

## กำลังอัดและการถ่ายเทความร้อนของผนังรับแรงที่ทำจากวัสดุผสมระหว่างพลาสติกพีวีซีและซีลื้อยไม้ที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน COMPRESSIVE STRENGTH AND HEAT TRANSFER OF WOOD/PVC COMPOSITE WALL BEARING WITH VARIOUS CROSS SECTIONS

ธรรุ ภาคสัญไชย<sup>1,\*</sup>, ทวิช พูลเงิน<sup>1</sup>, ณรงค์ฤทธิ สมบัติสมภพ<sup>2</sup> และ วิชัย โรซาร์พิทักษ์<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

<sup>2</sup> กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

<sup>3</sup> บริษัท วี.พี. วูด จำกัด 72/1 หมู่4 ซอย41 ถนนสุขสวัสดิ์ ตำบลบางพิง จังหวัดสมุทรปราการ

\*Corresponding author address: Tarat.paksunchai@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษารูปแบบของผนังรับแรงหน้าตัดกลวงที่เหมาะสมโดยแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ของหน้าตัดซึ่งประกอบด้วย ความหนาแผ่นเอว ความกว้างแผ่นปีก และความหนาแผ่นปีก ที่ส่งผลต่อค่ากำลังอัดและการถ่ายเทความร้อนของผนังรับแรง ผนังรับแรงที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ผนังรับแรงที่มีอัตราส่วนความขลุ้ด (SR) เท่ากับ 15 และ 30 และเป็นผนังรับแรงหน้าตัดกลวงที่ทำจากวัสดุผสมระหว่างพลาสติกพีวีซีและซีลื้อยไม้ (WPVC) พารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ความหนาแผ่นเอวขนาด 12 และ 20 มิลลิเมตร ความกว้างแผ่นปีกขนาด 70 100 และ 140 มิลลิเมตร และความหนาแผ่นปีก 20 และ 35 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าที่อัตราส่วนความขลุ้ดคงที่ การเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นเอว ความกว้างและความหนาของแผ่นปีก ส่งผลให้ผนังรับแรงหน้าตัดกลวงมีพื้นที่รับแรงมากขึ้นและส่งผลให้หน้าตัดรับกำลังอัดได้สูงขึ้นและมีการเสียรูปด้านข้างลดลง ในส่วนของการถ่ายเทความร้อนพบว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นเอว ความกว้างและความหนาของแผ่นปีก ส่งผลต่อช่องว่างอากาศภายในหน้าตัดสามารถต้านทานความร้อนได้มากขึ้นเช่นกัน ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นว่าเมื่อค่าอัตราส่วนความขลุ้ดของผนังสูงขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อผนังรับแรงหน้าตัดกลวงโดยทำให้ผนังรับแรงสามารถรับกำลังอัดลดลงและมีการเสียรูปด้านข้างเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ:** กำลังอัด, การถ่ายเทความร้อน, รูปแบบหน้าตัดกลวง, วัสดุผสมพลาสติกพีวีซีและซีลื้อยไม้, ผนังรับแรง

### Abstract

This work presented the effect of cross section parameters including web thickness, flange width, and flange thickness on the compressive strength and heat transfer of the hollowed wall panel. The wall panel of this investigation was the hollowed cross section with slenderness ratio (SR) of 15 and 30 and made from wood/PVC composite material. The wall cross section parameters used for this investigation were web thickness of 12 and 20 mm, flange width of 70 100 and 140 mm, and flange thickness of 20 and 35 mm, respectively. The obtained results indicate that increasing in web thickness, flange width and flange thickness to the hollowed cross section affected directly on compressive loading area of wall and resulted in higher compressive strength and lower lateral displacement. For heat transfer of the wall, increasing in web thickness, flange width and flange thickness also affected air volume in the cross section and then increased the temperature resistance. Moreover, increasing in wall slenderness ratio affected directly on hollowed wall panel which resulted in lower compressive strength and higher lateral displacement.

**Keywords:** Compressive strength, Heat transfer, Hollowed cross section, Wall bearing, Wood/PVC composite

### 1. คำนำ

ในอดีตถึงปัจจุบัน การก่อสร้างอาคารหรือบ้านพักอาศัย โดยส่วนใหญ่มักจะใช้ระบบการหล่อเสา-คานคอนกรีตเสริมเหล็กและผนังก่ออิฐฉาบปูน ซึ่งใช้เวลา แรงงาน และวัสดุในการก่อสร้างเป็นจำนวนมาก ทั้งยังมีวัสดุเหลือทิ้งจากการก่อสร้างสะสมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในเวลาต่อมาการก่อสร้างได้ยกระดับขึ้นโดยใช้ระบบที่เรียกว่า ชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Precast System) ระบบนี้สามารถช่วย

ลดระยะเวลาในการก่อสร้างและเศษวัสดุเหลือทิ้งได้ อีกทั้งยังสามารถควบคุมคุณภาพชิ้นส่วนสำเร็จรูปได้ ส่วนมากจะผลิตจากโรงงานและนำมาติดตั้งภายในพื้นที่ก่อสร้าง [1] แต่การก่อสร้างโดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการใช้เครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่เพื่อช่วยในการผลิต ขนย้าย และติดตั้ง ทำให้ราคาค่าต้นทุนในการก่อสร้างสูงขึ้นตามไปด้วย การก่อสร้างแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปจึงเหมาะกับโครงการบ้านพักอาศัยที่มีขนาดใหญ่ [2] ดังนั้นหากในอนาคตมีวัสดุทางเลือกที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความคงทนแข็งแรง และ

มีระบบก่อสร้างที่ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการทำงาน มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานโครงการ ขนาดเล็ก

จากการศึกษางานวิจัยเพื่อหาวัสดุทางเลือกชนิดใหม่ [3] พบว่า วัสดุผสมระหว่างพลาสติกและซีลี้อยไม้ (Wood-Plastic Composites หรือ WPC) คือ วัสดุทางเลือกที่สามารถทดแทนวัสดุ ก่อสร้างเดิม มีสมบัติตรงตามที่ต้องการ เช่น น้ำหนักเบา แข็งแรง เพียงพอ และสามารถอัดรีดขึ้นรูปหน้าต่างตันและหน้าต่างคกวงได้ หลายแบบหลายขนาด ในปัจจุบันพบว่า บริษัท วีพี วูด จำกัด [4] ได้ผลิตวัสดุประเภทนี้ออกจำหน่าย ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างพลาสติก พีวีซีกับซีลี้อยไม้เนื้อแข็ง (WPVC) ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบสมบัติของวัสดุ WPVC [5] พบว่า มีความแข็งแรง ทนทานต่อสภาพแวดล้อม มีน้ำหนักเบา ดูดซึมน้ำต่ำ ป้องกันปลวก ไม่ลามไฟ มีการบำรุงรักษาที่น้อยและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลในส่วนของระบบการก่อสร้าง ทางเลือกใหม่ พบว่าในหลาย ๆ ประเทศได้มีระบบการก่อสร้างแบบ Log Cabin [6] ซึ่งระบบนี้จะใช้ตัวผนังของบ้านรับน้ำหนักบรรทุก โครงสร้างของผนังถูกออกแบบให้เป็นชิ้นส่วนย่อยที่มีขนาดเล็ก แล้วนำมาประกอบเป็นชิ้นตามระดับความสูงเพื่อให้มีขนาดตามต้องการ ทำให้ระบบการก่อสร้างนี้มีความยืดหยุ่น ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักร ขนาดใหญ่ สามารถก่อสร้างในพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึงได้ รวมทั้งใช้ เวลาและแรงงานในการก่อสร้างน้อย

อย่างไรก็ตามการสร้างผนังรับแรงที่ติดนั้น นอกจากรับแรงกดใน แนวตั้งแล้ว การโก่งตัวด้านข้างต้องไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน และต้องคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ (Physical Environment) ด้วย ได้แก่ ความร้อน (Heat) แสงสว่าง (Light) และเสียง (Sound) [7] โดยปัจจัยเหล่านี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และตำแหน่งการจัดวางของตัวอาคารแล้ว ยังขึ้นอยู่กับ สมบัติของวัสดุที่ใช้ทำผนังของอาคารอีกด้วย โดยเฉพาะสมบัติทาง ความร้อนและสมบัติทางเสียง ผนังที่ดีควรสามารถที่จะป้องกันความ ร้อนและป้องกันเสียงได้ เพื่อให้ผู้พักอาศัยสามารถใช้ชีวิตประจำวัน ได้อย่างปกติโดยไม่เกิดความรำคาญ จากการศึกษางานวิจัยของ Pulngern และคณะ [8] ซึ่งได้ทดสอบกำลังอัด สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางเสียงของผนังที่ทำจากวัสดุผสมระหว่างพลาสติกพีวีซี และซีลี้อยไม้ พบว่าหน้าต่างมีผลกระทบต่อความสามารถในการรับ กำลังอัดและความร้อน แต่ในส่วนความสามารถในการป้องกัน เสียง พบว่าการลดระดับความดังของเสียงแต่ละหน้าต่างไม่แตกต่างกันมากเนื่องจากเสียงส่วนใหญ่ลอดผ่านช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนย่อย (Log element) จากงานวิจัย [8] ซึ่งชี้ให้เห็นถึงปัญหาของหน้าต่างของ ชิ้นส่วนย่อย ได้แก่ การเสียรูปแบบเฉพาะที่ของแผ่นเอวและการ วิบัติแบบทันทีทันใดเมื่อรับกำลังอัด ในส่วนของการต้านทานความ ร้อนพบว่าแผ่นปีกที่อยู่กึ่งกลางหน้าต่างเป็นสะพานความร้อนทำให้

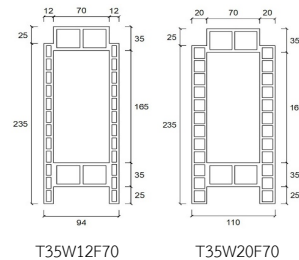
ประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนลดลง

ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงปัญหาดังกล่าวจึงได้ทำการปรับปรุงหน้าต่าง โดยเปลี่ยนแผ่นเอวและแผ่นปีกของชิ้นส่วนย่อยจากแผ่นตันบางมา เป็นแผ่นคกวงที่มีความหนาเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มเสถียรภาพขณะรับ น้ำหนักบรรทุก และนำแผ่นปีกที่อยู่กึ่งกลางหน้าต่างออกไปเพื่อขจัด ผลของสะพานความร้อน โดยรูปร่างหน้าต่างถูกพัฒนาขึ้นมีทั้งหมด 5 รูปแบบ นำมาศึกษาผลของความหนาแผ่นเอว ความกว้างแผ่นปีก และความหนาแผ่นปีก ที่มีต่อความสามารถในการรับกำลังอัดและ ถ่ายความร้อนของผนังรับแรงที่ทำจากวัสดุผสมระหว่างพลาสติก พีวีซีและซีลี้อยไม้

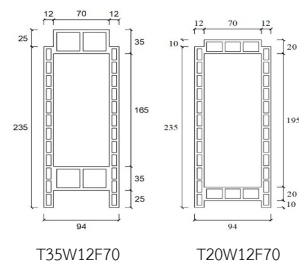
## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

### 2.1. ชิ้นส่วนย่อย (LOG ELEMENT)

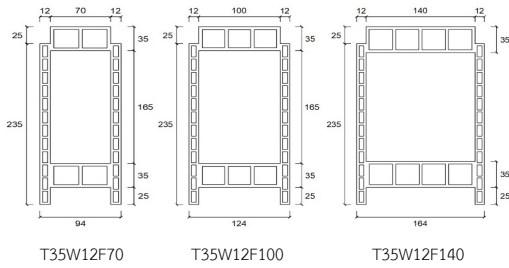
งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบชิ้นส่วนย่อยที่มีลักษณะแตกต่างกันทั้งหมด 5 รูปแบบ โดยชิ้นส่วนย่อยที่ใช้สำหรับศึกษาผลความ หนาแผ่นเอวคือ T35W12F70 และ T35W20F70 ผลความหนา แผ่นปีกคือ T20W12F70 และ T35W12F70 และผลความกว้าง แผ่นปีกคือ T35W12F70 T35W12F100 และ T35W12F140 มี ขนาดแสดงดังรูปที่ 1-3 ตามลำดับ ที่มีต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนัก บรรทุกแนวตั้งและการถ่ายความร้อน ชิ้นส่วนย่อยขึ้นรูปจากการ ประกอบแผ่นวัสดุผสม WPVC เข้าด้วยกัน มีชิ้นส่วนหลัก 2 ส่วนคือ แผ่นปีก (Flange) และแผ่นเอว (Web) ใช้ภายในกลุ่มไซยาโนอะครี เลต (Cyanoacrylate) ร่วมกับผงซีลี้อยเป็นวัสดุประสาน



รูปที่ 1 รูปแบบหน้าต่างที่ใช้ศึกษาผลความหนาแผ่น (มิติเป็น มม.)



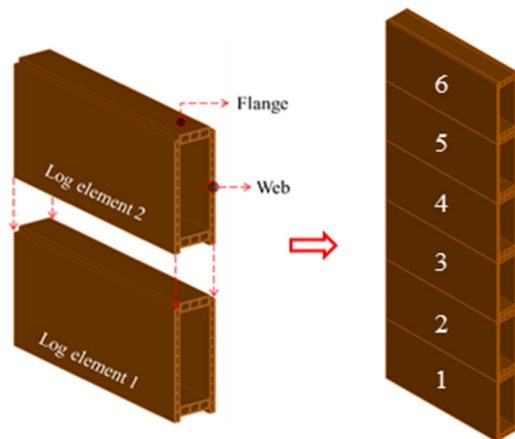
รูปที่ 2 รูปแบบหน้าต่างที่ใช้ศึกษาผลความหนาแผ่นปีก (มิติเป็น มม.)



รูปที่ 3 รูปแบบหน้าตัดที่ใช้ศึกษาผลความกว้างแผ่นปีก (มิติเป็น มม.)

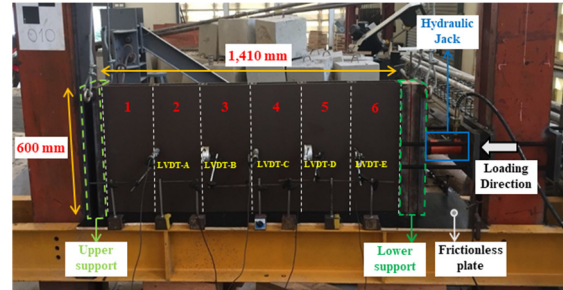
## 2.2. การทดสอบค่ากำลังอัดของผนังรับแรงวัสดุผสม WPVC ขนาดจำลอง

ผนังรับแรงขนาดจำลองเป็นผนังที่ใช้ความสูงเท่ากับครึ่งหนึ่งของความสูงจริงเพื่อลดความซับซ้อนในการทดสอบ ผนังมีค่าอัตราส่วนความชะลุด (ความสูงต่อความกว้าง) เท่ากับ 15 ชิ้นตัวอย่างผนังที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 5 รูปแบบ โดยมีขนาดความกว้าง 600 มิลลิเมตร สูง 1,410 มิลลิเมตร และหนา 94 มิลลิเมตร ผนังแต่ละรูปแบบเกิดจากการซ้อนกันของชิ้นส่วนย่อย 6 ชิ้นขึ้นไปในแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 4



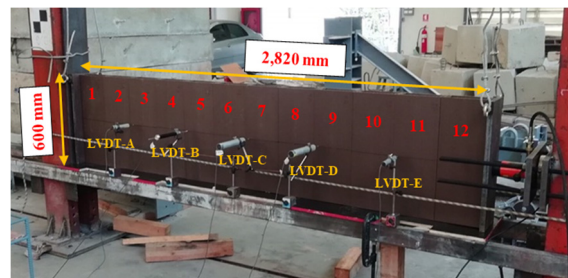
รูปที่ 4 ส่วนประกอบและการต่อกันของชิ้นส่วนย่อย

การทดสอบนี้ติดตั้งผนังในแนวนอนเพื่อความปลอดภัยระหว่างการทดสอบ โดยไม่พิจารณาผลของน้ำหนักผนัง (self-weight) ขั้นตอนและวิธีการทดสอบดำเนินการตามมาตรฐานทดสอบผนังอาคาร ASTM E72-15 [9] การให้แรงอัดใช้ชุดแม่แรงไฮดรอลิกต่อเข้ากับเครื่องเซนเซอร์วัดแรงชนิดกลวง ติดตั้งเครื่องวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างทั้งหมด 5 ตัว (LVDT-A ถึง LVDT-E) ไว้บริเวณจุดต่อระหว่างชิ้นส่วนย่อยเพื่อวัดการโก่งตัวของผนังขณะให้แรงอัด บริเวณด้านล่างผนังมีแผ่นไม้อัดสี่เหลี่ยมรองรับเพื่อหลีกเลี่ยงแรงเสียดทานที่อาจเกิดขึ้นเมื่อผนังมีการโก่งตัว ตำแหน่งของชิ้นตัวอย่างและอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดสอบกำลังอัดของผนังรับแรงวัสดุผสม WPVC ที่อัตราส่วนความชะลุด 15

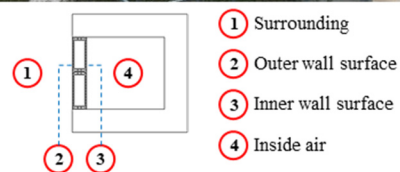
## 2.3. การทดสอบค่ากำลังอัดของผนังรับแรงวัสดุผสม WPVC ขนาดความสูงจริง



รูปที่ 6 การทดสอบกำลังอัดของผนังรับแรงวัสดุผสม WPVC ขนาดใช้งานจริงที่อัตราส่วนความชะลุด 30

เพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเมื่อผนังมีความสูงเท่ากับความสูงใช้งานจริง คือ 2,820 มิลลิเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนความชะลุดเพิ่มขึ้นเป็น 30 ชิ้นส่วนย่อยเพิ่มจำนวนจาก 6 ชิ้น เป็น 12 ชิ้น การทดสอบนี้ใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกันกับการทดสอบผนังจำลอง ในส่วนของเครื่องวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างติดตั้งแบบจุดเว้นจุดรวมทั้งหมด 5 ตัว โดยรูปแบบการติดตั้งชิ้นตัวอย่างและอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 6

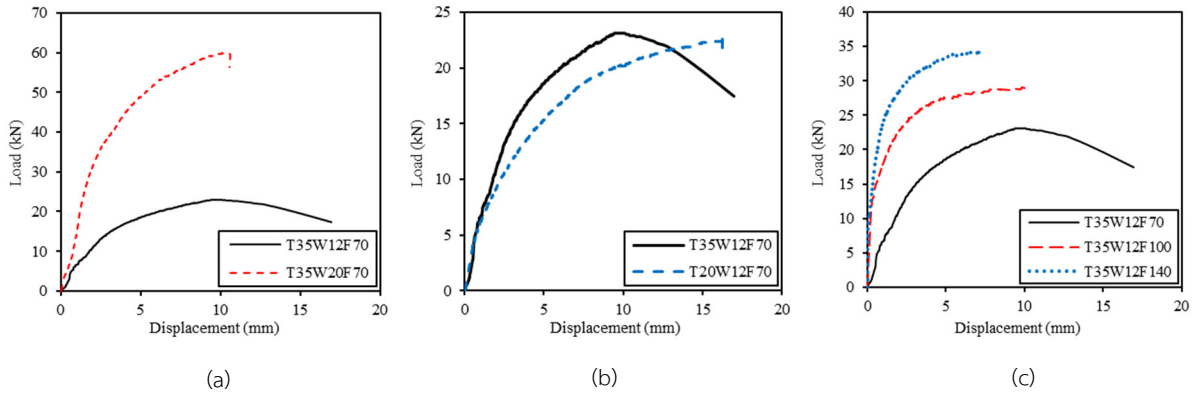
## 2.4. การทดสอบการถ่ายเทความร้อนของผนังรับแรงวัสดุผสม WPVC



รูปที่ 7 การทดสอบการถ่ายเทความร้อนของผนังวัสดุผสม WPVC และตำแหน่งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

ในการทดสอบการถ่ายเทความร้อนประยุกต์ใช้วิธีการศึกษาจากงานวิจัยในอดีต [10-13] โดยใช้ชิ้นส่วนย่อยซ้อนกัน 2 ชั้น ประกอบเข้ากับกล่องฉนวนที่ทำจากโฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene Foam) ความหนา 15 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีการควบคุมปริมาตรอากาศภายในกล่องให้มีค่าเท่ากับ

พร้อมทั้งทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิชนิด K (Thermocouple) ไว้ที่ ด้านนอกกล่องทดสอบ (Surrounding) เพื่อวัดอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมโดยรอบ ผิวผนังด้านนอก (Outer wall surface)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดสูงสุดกับการเสียรูปด้านข้างเปรียบเทียบผนัง (a)T35W12F70 และ T35W20F70; (b)T35W12F70 และ T20W12F70; (c)T35W12F70, T35W12F100 และ T35W12F140

ผิวผนังด้านใน (Inner wall surface) และด้านในกล่องทดสอบ (Air inside the test box) ดังแสดงในรูปที่ 7 ทำการต่อเซนเซอร์วัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger) โดยเก็บข้อมูลทุก 5 วินาที

กล่องทดสอบถูกติดตั้งที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตบางขุนเทียน โดยหันกล่องทดสอบด้านที่ติดตั้งชิ้นตัวอย่างไปทางทิศตะวันออก เก็บข้อมูลช่วงวันที่ 15 มกราคม – 15 กุมภาพันธ์ 2563 (ฤดูหนาว) รวมระยะเวลา 30 วัน ข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ผลพิจารณาจากวันที่สภาพอากาศร้อนที่สุดและต้องมิลักษณะเป็นท้องฟ้าแบบไม่มีเมฆ (Clear Sky Condition)

### 3. ผลและวิจารณ์ทดลอง

#### 3.1. ผลกระทบของความหนาแผ่นเอว ความหนาแผ่นปีก ความกว้างแผ่นปีก และค่าอัตราส่วนความขรุขระที่สุดที่มีต่อพฤติกรรมทางด้านทานแรงอัด

รูปที่ 8(A) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดสูงสุดกับการเสียรูปทางด้านข้างเปรียบเทียบระหว่างผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 12 มิลลิเมตร (T35W12F70) และ 20 มิลลิเมตร (T35W20F70) ผลที่ได้พบว่าผนังมีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 23.1 กิโลนิวตัน เป็น 59.9 กิโลนิวตัน คิดเป็น 2.6 เท่า โดยผนังทั้งสองมีพฤติกรรมในการรับแรงที่คล้ายคลึงกันในช่วงแรก แต่เมื่อน้ำหนักบรรทุกเกินกว่า 10 กิโลนิวตัน ผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 12 มิลลิเมตร (T35W12F70) เกิดการเสียรูปมากและวิบัติก่อน อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นเอวนอกจากจะเพิ่มพื้นที่รับแรงแล้วยังทำให้โครงสร้างโดยรวมมีเสถียรภาพมากขึ้นอีก

ด้วย

รูปที่ 8(B) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดสูงสุดกับการเสียรูปทางด้านข้างเปรียบเทียบระหว่างผนังที่มีความหนาแผ่นปีก 20 มิลลิเมตร (T20W12F70) และ 35 มิลลิเมตร (T35W12F70) ผลที่ได้พบว่า การเปลี่ยนความหนาแผ่นปีก ให้ค่าแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 23.0 กิโลนิวตัน และ 23.1 กิโลนิวตัน แสดงให้เห็นว่าความหนาแผ่นปีกไม่ได้ส่งผลกับความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุด แต่ส่งผลต่อพฤติกรรมของผนัง โดยผนังที่มีความหนาแผ่นปีกมากกว่าจะเกิดการเสียรูปทางด้านข้างน้อยกว่าเมื่อพิจารณาที่ค่าแรงอัดเท่ากัน และยังคงพบความแตกต่างของพฤติกรรมช่วงก่อนการวิบัติ กล่าวคือผนังที่มีความหนาแผ่นปีกสูงกว่าเกิดช่วงการลดลงของน้ำหนักบรรทุกก่อนการวิบัติ ในขณะที่ผนังที่มีความหนาแผ่นปีกน้อยกว่าเกิดการวิบัติทันทีเมื่อค่ากำลังอัดถึงจุดสูงสุด

รูปที่ 8(C) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดสูงสุดกับการเสียรูปทางด้านข้างเปรียบเทียบระหว่างผนังที่มีความกว้างแผ่นปีก 70 มิลลิเมตร (T35W12F70), 100 มิลลิเมตร (T35W12F100) และ 140 มิลลิเมตร (T35W12F140) ซึ่งให้เห็นว่าการเพิ่มความกว้างแผ่นปีก ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจาก 23.1 กิโลนิวตัน เป็น 29.1 กิโลนิวตัน และ 34.2 กิโลนิวตัน ตามลำดับ คิดเป็น 1.26 และ 1.48 เท่า อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าการเสียรูปทางด้านข้างลดลงเมื่อพิจารณาที่ค่าแรงอัดเท่ากัน แม้ว่าแผ่นปีกไม่ใช่ส่วนที่รับแรงอัดโดยตรง อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความกว้างแผ่นปีกส่งผลให้ผนังมีค่าอัตราส่วนความขรุขระลดลงจึงทำให้ผนังมีเสถียรภาพมากขึ้น

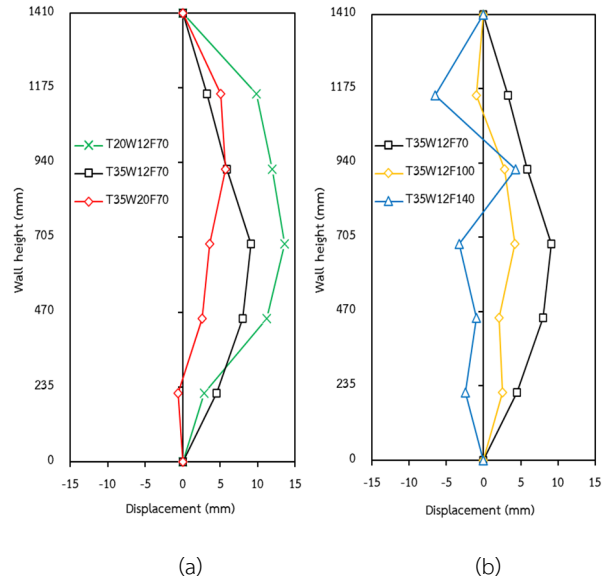
ตารางที่ 1 อัตราส่วนความขรุขระและกำลังอัดสูงสุดของผนังที่ทำจากวัสดุผสม WPVC หน้าตัดกลางขนาดใช้งานจริง

| อัตราส่วนความขรุขระ | อัตราส่วนความสูงต่อความยาว | กำลังอัดสูงสุด (kN) |           | ค่าเฉลี่ยกำลังอัด (kN) |
|---------------------|----------------------------|---------------------|-----------|------------------------|
|                     |                            | ชั้นที่ 1           | ชั้นที่ 2 |                        |
| 15                  | 2.35                       | 20.3                | 20.9      | 20.6                   |
| 30                  | 4.7                        | 14.4                | 16.5      | 15.4                   |

การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนความขรุขระจาก 15 เป็น 30 ส่งผลให้ผนังมีความสามารถในการต้านทานแรงอัดลดลงจาก 20.6 เป็น 15.4 กิโลนิวตัน คิดเป็นร้อยละ 25 แสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ค่าการเสียรูปทางด้านข้างที่ค่าแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 10.1 เป็น 28.1 มิลลิเมตร คิดเป็นร้อยละ 178

### 3.2. ลักษณะการโก่งตัวทางด้านข้างของผนังวัสดุผสม WPVC

ในการทดสอบได้ทำการตรวจวัดค่าการโก่งตัวบริเวณจุดต่อของชิ้นส่วนย่อย สามารถนำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความสูงผนังและค่าการโก่งตัวด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 9 ทั้งนี้ค่าการโก่งตัวพิจารณาที่ค่ากำลังอัดสูงสุด (Ultimate Load) จากการเปรียบเทียบผลของผนังทั้ง 5 รูปแบบ เมื่อพิจารณาผนังที่มีความหนาแผ่นเอวต่างกันดังแสดงในรูปที่ 9(a) พบว่าผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 12 มิลลิเมตร (T35W12F70) เกิดการโก่งตัวสูงกว่าผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 20 มิลลิเมตร (T35W20F70) อยู่ร้อยละ 37 ความหนาแผ่นเอวที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผนังมีความแข็งแรงมากขึ้นและสามารถต้านทานแรงอัดได้มากขึ้น หากพิจารณาผนังที่มีความหนาแผ่นปีกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 9(a) พบว่าผนังที่มีความหนาแผ่นปีก 20 มิลลิเมตร (T20W12F70) เกิดการโก่งตัวสูงกว่าผนังที่มีความหนาแผ่นปีก 35 มิลลิเมตร (T35W12F70) อยู่ร้อยละ 33 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นปีกช่วยเพิ่มพื้นที่ยึดรั้งบริเวณจุดต่อระหว่างชิ้นส่วนย่อย หากพิจารณาผนังที่มีความกว้างแผ่นปีกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 9(b) พบว่าผนังที่มีความกว้างแผ่นปีก 70 มิลลิเมตร (T35W12F70) เกิดการโก่งตัวสูงกว่าผนังที่มีความกว้างแผ่นปีก 100 มิลลิเมตร (T35W12F100) อยู่ร้อยละ 54 การเพิ่มขึ้นของความกว้างแผ่นปีกทำให้ผนังมีค่าอัตราส่วนความขรุขระลดลงจาก 15 เป็น 11 ส่งผลให้ผนังมีเสถียรภาพมากขึ้นและการเสียรูปทางด้านข้างลดลง แต่สำหรับผนังที่มีความกว้างแผ่นปีก 140 มิลลิเมตร (T35W12F140) เป็นผนังที่มีความกว้างมากที่สุด ดังนั้นโอกาสที่จะโก่งตัวด้านข้างเป็นรูปแบบโค้งเดียวเหมือนผนังรูปแบบอื่นจะลดลง เมื่อรับแรงในแนวตั้งผนังที่มีความกว้างมากจะเสียรูปน้อยและสามารถเกิดคนละทิศทางได้

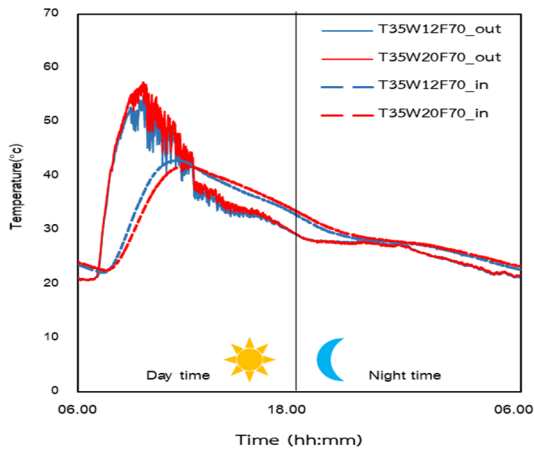


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของผนังกับการเสียรูปทางด้านข้างที่แรงอัดสูงสุดเปรียบเทียบ (a)ความหนาแผ่นเอวและความหนาแผ่นปีก;(b)ความกว้างแผ่นปีก

### 3.3. ผลการถ่ายเทความร้อนของผนังวัสดุ WPVC

จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับช่วงเวลาของผิวผนังด้านนอก และผิวผนังด้านในกล่องทดสอบ โดยเปรียบเทียบระหว่างผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 12 มิลลิเมตร (T35W12F70) และ 20 มิลลิเมตร (T35W20F70) การพิจารณาจะแบ่งเป็นช่วงกลางวัน (6.00-18.00 นาฬิกา Day time) และช่วงเวลากลางคืน (18.00-6.00 นาฬิกา Night time) เมื่อพิจารณาช่วงเวลากลางวันพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกผนังมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิผิวผนังด้านในพบว่าผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 12 มิลลิเมตร (T35W12F70) มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงกว่าผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 20 มิลลิเมตร (T35W20F70) ส่งผลให้ค่าผลต่างสูงสุดระหว่างอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านใน ( $\Delta T$ ) ของผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 12 มิลลิเมตร (T35W12F70) มีค่าเท่ากับ 18.2 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 20 มิลลิเมตร (T35W20F70) มีค่า  $\Delta T$  เท่ากับ 24 องศาเซลเซียส อยู่ร้อยละ 31 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นเอวส่งผลให้ปริมาตรช่องว่างอากาศภายในหน้าตัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ซึ่งอากาศถือเป็นฉนวนความร้อนที่ดี [14] ต่อมาหากพิจารณาช่วงเวลากลางคืนพบว่าทั้งสองผนังมีอุณหภูมิผิวผนังด้านในสูงกว่าด้านนอก เนื่องจากช่วงเวลากลางคืน



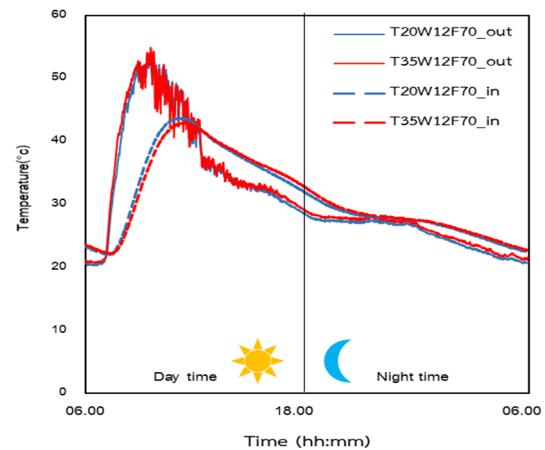


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาเปรียบเทียบผนังด้านนอก และ ผนังด้านใน ของผนัง T35W12F70 และผนัง T35W20F70

อุณหภูมิภายนอกกล่องทดสอบลดลง จึงทำให้ผิวผนังด้านนอกมีอุณหภูมิลดลงตามไปด้วย สำหรับอุณหภูมิผิวผนังด้านใน ผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 20 มิลลิเมตร (T35W20F70) มีค่าสูงกว่าผนังที่มีความหนาแผ่นเอว 12 มิลลิเมตร (T35W12F70) เล็กน้อยเป็นผลมาจากความสามารถในการต้านทานความร้อนที่ดีกว่าทำให้ความร้อนภายในกล่องระบายออกไปด้านนอกช้ากว่า ในส่วนของอุณหภูมิอากาศภายในกล่องทดสอบของทั้งสองผนังไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อเทียบกับอุณหภูมิผิวผนังด้านใน

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับช่วงเวลาของผิวผนังด้านนอก และผิวผนังด้านในกล่องทดสอบ โดยเปรียบเทียบระหว่างผนังที่มีความหนาแผ่นปีก 20 มิลลิเมตร (T20W12F70) และ 35 มิลลิเมตร (T35W12F70) เมื่อพิจารณาช่วงเวลากลางวันพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกของทั้งสองผนังมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวผนังด้านในของผนังที่มีความหนาแผ่นปีก 20 มิลลิเมตร (T20W12F70) มีค่าสูงกว่า

ผนังที่มีความหนาแผ่นปีก 35 มิลลิเมตร (T35W12F70) นอกจากนี้ค่า  $\Delta T$  ของผนังที่มีความหนาแผ่นปีก 20 มิลลิเมตร (T20W12F70) มีค่าเท่ากับ 15.5 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าผนังที่มีความหนาแผ่นปีก 35 มิลลิเมตร (T35W12F70) มีค่า  $\Delta T$  เท่ากับ 18.2 องศาเซลเซียสอยู่ร้อยละ 17 หมายความว่าผนังที่มีความหนาแผ่นปีกมากกว่า สามารถต้านทานความร้อนได้ดีกว่า หากพิจารณาที่ปริมาตรช่องว่างอากาศของทั้งสองผนัง (ตารางที่ 2) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยความหนาแผ่นปีกที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความยาวของระยะเดียว จึงอาจสรุปได้ว่าระยะเดียวที่เพิ่มขึ้นช่วยชะลอการส่งผ่านความร้อนจากด้านนอกผนังสู่ด้านในผนัง สำหรับช่วงเวลากลางคืนอุณหภูมิผิวผนังด้านในของทั้งสองผนังมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก ในส่วนของอุณหภูมิอากาศภายในกล่องทดสอบของทั้งสองผนังไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อเทียบกับอุณหภูมิผิวผนังด้านใน

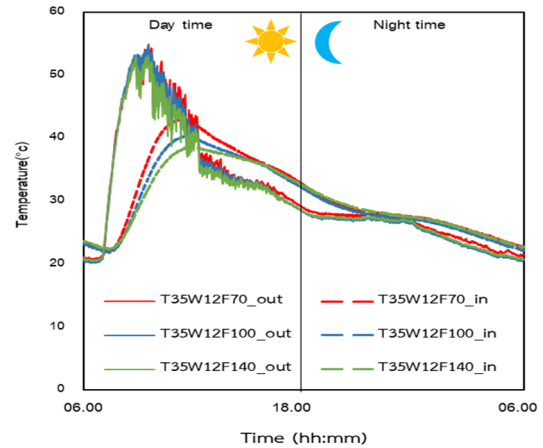


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาเปรียบเทียบผนังด้านนอก และ ผนังด้านใน ของผนัง T20W12F70 และผนัง T35W12F70

ตารางที่ 2 ผลการถ่ายเทความร้อนของหน้าต่างวัสดุผสม WPVC ที่แปรเปลี่ยน ความหนาแผ่นเอว ความหนาแผ่นปีกและความกว้างแผ่นปีก

| Cross section | Max. outer wall temperature (°C) | Max inner wall temperature (°C) | Temperature difference value $\Delta T$ , (°C) | Volume of air gap inside cross section $\times 10^{-3} \text{ m}^3$ | Volume of material inside cross section $\times 10^{-3} \text{ m}^3$ |
|---------------|----------------------------------|---------------------------------|--|---|--|
| T20W12F70     | 54.0                             | 38.5                            | 15.5   | 19.0  | 5.2  |
| T35W20F70     | 57.4                             | 33.4                            | 24.0   | 21.0  | 7.4  |
| T35W12F70     | 54.9                             | 36.7                            | 18.2   | 19.1  | 5.5  |
| T35W12F100    | 54.8                             | 33.8                            | 21.0   | 20.5  | 6.6  |
| T35W12F140    | 53.1                             | 31.9                            | 21.2   | 23.0  | 8.3  |

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับช่วงเวลาของผิวผนังด้านนอก และผิวผนังด้านในของกล่องทดสอบ โดยเปรียบเทียบระหว่างผนัง T35W12F70 T35W12F100 และ T35W12F140 ที่มีค่าความกว้างแผ่นปีกต่างกันคือ 70 100 และ 140 มิลลิเมตร ตามลำดับเมื่อพิจารณาช่วงเวลากลางวันพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกของทั้งสามผนังมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่อุณหภูมิผิวผนังด้านใน พบว่าผนังที่มีความกว้างแผ่นปีก 70 มิลลิเมตร (T35W12F70) มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงที่สุด รองลงมา เป็นผนังที่มีความกว้างแผ่นปีก 100 มิลลิเมตร (T35W12F100) และ 140 มิลลิเมตร (T35W12F140) มีค่าต่ำที่สุดส่งผลให้ค่า  $\Delta T$  ของผนังที่มีความกว้างแผ่นปีก 70 มิลลิเมตร (T35W12F70) เท่ากับ 18.2 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่าผนังที่มีความกว้างแผ่นปีก 100 มิลลิเมตร (T35W12F100) ที่มีค่า  $\Delta T$  เท่ากับ 21 องศาเซลเซียส อยู่ร้อยละ 15 ในขณะที่ค่า  $\Delta T$  ของผนังที่มีความกว้างแผ่นปีก 100 มิลลิเมตร (T35W12F100) มีค่าใกล้เคียงกับผนังที่มีความกว้างแผ่นปีก 140 มิลลิเมตร (T35W12F140) จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ค่า  $\Delta T$  เป็นผลมาจาก 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกคือ ช่องว่างอากาศ เมื่อพื้นที่ช่องว่างอากาศภายในหน้าต่างเพิ่มขึ้นทำให้ผนังสามารถต้านทานความร้อนดีขึ้น เนื่องจากอากาศถือเป็นฉนวนความร้อนที่ดี [14] ปัจจัยที่ 2 คือเนื้อวัสดุ การเพิ่มขึ้นของเนื้อวัสดุในส่วนของแผ่นปีกจะทำให้เป็นแกนกลางในการนำความร้อนจากผิวผนังด้านนอกสู่ผิวผนังด้านในซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีสะพานความร้อน (Thermal Bridges) [15] ดังนั้นเมื่อความกว้างแผ่นปีกเพิ่มขึ้นจาก 70 มิลลิเมตร (T35W12F70) เป็น 100 มิลลิเมตร (T35W12F100) จากข้อมูลในตารางที่ 2 ชี้ให้เห็นว่า ช่องว่างอากาศภายในหน้าต่างเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากในขณะที่เนื้อวัสดุเพิ่มขึ้นน้อย จึงส่งผลให้ค่า  $\Delta T$  ที่เปลี่ยนแปลงมากเป็นผลโดยตรงจากช่องว่างอากาศที่เปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน ในส่วนของผนังที่มีความกว้างแผ่นปีกเพิ่มขึ้นจาก 100 มิลลิเมตร (T35W12F100) เป็น 140 มิลลิเมตร (T35W12F140) จากตารางชี้ให้เห็นว่าค่า  $\Delta T$  แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าการเพิ่มขึ้นของเนื้อวัสดุจะมีค่ามาก ในขณะเดียวกันช่องว่างอากาศของกรณีนี้ก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้เกิดการหักล้างกันและทำให้ค่า  $\Delta T$  ไม่เปลี่ยนแปลงสำหรับในช่วงเวลากลางคืนอุณหภูมิผิวผนังด้านในของทั้งสามผนังมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก ในส่วนของอุณหภูมิอากาศภายในกล่องทดสอบของทั้งสองผนังไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญเมื่อเทียบกับอุณหภูมิผิวผนังด้านใน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาเปรียบเทียบผิวผนังด้านนอก และ ผิวผนังด้านใน ของผนัง T35W12F70 T35W12F100 และ T35W12F140

#### 4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของความหนาแผ่นเอว ความหนาแผ่นปีก ความกว้างแผ่นปีก และค่าอัตราส่วนความขรุขระที่มีต่อความสามารถในการต้านทานแรงอัด รวมทั้งตรวจสอบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของผนังที่สภาวะแวดล้อมจริงจากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- การเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นเอวจาก 12 เป็น 20 มิลลิเมตร ทำให้มีพื้นที่รับแรงอัดมากขึ้นส่งผลให้ผนังสามารถรับกำลังอัดได้มากขึ้น 2.6 เท่า มีการเสีรูปทางด้านข้างลดลงร้อยละ 37 และผนังสามารถต้านทานความร้อนดีขึ้นร้อยละ 31

- การเพิ่มขึ้นของความหนาแผ่นปีกจาก 20 เป็น 35 มิลลิเมตร ทำให้ผนังแต่ละชั้นซ้อนกันได้แน่นขึ้นซึ่งไม่ได้ส่งผลต่อการรับแรงอัดสูงสุด แต่ส่งผลให้ผนังมีการเสีรูปทางด้านข้างลดลงร้อยละ 33 และผนังสามารถต้านทานความร้อนดีขึ้นร้อยละ 17

- การเพิ่มขึ้นของความกว้างแผ่นปีกจาก 70 เป็น 100 และ 140 มิลลิเมตร ทำให้ผนังมีความขรุขระลดลงและมีเสถียรภาพในการรับแรงมากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 1.26 และ 1.48 เท่า มีการเสีรูปทางด้านข้างลดลงร้อยละ 54 ในส่วนของความกว้าง 140 มิลลิเมตร โอกาสเกิดการโก่งตัวแบบโค้งเดียวจะลดลง มีการเสีรูปน้อย ผนังสามารถต้านทานความร้อนดีขึ้นร้อยละ 15 และสำหรับผนังที่มีความกว้าง 140 มิลลิเมตร การต้านทานความร้อนจะใกล้เคียงกับผนังที่มีความกว้าง 100 มิลลิเมตร

- เมื่อผนังมีอัตราส่วนความขรุขระเพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 30 ส่งผลให้ผนัง WPVC มีความสามารถในการรับกำลังอัดได้ลดลงร้อยละ 25 และมีการเสีรูปทางด้านข้างมากขึ้นร้อยละ 178

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท วีพี วู้ด จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างวัสดุผสมระหว่างพลาสติกพีวีซีและซีล้อยไม้ สำหรับการทาวีจัย ขอขอบคุณ คุณศิริชัย ก้านกิ่ง คุณวราวิทย์ เอกอินทุมาศ คุณพงศ์ภัค สืบถวิลกุล คุณวัชรพล กิรติขจร และคุณศตวรรษ ลิ้มตระกูล ที่ให้การช่วยเหลือขณะเตรียมชิ้นตัวอย่างและการทดสอบ ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ทำการวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] เทอดธรรม ยอดพฤติการณ์, 2555, การก่อสร้างโดยใช้ระบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป : Precast concrete structures step by step, บริษัท สุนทรฟิล์ม จำกัด, กรุงเทพฯ , หน้า 12-29.
- [2] ศุภณัฐ วัฒนสินศักดิ์, 2556, การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการก่อสร้างแบบดั้งเดิม และ การก่อสร้างแบบผนังหล่อประกอบเพื่อพัฒนานวัตกรรมการก่อสร้างของหมู่บ้านจัดสรร, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, หน้า 64-65.
- [3] Klyosov, A.A., 2007, Wood-Plastic Composites, 1st ed., John Wiley & Sons, Inc., NJ, pp. 1-11, 356-368.
- [4] V.P. Wood Co., Ltd [Online], Available: <http://www.vpwood.com/> [2015, June 29].
- [5] Pulngern, T., Kaewkalya, P., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2014, "Experimental and Computational Investigations of Creep Responses of Wood/PVC Composite Members", Polymer Processing, Vol. 29, pp. 307-316
- [6] Bomberger, B.D., 1991, The Preservation of Historic Architecture: 26 Preservation Briefs, The Lyons Press, Washington, D.C., pp. 285-300.
- [7] Oral, G.K., Yener, A.K. and Bayazit, N.T., 2004, "Building Envelope Design with The Objective to Ensure Thermal, Visual and Acoustic Comfort Conditions", Building and Environment, Vol. 39, pp. 281-287
- [8] Pulngern, T., Eakintumas, W., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N., 2017, Compressive Load, Thermal and Acoustic Properties of Wood/Polyvinyl

Chloride Composite Log-Wall Panels, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 36, No. 16, pp. 1183-1193.

- [9] ASTM E72: 2015. Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [10] ธัญชัย ปทุมวรกิจ, พันธุดา พุฒิไพโรจน์, วรธรรม อุ้นจิตติชัย และพรรณจิรา ทิศาภิภาต, 2549, ประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของฉนวนอาคารจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, วารสารวิจัยและสาระสถาปัตยกรรม/การผังเมือง, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [11] นรากร พุทธิโชค และ ชูพงษ์ ทองคำสมุทร, 2553, การพัฒนาผนังอาคารจากวัสดุเหลือใช้เพื่อปรับปรุงสภาพแวดล้อมในอาคาร กรณีศึกษา: ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประเทศไทย, วารสารวิชาการ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [12] ชูพงษ์ ทองคำสมุทร, 2556, อิทธิพลของฉนวนต้านทานความร้อนและการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุผนังอาคาร, วารสารวิชาการ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [13] กฤษณา จันทร์เดือน และ ชำนาญ บุญญาพิพิธพงศ์, 2557, การพัฒนาฉนวนใยพืชจากไมยราบยักษ์, การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอาคารด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 1, 28 กุมภาพันธ์ - 1 มีนาคม 2557, มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [14] Boonyatikarn, S. & Buranakarn, V., 2006, Presentations Made for The Training Programme for Architects on Design of Eco-houses as Part of The UNEP-UNHABITAT Regional Initiative on Eco-housing, Department of Architecture, Chulalongkorn University, Thailand.
- [15] Davies, J.M., 2001, Lightweight Sandwich Construction. London: Blackwell Science, pp. 1-80.