

การศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟมพอลิस्टไรรีนแบบขยายตัว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON PROPERTIES OF EXPANDED POLYSTYRENE FOAM COMPOSITE  
STRUCTURAL INSULATED PANELS



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 2018  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างผนังประกอบที่เป็นฉนวน โฟมพอลิสไตรีนแบบขยายตัว
โดย	นายธนีสร์ ชาญสุทธิกนก
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เฉลิมชัย วาณิชย์ล้ำเลิศ)	

ธนีสร์ ชาญสุทธิภิกน : การศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างผนังประกอบที่เป็นฉนวนโพลีเมโฟลิสไตรีนแบบขยายตัว. ( A STUDY ON PROPERTIES OF EXPANDED POLYSTYRENE FOAM COMPOSITE STRUCTURAL INSULATED PANELS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิฑิต ปานสุข

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโพลีเมโฟลิสไตรีน (Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels) ใช้โพลีเมโฟลิสไตรีน (Expanded Polystyrene Foam : EPS foam) เป็นวัสดุแกนกลางประกบด้วยแผ่นซีเมนต์ (Cement Board) ทั้ง 2 ด้านแล้วนำมาทดสอบเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังโดยการนำเหล็กรีดเป็นรูปตัว C (Ribbed C-Channel) เสริมที่ขอบของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโพลีเมโฟลิสไตรีนทั้ง 4 ด้าน หลังจากนั้นนำผนังประกอบที่เป็นฉนวนโพลีเมโฟลิสไตรีนแบบมีเหล็กไปทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง และคุณสมบัติอื่นๆ รวมถึงการนำคุณสมบัติที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผนังอื่นๆที่มีในท้องตลาด การทดสอบของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโพลีเมโฟลิสไตรีนประกอบด้วย กำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงอัด คุณสมบัติการทนไฟ คุณสมบัติการนำความร้อน และคุณสมบัติการส่งผ่านของเสียง โดยผลของการทดสอบด้านกำลังสามารถพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโพลีเมโฟลิสไตรีนแบบมีเหล็กได้ และจากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโพลีเมโฟลิสไตรีนทำให้ทราบว่าแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโพลีเมโฟลิสไตรีนมีคุณสมบัติการนำความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับผนังอื่นๆที่มีในท้องตลาด ซึ่งสามารถนำแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโพลีเมโฟลิสไตรีนแบบมีเหล็กมาเป็นผนังทางเลือกที่มีความต้องการความเป็นฉนวนสูงได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5970190221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Composite Structural Insulated Panels, Expanded Polystyrene Foam,  
Insulated foam, Thermal conductivity

Tanis Chansutthikanok : A STUDY ON PROPERTIES OF EXPANDED  
POLYSTYRENE FOAM COMPOSITE STRUCTURAL INSULATED PANELS.

Advisor: Assoc. Prof. Withit Pansuk, Ph.D.

This thesis aims to study and develop the strength properties of Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels. Expanded Polystyrene Foam (EPS foam) is used as the core of Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels with Cement Board on both sides. Tested to develop strength properties by using C-shaped cold rolled steel (C-Channel) add on 4 sides of Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels. Then tested the other properties the Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels and compared to the other wall in the market. Testing of Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels are Shear strength test, Compressive strength test, Combustibility test, Thermal conductivity test, and Sound Transmission test. As a result of strength test can conclude that Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels with steel can improve the shear strength and compressive strength of Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels. In addition, the properties of Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels is the best in thermal conductivity, compared to the other wall in the market. Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels can be used as an alternative wall with high insulation requirements.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้เสียสละเวลาอันมีค่าในการเสนอแนะแนวทางของการทำงานวิจัยครั้งนี้ ช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่มีในงานวิจัยครั้งนี้ และรวมถึงการให้กำลังใจในการทำงาน ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชชา จงวิวัฒน์สกุล อาจารย์ ดร. เสวกชัย ตั้งอร่ามวงศ์ และ ดร. เฉลิมชัย วาณิชย์ล้ำเลิศ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ผู้ให้คำแนะนำในการทดสอบต่างๆ รวมถึงให้ความรู้เพิ่มเติม ตรวจสอบ แก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งต่อ รุ่นพี่ เพื่อนๆ และรุ่นน้องที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านและให้กำลังใจระหว่างการเดินทาง

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติ ผู้เป็นกำลังใจและสนับสนุนการทำงานเป็นอย่างดี ตลอดจนครูบาอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอน อบรม และให้ความรู้ในศาสตร์สาขาต่างๆ ผู้เขียนจะระลึกถึงพระคุณเหล่านี้จนกว่าชีวิตจะหาไม่

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนในการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจากบริษัท วอลรัสโฮม จำกัด

ธนีสร์ ชาญสุทธิกนก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ .....	1
สารบัญตาราง.....	5
บทที่ 1 บทนำ .....	8
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	8
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
1.2.1 พัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมโดยการเสริมเหล็กกริดเอ็น รอบด้านแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม.....	9
1.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม .....	9
1.2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก กับผนังชนิด อื่นๆที่ใช้ในประเทศไทย .....	9
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	10
1.3.1 โฟม EPS ความหนาแน่น 1.25 lb/ft <sup>3</sup> หรือ 20 kg/m <sup>3</sup> คือวัสดุที่นำมาใช้เป็นแกนกลาง ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม .....	10
1.3.2 แผ่นซีเมนต์หนา 6 mm คือวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุผิวหน้าของแผ่นประกอบที่เป็น ฉนวนโฟม .....	10
1.3.3 เหล็กกริดเอ็นที่นำมาประกอบกับแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กเพื่อพัฒนา คุณสมบัติเป็นเหล็กรูปตัวซีขนาด 75X41X10 .....	10
1.3.4 คุณสมบัติที่ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผนังชนิดอื่น .....	10

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.4.1 นำแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กไปใช้เป็นผนังทางเลือกในการก่อสร้างตามจุดประสงค์ที่ต้องการได้ .....	10
1.4.2 สามารถนำข้อมูลคุณสมบัติที่ทดสอบไปช่วยในการออกแบบในอนาคตได้.....	10
1.4.3 เป็นแนวทางการทดสอบแผ่นประกอบเพื่อใช้ในการหาคุณสมบัติต่างๆ.....	10
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	11
1.5.1 ศึกษาข้อมูลของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม แผ่นประกอบ และส่วนประกอบของแผ่นประกอบแต่ละชนิด .....	11
1.5.2 ศึกษาข้อมูลคุณสมบัติต่างๆของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และวิธีการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย.....	11
1.5.3 ศึกษามาตรฐานที่นำมาใช้ในการทดสอบผนัง และแผ่นประกอบชนิดต่างๆ.....	11
1.5.4 กำหนดขอบเขตของงานวิจัย วิธีการทดลอง .....	11
1.5.5 เตรียมอุปกรณ์และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง .....	11
1.5.6 ทำการทดลองตัวอย่างที่เตรียมมา .....	11
1.5.7 สรุปผลการทดลอง .....	11
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	12
2.1 ส่วนนำ .....	12
2.2 แผ่นประกอบ.....	12
2.3 พฤติกรรมของแผ่นประกอบ .....	13
2.4 วัสดุผิวหน้า.....	14
2.4.1 วัสดุผิวหน้าที่เป็นเหล็ก.....	14
2.4.2 วัสดุผิวหน้าที่ไม่ใช่เหล็ก.....	15
2.4.3 แผ่นไม้อัด (Wood board).....	15
2.4.4 แผ่นยิปซัม (Gypsum Board) .....	16
2.4.5 แผ่นซีเมนต์ (Cement Board) .....	16

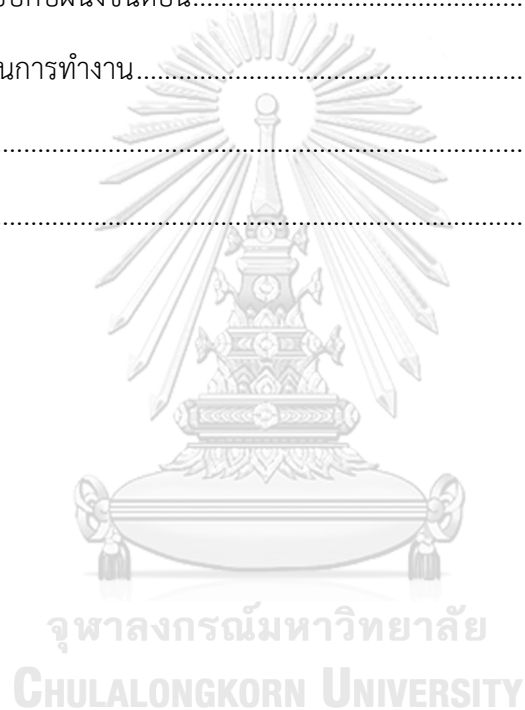


2.5	แกนกลางของแผ่นประกอบ.....	17
2.5.1	แกนกลางของแผ่นประกอบแบบโครงสร้าง (Structural core).....	18
2.5.2	แกนกลางของแผ่นประกอบที่เป็นแบบเซลล์ (Cellular core).....	19
2.6	เหล็กกรีดเย็น.....	24
2.7	ผนังสำเร็จประเภทอื่น.....	25
2.7.1	ผนังอิฐมวลเบา.....	25
2.7.2	ผนังอิฐมวลเบา (Lightweight concrete brick).....	26
2.7.3	ผนังคอนกรีตอัดแรงชนิดกลวง (Hollow core concrete panels).....	26
2.7.4	แผ่นประกอบที่แกนกลางเป็นเม็ดโฟมผสมคอนกรีต (EPS aggregate concrete sandwich panels).....	27
บทที่ 3	การดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1	ส่วนนำ.....	28
3.2	แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม.....	28
3.2.1	วัสดุผิวหน้า.....	28
3.2.2	วัสดุแกนกลาง.....	29
3.2.3	เหล็กที่นำมาประกอบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลัง.....	29
3.3	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength).....	30
3.3.1	มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ.....	30
3.3.2	การเตรียมตัวอย่าง.....	31
3.4	การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมด้วยวิธีแปลงหน้าตัด.....	32
3.4.1	วิธีแปลงหน้าตัด.....	32
3.4.2	การแปลงหน้าตัดแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมชนิดไม่มีเหล็ก.....	33
3.4.3	การแปลงหน้าตัดแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมชนิดมีเหล็ก.....	33
3.4.4	การหาค่า Moment of Inertia.....	34

3.4.5 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือน .....	35
3.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) .....	35
3.5.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ .....	35
3.5.2 การเตรียมตัวอย่าง .....	37
3.6 การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม .....	38
3.6.1 พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาสั้น .....	38
3.6.2 พฤติกรรมของเสายาวเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกน .....	39
3.6.3 พฤติกรรมของเสายาวเมื่อรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน .....	41
3.7 การทดสอบการไหม้ไฟ (Combustibility).....	41
3.7.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ .....	41
3.7.2 การเตรียมตัวอย่าง .....	43
3.8 การทดสอบค่าความเป็นฉนวน (Thermal Conductivity).....	44
3.8.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ .....	44
3.8.2 การเตรียมตัวอย่าง .....	46
3.9 การทดสอบการส่งผ่านของเสียง (Sound Transmission) .....	47
3.9.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ .....	47
3.9.2 ตัวอย่างการคำนวณค่า STC.....	48
3.9.3 การเตรียมตัวอย่าง .....	50
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	52
4.1 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) แบบไม่มีเหล็ก .....	52
4.1.1 ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก .....	52
4.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก.....	53
4.2 การคำนวณกำลังรับแรงเฉือนจากวิธีแปลงหน้าตัด.....	54
4.2.1 ผลการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก ....	54

4.2.2 การวิเคราะห์ผลที่คำนวณได้กับผลจากการทดสอบ .....	55
4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) แบบไม่มีเหล็ก .....	56
4.3.1 ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก .....	56
4.3.2 การวิเคราะห์ผลที่คำนวณได้กับผลจากการทดสอบ .....	60
4.4 การคำนวณกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม .....	61
4.4.1 ผลการคำนวณกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก .....	61
4.4.2 การวิเคราะห์ผลการคำนวณเทียบกับผลการทดสอบ .....	61
4.5 สรุปการเลือกขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลัง 62	
4.5.1 การพิจารณาเลือกจากกำลังรับแรงเฉือน .....	62
4.5.2 การพิจารณาเลือกจากกำลังรับแรงอัด .....	63
4.6 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) แบบมีเหล็ก .....	63
4.6.1 ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	63
4.6.2 การคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	66
4.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) แบบมีเหล็ก .....	66
4.7.1 ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	66
4.7.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	69
4.7.3 การคำนวณกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	70
4.8 การทดสอบการทนไฟ (Combustibility) .....	71
4.8.1 ผลการทดสอบ .....	71
4.8.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	72
4.9 การทดสอบค่าความเป็นฉนวน (Thermal Conductivity) .....	73
4.9.1 ผลการทดสอบ .....	73
4.9.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ .....	73

4.10	การทดสอบการส่งผ่านของเสียง (Sound Transmission).....	74
4.10.1	ผลการทดสอบ .....	74
4.10.2	การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	75
บทที่ 5	สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	77
5.1	การพัฒนาคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม .....	77
5.2	คุณสมบัติของผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม. ....	77
5.3	การเปรียบเทียบกับผนังชนิดอื่น.....	78
5.4	ข้อเสนอแนะในการทำงาน.....	78
บรรณานุกรม.....		79
ประวัติผู้เขียน.....		82



## สารบัญญภาพ

	หน้า
รูป 2-1 ส่วนประกอบของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม .....	12
รูป 2-2 เปรียบเทียบแผ่นประกอบกับคานรูปตัวไอ(Abdolpour, 2017).....	13
รูป 2-3 แผ่นไม้อัดชนิด osb.....	16
รูป 2-4 แผ่นซีเมนต์.....	16
รูป 2-5 แกนกลางแบบลอนลูกฟูกที่เป็นตาข่าย คล้ายใยแมงมุม .....	18
รูป 2-6 วัสดุแกนกลางจำแนกตามประเภทและชนิด ดัดแปลงมาจาก(Abdolpour, 2017).....	18
รูป 2-7 ซ้ายแผ่นประกอบที่มีแกนกลางเป็นลอนลูกฟูกทรงสามเหลี่ยมจากอลูมิเนียม GFRP และ CFRP (Rejab & Cantwell, 2013) ขวาแผ่นประกอบที่แกนกลางเป็นลูกฟูกทรงลอนจากอลูมิเนียม .....	19
รูป 2-8 ซ้ายแกนกลางของแผ่นประกอบที่ทำจากไม้บัลซา (Morgan & Toubia, 2014) ขวา แกนกลางแผ่นประกอบไม้บัลซาที่มีความยืดหยุ่น .....	19
รูป 2-9 การผลิตแกนกลางที่มีโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง.....	20
รูป 2-10 รูปทรงต่างๆของแกนรังผึ้ง.....	20
รูป 2-11 แผ่นประกอบที่วัสดุผิวหน้าเป็นไม้อัดและวัสดุแกนกลางเป็นโฟม .....	21
รูป 2-12 ค่ากำลังรับแรงอัดของโฟมชนิดต่างๆเทียบกับความหนาแน่น (Davies, 2008).....	22
รูป 2-13 ค่ากำลังรับแรงดึงของโฟมชนิดต่างๆเทียบกับความหนาแน่น (Davies, 2008) .....	22
รูป 2-14 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของโฟมชนิดต่างๆเทียบกับความหนาแน่น (Davies, 2008).....	23
รูป 2-15 ขนาดและรูปร่างของเหล็กที่นำมาใช้ในการประกอบกับแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม .....	25
รูป 3-1 แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กที่นำมาใช้ทดสอบ .....	28
รูป 3-2 แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กที่นำมาใช้ทดสอบ .....	29
รูป 3-3 แบบจำลองสามมิติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมชนิดมีเหล็ก.....	29
รูป 3-4 การทดสอบแบบ Quarter Point Loading.....	30

รูป 3-5 ขนาดความหนาของแผ่นประกบ.....	30
รูป 3-6 การออกแบบการทดสอบหากล้างรับแรงอัด .....	31
รูป 3-7 การแปลงหน้าตัดของแผ่นประกบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก .....	33
รูป 3-8 การแปลงหน้าตัดของแผ่นประกบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	34
รูป 3-9 การพังของผนังประกบแบบต่างๆ :(A) face/core yielding (B) core shear (C) buckling-face wrinkling (D) debonding (E) general buckling (F) buckling-shear crimping (G) buckling-face dimpling (H) core indentation core yield .....	36
รูป 3-10 การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM E72 (C. ASTM).....	36
รูป 3-11 Stress-Strain Curve ของ Concrete กับ Steel Reinforcement .....	38
รูป 3-12 Stress-Strain Curve ของโฟม EPS ความหนาแน่น 20 kg/m <sup>3</sup> .....	39
รูป 3-13 Stress-Strain Curve ของ Cement paste, Concrete, และ Aggregate .....	39
รูป 3-14 กำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนความชะลูดของเสา.....	40
รูป 3-15 Interaction diagram ที่แสดงการวิบัติของเสา.....	41
รูป 3-16 เครื่องทดสอบตามมาตรฐาน BS476 part 20, 22 และเฟรมขนาด 3 x 3 m <sup>2</sup> .....	42
รูป 3-17 จุดที่มีการวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน.....	42
รูป 3-18 มาตรฐาน BS476 part 20, 22การควบคุมเวลากับอุณหภูมิภายในเตา .....	43
รูป 3-19 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นประกบที่เป็นฉนวนโฟมก่อนการทดสอบทนไฟ.....	44
รูป 3-20 เครื่อง Heat flow meter (HFM 436) และการทำงานของเครื่อง ตามมาตรฐาน ASTM C518 (Standard).....	45
รูป 3-21 ค่า STC ต่างๆ .....	47
รูป 3-22 กราฟค่า TL ของผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 10 ซม. ....	49
รูป 3-23 ค่า STC ของผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 10 ซม.....	49
รูป 3-24 ห้องที่ใช้ทดสอบความสามารถในการส่งผ่านของเสียงตามมาตรฐาน ASTM E90 (E. ASTM) .....	50

รูป 3-25 ห้องที่ใช้ในการทดสอบจริง .....	50
รูป 3-26 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมก่อนการทดสอบการส่งผ่านของเสียง .....	51
รูป 4-1 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก .....	52
รูป 4-2 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมชนิดไม่มีเหล็ก .....	52
รูป 4-3 การพังด้วยแรงเฉือนของแผ่นฉนวนสำเร็จรูปที่ไม่มีเหล็ก .....	53
รูป 4-4 กราฟ Load Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 และ 15 ซม. .....	54
รูป 4-5 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาดความหนา 10 ซม. และ 15 ซม.....	56
รูป 4-6 การพังแบบ general buckling ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก .....	57
รูป 4-7 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. ....	58
รูป 4-8 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. ....	58
รูป 4-9 กราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม... ..	59
รูป 4-10 กราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. ..	59
รูป 4-11 กราฟเปรียบเทียบ Load-Deflection ระหว่างแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก ขนาด 10 กับ 15 ซม.....	60
รูป 4-12 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก.....	63
รูป 4-13 การพังของในรูปแบบการรับแรงเฉือนของโฟม .....	64
รูป 4-14 การพังของเหล็กจากการบิดงอเสียรูป.....	64
รูป 4-15 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	65
รูป 4-16 กราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กและไม่มีเหล็ก....	65
รูป 4-17 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก.....	66
รูป 4-18 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	67
รูป 4-19 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	68

รูป 4-20 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก.....	68
รูป 4-21 กราฟเปรียบเทียบ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม. ....	69
รูป 4-22 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงกดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม .....	69
รูป 4-23 การเปรียบเทียบ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กและไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. ....	70
รูป 4-24 ผลการทดสอบการทนไฟของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม .....	71
รูป 4-25 การควบคุมอุณหภูมิของไฟภายในเตาเผาและอุณหภูมิของชิ้นงาน .....	71
รูป 4-26 เวลาที่เกิดรอยร้าวต่างๆ.....	72
รูป 4-27 ด้านที่ไม่โดนไฟหลังการทดสอบ (ซ้าย) ด้านที่โดนไฟหลังการทดสอบ (ขวา) .....	72
รูป 4-28 ค่า Transmission Loss ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาดความหนา 10 ซม. ....	74
รูป 4-29 ค่า Transmission Loss ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาดความหนา 15 ซม. ....	75
รูป 4-30 การเปรียบเทียบค่า Transmission Loss ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 10 และ 15 ซม. ....	75



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2-1 การเพิ่มกำลังรับแรงดัดและค่าสติเฟนสการดัดเมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นประกอบ ดัดแปลงมาจาก (Vinson, 1999) .....	14
ตาราง 2-2 คุณสมบัติวัสดุผิวหน้าที่เป็นหลัก (Allen, 2013) .....	14
ตาราง 2-3 คุณสมบัติวัสดุผิวหน้าที่ไม่ใช่หลัก (Zenkert, 1995) .....	15
ตาราง 2-4 ค่าคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์ที่ความหนาแน่นต่างๆ .....	17
ตาราง 2-5 ข้อมูลแผ่นซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก.....	17
ตาราง 2-6 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณสมบัติของโฟมแต่ละประเภท ดัดแปลงจาก (Davies, 2008) .....	23
ตาราง 2-7 ข้อมูลโฟม EPS ในประเทศไทย.....	24
ตาราง 2-8 ข้อมูลคุณสมบัติเหล็ก Steel Structural A36 .....	24
ตาราง 2-9 ข้อมูลขนาดและรูปร่างของเหล็กที่นำมาใช้.....	25
ตาราง 2-10 คุณสมบัติของผนังอิฐมวลเบา .....	26
ตาราง 2-11 คุณสมบัติของผนังอิฐมวลเบา.....	26
ตาราง 2-12 คุณสมบัติของผนังอัดแรงชนิดกลาง .....	27
ตาราง 2-13 คุณสมบัติของแผ่นประกอบที่แกนกลางเป็นเม็ดโฟมผสมคอนกรีต .....	27
ตาราง 3-1 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.ที่นำมาทดสอบกำลัง รับแรงเฉือน.....	31
ตาราง 3-2 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม.ที่นำมาทดสอบกำลัง รับแรงเฉือน.....	32
ตาราง 3-3 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือน ..	32
ตาราง 3-4 โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทดสอบ.....	33
ตาราง 3-5 ค่าการแปลงหน้าตัด Transformation Factor (n).....	33

ตาราง 3-6 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.ที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	37
ตาราง 3-7 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม.ที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด .....	37
ตาราง 3-8 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม.ที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	37
ตาราง 3-9 ขนาดของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบค่าความเป็นฉนวน.....	46
ตาราง 3-10 ค่า TL ของผนังก่ออิฐฉาบปูน ความหนารวม 10 ซม. ....	48
ตาราง 4-1 แรกกดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. ....	53
ตาราง 4-2 แรกกดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. ....	53
ตาราง 4-3 ค่า Calculate Shear Strength ที่ได้จากการคำนวณของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. ....	55
ตาราง 4-4 ค่า Calculate Shear Strength ที่ได้จากการคำนวณของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. ....	55
ตาราง 4-5 แรงอัดและกำลังรับแรงอัดสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. ....	57
ตาราง 4-6 แรงอัดและกำลังรับแรงอัดสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. ....	57
ตาราง 4-7 ค่ากำลังรับแรงอัดของเสาสั้น และเสายาวที่ค่า k 0.5 และ 1 ขนาด 10 และ 15 ซม.....	61
ตาราง 4-8 ค่ากำลังรับแรงอัดของการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก เสาสั้น และเสายาวที่ค่า k 0.5 และ 1 ขนาด 10 และ 15 ซม.....	61
ตาราง 4-9 แรกกดสูงสุดที่โฟมและเหล็กรับได้และแรงเฉือนสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	64

ตาราง 4-10 ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการคำนวณของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	66
ตาราง 4-11 แรงกดและกำลังรับแรงอัดสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก .....	67
ตาราง 4-12 ค่ากำลังรับแรงอัดของการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กกับมี เหล็ก เสาสั้น และเสายาวที่ค่า $k$ 0.5 และ 1 .....	70
ตาราง 4-13 ค่าการนำความร้อน (K) และ ฉนวนความร้อน (R) .....	73
ตาราง 4-14 ค่าการนำความร้อนของตัวกลางชนิดต่างๆ.....	73
ตาราง 5-1 คุณสมบัติของผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม.....	77
ตาราง 5-2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม.กับผนัง ชนิดอื่นๆ .....	78



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสร้างสิ่งปลูกสร้างของประเทศไทยในสมัยก่อน นิยมสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) หรือคอนกรีตหล่อในที่ เพราะมีความแข็งแรง ทนทาน ใช้งานทั่วไป ง่ายต่อการออกแบบ แต่มักใช้เวลาในการสร้างค่อนข้างนาน อีกทั้งยังสร้างมลภาวะทางอากาศและเสียง

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างพัฒนาไปมาก มีการนำวิธีการก่อสร้างแบบใหม่ๆเข้ามา เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการสร้างสิ่งปลูกสร้างให้เหมาะสมกับสถานที่และการใช้งานของสิ่งปลูกสร้างนั้นๆ เช่นระบบการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จ

การก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จ (Precast Construction) เป็นวิธีการก่อสร้างแบบใหม่ที่คิดค้นขึ้นมา เพื่อเป็นทางเลือกในการก่อสร้าง ลดปริมาณขยะ ช่วยลดมลภาวะทางอากาศและเสียง ก่อสร้างง่ายและรวดเร็ว มีวัสดุให้เลือกใช้ก่อสร้างหลายชนิด ซึ่งในการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จ ผนังเป็นส่วนสำคัญที่จะเป็นตัวเลือกในการก่อสร้างประเภทนี้ เนื่องจากมีผนังสำเร็จให้เลือกใช้ในการก่อสร้างมากมายขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการใช้งาน

ผนังสำเร็จ (Precast Wall) ที่ใช้ในการก่อสร้างในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด และถูกพัฒนาเพื่อจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น เพื่อความเร็วในการก่อสร้าง เพื่อป้องกันความร้อนช่วยให้บ้านเย็น ประหยัดพลังงาน เพื่อป้องกันอุบัติเหตุทางอัคคีภัย เพื่อความแข็งแรง หรือเพื่อป้องกันเสียงรบกวน เป็นต้น หรือบางครั้งอาจมีจุดประสงค์ในการก่อสร้างหลายจุดประสงค์ในสิ่งปลูกสร้างเดียว เช่น ต้องการบ้านที่ประหยัดพลังงานป้องกันความร้อน มีความแข็งแรง ก่อสร้างง่ายและรวดเร็ว กันเสียงรบกวนได้

ซึ่งผู้จัดทำได้ศึกษาวัสดุชนิดหนึ่งที่นำมาทำเป็นผนังสำเร็จ เป็นวัสดุคอมโพสิต (Composite Material) คือโฟมพอลิสไตรีนชนิดขยายตัว (Expanded Polystyrene foam : EPS foam) นำมาเป็นแผ่นประกอบเรียกว่า แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมโพลิสไตรีน (Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels) มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน น้ำหนักเบา และจากการศึกษาพบว่าในประเทศไทยมีการศึกษาวัสดุประเภทนี้มาบ้างแต่ไม่มากนัก จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม (Expanded Polystyrene Foam Composite Structural Insulated Panels) ประกอบจากแผ่นซีเมนต์ประกบกับโฟมโพลิสไตรีน (EPS Foam : Expanded polystyrene Foam) ที่มีข้อดีคือมีความแข็งแรง มีความแข็งแรงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก (Strength to

Weight Ratio) เป็นฉนวนกันความร้อน ก่อสร้างง่ายและรวดเร็ว ง่ายต่อการซ่อมแซมกรณีที่เกิดความเสียหาย

นอกจากนี้ผู้จัดทำได้นำแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมมาทำการทดสอบเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมโดยการนำเหล็กกรีดเย้นรูปตัว C (Ribbed C-Channel) เสริมที่ขอบของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมทั้ง 4 ด้านหลังจากนั้นนำแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กไปทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง และคุณสมบัติอื่นๆ ดังนี้ กำลังรับแรงเฉือน กำลังรับแรงอัด คุณสมบัติการทนไฟ คุณสมบัติการนำความร้อน คุณสมบัติการส่งผ่านของเสียง แล้วนำคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของผนังอื่นๆที่มีในท้องตลาด

ผลการทดสอบด้านกำลังทำให้ทราบได้ว่าผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กมีกำลังรับแรงเฉือนและแรงอัดมากกว่าแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก และจากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กกับผนังอื่นๆที่มีในท้องตลาดทำให้ทราบว่าแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กมีคุณสมบัติการนำความร้อนและการส่งผ่านความร้อนที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถนำแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กมาใช้เป็นผนังทางเลือกที่มีความต้องการความเป็นฉนวนสูงได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 พัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมโดยการเสริมเหล็กกรีดเย้นรอบด้านแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม
- 1.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม
- 1.2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก กับผนังชนิดอื่นๆที่ใช้ในประเทศไทย

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 โฟม EPS ความหนาแน่น  $1.25 \text{ lb/ft}^3$  หรือ  $20 \text{ kg/m}^3$  คือวัสดุที่นำมาใช้เป็นแกนกลางของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม
- 1.3.2 แผ่นซีเมนต์หนา 6 mm คือวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุผิวหน้าของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม
- 1.3.3 เหล็กกรีดเย็นที่นำมาประกอบกับแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กเพื่อพัฒนาคุณสมบัติเป็นเหล็กรูปตัวซีขนาด 75X41X10
- 1.3.4 คุณสมบัติที่ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผนังชนิดอื่น
- |                             |             |           |
|-----------------------------|-------------|-----------|
| กำลังรับแรงเฉือน            | ด้วยมาตรฐาน | ASTM C393 |
| กำลังรับแรงอัด              | ด้วยมาตรฐาน | ASTM E72  |
| คุณสมบัติการทนไฟ            | ด้วยมาตรฐาน | BS 476    |
| คุณสมบัติการนำความร้อน      | ด้วยมาตรฐาน | ASTM C518 |
| คุณสมบัติการส่งผ่านของเสียง | ด้วยมาตรฐาน | ASTM E90  |

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 นำแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กไปใช้เป็นผนังทางเลือกในการก่อสร้างตามจุดประสงค์ที่ต้องการได้
- 1.4.2 สามารถนำข้อมูลคุณสมบัติที่ทดสอบไปช่วยในการออกแบบในอนาคตได้
- 1.4.3 เป็นแนวทางการทดสอบแผ่นประกอบเพื่อใช้ในการหาคุณสมบัติต่างๆ

## 1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม แผ่นประกอบ และส่วนประกอบของแผ่นประกอบแต่ละชนิด
- 1.5.2 ศึกษาข้อมูลคุณสมบัติต่างๆของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และวิธีการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย
- 1.5.3 ศึกษามาตรฐานที่นำมาใช้ในการทดสอบผนัง และแผ่นประกอบชนิดต่างๆ
- 1.5.4 กำหนดขอบเขตของงานวิจัย วิธีการทดลอง
- 1.5.5 เตรียมอุปกรณ์และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- 1.5.6 ทำการทดลองตัวอย่างที่เตรียมมา
- 1.5.7 สรุปผลการทดลอง



## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ส่วนนำ

จากการศึกษาข้อมูลมีการศึกษาคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมชนิดนี้มาแล้วพอสมควร แต่มีการทดสอบบางอย่างที่ยังไม่ได้ทำการทดสอบ และผู้จัดทำสามารถพัฒนาคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการรับแรงกด และแรงเฉือน

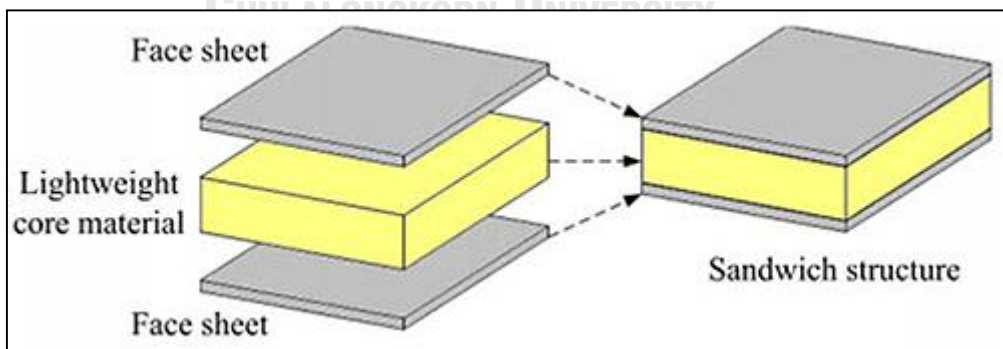
ในบทนี้จะอธิบายและขยายความเกี่ยวกับแผ่นประกอบ วัสดุที่ใช้ทำแผ่นประกอบและวัสดุแกนกลาง ค่าคุณสมบัติต่างๆของวัสดุผิวหน้าและวัสดุแกนกลาง อธิบายเกี่ยวกับผนังรับแรงประเภทอื่นๆ และค่าคุณสมบัติต่างๆของผนังรับแรงประเภทอื่นๆ ที่มีใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปในประเทศไทยในปัจจุบัน

#### 2.2 แผ่นประกอบ

แผ่นประกอบ (Sandwich Panels หรือ Sandwich structure) คือโครงสร้างที่ประกอบจากวัสดุที่นำมาประกบกันสองชนิดขึ้นไป โดยมีส่วนที่เป็นแกนกลาง (Core) และวัสดุผิวหน้า (Facing Sheets หรือ Skins) สองแผ่นดัง

รูป 2-1

โดยส่วนใหญ่แล้วแกนกลางจะทำมาจากวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำแต่จะมีความแข็งแรง และค่อนข้างหนา ส่วนวัสดุผิวหน้าจะมีลักษณะบางทำมาจากวัสดุที่มีความแข็งแรงและแข็งแรง นิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในงานก่อสร้างที่ต้องการทั้งความแข็งแรงแต่น้ำหนักเบา นอกจากนั้นแล้วส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของแผ่นประกอบคือกาวที่ใช้ยึดวัสดุแกนกลางกับวัสดุผิวหน้าเข้าด้วยกัน ซึ่งช่วยให้แผ่นประกอบสามารถคงรูปอยู่ได้



รูป 2-1 ส่วนประกอบของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม

วัสดุที่ใช้ทำแผ่นประกอบมีหลากหลายประเภททั้งแกนกลางและวัสดุผิวหน้า เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยวัสดุแกนกลางจะเป็นโครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycomb) หรืออาจจะเป็นวัสดุที่มาจากความแข็งก็ได้

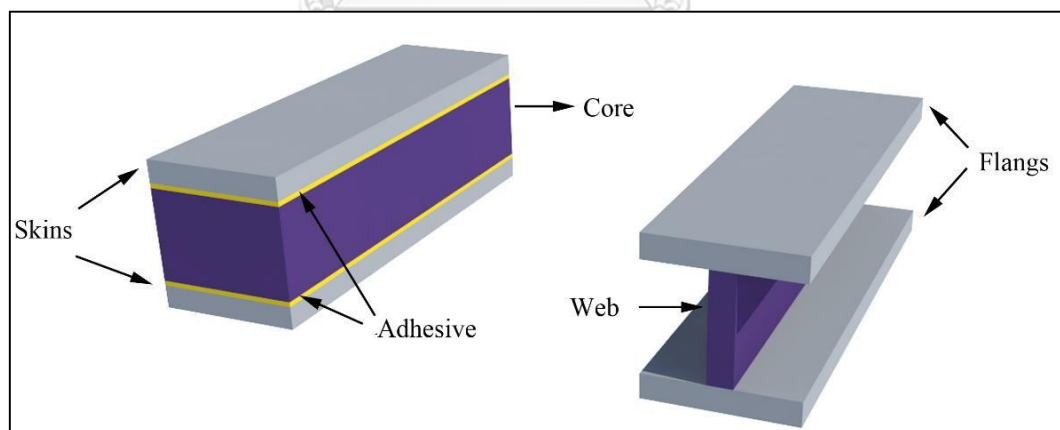


โครงสร้างของแผ่นประกอบมีสองแบบคือแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตร โดยในแผ่นประกอบแบบสมมาตรจะมีความหนาของแผ่นวัสดุผิวหน้าเท่ากัน ในทางตรงข้าม แบบไม่สมมาตรจะมีวัสดุผิวหน้าขนาดไม่เท่ากัน เนื่องจากการออกแบบให้เหมาะสมกับพฤติกรรมการรับแรงและปัจจัยจากสภาพแวดล้อม เช่นการ เพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันเสียง เป็นต้น

### 2.3 พฤติกรรมของแผ่นประกอบ

แนวคิดหลักของแผ่นประกอบสามารถอธิบายได้คือ กำลังรับแรงดัดจะถูกกำหนดไปบนวัสดุผิวหน้าและกำลังรับแรงเฉือนจะถ่ายโอนผ่านวัสดุแกนกลางของแผ่นประกอบ (D'Alessandro, Petrone, Franco, & De Rosa, 2013) นอกจากนี้วัสดุแกนกลางจะต้องทำให้วัสดุผิวหน้าคงรูปได้โดยไม่ทำให้วัสดุผิวหน้าโก่งงอหรือยุบ ทั้งนี้การใช้ในการยึดวัสดุผิวหน้ากับแกนกลางของแผ่นประกอบจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะทนต่อกำลังรับแรงเฉือนและแรงดัดได้

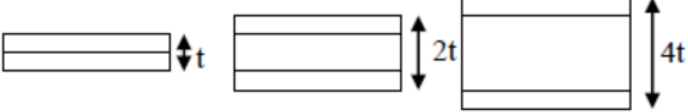
โครงสร้างของแผ่นประกอบจะทำหน้าที่คล้ายกับคานารูปตัวไอ (I-Beam) ดังรูป 2-2 ที่ประกอบด้วยก้าน (web) และปีก (Flanges) (Zenkert, 1995) ปีกจะรับกำลังรับแรงดัดและแรงอัดได้ดี ส่วนก้านของคานาจะรับแรงเฉือนเป็นส่วนใหญ่ (Davies, 2008) โครงสร้างของแผ่นประกอบจะแตกต่างกับคานารูปตัวไอ ในกรณีที่แผ่นวัสดุประกบทั้งสองด้านมีขนาดไม่เท่ากันหรือแตกต่างกัน หรือที่เรียกว่าแบบไม่สมมาตร นอกจากนี้แกนกลางของแผ่นประกอบยังช่วยให้วัสดุผิวหน้าคงรูปได้อีกด้วย



รูป 2-2 เปรียบเทียบแผ่นประกอบกับคานารูปตัวไอ (Abdolpour, 2017)

ข้อดีอีกประการหนึ่งของแผ่นประกอบคือการเพิ่มกำลังรับแรงดัด (Bending Strength) และค่าสติฟเนสการดัด (Bending Stiffness) เมื่อเทียบกับวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันโดยไม่เพิ่มน้ำหนักด้วยการเพิ่มขนาดความหนาของแกนกลางของแผ่นประกอบดังค่าที่แสดงในตาราง 2-1

ตาราง 2-1 การเพิ่มกำลังรับแรงดัดและค่าสตีฟเนสการดัดเมื่อเพิ่มความหนาของแผ่นประกอบ  
ดัดแปลงมาจาก (Vinson, 1999)



Relative bending stiffness	1	7	39
Relative bending strength	1	3.5	9.2
Relative weight	1	1.03	1.06

อีกทั้งยังมีความแข็งแรงสูง มีความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (Strength per Weight Ratio) เป็น  
ฉนวนกันความร้อน ก่อสร้างง่ายและรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการช่วยยก และง่ายต่อ  
การซ่อมแซมกรณีที่เกิดความเสียหาย (Davies, 2008; Vinson, 1999; Zenkert, 1995)

## 2.4 วัสดุผิวหน้า

วัสดุผิวหน้า (Facing Sheets หรือ Skins) ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายของวัสดุแกนกลาง  
จากความเสียหายจากปัจจัยภายนอก อีกทั้งยังช่วยในการรับแรงดัด โดยวัสดุที่นำมาใช้ส่วนใหญ่จะ  
เป็นวัสดุที่รับแรงกดและแรงดึงได้ดี มีความแข็งแรง สามารถรับแรงกระแทกได้ นิยมใช้วัสดุ  
หลากหลายประเภทขึ้นอยู่กับการใช้งาน

วัสดุผิวหน้าสามารถจำแนกได้สองประเภทหลักๆคือ วัสดุผิวหน้าที่เป็นเหล็กและวัสดุที่ไม่ใช่  
เหล็ก (Zenkert, 1995) ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุผิวหน้าจะมีแสดงไว้ในตาราง 2-2 และตาราง 2-3

### 2.4.1 วัสดุผิวหน้าที่เป็นเหล็ก

นิยมใช้ในโครงสร้างอาคารประเภทโรงงานอุตสาหกรรม โกดัง ห้องเย็น ห้างสรรพสินค้า  
ส่วนมากจะเป็นอลูมิเนียม เหล็กเคลือบสี สแตนเลส เนื่องจากน้ำหนักเบาต่อการผลิตและ  
ประกอบ แต่มีข้อด้อยคือ เพราะมีขนาดบางทำให้ยุบตัวง่าย ไม่เหมาะกับโครงสร้างอาคารประเภท  
บ้าน เนื่องจากการนำความร้อน

ตาราง 2-2 คุณสมบัติวัสดุผิวหน้าที่เป็นเหล็ก (Allen, 2013)

Metallic material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E$ (GPa)	$\sigma_T$ (MPa)
Aluminum (2024-T3)	2800	73	414
Steel (AISI 1025)	7800	207	394
Titanium	4400	108	550

$\rho$  = density,  $E$  = Young's modulus,  $\sigma_T$  = Ultimate tensile strength

#### 2.4.2 วัสดุผิวหน้าที่ไม่ใช่เหล็ก

มีหลากหลายมากกว่าวัสดุที่เป็นเหล็ก เช่น แผ่นไม้อัด แผ่นยิปซัม แผ่นซีเมนต์ ทั้งนี้ในปัจจุบันเทคโนโลยีต่างๆพัฒนาไปมากทำให้มีวัสดุใหม่ๆเพิ่มเข้ามามากขึ้น เช่น คาร์บอน กระจก เคฟลา(Kevlar) นอแมก(Nomex) เป็นต้น ซึ่งมีการใช้งานหลากหลาย ขึ้นกับจุดประสงค์ของการใช้งาน ทั้งอุตสาหกรรมการขนถ่าย ทางทะเล การขนส่ง การบินและอวกาศ แต่วัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างอากาศยานมี 3 ชนิด คือ แผ่นไม้อัด แผ่นยิปซัม และแผ่นซีเมนต์ ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกัน

ตาราง 2-3 คุณสมบัติวัสดุผิวหน้าที่ไม่ใช่เหล็ก (Zenkert, 1995)

Non-Metallic Material		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E$ (GPa)	$\sigma_T$ (MPa)
Wood	Pine	520	12	47.7
	Plywood	580	12.4	21
Unidirectional Fibre Composite ( $v_f \approx 0.6-0.7$ )	Carbon/Epoxy	1600	180/10	1500/40
	Glass/Epoxy	1800	39/8	1060/30
Bi-directional Fibre Composite ( $v_f \approx 0.3-0.4$ )	Kevlar/Epoxy	1300	76/6	1400/12
	Kevlar/Polyester	1300	17.5	375
Random Fibres ( $v_f \approx 0.15-0.25$ )	Glass weave/ Polyester	1700	16	250
	Glass WR (woven roving)/Polyester	1600	12	215
	Glass CSM (chopped strand mat)	1500	6.5	85
	SMC (sheet moulding compound)	1800	9	60

$\rho$  = density,  $E$  = Young's modulus,

$\sigma_T$  = Ultimate tensile strength  $v_f$ : fiber volume fraction

#### 2.4.3 แผ่นไม้อัด (Wood board)

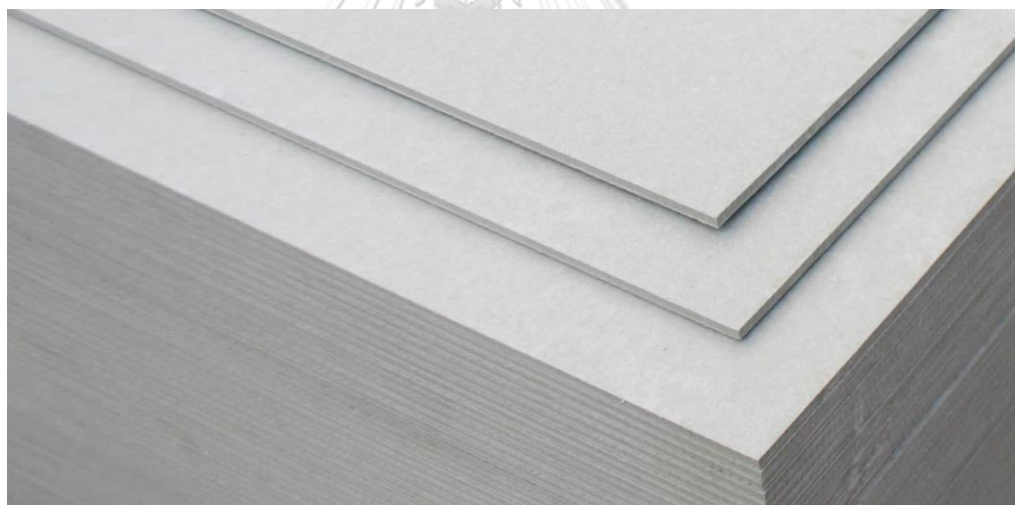
เป็นวัสดุจากธรรมชาติที่นิยมใช้กันมานานหลาย 10 ปี ทำจากไม้แผ่นบาง ปอกออกมาแล้วนำมาอัดกันหลายๆชั้นด้วยกาว การวางอย่างไม่มีระเบียบจะช่วยให้ไม่มีความแข็งแรงรับแรงได้ดี อีกทั้งลดการขยายตัวหรือหดตัวของไม้ได้ ข้อเสียของไม้อัดคือ สามารถติดไฟได้ ไม่ทนทานต่อสภาพอากาศ มีการหดตัวและขยายตัวเมื่อโดนน้ำ เป็นผลทำให้บวมและเน่าเปื่อยได้ ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างในประเทศไทยจึงไม่นิยมเนื่องจากประเทศไทยมีสภาพอากาศแบบร้อนชื้น



รูป 2-3 แผ่นไม้อัดชนิด osb

#### 2.4.4 แผ่นยิปซัม (Gypsum Board)

ผลิตโดยการนำยิปซัมมาอัดแล้วประกบด้วยกระดาษบางชนิดสามารถทนความชื้น ทนไฟได้ มีจุดเด่นคือ น้ำหนักเบาทำให้ติดตั้งง่าย สามารถกันเสียงได้ดี ค่าความสามารถในการต้านทานความร้อนสูง อีกทั้งผงยิปซัมไม่ติดไฟจึงทำให้ทนไฟได้ดี นิยมนำมาก่อสร้างเป็นบ้านพักอาศัย แต่ข้อเสียของแผ่นยิปซัมคือไม่สามารถรับแรงได้เนื่องจากผลิตมาจากวัสดุที่เปราะ และไม่เหมาะสมกับสภาพอากาศเปียกชื้น อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ



รูป 2-4 แผ่นซีเมนต์

#### 2.4.5 แผ่นซีเมนต์ (Cement Board)

มีหลากหลายความหนา หลายความหนาแน่น มีความเหนียว แข็งแรง และยืดหยุ่น มีคุณสมบัติการต้านทานความร้อน ทนทานต่อสภาพอากาศ ราคาไม่สูงมาก นิยมนำมาก่อสร้างเป็นบ้านพักอาศัย ผู้จัดทำเห็นว่าแผ่นซีเมนต์เป็นแผ่นที่หาง่าย มีคุณสมบัติหลากหลายจึงเลือกนำซีเมนต์บอร์ดมาศึกษาเป็นแผ่นประกอบ และได้ศึกษาข้อมูลคุณสมบัติต่างๆเพิ่มเติมดังตาราง 2-4

ตาราง 2-4 ค่าคุณสมบัติของแผ่นซีเมนต์ที่ความหนาแน่นต่างๆ

รายละเอียด	หน่วย	ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์		
		สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ความหนาแน่น	กก/ลบ.ม.	1584	1440	1104
ความหนาที่ทดสอบ	ซ.ม.	6	6	6
ปริมาณการดูดซึมน้ำ	%	9-15	24	48
ค่าการนำความร้อน	วัตต์/ม. เคลวิน	0.25	0.25	0.25
ความต้านทานแรงอัด	นิวตัน/ตร.มม.	39.99	37.92	N/A
ความต้านทานแรงดึง	นิวตัน/ตร.มม.	14.48	12.76	4.00
ความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิว	นิวตัน/ตร.มม.	7.58	6.89	2.96
โมดูลัสยืดหยุ่น	นิวตัน/ตร.มม.	13790	6895	3999

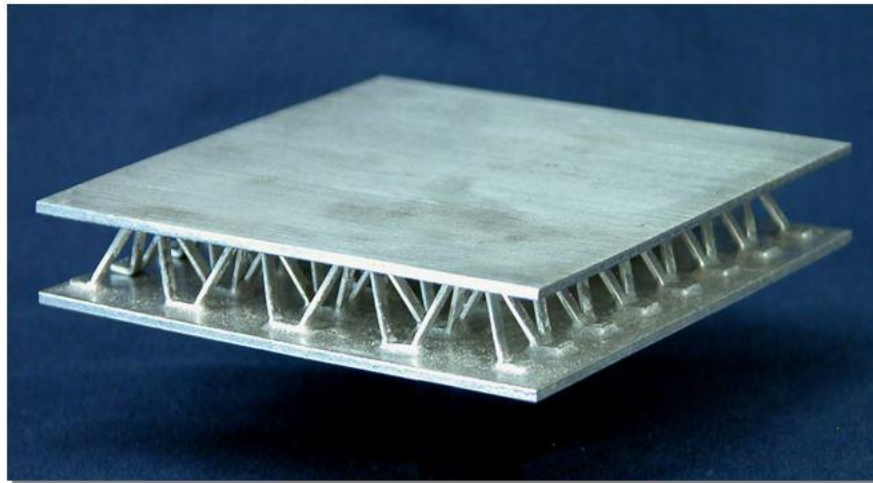
เนื่องจากในประเทศไทยมีมาตรฐานอุตสาหกรรม เรียกว่า มอก. จากการศึกษาข้อมูลจากมาตรฐานดังกล่าวเพื่อให้สอดคล้องกับการประกอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมที่สุด จึงใช้ข้อมูลดังตาราง 2-5 เพื่อศึกษา คำนวณ และวิเคราะห์ผล

ตาราง 2-5 ข้อมูลแผ่นซีเมนต์ตามมาตรฐาน มอก.

ข้อมูลจำเพาะ	หน่วย	มาตรฐาน มอก. 878-2537
ความหนาแน่น	kg/m <sup>3</sup>	1100-1300
โมดูลัสยืดหยุ่น	N/mm <sup>2</sup>	>3000
ความต้านทานแรงดัด	N/mm <sup>2</sup>	>9.0
ความต้านทานแรงดึง	N/mm <sup>2</sup>	>0.5

## 2.5 แกนกลางของแผ่นประกอบ

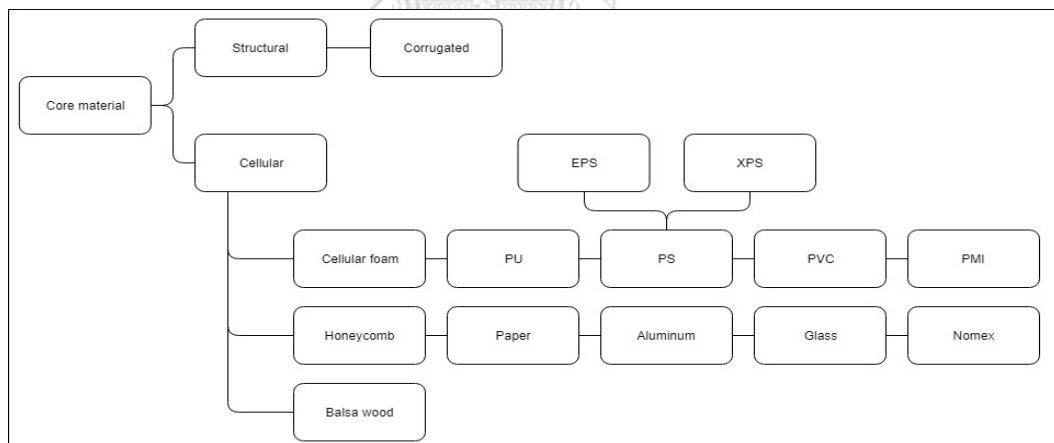
แกนกลาง (Core) ของแผ่นประกอบเป็นส่วนประกอบหลักของแผ่นประกอบที่มีความสำคัญในการพิจารณาออกแบบโครงสร้าง เนื่องจากเป็นส่วนหลักในการรับแรงเฉือน เป็นส่วนที่ช่วยกำหนดระยะห่างของวัสดุผิวหน้า และต้องมีความแข็งแรงมากพอที่จะทำให้วัสดุผิวหน้าสามารถคงรูปอยู่ได้ ซึ่งการลดความหนาแกนกลางจะทำให้กำลังรับแรงดัดของโครงสร้างลดลง (Zenkert, 1995) และเพื่อเป็นการลดน้ำหนักของโครงสร้างแผ่นประกอบ วัสดุแกนกลางจึงควรจะเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ



รูป 2-5 แกนกลางแบบลอนลูกฟูกที่เป็นตาข่าย คล้ายใยแมงมุม

แกนกลางของแผ่นประกอบจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือแบบโครงสร้าง (Structural) กับแบบที่เป็นเซลล์ (Cellular) แบบที่เป็นโครงสร้างแกนกลางเป็นลอนลูกฟูก (Corrugated) ส่วนวัสดุผิวหน้าจะทำมาจากวัสดุแข็ง

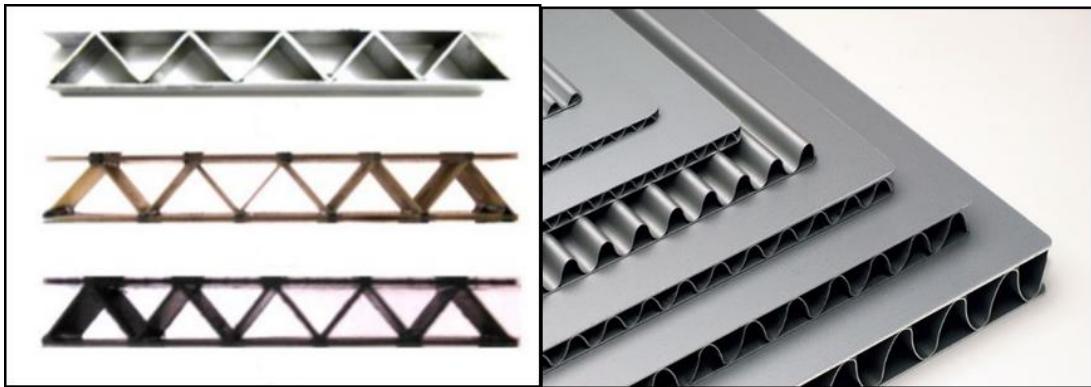
แบบที่เป็นเซลล์ (Cellular) วัสดุแกนกลางจะมีหลากหลายรูปแบบทั้งแบบ ที่เป็นไม้บัลซา (Balsa wood) โครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycomb) และโครงสร้างโฟม (Cellular foam) ส่วนสำคัญช่องว่างด้านในเพื่อให้มีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติเป็นฉนวน



รูป 2-6 วัสดุแกนกลางจำแนกตามประเภทและชนิด ดัดแปลงมาจาก(Abdolpour, 2017)

### 2.5.1 แกนกลางของแผ่นประกอบแบบโครงสร้าง (Structural core)

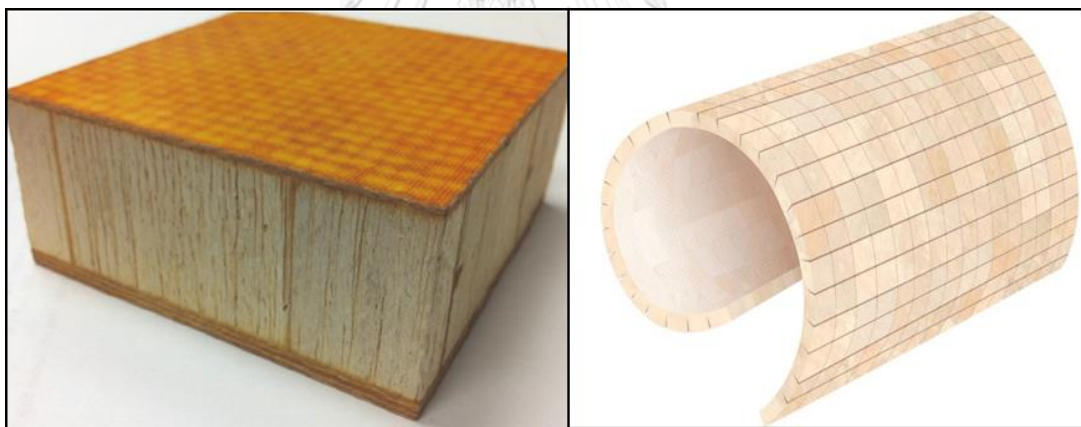
แกนกลางที่เป็นลอนลูกฟูก (Corrugated core) เป็นแกนกลางที่ทำจากแผ่นวัสดุแข็งเช่น เหล็ก ไม้อัด พลาสติก เป็นต้น วางทับด้วยวัสดุผิวหน้าในแบบต่างๆ ดังรูป 2-7 ทั้งนี้แกนกลางแบบลอนลูกฟูกบางชนิดอาจทำให้เป็นโครงสร้างแบบตาข่ายเพื่อลดน้ำหนักของแผ่นประกอบให้เบาลงดังรูป 2-5



รูป 2-7 ซ้ายแผ่นประกอบที่มีแกนกลางเป็นลอนลูกฟูกทรงสามเหลี่ยมจากอลูมิเนียม GFRP และ CFRP (Rejab & Cantwell, 2013) ขวาแผ่นประกอบที่แกนกลางเป็นลูกฟูกทรงลอนจากอลูมิเนียม

### 2.5.2 แกนกลางของแผ่นประกอบที่เป็นแบบเซลล์ (Cellular core)

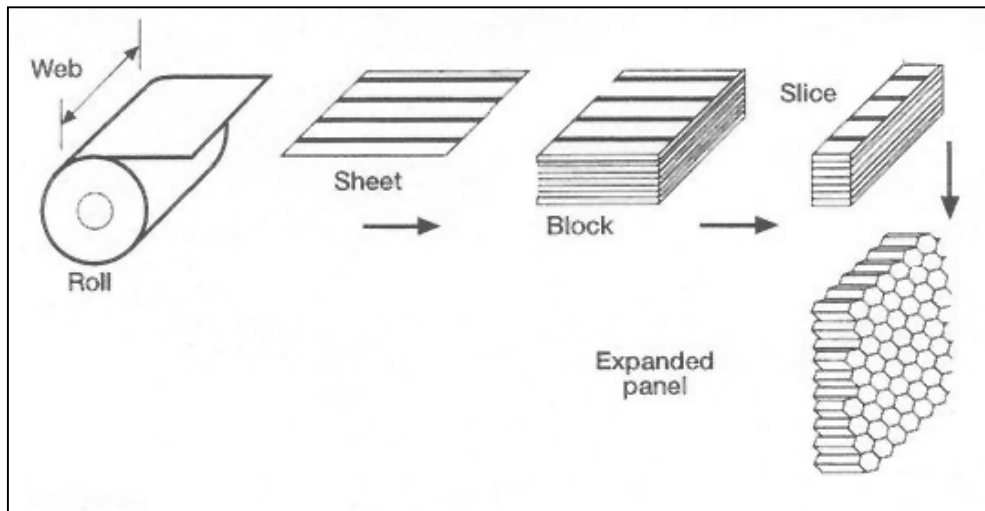
แกนกลางที่เป็นไม้บัลซา (Balsa wood core) เป็นวัสดุที่แกนกลางเป็นไม้บัลซา นิยมใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมทางทะเลเนื่องจากคุณสมบัติและพฤติกรรมของมัน เป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติที่สามารถหาได้ในตลาดทั่วไปเพราะต้นบัลซาเจริญเติบโตเร็วทำให้มีปริมาณมากพอที่จะจัดหา



รูป 2-8 ซ้ายแกนกลางของแผ่นประกอบที่ทำจากไม้บัลซา (Morgan & Toubia, 2014) ขวา

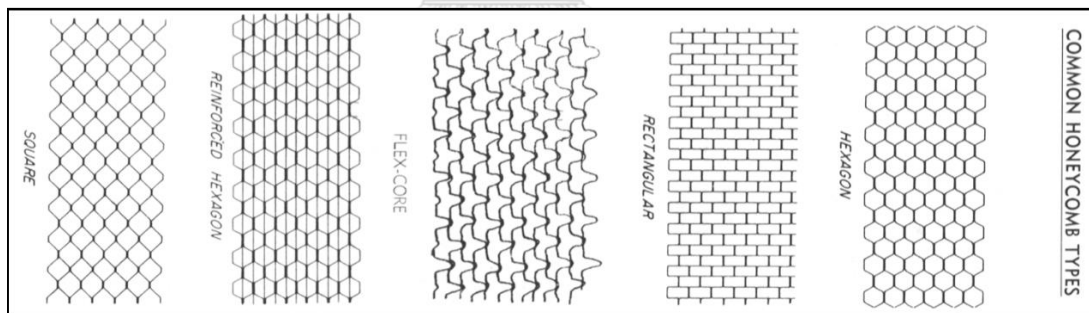
แกนกลางแผ่นประกอบไม้บัลซาที่มีความยืดหยุ่น

ไม้บัลซาเป็นวัสดุที่มีข้อดีหลายอย่างและถูกใช้ในการทำแผ่นประกอบหลายหลายชนิดเนื่องจากราคาถูก มีความแข็งแรงและเบา แต่เพราะเป็นวัสดุทางธรรมชาติทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะเน่าเปื่อยเพราะได้รับผลกระทบจากน้ำ



รูป 2-9 การผลิตแกนกลางที่มีโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

แกนกลางที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb core) เป็นแกนกลางที่นำวัสดุชนิดต่างๆ เช่น กระดาษ อลูมิเนียม แก้ว ไม้อัด คาร์บอน เป็นต้นมาทำเป็นรูปทรงคล้ายรังผึ้ง นิยมใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างแผ่นประกอบ มีข้อดีคือมีน้ำหนักเบามาก รับแรงได้ดีเมื่อเทียบกับน้ำหนักตัวเอง (Strength to weight ratio) สามารถเลือกความหนาและความหนาแน่นได้หลากหลาย แต่เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการผลิต แผ่นประกอบประเภทนี้จึงมีราคาสูง และประเภทที่เป็นอลูมิเนียมอาจเกิดการกัดกร่อนจากสนิมได้



รูป 2-10 รูปทรงต่างๆของแกนรังผึ้ง

แกนกลางที่ทำมาจากโฟม (Foam core) ถูกนำมาใช้เป็นแกนกลางของแผ่นประกอบเพื่อเพิ่มทางเลือก และวัตถุประสงค์ในการใช้งานให้มากขึ้น เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงเทียบกับน้ำหนัก ป้องกันการซึมผ่านน้ำ จึงสามารถใช้งานอุตสาหกรรมทางทะเลได้ โฟมสามารถผลิตได้จากวัสดุหลายประเภทเช่น โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane หรือ PU foam) โฟมพีวีซี (Polyvinyl Chloride หรือ PVC foam) โฟมพีเอ็มเอ (Polymethacrylimide หรือ PMI foam) โฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene หรือ PS foam) ซึ่งวัสดุทั้งหมดจะมีลักษณะสำคัญแตกต่างกันแต่มีจุดสำคัญคือน้ำหนักเบา





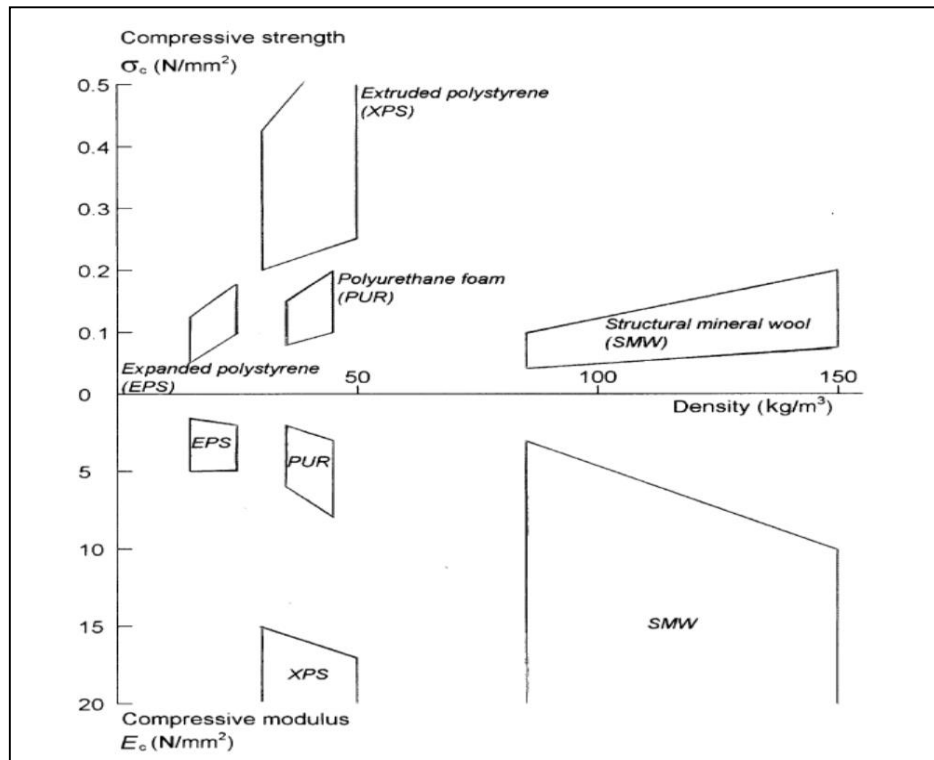
รูป 2-11 แผ่นประกอบที่วัสดุผิวหน้าเป็นไม้อัดและวัสดุแกนกลางเป็นโฟม

โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane หรือ PU foam) มีความยืดหยุ่น ทนทาน เป็นประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมที่เฉพาะเจาะจง มีความต้านทานค่าการส่งผ่านความร้อนสูง (R-value) แต่ค่านี้อาจลดลงเมื่อผ่านไปเป็นเวลาหนึ่งและปล่อยสารที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

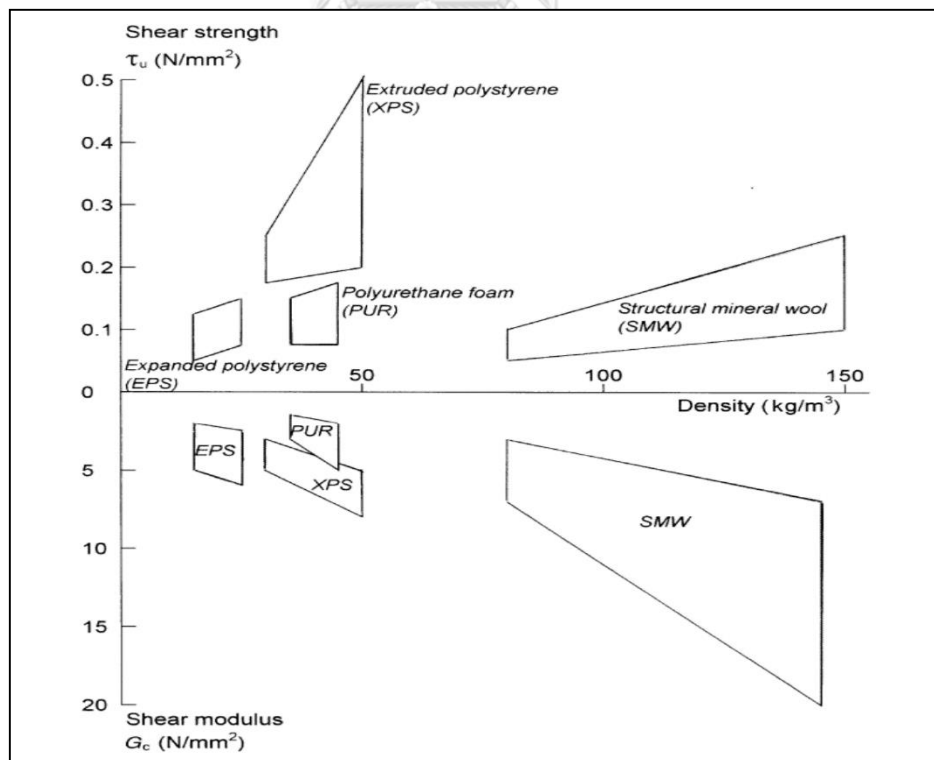
โฟมพีวีซี (Polyvinyl Chloride หรือ PVC foam) เป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้งานหลากหลาย ตั้งแต่ทะเล การบิน การกีฬา และสินค้าอื่นๆ ใช้เป็นส่วนประกอบหลักในโครงสร้างแผ่นประกอบ ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมทางทะเลเพราะผลมาจากการดูดซึมน้ำต่ำ ราคาถูกและคุ้มค่า อายุการใช้งานนาน เป็นฉนวนไฟฟ้า ทนต่อตัวทำลายหลายชนิดทั้งสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และเชื้อเพลิงต่างๆ เป็นวัสดุที่ดับไฟได้เอง และไม่ย่อยสลายทางธรรมชาติ แต่วัสดุชนิดนี้มีข้อเสียคือ ความสามารถในการระบายความร้อนช้า และไวต่อรังสียูวี

โฟมพีเอ็มไอ (Polymethacrylimide หรือ PMI foam) ผลิตจากกรดเมทาคริลิก (Methacrylic acid) และโมโนเมอร์ประเภทเมทาครีโลนไนไตรัล (Methacrylonitrile monomers) การดูดซึมน้ำต่ำ มีสมรรถนะสูง ใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ ดูดซึมน้ำได้ดีกว่าโฟมชนิดอื่น ทนต่ออุณหภูมิสูงถึง 176 องศาเซลเซียส แข็งแรงกว่าโฟมชนิดอื่น เนื่องจากสมรรถนะที่สูงทำให้ราคาแพงมากเทียบกับโฟมชนิดอื่น

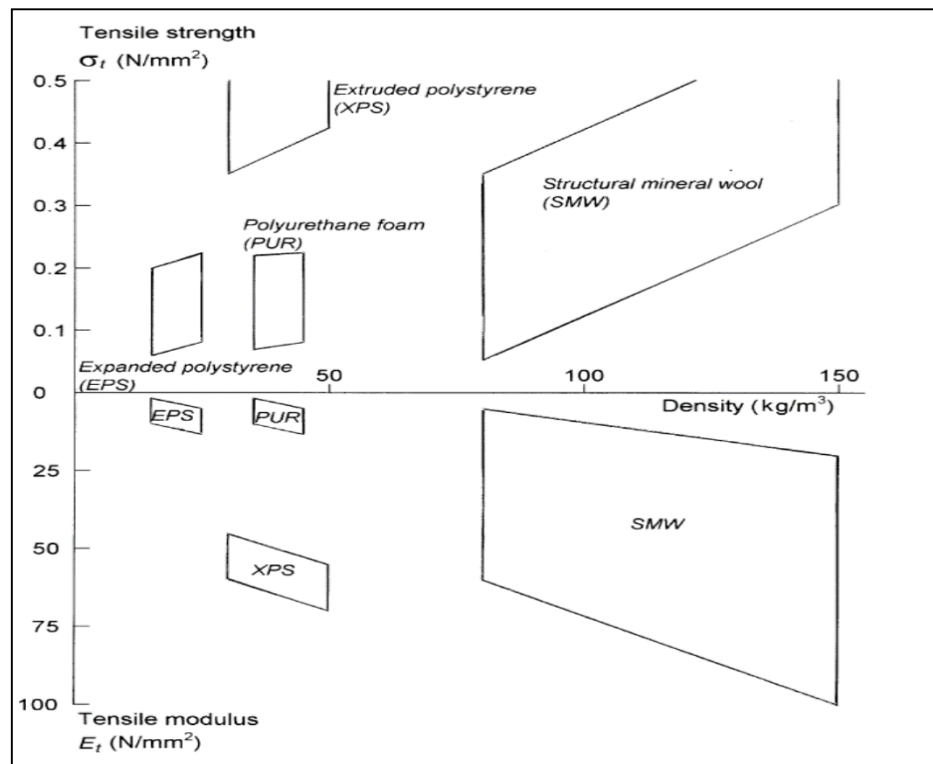
โฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene หรือ PS foam) ราคาถูกเมื่อเทียบกับโฟมชนิดอื่น ทนต่อความชื้น น้ำหนักเบา ใช้งานง่าย ป้องกันการซึมผ่านน้ำได้ดี แบ่งได้เป็นอีก 2 ชนิดคือ Expanded Polystyrene foam (EPS) กับ Extruded polystyrene foam (XPS) โดย XPS จะแข็งแรงกว่าโฟม EPS แต่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า EPS ดับไฟได้ และไวต่อรังสียูวี และเนื่องจากต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศจึงมีราคาสูง



รูป 2-12 ค่ากำลังรับแรงอัดของโฟมชนิดต่างๆเทียบกับความหนาแน่น (Davies, 2008)



รูป 2-13 ค่ากำลังรับแรงดิ่งของโฟมชนิดต่างๆเทียบกับความหนาแน่น (Davies, 2008)



รูป 2-14 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของโฟมชนิดต่างๆเทียบกับความหนาแน่น (Davies, 2008)

โฟมที่นำมาใช้เป็นแผ่นประกอบที่สร้างเป็นสิ่งปลูกสร้าง โดยทั่วไปแล้วจะมี 3 คือ โฟม EPS โฟม PU และโฟม XPS เนื่องจากคุณลักษณะต่างๆ ทั้งคุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในตาราง 2-6 โดยแผ่นประกอบที่ผลิตจากโฟมถูกเรียกว่า แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม ตาราง 2-6 ตัวอย่างการเปรียบเทียบคุณสมบัติของโฟมแต่ละประเภท ดัดแปลงจาก (Davies, 2008)

รายละเอียด	หน่วย	โฟม EPS	โฟม PU	โฟม XPS
ความหนาแน่น	กก/ลบ.ม.	24-29	32	26-29
ปริมาณการดูดซึมน้ำ	% ของน้ำหนัก	< 3	2	<0.3
ค่าการนำความร้อน	วัตต์/ม. เคลวิน	0.033-0.039	0.024-0.028	0.026-0.036
ความต้านทานแรงอัด	นิวตัน/ตร.มม.	0.075-0.175	0.146	0.25
ความต้านทานแรงดึง	นิวตัน/ตร.มม.	0.165-0.360	0.146	0.45
ความต้านทานแรงดัด	นิวตัน/ตร.มม.	0.175-0.350	N/A	N/A
ความต้านทานแรงเฉือน	นิวตัน/ตร.มม.	N/A	0.171	0.25

จากการตรวจสอบข้อมูล โฟม EPS ในประเทศไทยที่นำมาใช้ในการทำแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมภายในงานวิจัยฉบับนี้ ได้ค่าดังที่สรุปในตาราง 2-7

ตาราง 2-7 ข้อมูลโฟม EPS ในประเทศไทย

ข้อมูลจำเพาะ	หน่วย	โฟม EPS
ความหนาแน่น	kg/m <sup>3</sup>	20
มอดูลัสยืดหยุ่น	N/mm <sup>2</sup>	2.5-7
ความต้านทานแรงดัด	N/mm <sup>2</sup>	0.175-0.350
ความต้านทานแรงดึง	N/mm <sup>2</sup>	0.165-0.360
ความต้านทานแรงอัด	N/mm <sup>2</sup>	0.075-0.175
ความต้านทานแรงเฉือน	N/mm <sup>2</sup>	0.07-0.13

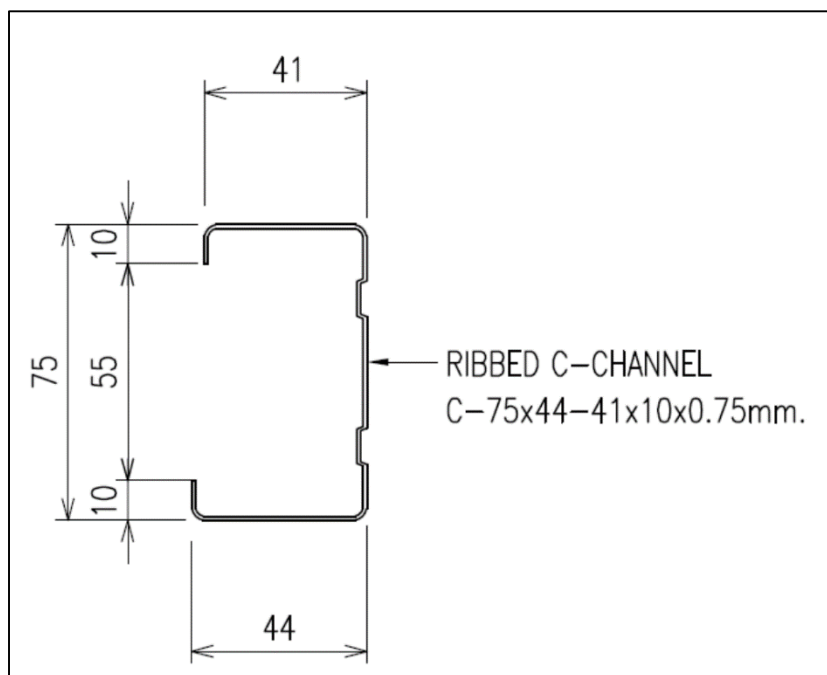
## 2.6 เหล็กกริตเย็น

เหล็กกริตเย็นที่นำมาใช้เพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมผลิตจากวัสดุเหล็กเคลือบอลูซิงค์ ขึ้นรูปเป็นตัว c เรียกว่า Ribbed c channel โดยเหล็กกริตเย็นมีคุณสมบัติดังแสดงในตาราง 2-8 เคลือบด้วยโลหะผสม (Aluminium Zinc Coated Steel) ประกอบด้วยอลูมิเนียม 55% สังกะสี 45% ผลิตโดยกรรมวิธีชุบความร้อนแบบต่อเนื่อง

ตาราง 2-8 ข้อมูลคุณสมบัติเหล็ก Steel Structural A36

ข้อมูลจำเพาะ	หน่วย	เหล็ก A36
ความหนาแน่น	kg/m <sup>3</sup>	7850
มอดูลัสยืดหยุ่น	N/mm <sup>2</sup>	200000
ความต้านทานแรงดัด	N/mm <sup>2</sup>	165
ความต้านทานแรงดึง	N/mm <sup>2</sup>	250
ความต้านทานแรงอัด	N/mm <sup>2</sup>	250
ความต้านทานแรงเฉือน	N/mm <sup>2</sup>	145

อลูมิเนียม มีประสิทธิภาพในการต้านทานการกัดกร่อน ส่วนสังกะสีสามารถป้องกันการเกิดสนิม ทำให้เหล็กเคลือบชนิดนี้มีอายุการใช้งานยาวนานกว่าสังกะสีธรรมดาถึง 4 เท่า มีความทนทานและนำมาผลิตขึ้นรูปแบบลอนต่างๆ ได้ง่ายจึงมีความเหมาะสมกับภูมิภาคร้อนชื้นในประเทศไทย อีกทั้งยังสามารถนำไปเคลือบสีได้ตามความต้องการ โดยขนาดและรูปร่างของเหล็กที่นำมาใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนแสดงในรูป 2-15 และตาราง 2-9



รูป 2-15 ขนาดและรูปร่างของเหล็กที่นำมาใช้ในการประกอบกับแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม  
ตาราง 2-9 ข้อมูลขนาดและรูปร่างของเหล็กที่นำมาใช้

Size	b (mm)	d (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	tw (mm)	Mass (kg/m)	I <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	Z <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> )	Z <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	C <sub>y</sub> (cm)
3"	44	75	1.78	1.00	1.35	17.01	4.61	4.54	3.01	3.70

## 2.7 ผนังสำเร็จประเภทอื่น

จากการศึกษาการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จในประเทศไทยมีการนำผนังแบบต่างๆมาใช้งานหลากหลายชนิด แต่ผนังที่นำมาสร้างเป็นที่พักอาศัยส่วนใหญ่จะมีด้วยกัน 4 ชนิดหลักๆ คือผนังอิฐมอญ ผนังอิฐมวลเบา (Lightweight concrete brick) ผนังคอนกรีตอัดแรงชนิดกลวง (Hollow core concrete panels) และ แผ่นประกอบที่แกนกลางเป็นเม็ดฉนวนโฟมผสมคอนกรีต (EPS aggregate concrete sandwich panel) โดยจากการหาศึกษาของผนังดังกล่าวทำให้ทราบข้อมูลดังต่อไปนี้

### 2.7.1 ผนังอิฐมอญ

อิฐมอญหรืออิฐดินเผาคืออิฐที่ทำจากดินเหนียวผสมกับแกลบหรือวัสดุอื่นผสมน้ำ นวดเคล้าให้เข้าเนื้อเดียวกันแล้วลงในแม่พิมพ์ จากนั้นก็นำมาตัดทำเป็นแผ่น แล้วเอาเข้าเตาเผาจนสุก มีขนาดกว้าง 5.5 เซนติเมตร ยาว 14 เซนติเมตร และหนา 3 เซนติเมตร เป็นอิฐที่ใช้มานาน เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทานมีคุณสมบัติดังตาราง 2-10

ตาราง 2-10 คุณสมบัติของผนังอิฐมวลเบา

คุณสมบัติ	หน่วย	ผนังอิฐมวลเบา
อัตราการทนไฟ (10 cm)	Hr:Min	1:00-2:00
การนำความร้อน (6.5 cm)	W/m.K	1.12-1.14
ค่าฉนวนความร้อน (6.5 cm)	m <sup>2</sup> K/W	0.057-0.058
การส่งผ่านของเสียง (10 cm)	STC	36-38
กำลังรับแรงอัด	MPa	1.96-3.43
กำลังรับแรงเฉือน	MPa	-

### 2.7.2 ผนังอิฐมวลเบา (Lightweight concrete brick)

อิฐมวลเบาผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย ปูนขาว ยิบซั่ม น้ำ และสารกระจายฟองอากาศส่วนผสมพิเศษในอัตราส่วนที่เป็นสูตรเฉพาะตัว การผลิตส่วนใหญ่เป็นการนำเทคโนโลยีและเครื่องจักรที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ คอนกรีตมวลเบาเป็นวัสดุก่อสร้างยุคใหม่ที่เข้ามาใช้แทนอิฐมวลเบา มีน้ำหนักเบา ขนาดก้อนได้มาตรฐานเท่ากันทุกก้อน ทนไฟ ป้องกันความร้อน ป้องกันเสียง ตัดแต่งเข้ารูปง่ายโดยคุณสมบัติของอิฐมวลเบาจะแสดงในตาราง 2-11

ตาราง 2-11 คุณสมบัติของผนังอิฐมวลเบา

คุณสมบัติ	หน่วย	ผนังอิฐมวลเบา
อัตราการทนไฟ (10 cm)	Hr:Min	3:00-4:00
การนำความร้อน (7.5 cm)	W/m.K	0.089-0.144
ค่าฉนวนความร้อน (7.5 cm)	m <sup>2</sup> K/W	0.52-0.84
การส่งผ่านของเสียง (10 cm)	STC	36
กำลังรับแรงอัด	MPa	2.94-4.90
กำลังรับแรงเฉือน	MPa	-

### 2.7.3 ผนังคอนกรีตอัดแรงชนิดกลวง (Hollow core concrete panels)

ผนังอัดแรงชนิดกลวง หรือ Hollow core panel เป็นผนังที่นิยมนำมาใช้แทนผนังก่อภายใน มีคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด ความแข็งแรง และการทนไฟที่ดีดังแสดงในตาราง 2-12 ลักษณะและคุณสมบัติคล้าย precast concrete

ตาราง 2-12 คุณสมบัติของผนังอัดแรงชนิดกลาง

คุณสมบัติ	หน่วย	ผนังอัดแรงชนิดกลาง
อัตราการทนไฟ (10 cm)	Hr:Min	4:00
การนำความร้อน (9 cm)	W/m.K	0.175
ค่าฉนวนความร้อน (9 cm)	m <sup>2</sup> K/W	1.14
การส่งผ่านของเสียง (10 cm)	STC	41-43
กำลังรับแรงอัด	MPa	9.806
กำลังรับแรงเฉือน	MPa	-

#### 2.7.4 แผ่นประกอบที่แกนกลางเป็นเม็ดโฟมผสมคอนกรีต (EPS aggregate concrete sandwich panels)

เป็นแผ่นประกอบที่วัสดุผิวหน้าเป็นแผ่นซีเมนต์และวัสดุแกนกลางเป็นเม็ดโฟม EPS ผสมคอนกรีต มีน้ำหนักเบา เป็นฉนวนที่ดี เป็นผนังประเภทใหม่ที่น่าเข้ามาใช้ในการก่อสร้างมีคุณสมบัติตามตาราง 2-13

ตาราง 2-13 คุณสมบัติของแผ่นประกอบที่แกนกลางเป็นเม็ดโฟมผสมคอนกรีต

คุณสมบัติ	หน่วย	ผนังประกอบที่แกนกลางเป็นเม็ดโฟมผสมคอนกรีต
อัตราการทนไฟ (10 cm)	Hr:Min	3:00
การนำความร้อน (10 cm)	W/m.K	0.23
ค่าฉนวนความร้อน (10 cm)	m <sup>2</sup> K/W	0.94
การส่งผ่านของเสียง (10 cm)	STC	35-40
กำลังรับแรงอัด	MPa	3.4-3.9
กำลังรับแรงเฉือน	MPa	-

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ส่วนนำ

ในส่วนของ การดำเนินงานวิจัยจะเป็นการนำแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาดความหนา 10 และ 15 ซม. แล้วนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อนำแผ่นประกอบไปใส่เหล็กกริดยื่น

ผลการทดสอบทำให้ผู้จัดทำพิจารณาเลือกแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาดความหนา 10 ซม. มาใส่เหล็กเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังแล้วทำการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กซึ่งมีความหนา 10 ซม. ด้วยการทดสอบด้านกำลังและการทดสอบด้านอื่นๆดังนี้ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน การทดสอบกำลังรับแรงอัด การทดสอบคุณสมบัติการทนไฟ การทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อน การทดสอบคุณสมบัติการส่งผ่านของเสียง

หลังจากนั้นนำผลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กที่ได้ไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติต่างๆของผนังประเภทอื่นที่มีในท้องตลาด

#### 3.2 แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม

การประกอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมมีวัสดุในการประกอบหลักๆอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดโดยมีลักษณะและคุณสมบัติดังนี้

##### 3.2.1 วัสดุผิวหน้า

วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุผิวหน้า เป็นแผ่นซีเมนต์ ตามมาตรฐาน มอก. 878-2537 ดังตาราง

2-5



รูป 3-1 แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กที่นำมาใช้ทดสอบ



### 3.2.2 วัสดุแกนกลาง

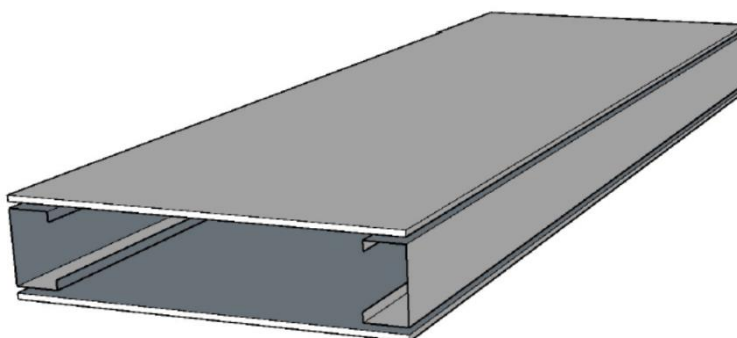
วัสดุแกนกลางที่นำมาใช้คือ โฟม EPS ความหนาแน่น 1.25 ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต (lb/ft<sup>3</sup>) หรือ 20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m<sup>3</sup>) เป็นโฟมชนิดไม่ลามไฟ 255E (Self-Extinguishing EPS foam หรือชนิด F Grade) เป็นเกรดพิเศษที่ใช้ในงานที่ต้องการความปลอดภัยเกี่ยวกับอัคคีภัย คือ เมื่อติดไฟแล้วโฟมชนิดนี้จะดับไฟได้เอง ผ่านการทดสอบการลามไฟด้วยมาตรฐาน DIN4102-1, B2 และ ISO 11925-2 (ISO, 2002) ข้อมูลคุณสมบัติของโฟม EPS ดังตาราง 2-7



รูป 3-2 แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กที่นำมาใช้ทดสอบ

### 3.2.3 เหล็กที่นำมาประกอบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลัง

เหล็กที่นำมาใช้ในการประกอบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมเป็นเหล็กรูปตัวซี มีรูปร่างดังรูป 2-15 โดยแบบจำลองของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมจะมีรูปร่างดังรูป 3-3

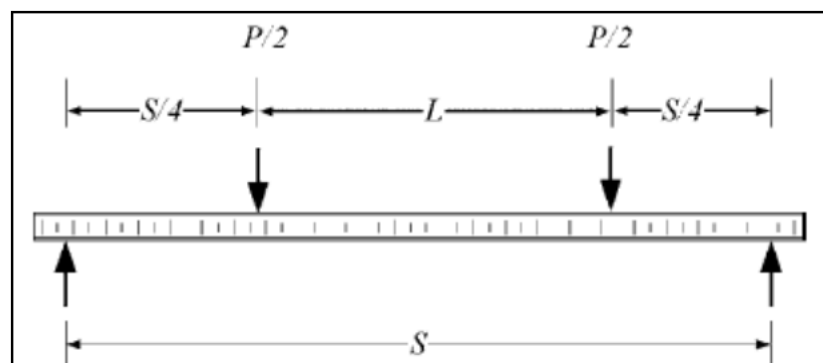


รูป 3-3 แบบจำลองสามมิติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมชนิดมีเหล็ก

### 3.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength)

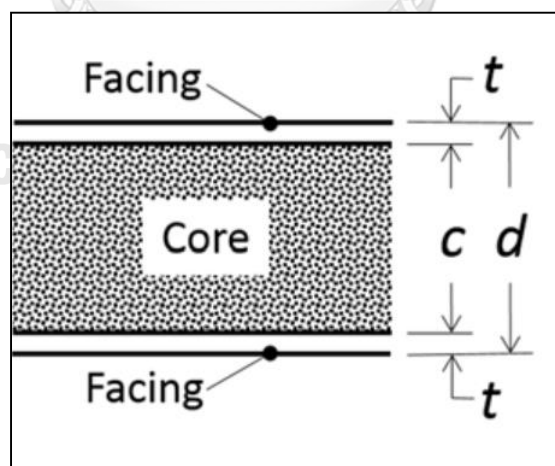
#### 3.3.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure โดยการกดแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมเพื่อหาความสามารถในการรับแรงเฉือนของวัสดุแกนกลางของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมด้วยวิธีการกดแบบ Quarter Point Loading



รูป 3-4 การทดสอบแบบ Quarter Point Loading

การหาลำดับรับแรงดัดมีวิธีทดสอบหลักๆ สามวิธี (M-06, 2011) แยกเป็นแบบ Standard Configuration 1 วิธีเรียกว่า 3-point loading และวิธี Non-Standard Configuration 2 วิธี คือ Quarter point loading กับ Third point loading โดยวิธีที่เลือกใช้ในการทดสอบคือแบบ Quarter Point Loading ดังรูป 3-4



รูป 3-5 ขนาดความหนาของแผ่นประกบ

จากการทดสอบ จะทำให้ได้ load-displacement มาเป็นกราฟ และหาค่าอื่นๆได้ ดังสมการ (1)

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{(d+c)b} \quad (1)$$

เมื่อ  $F_s^{ult}$  = core shear ultimate strength (MPa)

$P_{max}$  = maximum force prior to failure (N)

$t$  = nominal facing thickness (mm)

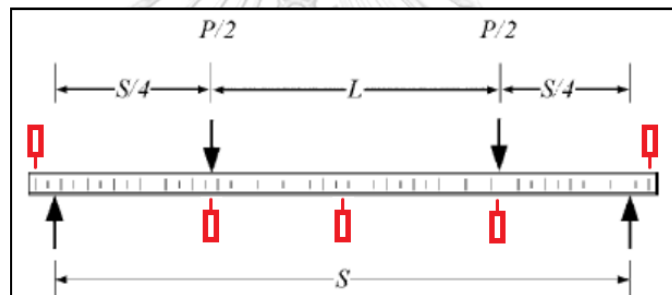
$d$  = sandwich thickness (mm)

$c$  = core thickness (mm) ( $c = d - 2t$ ) ดังรูป 3-5

$b$  = sandwich width (mm)

### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

การออกแบบการทดลองจะมีการใช้ LVDT ทั้งหมด 5 ตัว โดย 3 ตัวจะอยู่ด้านล่างของคาน เพื่อหา displacement ของคานและอีกสองตัวจะอยู่ด้านขอบคานเพื่อหาค่าการยุบตัว และ load cell 30 ton ต่อเข้ากับ data locker ทุกๆ 2 Hz ดังรูป 3-6



รูป 3-6 การออกแบบการทดสอบหากำลังรับแรงดัด

การเตรียมตัวอย่างแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก จะเตรียมตัวอย่างที่ขนาดความหนา 10 และ 15 ซม. เพื่อทดสอบหาขนาดความหนาที่จะนำมาประกอบกับเหล็กกริดเย็นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลัง

ตาราง 3-1 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. ที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ชื่อ	หนา (cm.)	กว้าง (cm.)	สูง (cm.)
WB10_01	10	40	120
WB10_02	10	40	120
WB10_03	10	40	120

ตาราง 3-2 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. ที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ชื่อ	หนา (cm.)	กว้าง (cm.)	สูง (cm.)
WB15_01	15	60	120
WB15_02	15	60	120
WB15_03	15	60	120

จากการทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 10 และ 15 ซม. ทำให้ทราบว่า จะทำการใส่เหล็กยึดในแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 10 ซม. เพื่อทดสอบในขั้นต่อไป

ตาราง 3-3 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ชื่อ	หนา (cm.)	กว้าง (cm.)	สูง (cm.)
WBS10_01	10	40	120
WBS10_02	10	40	120
WBS10_03	10	40	120

### 3.4 การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมด้วยวิธีแปลงหน้าตัด

#### 3.4.1 วิธีแปลงหน้าตัด

การแปลงหน้าตัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมด้วยการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กจะแปลงหน้าตัดที่เป็นโฟมให้กลายเป็นแผ่นซีเมนต์ ส่วนแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กจะแปลงหน้าตัด โฟมและแผ่นซีเมนต์ให้กลายเป็นเหล็ก (Hibbeler, 2013) ดังสมการ (2-3)

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

เมื่อ  $n$  = Transformation factor

$E$  = Modulus of Elasticity (GPa)

$$b_2 = nb_1 \quad (3)$$

เมื่อ  $b$  = Width of section (mm)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุต่างๆจะแสดงในตาราง 3-4 ส่วนค่า Transformation Factor (n) จะแสดงในตาราง 3-5

ตาราง 3-4 โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทดสอบ

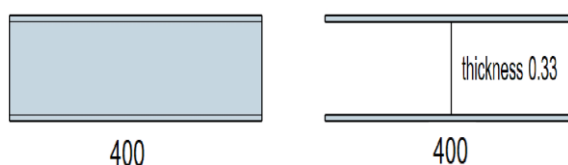
ชื่อ	EPS foam	Cement Board	Steel
Modulus of elasticity (GPa)	0.0025	3	200

ตาราง 3-5 ค่าการแปลงหน้าตัด Transformation Factor (n)

n	EPS foam	Cement Board	Steel
EPS foam	1	1200	80000
Cement Board	1/1200	1	66.67
Steel	1/80000	0.015	1

#### 3.4.2 การแปลงหน้าตัดแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมชนิดไม่มีเหล็ก

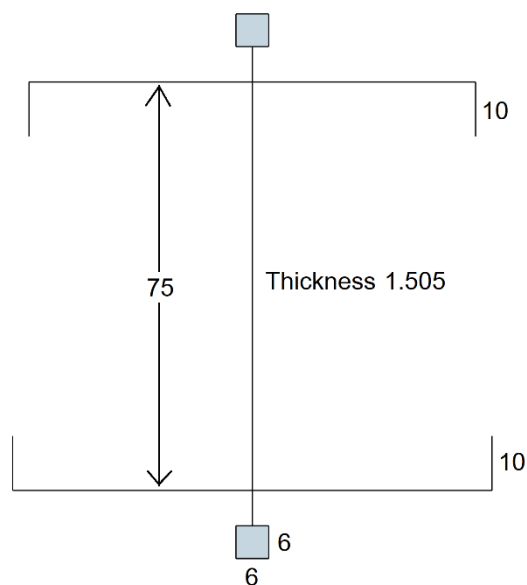
การแปลงหน้าตัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กจาก ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโฟมและแผ่นซีเมนต์ โดยแปลงหน้าตัดความหนาของโฟมให้กลายเป็นแผ่นซีเมนต์จากสมการที่ (8) จะได้ความหนาใหม่ของโฟม หนา 0.33 มม. ดังรูป 3-7



รูป 3-7 การแปลงหน้าตัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก

#### 3.4.3 การแปลงหน้าตัดแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมชนิดมีเหล็ก

ในส่วนของการแปลงหน้าตัดที่มีเหล็กนั้น จะทำการแปลงหน้าตัดของโฟมและแผ่นซีเมนต์เป็นเหล็กจะได้หน้าตัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบที่มีเหล็กดังรูป 3-8



รูป 3-8 การแปลงหน้าตัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

#### 3.4.4 การหาค่า Moment of Inertia

การหาค่า Moment of Inertia (Hibbeler, 2013) จะหาได้จากสมการ (4-5) โดยจะหาจากหน้าตัดของรูปที่แปลงหน้าตัดแล้ว

$$I_{total} = \sum (\bar{I}_i + A_i d_i^2) \quad (4)$$

เมื่อ  $\bar{I}_i$  = Moment of inertia of the individual segment about its own centroid axis (mm<sup>4</sup>)

$A_i$  = Area of the individual segment (mm<sup>2</sup>)

$d_i$  = Vertical distance from centroid of segment to Neutral Axis (mm)

$$\bar{I} = \frac{1}{12} b h^3 \quad (5)$$

เมื่อ  $b$  = Width of rectangle (mm)

$h$  = Height of rectangle (mm)

ซึ่งจากสมการ (4-5) ค่า Moment of Inertia ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. และขนาด 15 ซม. หลังจากแปลงหน้าตัดแล้วจะเท่ากับ 10,636,529 mm<sup>3</sup> และ 37,455,903 mm<sup>3</sup> ตามลำดับ ส่วนแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กหลังจากแปลงหน้าตัดแล้วจะเท่ากับ 499748 mm<sup>3</sup>

### 3.4.5 การหาค่ากำลังรับแรงเฉือน

การคำนวณกำลังรับแรงเฉือน (Hibbeler, 2013) จากสมการที่ (6-7)

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (6)$$

$$Q = \sum \bar{y}'A' \quad (7)$$

เมื่อ  $\tau$  = Shear stress at point located a distance  $y'$  from N-A ( $N/mm^2$ )

$V$  = Internal resultant shear force (N)

$I$  = Moment of Inertia ( $mm^4$ )

$t$  = Width of member's cross section area at point where shear stress is to be determined (mm)

$\bar{y}'$  = Distance to the centroid of  $A'$  from N-A (mm)

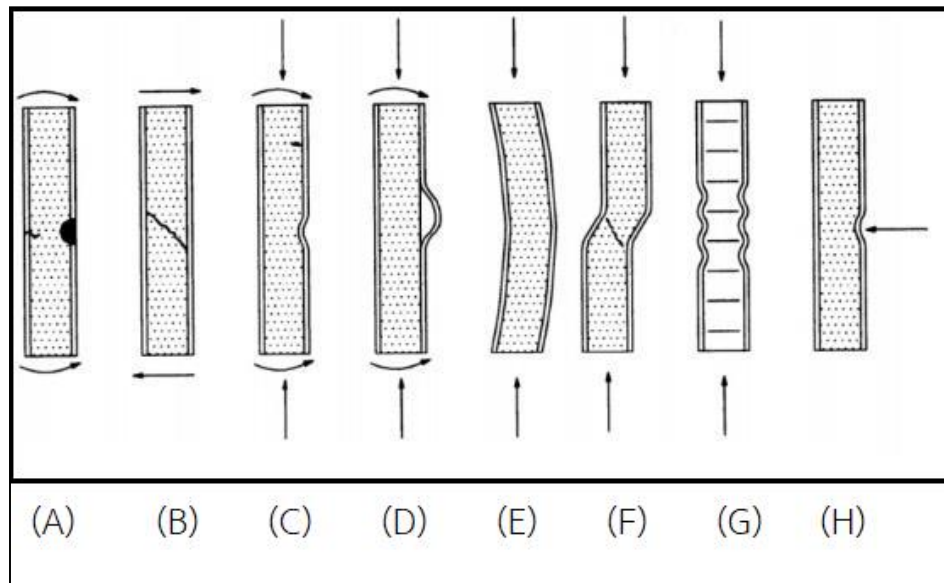
$A'$  = Top (or bottom) portion of member's cross section area at point where shear stress is to be determined ( $mm^2$ )

## 3.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

### 3.5.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

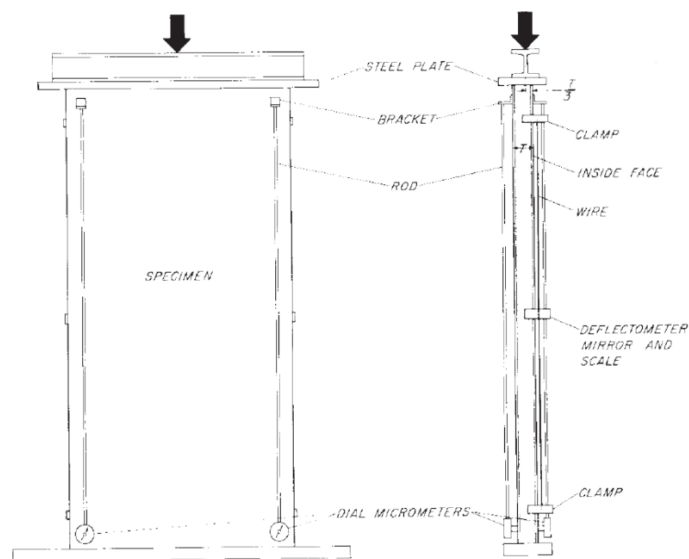
จากการหาข้อมูลของมาตรฐาน ASTM E72 เป็นการนำผนังขนาดจริงมากัด เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดและระยะยุบตัวของผนัง รวมถึงกำลังรับแรงอัดสูงสุด (Compressive Strength) โดยส่วนใหญ่แล้วการพังจะเกิดขึ้นหลายแบบอธิบายดังรูป 3-9

การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดจะออกแบบการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E72 (C. ASTM) ดังรูป 3-10 โดยจะติด LVDT ที่ด้านฐานของตัวอย่างทดสอบ เพื่อหา deformation และใช้ load cell 30 ton เพื่อหาค่า load ต่างๆ ทั้งหมดเชื่อมกับ data locker เพื่อเก็บข้อมูลเทียบกับเวลาโดยเก็บข้อมูลทุกๆ 2 Hz



รูป 3-9 การพังของผนังประกอบแบบต่างๆ : (A) face/core yielding (B) core shear (C) buckling-face wrinkling (D) debonding (E) general buckling (F) buckling-shear crimping (G) buckling-face dimpling (H) core indentation core yield

ทั้งนี้เนื่องจากฐานของผนังประกอบที่ทำมาอาจไม่เรียบจึงมีการเทปูนพลาสติกเพื่อปรับระดับของฐานผนังประกอบเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง และเนื่องจากเป็นรับของเครื่องทดสอบมีขนาด 60 x 60 cm<sup>2</sup> ทำให้ต้องใช้เหล็กรูปตัวไอ (I-Beam) เพื่อเป็นฐานให้ตัวอย่างทดสอบ เพื่อให้การกดเป็นแบบ distributed load ดังรูป 3-10



รูป 3-10 การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM E72 (C. ASTM)



### 3.5.2 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นตัวอย่างที่มีขนาดเท่ากับขนาดที่ใช้งานจริงอยู่ในปัจจุบันคือ  $3 \times 1.2 \text{ m}^2$  และเพื่อเป็นการหาขนาดที่เหมาะสมที่จะนำมาประกอบกับเหล็กกรีดเย็นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลัง จะทำการเตรียมตัวอย่างแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 และ 15 ซม. แล้วนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อเลือกขนาดในการพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลัง

ตาราง 3-6 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. ที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด

ชื่อ	หนา (cm.)	กว้าง (cm.)	สูง (cm.)
WC10_01	10	120	300
WC10_02	10	120	300
WC10_03	10	120	300

ตาราง 3-7 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. ที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด

ชื่อ	หนา (cm.)	กว้าง (cm.)	สูง (cm.)
WC15_01	15	120	300
WC15_02	15	120	300
WC15_03	15	120	300

จากการทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 10 และ 15 ซม. ทำให้ทราบว่า จะทำการใส่เหล็กกรีดเย็นในแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 10 ซม. เพื่อทดสอบในขั้นตอนต่อไป

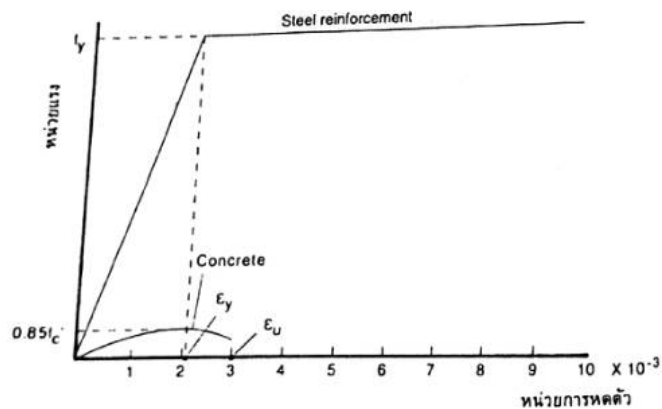
ตาราง 3-8 ขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม. ที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด

ชื่อ	หนา (cm.)	กว้าง (cm.)	สูง (cm.)
WCS10_01	10	120	300
WCS10_02	10	120	300
WCS10_03	10	120	300

### 3.6 การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม

#### 3.6.1 พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาสั้น

กำลังรับแรงอัดของเสาสั้น พิจารณาได้จาก Stress-Strain Curve ของวัสดุที่นำมาประกอบเป็นเสาโดยพิจารณาจากการหดตัว (Strain) ที่น้อยที่สุดที่ทำให้วัสดุใดวัสดุหนึ่งเกิดการวิบัติก่อนแล้วพิจารณาว่าวัสดุอื่น ๆ มีกำลังรับแรงอัด (Stress) ได้เท่าไรโดยวัสดุที่มีการหดตัวมากกว่าจะรับกำลังเป็นสัดส่วนน้อยกว่าวัสดุที่เกิดการหดตัวน้อย



รูป 3-11 Stress-Strain Curve ของ Concrete กับ Steel Reinforcement

โดยหลักการทั่วไปของการวิเคราะห์คือ กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสา เป็นผลรวมของกำลังรับแรงของวัสดุแต่ละประเภทสมการ (8) เช่น ในคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กยื่นมีกำลังรับแรงอัดที่จุดครากเท่ากับ 0.002 มม./มม. แต่คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 0.003 มม./มม. ทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ  $0.85f'_c$  ดังรูป 3-11 และสมการ (9)

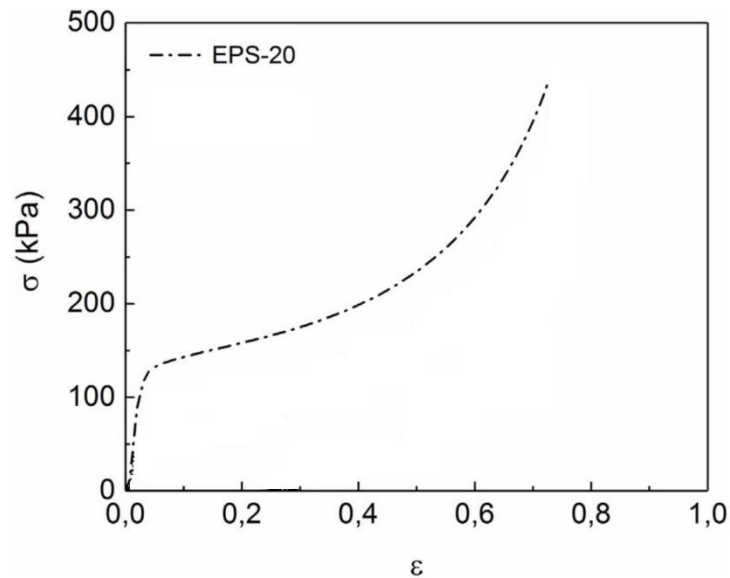
$$P_0 = P_{conc} + P_{steel} = f_c A_c + f_s A_{st} \quad (8)$$

เมื่อ  $A_c$  = เนื้อที่หน้าตัดคอนกรีต

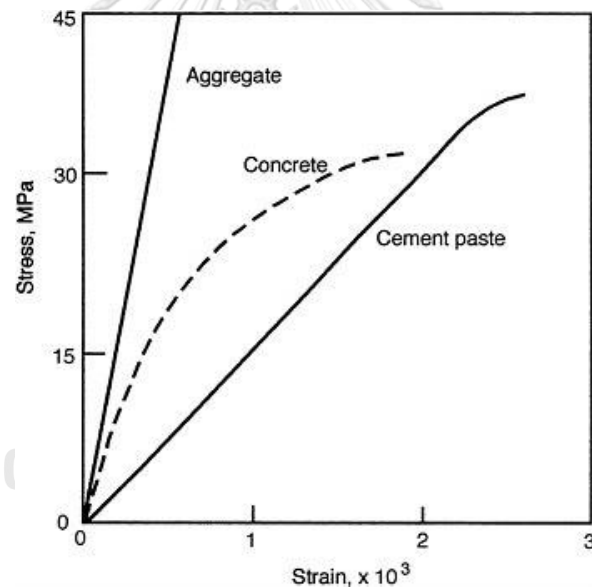
$A_{st}$  = เนื้อที่หน้าตัดเหล็ก

$f_c$  และ  $f_s$  = หน่วยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและเหล็ก ตามลำดับ

$$P_0 = 0.85f'_c A_c + f_y A_{st} \quad (9)$$



รูป 3-12 Stress-Strain Curve ของโฟม EPS ความหนาแน่น 20 kg/m<sup>3</sup>



รูป 3-13 Stress-Strain Curve ของ Cement paste, Concrete, และ Aggregate

### 3.6.2 พฤติกรรมของเสายาวเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกน

แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมเมื่อนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด จะประพฤติตัวเหมือนเสายาว เมื่อเสายาวเป็นเสาเดี่ยวโดดๆ รับแรงอัดตามแนวแกน จะพบว่าเสานั้นโก่งตัวออกทางด้านข้างรอบแกนที่มีโมเมนต์อินเนอร์เซียต่ำสุด ทำให้เสาต้องรับโมเมนต์ดัดจากการโก่งตัวเพิ่ม ทำให้การวิบัติของเสายาวจึงเป็นเพราะการโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากโมเมนต์ดัด ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดพิจารณาได้จากสมการออยเลอร์ทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดของเสาสูงสุดดังสมการ (10)

$$P_c = \frac{\pi^2 E_t I_g}{(kl_u)^2} = \frac{\pi^2 E_t A_g}{(kl_u / r)^2} \quad (10)$$

เมื่อ  $E_t$  = โมดูลัสสัมผัส (tangent modulus) ของเสาหรือ หากแรงอัดวิกฤตเฉลี่ยอยู่ในช่วงอีลาสติก ให้ใช้ค่าโมดูลัสของยัง  $E$  แทน

$I_g$  = โมเมนต์อินเนอร์เซียที่น้อยสุดของรูปตัดเสา

$A_g$  = พื้นที่หน้าตัดเสา

$l_u$  = ช่วงความยาวประสิทธิผล ขึ้นกับลักษณะการยึดปลายทั้งสองของเสา

= 1.0 เมื่อปลายทั้งสองข้างเป็นแบบยึดหมุน

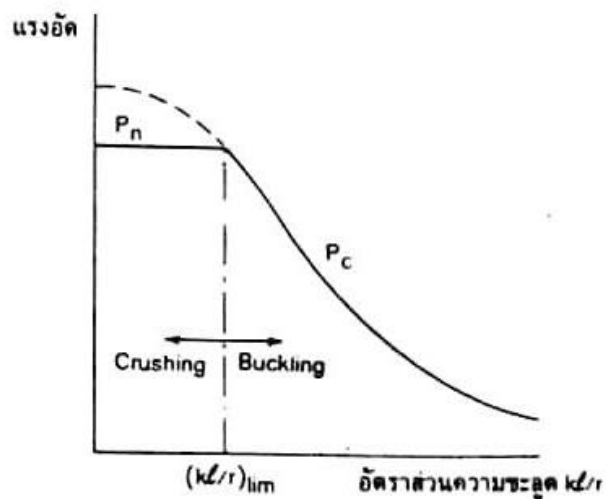
= 0.5 เมื่อปลายทั้งสองข้างเป็นแบบยึดแน่น

= 0.7 เมื่อปลายข้างหนึ่งเป็นแบบยึดหมุน และอีกข้างเป็นแบบยึดแน่น

= 2.0 เมื่อปลายข้างหนึ่งเป็นแบบยึดแน่น และอีกข้างเป็นแบบปล่อยอิสระ

$r$  = รัศมีโรเจชั่นที่น้อยที่สุดของรูปตัดเสา

จากสามการ (10) ถ้านำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนความชะลุดของเสา ( $kl_u / r$ ) ดังรูป 3-14 จะพบว่าค่ากำลังต้านทานของเสาจะลดลงมากเมื่ออัตราส่วนความชะลุดของเสามีค่ามากกว่า  $(kl_u / r)_{lim}$  เพราะฉะนั้น ถ้า  $(kl_u / r)$  มากกว่า  $(kl_u / r)_{lim}$  เสาจะวิบัติเนื่องจากการโก่งคดทางข้าง (buckling) โดยอาจจะเป็นแบบ material failure หรือแบบ instability failure ก็ได้ขึ้นอยู่กับว่าเสามีการเซหรือไม่

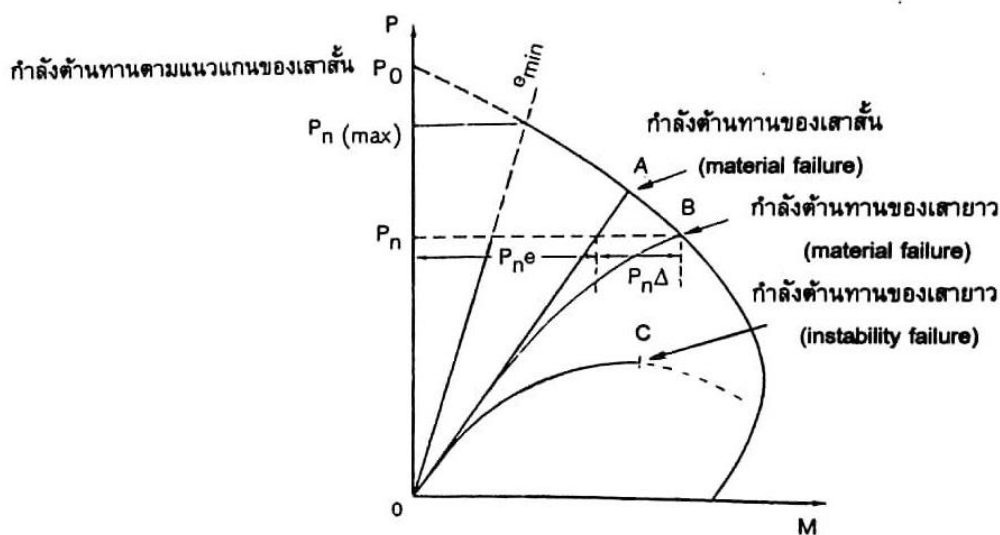


รูป 3-14 กำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนความชะลุดของเสา

### 3.6.3 พฤติกรรมของเสายาวเมื่อรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน

จากรูป 3-15 พฤติกรรมและการวิบัติของเสายาวที่รับทั้งแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน แบบแรก เป็นพฤติกรรมการโก่งทางข้างของเสายาวที่ไม่ยอมเสีย เพราะมีค้ำยันทางข้าง จะพบว่ากำลังรับแรงอัด และดัดจะเป็นเส้นโค้งสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามค่าแรงอัดจนกระทั่งไปติดกับขอบเขตการวิบัติของเสาสั้นที่มีขนาดหน้าตัดเดียวกัน (จุด B) เป็นการวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสามีค่ามากเกินไปเกินกำลังต้านทานของวัสดุ เรียกว่า material failure

พฤติกรรมแบบที่สองเป็นพฤติกรรมการโก่งทางข้างของเสายาวที่ยอมให้เสีย เนื่องจากมีค้ำยันด้านข้างไม่เพียงพอหรือไม่มีเลย จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและดัดจะเป็นเส้นโค้งสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามค่าแรงอัดเช่นเดียวกัน แต่เกิดการวิบัติเสียก่อน (จุด C) ทั้งนี้เพราะเสาโก่งออกทางข้างมาก จนทำให้เสาไร้เสถียรภาพในการรับน้ำหนัก เรียกว่า instability failure หรือ sway failure



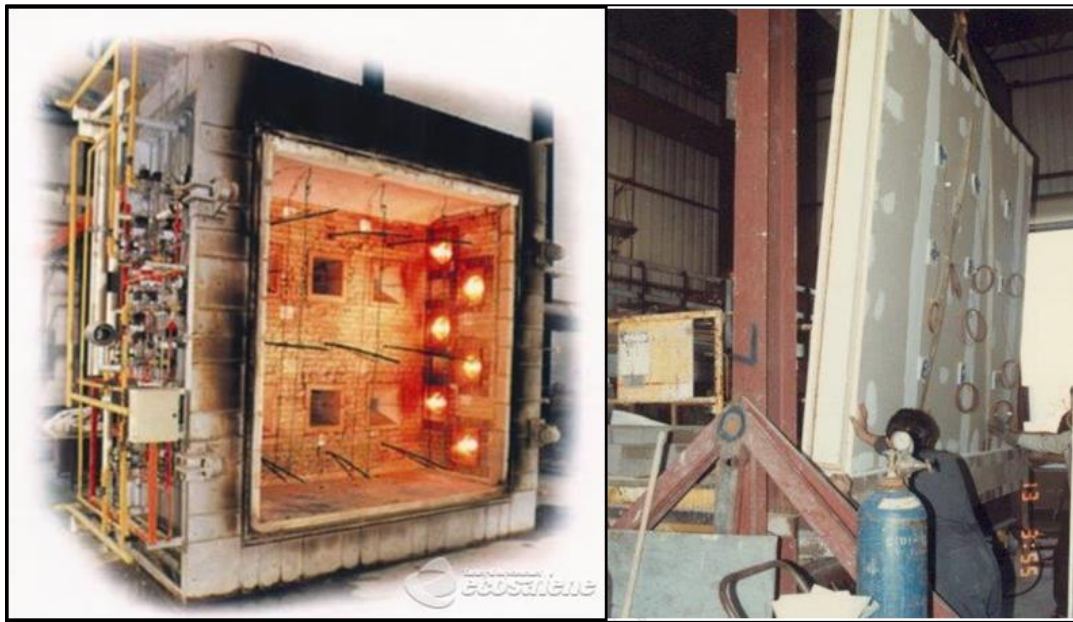
รูป 3-15 Interaction diagram ที่แสดงการวิบัติของเสา

## 3.7 การทดสอบการทนไฟ (Combustibility)

### 3.7.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบการทนไฟ (Combustibility) เป็นการก่อบนึ่งขึ้นมาในแบบแล้วนำไปเผาไฟ ทดสอบการทนไฟของคอนกรีต คอนกรีตมวลเบา และผนังแบบต่างๆด้วยมาตรฐาน BS 476 part 20, 22 เพื่อหาว่าแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมสามารถทนรับการเผาได้ในนานแค่ไหนกำหนดหน่วยเป็น นาที

ทั้งนี้จากมาตรฐานการทนไฟ BS 476 part 20, 22 แบ่งความสามารถในการทนไฟเป็น 2 แบบคือ Insulation กล่าวคืออุณหภูมิภายนอกของด้านที่ไม่โดนไฟต้องไม่เกิน 180 องศาเซลเซียส กับ Integrity กล่าวคือหากเกิดช่องว่างที่ด้านฝั่งที่ไม่โดนไฟ ขนาดของช่องด้านที่กว้างที่สุดต้องไม่เกิน 25 mm ซึ่งโดยปกติแล้วจะเกิด Insulation ก่อน Integrity



รูป 3-16 เครื่องทดสอบตามมาตรฐาน BS476 part 20, 22 และเฟรมขนาด 3 x 3 m<sup>2</sup>

โดยการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานจะทำการวัดทั้งหมด 10 จุดดังรูป 3-17 หากจุดใดจุดหนึ่งในชิ้นงานมีอุณหภูมิเกินกำหนดจะถือว่าเวลานั้นเป็นเวลาสิ้นสุดแบบ Insulation

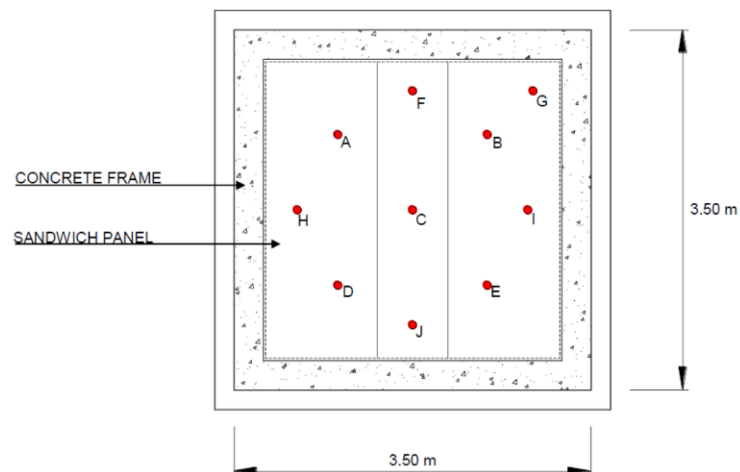
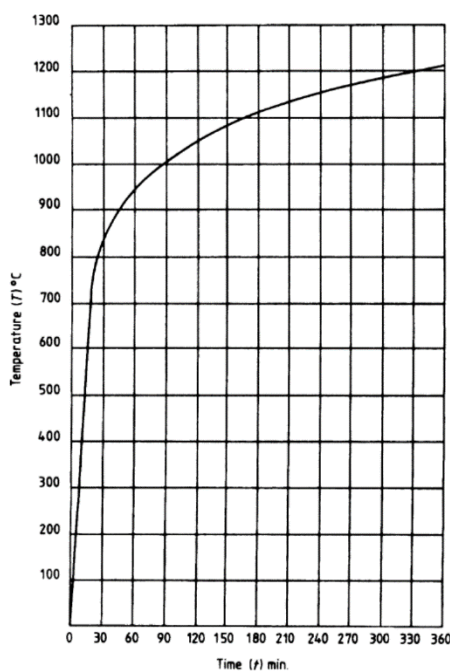


Figure A-2: Location of thermocouples on the specimen

รูป 3-17 จุดที่มีการวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน

### 3.7.2 การเตรียมตัวอย่าง

จากมาตรฐาน BS476 part 20, 22 จะนำผนังที่ต้องการทดสอบ ในที่นี้คือแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กมาประกอบเข้ากับโครงเฟรมที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานขนาด  $3 \times 3 \text{ m}^2$  จากนั้นนำเข้าเครื่องทดสอบดังรูป 3-16



รูป 3-18 มาตรฐาน BS476 part 20, 22 การควบคุมเวลากับอุณหภูมิภายในเตา

การทดสอบจะนำแผ่นที่ประกอบกับโครงเฟรมเรียบร้อยแล้วนำไปประกบกับเครื่องทดสอบ แล้วเผาด้วยอุณหภูมิที่เวลาต่างๆดังรูป 3-18 เพื่อหาว่าผนังที่ทดสอบสามารถทนไฟได้นานเท่าไร โดยการทดสอบจะเป็นแบบ nonbearing wall and partitions ซึ่งมีมาตรฐานกำหนดไว้เช่น ผนังต้องทนไฟโดยไม่มีความร้อนหรือก๊าซผ่านโดยไม่ทำให้ฝ้าย cotton ไหม่ พื้นผิวที่ไม่ได้รับการส่งผ่านความร้อนโดยตรงต้องมีอุณหภูมิไม่เกิน  $180^{\circ}\text{C}$



รูป 3-19 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมก่อนการทดสอบทนไฟ

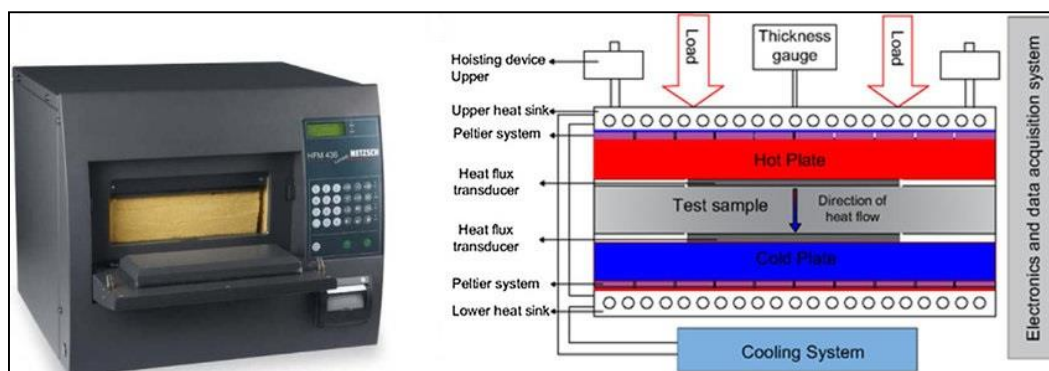
### 3.8 การทดสอบค่าความเป็นฉนวน (Thermal Conductivity)

#### 3.8.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบค่าความเป็นฉนวน (Thermal Conductivity) จากมาตรฐาน ASTM C518 เป็นการนำวัสดุขนาด  $30 \times 30 \text{ cm}^3$  ไปเข้าเครื่องทดสอบโดยการปล่อยความร้อนที่ด้านหนึ่งแล้วรับอ่านค่าจากอีกด้านหนึ่งเพื่อหาค่าความเป็นฉนวนความร้อน (R) และค่าการนำความร้อน (K)



การถ่ายเทความร้อนของวัสดุทั่วไปมี 3 ลักษณะ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ส่วนใหญ่แล้วจะวัดการนำความร้อนของวัสดุเพื่อหาค่าสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity, K) หากวัสดุมีค่าการนำความร้อนได้ดี ก็จะมีค่า K สูง เรียกว่าวัสดุประเภทนี้ว่า “ตัวนำความร้อน” เช่น เหล็ก แต่ถ้าวัสดุใดนำความร้อนได้น้อย หรือมีค่า K ต่ำ จะเรียกว่า “ฉนวนความร้อน” มีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนได้ดี (กรองทิพย์, 2560)



รูป 3-20 เครื่อง Heat flow meter (HFM 436) และการทำงานของเครื่อง ตามมาตรฐาน ASTM C518 (Standard)

การวัดความการนำความร้อนแบ่งได้ 2 วิธีใหญ่ๆคือ การวัดแบบสภาวะไม่คงที่ (transient method) ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถวัดได้รวดเร็ว แต่การคำนวณจะยุ่งยากและซับซ้อน และแบบสภาวะคงที่ (Steady-state method) นิยมใช้กับวัสดุที่มีความเป็นฉนวนมาก มีวิธีวัด 2 วิธี แต่จากมาตรฐาน ASTM C518 (Standard) จะใช้วิธีวัดแบบ 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 (สมจิตร์)

การคำนวณค่าการนำความร้อนของ Heat flow meter จะใช้สมการของ Fourier's law (11) แบบ 1 มิติ ในการคำนวณคือ

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (11)$$

เมื่อ  $k$  = สภาพนำความร้อน (W/m.K)

$Q$  = ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง (W)

$A$  = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m<sup>2</sup>)

$L$  = ความหนาของชิ้นทดสอบ (m)

$\Delta T$  = อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิววัสดุด้านอุณหภูมิสูงและด้านอุณหภูมิต่ำ (K)

ส่วนค่าความต้านทานการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal resistance, R-Value) สามารถคำนวณได้จากสมการ (12)

$$R = \frac{L}{k} \quad (12)$$

เมื่อ  $R$  = ความต้านทานความร้อน ( $m^2K/W$ )

และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U-Value) คือส่วนกลับของค่า R-Value ดังสมการ (13)

$$U = \frac{1}{R} \quad (13)$$

จากสมการ (2) จะเห็นว่าความต้านทานความร้อน  $R$  ขึ้นกับความหนาของวัสดุ ถ้าวัสดุหนาขึ้นค่าความต้านทานความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วย

### 3.8.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ โดยผู้จัดทำได้ทำการเตรียมตัวอย่างได้ทั้งหมด 3 ชิ้นแบ่งตามความหนาคือ 2.5 cm, 5 cm, และ 7.5 cm. เนื่องจากข้อจำกัดทางขนาดของเครื่องทำให้ไม่สามารถนำแผ่นประกอบที่มีฉนวนโฟมขนาด 10 ซม. มาทดสอบได้ โดยชิ้นงานประกอบจากแผ่นวัสดุผิวหน้าที่เป็น แผ่นซีเมนต์หนา 6 mm และวัสดุแกนกลางเป็น โฟม EPS ความหนาแน่น 1.25 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต ( $lb/ft^3$ ). ดังแสดงในตาราง 3-9

ตาราง 3-9 ขนาดของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบค่าความเป็นฉนวน

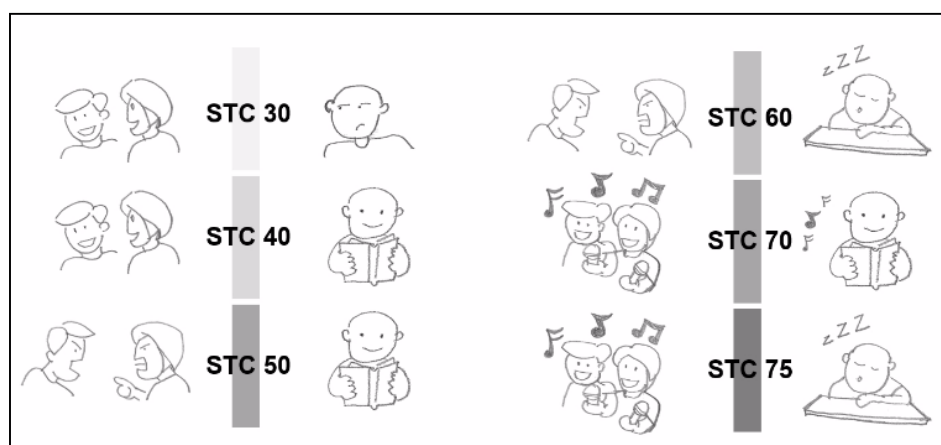
ชื่อ	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)	แกนกลาง (mm)	วัสดุผิวหน้า (mm)
HF25	300	300	27	15	6
HF50	300	300	51	39	6
HF75	300	300	76	64	6

ชิ้นทดสอบจะนำมาไว้ที่อุณหภูมิห้อง  $22 \pm 5$  °C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $50 \pm 10$  อย่างน้อย 24 ชั่วโมง และมวลจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงเกินร้อยละ 1 หลังจากนำเข้าเครื่องโดยวางอยู่ระหว่างแผ่น Hot plate และ cold plate แล้วตั้งค่าอุณหภูมิให้ต่างกัน ( $\Delta T$ ) เครื่องจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากเซนเซอร์ที่ติดอยู่กับผิวของ plate โดยการวัดการไหลของความร้อน(heat flow) และอุณหภูมิระหว่างแผ่นทั้งสองที่สภาวะคงที่ (Steady-state condition) แล้วนำมาทำการคำนวณหาค่าความเป็นฉนวนความร้อน (R) และค่าการนำความร้อน (K) ต่อไปซึ่งการทดสอบจะทดสอบที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถนนพระราม 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

### 3.9 การทดสอบการส่งผ่านของเสียง (Sound Transmission)

#### 3.9.1 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

กาทดสอบการส่งผ่านของเสียง (Sound Transmission) เป็นการนำแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมไปติดตั้งในห้องที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน ASTM E90 โดยจะมีห้อง 2 ห้องแล้วใช้ลำโพงเปิดเสียงความถี่ต่างๆแล้ววัดว่าด้วยเครื่องวัดแยกความถี่ ทั้งสองด้านเพื่อหาค่า TL (Transmission Loss)



รูป 3-21 ค่า STC ต่างๆ

กำแพงแต่ละชนิดจะกันเสียงแต่ละความถี่ได้ไม่เท่ากัน เช่น กำแพงคอนกรีตสามารถกันเสียง 250 Hz ได้ 35 เดซิเบลในขณะที่กันเสียง 2000 Hz ได้ 54 เดซิเบล ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ โดยเพื่อให้สามารถเข้าใจกันได้และเป็นมาตรฐานเดียวกัน จึงมีการคิดค้นค่า STC (Sound Transmission Class) ขึ้น โดยค่า STC มากหมายถึงกำแพงสามารถกันเสียงได้ดี หรือห้องที่ให้กำแพงชนิดนั้นๆกันจะเงียบกว่าห้องที่ใช้กำแพงที่มีค่า STC ต่ำกว่ากันห้อง ดังรูป 3-21

การหาค่า TL (Transmission loss) ของเสียงที่ความถี่ต่างๆ เมื่อผ่านผนังที่ต้องการทดสอบ โดยการวัดความดังของเสียงที่ห้องกระจายเสียง (source room) กับห้องที่เสียงผ่านผนังที่ต้องการทดสอบหรือห้องรับเสียง (receiving room) ดังสมการ (14) แล้วนำค่า TL ที่ได้มาวาดกราฟ ค่า TL กับความถี่เพื่อหาค่า STC (Sound Transmission Class)

$$TL = \langle L_1 \rangle - \langle L_2 \rangle + 10 \log \frac{S}{A_2} \quad (14)$$

เมื่อ  $TL$  = transmission Loss (dB)

$\langle L_1 \rangle$  = ค่าเฉลี่ยความดังของเสียงที่ห้องกระจายเสียง (dB)

$\langle L_2 \rangle$  = ค่าเฉลี่ยความดังของเสียงที่ห้องรับเสียง (dB)

$S$  = พื้นที่ของห้องรับเสียง ( $m^2$ )

$A_2$  = ค่าการซึมซับเสียง (sound absorption) ของห้องรับเสียงที่มีผนังทดสอบติดตั้งไว้

และจากสมการ (14) จะสามารถหาค่าเฉลี่ยความดังของเสียงที่ห้องกระจายเสียงและห้องรับเสียงได้จากสมการต่อไปนี้

$$\langle L \rangle = 10 \text{Log} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right] \quad (15)$$

เมื่อ  $L_i$  = ช่วงเวลาเฉลี่ยที่วัดที่  $n$  จุด

$n$  = จำนวนจุดที่วัด

วิธีการหาค่า STC ทำได้โดยการนำค่า TL มาวาดกราฟเทียบกับค่าความถี่ ซึ่งการหาค่า STC จะแสดงในตัวอย่างด้านล่าง

### 3.9.2 ตัวอย่างการคำนวณค่า STC

ตาราง 3-10 ค่า TL ของผนังก่ออิฐฉาบปูน ความหนารวม 10 ซม.

Hz	125	160	200	250	315	400	500	630
TL (dB)	38	39	38	33	33	36	38	41
Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
TL (dB)	44	46	49	51	54	55	57	59

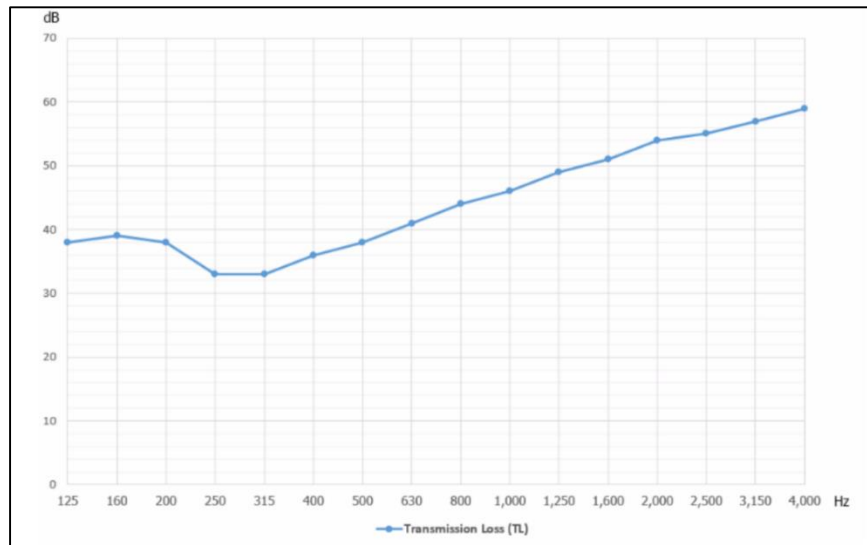
เมื่อได้ค่า TL มาแล้วจากตาราง 3-10 จะพบว่าผนังหนึ่งผนังมีค่า TL ของแต่ละความถี่ไม่เท่ากัน เช่น ที่ 250 Hz สามารถกันเสียงได้ 33 dB แต่ที่ 1600 สามารถกันเสียงได้ 51 dB ทำให้ยากต่อการอธิบายว่าผนังนี้กันเสียงได้เท่าไร จึงใช้ค่า STC ในการอธิบายเพื่อให้ง่ายต่อการสื่อสาร

การหาค่า STC จะใช้กราฟ STC contour คือกราฟสี่เหลี่ยมในรูป 3-23 มาเลื่อนตามกฎ 2 ข้อคือ

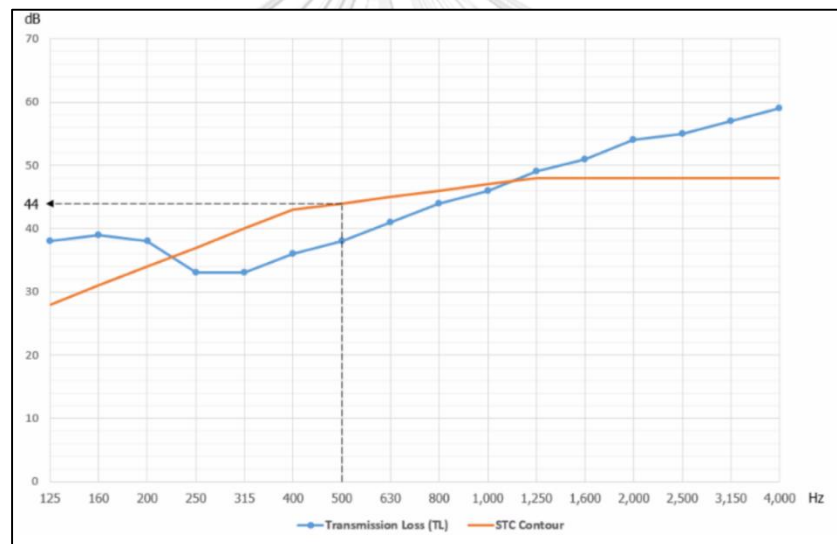
1. กราฟสี่เหลี่ยม TL กับสี่เหลี่ยม STC contour ในบริเวณที่สี่เหลี่ยมเหนือสี่เหลี่ยมจะต้องต่างกันมากที่สุดไม่เกิน 8 dB

2. ผลรวมความต่างในบริเวณที่กราฟสี่เหลี่ยมเหนือสี่เหลี่ยมต้องรวมกันไม่เกิน 32 dB

จากนั้นลากเส้นจาก 500 Hz ไปชนกราฟสี่เหลี่ยมแล้วลากเส้นไปทางซ้ายจะได้ค่า STC ซึ่งจากตัวอย่างจะได้ค่า STC คือ 44 dB

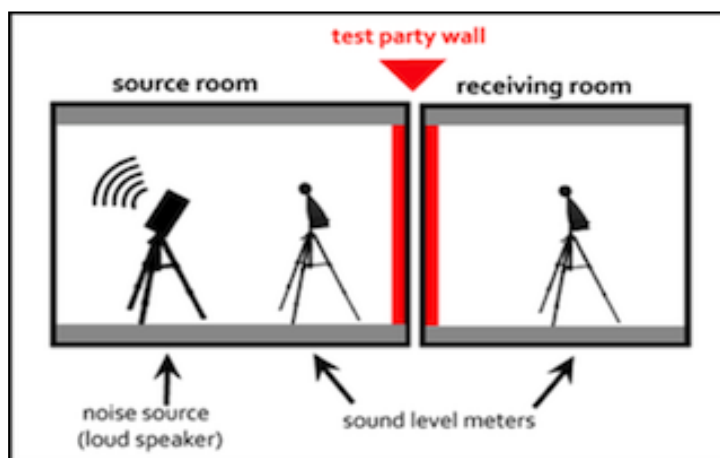


รูป 3-22 กราฟค่า TL ของผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 10 ซม.



รูป 3-23 ค่า STC ของผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 10 ซม.

### 3.9.3 การเตรียมตัวอย่าง



รูป 3-24 ห้องที่ใช้ทดสอบความสามารถในการส่งผ่านของเสียงตามมาตรฐาน ASTM E90 (E. ASTM) จากมาตรฐาน ASTM E90 (E. ASTM) จะเป็นการก่อบนึ่งในห้องทดสอบสองห้องติดกันโดยให้ผนังทดสอบเป็นตัวกั้นเสียงดังรูป 3-24 แล้วปล่อยคลื่นเสียงความถี่ต่างๆทั้งหมด 16 ความถี่ ตั้งแต่ 125 Hz จนถึง 4000 Hz



รูป 3-25 ห้องที่ใช้ในการทดสอบจริง

โดยในการติดตั้งต้องติดตั้งผนังที่จะทดสอบให้เต็มช่องว่างที่ทำการทดสอบขนาด  $2.4 \times 3 \text{ m}^2$  ดังรูป 3-25 ในการทดสอบจะทำการทดสอบทั้งหมด 2 ขนาดความหนา คือ 10 ซม. และ 15 ซม. โดยขนาด 10 ซม. เป็นชนิดที่มีเหล็กที่ใช้ในการพัฒนาคุณสมบัติ ส่วนชนิด 15 ซม. เป็นชนิดที่ไม่มีเหล็ก เพื่อเป็นการเปรียบเทียบ STC กับความหนาของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม



รูป 3-25 ขั้นตอนการติดตั้งแผ่นฉนวนโฟม



รูป 3-26 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมก่อนการทดสอบการส่งผ่านของเสียง

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

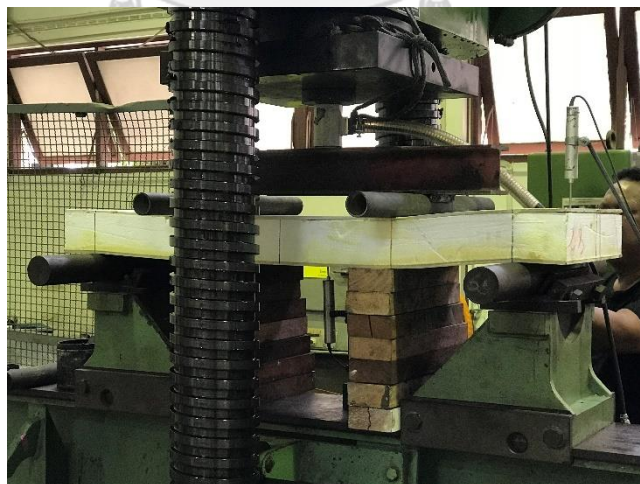
#### 4.1 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) แบบไม่มีเหล็ก

##### 4.1.1 ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก



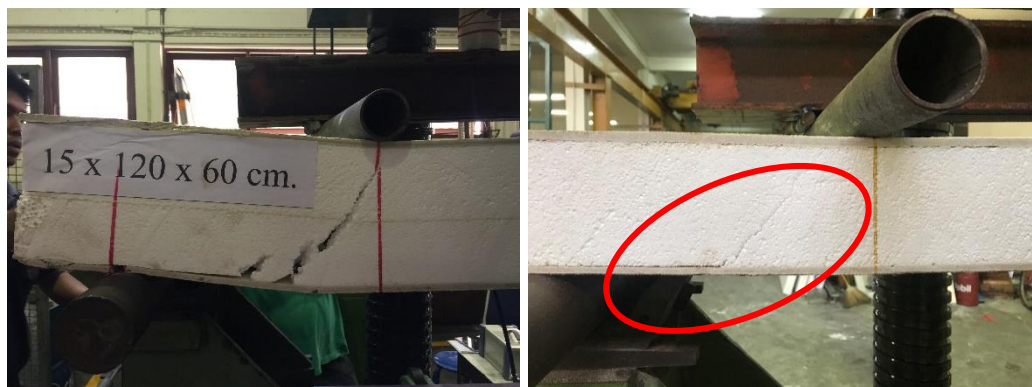
รูป 4-1 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก

จากรูป 4-1 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กจะเห็นได้ว่าการพังของชิ้นงานรูป 4-2 จากการทดสอบทำให้ทราบว่าเกิดเสียงฉีกขาดที่โฟมก่อน หลังจากนั้นแผ่นวัสดุผิวหน้าจึงขาดตามมา หลังจากที่โฟมเกิดการฉีกขาดจากแรงเฉือนดังรูป 4-3 ไม่สามารถทราบได้ก่อนว่าจะเกิดการพังเมื่อไร เพราะหลังจากเกิดเสียงฉีกขาดของโฟมแผ่นวัสดุผิวหน้าก็แทบจะพังทันที



รูป 4-2 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมชนิดไม่มีเหล็ก





รูป 4-3 การพังด้วยแรงเฉือนของแผ่นฉนวนสำเร็จรูปที่ไม่มีเหล็ก

จากการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กทำให้ทราบค่าแรงกดสูงสุดที่แผ่นประกอบรับได้ และจากการนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Shear Strength) ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. และ 15 ซม. จากสมการ (6) ดังแสดงในตาราง 4-1 และตาราง 4-2 ตามลำดับ

ตาราง 4-1 แรงกดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.

ชื่อ	P max (N)	Shear Strength (MPa)
WB10_01	7,605	0.101
WB10_02	8,143	0.108
WB10_03	7,958	0.106
average	7,902	0.105

ตาราง 4-2 แรงกดสูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม.

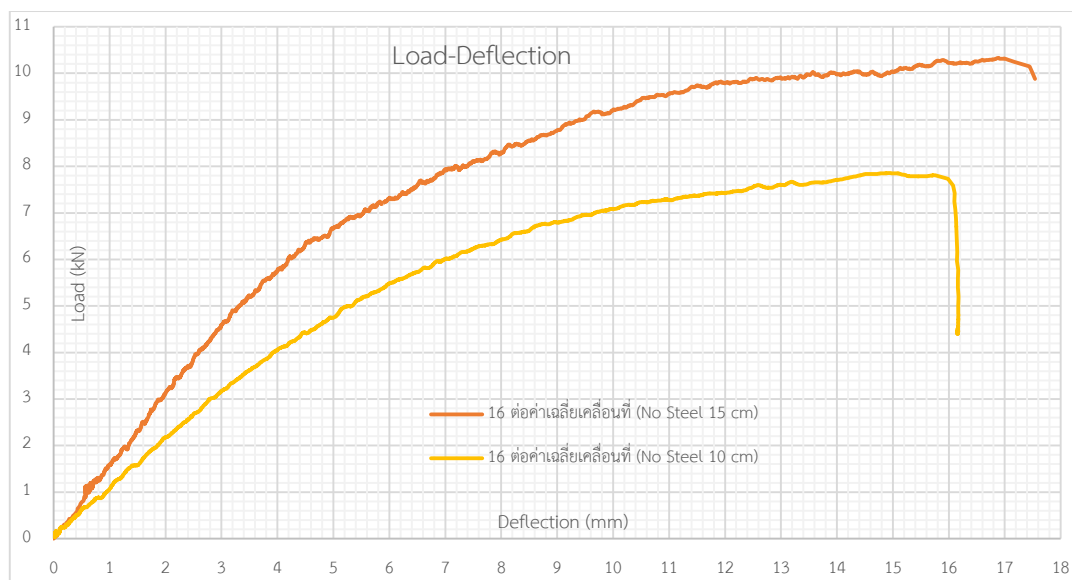
ชื่อ	P max (N)	Shear Strength (MPa)
WB15_01	10,498	0.061
WB15_02	8,122	0.047
WB15_03	9,544	0.055
average	9,388	0.054

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก

การวิเคราะห์ผลการทดสอบระหว่างแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 และ 15 ซม. จากตาราง 4-1 และตาราง 4-2 ทำให้ทราบว่า การเพิ่มขนาดความหนาของแผ่นประกอบที่

เป็นฉนวนโฟมทำให้แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. รับแรงได้มากกว่าแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. ประมาณ 20 %

ในทางกลับกันค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (Shear Strength) ที่รับได้ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. ลดน้อยลง ประมาณ 50 % ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.



รูป 4-4 กราฟ Load Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 และ 15 ซม.

การเพิ่มขนาดความหนาของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมทำให้แผ่นประกอบรับแรงเพิ่มมากขึ้นได้ประมาณ 20 % จากความหนาเดิม แต่เมื่อเทียบกับความหนาที่เพิ่มขึ้นมาถึง 50 % ในด้านของความเหมาะสมที่จะใช้ในการก่อสร้างอาจทำให้พื้นที่ใช้สอยในอาคารมีพื้นที่น้อยลงซึ่งในการก่อสร้างจริง จำเป็นต้องนำมาพิจารณาเพิ่มเติมด้วย รวมถึงค่าวัสดุที่เพิ่มขึ้นมาก็จำเป็นต้องนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน

## 4.2 การคำนวณกำลังรับแรงเฉือนจากวิธีแปลงหน้าตัด

### 4.2.1 ผลการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก

จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนนำค่าของแรงกดที่ได้จากการกดแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 และ 15 ซม. ทำให้ทราบค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่ามากที่สุดที่แกน Neutral Axis ดังตาราง 4-3 และตาราง 4-4

ตาราง 4-3 ค่า Calculate Shear Strength ที่ได้จากการคำนวณของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.

ชื่อ	P max (N)	Calculate Shear Strength (MPa)	Test Shear Strength (MPa)
WB10_01	7,605	0.101	0.101
WB10_02	8,143	0.108	0.108
WB10_03	7,958	0.106	0.106
average	7,902	0.105	0.105

ตาราง 4-4 ค่า Calculate Shear Strength ที่ได้จากการคำนวณของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม.

ชื่อ	P max (N)	Calculate Shear Strength (MPa)	Test Shear Strength (MPa)
WB15_01	10,498	0.061	0.061
WB15_02	8,122	0.047	0.047
WB15_03	9,544	0.055	0.055
average	9,388	0.054	0.054

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ผลที่คำนวณได้กับผลจากการทดสอบ

จากการคำนวณด้วยวิธีแปลงหน้าตัด แล้วหาค่า Shear Strength เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบแล้ว แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 และ 15 ซม. ค่าที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากัน

ทำให้ทราบว่า ค่า Shear Strength ที่คำนวณได้จากสมการ (1) จากการทดสอบ กับค่าที่คำนวณได้จากสมการแปลงหน้าตัด (6) มีค่าเท่ากัน

### 4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) แบบไม่มีเหล็ก

#### 4.3.1 ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก



รูป 4-5 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาดความหนา 10 ซม. และ 15 ซม.

จากการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กซึ่งมีขนาดความหนา 10 ซม. และ 15 ซม. ดังรูป 4-5 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาดความหนา 10 ซม. จะเป็นการพังเพราะแผ่นวัสดุผิวหน้าไม่สามารถรับแรงได้จึงเกิดการหักงอ ดังรูป 4-7

ส่วนแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. เป็นการพังเพราะการโก่งงอ (Buckling) ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม ซึ่งแสดงในรูป 4-6 และรูป 4-8



รูป 4-6 การพังแบบ general buckling ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก  
 หลังจากการทดสอบทำให้ทราบค่าแรงกดสูงสุดที่แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มี  
 เหล็กขนาด 10 และ 15 ซม.รับได้ และนำค่าที่ได้มาคำนวณหากำลังรับแรงอัด ดังแสดงในตาราง 4-5,  
 ตาราง 4-6

ตาราง 4-5 แรงอัดและกำลังรับแรงอัดสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด  
 10 ซม.

ชื่อ	Max Load (kN)	Compressive Strength (MPa)
WC10_01	147.852	1.232
WC10_02	137.840	1.149
Average	142.846	1.190

ตาราง 4-6 แรงอัดและกำลังรับแรงอัดสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด  
 15 ซม.

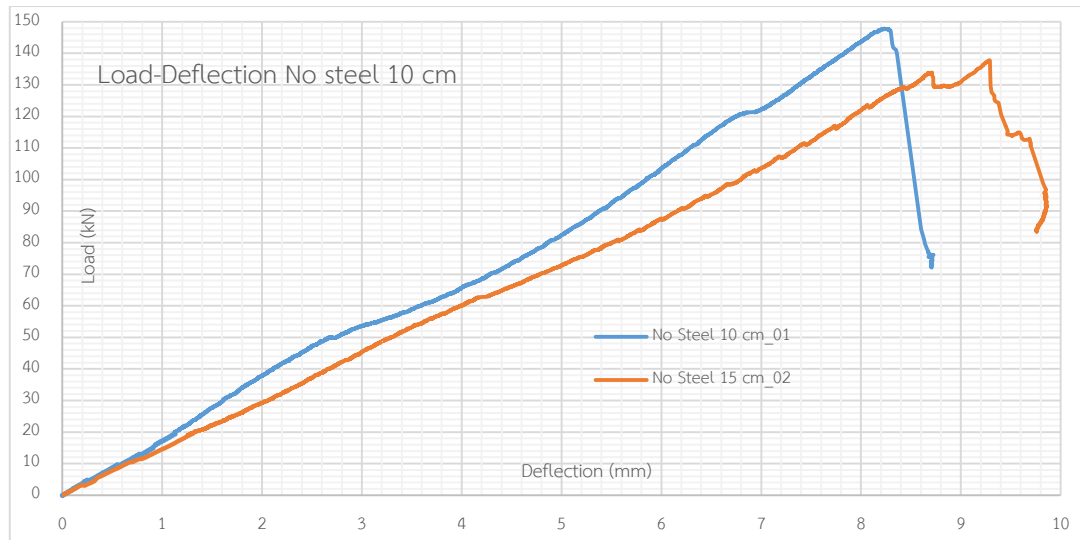
ชื่อ	Max Load (kN)	Compressive Strength (MPa)
WC15_01	102.204	0.568
WC15_02	92.364	0.513
Average	97.284	0.541



รูป 4-7 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.

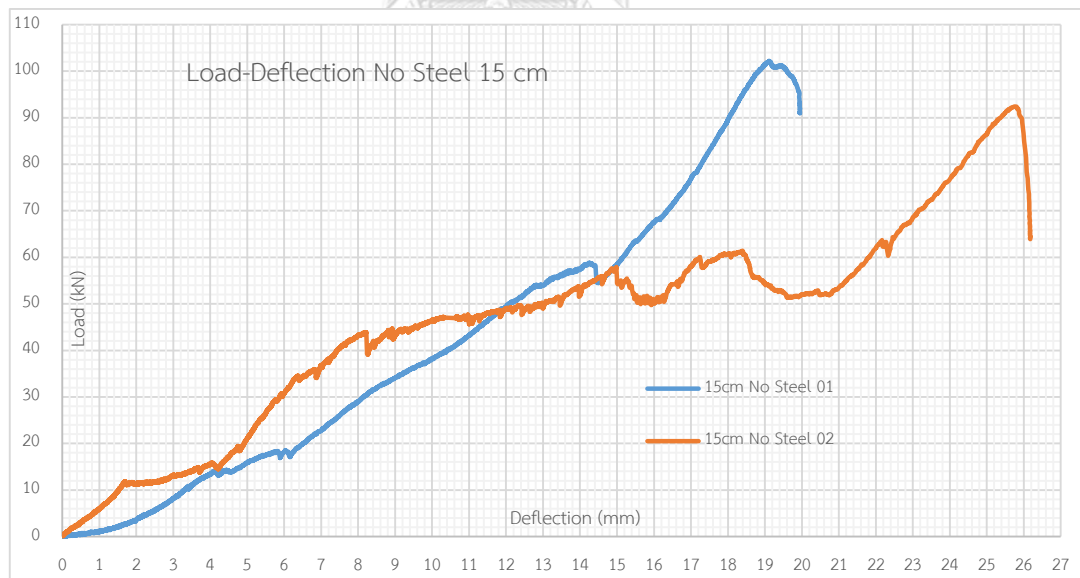


รูป 4-8 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม.



รูป 4-9 กราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.

ค่าที่ได้จากการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. มีค่าใกล้เคียงกันโดยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 142.846 kN ส่วนค่า Compressive Strength คือ 1.190 MPa รวมถึงกราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. นี้ก็มีรูปร่างไปในทางเดียวกัน



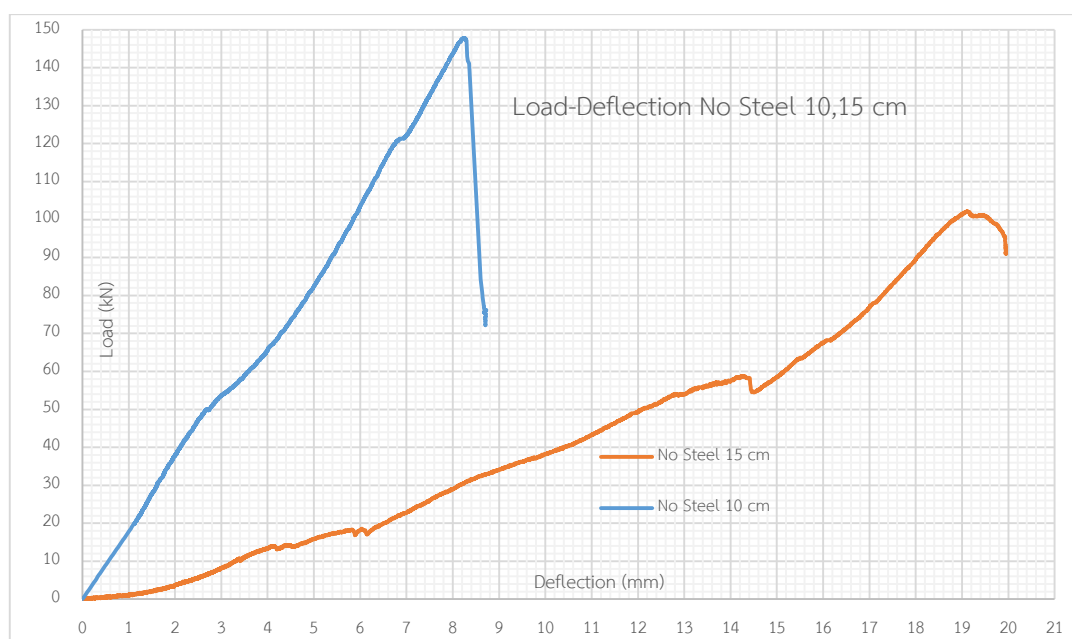
รูป 4-10 กราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม.

ค่าที่ได้จากการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. มีค่าใกล้เคียงกันโดยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 97.284 kN ส่วนค่า Compressive Strength คือ 0.541 MPa รวมถึงกราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. นี้ก็มีรูปร่างไปในทางเดียวกัน

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ผลที่คำนวณได้กับผลจากการทดสอบ

การวิเคราะห์ผลการทดสอบระหว่างแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 และ 15 ซม. ทำให้ทราบว่า การเพิ่มขนาดความหนาของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมทำให้แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. ทำให้แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. รับแรงได้น้อยลงประมาณ 32 %

ในทางเดียวกันค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด (Compressive Strength) ที่รับได้ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. ลดน้อยลง ประมาณ 55 % ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.



รูป 4-11 กราฟเปรียบเทียบ Load-Deflection ระหว่างแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 กับ 15 ซม.

จากพฤติกรรมการรับแรงอัดและแรงดัดของเสายาวทำให้ทราบว่าแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กหนา 10 ซม. มีพฤติกรรมการพังจากวัสดุ (Material Failure) จากรูป 4-7 ซึ่งในพฤติกรรมของแผ่นประกอบ วัสดุแกนกลางจะทำหน้าที่เป็นค้ำยันด้านข้างเพื่อไม่ให้เกิดการเซ

และแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กหนา 15 ซม. มีพฤติกรรมการพังจากการโค้งงอ (Instability Failure) จากรูป 4-8 ทั้งนี้ การเพิ่มความหนาของวัสดุแกนกลางด้วยความที่วัสดุแกนกลางเป็นโฟม EPS จากคุณสมบัติของวัสดุแล้ว โฟม EPS สามารถยุบตัวได้ ทำให้เกิดการบิดงอเสียรูปในวัสดุแกนกลาง ทำให้ไม่สามารถเป็นค้ำยันด้านข้างได้ หรือมีค้ำยันด้านข้างที่ไม่เพียงพอ และ ทั้งนี้ ความหนาของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมที่มากขึ้น ทำให้เกิดโมเมนต์ที่ปลายเสามากขึ้นตาม



ไปด้วย ด้วยเหตุนี้อีกประการหนึ่งทำให้เกิดการโก่งงอของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมในกรณีที่เพิ่มความหนาให้แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมมากเกินไปด้วย

#### 4.4 การคำนวณกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม

##### 4.4.1 ผลการคำนวณกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก

จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาผู้จัดทำได้พิจารณาคำนวณค่ากำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 และ 15 ซม. โดยแบ่งพิจารณาเป็นเสาสั้น และพิจารณาคำนวณค่ากำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสายาว ซึ่งจากการทดสอบผู้จัดทำทำการพิจารณาค่า  $k$  ของเสาไว้ 2 แบบคือ 1 และ 0.5 เนื่องจากการออกแบบการทดลองให้ปลายทั้งสองข้างของเสาเป็นแบบยึดหมุน ซึ่งทำให้ไม่มีโมเมนต์ดัดที่ปลายเสา แต่ในความเป็นจริงแล้วเนื่องจากความหนาของเสาทำให้อาจเกิดโมเมนต์ดัดที่ปลายเสาได้ ทำให้ค่า  $k$  ของการทดลองนี้น่าจะอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1 สรุปค่าได้ดังตาราง

ตาราง 4-7 ค่ากำลังรับแรงอัดของเสาสั้น และเสายาวที่ค่า  $k$  0.5 และ 1 ขนาด 10 และ 15 ซม.

ขนาด	กำลังอัดเสาสั้น (KPa)	กำลังอัดเสายาว $k:0.5$ (KPa)	กำลังอัดเสายาว $k:1$ (KPa)
10 ซม.	594.48	180.72	45.18
15 ซม.	604.98	225.03	56.25

##### 4.4.2 การวิเคราะห์ผลการคำนวณเทียบกับผลการทดสอบ

ด้วยคุณสมบัติของแผ่นประกอบกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบจะเกิดขึ้นที่ วัสดุผิวหน้า และวัสดุแกนกลางจะทำหน้าที่เป็นค้ำยันเพื่อให้วัสดุผิวหน้าคงรูปอยู่ได้ ทำให้การคำนวณกำลังรับแรงอัดของเสาสั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเพิ่มความหนาของวัสดุแกนกลางไม่ได้ช่วยให้กำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมเพิ่มขึ้น

ตาราง 4-8 ค่ากำลังรับแรงอัดของการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก เสาสั้น และเสายาวที่ค่า  $k$  0.5 และ 1 ขนาด 10 และ 15 ซม.

ขนาด	กำลังอัดจากการทดสอบ (KPa)	กำลังอัดเสาสั้น (KPa)	กำลังอัดเสายาว $k:0.5$ (KPa)	กำลังอัดเสายาว $k:1$ (KPa)
10 ซม.	142.85	594.48	180.72	45.18
15 ซม.	97.28	604.98	225.03	56.25

จากการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลของการทดสอบกับค่าที่คำนวณได้ ทำให้ยืนยันได้ว่า ค่า  $k$  ของเสาไม่ได้เท่ากับ 1 อย่างที่คาดเดาไว้ เพราะความหนาของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่

มีเหล็ก มีการเกิดโมเมนต์ที่ปลายเสาทำให้ปลายเสาไม่ได้เป็นแบบยึดหมุน เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดของเสาจริงที่รับได้มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้เมื่อ  $k$  เป็น 1

และเมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่คำนวณได้ของเสาที่  $k$  เท่ากับ 0.5 แล้ว ทำให้ทราบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของเสาที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ หากแยกพิจารณาแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กความหนา 10 ซม. ค่ากำลังอัดที่คำนวณได้ คือ 180 kN ส่วนค่าที่ทดสอบได้คือ 142.85 kN ค่าที่หายไปนั้นจะไปเกิดเป็นโมเมนต์ดัดที่ปลายเสาแทนตามภาพ Interaction Diagram ในรูป 3-15 ที่จุด B เมื่อพิจารณาจากรูปแบบการพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. วัสดุผิวหน้าเกิดการหักงอ และแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กไม่เกิดการโก่งงอ ตรงกับพฤติกรรมการพังของเสายาวแบบการพังที่วัสดุ (Material Failure)

และเมื่อพิจารณาแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กความหนา 15 ซม. ค่ากำลังรับแรงอัดที่คำนวณได้คือ 225.03 kN ส่วนค่าที่ทดสอบได้คือ 97.28 kN จะเห็นได้ว่าค่าที่คำนวณได้มากกว่าค่าจากการทดสอบพอสมควร โดยเมื่อพิจารณาตามภาพ Interaction Diagram ในรูป 3-15 ที่จุด C และจากการพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. จากการทดสอบ แผ่นประกอบเกิดการโก่งงอ และไม่สามารถรับแรงได้ ซึ่งตรงกับพฤติกรรมการพังแบบการโก่งงอ (Instability Failure)

ทั้งนี้การเพิ่มความหนาของวัสดุแกนกลางของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม ทำให้เกิดโมเมนต์ที่ดัดปลายเสามากกว่าเดิม ทำให้วัสดุแกนกลางที่เป็นฉนวนโฟมไม่สามารถทำให้วัสดุผิวหน้าคงรูปไว้ได้ เสมือนว่าแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กมีการค้ำยันด้านข้างน้อยเกินไป ทำให้แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 15 ซม. มีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าขนาด 10 ซม.

#### 4.5 สรุปการเลือกขนาดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลัง

##### 4.5.1 การพิจารณาเลือกจากกำลังรับแรงเฉือน

จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. สามารถรับแรงได้มากกว่าขนาด 10 ซม. แต่หากพิจารณาถึงกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแล้ว แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. มีกำลังรับแรงเฉือนที่สูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มความหนาของวัสดุแกนกลาง 50% ไม่ได้ทำให้ความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่เท่ากัน ทำให้กำลังรับแรงเฉือนต่างกัน

อีกประการหนึ่งในการพิจารณาจากความหนาของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก การเพิ่มความหนาของแผ่นประกอบ เป็นการลดพื้นที่ใช้สอยในการใช้งาน และเพิ่มราคาค่าวัสดุอีกด้วย ทำให้ผู้จัดทำพิจารณาเลือกแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. มาใส่เหล็กยึดยื่นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลัง

#### 4.5.2 การพิจารณาเลือกจากกำลังรับแรงอัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. สามารถรับกำลังรับแรงอัดได้มากกว่าแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. เนื่องจากพฤติกรรมการพัง (Mode of Failure) ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 10 และ 15 ซม. ไม่เหมือนกัน โดยแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. เป็นแบบการพังจากวัสดุ (Material Failure) ส่วนแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. เป็นการพังจากการโก่งงอ (Instability Failure)

และจากที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อการพิจารณาเลือกจากกำลังรับแรงเฉือน การเพิ่มขนาดนอกจากไม่สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ ยังเป็นการลดพื้นที่ในการใช้สอยและเพิ่มราคาค่าวัสดุอีกด้วย ผู้จัดทำจึงพิจารณาเลือกแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. มาพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังต่อไป

### 4.6 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) แบบมีเหล็ก

#### 4.6.1 ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก



รูป 4-12 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

จากการทดสอบเมื่อแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กรับแรงกดไปเรื่อยๆ โฟมและเหล็กจะทำหน้าที่รับแรงร่วมกัน หลังจากทีโฟม EPS ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กรับแรงกดไม่ได้แล้ว สังเกตจากเสียงโฟม EPS ฉีกขาดในขณะที่ทดสอบ เหล็กจะทำหน้าที่รับแรงต่อไปอีก

จนเกิดการบิดงอเสียรูป และไม่สามารถรับแรงต่อได้ ทำให้กำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กเพิ่มขึ้น



รูป 4-13 การพังของในรูปแบบการรับแรงเฉือนของโฟม

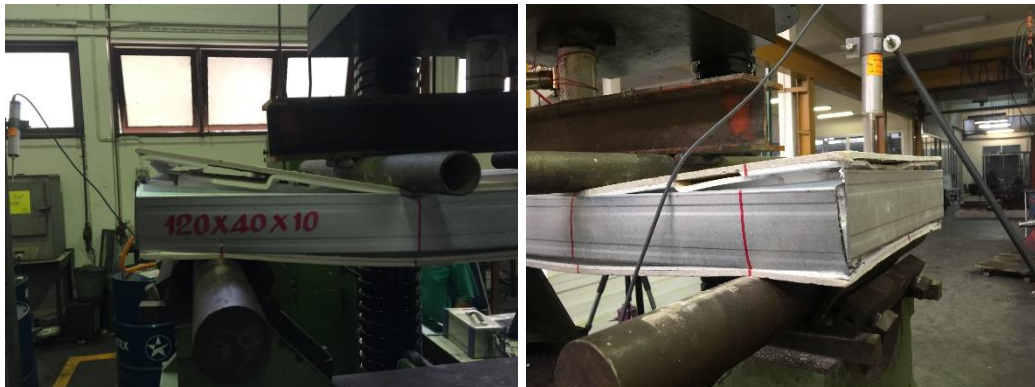


รูป 4-14 การพังของเหล็กจากการบิดงอเสียรูป

จากการทดสอบทำให้ทราบค่าความสามารถในการรับแรงทำให้ทราบค่าแรงกดสูงสุดที่เหล็กรับได้รวมถึงการคำนวณหาค่าแรงเฉือนสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กจากสมการ (1) ดังแสดงในตาราง 4-9

ตาราง 4-9 แรงกดสูงสุดที่โฟมและเหล็กรับได้และแรงเฉือนสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

ชื่อ	Psteel (N)	Shear Strength (MPa)
WBS10_01	11,166	0.148
WBS10_02	13,123	0.174
WBS10_03	11,500	0.153
average	11,930	0.159



รูป 4-15 การพียงของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

การวิเคราะห์ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

จากการนำค่าแรงกดที่ได้มาวาดกราฟ Load-Deflection จะเห็นว่ากราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กรับแรงได้มากกว่ากราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็ก ดังรูป 4-16

จากการพิจารณากราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก กราฟจะแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่โฟมและเหล็กรับแรงกับช่วงที่เหล็กรับแรงอย่างเดียวสังเกตจากค่าความชันของกราฟช่วงแรกที่เหล็กและโฟมรับแรงไปด้วยกันค่าความชันของกราฟมีค่ามากกว่าช่วงหลัง ที่เหล็กรับแรงอย่างเดียว



รูป 4-16 กราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กและไม่มีเหล็ก

จากการทดสอบทำให้ทราบว่า การใส่เหล็กเสริมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมสามารถช่วยให้แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมรับแรงได้มากขึ้น รวมทั้งค่า Shear Strength ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าแรงกดสูงสุดที่รับได้เพิ่มขึ้นประมาณ 50 % และค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นประมาณ 51%

#### 4.6.2 การคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

ตาราง 4-10 ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการคำนวณของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

ชื่อ	P max (N)	Calculate Shear Strength (MPa)	Test Shear Strength (MPa)
WBS10_01	11,166	0.159	0.148
WBS10_02	13,123	0.187	0.174
WBS10_03	11,500	0.164	0.153
average	11,930	0.170	0.159

จากตาราง 4-10 แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณประมาณ 7% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการประกอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมประกอบได้ไม่แนบสนิทหรือเป็นเนื้อเดียวกันทั้งชิ้นงาน และมีการตัดเนื้อโฟมออกเล็กน้อยเพื่อให้สามารถใส่เหล็กได้ง่ายทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจริงเล็กน้อย

### 4.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) แบบมีเหล็ก

#### 4.7.1 ผลการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก



รูป 4-17 การทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

จากการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กดังรูป 4-17 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กจะเป็นการพังกรณีการพังจากวัสดุ (Material Failure) ซึ่งแสดงในรูป 4-18



รูป 4-18 การพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

หลังจากการทดสอบทำให้ทราบค่าแรงกดสูงสุดที่แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กรับได้ และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัด รวมถึงนำค่าที่เก็บรวบรวมได้มาวาดกราฟ Load-Deflection ดังแสดงในตาราง 4-11 และรูป 4-21

ตาราง 4-11 แรงกดและกำลังรับแรงอัดสูงสุดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

ชื่อ	Max Load (kN)	Compressive Strength (MPa)
WCS10_01	175.185	1.460
WCS10_02	188.260	1.569
Average	181.722	1.514

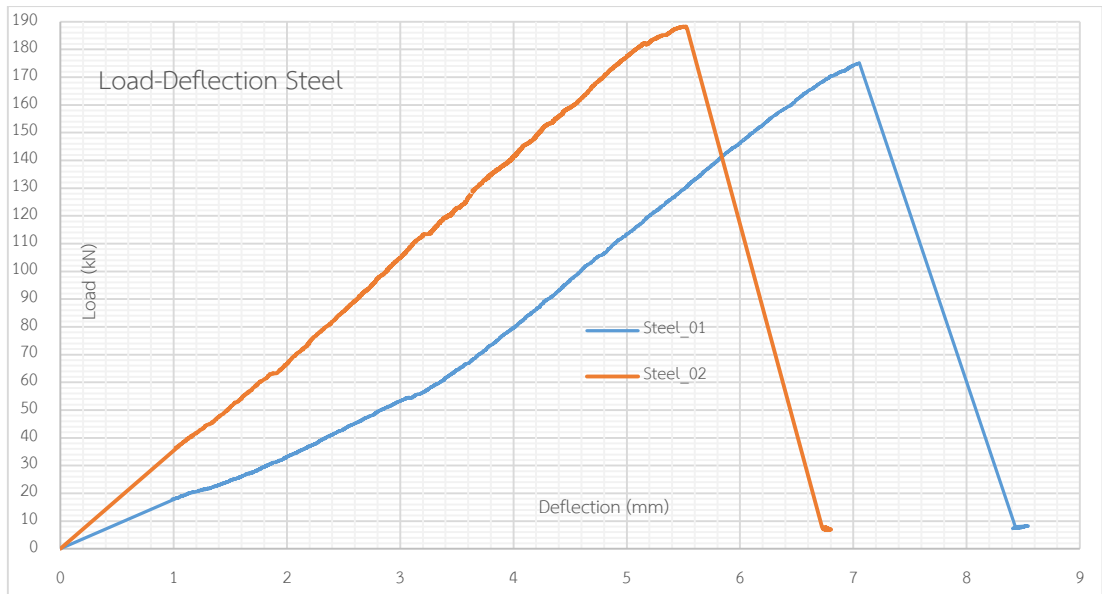


รูป 4-19 การฟุ้งของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก



รูป 4-20 การฟุ้งของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

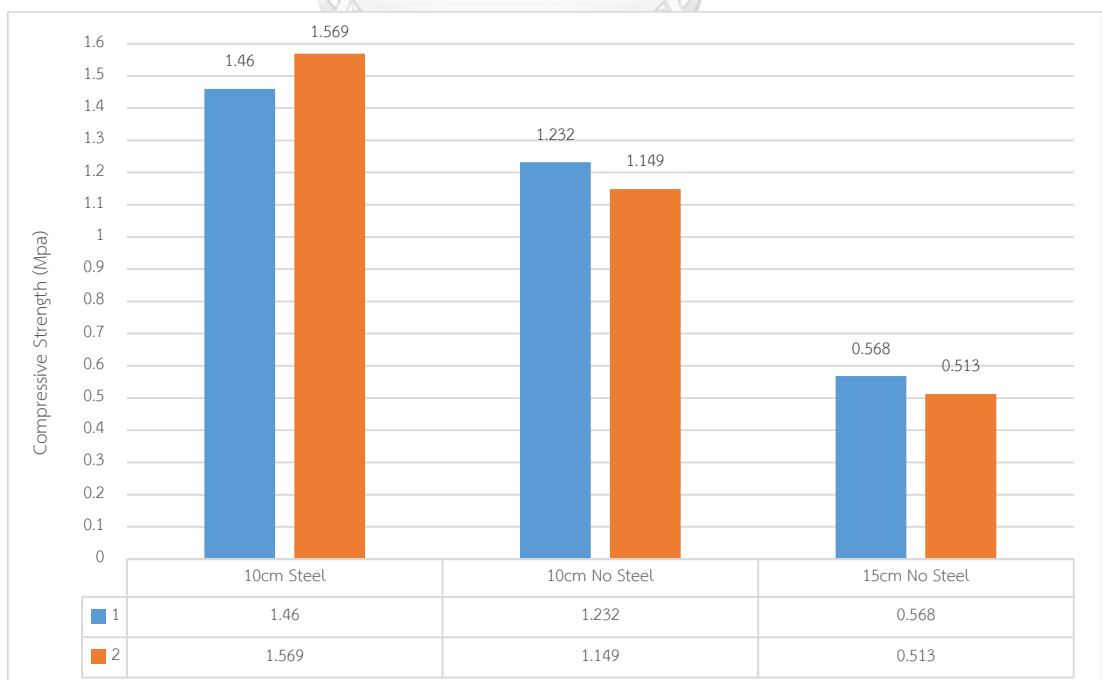




รูป 4-21 กราฟเปรียบเทียบ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม.

ค่าที่ได้จากการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม. มีค่าใกล้เคียงกันคือ 175.185 kN และ 188.260 kN รวมถึงกราฟ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม. นี้ก็มีรูปร่างไปในทางเดียวกัน

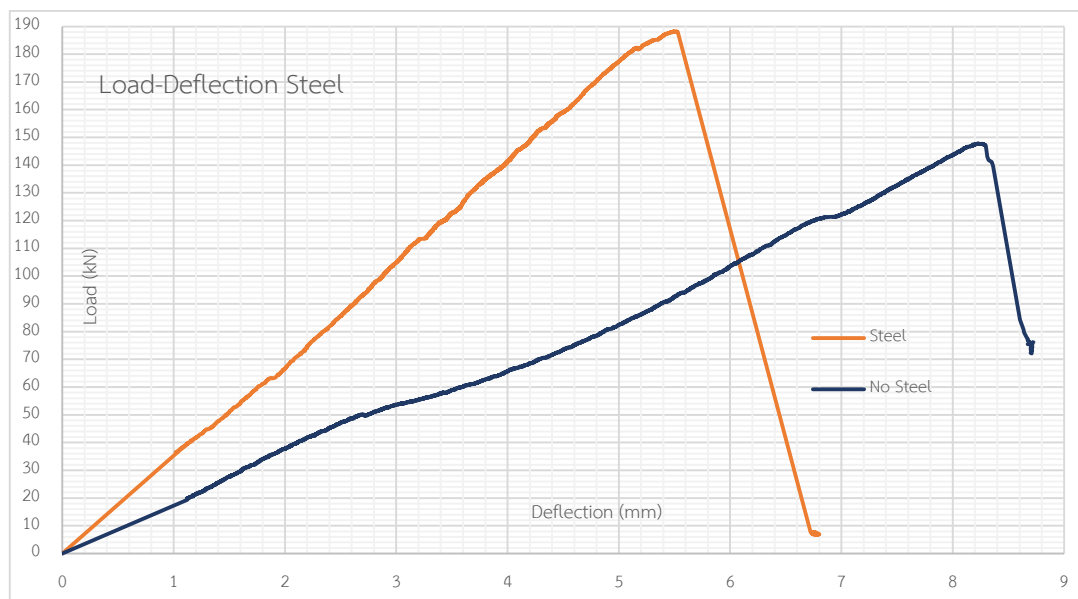
#### 4.7.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ



รูป 4-22 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงกดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม

จาก

รูป 4-22 ทำให้ทราบว่ากำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม. มีค่ามากที่สุดและแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยลงมา ส่วนแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 15 ซม. มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด รูปแบบการพังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กเป็นการพังของวัสดุ (Material Failure) เช่นเดียวกับแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.



รูป 4-23 การเปรียบเทียบ Load-Deflection ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กและไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.

#### 4.7.3 การคำนวณกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก

ตาราง 4-12 ค่ากำลังรับแรงอัดของการทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กกับมีเหล็ก เสาสั้น และเสายาวที่ค่า  $k$  0.5 และ 1

ขนาด	กำลังอัดจากการทดสอบ (KPa)	กำลังอัดเสาสั้น (KPa)	กำลังอัดเสายาว $k:0.5$ (KPa)	กำลังอัดเสายาว $k:1$ (KPa)
10 ซม.ไม่มีเหล็ก	142.85	594.48	180.72	45.18
10 ซม.มีเหล็ก	181.72	693.34	193.44	48.36

จากตาราง 4-12 ทำให้ทราบว่าเมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กเทียบกับแบบไม่มีเหล็กแล้ว มีความสอดคล้องกันโดยการเพิ่มเหล็กจะเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมได้ประมาณ 27% และกำลังรับแรงอัดของเสาที่ได้จาก

การทดสอบมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดเสายาวที่ได้จากการคำนวณ  $k$  เท่ากับ 0.5 ค่าที่หายไปนั้นจะ  
ไปเกิดเป็นโมเมนต์ดัดที่ปลายเสาแทนตามภาพ Interaction Diagram ในรูป 3-15 ที่จุด B

#### 4.8 การทดสอบการทนไฟ (Combustibility)

##### 4.8.1 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบการทนไฟ ตามมาตรฐาน BS 476 part 20 เกิด Insulation ที่ 11 นาทีและ  
เกิด Integrity ที่ 16 นาทีดังรูป 4-24 โดยการควบคุมไฟของเตาเป็นไปตามรูป 4-25

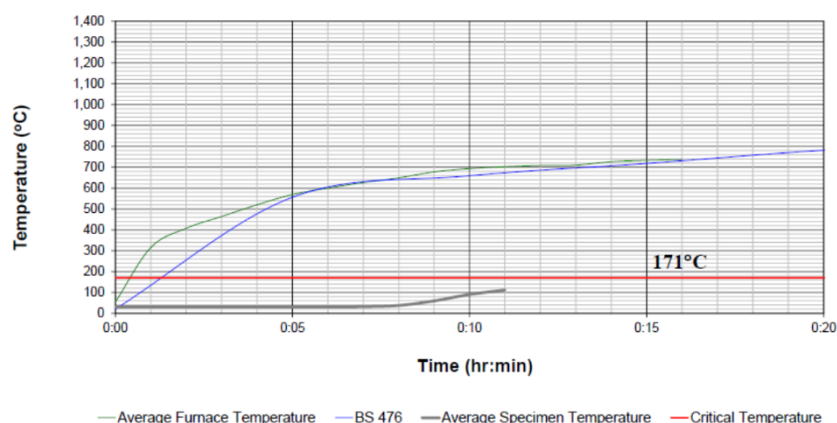
**TEST RESULTS** : The non-loadbearing element of construction described above has the fire resistance of  
each criterion for the period stated:  
(The test results are good only for the specimen tested.)

Criteria	Fire Resistance (hr:min)	Remarks
Insulation	0:11	The maximum temperature of the unexposed face of the specimen exceeded $180^{\circ}\text{C}$ above the initial mean value of $31^{\circ}\text{C}$ .
Integrity	0:16	The specimen had a through gap in which the 25 mm diameter gap gauge could penetrate such that the end of the gauge projected into the furnace.

รูป 4-24 ผลการทดสอบการทนไฟของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม

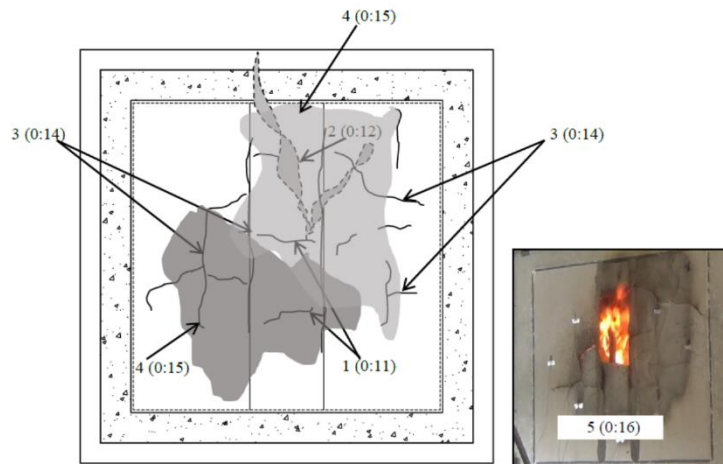
โดยจากการสังเกตการณ์ในขณะที่มีการทดสอบช่วงนาทีที่ 11 เกิดรอยร้าวหลายรอยที่กลาง  
ชิ้นงาน นาทีที่ 12 สังเกตเห็นควันลอยออกมาจากรอยร้าว นาทีที่ 14 เกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้น นาทีที่ 15  
เกิดการเผาไหม้ที่แผ่นวัสดุผิวหน้าของชิ้นงาน นาทีที่ 16 เกิดช่องว่างขนาดเกิด 25 mm ดังแสดงใน  
รูป 4-26

FURNACE TEMPERATURE



รูป 4-25 การควบคุมอุณหภูมิของไฟภายในเตาเผาและอุณหภูมิของชิ้นงาน

No.	Time (hr:min)	Observations
1	0:11	Multiple cracks were observed at the middle part of the specimen.
2	0:12	Smoke leaking from the cracks.
3	0:14	Additional cracks were observed on the unexposed face of the specimen.
4	0:15	Multiple burnt areas were observed on the unexposed face of the specimen.
5	0:16	The specimen had a through gap in which the 25 mm diameter gap gauge could penetrate such that the end of the gauge projected into the furnace.



รูป 4-26 เวลาที่เกิดรอยร้าวต่างๆ

ภายหลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น พบว่าวัสดุผิวหน้าส่วนที่ไม่โดนไฟเกิดการไหม้ประมาณ 65% ส่วนด้านที่โดนไฟนั้นเกิดการไหม้ประมาณ 80% ของทั้งหมด เหล็กรูปตัวซีที่ใช้ในการประกอบเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมเกิดการโก่งงอเสียรูป ส่วนโฟม EPS ที่เป็นวัสดุแกนกลางของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมละลายทั้งหมดดังรูป 4-27



รูป 4-27 ด้านที่ไม่โดนไฟหลังการทดสอบ (ซ้าย) ด้านที่โดนไฟหลังการทดสอบ (ขวา)

#### 4.8.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลที่ได้จากการทดสอบ ทำให้ทราบว่าผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟม มีความสามารถในการทนไฟได้น้อย เนื่องจากวัสดุหลักของผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟมชนิดนี้คือ โฟม EPS ชนิดไม่

ลามไฟ ถึงแม้ว่าโฟม EPS จะมีความเป็นฉนวนมาก แต่หากได้รับความร้อนเกินกว่าค่าการเผาไหม้ของ โฟม EPS แล้วโฟม EPS จะละลายกลายเป็นของเหลวทำให้ไม่สามารถทนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงได้

#### 4.9 การทดสอบค่าความเป็นฉนวน (Thermal Conductivity)

##### 4.9.1 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบค่าความเป็นฉนวนของผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟม ตามมาตรฐาน ASTM C 518 เพื่อหาค่าการนำความร้อน (K) และค่าความเป็นฉนวนความร้อน (R) ที่ความหนาต่างๆกัน ได้ ค้างตาราง 4-13

ตาราง 4-13 ค่าการนำความร้อน (K) และ ฉนวนความร้อน (R)

ชื่อ	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)	การนำความร้อน : K (W/m.K)	ฉนวนความร้อน : R (m <sup>2</sup> K/W)
HF25	300	300	27	0.054	0.494
HF50	300	300	51	0.048	1.066
HF75	300	300	76	0.050	1.531

ตาราง 4-14 ค่าการนำความร้อนของตัวกลางชนิดต่างๆ

Thermal conductivity (k) (W/m C)	ไอน้ำ	อากาศ	น้ำ	น้ำแข็ง	เหล็ก
	0.016	0.025	0.58	2.18	80

##### 4.9.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากตาราง 4-13 ทำให้ทราบว่าค่าการนำความร้อน (K) ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมมีค่าใกล้เคียงกันหรือคงที่โดยค่าเฉลี่ยของค่าการนำความร้อน (K) ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมคือ 0.051 W/m.K ซึ่งหากเปรียบเทียบกับตาราง 4-14 แล้วค่าการนำความร้อนเฉลี่ย (K) ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมนี้ถือว่าค่าการนำความร้อน (K) น้อยมาก คือเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี

ทั้งนี้จากตาราง 2-6 ค่าการนำความร้อน (K) ของโฟม EPS คือระหว่าง 0.033-0.039 ขึ้นกับความหนาแน่นของโฟม และจากตาราง 2-4 ค่าการนำความร้อน (K) ของแผ่นซีเมนต์คือ 0.25 ซึ่งค่าการนำความร้อน (K) ของซีเมนต์มากกว่าค่าการนำความร้อน (K) ของโฟม EPS ประมาณ 7 เท่าทำให้ค่าการนำความร้อน (K) ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมมากกว่าค่าการนำความร้อน (K) ของโฟม EPS อยู่เล็กน้อย

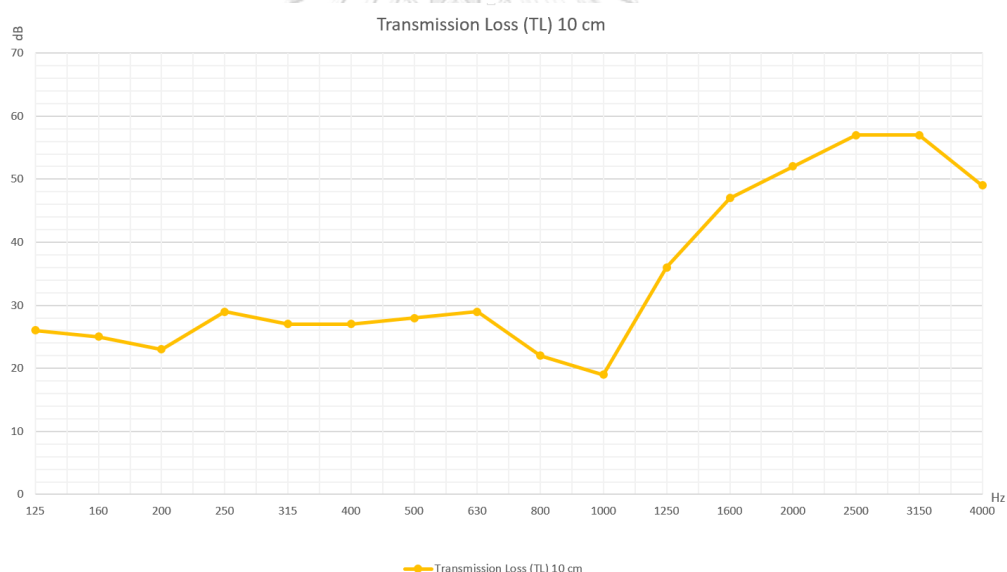
จากสมการ (12) ค่าความเป็นฉนวนความร้อน (R) นั้นแปรผันตรงตามความหนาของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมทำให้ค่าความเป็นฉนวน (R) ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมจะเพิ่มขึ้น

อย่างมีนัยยะ และเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องทดสอบทำให้ไม่สามารถทดสอบแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาดความหนา 10 ซม. ซึ่งเป็นความหนาหลักที่ใช้ในการทดสอบ จึงทำการประมาณค่าความเป็นฉนวนความร้อนจากสมการ (12) โดยให้ค่าการนำความร้อน (K) เท่ากับ 0.051 และความหนาของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมเท่ากับ 100 mm จะได้ค่าความเป็นฉนวน (R) เท่ากับ 1.961  $\text{m}^2\text{K/W}$  ซึ่งค่าความเป็นฉนวน (R) ที่ได้นี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลคุณสมบัติของผนังชนิดอื่นๆได้

#### 4.10 การทดสอบการส่งผ่านของเสียง (Sound Transmission)

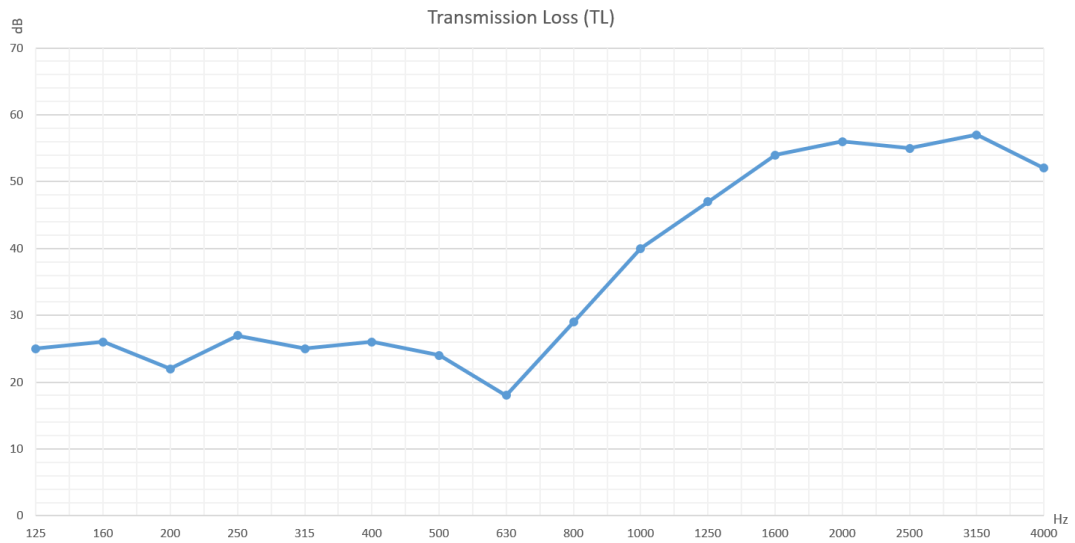
##### 4.10.1 ผลการทดสอบ

จากการทดสอบการส่งผ่านของเสียงทำให้ทราบว่าค่า STC ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาดความหนา 10 ซม. คือ  $\text{STC}=24$  โดยแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาดความหนา 10 ซม. สามารถกันเสียงช่วงความถี่ 1000 Hz ได้น้อยที่สุดคือ  $\text{TL}=19$  และกันเสียงช่วงความถี่ 2500-3150 Hz ได้ดีที่สุดคือ  $\text{TL}=57$  ดังแสดงในรูป 4-28



รูป 4-28 ค่า Transmission Loss ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาดความหนา 10 ซม.

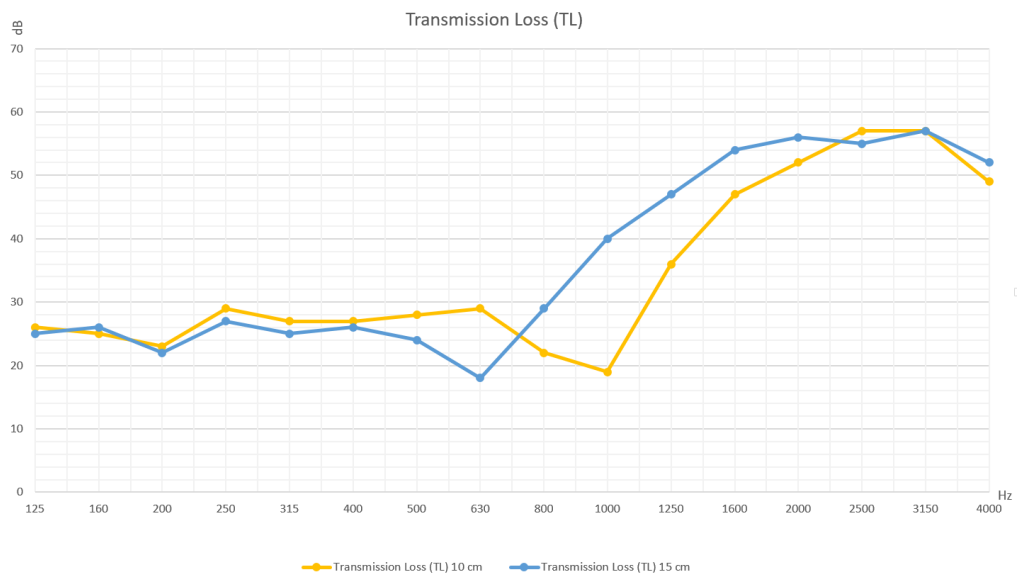
จากการทดสอบการส่งผ่านของเสียงทำให้ทราบว่าค่า STC ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาดความหนา 15 ซม. คือ  $\text{STC}=25$  โดยแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาดความหนา 15 ซม. สามารถกันเสียงช่วงความถี่ 630 Hz ได้น้อยที่สุดคือ  $\text{TL}=18$  และกันเสียงช่วงความถี่ 3150 Hz ได้ดีที่สุดคือ  $\text{TL}=57$  ดังแสดงในรูป 4-29



รูป 4-29 ค่า Transmission Loss ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาดความหนา 15 ซม.

#### 4.10.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบการส่งผ่านของเสียงของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาดความหนา 10 ซม. และขนาดความหนา 15 ซม. มีค่าใกล้เคียงกันคือ  $STC=24$  และ  $25$  ตามลำดับ การเพิ่มความหนาของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมจึงสามารถช่วยเพิ่มค่า  $STC$  ได้เพียงเล็กน้อย



รูป 4-30 การเปรียบเทียบค่า Transmission Loss ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 10 และ 15 ซม.

แต่หากพิจารณาถึงค่า TL ในช่วงความถี่ 125-500 Hz จะเห็นว่า ค่า TL ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 15 ซม. มีค่าใกล้เคียงกับค่า TL ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 10 ซม.

แต่ที่ช่วงความถี่ 800-2000 Hz ดังรูป 4-30 จะเห็นว่าค่า TL ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 15 ซม. มีค่ามากกว่าค่า TL ของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมขนาด 10 ซม. พอสมควรซึ่งหากพิจารณาในส่วนของค่า TL นี้ด้วย การเพิ่มขนาดความหนาของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมสามารถช่วยเพิ่มการป้องกันเสียงได้พอสมควร





## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

#### 5.1 การพัฒนาคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟม

จากการทดสอบด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 และ 15 ซม. เพื่อเลือกขนาดที่เหมาะสมในการใส่เหล็กกริดเอ็นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมประเภทนี้ สรุปได้ว่าแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม. มีความเหมาะสมในการนำมาใส่เหล็กกริดเอ็นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านกำลังมากกว่าขนาด 15 ซม.

ในการเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด การเสริมเหล็กเข้าไปในผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟมสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมได้มากขึ้นประมาณ 27% ของกำลังรับแรงอัดของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบไม่มีเหล็กขนาด 10 ซม.

ในการเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือน การใส่เหล็กเสริมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของแผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมสามารถช่วยให้แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมรับแรงได้มากขึ้นประมาณ 51% อีกทั้งหลังจากที่เหล็กเกิดการเสียรูปไปแล้ว แผ่นประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็ก ไม่เกิดการพังทลายที่เหมือนกับแบบไม่มีเหล็ก เพราะว่ามีเหล็กไม่เกิดการขาด ซึ่งเป็นการแจ้งเตือนล่วงหน้าเพื่อให้สามารถแก้ปัญหาได้ก่อนเกิดอุบัติเหตุขึ้นอีกด้วย

#### 5.2 คุณสมบัติของผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม.

จากการทดสอบคุณสมบัติของผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม. ทั้งหมดแล้วได้ค่าสรุปดังตาราง 5-1

ตาราง 5-1 คุณสมบัติของผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟมแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม.

คุณสมบัติ	หน่วย	ผนังประกอบที่เป็นฉนวนโฟม
อัตราการทนไฟ (10 cm)	Hr:Min	0:15
การนำความร้อน (10 cm)	W/m.K	0.051
ค่าฉนวนความร้อน (10 cm)	m <sup>2</sup> K/W	1.961
การส่งผ่านของเสียง (10 cm)	STC	24
กำลังรับแรงอัด	MPa	1.5
กำลังรับแรงเฉือน	MPa	0.159

### 5.3 การเปรียบเทียบกับผนังชนิดอื่น

ตาราง 5-2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของผนังประกอบที่เป็นฉนวนโพลีเอทิลีนแบบมีเหล็กขนาด 10 ซม. กับผนังชนิดอื่นๆ

คุณสมบัติ	หน่วย	ผนังอิฐ มวลเบา	ผนังอิฐมวล เบา	ผนังอัด แรงชนิด กลวง	ผนังประกอบที่ แกนกลางเป็น เม็ดโพลีเอทิลีน คอนกรีต	ผนัง ประกอบที่ เป็นฉนวน โพลีเอทิลีน
อัตราการ ทนไฟ	Hr:Min	1:00– 2:00	3:00-4:00	4:00	3:00	0:15
การนำ ความร้อน	W/m.K	1.12– 1.14 (6.5 cm)	0.089-0.144 (7.5 cm)	0.175 (9 cm)	0.23 (10 cm)	0.051 (10 cm)
ค่าฉนวน ความร้อน	m <sup>2</sup> K/ W	0.057– 0.058 (6.5 cm)	0.52-0.84 (7.5 cm)	1.14 (9 cm)	0.94 (10 cm)	1.961 (10 cm)
การส่งผ่าน ของเสียง	STC	36–38	36	41-43	35-40	24
กำลังรับ แรงอัด	MPa	1.96– 3.43	2.94-4.90	9.806	3.4-3.9	1.5
กำลังรับ แรงเฉือน	MPa	-	-	-	-	0.159

### 5.4 ข้อเสนอแนะในการทำงาน

การทดสอบในงานวิจัยฉบับนี้ยังสามารถเพิ่มเติมการทดสอบอื่นๆที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับผนังแต่ละประเภทได้เช่น การทดสอบห้องทนไฟ การทดสอบการรับแรงกระแทก การทดสอบความสามารถในการรับแรงเฉือนของวัสดุยึดผนัง การซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

- Abdolpour, H. (2017). Development of prefabricated modular houses in pure composite sandwich panels.
- Allen, H. G. (2013). *Analysis and design of structural sandwich panels: the commonwealth and international library: structures and solid body mechanics division*: Elsevier.
- ASTM, C. E72. *Standard Test Methods for Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction*.
- ASTM, E. Standard test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions and elements. *STC values*.
- D'Alessandro, V., Petrone, G., Franco, F., & De Rosa, S. (2013). A review of the vibroacoustics of sandwich panels: Models and experiments. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 15(5), 541-582.
- Davies, J. M. (2008). *Lightweight sandwich construction*: John Wiley & Sons.
- Hibbeler, R. C. (2013). *Statics and mechanics of materials*: Pearson Higher Ed.
- ISO, E. (2002). 11925-2, Reaction to fire tests--Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame--Part 2: Single-flame source test. *International Organization for Standardisation*.
- M-06, A. C. C. (2011). Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure: ASTM International West Conshohocken, PA.
- Morgan, A. B., & Toubia, E. (2014). Cone calorimeter and room corner fire testing of balsa wood core/phenolic composite skin sandwich panels. *Journal of Fire Sciences*, 32(4), 328-345.
- Rejab, M., & Cantwell, W. (2013). The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels. *Composites Part B: Engineering*, 47, 267-277.
- Standard, A. C518-10, 2010, "Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, DOI: 10.1520/C0518-10.
- Vinson, J. R. (1999). *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*: CRC Press.
- Zenkert, D. (1995). *An introduction to sandwich construction*: Engineering materials advisory services.

กรองทิพย์, เ. (2560). การทดสอบสภาพนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต. วารสารกรมวิทยาศาสตร์  
บริการ, 190, 9-11.

สมจิตร, พ. การวัดสภาพการนำความร้อนของวัสดุ. Retrieved from <http://www.eic.co.th> website:  
[http://www.eic.co.th/Portals/4/download/Thermal%20conductivity%20measure  
ment.pdf](http://www.eic.co.th/Portals/4/download/Thermal%20conductivity%20measurement.pdf)



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายธนีสร์ ชาณสุทธิกนก
วัน เดือน ปี เกิด	21 ธันวาคม 2536
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลจังหวัดราชบุรี
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษา โรงเรียนเบญจมราชูทิศราชบุรี ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	99/90 ถนนตากสิน-เพชรเกษม แขวงบुकคโโล เขตธนบุรี กทม. 10600



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY