเฉือน จากสมการที่ 2-4

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (2-4)$$

$$Q = \sum \bar{y} A \quad (2-5)$$

เมื่อ τ = ความเค้นเฉือนบนระนาบแนวราบที่มีระยะ y' ห่างจากแกนสะเทิน (N/mm²)

V = แรงเฉือนภายในที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด (N)

I = โมเมนต์อินเนอร์เซีย (mm⁴)

t = ความกว้างของหน้าตัดที่ต้องการหาค่าหน่วยแรงเฉือน (mm)

\bar{y} = ระยะจากจุดกึ่งกลางของ A' ถึงแกนสะเทิน (mm)

A = พื้นที่หน้าตัดส่วนบนหรือส่วนล่าง ณ จุดที่ต้องการพิจารณาความเค้นเฉือน (mm²)

2.8. การทดสอบความแข็งแรงของผนังตามมาตรฐาน BS 5234

BS 5234-2, (1992) เป็นมาตรฐานของประเทศอังกฤษ เพื่อใช้ในการกำหนดการทดสอบความแข็งแรงของผนัง ซึ่งการทดสอบแต่ละวิธีจะจำลองการใช้งานจริงของระบบผนัง โดยแบ่งผนังตามประเภทการใช้งานออกเป็น 4 ประเภท และมีการทดสอบทั้งหมด 7 การทดสอบ

1. Partition Stiffness การทดสอบความแข็งแรงของผนังโดยใช้แรงกระทำจุดเดียว (Point load)
2. Small Hard Body Impact การทดสอบความแข็งแรงของผนังโดยใช้การกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก (มอก.2226, 2548)
3. Large Soft Body Impact การทดสอบความแข็งแรงของผนังโดยใช้การกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (มอก.2226, 2548)
4. Door Slamming การทดสอบความทนทานของผนังเมื่อทำการเปิด-ปิด ประตูกระแทกซ้ำๆ
5. Crowd Pressure การทดสอบความแข็งแรงของผนังโดยให้ผนังรับแรงดัน
6. Light Weight Anchorage การทดสอบผนังโดยการรับแรงแขวนของวัตถุน้ำหนักเบา
7. Heavy Weight Anchorage การทดสอบผนังโดยการรับแรงแขวนชิ้นวางของวัตถุน้ำหนักมาก

โดยการทดสอบที่ 1-4 จะมีการแบ่งระดับของผนังเอาไว้ในแต่ละการทดสอบ เมื่อทดสอบครบทั้ง 4 การทดสอบ จะนำผลการทดสอบมาประเมินเพื่อแบ่งระดับของผนัง ดังแสดงในตารางที่ 2-2 ส่วนการทดสอบที่ 5-7 เป็นการทดสอบเพื่อให้รู้ถึงสมรรถภาพของผนัง ตารางที่ 2-2 การแบ่งประเภทการใช้งานของผนัง

| เกรด | ลักษณะการใช้งาน | พื้นที่ใช้งาน |
|------------------|---|--|
| Light duty (LD) | ใช้กันพื้นที่ส่วนบุคคล พื้นที่ที่มีบุคคลอยู่อาศัยน้อย มีการกระทบกระทั่งน้อย มีโอกาสเกิดอุบัติเหตุตุน้อย | ที่พักอาศัย |
| Medium duty (MD) | ใช้กันพื้นที่ที่มีการใช้งานและมีการกระทบกระทั่งปานกลาง มีโอกาสเกิดอุบัติเหตุมากกว่า | สำนักงาน, อาคารพาณิชย์ |
| Heavy duty (HD) | ใช้กันพื้นที่สาธารณะจากบุคคลต่างๆ มีการใช้งานบ่อย มีโอกาสเกิดอุบัติเหตุมากกว่า | โรงงานอุตสาหกรรม |
| Severe duty (SD) | ใช้กันพื้นที่สาธารณะ ที่มีบุคคลใช้งานจำนวนมาก มีโอกาสเกิดอุบัติเหตุสูงมาก | โรงงานอุตสาหกรรมหนัก บริเวณที่มีบุคคลหนาแน่น |

ตารางที่ 2-3 สรุปความต้องการในการทดสอบเพื่อแบ่งระดับประสิทธิภาพ

| No. | Requirement | Grade | | | | Units | Criteria |
|-----|--|-------|----|-----|-----|-------|---|
| | | LD | MD | HD | SD | | |
| 1 | Stiffness | 25 | 20 | 15 | 10 | mm | Maximum deflection |
| | | 5 | 3 | 2 | 1 | mm | Maximum residual deformation |
| 2 | Small hard body impact : surface damage | 3 | 3 | 6 | 10 | N m | Judgement of indent |
| | | | | 5 | 15 | | 30 |
| 3 | Large soft body impact : damage | 20 | 20 | 40 | 100 | N m | 2 mm maximum deformation |
| | | | | 60 | 60 | | 120 |
| 4 | Door slam | 20 | 20 | 100 | 100 | No. | No damage and 1 mm maximum displacement |

ตารางที่ 2-4 สรุปความต้องการในการทดสอบเพื่อแบ่งระดับประสิทธิภาพ

| No. | Requirement | Performance level | Units | Principal criteria |
|-----|--|--------------------|-------|---|
| 5 | Crowd pressure | 0.75, 1.5 or 3.0 | kN/m | No collapse or dangerous damage |
| 6 | Lightweight anchorages : pull-out | 100 minimum | N | Shim retained |
| | | 250 minimum | N | Shim retained and 2 mm maximum displacement |
| 7 | Heavyweight anchorages : wash basin | 500 minimum | N | 5 mm maximum deflection |
| | | 1000 to 1500 range | N | 20 mm maximum deflection |
| | | 2000 to 4000 range | N | 5 mm maximum deflection |

การศึกษานี้จะพิจารณาทดสอบเฉพาะการทดสอบความแข็งแรงของผนังโดยใช้การกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก และการทดสอบความแข็งแรงของผนังโดยใช้การกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่เท่านั้น เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐาน มอก.2226 - 2548 เป็นหลัก

2.8.1 การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก (Small Hard Body Impact)

การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก เป็นการทดสอบความแข็งแรงของผนังในการทนทานต่อความเสียหายที่เกิดการกระแทกจากวัสดุต่างๆ ในระหว่างการใช้งาน ซึ่งได้จำลองการทดสอบโดยใช้ตุ้มกระแทกทรงกลมขนาด 50 มิลลิเมตร ถ่วงด้วยน้ำหนัก 3 กิโลกรัม โดยแกว่งตุ้มให้กระแทกกับผิวผนัง แล้วบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้น การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบย่อย คือ

- 1) Surface damage พลังงานกระแทกต่ำ โดยที่ก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อผิวหน้าของผนังเกินกว่าจะซ่อมแซมได้หรือไม่ โดยการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex B

ตารางที่ 2-5 Angles of swing for small hard body impact test: surface damage

| Grade | Impact energy N m | Angle of swing ° |
|-------|----------------------|---------------------|
| LD | 3 | 33.6 |
| MD | 3 | 33.6 |
| HD | 6 | 48.2 |
| SD | 10 | 63.6 |

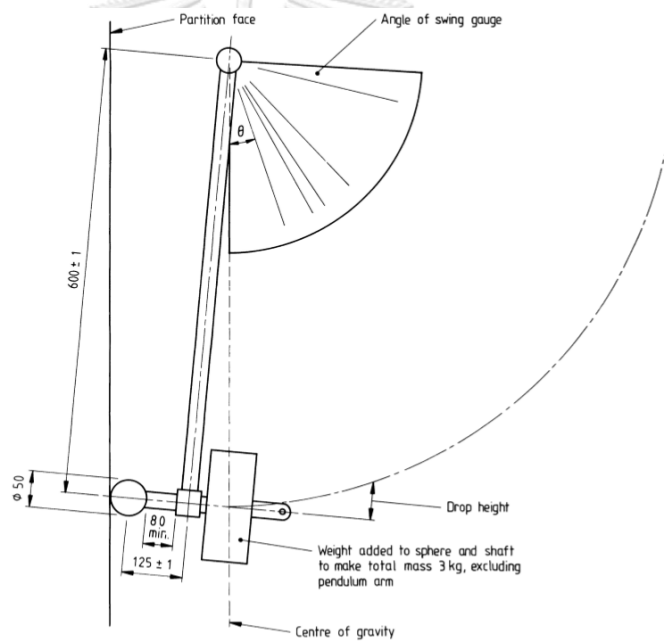
- 2) Perforation พลังงานกระแทกสูง โดยที่ก่อให้เกิดการเจาะทะลุต่อผิวหน้าของผนังหรือไม่ โดยการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex D

ตารางที่ 2-6 Angles of swing for resistance to perforation test

| Grade | Impact energy N m | Angle of swing ° |
|-------|----------------------|---------------------|
| LD | No requirement | |
| MD | 5 | 43.8 |
| HD | 15 | 80.4 |
| SD | 30 | 131.8 |

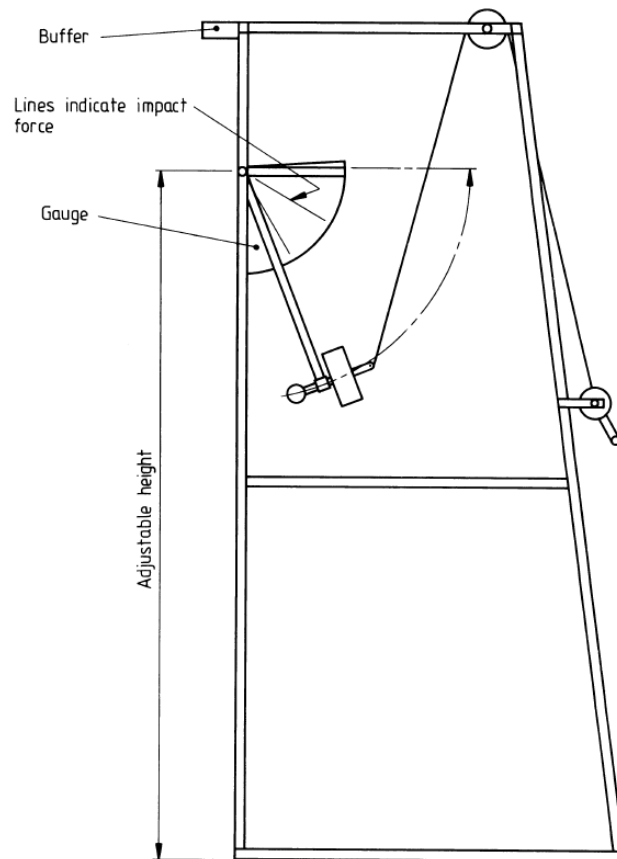
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) ตี้มกระแทกทรงกลมขนาด 50 มิลลิเมตร น้ำหนัก 3 กิโลกรัม



รูปที่ 2-13 อุปกรณ์สำหรับทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทกด้วย

วัสดุแข็งขนาดเล็ก (BS 5234-2, 1992)



รูปที่ 2-14 อุปกรณ์สำหรับทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทกด้วย
วัสดุแข็งขนาดเล็ก (BS 5234-2, 1992)

2.8.2 การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (Large Soft Body Impact)

การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ เป็นการทดสอบความแข็งแรงของผนังในการทนทานต่อความเสียหายที่เกิดการกระแทกจาก ผู้อยู่อาศัยหรือวัสดุขนาดใหญ่ต่างๆ ในระหว่างการใช้งาน ซึ่งได้จำลองการทดสอบโดยใช้ตุ้ม กระแทกจากถ่วงทราย น้ำหนัก 50 กิโลกรัม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบย่อย คือ

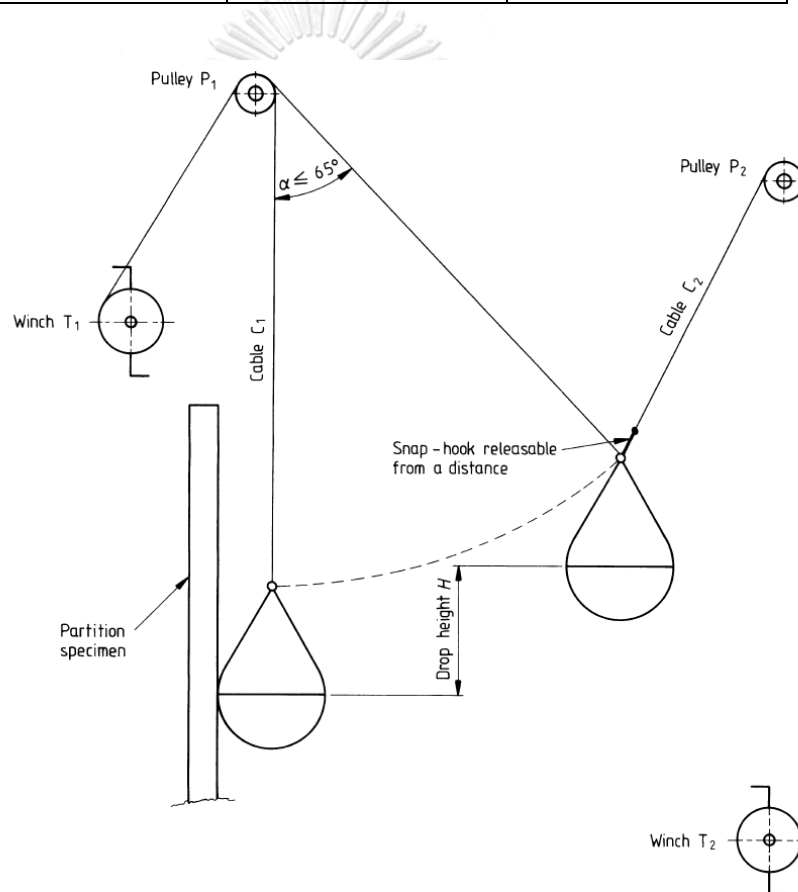
- 1) Damage พลังงานกระแทกที่ทำให้เกิดการโก่งตัวสูงสุด เป็นการทดสอบรับแรง กระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ กระแทกเพียง 1 ครั้ง โดยผนังต้องไม่เกิด การเสียรูปถาวร (Permanent deformation) เกิน 2 มิลลิเมตร ซึ่งการทดสอบ เป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex C
- 2) Structural damage พลังงานกระแทกที่ทำให้เกิดการแตกหัก เป็นการทดสอบ รับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ กระแทกผนังจุดเดิม 3 ครั้ง โดยผนัง ต้องไม่เกิดการพังทลาย ซึ่งการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex E

ตารางที่ 2-7 BS 5234:1992 part 2 Annex C

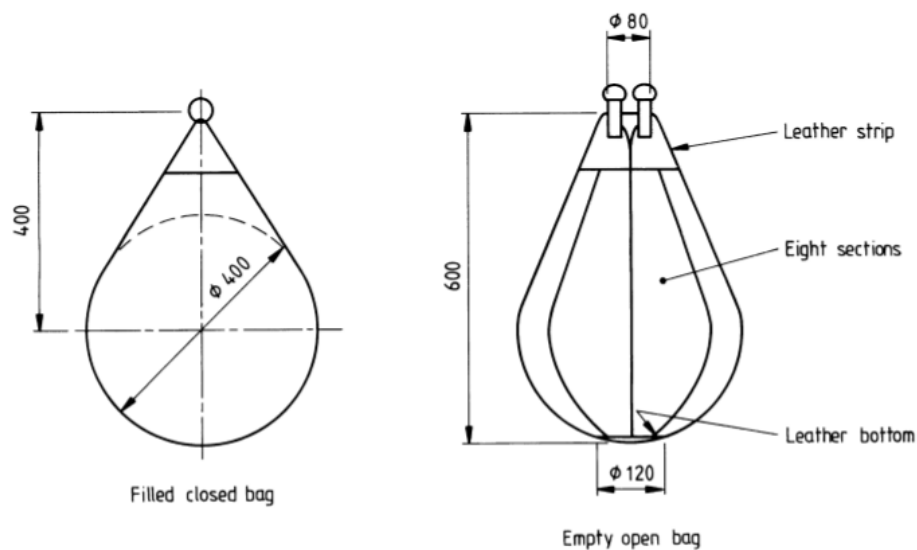
| Grade | Impact energy | Pendulum head |
|-------|---------------|-------------------|
| | N m | drop height mm |
| LD | 20 | 41 |
| MD | 20 | 41 |
| HD | 40 | 82 |
| SD | 100 | 204 |

ตารางที่ 2-8 BS 5234:1992 part 2 Annex E

| Grade | Impact energy | Pendulum head drop height |
|-------|---------------|---------------------------|
| | N m | mm |
| LD | 60 | 122 |
| MD | 60 | 122 |
| HD | 120 | 245 |
| SD | 120 | 245 |



รูปที่ 2-15 อุปกรณ์สำหรับทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (BS 5234-2, 1992)



All dimensions are in millimetres.

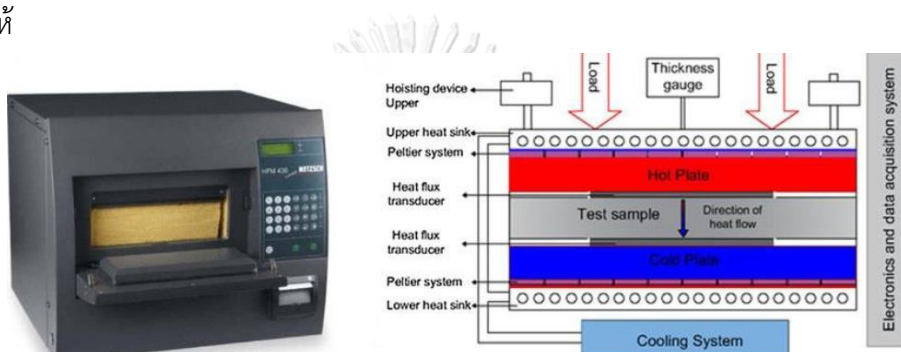
รูปที่ 2-16 วัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ น้ำหนัก 50 กิโลกรัม (BS 5234-2, 1992)

ตารางที่ 2-9 แสดงการเปรียบเทียบผนังทดสอบ Large Soft Body Impact

| Grade | การทดสอบ Resistance to Damage | | | การทดสอบ Structural Damage | | |
|-------|-------------------------------|-------------|-------------------------|----------------------------|-------------|-------------------------|
| | Impact Energy | Drop Height | Criteria for acceptance | Impact Energy | Drop Height | Criteria for acceptance |
| LD | 20 N m | 41 mm | ผนังไม่ก่อให้เกิด | 60 N m | 122 mm | ผนังไม่ก่อให้เกิด |
| MD | 20 N m | 41 mm | การเสียรูปถาวร | 60 N m | 122 mm | การพังทลาย |
| HD | 40 N m | 82 mm | เกิน 2 มม. หรือไม่ | 120 N m | 245 mm | |
| SD | 100 N m | 204 mm | เกิดความเสียหาย ใดๆ | 120 N m | 245 mm | |

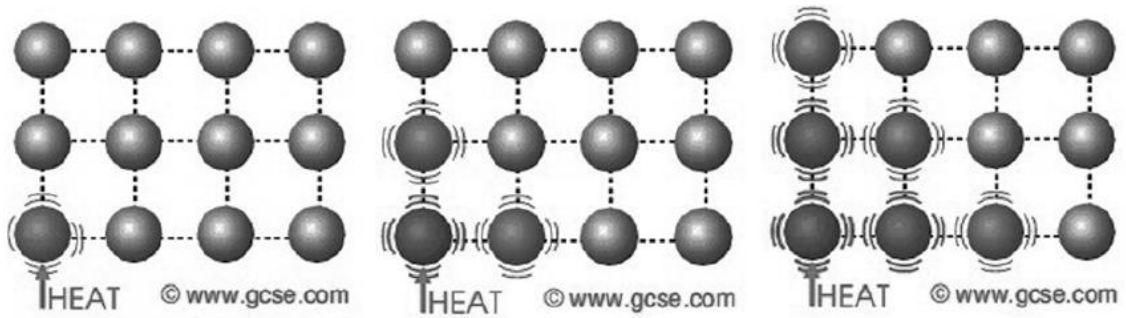
2.9. การหาค่าความเป็นฉนวน

สมจิตร พุฒดี, (2019) การวัดการนำความร้อนแบ่งได้ 2 วิธี คือ การวัดแบบสภาวะไม่คงที่ (Transient method) สามารถวัดได้รวดเร็ว แต่การคำนวณจะยุ่งยากและซับซ้อน และแบบสภาวะคงที่ (Steady-state method) นิยมใช้กับวัสดุที่มีความเป็นฉนวน โดยการทดสอบแบบสภาวะคงที่ด้วยวิธี Heat flow meter (HFM) เป็นวิธีการทดสอบที่ง่าย และรวดเร็ว ใช้ชิ้นงานทดสอบแค่ชิ้นเดียว โดยเครื่อง HFM จะประกอบด้วย Plate 2 อันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ Hot plate และ Cold plate โดยความร้อนจะถ่ายเทจากอุณหภูมิสูงไปอุณหภูมิต่ำ แล้วตัวเครื่องจะทำการวัด Heat flow ด้วย Sensor เมื่อเครื่องเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-state) และคำนวณค่าสภาพการนำความร้อนออกมาให้



รูปที่ 2-17 Heat flow meter (HFM 436) และการทำงานของเครื่องตามมาตรฐาน (ASTM C518)

การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ของวัสดุโดยทั่วไปมี 3 ลักษณะ คือ การนำความร้อน (Convection) การพาความร้อน (Conduction) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) วัสดุที่เป็นของแข็ง การนำความร้อนถือว่ามีความสำคัญ เมื่อวัสดุได้รับพลังงานความร้อน อะตอมที่ได้รับความร้อนจะเกิดการสั่นสะเทือนและชนกับอะตอมที่อยู่ข้างๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมที่อยู่ติดกันต่อไปเรื่อยๆ โดยที่อุณหภูมิจะไม่เคลื่อนที่แต่พลังงานความร้อนเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2-18 วัสดุที่มีความสามารถนำความร้อนได้ดี เรียกว่า ตัวนำความร้อน ส่วนวัสดุที่นำความร้อนได้ต่ำ เรียกว่า ฉนวนกันความร้อน ส่วนค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการนำความร้อน พิจารณาจากค่าสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity, K) และค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance, R) วัสดุที่เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีต้องมีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำ และมีค่าความต้านทานความร้อนสูง



รูปที่ 2-18 การถ่ายเทความร้อนเมื่ออนุภาคได้ความร้อน โมเลกุลสั่นสะเทือน

และถ่ายเทพลังงานให้โมเลกุลที่อยู่ติดกัน (กรองทิพย์, 2560)

การคำนวณค่าการนำความร้อนของ Heat flow meter จะใช้สมการของ Fourier's law

ดังสมการที่ 2-6

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (2-6)$$

เมื่อ k = สภาพนำความร้อน (W/m.°C)

Q = ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง (W)

A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m²)

L = ความหนาของชิ้นทดสอบ (m)

ΔT = อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิววัสดุด้านอุณหภูมิสูงและด้านอุณหภูมิต่ำ(C)

ส่วนค่าความต้านทานการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal resistance, R-Value) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-7

$$R = \frac{L}{k} \quad (2-7)$$

เมื่อ R = ความต้านทานความร้อน (m²K/W)

และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient,

U-Value) คือส่วนกลับของค่า R-Value ดังสมการที่ 2-8

$$U = \frac{1}{R} \quad (2-8)$$

จากสมการที่ 2-7 จะเห็นว่าความต้านทานความร้อน R ขึ้นกับความหนาของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วย

บทที่ 3

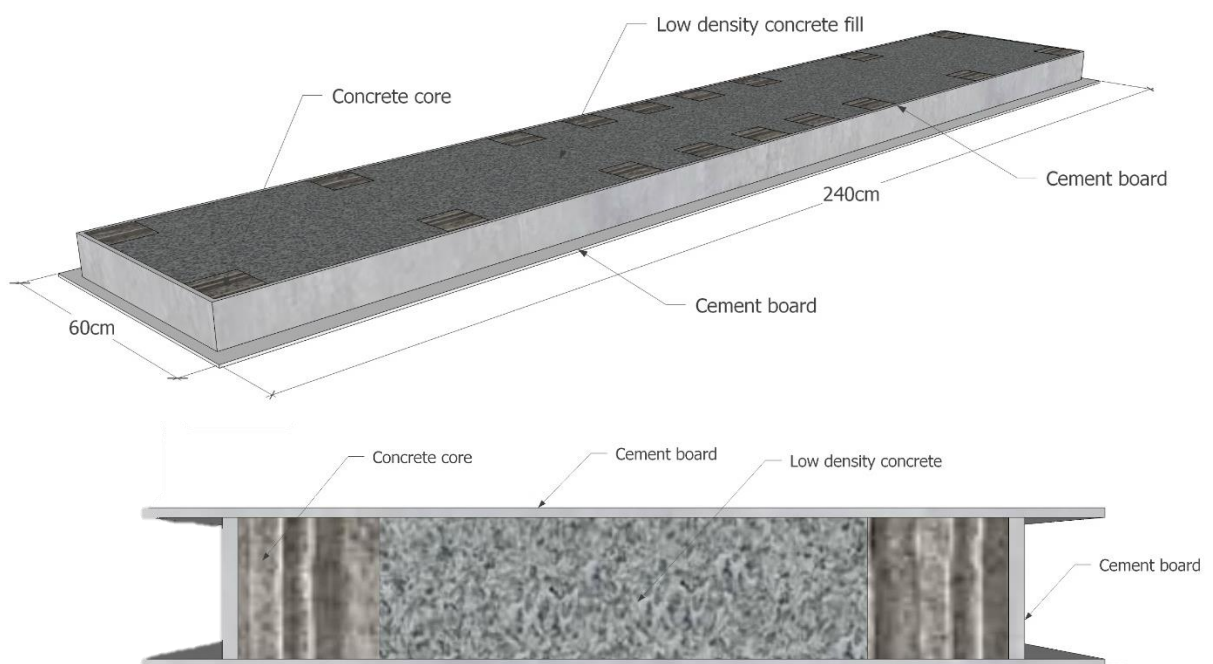
การดำเนินงานวิจัย

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานในการประกอบ ออกแบบ และทดสอบ ผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ดังแสดงตามหัวข้อต่อไปนี้

3.1. แผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

3.1.1. ส่วนประกอบและขนาดของแผ่นผนัง

ในการออกแบบแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก จะเน้นถึงการนำไปใช้งานจริงเป็นหลัก โดยแผ่นผนังจะต้องมีน้ำหนักเบา เพื่อให้สะดวกต่อการขนส่ง สามารถติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็ว โดยแผ่นผนังประกอบด้วยวัสดุประกอบผิวทั้ง 2 ด้าน ด้วยแผ่นซีเมนต์บอร์ด วัสดุแกนกลางประกอบด้วยคอนกรีต 2 ชนิด คือ คอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก (Ultra-low density concrete) ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อน และคอนกรีตความหนาแน่นปกติ (Concrete core) ทำหน้าที่รับกำลังเมื่อผนังได้รับแรงกระทำ และยึดติดวัสดุประกอบผิวกับวัสดุแกนกลางด้วยปูนกาวซีเมนต์ กำหนดให้แผ่นผนังมีขนาดความกว้าง 60 เซนติเมตร ความสูง 240 เซนติเมตร เนื่องจากขนาดซีเมนต์บอร์ดที่ใช้มีขนาดความกว้าง 120 เซนติเมตร ความสูง 240 เซนติเมตร ซึ่งสามารถตัดแบ่งครึ่งได้พอดี ทำให้เกิดการใช้วัสดุได้คุ้มค่าที่สุด และกำหนดให้ความหนารวมของผนังหนาประมาณ 12 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 แบบจำลองแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

3.1.2. แกนกลางคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

การเตรียมคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก จะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน 1) การเตรียมซีเมนต์เพสต์ในการศึกษานี้ จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีคุณสมบัติถูกต้องตามเกณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 1-2555 ประเภท 1 และมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM C-150 TYPE 1 โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3-1 มาผสมกับน้ำด้วยเครื่องผสมคอนกรีต 2) การเตรียมโฟม ดังแสดงในรูปที่ 3-2 สารเกิดฟองอากาศที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์ในการศึกษานี้จะใช้สารเกิดฟองอากาศชนิดโปรตีน (Protein foaming agent) เนื่องจากเมื่อผสมเป็นคอนกรีตแล้ว จะให้กำลังสูงกว่าชนิดอื่น โดยจะนำสารเกิดฟองอากาศดังกล่าวมาผ่านเครื่องผลิตโฟมหรือฟองอากาศ (Foam generator) 3) นำซีเมนต์เพสต์และโฟม มาผสมกันโดยผ่านเครื่องผสมคอนกรีตโฟม จะได้ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-2 ตัวอย่างโฟมที่ใช้ผสมกับซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 3-3 ตัวอย่างการผสมคอนกรีตโฟมความหนาแน่นต่ำมาก

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

| เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมี | | ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง | | |
|---|--------------|--|------------------------------------|--|
| | | ตามมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1- 2555 ประเภท หนึ่ง | ตามมาตรฐาน ASTM C 150 TYPE I | ปูนซีเมนต์ที่พีไอ (สีแดง) (TYPICAL AVERAGE VALUES) |
| มักเนเซียมออกไซด์ (MgO) | สูงสุดร้อยละ | 6.0 | 6.0 | 1.2 |
| ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) | | | | |
| เมื่อมี 3 CaO. Al ₂ O ₃ ร้อยละ 8 หรือน้อยกว่า | สูงสุดร้อยละ | 3.0 | 3.0 | - |
| เมื่อมี 3 CaO. Al ₂ O ₃ น้อยกว่าร้อยละ 8 | สูงสุดร้อยละ | 3.5 | 3.5 | 2.5 |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) | สูงสุดร้อยละ | 3.0 | 3.0 | 1.1 |
| กากที่ไม่ละลายในกรดต่าง (Insoluble Residue) | สูงสุดร้อยละ | 0.75 | 0.75 | 0.30 |

การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ทดสอบตามมาตรฐาน (ASTM C495) ซึ่งต้องใช้จำนวนตัวอย่างทดสอบอย่างน้อยสามชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 ตัวอย่างทดสอบกำลังอัดคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

3.1.3. คุณสมบัติของวัสดุประกอบซีเมนต์บอร์ด

โดยการศึกษาจะใช้แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์บอร์ดชนิด ทิพีโอบอร์ด ความกว้าง 120 เซนติเมตร ความยาว 240 เซนติเมตร ความหนา 6 มิลลิเมตร โดยมีน้ำหนักต่อแผ่น 25.8 กิโลกรัม โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติทางกายภาพ

| สมบัติทางกายภาพ | มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ | หน่วย | TPI BOARD |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| 1. ความคลาดเคลื่อนความหนา | ASTM C1185 | % | +/- 8 |
| 2. ความหนาแน่น | ASTM C1185 | kg./m ³ | 1,300 +/- 50 |
| 3. การดูดซึมน้ำ | ASTM C1185 | % | Max. 35 |
| 4. ปริมาณความชื้น | ASTM C1185 | % | ≤ 15 |
| 5. ความสามารถในการกันเชื้อรา | ASTM D3272 | | Pass |
| 6. ความเป็นกรด-ด่าง | ISO 10390:2005 | | 7-8 |
| 7. การต้านทานรั้วซึม | ASTM C1185 | | Pass |

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติเชิงกล

| สมบัติเชิงกล | มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ | หน่วย | TPI BOARD |
|---|--------------------|-------|---------------|
| 1. ความต้านทานแรงดัดที่ภาวะแห้ง (เฉลี่ย 2 แนว) | ASTM C1185 | MPa | ≥ 10 (EMC) |
| 2. มอดูลัสยืดหยุ่นแนวตามยาว (แห้ง) | ASTM C1185 | MPa | ≥ 5,000 (EMC) |
| 3. ความต้านทานแรงดัดที่ภาวะเปียก (เฉลี่ย 2 แนว) | ASTM C1185 | MPa | ≥ 7 (Wet) |
| 4. มอดูลัสยืดหยุ่นแนวตามยาว (เปียก) | ASTM C1185 | MPa | ≥ 4,000 (Wet) |

ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติด้านการทนไฟ

| สมบัติเชิงกล | มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ | หน่วย | TPI BOARD |
|--------------------------|--------------------|-------|-----------|
| 1. การไม่ติดไฟ | BS476 Part 5 | MPa | Pass |
| 2. ดัชนีการไม่ติดไฟ | BS476 Part 6 | MPa | Pass |
| 3. การไม่ลามไฟของพื้นผิว | BS476 Part 7 | MPa | Pass |

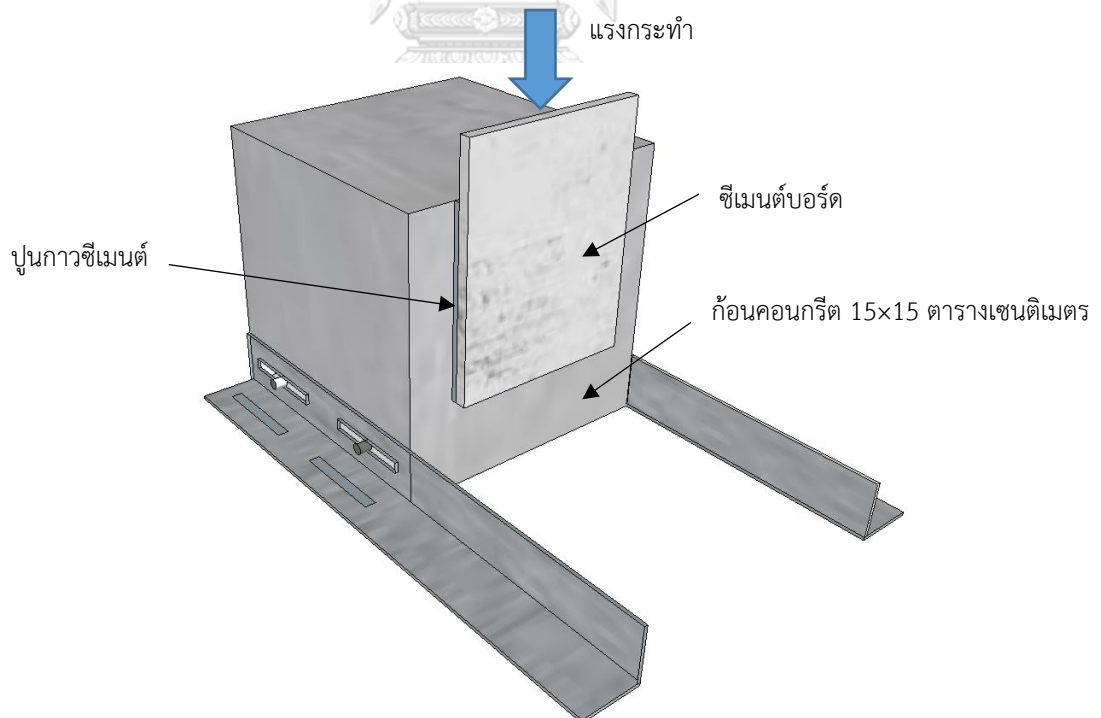
3.1.4. การประสานแผ่นซีเมนต์บอร์ด

(Assaad et al., 2018) ทำการทดสอบความแข็งแรงและหาค่าแรงเฉือนระหว่างผิวสัมผัส Calcium-silicate board (CSB) กับ Polystyrene lightweight concrete (LWC) เพื่อตรวจสอบการยึดเกาะ ดังแสดงในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 การเตรียมการทดสอบการยึดเกาะระหว่าง CSB กับ LWC (Assaad et al., 2018)

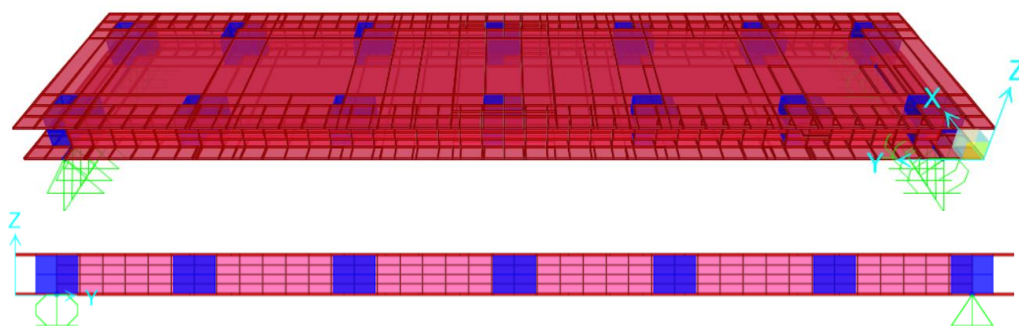
การศึกษาการประสานระหว่างวัสดุประเภทผิวซีเมนต์บอร์ดยึดเข้ากับวัสดุแกนกลางคอนกรีตจะยึดด้วยปูนกาวซีเมนต์ความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร และทำการทดสอบการยึดเกาะระหว่างวัสดุประเภทผิวซีเมนต์บอร์ดกับวัสดุแกนกลางคอนกรีตด้วยปูนกาวซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 แบบจำลองตัวอย่างทดสอบการประสานระหว่างวัสดุประเภทผิวเข้ากับวัสดุแกนกลางด้วยปูนกาวซีเมนต์

3.2. การออกแบบผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

ในการศึกษานี้ จะใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติด้วยโปรแกรม SAP2000 โดยกำหนดให้แผ่นวัสดุประกอบผิวนอกทั้ง 2 ด้าน (แผ่นซีเมนต์บอร์ด) ของแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์แบบเปลือกบาง (Shell element) และวัสดุก้อนคอนกรีตความหนาแน่นปกติ ใช้เป็นเอลิเมนต์แบบ Line (Line element) โดยปูนกาวซีเมนต์ที่เชื่อมต่อระหว่างแผ่นซีเมนต์บอร์ดกับก้อนคอนกรีต ใช้เป็นเอลิเมนต์แบบ Link (Link element) ซึ่งเอลิเมนต์แบบเปลือกบางในหนึ่งเอลิเมนต์จะมี 4 โหนด แต่ละโหนดจะมี 6 ลำดับขั้นอิสระ (Degree of freedom) และใช้แบบจำลองเอลิเมนต์แบบ Link ในหนึ่งเอลิเมนต์จะมี 2 โหนด แต่ละโหนดจะมี 6 ลำดับขั้นอิสระ โดยกำหนดให้มีฐานรองรับที่ปลายทั้ง 2 ด้านของแบบจำลอง ซึ่งเป็นแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ได้ (Roller supports) และแบบยึดหมุนเคลื่อนที่ไม่ได้ (Hinge supports) ดังแสดงในรูปที่ 3-7

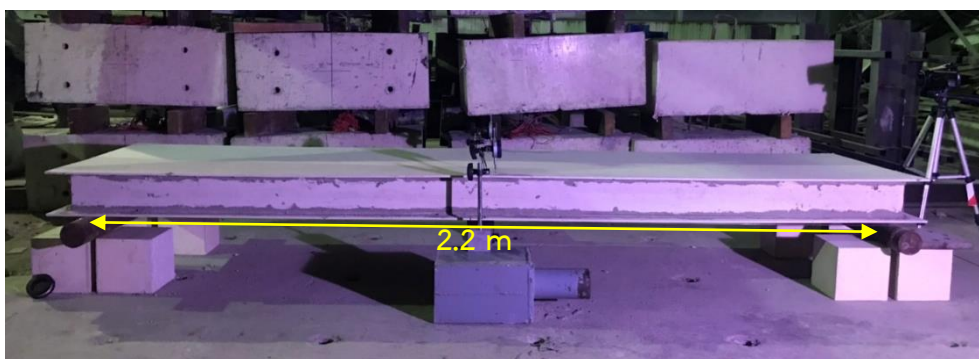


รูปที่ 3-7 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติ

แบบจำลองนี้ กำหนดให้มีแรงกระทำที่จุดกึ่งกลางแผ่น โดยแรงกระทำเป็นไปตามค่าพลังงานกระแทก ตามมาตรฐานการทดสอบ BS 5234 :1992 part 2 Annex C and Annex E เพื่อศึกษา รูปแบบผนังที่ประหยัด มีน้ำหนักเบา แต่ผนังยังคงมีความแข็งแรง และมีค่าการเสียรูปสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

3.3. การทดสอบกำลังรับดัด (Flexural Strength)

การทดสอบกำลังรับดัดของผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก แผ่นผนัง มีขนาด ความกว้าง 0.60 เมตร ความยาว 2.40 เมตร ความหนา 0.12 เมตร กำหนดให้ Support อยู่ห่างกันเป็นระยะ 2.20 เมตร (ห่างจากขอบแผ่นผนังเข้ามา 0.10 เมตร) ดังแสดงในรูปที่ 3-8 การทดสอบจะให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางแผ่นผนัง ซึ่งจะใช้ถ่วงทรายน้ำหนักถ่วงละ 5 กิโลกรัม วางลงที่ ละตุ้ง ติดตั้ง Dial gauge 2 ชุด ที่ตำแหน่งกลางแผ่นผนัง จดบันทึกค่าการแอ่นตัวของแผ่นผนัง



รูปที่ 3-8 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

3.4. การทดสอบความแข็งแรงของผนังตามมาตรฐาน BS 5234

โดยการศึกษานี้ ต้องการทดสอบความแข็งแรงของผนังในระดับ Medium duty (MD) ตามมาตรฐาน BS 5234 โดยรายละเอียดการทดสอบดังต่อไปนี้

3.4.1. การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก (Small Hard Body Impact)

ทดสอบโดยใช้ตุ้มกระแทกทรงกลมขนาด 50 มิลลิเมตร ถ่วงด้วยน้ำหนัก 3 กิโลกรัม โดยแกว่งตุ้มให้กระแทกกับผิวผนัง แล้วบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้น การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบย่อย คือ

- 1) Surface damage พลังงานกระแทก 3 นิวตัน เมตร โดยที่ก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อผิวหน้าของผนังเกินกว่าจะซ่อมแซมได้หรือไม่ โดยการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex B
- 2) Perforation พลังงานกระแทก 5 นิวตัน เมตร โดยที่ก่อให้เกิดการเจาะทะลุต่อผิวหน้าของผนังหรือไม่ โดยการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex D

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) ต้มกระแทกทรงกลมขนาด 50 มิลลิเมตร น้ำหนัก 3 กิโลกรัม
- 2) เครื่องมือวัดขนาด

ขั้นตอนการทดสอบ

ติดตั้งต้มกระแทกให้สัมผัสกับผิวผนังพอดิ ทำการทดสอบ Surface damage และ Perforation อย่างละ 10 จุด โดยเลือกจุดที่วิกฤตที่สุดในการทดสอบ ยกต้มกระแทกตามองศาเหวี่ยงที่กำหนด จากนั้นปล่อยให้ต้มแกว่งลงมา กระแทกผนัง 1 ครั้ง โดยไม่กระแทกซ้ำ แล้วบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้น เช่น การเจาะทะลุ ความลึกและขนาดของรอยกระแทก จากนั้นเลื่อนต้มกระแทกไปยังจุดอื่นๆ ต่อไปจนครบจำนวน

3.4.2. การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (Large Soft Body Impact)

การทดสอบโดยใช้ต้มกระแทกจากถุงทราย น้ำหนัก 50 กิโลกรัม ทำการกระแทกกับผนัง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบย่อย คือ

- 1) Damage พลังงานกระแทก 20 นิวตัน เมตร กระแทกเพียง 1 ครั้ง โดยผนังต้องไม่เกิดการเสียรูปถาวร (Permanent deformation) เกิน 2 มิลลิเมตร ซึ่งการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex C

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) Displacement sensor

2) Dial gauge

3) วัสดุอ่อนนุ่ม (ถุงทราย)

ขั้นตอนการทดสอบ

กำหนดจุดที่จะทำการทดสอบ 2 จุด ในระดับความสูง 1.20 - 1.75 เมตร จากพื้น ยกวัสดุอ่อนนุ่มให้ระดับความสูงตามพลังงานกระแทกที่จะทำการทดสอบ จากนั้นปล่อยให้ต้มแกว่งลงมากระแทกผนัง 1 ครั้ง โดยห้ามกระแทกซ้ำ ทิ้งให้ผนังคืนตัว 5 นาที แล้วบันทึกค่าการเสียรูปของผนัง และทำการทดสอบจุดที่ 2 ในรูปแบบเดียวกัน

- 2) Strucural damage พลังงานกระแทก 60 นิวตัน เมตร กระแทกผนังจุดเดิม 3 ครั้ง โดยผนังต้องไม่เกิดการพังทลาย ซึ่งการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex E

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

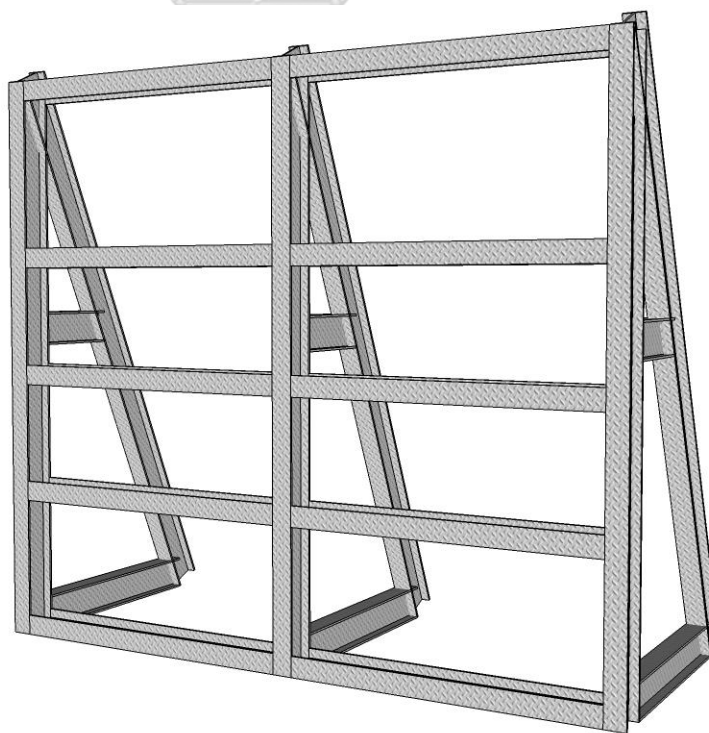
- 1) Displacement sensor
- 2) Dial gauge
- 3) วัสดุอ่อนนุ่ม (ถุงทราย)

ขั้นตอนการทดสอบ

กำหนดจุดที่จะทำการทดสอบ 2 จุด ในระดับความสูง 1.20 - 1.75 เมตรจากพื้น ยกวัสดุอ่อนนุ่มให้ระดับความสูงตามพลังงานกระแทกที่จะทำการทดสอบ จากนั้นปล่อยถุงให้ลงมากระแทกผนังจุดทดสอบละ 3 ครั้ง แล้วบันทึกความเสียหายของผนัง และทำการทดสอบจุดที่ 2 ในรูปแบบเดียวกัน

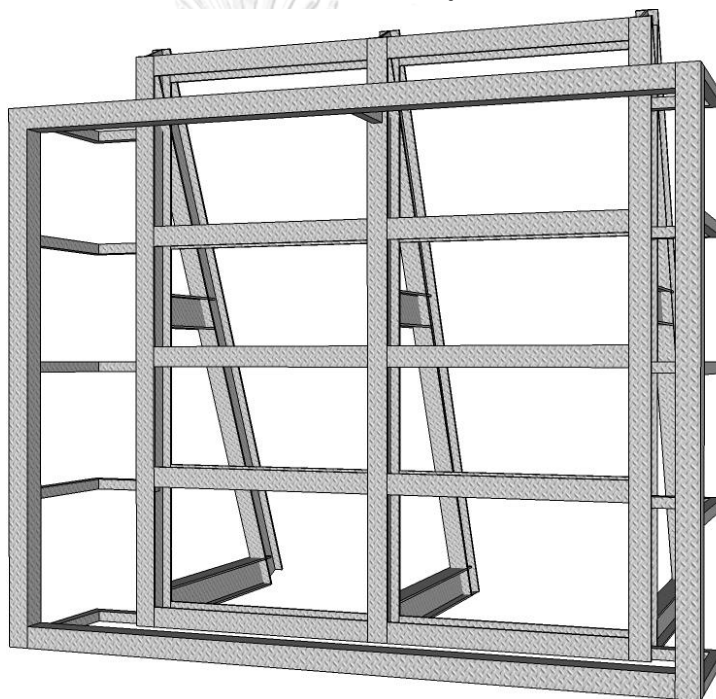
3.4.3. การเตรียมการทดสอบ

การทดสอบความแข็งแรงของผนังตามมาตรฐาน BS 5234 มีรายละเอียดการเตรียมการทดสอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 3-9 โครงสร้างต้านทานการเคลื่อนในแนวราบ

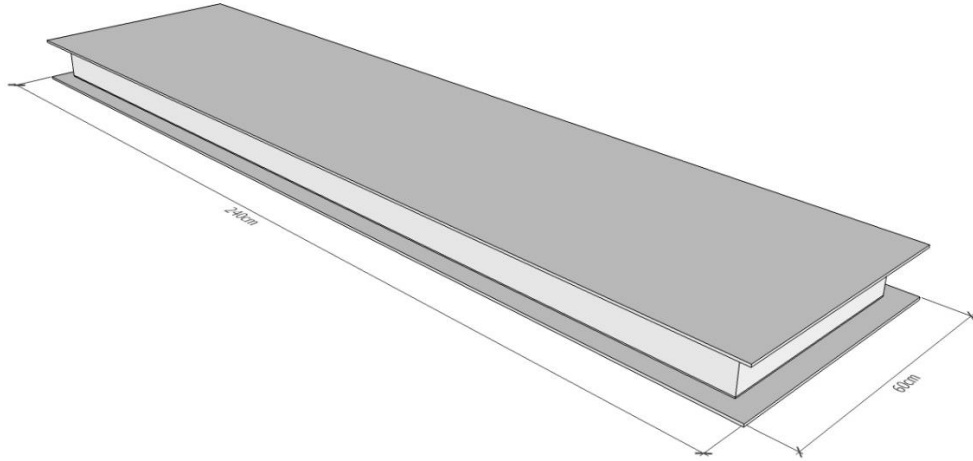
- 1) โครงสร้างสำหรับการยึดเกาะผนังตัวอย่างทดสอบ เป็นโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ โดยโครงสร้างเสา ขนาด 100×100 มิลลิเมตร หนา 1.8 มิลลิเมตร ความสูง 2.6 เมตร จำนวน 2 ท่อน โครงสร้างคาน ขนาด 100×100 มิลลิเมตร หนา 1.8 มิลลิเมตร ความยาว 3 เมตร จำนวน 2 ท่อน โดยหนึ่งท่อนทำหน้าที่เสมือนคาน อีกหนึ่งท่อนทำหน้าที่เสมือนพื้น ดังแสดงในรูปที่ 3-10 เนื่องจากพื้นในสถานที่ทดสอบ เป็นพื้น strong floor จึงไม่สามารถเจาะยึดตัวอย่างแผ่นผนังในพื้นที่ทดสอบจริงได้ โดยโครงสร้างสำหรับการยึดเกาะผนังตัวอย่างทดสอบนี้จะถูกยึดกับโครงสร้างต้านทานการเคลื่อนในแนวราบ ยึดติดกับพื้น strong floor ที่สามารถรับแรงในแนวราบ (แรงด้านข้าง) ได้มากกว่า 1 ตัน โดยโครงสร้างดังกล่าวไม่มีการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 3-9



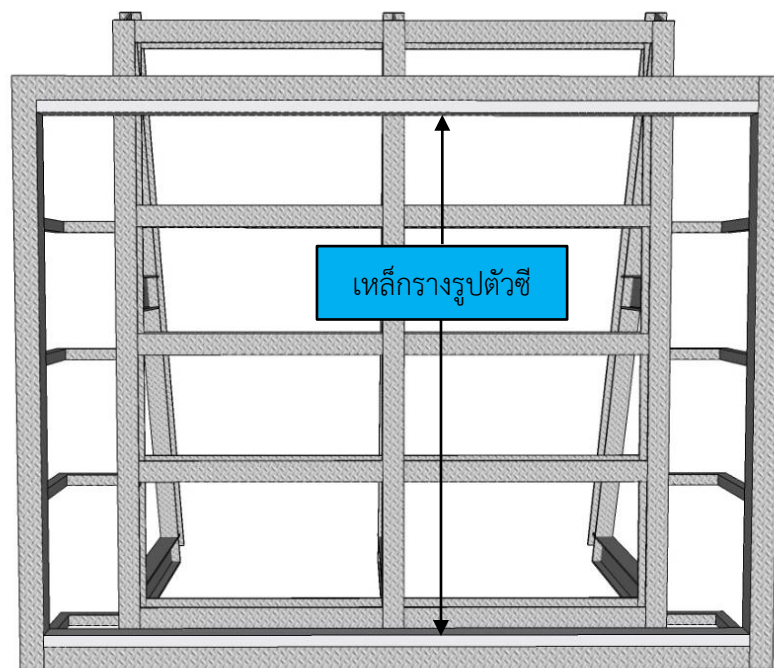
รูปที่ 3-10 โครงสร้างสำหรับการยึดเกาะผนังตัวอย่างทดสอบ

- 2) การติดตั้งผนังทดสอบ เนื่องจากแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก 1 แผ่น มีขนาดความสูง 240 เซนติเมตร ความกว้าง 60 เซนติเมตร ปิดผิวด้วยแผ่นซีเมนต์บอร์ดทุกด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3-11 จึงต้องใช้แผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก จำนวน 5 แผ่น จึงจะมีความกว้างของผนังรวม 3 เมตร ในการยึดโครงสร้างพื้นและคานเข้ากับแผ่นผนังจะใช้เหล็กทรงรูปตัวซี ขนาด 100×50 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3-12 เพื่อทำหน้าที่เสมือนรางให้แผ่นผนังสามารถสไลด์ไปมาได้ (ในอนาคตรางเหล็กรูปตัวซีนี้จะถูกพัฒนาให้กลายเป็นแกนคอนกรีตสำเร็จรูปความหนาแน่น 1,000 – 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งหัวท้ายของแผ่นผนังฉนวน

สำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก จะมีช่องให้สอดแผ่นผนังให้เข้าไปนั่งบนรางได้ ดังแสดงในรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-11 ขนาดของแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก



รูปที่ 3-12 ยึดเหล็กวางรูปตัวซีกับโครงสร้างพื้นและคาน

ด้านข้างบริเวณด้านบนและล่างของแผ่นผนัง จะถูกยึดด้วยเหล็กฉากเจาะรูยิงด้วยสกรูยึด ดังแสดงในรูปที่ 3-14 เพื่อไม่ให้แผ่นผนังเคลื่อนตัวและเพื่อรักษาให้อยู่ในระนาบที่ต้องการ เมื่อติดตั้งแผ่นผนังครบทั้ง 5 แผ่น จะเห็นได้ว่าเมื่อแผ่นผนังเรียงชิดติดกัน และระหว่างแผ่นผนังจะมีช่องขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร จะทำการ

กรอบมอร์ต้าคอนกรีตเข้าไปในช่องว่าง เพื่อทำหน้าที่เป็นเสาเอ็นช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับผนัง (ในอนาคตมอร์ต้าคอนกรีตจะถูกพัฒนาให้กลายเป็นแกนคอนกรีตสำเร็จรูปความหนาแน่น 1,000 – 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 3-13 การติดตั้งแผ่นผนัง โดยแผ่นผนังสามารถสไลด์บนรางได้

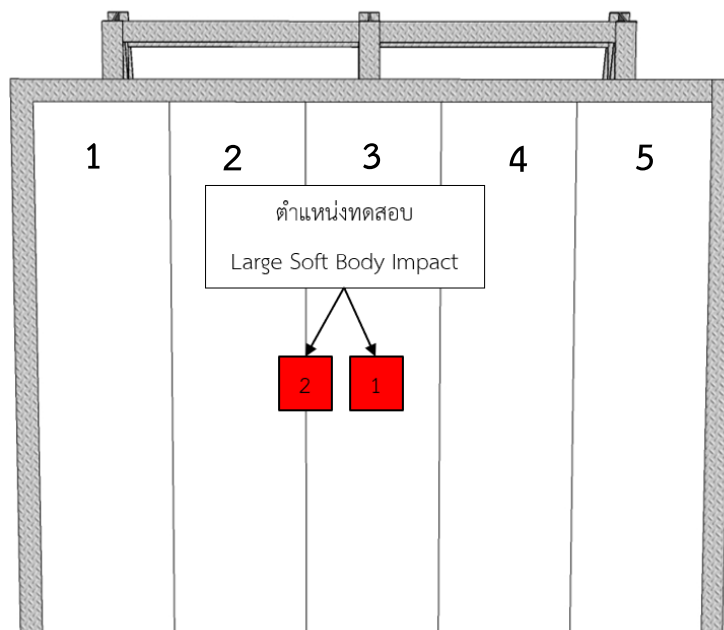


รูปที่ 3-14 แผ่นผนังถูกยึดด้วยเหล็กฉากเจาะรูยิงด้วยสกรูยึดด้านบนและล่าง



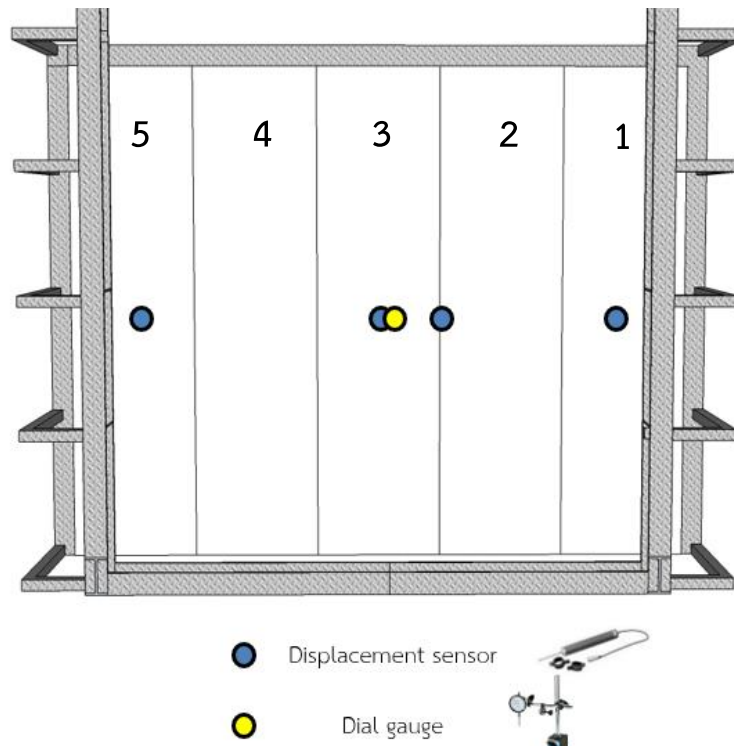
รูปที่ 3-15 ผนังทดสอบที่ติดตั้งแล้วเสร็จ

- 3) ตำแหน่งการทดสอบ ในการทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (Large Soft Body Impact) จะทำการทดสอบจำนวน 2 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3-16 โดยมีความสูงจากพื้น 1.30 เมตร ซึ่งตำแหน่งที่ 1 จะอยู่บริเวณกึ่งกลางของแผ่นผนัง และตำแหน่งที่ 2 เป็นรอยต่อระหว่างแผ่นหมายเลข 2 กับ 3 โดยจะใช้ตำแหน่งเดียวกันในการทดสอบทั้งการทดสอบ Resistance to damage และการทดสอบ Structural damage

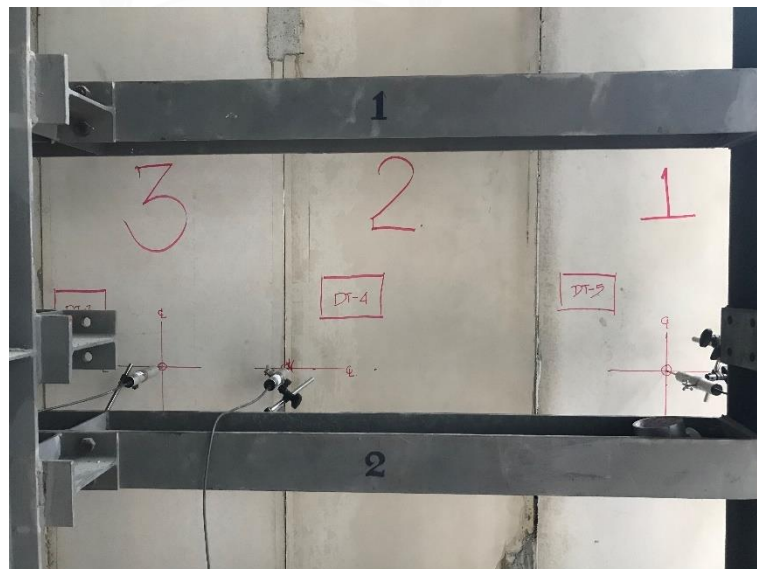


รูปที่ 3-16 ตำแหน่งการทดสอบ Large Soft Body Impact

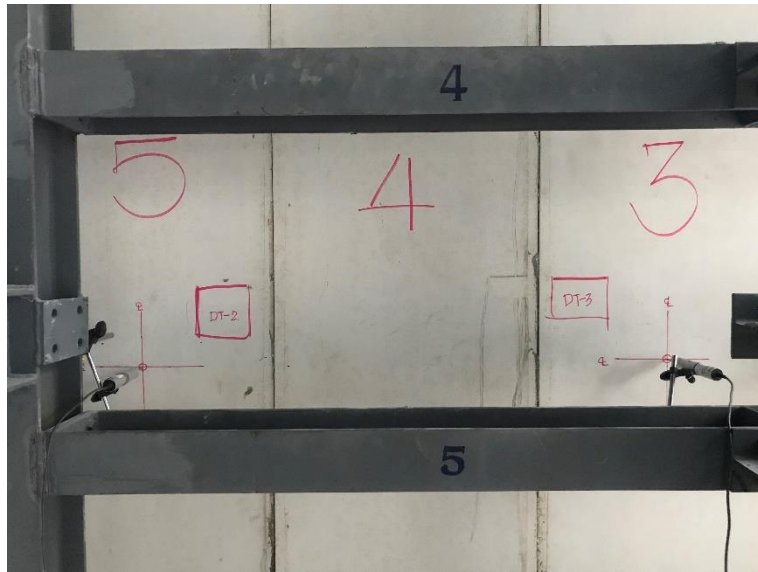
- 4) ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ ในการทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (Large Soft Body Impact) จะติดตั้ง Displacement sensor จำนวน 4 ตำแหน่ง ติดตั้ง Dial gauge จำนวน 1 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3-17 ซึ่งจะติดตั้งบริเวณด้านหลังของแผ่นผนัง



รูปที่ 3-17 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ บริเวณด้านหลังของแผ่นผนัง



รูปที่ 3-18 ตำแหน่งติดตั้ง Displacement sensor แผ่นหมายเลข 1 ถึง 3



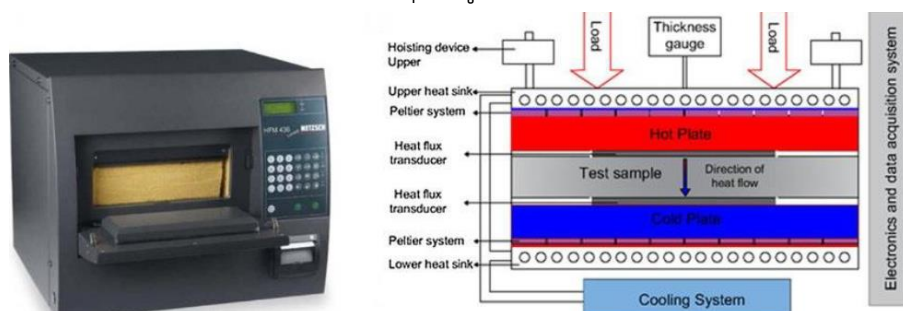
รูปที่ 3-19 ตำแหน่งติดตั้ง Displacement sensor แผ่นหมายเลข 3 ถึง 5



รูปที่ 3-20 ตำแหน่งติดตั้ง Dial gauge

3.5. การทดสอบค่าความเป็นฉนวน

การทดสอบหาค่าสภาพการนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนกันความร้อน แบบ Heat Flow Meter ด้วยเครื่อง NETZSCH HFM 436 ตามมาตรฐาน ASTM C518 : Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus เป็นการนำวัสดุขนาด 30 x 30 ตารางเซนติเมตร ความหนา 7 เซนติเมตร นำเข้าเครื่อง ซึ่งจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาด้วยเซ็นเซอร์ที่ติดอยู่กับผิวของแผ่นอุณหภูมิทั้งสอง โดยการวัดการไหลของความร้อนและอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างแผ่นบนและแผ่นล่าง



รูปที่ 3-21 Heat flow meter (HFM 436) และการทำงานของเครื่องตามมาตรฐาน (ASTM C518)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

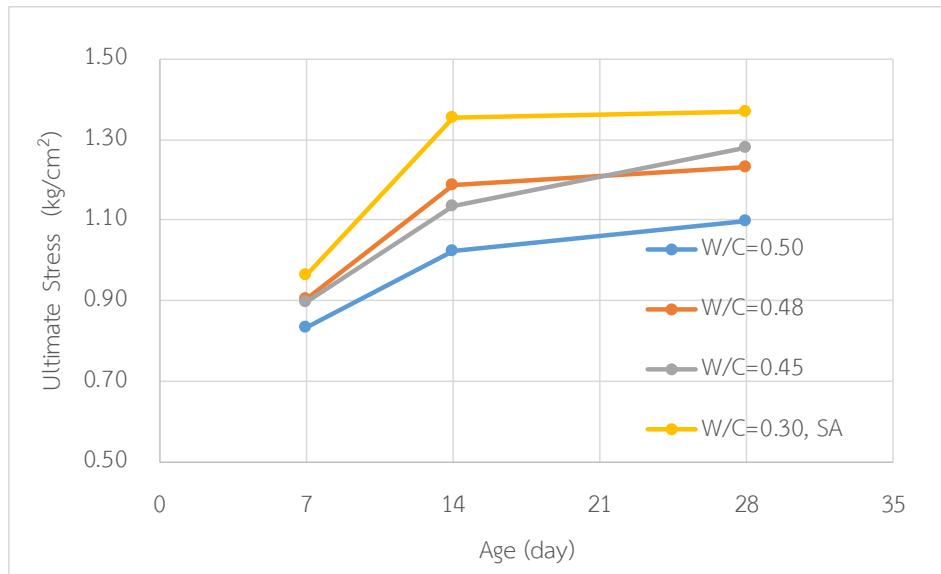
4.1. ผลการพัฒนาคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

ในการศึกษาและพัฒนาคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากนั้น มีปัจจัยที่สำคัญหลายอย่าง ที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

ผลการทดสอบคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก โดยทดลองผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 จำนวน 4 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ อัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5, 0.48, 0.45 และ 0.30 โดยมีการเติมสารผสมเพิ่ม superplasticizer ในกลุ่มตัวอย่างอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.3 เพียงกลุ่มเดียว ทำการบ่มโดยใช้พลาสติกใสห่อหุ้มโดยรอบที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม ทำการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

| Spec. No. | Unit Weight (kg/m ³) | Ultimate Stress 7d (kg/cm ²) | Ultimate Stress 14d (kg/cm ²) | Ultimate Stress 28d (kg/cm ²) | Remark |
|-----------|-------------------------------------|---|--|--|--------------|
| 1 | 231 | 0.79 | 0.91 | 1.15 | W/C=0.50 |
| 2 | 238 | 0.87 | 0.96 | 0.97 | W/C=0.50 |
| 3 | 237 | 0.84 | 1.20 | 1.17 | W/C=0.50 |
| 4 | 247 | 0.93 | 1.17 | 1.22 | W/C=0.48 |
| 5 | 241 | 0.88 | 1.26 | 1.21 | W/C=0.48 |
| 6 | 238 | 0.89 | 1.13 | 1.26 | W/C=0.48 |
| 7 | 249 | 0.84 | 0.95 | 1.13 | W/C=0.45 |
| 8 | 257 | 1.02 | 1.20 | 1.25 | W/C=0.45 |
| 9 | 251 | 0.83 | 1.26 | 1.46 | W/C=0.45 |
| 10 | 270 | 0.93 | 1.30 | 1.37 | W/C=0.30, SA |
| 11 | 270 | 0.89 | 1.47 | 1.45 | W/C=0.30, SA |
| 12 | 264 | 1.07 | 1.30 | 1.29 | W/C=0.30, SA |



รูปที่ 4-1 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกับอายุคอนกรีต



4.2. ผลการทดสอบการประสานแผ่นซีเมนต์บอร์ด

การศึกษาการประสานแผ่นซีเมนต์บอร์ดด้วยปูนกาวซีเมนต์นั้น เพื่อคัดเลือกให้ได้ซึ่งปูนกาวซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติที่ดี มีกำลังรับแรงสูง จึงได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของปูนกาวซีเมนต์ 3 ชนิด โดยกำหนดให้มีพื้นที่รับแรงเฉือน 20×20 ตารางเซนติเมตร ความหนาปูนกาวซีเมนต์ 1 มิลลิเมตร เท่ากันทั้ง 3 ชนิด ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Amster 20 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 4-2 และได้ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน ดังแสดงในตารางที่ 4-2



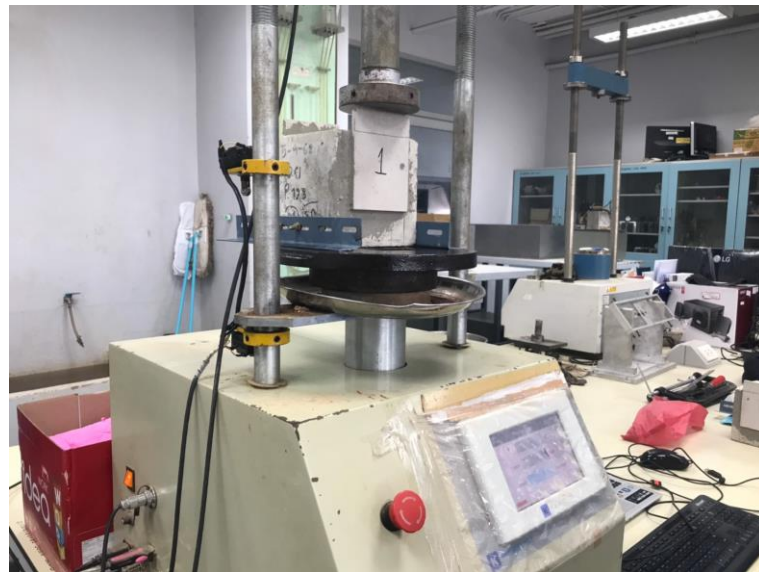
รูปที่ 4-2 ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของปูนกาวซีเมนต์ 3 ชนิด

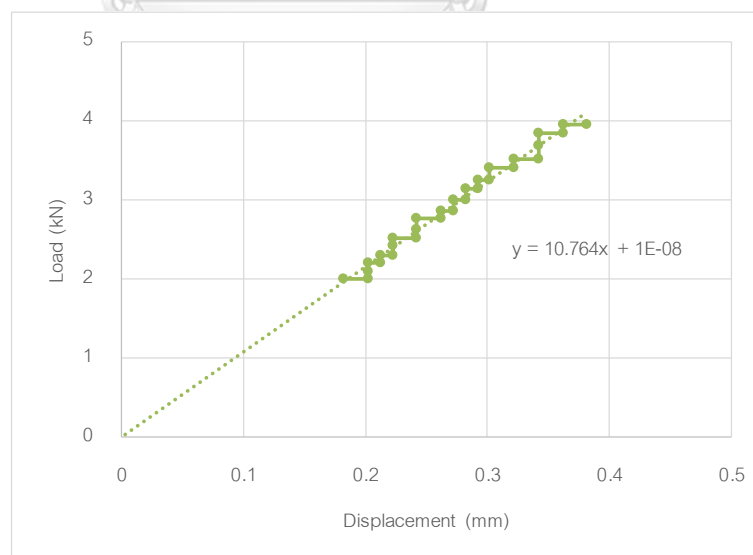
| ตัวอย่างที่ | ชนิดตัวอย่าง | แรงเฉือน (kg) | กำลังเฉือน (ksc) | ค่าเฉลี่ยกำลังเฉือน (ksc) |
|-------------|--------------|---------------|------------------|---------------------------|
| 1 | ชนิด A | 1060 | 1.33 | 1.51 |
| 2 | ชนิด A | 1190 | 1.49 | |
| 3 | ชนิด A | 1370 | 1.71 | |
| 4 | ชนิด B | 1280 | 1.60 | 2.02 |
| 5 | ชนิด B | 2060 | 2.58 | |
| 6 | ชนิด B | 1500 | 1.88 | |
| 7 | ชนิด C | 1540 | 1.93 | 1.78 |
| 8 | ชนิด C | 1310 | 1.64 | |

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของปูนกาวซีเมนต์ 3 ชนิด พบว่าปูนกาวซีเมนต์ชนิด B มีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนสูงที่สุด คือ 2.02 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ในการศึกษาการประสานระหว่างวัสดุประกอบผิวซีเมนต์บอร์ดยึดเข้ากับวัสดุแกนกลางคอนกรีตด้วยปูนกาวซีเมนต์ความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร และทำการทดสอบการยึดเกาะระหว่างวัสดุประกอบผิวซีเมนต์บอร์ดกับวัสดุแกนกลางคอนกรีตด้วยปูนกาวซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4-3 โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ชีตจำกัดแรงกระทำ 50 กิโลนิวตัน ได้กราฟสติฟเนสต้านทานแรงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 4-4 และได้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือน เท่ากับ 0.478 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 4-3 การทดสอบการประสานของปูนกาวซีเมนต์



รูปที่ 4-4 ค่าสติฟเนสต้านทานแรงเฉือนของปูนกาวซีเมนต์ เท่ากับ 10,764 นิวตันต่อมิลลิเมตร

4.3. ผลการทดสอบเปรียบเทียบพลังงานเป็นแรงกระทำ

เนื่องจากในมาตรฐานการทดสอบ BS 5234 ได้กำหนดพลังงานที่ใช้ในการทดสอบพลังงานกระแทก (หน่วยเป็น นิวตัน เมตร) แต่เพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณและการออกแบบผนัง จึงต้องการทราบค่าแรงกระทำ (หน่วยเป็นกิโลนิวตัน) โดยได้ทำการจำลองการทดสอบจริงขึ้น

อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

- 1) Load cell 20 กิโลนิวตัน
- 2) วัสดุอ่อนนุ่ม น้ำหนัก 50 กิโลกรัม

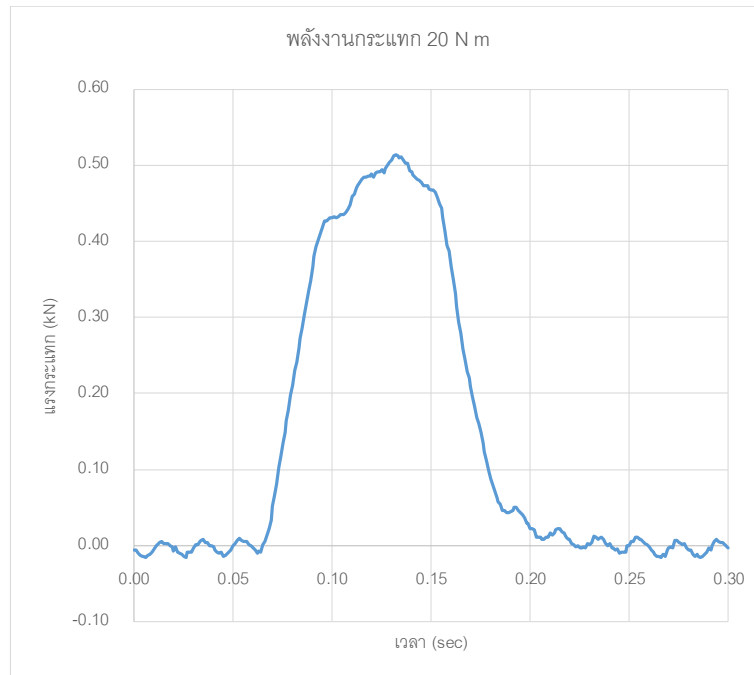
วิธีการทดสอบ

ติดตั้ง Load cell 20 กิโลนิวตัน ในระดับความสูง 1.50 เมตร จากพื้น ยกวัสดุอ่อนนุ่มให้ระดับความสูงตามพลังงานกระแทกที่จะทำการทดสอบ จากนั้นปล่อยลงให้ลงมากระแทกตำแหน่ง Load cell 1 ครั้ง โดยห้ามกระแทกซ้ำ วัดขนาดของแรงกระทำ เก็บข้อมูลด้วยความถี่ 500 Hz ทดสอบแบบเดียวกันจนครบทุกพลังงานกระแทก ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบพลังงานเป็นแรงกระทำ

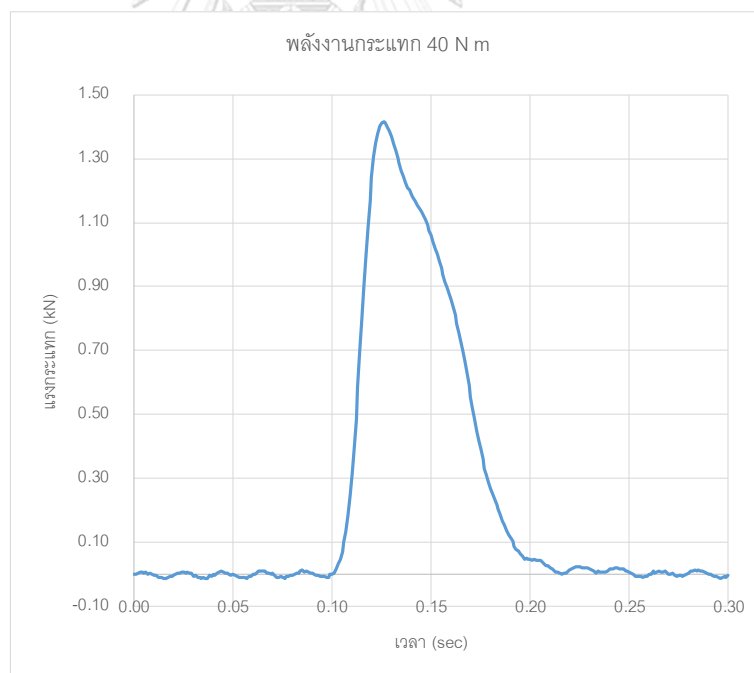
| พลังงานกระแทก (N m) | ความสูงตกกระทบ (mm) | แรงกระแทกสูงสุด (kN) |
|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 20 | 41 | 0.51 |
| 40 | 82 | 1.42 |
| 60 | 122 | 2.07 |
| 100 | 204 | 2.68 |
| 120 | 245 | 2.81 |

จากการทดสอบทำให้ทราบค่าแรงกระทำในหน่วย กิโลนิวตัน (kN) ซึ่งทำให้ง่ายในการนำค่าแรงกระทำดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบการรับแรงของแผ่นผนังต่อไป



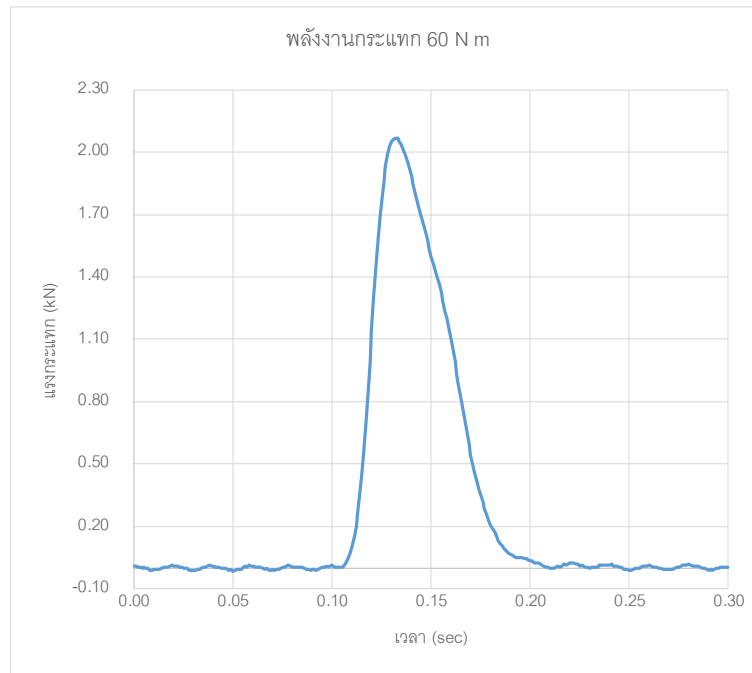
รูปที่ 4-5 กราฟแสดงค่าแรงกระแทกสูงสุด ด้วยความสูงตกกระทบ 41 มิลลิเมตร

พลังงานกระแทก 20 N m



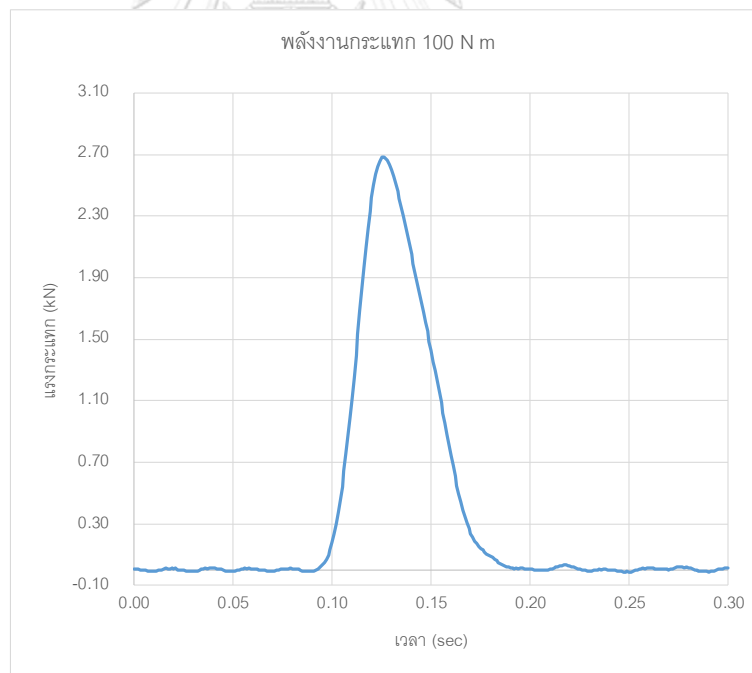
รูปที่ 4-6 กราฟแสดงค่าแรงกระแทกสูงสุด ด้วยความสูงตกกระทบ 82 มิลลิเมตร

พลังงานกระแทก 40 N m



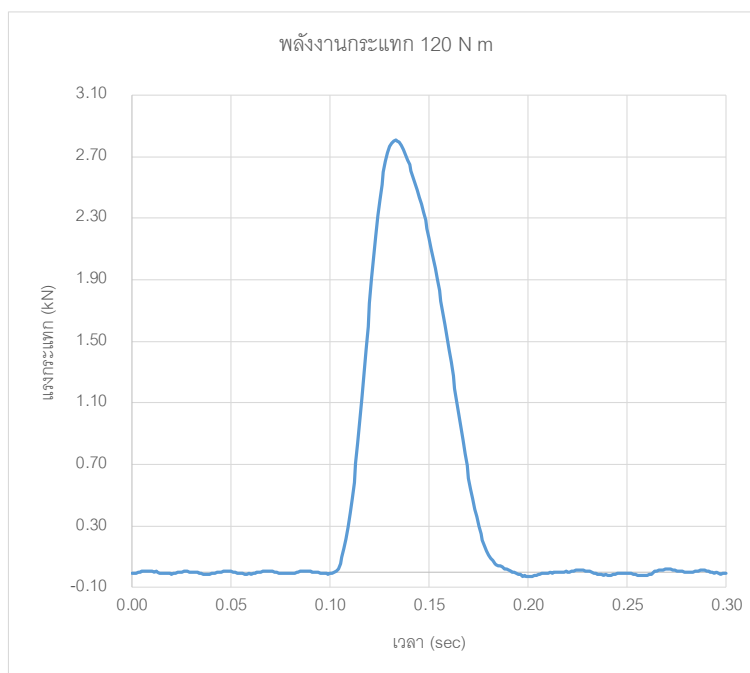
รูปที่ 4-7 กราฟแสดงค่าแรงกระแทกสูงสุด ด้วยความสูงตกกระทบ 122 มิลลิเมตร

พลังงานกระแทก 60 N m



รูปที่ 4-8 กราฟแสดงค่าแรงกระแทกสูงสุด ด้วยความสูงตกกระทบ 204 มิลลิเมตร

พลังงานกระแทก 100 N m



รูปที่ 4-9 กราฟแสดงค่าแรงกระแทกสูงสุด ด้วยความสูงตกกระทบ 245 มิลลิเมตร
พลังงานกระแทก 120 N m



4.4. ผลการออกแบบผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

ในการศึกษาการแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามมิติด้วยโปรแกรม SAP2000 ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ในแบบจำลองดังนี้

1. ค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) ของแผ่นซีเมนต์บอร์ดมีค่าเท่ากับ 5,000 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
2. ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยแบบทรงกระบอกของก้อนแกนคอนกรีต (f_c') และค่ายังโมดูลัสมีค่าเท่ากับ 27.5 และ 24,633 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ
3. ค่าสติฟเนสต้านทานแรงเฉือนของปูนกาซีเมนต์ เท่ากับ 10,764 นิวตันต่อมิลลิเมตร ซึ่งอ้างอิงจากการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4-4 และมีค่ากำลังรับแรงเฉือน เท่ากับ 0.478 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

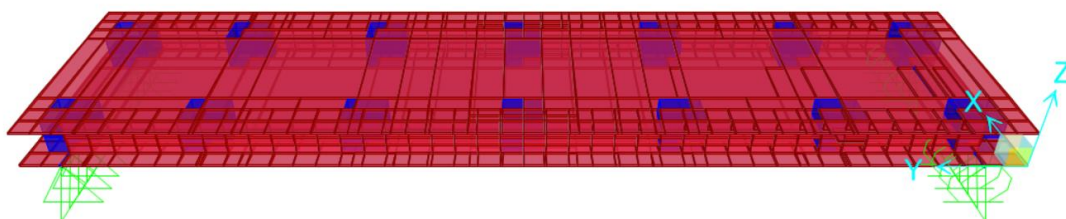
โดยในการออกแบบจะมีแกนคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ยึดติดกับซีเมนต์บอร์ดด้วยปูนกาซีเมนต์ เพื่อช่วยรับแรง แต่ด้วยความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตนั้นมากถึง 2,200-2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้ผนังมีน้ำหนักมาก หากใช้จำนวนก้อนคอนกรีตมากเกินไป จึงต้องออกแบบให้ผนังมีจำนวนก้อนคอนกรีตให้น้อยที่สุด เพื่อให้ผนังมีน้ำหนักเบา แต่ยังคงมีความแข็งแรง และมีค่าการเสียรูปสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน BS 5234 :1992 part 2 Annex C and Annex E

ในการศึกษานี้ ต้องการทดสอบความแข็งแรงของผนังในระดับ Medium duty (MD) ตามมาตรฐาน BS 5234 ซึ่งมี 2 การทดสอบย่อย ที่ต้องทำการออกแบบให้ผ่านเกณฑ์ คือ

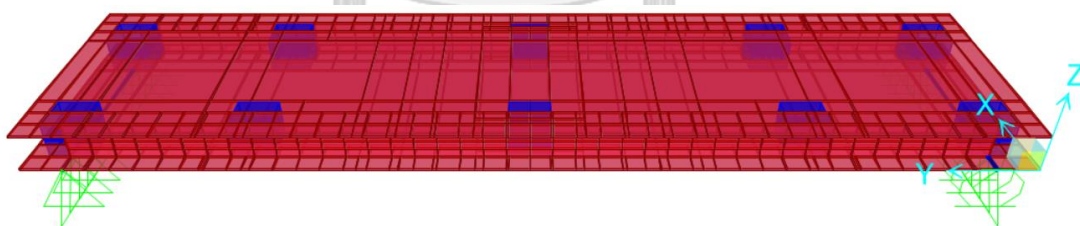
1. BS 5234 :1992 part 2 Annex C การทดสอบ Resistance of damage ด้วยพลังงานกระแทก 20 นิวตัน เมตร ความสูงตกกระทบ 41 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าแรงกระแทกเท่ากับ 0.51 กิโลนิวตัน โดยผนังต้องไม่เกิดการเสียรูปถาวร เกิน 2 มิลลิเมตร และเนื่องจากในอนาคตจะมีการทดสอบ BS 5234 :1992 part 2 Annex A การทดสอบ Partition Stiffness เป็นการทดสอบด้วยแรงกระทำ 0.50 กิโลนิวตัน ที่จุดกึ่งกลางแผ่นผนัง โดยเกิดการเสียรูปสูงสุดไม่เกิน 20 มิลลิเมตร และไม่เกิดการเสียรูปถาวร เกิน 3 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงกำหนดให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีแรงกระทำที่จุดกึ่งกลางด้วยแรง 0.60 กิโลนิวตัน ซึ่งมีแรงกระทำมากกว่าทั้ง 2 การทดสอบ โดยที่แบบจำลอง ไม่เกินค่าจุดประลัย (Ultimate) โดยผลการวิเคราะห์เป็นไปตามตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 เปรียบเทียบแบบจำลองผนังด้วยแรงกระทำ 0.60 กิโลนิวตัน

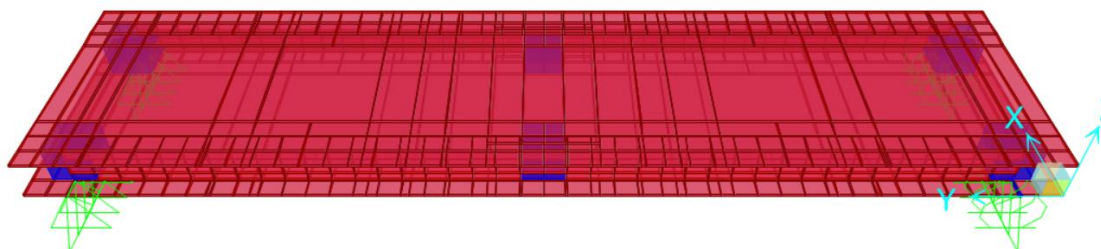
| Name of specimen | Maximum Shear Strength (MPa) | Maximum Displacement (mm) |
|--|----------------------------------|----------------------------------|
| คุณสมบัติวัสดุที่ต้องการ | < 0.478 | < 20 |
| แบบจำลองที่ 1 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 14 ก้อน | 0.110 | 7.10 |
| แบบจำลองที่ 2 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 10 ก้อน | 0.115 | 7.38 |
| แบบจำลองที่ 3 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 6 ก้อน | 0.123 | 7.81 |
| แบบจำลองที่ 4 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 4 ก้อน | เกิดการวิบัติที่แผ่นซีเมนต์บอร์ด | เกิดการวิบัติที่แผ่นซีเมนต์บอร์ด |



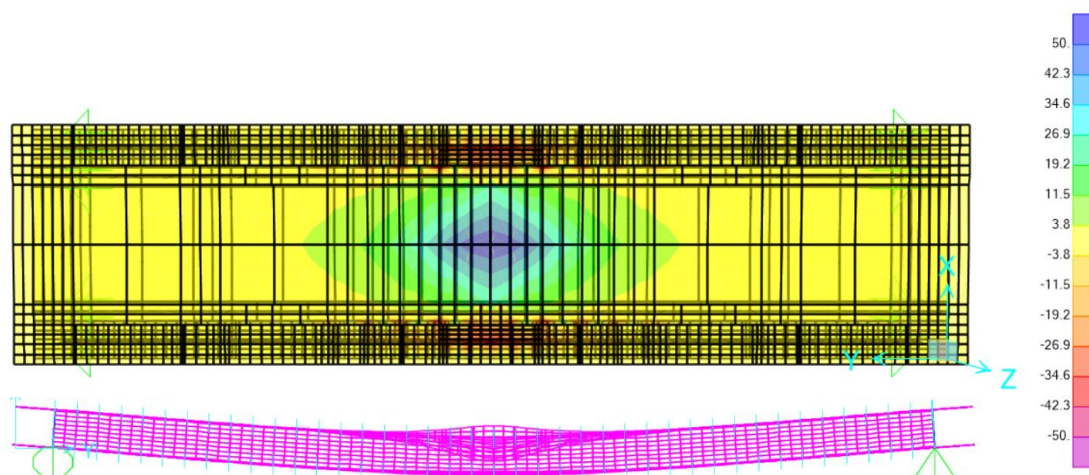
รูปที่ 4-10 แบบจำลองที่ 1 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 14 ก้อน



รูปที่ 4-11 แบบจำลองที่ 2 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 10 ก้อน



รูปที่ 4-12 แบบจำลองที่ 3 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 6 ก้อน



รูปที่ 4-13 แบบจำลองที่ 4 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 4 ก้อน เกิดการวิบัติที่กลางแผ่นซีเมนต์บอร์ด

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อมีแรงกระทำ 0.60 กิโลนิวตัน กระทำที่จุดกึ่งกลาง พบว่าแบบจำลองที่มีก้อนคอนกรีตจำนวนทั้งหมด 4 ก้อน เกิดการวิบัติที่กลางแผ่นซีเมนต์บอร์ด เนื่องจากเกิดแรงดัดเกินกว่าคุณสมบัติของซีเมนต์บอร์ดรับไหว ดังนั้นแบบจำลองที่มีแกนคอนกรีตจำนวน 6 ก้อน มีค่าการเสียรูปสูงสุดเท่ากับ 7.81 มิลลิเมตร ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ โดยกำลังรับแรงของวัสดุไม่เกินค่าจุดประลัย

2. BS 5234 :1992 part 2 Annex E การทดสอบ Structural damage ด้วยพลังงานกระทำ 60 นิวตัน เมตร ความสูงตักกระทบ 122 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าแรงกระทำเท่ากับ 2.07 กิโลนิวตัน โดยผนังต้องไม่เกิดการพังทลาย ดังนั้นจึงออกแบบให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ มีแรงกระทำที่จุดกึ่งกลางด้วยแรง 2.10 กิโลนิวตัน แล้วไม่เกินค่าวิบัติของแบบจำลอง โดยผลการวิเคราะห์เป็นไปตามตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบแบบจำลองผนังด้วยแรงกระทำ 2.10 กิโลนิวตัน

| Name of specimen | Maximum Shear Strength (MPa) | Maximum Displacement (mm) |
|--|------------------------------|---------------------------|
| คุณสมบัติวัสดุที่ต้องการ | < 0.478 | ไม่มีข้อกำหนด |
| แบบจำลองที่ 1 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 14 ก้อน | 0.385 | 24.83 |
| แบบจำลองที่ 2 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 10 ก้อน | 0.405 | 26.00 |
| แบบจำลองที่ 3 ก้อนคอนกรีตทั้งหมด 6 ก้อน | 0.432 | 27.5 |

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อมีแรงกระทำด้วยแรง 2.10 กิโลนิวตัน ที่จุดกึ่งกลาง แบบจำลองที่มีแกนคอนกรีตจำนวน 6 ก้อน สามารถรับแรงกระแทกโดยกำลังรับแรงของวัสดุไม่เกินค่าจุดประลัย

ดังนั้นแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากที่สุดที่ประหยัด มีน้ำหนักเบา แต่ผนังยังคงมีความแข็งแรง และมีค่าการเสียรูปสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน BS 5234 :1992 part 2 Annex C and Annex E มีรูปแบบของแผ่นผนัง ดังแสดงในรูปที่ 4-12 คือ มีก้อนคอนกรีตจำนวน 6 ก้อน แบ่งเป็น 2 ข้าง ข้างละ 3 ก้อน

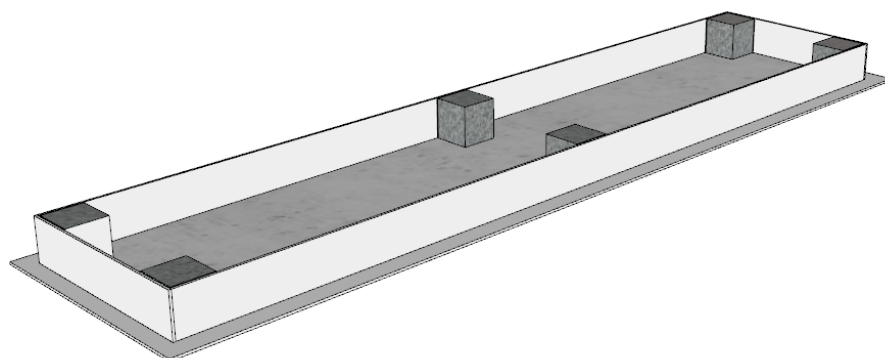


4.5. ผลการทดสอบกำลังรับดัด (Flexural Strength)

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังที่กล่าวมานั้น จึงได้นำรูปแบบแผ่นผนังที่มีก้อนคอนกรีตจำนวน 6 ก้อน ทำการประกอบขึ้นรูปและทำการทดสอบกำลังรับดัด โดยมีขั้นตอนการประกอบแผ่นผนังและรายละเอียดการทดสอบ ดังนี้

4.5.1. ขั้นตอนการประกอบแผ่นผนังจนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก มีขั้นตอนการประกอบทั้งหมด 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตัดแผ่นซีเมนต์บอร์ดให้มีขนาดความกว้าง 0.6 เมตร ความยาว 2.4 เมตร เป็นวัสดุประกบผิวด้านบนและด้านล่างของแผ่นผนัง จากนั้นตัดขนาดความกว้าง 0.1 เมตร ความยาว 2.3 เมตร จำนวน 2 แผ่น และตัดขนาดความกว้างเดียวกัน ความยาว 0.5 เมตร จำนวน 2 แผ่น เพื่อปิดด้านข้างของแผ่นผนัง
2. หล่อก้อนคอนกรีตความหนาแน่น 2,200-2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้จำนวน 6 ก้อน ต่อผนัง 1 แผ่น



รูปที่ 4-14 แบบจำลองแผ่นผนัง



รูปที่ 4-15 เตรียมอุปกรณ์เพื่อกรอกคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

3. ประกอบแผ่นซีเมนต์บอร์ดด้านล่างเข้ากับก้อนแกนคอนกรีตทั้ง 6 ก้อน ด้วยปูนกาวซีเมนต์ ชนิด B ด้วยความหนาปูนกาวซีเมนต์ 3 มิลลิเมตร ปล่อยให้ปูนกาวซีเมนต์แห้งอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นประกอบแผ่นซีเมนต์บอร์ดด้านข้างเข้ากับก้อนแกนคอนกรีตทั้ง 6 ก้อน ด้วยปูนกาวซีเมนต์ความหนาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-14 แล้วปล่อยให้ปูนกาวซีเมนต์แห้ง อย่างน้อย 24 ชั่วโมง
4. นำแผ่นผนังที่ประกอบในขั้นตอนที่ 3 แล้วมากรอกคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากจนเต็มแบบหล่อผนัง ดังแสดงในรูปที่ 4-16 จากนั้นปล่อยให้แข็งตัว
5. ประกอบแผ่นซีเมนต์บอร์ดด้านบนเข้ากับผนังที่กรอกคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากด้วยปูนกาวซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4-17



รูปที่ 4-16 กรอกคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากแล้วเสร็จ



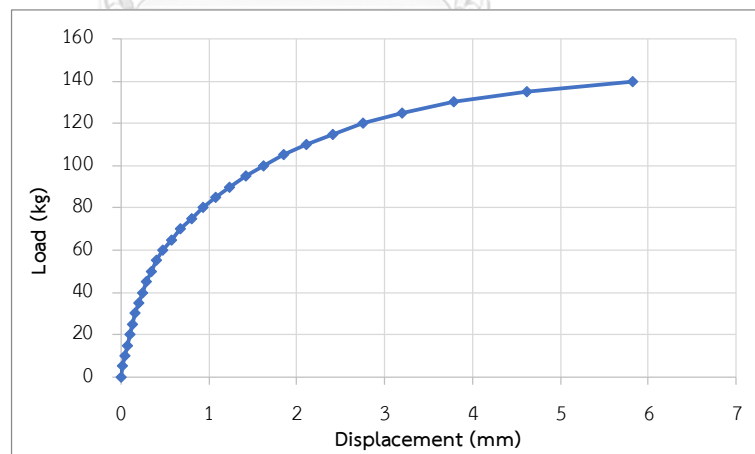
รูปที่ 4-17 แผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก
ที่ทำการประกอบแล้วเสร็จ

4.5.2. ผลการทดสอบ

ผลทดสอบการทดสอบกำลังรับแรงดัดของผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก โดยให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางแผ่นผนัง ซึ่งจะใช้ถุงทรายน้ำหนักถุงละ 5 กิโลกรัม วางลงทีละถุง แล้วทำการจดบันทึก ได้ค่าแรงกระทำสูงสุด 140 กิโลกรัม (ไม่รวมน้ำหนักของแผ่นผนัง) ตำแหน่งที่เกิดการวิบัติเริ่มแรก ดังแสดงในรูปที่ 4-18 โดยมีรอยแตกร้าวบริเวณปูนกาวซีเมนต์ด้านล่าง เมื่อรับแรงกระทำประมาณ 130 กิโลกรัม และได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม และการเคลื่อนตัว มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-19



รูปที่ 4-18 แสดงตำแหน่งที่เกิดการวิบัติ



รูปที่ 4-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ และการเคลื่อนตัว

โดยผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก มีน้ำหนักรวมของตัวเองประมาณ 80 กิโลกรัม หากทำการพิจารณาน้ำหนักรวมของแผ่นผนังด้วย แผ่นผนังนี้จะสามารถรับแรงกระทำสูงสุด เท่ากับ 220 กิโลกรัม

4.6. ผลการทดสอบความแข็งแรงของผนังตามมาตรฐาน BS 5234

4.6.1. การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก (Small Hard Body Impact)

ผลการทดสอบโดยใช้ตุ้มกระแทกทรงกลมขนาด 50 มิลลิเมตร ถ่วงด้วยน้ำหนัก 3 กิโลกรัม โดยแกว่งตุ้มให้กระแทกกับผิวผนัง ตามพลังงานกระแทกที่มาตรฐานกำหนด แล้วบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้น

- 1) Surface damage พลังงานกระแทก 3 N m โดยที่ก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงต่อผิวหน้าของผนังเกินกว่าจะซ่อมแซมได้หรือไม่ โดยการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex B

ตารางที่ 4-6 บันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยพลังงานกระแทก 3 N m

| No. of Impact | Diameter of Indentation (mm) | Depth of Indentation (mm) | Surface condition |
|---------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 1 | 21.45 | 2.05 | No damage penetrated through partition panel. |
| 2 | 22.50 | 1.70 | |
| 3 | 14.55 | 0.50 | |
| 4 | 12.60 | 0.50 | |
| 5 | 13.65 | 0.55 | |
| 6 | 11.10 | 0.40 | |
| 7 | 20.80 | 1.45 | |
| 8 | 24.90 | 2.70 | |
| 9 | 23.45 | 2.65 | |
| 10 | 18.55 | 0.40 | |

การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก ด้วยพลังงานกระแทก 3 N m ที่ได้ทำการทดสอบทั้ง 10 จุด ซึ่งในการทดสอบไม่มีความเสียหายรุนแรงที่ผิวหน้าของผนัง เกินกว่าจะซ่อมแซมได้



รูปที่ 4-20 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก



รูปที่ 4-21 ตัวอย่างการบันทึกความเสียหายของผนังจากการทดสอบ

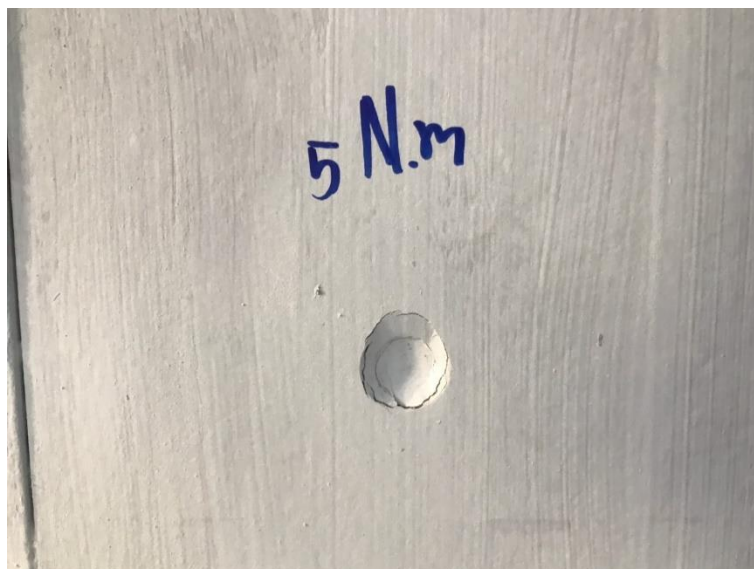
- 2) Perforation พลังงานกระแทก 5 N m โดยที่ก่อให้เกิดการเจาะทะลุต่อผิวหน้าของผนังหรือไม่ โดยการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex D

ตารางที่ 4-7 บันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยพลังงานกระแทก 5 N m

| No. of Impact | Diameter of Indentation (mm) | Depth of Indentation (mm) | Surface condition |
|---------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 1 | 20.95 | 0.15 | No damage penetrated through partition panel. |
| 2 | 21.00 | 0.25 | |
| 3 | 31.15 | 4.60 | |
| 4 | 29.80 | 5.85 | |
| 5 | 30.10 | 4.75 | |
| 6 | 30.70 | 4.55 | |
| 7 | * | * | |
| 8 | 32.55 | 4.90 | |
| 9 | 38.10 | 9.40 | |
| 10 | 29.90 | 5.75 | |

หมายเหตุ : * คือ ไม่เกิดความเสียหายใดๆ (ไม่สามารถวัดขนาดความเสียหายได้)

การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก ด้วยพลังงานกระแทก 5 N m ที่ได้ทำการทดสอบทั้ง 10 จุด โดยในการทดสอบตำแหน่งทดสอบที่ 1, 2 และ 7 ผลของการกระแทก ผนังจะไม่สามารถวัดขนาดของความเสียหายได้ ซึ่งตำแหน่งดังกล่าว ถือว่าเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของแผ่นผนัง และจุดที่วัดขนาดความเสียหายได้นั้นสามารถซ่อมแซมความเสียหายได้ จึงถือว่าไม่ก่อให้เกิดการเจาะทะลุต่อผิวหน้าของผนัง



รูปที่ 4-22 ตัวอย่างการบันทึกความเสียหายของผนังจากการทดสอบ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.6.2. การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ (Large Soft Body Impact)

ผลการทดสอบโดยใช้วัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ลูกตุ้มกระแทกจากถ่วงทราย น้ำหนัก 50 กิโลกรัม

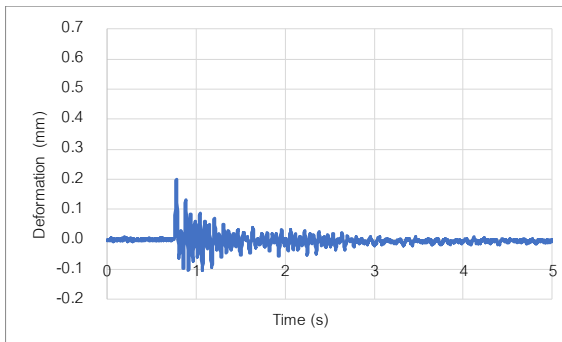


รูปที่ 4-23 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ ที่ตำแหน่งทดสอบที่ 1

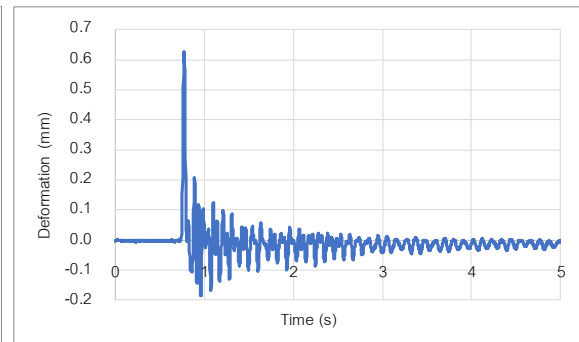
- 1) Resistance of damage ใช้วัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ กระแทกเพียง 1 ครั้ง ไม่กระแทกซ้ำ ด้วยพลังงานกระแทก 20 N m ความสูงตกกระทบ 41 มิลลิเมตร โดยผนังต้องไม่เกิดการเสียรูปถาวร (Permanent deformation) เกิน 2 มิลลิเมตร ทำการทดสอบจำนวน 2 ตำแหน่ง ซึ่งการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex C (ในการทดสอบครั้งนี้ เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือ จึงได้ทำการทดสอบตำแหน่งละ 2 ครั้ง)

ตารางที่ 4-8 ค่าการเสียรูปสูงสุดที่เกิดจากการทดสอบรับแรงกระแทกด้วยพลังงาน 20 N m

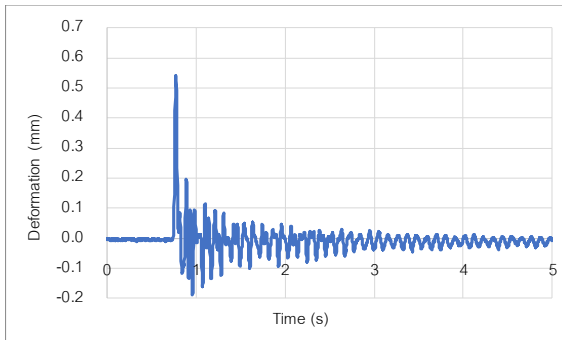
| No. of Impact | Maximum deformation (mm) | |
|---------------|--------------------------|---------|
| | Point 1 | Point 2 |
| 1 | 0.62 | 0.73 |
| 2 | 0.73 | 0.86 |



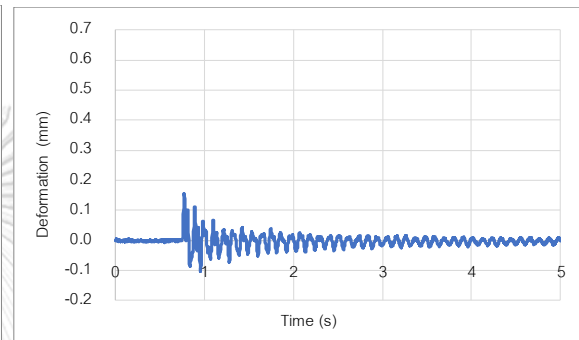
(ก) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT2



(ข) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT3 (ตรงจุดกระแทก)

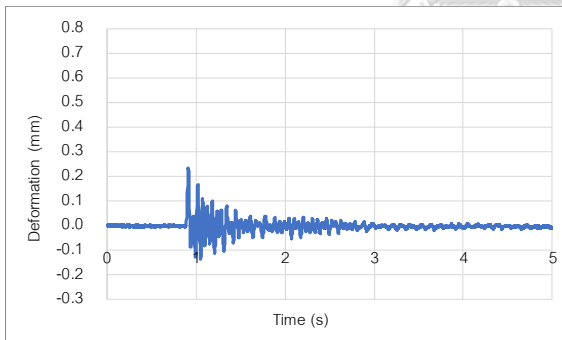


(ค) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT4

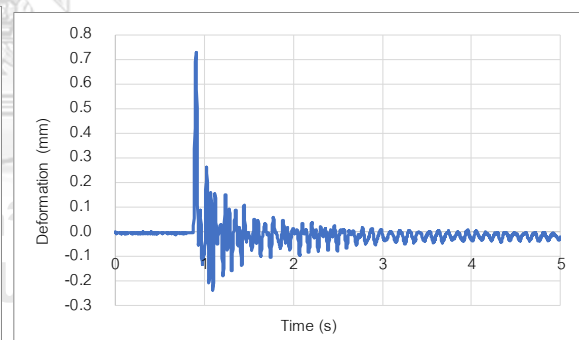


(ง) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT5

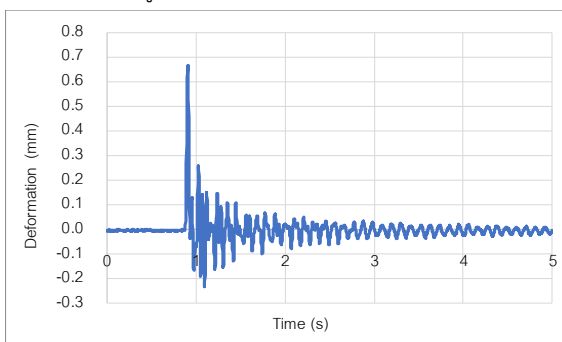
รูปที่ 4-24 กราฟค่าการเสียรูปสูงสุดตำแหน่งที่ 1 การกระแทกครั้งที่ 1
ด้วยพลังงานกระแทก 20 N m ความสูงตกกระทบ 41 มิลลิเมตร



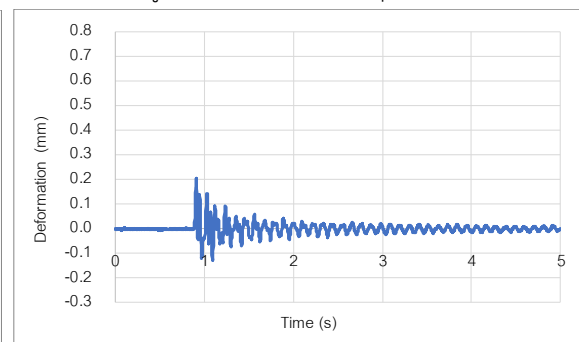
(ก) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT2



(ข) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT3 (ตรงจุดกระแทก)

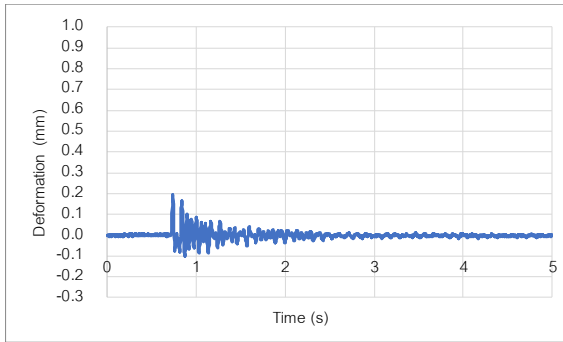


(ค) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT4

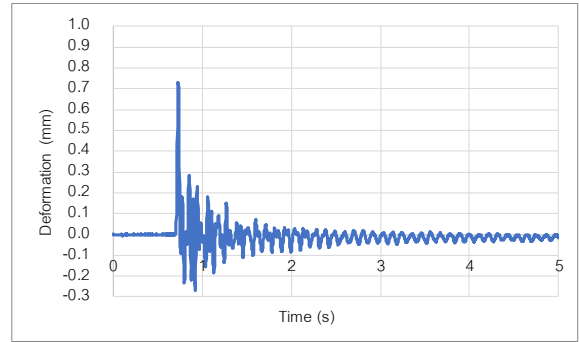


(ง) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT5

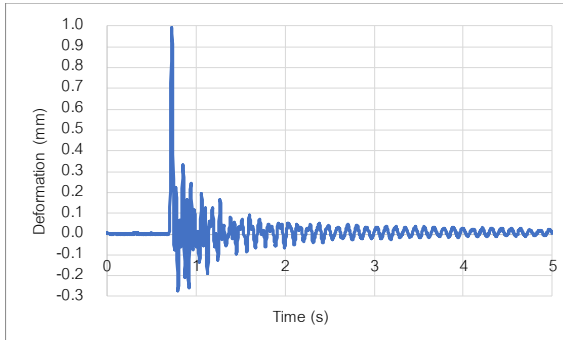
รูปที่ 4-25 กราฟค่าการเสียรูปสูงสุดตำแหน่งที่ 1 การกระแทกครั้งที่ 2
ด้วยพลังงานกระแทก 20 N m ความสูงตกกระทบ 41 มิลลิเมตร



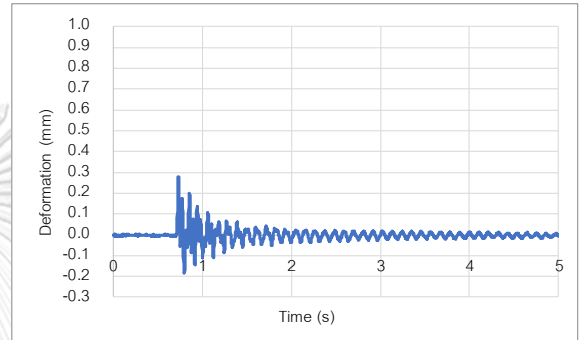
(ก) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT2



(ข) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT3

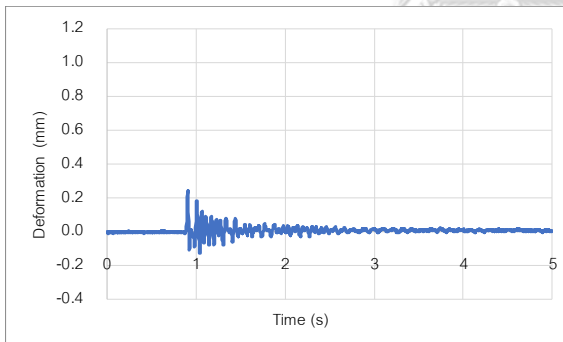


(ค) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT4 (ตรงจุดกระแทก)

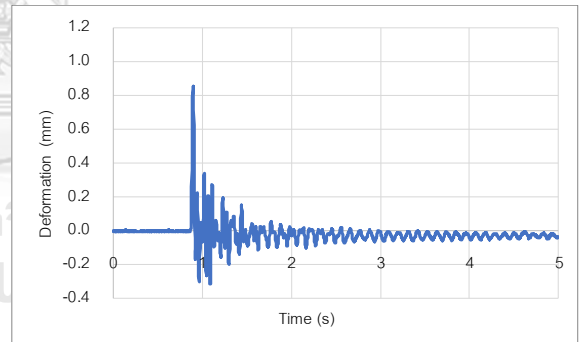


(ง) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT5

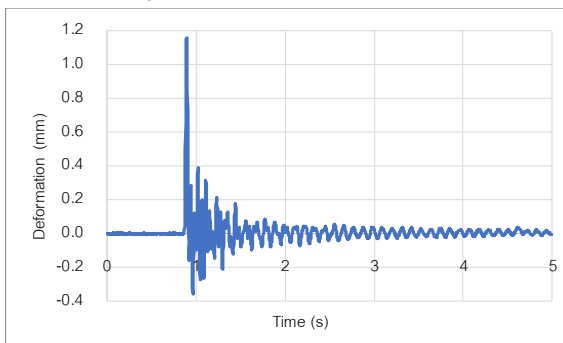
รูปที่ 4-26 กราฟค่าการเสียรูปสูงสุดตำแหน่งที่ 2 การกระแทกครั้งที่ 1 ด้วยพลังงานกระแทก 20 N m ความสูงตกกระทบ 41 มิลลิเมตร



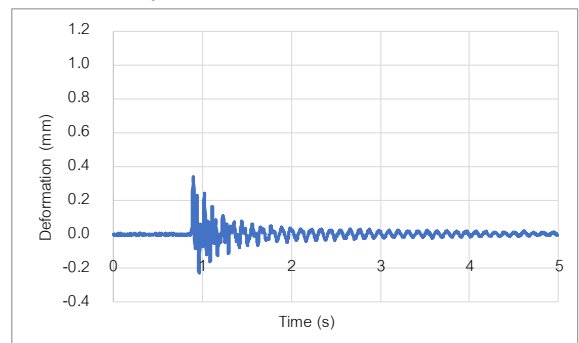
(ก) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT2



(ข) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT3



(ค) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT4 (ตรงจุดกระแทก)



(ง) ค่าการเสียรูป ตำแหน่ง DT5

รูปที่ 4-27 กราฟค่าการเสียรูปสูงสุดตำแหน่งที่ 2 การกระแทกครั้งที่ 2 ด้วยพลังงานกระแทก 20 N m ความสูงตกกระทบ 41 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4-9 ค่าการเสียรูปที่เกิดจากการทดสอบรับแรงกระแทกด้วยพลังงาน 20 N m

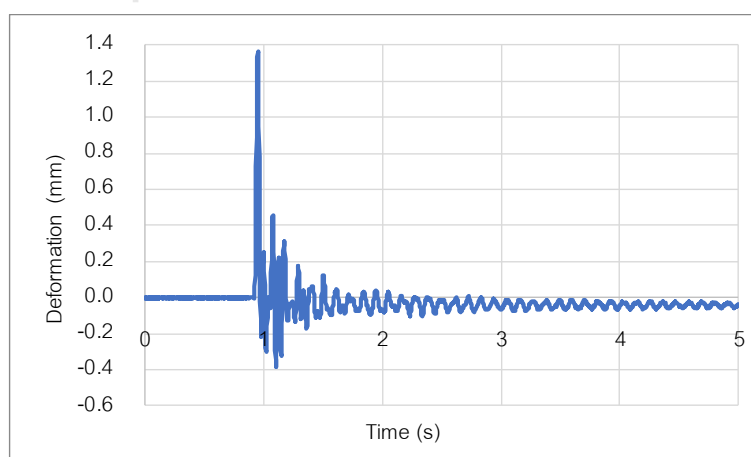
| No. of Impact | Permanent deformation (mm) | | Surface condition |
|---------------|----------------------------|---------|-----------------------------|
| | Point 1 | Point 2 | |
| 1 | 0.01 | 0.01 | No Surface damage occurred. |
| 2 | 0.01 | 0.02 | |

การทดสอบรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ ด้วยพลังงานกระแทก 20 N-m ทั้ง 2 ตำแหน่ง ซึ่งพบว่าผนังไม่เกิดการเสียรูปถาวร เกิน 2 มิลลิเมตร และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ

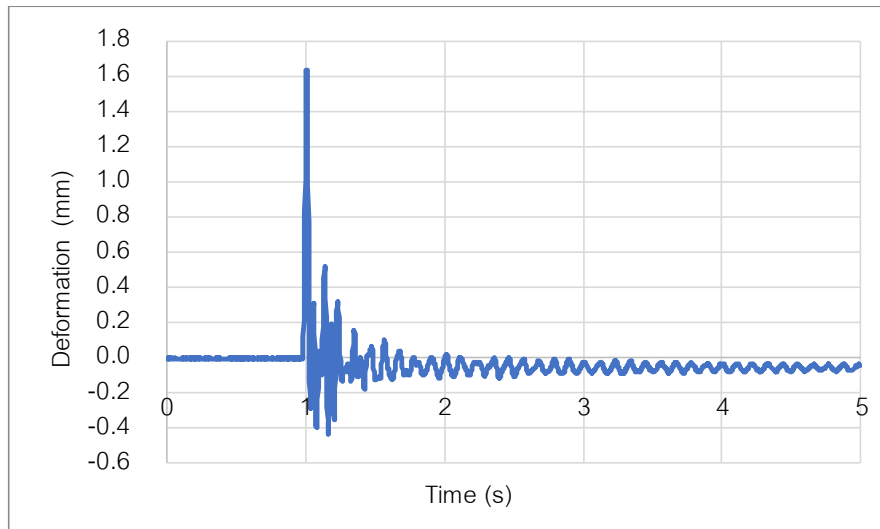
- 2) Structural damage ใช้วัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ กระแทกผนังจุดเดิม 3 ครั้ง ด้วยพลังงานกระแทก 60 N m ความสูงตกกระแทก 122 มิลลิเมตร โดยผนังต้องไม่เกิดการพังทลาย ซึ่งการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน BS 5234 :1992 part 2 Annex E

ตารางที่ 4-10 ค่าการเสียรูปสูงสุดที่เกิดจากการทดสอบรับแรงกระแทกด้วยพลังงาน 60 N m

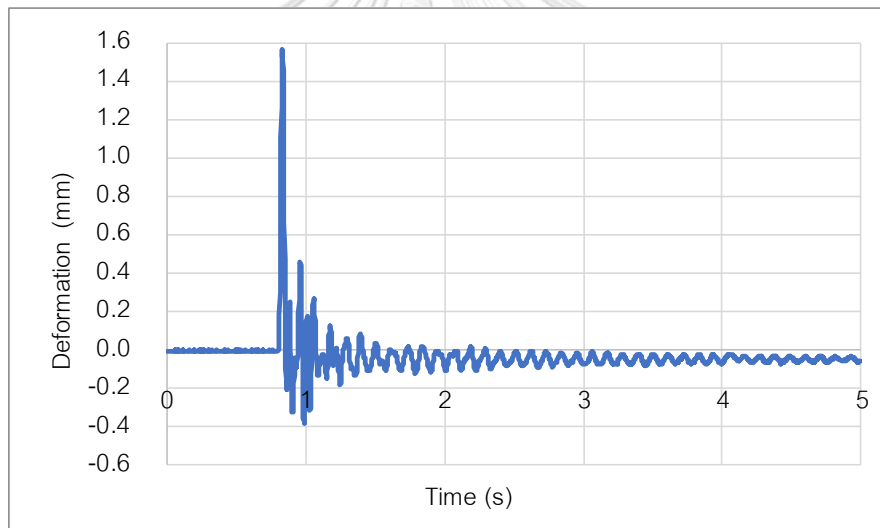
| No. of Impact | Maximum deformation (mm) | |
|---------------|--------------------------|---------|
| | Point 1 | Point 2 |
| 1 | 1.36 | 1.91 |
| 2 | 1.64 | 1.93 |
| 3 | 1.57 | 2.08 |



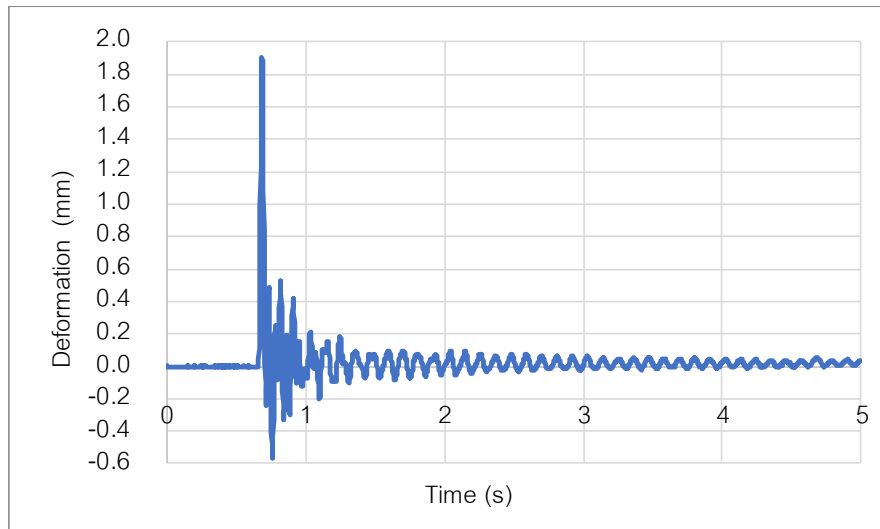
รูปที่ 4-28 กราฟค่าการเสียรูปสูงสุดตำแหน่งที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 1 ด้วยพลังงานกระแทก 60 N m ความสูงตกกระแทก 122 มิลลิเมตร



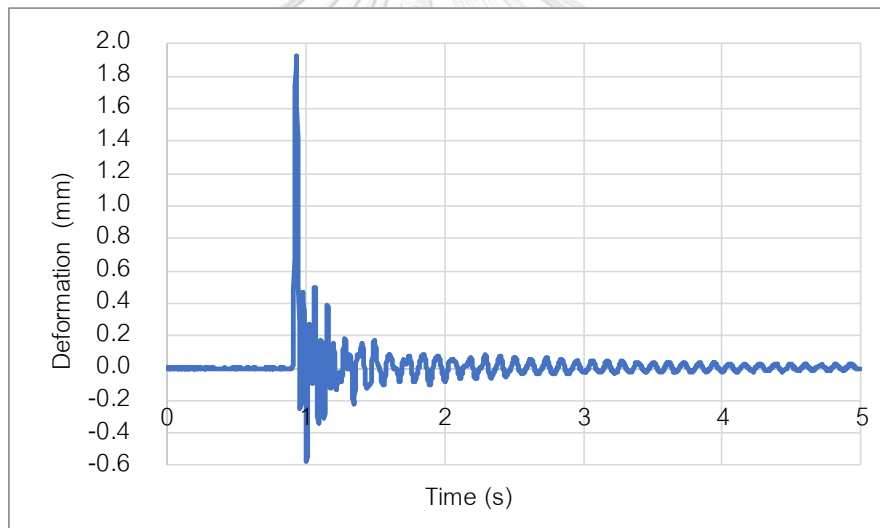
รูปที่ 4-29 กราฟค่าการเสียรูปสูงสุดตำแหน่งที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 2
ด้วยพลังงานกระแทก 60 N m ความสูงตกกระทบ 122 มิลลิเมตร



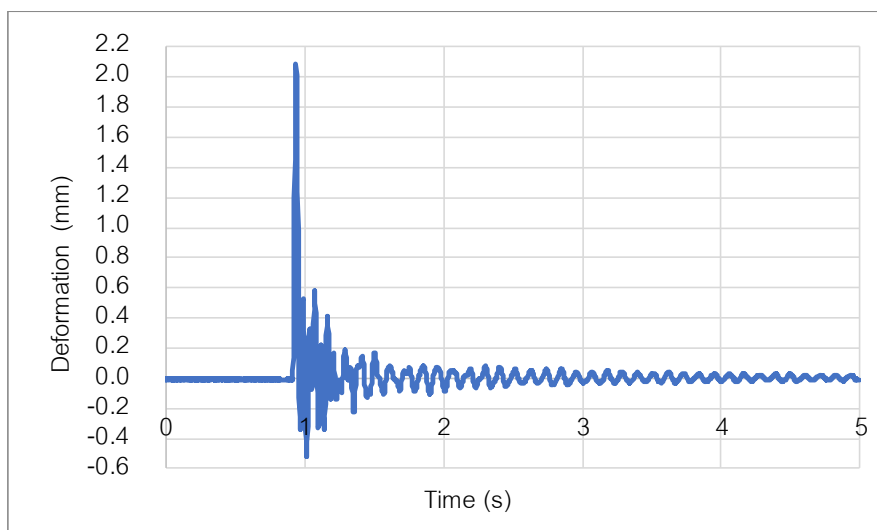
รูปที่ 4-30 กราฟค่าการเสียรูปสูงสุดตำแหน่งที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 3
ด้วยพลังงานกระแทก 60 N m ความสูงตกกระทบ 122 มิลลิเมตร



รูปที่ 4-31 กราฟค่าการเสียรูปสูงสุดตำแหน่งที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 1
ด้วยพลังงานกระแทก 60 N m ความสูงตกกระทบ 122 มิลลิเมตร



รูปที่ 4-32 กราฟค่าการเสียรูปสูงสุดตำแหน่งที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 2
ด้วยพลังงานกระแทก 60 N m ความสูงตกกระทบ 122 มิลลิเมตร



รูปที่ 4-33 กราฟค่าการเสียรูปสูงสุดตำแหน่งที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 3 ด้วยพลังงานกระแทก 60 N m ความสูงตกกระทบ 122 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4-11 ค่าการเสียรูปคงค้างที่เกิดจากการทดสอบรับแรงกระแทกด้วยพลังงาน 60 N m

| No. of Impact | Permanent deformation (mm) | | Surface condition |
|---------------|----------------------------|---------|-----------------------------|
| | Point 1 | Point 2 | |
| 1 | 0.04 | 0.02 | No Surface damage occurred. |
| 2 | 0.05 | 0.03 | |
| 3 | 0.04 | 0.03 | |

การทดสอบรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ กระแทกผนังจุดเดิม 3 ครั้ง ด้วยพลังงานกระแทก 60 N m ความสูงตกกระทบ 122 มิลลิเมตร พบว่าผนังไม่เกิดการพังทลาย และยังไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ

4.7. ผลการทดสอบค่าความเป็นฉนวน

การทดสอบหาค่าสภาพการนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนกันความร้อนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก แบบ Heat Flow Meter ด้วยเครื่อง NETZSCH HFM 436 ตามมาตรฐาน ASTM C518 ตัวอย่างทดสอบมีขนาด 30x30 ตารางเซนติเมตร ความหนา 7 เซนติเมตร โดยมี 2 กลุ่มตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ 1 คือ ตัวอย่างทดสอบที่เป็นคอนกรีตความหนาแน่น 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่เป็นเนื้อเดียว ไม่มีการปิดผิวตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4-34 กลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ 2 คือ ตัวอย่างทดสอบที่เป็นคอนกรีตความหนาแน่น 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปิดผิวตัวอย่างทุกด้านด้วยแผ่นซีเมนต์บอร์ด ดังแสดงในรูปที่ 4-35



รูปที่ 4-34 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ที่เป็นเนื้อเดียว ไม่มีการปิดผิวตัวอย่าง



รูปที่ 4-35 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ปิดผิวตัวอย่างด้วยซีเมนต์บอร์ด

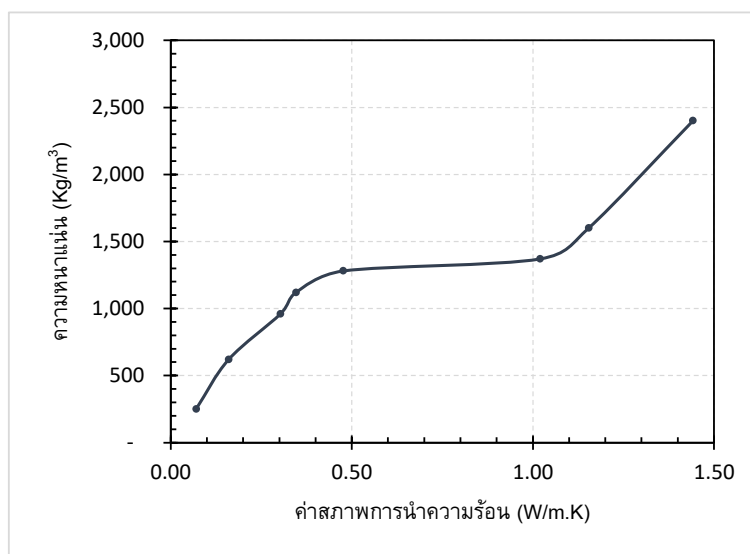
ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนกลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ 1 คอนกรีตความหนาแน่น 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสภาพการนำความร้อน (K) และค่าความต้านทานความร้อน (R) เท่ากับ 0.118 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส และ 0.593 ตารางเมตร-องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ตามลำดับ

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นคอนกรีตกับค่าสภาพการนำความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4-12 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ให้ค่าสภาพการนำความร้อนต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดอื่นๆ ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แม้หากเปรียบเทียบกับงานวิจัยของต่างประเทศจะพบว่าค่าที่ได้ยังสูงกว่าเล็กน้อย

ตารางที่ 4-12 ค่าสภาพการนำความร้อนที่ความหนาแน่นต่างๆ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

| ลำดับ | วัสดุ | ความหนาแน่น (Kg/m ³) | ค่าสภาพการนำความร้อน (W/m.°C) |
|-------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | คอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก | 250 | 0.118 |
| 2 | คอนกรีตมวลเบา | | |
| | (ก) 620 Kg/m ³ | 620 | 0.160 |
| | (ข) 960 Kg/m ³ | 960 | 0.303 |
| | (ค) 1120 Kg/m ³ | 1120 | 0.346 |
| | (ง) 1280 Kg/m ³ | 1280 | 0.476 |
| 3 | บล็อกคอนกรีต | 1370 | 1.020 |
| 4 | อิฐมอญ | 1600 | 1.154 |
| 5 | คอนกรีตทั่วไป | 2400 | 1.442 |

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นคอนกรีตกับค่าสภาพการนำความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4-36 จะเห็นได้ว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตมีผลต่อค่าสภาพการนำความร้อนอย่างมาก โดยความหนาแน่นของคอนกรีตจะแปรผันตรงกับค่าสภาพการนำความร้อน คือ เมื่อความหนาแน่นของคอนกรีตมีค่าน้อย ค่าสภาพการนำความร้อนก็จะมีค่าน้อยเช่นเดียวกัน แต่ช่วงค่าสภาพการนำความร้อน 0.5-1.0 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ค่าความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก เมื่อเทียบกับช่วงอื่น เนื่องจากเป็นกลุ่มตัวอย่างคนละกลุ่ม ทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนต่างกันอย่างมาก ทั้งที่ความหนาแน่นนั้นใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4-36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นคอนกรีตกับค่าสภาพการนำความร้อน

ผลการทดสอบสภาพการนำความร้อนกลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ 2 คอนกรีตความหนาแน่น 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปิดผิวด้วยแผ่นซีเมนต์บอร์ดทั้ง 2 ด้าน มีค่าสภาพการนำความร้อน (K) และค่าความต้านทานความร้อน (R) เท่ากับ 0.110 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส และ 0.636 ตารางเมตร-องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ตามลำดับ.

เนื่องจากการทดสอบมีข้อจำกัดความหนาของตัวอย่างทดสอบต้องมีความหนาต่ำกว่า 7 เซนติเมตร แต่ผนังจริงนั้นมีความหนารวม 12 เซนติเมตร ดังนั้นหากต้องการทราบค่าต้านทานความร้อน ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2-7 โดยให้ค่าสภาพการนำความร้อนของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก เท่ากับ 0.118 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์บอร์ด เท่ากับ 0.100 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส และความหนารวมของผนังเท่ากับ 12 เซนติเมตร จะได้ค่าต้านทานความร้อน หรือค่าความเป็นฉนวน เท่ากับ 1.035 ตารางเมตร-องศาเซลเซียสต่อวัตต์

จากคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่มีค่าความเป็นฉนวนที่ดีและมีค่าสภาพการนำความร้อนที่ต่ำกว่า 0.100 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าค่าสภาพการนำความร้อนของคอนกรีตปกติถึง 14 เท่า และต่ำกว่าคอนกรีตความหนาแน่น 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพียงเล็กน้อย เมื่อนำแผ่นซีเมนต์บอร์ดมาปิดผิวทั้ง 2 ด้านของแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนกลุ่มตัวอย่างทดสอบที่ 2 ต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ 1 ที่เป็นเนื้อคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากอย่างเดียว

เนื่องจากผนังแต่ละชนิดมีความหนาที่แตกต่างกัน จึงได้คำนวณค่าต้านทานความร้อน ของผนังแต่ละชนิด โดยกำหนดให้ผนังหนา 12 เซนติเมตรเท่ากัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานความร้อน

ตารางที่ 4-13 เปรียบเทียบค่าต้านทานความร้อน (R) ของผนังที่มีความหนา 12 เซนติเมตร

| ชนิดของผนัง | ค่าต้านทานความร้อน หรือ ค่าความเป็นฉนวน (m^2C/W) |
|--|---|
| ผนังอิฐมวลเบา | 0.105 |
| ผนังอิฐมวลเบา | 0.833 |
| ผนังคอนกรีตอัดแรงชนิดกลาง | 0.685 |
| ผนังประกอบแกนกลางเป็นเม็ดโฟมผสมคอนกรีต | 1.128 |
| ผนังประกอบแกนกลางเป็นฉนวนโฟม | 2.372 |
| ผนังประกอบแกนกลางเป็นฉนวนคอนกรีต ความหนาแน่น 250 kg/m^3 | 1.035 |

เมื่อเปรียบเทียบกับผนังแต่ละชนิดที่มีความหนาผนัง 12 เซนติเมตรเท่ากัน พบว่าผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากมีค่าความเป็นฉนวนสูงกว่าผนังชนิดเดียวที่มีคอนกรีตเป็นองค์ประกอบ ยกเว้นผนังประกอบแกนกลางเป็นเม็ดโฟมผสมคอนกรีต และผนังประกอบแกนกลางเป็นฉนวนโฟม เนื่องจากโฟมนี้มีค่าความเป็นฉนวนสูงกว่าคอนกรีต

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

5.1. การพัฒนาผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก

การศึกษานี้มุ่งหวังที่จะพัฒนาผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก โดยพยายามจะพัฒนาผนังภายในอาคารให้มีราคาถูกลง แต่มีประสิทธิภาพในด้านการทนไฟ การนำความร้อน และการกันเสียงที่ดี ทั้งมีความแข็งแรงทนทานที่เพียงพอด้วย แม้ในอดีตจะมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แต่ก็ยังเป็นเพียงการศึกษาเชิงคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากเป็นหลัก ยังไม่มีการศึกษาจำลองหรือทดสอบในรูปแบบของผนังสำเร็จรูป ซึ่งมีความนิยมใช้งานสูงในประเทศที่ขาดแคลนแรงงานฝีมือในการก่อสร้าง

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตทำให้ทราบว่าคอนกรีตที่มีค่าความหนาแน่นต่ำมาก จะมีคุณสมบัติการทนไฟและการเป็นฉนวนที่ดีกว่าคอนกรีตปกติ โดยพบว่ายิ่งค่าความหนาแน่นต่ำลงมากเท่าไรก็จะยิ่งมีประสิทธิภาพการเป็นฉนวนเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงเทคโนโลยีการผลิตคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากในปัจจุบัน พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะผลิตให้ได้ความหนาแน่นประมาณ 200-300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยไม่ต้องใช้ซีเมนต์ชนิดพิเศษ หรือเติมสารผสมเพิ่มที่มีราคาแพง จึงพิจารณาใช้ทำเป็นส่วนแกนฉนวนของผนัง แต่เนื่องจากคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากระดับนี้จะมีกำลังรับแรงที่ต่ำลงมาก เมื่อหล่อเป็นชิ้นส่วนผนังจะเกิดความเสียหายจากการขนส่งหรือติดตั้งได้ง่าย อีกทั้งผิวหน้าของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากไม่เรียบเนียน ทำให้ต้องฉาบปูนที่ผิวหน้าอีกครั้ง เพื่อแก้ไขปัญหากำลังรับแรงที่ค่อนข้างต่ำและผิวหน้าไม่เรียบแข็งข้างต้น การศึกษานี้จึงเลือกใช้แผ่นซีเมนต์บอร์ดปิดผิวหน้าแผ่นผนังทั้งสองด้าน และใช้คอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากทำหน้าที่เป็นแกนฉนวนตรงกลาง

คอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ผลิตโดยการผสมฟองอากาศที่เตรียมจากสารสร้างฟองอากาศชนิดโปรตีน (Protein foaming agent) ผ่านเครื่องผลิตฟองอากาศ (Foam generator) เข้ากับซีเมนต์เพสต์ที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมน้ำ โดยปราศจากสารผสมเพิ่ม ซึ่งในการศึกษานี้พบว่าสามารถผลิตคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากได้ประมาณ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อนำคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากที่ผลิตได้นี้ไปทดสอบหาค่าสภาพการนำความร้อน พบว่ามีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.118 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่าได้คุณสมบัติการเป็นฉนวนอยู่ในเกณฑ์ที่ดีกว่าคอนกรีตปกติมาก จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากที่ปิดผิวหน้าด้วยแผ่นซีเมนต์บอร์ด ได้ค่าสภาพการนำความร้อนเฉลี่ยประมาณ 0.110 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากที่ไม่ได้ปิดผิวด้วย

ซีเมนต์บอร์ด เมื่อเปรียบเทียบกับผนังอิฐมวลเบาพบว่าผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากที่พัฒนาขึ้นนี้ มีคุณสมบัติด้านการเป็นฉนวนหรือการต้านทานความร้อนที่ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

จากนั้นจึงทำการศึกษาออกแบบผนังสำเร็จรูปให้มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการขนส่ง และใช้งานเป็นผนังภายในอาคาร โดยอาศัยการวิเคราะห์จากแบบจำลองในคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของปูนกาวซีเมนต์ ทำให้ได้แผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมากขนาดมาตรฐาน กว้าง 60 เซนติเมตร ความสูง 240 เซนติเมตร ความหนา 12 เซนติเมตร ที่ยึดผิวแผ่นซีเมนต์บอร์ดด้วยก้อนคอนกรีตลูกบาศก์จำนวน 6 ก้อน แล้วรอกแกนผนังด้วยคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก เพื่อให้มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนกันความร้อน ทนไฟ กันเสียงที่ดี ทั้งยังมีน้ำหนักเบาและแข็งแรงเพียงพอ

เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ออกแบบแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก จึงทำการเตรียมตัวอย่างผนังเพื่อทำการทดสอบการรับน้ำหนักและแรงกระแทกตามมาตรฐาน

การทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก มีการทดสอบย่อย 2 การทดสอบ คือ 1) การทดสอบ Surface damage ตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex B ด้วยพลังงานกระแทก 3 N.m ที่ได้ทำการทดสอบทั้ง 10 จุด ซึ่งในการทดสอบไม่มีความเสียหายรุนแรงที่ผิวหน้าของผนัง 2) การทดสอบ Perforation ตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex D ด้วยพลังงานกระแทก 5 N.m ที่ได้ทำการทดสอบทั้ง 10 จุด ซึ่งในการทดสอบไม่ก่อให้เกิดการเจาะทะลุต่อผิวหน้าของผนัง

และการทดสอบความสามารถของผนังในการรับแรงกระแทกด้วยวัสดุอ่อนนุ่มขนาดใหญ่ ซึ่งมีการทดสอบย่อย 2 การทดสอบ คือ 1) การทดสอบ Resistance of damage ตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex C ด้วยพลังงานกระแทก 20 N.m ซึ่งในการทดสอบไม่เกิดการเสียหายรูปถาวร เกิน 2 มิลลิเมตร และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ 2) การทดสอบ Structural damage ตามมาตรฐาน BS 5234:1992 part 2 Annex E พลังงานกระแทก 60 N.m ซึ่งในการทดสอบผนังไม่เกิดการพังทลาย และยังไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ผ่านการทดสอบตามเกณฑ์มาตรฐานอยู่ในระดับ Medium duty (MD) ใช้กันพื้นที่ที่มีการใช้งานและมีการกระทบกระทั่งปานกลาง มีโอกาสเกิดอุบัติเหตุมาก เช่น ที่พักอาศัย อาคารสำนักงาน หรืออาคารพาณิชย์ เป็นต้น

ผลการศึกษาทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการต้านทานความร้อนและประหยัดพลังงานของผนังฉนวนสำเร็จรูปแกนคอนกรีตความหนาแน่นต่ำมาก ทั้งยังมีความแข็งแรงที่เพียงพอ

และราคาถูก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาต่อยอดเป็นผนังสำเร็จรูปเพื่อผลิตใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ต่อไป

5.2. ข้อเสนอแนะในการทำงาน

การทดสอบในงานวิทยานิพนธ์นี้ ยังมีทดสอบอื่น ของมาตรฐาน BS 5234 ที่สามารถทดสอบได้ เช่น การทดสอบความแข็งแรงของผนังโดยใช้แรงกระทำจุดเดียว (Partition Stiffness) การทดสอบความทนทานของผนังเมื่อทำการเปิด-ปิด ประตูกระแทกซ้ำๆ (Door Slamming) การทดสอบความแข็งแรงของผนังโดยให้ผนังรับแรงดัน (Crowd Pressure) การทดสอบผนังโดยการรับแรงเฉวนของวัตถุน้ำหนักเบา (Light Weight Anchorage) การทดสอบผนังโดยการรับแรงเฉวนชั้นวางของวัตถุน้ำหนักมาก (Heavy Weight Anchorage) และการทดสอบอื่นๆ ที่นอกเนื่องจากมาตรฐาน BS 5234 เช่น การทดสอบการทนไฟ ตามมาตรฐาน BS 476 part 20 การทดสอบการส่งผ่านของเสียง (Sound Transmission) ตามมาตรฐาน ASTM E90 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

บรรณานุกรม

- Assaad, J., Chakar, E., & Zéhil, G.-P. (2018). Testing and modeling the behavior of sandwich lightweight panels against wind and seismic loads. *Engineering Structures*, 175, 457-466.
- ASTM C393. Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure.
- ASTM C495. Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete.
- ASTM C518. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus
- Avó de Almeida, M. (2009). *Structural behaviour of composite sandwich panels for applications in the construction industry*. master thesis). Universidade Técnica de Lisboa,
- BS 5234-2. (1992). Partitions (including matching linings). . In.
- Burnham, K. (1951.). The Prefabrication of Houser. U.S.A. *The Technology Press of the Massachusetts Institute of Tachnology and John Willy & Sons*.
- Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., & Gugliandolo, E. (2018). Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. *Construction and Building Materials*, 165, 735-749.
- Hibbeler, R. C. (2014). *Statics and mechanics of materials* Pearson.
- Kearsley, E., & Mostert, H. (2005). *Opportunities for expanding the use of foamed concrete in the construction industry*. Paper presented at the Use of Foamed Concrete in Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5 July 2005.
- Li, P., Wu, H., Liu, Y., Yang, J., Fang, Z., & Lin, B. (2019). Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete. *Construction and Building Materials*, 205, 529-542.

- Pan, Z., Li, H., & Liu, W. (2014). Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. *Construction and Building Materials*, 72, 256-261.
- Sharaf, T., & Fam, A. (2013). Analysis of large scale cladding sandwich panels composed of GFRP skins and ribs and polyurethane foam core. *Thin-Walled Structures*, 91-101.
- Shu, C., Zhao, S., & Hou, S. (2018). Crashworthiness analysis of two-layered corrugated sandwich panels under crushing loading. *Thin-Walled Structures*, 133, 42-51.
- Sun, G., Chen, D., Wang, H., Hazell, P. J., & Li, Q. (2018). High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations. *International Journal of Impact Engineering*, 122, 119-136.
- Tan, X., Chen, W., Hao, Y., & Wang, X. (2014). Experimental study of ultralight (< 300 kg/m³) foamed concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- Wang, Z., Li, Z., & Xiong, W. (2019). Experimental investigation on bending behavior of honeycomb sandwich panel with ceramic tile face-sheet. *Composites Part B: Engineering*, 164, 280-286.
- Xia, Z., Wang, X., Fan, H., Li, Y., & Jin, F. (2016). Blast resistance of metallic tube-core sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*, 97, 10-28.
- Zenkert, D. (1995). *An introduction to sandwich construction: Engineering materials advisory services*.
- Zhou, J., Wang, Y., Liu, J., Liu, J., Mei, J., Huang, W., & Tang, Y. (2018). Temperature effects on the compressive properties and failure mechanisms of composite sandwich panel with Y-shaped cores. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 114, 72-85.
- กรองทิพย์ เต็มเกาะ. การทดสอบสภาพนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, ปีที่ 60 ฉบับที่ 190.
- กิตติพันธ์ บุญโตสิตระกูลม, ผกามาศ ชูสิทธิ์, ปราโมทย์ วีรานุกูล, & กิตติพงษ์ สุวีโร. (2560). แผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปน้ำหนักเบาจากเศษโฟมบรรจุภัณฑ์. *Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University*, 7(2), 67-82.
- จรัญพัฒน์ ภูวนันท์. (2546). Structural Sandwish Panels: อีกทางเลือกหนึ่งของระบบก่อสร้างบ้านประหยัดพลังงาน. *NAJUA: Architecture, Design and Built Environment*, 19, 126-126.

ทงศักดิ์ อี้มใจ, & จิราวัฒน์ พุ่มเกสร. (2561). พฤติกรรมของโครงสร้างระบบผนังคอมโพสิตแบบผสมภายใต้แรงดัดและแรงตามแนวแกน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เทอดธรรม ยอดพฤติการณ์. (2555). การก่อสร้างโดยใช้ระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป: สำนักพิมพ์สุนทรฟิล์ม.

มอก.2226. (2548). แผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูป. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

มาลี ไตรยามีกุล. (2540). การศึกษาระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมจิตร พุฒดี. การวัดสภาพการนำความร้อนของวัสดุ. Retrieved from <http://www.eic.co.th/Portals/4/download/Thermal%20conductivity%20measurement.pdf>



ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | นายวรากร อิมรักษา |
| วัน เดือน ปี เกิด | 21 พฤษภาคม 2537 |
| สถานที่เกิด | อุดรธานี |
| วุฒิการศึกษา | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 14/4 ซอย สายลม (พหลโยธิน 8) ถนน พหลโยธิน แขวงสามเสนใน เขต พญาไท กรุงเทพมหานคร 10400 |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY