



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

โดย สุฤกษ์ คงทอง

กรกฎาคม 2556

สัญญาเลขที่ RDG5550082

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ผู้วิจัย

สุฤกษ์ กองทอง

ชุดโครงการยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ การพัฒนาแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปที่มียางธรรมชาติเป็นวัสดุแกนกลาง

The Development of Insulated Panel with Natural Rubber as the Core Filler

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุฤกษ์ คงทอง

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

222 ต.ไทยบุรี อ.ท่าศาลา จ.นครศรีธรรมราช 80161

โทรศัพท์ (075)627-326 โทรสาร (075)672-399 E-mail address ksureurg@wu.ac.th

นักศึกษา นายเฉลิมศักดิ์ ชวดชุม นายดุรงค์ฤทธิ์ นามกุล และ นายนิรุทธิ์ สุขอ่อน

งบประมาณทั้งโครงการ 142,000 บาท

ระยะเวลาดำเนินการ 12 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ส.ค. 2555 ถึงวันที่ 31 ก.ค. 2556

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ปัจจุบันแผ่นผนังสำเร็จรูปสำหรับการก่อสร้างตัวอาคาร มีแนวโน้มเปลี่ยนไปใช้วัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนและมีความแข็งแรงในตัวเอง (structural insulated panels, SIP) แทนการก่ออิฐฉาบปูนและแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปแบบเดิม SIP นั้นเป็นแผ่นผนังฉนวนที่ประกอบด้วยแผ่นไม้ประกอบจากแถบไม้อัดเรียงเสี้ยน (oriented strand board, OSB) ประกอบอยู่ทั้งสองด้านของแผ่นโฟมพอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้แก่ expanded polystyrene (EPS) หรือ polyurethane foam (PU) ดังนั้นจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ที่ต่ำกว่าผนังอิฐฉาบปูนและแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป นอกจากนั้นแผ่นผนังฉนวนชนิดนี้สามารถรับแรงดัดได้สูง จึงสามารถใช้แทนแผ่นผนัง แผ่นหลังคา แผ่นฝ้าหลังคาได้ ในขณะที่มีน้ำหนักเบา จึงช่วยลดมูลค่าของค่าขนส่งวัสดุ ลดน้ำหนักของตัวอาคาร และลดมูลค่าก่อสร้างในส่วนของการสร้างตัวอาคารได้

อนึ่งผลิตภัณฑ์กลุ่มดังกล่าวยังไม่มีการผลิตในประเทศไทย ซึ่งกระบวนการผลิตในต่างประเทศนั้นใช้วัตถุดิบจากเศษไม้ตกขนาดจากไม้ป่าในส่วนของแถบไม้ในชั้นผิว OSB และใช้โฟมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ผลิตจากปิโตรเลียมเป็นชั้นฉนวนแกนกลาง โดยขึ้นรูปส่วนประกอบทั้งสองส่วนแยกกันแล้วนำมายึดติดกันด้วยกาวภายหลัง ดังนั้นเป้าหมายของงานวิจัยนี้ คือการพัฒนาแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปโดยใช้แถบไม้ยางพาราที่ได้จากเศษไม้ที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราเป็นชั้นผิว OSB และใช้ยางฟองน้ำที่เตรียมจากยางธรรมชาติเป็นแกนกลางจากนั้นอัดขึ้นรูปทั้งสองส่วนไปพร้อมกันด้วยกระบวนการอัดร้อนซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นไม้ประกอบ โดยผลงานวิจัยที่เสร็จสิ้นใน

ช่วงแรกนี้ ได้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในระดับห้องปฏิบัติการที่น่าจะสามารถแข่งขันกับผลิตภัณฑ์ในกลุ่มแผ่นสมาร์ทบอร์ด (smart board) ที่ใช้งานอยู่ภายในประเทศไทยได้ โดยตัวอย่างที่เตรียมได้มีคุณสมบัติสูงกว่าผลิตภัณฑ์ในกลุ่มแผ่นสมาร์ทบอร์ดที่ใช้งานอยู่ทั่วไป

อีกหนึ่งจุดเด่นของผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยนี้นอกจากประเด็นด้านความแข็งแรงและน้ำหนักเบาแล้ว ตัววัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตยังมาจากแหล่งวัตถุดิบที่ยั่งยืน (ทดแทนไม้จากป่าและวัตถุดิบจากปิโตรเลียม) และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ช่วยลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ (carbon sink) ประเด็นดังกล่าวจึงช่วยเพิ่มมูลค่าของตัวผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้นได้ (รวมถึงเพิ่มแหล่งเงินทุนด้วย) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงน่าจะสามารถนำไปขยายผลในเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากไม้ยางพารา (ซึ่งเป็นไม้ปลูก) ให้คุ้มค่าที่สุดและส่งเสริมการเพิ่มปริมาณการใช้งานยางธรรมชาติในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังช่วยลดกระแสต่อต้านการใช้โฟมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ในงานทางวิศวกรรม

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมี OSB จากไม้ยางพาราเป็นวัสดุชั้นผิวและมียางพองน้ำที่เตรียมจากยางธรรมชาติเป็นแกนกลาง

ผลการดำเนินการ

1. สามารถอัดขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนความร้อนสำเร็จรูปที่ประกอบด้วยชั้นผิวที่เป็นแผ่นไม้ประกอบจากแถบไม้อัดเรียงเส้น (oriented strand board, OSB) และชั้นแกนกลางที่เป็นฟองน้ำจากยางธรรมชาติ ซึ่งมีความหนา รวมทั้งแผ่นฉนวนเท่ากับ 2 ซม. ได้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเดียวกัน โดยกระบวนการอัดขึ้นรูปต้องทำในแบบพิมพ์ที่สามารถปรับระยะความลึกของช่องว่างในแบบพิมพ์ได้ กระบวนการอัดมี 2 ขั้นตอน คือ ช่วงแรกกดอัดแบบพิมพ์ด้วยแรงประมาณ 24 kg/cm^2 เป็นระยะเวลา 5-6 นาที เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นผิว OSB จนกว่า MDI เกิดการประสานกับแถบไม้ และเกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านเข้าสู่ชั้นยางแกนกลางเพื่อให้สารฟู่เกิดการขยายตัวให้ฟองอากาศ จากนั้นอัดต่อในช่วงที่สอง โดยการขยายแบบพิมพ์เพื่อให้ได้แผ่นผนังที่มีความหนาตามต้องการ (2 ซม.) แล้วอัดต่อไปจนครบ 15 นาที เพื่อให้ชั้นยางพองน้ำขยายตัวและเกิดการวัลคาไนซ์
2. ชั้นผิว OSB ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนคือ มีความหนา 0.5 ซม. โดยชั้นผิว OSB ที่บางกว่านี้จะส่งผลให้เกิดการยึดประสานของชั้นแถบไม้ไม่ดี ส่วนชั้นผิว OSB ที่หนากว่านี้ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ชั้นยางพองน้ำแกนกลางได้น้อยลง

3. ส่วนชั้นยางพองน้ำแกนกลางต้องประกอบด้วยสารฟูคือ OBSH ในปริมาณ 10 phr เพื่อให้สามารถเกิดฟองอากาศได้ที่อุณหภูมิของชั้นยางแกนกลางประมาณ 125 องศาเซลเซียส โดยปริมาณของ blank ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชั้นยางพองน้ำที่ขยายตัวแล้วได้แผ่นฉนวนที่มีความหนา 2 ซม.คือ มีปริมาตร ~ 35 % ของช่องว่างแบบพิมพ์

4. ค่า internal bonding และความหนาของแผ่นฉนวนที่เตรียมได้บ่งชี้ว่า การอัดแผ่นฉนวนที่มีความหนา 2 ซม. ในช่วงแรกด้วยระยะเวลาอัด 5 และ 6 นาที แล้วอัดต่อช่วงที่สองจนครบ 15 นาที น่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมเนื่องจากให้ระดับการประสานของกาวในชั้นผิว OSB และระดับการเกิดฟองอากาศรวมถึงระดับการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมในชั้นยางพองน้ำแกนกลาง

5. คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฉนวนที่เตรียมได้บ่งชี้ว่าน่าจะสามารถพัฒนาขยายขนาดแผ่นผนังเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่มแผ่นสมาร์ทบอร์ด (smart board) สำหรับใช้ในงานก่อสร้างอาคารได้จริง และบ่งชี้ว่ามีคุณสมบัติเบื้องต้นในระดับเดียวกับ SIP ที่ใช้งานในต่างประเทศ

6. กระบวนการอัดขึ้นรูปที่ใช้น่าจะสามารถใช้เตรียมแผ่นผนังฉนวนที่มีความหนามากขึ้นถึง 5 ซม.ได้

สรุปผลการวิจัย

ผลงานวิจัยนี้แสดงความเป็นไปได้ในการเตรียมแผ่นผนังฉนวนความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการที่มีความหนา 2 ซม. ซึ่งประกอบด้วยชั้นผิว OSB และชั้นพองน้ำแกนกลางจากยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอัดร้อนขึ้นรูปในคราวเดียวกัน โดยแผ่นผนังที่เตรียมได้มีคุณสมบัติอยู่ในระดับสูงกว่าผลิตภัณฑ์ในกลุ่มแผ่นสมาร์ทบอร์ดทางการค้าซึ่งมีจุดเด่นของผลิตภัณฑ์คือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยวัสดุจากธรรมชาติล้วน นอกจากนั้นผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเชิงกลเบื้องต้นบ่งชี้ว่า แผ่นผนังฉนวนที่เตรียมได้มีคุณสมบัติอยู่ในระดับเดียวกับ SIP

ข้อเสนอแนะที่ควรวิจัยเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถนำผลไปประยุกต์ใช้ได้จริง

ส่วนแรก เป็นงานที่ทำในห้องปฏิบัติการ

1. เนื่องจากราคาค้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตยังสูงกว่าแผ่นสมาร์ทบอร์ด ทั้งนี้ต้นทุนส่วนนี้มากจากราคายางธรรมชาติที่สูง ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถลดต้นทุนส่วนนี้ลงได้ 50 % จากงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไป

2. กระบวนการอัดขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนด้วยความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยใช้ระยะเวลากระบวนการอัดขึ้นรูปรวม 15 นาที เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทไปยังบริเวณส่วนแกนกลางของแผ่นฉนวนได้ยากเพราะความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีของยางธรรมชาติ ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณแกนกลางขึ้นอย่างมีค่าเพียงประมาณ 125 องศาเซลเซียส จึงต้องใช้ระยะเวลาเพื่อให้ชั้นยางคอมพาวด์ฟูและเกิดการวัลคาไนซ์ นอกจากนี้วิธีการขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนน่าจะใช้เตรียมแผ่นผนังฉนวนที่มีความหนามากขึ้นได้ยากขึ้นด้วย เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทไปยังบริเวณส่วนแกนกลางของแผ่นฉนวนที่มีความหนามาก เกิดขึ้นน้อยลงส่งผลให้สารฟูในชั้นยางคอมพาวด์ที่แกนกลางไม่สลายตัวให้ก๊าซและไม่เกิดการวัลคาไนซ์ และถึงแม้จะใช้วิธีการขึ้นรูปแยกชั้นผิว OSB และชั้นฉนวนยางฟองแยกกันก็ตาม ชั้นยางฟองแกนกลางที่หนาขึ้นจะเป็นอุปสรรคของการถ่ายเทความร้อน (SIP ในทางการค้าไม่มีปัญหานี้ เพราะชั้นฉนวนที่เป็น EPS จะถูกเตรียมให้เป็นเม็ดโฟมมาก่อนล่วงหน้า แล้วให้ความร้อนแก่เม็ดโฟมเพื่ออัดขึ้นรูปเป็นแผ่น ส่วนกรณีของโฟม PU นั้น ฟองอากาศเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของ PU อยู่แล้ว)

ดังนั้นการอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนเพื่อให้มีระยะเวลาของการขึ้นรูปที่สั้นลงและเพื่อให้สามารถเตรียมแผ่นผนังที่มีความหนาขึ้นในระยะเวลาที่สั้นเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต น่าจะต้องเปลี่ยนไปใช้วิธีให้ความร้อนด้วย dielectric (inductive) heating แทน ซึ่งกระบวนการนี้เป็นวิธีการที่ใช้ทั่วไปในการ cure กาวสำหรับการอัดไม้ประกอบเพื่อลดระยะเวลาของการนำความร้อนเข้าสู่ชั้นไม้ จึงสามารถใช้อัดขึ้นรูปขึ้นไม้ประกอบที่มีความหนาหลายๆ ได้ และเป็นวิธีการที่ใช้กันทั่วไปสำหรับช่วยวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาหลายๆ

ส่วนที่สอง เป็นงานที่ต้องขยายขนาดการขึ้นรูปแผ่นฉนวนหนา 2 ซม. (และที่หนากว่า หากพบว่ามีคุณสมบัติตามกำหนด) ให้มีขนาดใหญ่ (กว้าง x ยาว) เท่ากับที่ใช้งานจริง เช่น ขนาด 1.2 x 2.4 ตร.ม. (ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กที่สุดตามที่กำหนด) ทั้งนี้เพื่อยืนยันว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปจากงานวิจัยนี้ ใช้ผลิตแผ่นฉนวนได้จริง และเพื่อใช้เตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบคุณสมบัติทางเชิงกลอื่นๆ (ตามมาตรฐานของ SIP ที่ใช้งานในต่างประเทศ) ได้แก่ความสามารถในการรับแรงกระทำในลักษณะต่างๆ คือ dead load, live loads, wind loads and seismic loads ซึ่งต้องใช้ชิ้นตัวอย่างขนาดใหญ่

ดังนั้นการขยายขนาดคงต้องอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนด้วยเครื่องอัดขนาดใหญ่ในโรงงาน อย่างไรก็ตามการเข้าไปทดลองอัดขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนขนาดใหญ่เท่าจริง เป็นกระบวนการที่ต้องใช้ระยะเวลาเพื่อหาสถานะต่างๆที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป ซึ่งจะส่งผลต่อการผลิตหลักของโรงงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

งานวิจัยนี้จึงต้องพึ่งภาคอุตสาหกรรมในขั้นตอนที่จะยืนยันว่าสามารถนำไปใช้ผลจริงได้ ดังนั้นผู้วิจัยมีความเห็นว่า น่าจะทำการศึกษาในส่วนที่สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการ จนได้แผ่นฉนวนที่มีต้นทุนของวัตถุดิบที่ต่ำลง ตลอดจนวิธีการขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่มีระยะเวลาการอัดขึ้นรูปที่สั้นลงและสามารถขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่มีความหนาเพิ่มขึ้นให้ได้เสียก่อน (ข้อจำกัดทางด้านการผลิตแผ่นผนังที่มีความหนาหลายๆ ขึ้นอยู่กับวิธีการในการอัดขึ้นรูป ส่วนข้อจำกัดทางด้านการผลิตแผ่นฉนวนที่มีขนาดใหญ่ๆ ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องอัด) ณ เวลานั้นข้อมูลที่ได้จากการทำวิจัย น่าจะมากพอที่จะทำให้อุตสาหกรรมมีความกล้าในการลองอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนดังกล่าวมากยิ่งขึ้น

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

บทความวิจัยตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการระดับชาติ 1 บทความ
อนุสิทธิบัตร 1 ชิ้น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ของกระบวนการขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนกันความร้อนที่ประกอบด้วยชั้นผิวที่เป็นแผ่นไม้อัดเรียงเส้น (strand oriented board, OSB) ซึ่งเป็นชั้นที่ให้ความแข็งแรง และมีชั้นแกนกลางเป็นฟองน้ำที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดี วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของชั้นผิว OSB คือแถบไม้ยางพาราที่เตรียมจากเศษไม้เหลือใช้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา และใช้กาว Isocyanate (MDI) เป็นตัวประสาน ส่วนวัสดุชั้นแกนกลางเป็นฟองน้ำจากยางธรรมชาติ โดยสามารถอัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่นผนังฉนวนดังกล่าวได้ในแบบพิมพ์เดียวกันด้วยกระบวนการอัดร้อน โดยความร้อนจะถ่ายเทผ่านชั้น OSB ก่อนจึงผ่านเข้าสู่ชั้นยางฟองน้ำ ดังนั้นความหนาของชั้น OSB ทั้งสองด้านและการออกสูตรยางฟองน้ำจะต้องมีความสัมพันธ์กัน เพื่อมิให้ชั้น OSB เกิด over cure ก่อนที่ชั้นยางฟองน้ำจะวัลคาไนซ์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งในขณะได้รับความร้อนนั้นกาวในชั้น OSB จะเกิดการเชื่อมประสานแถบไม้เข้าด้วยกันและสามารถเกิดพันธะกับสายโซ่ยางธรรมชาติในชั้นยางแกนกลางได้ ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงภายในชั้นผิว OSB และที่รอยต่อระหว่างผิว OSB กับชั้นยาง ในขณะเดียวกันความร้อนที่ถ่ายเทสู่ชั้นยางแกนกลางจะส่งผลให้สารฟลูเกิดการสลายตัวให้ก๊าซ ดังนั้นเมื่อขยายแบบพิมพ์เพื่อให้ได้ระยะความหนาตามต้องการ ก๊าซในชั้นยางจะขยายตัวทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อยางฟองน้ำ และชั้นยางฟองน้ำเกิดการวัลคาไนซ์ลงรูปร่างที่ระยะความหนาตามต้องการ

ผลการทดลองที่ได้บ่งชี้ว่า ความหนาของชั้นผิว OSB ที่เหมาะสมควรจะเป็นด้านละ 0.5 ซม. เพื่อให้มีความแข็งแรงเพียงพอและไม่เป็นอุปสรรคต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ชั้นยางแกนกลาง โดยอุณหภูมิของการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ 150 องศาเซลเซียส เพื่อมิให้ชั้นผิว OSB เกิด over cure ในขณะรอให้ชั้นยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ อย่างไรก็ตามการอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนด้วยระดับอุณหภูมิดังกล่าว ส่งผลให้อุณหภูมิของชั้นยางแกนกลางมีค่าเพียง ~ 125 องศาเซลเซียส เนื่องจากชั้นผิว OSB และชั้นยางแกนกลางเป็นอุปสรรคต่อการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นจึงต้องใช้ OBSH เป็นสารฟลู และ ZDEC เป็นสารตัวเร่งในชั้นยางแกนกลาง แล้วอัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาอัดช่วงแรก 5 - 6 นาที จากนั้นขยายแบบพิมพ์ให้ได้แผ่นฉนวนที่มีความหนา 2 ซม. แล้วอัดต่อไปจนครบ 15 นาที เพื่อให้ชั้นยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ ซึ่งพบว่าแผ่นฉนวนที่ได้มีค่า ความหนาแน่น, internal bonding, modulus of elastic, modulus of rupture, compressive strength, thickness swelling, water absorption และ thermal conductivity อยู่ในระดับตามที่กำหนดของแผ่นผนังฉนวนในทางการค้า (แผ่นสมาร์ทบอร์ดและ SIP) นอกจากนี้ยังพบว่า กระบวนการดังกล่าวน่าจะใช้อัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่มีความหนามากขึ้นถึง 5 ซม. ได้

Abstract

This research illustrates the possibility of the fabrication of structural insulated panels (SIP) consisted of oriented strand board (OSB) as a facing material and rubber sponge as a core. OSB surface and rubber sponge core would provide strength and thermal insulation to SIP respectively. Wood strands in the OSB surface were prepared from the under size rubber wood and glued by isocyanate adhesion (MDI) while rubber sponge was a natural rubber based compound. A single process of compression molding was conducted in order to achieve the heat transfer through the OSB surface to rubber core. As a result, the balance between OSB thickness and rubber compound recipes was essential for the optimum cure levels in both OSB and rubber sponge layers. When compressed, crosslinking, trickled by thermal reaction, within OSB and at the OSB/rubber interface would enhance the OSB internal bonding and OSB/rubber interfacial strength. Additionally, a thermal blowing agent in rubber compounds decomposed and released amounts of gases. This brought about the forming rubber sponge when the mold was released to the certain thickness.

The results of this study indicated that the optimum thickness of each OSB surface should be at about 0.5 cm in order to provide enough strength and allow heat to transfer into a rubber core. The compression temperature at 150 degree Celsius was optimized for OSB curing, however, it resulted the rubber core temperature at only ~ 125 degree Celsius. As a result, OBSH and ZDEC were used as a blowing agent and an accelerator in rubber compounds. Using of 5- and 6-min compression before further curing until the overall compression period reached 15 min (during the second step of curing, the mold thickness was released to 2 cm in order to allow the expansion of rubber sponge) produced SIP of which density, internal bonding, modulus of elastic, modulus of rupture, compressive strength, thickness swelling, water absorption and thermal conductivity were in the same levels as that of the commercial products (smart board and SIP). Moreover, it was found that this process might be able to yield the boards with the thickness as high as 5 cm.

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร	1
บทคัดย่อ	6
Abstract	7
สารบัญ	8
บทที่ 1 บทนำ	9
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	9
1.2 วัตถุประสงค์	10
1.3 ทฤษฎี แนวคิดในการทำวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 2 วิธีการ	13
2.1 การเตรียมแถบไม้ยาง (strand)	13
2.2 การเตรียมคอมพาวด์	13
2.3 สร้างแบบพิมพ์ที่ปรับระยะความลึกของ mold cavity ได้	14
2.4 การขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่ประกอบด้วยชั้นผิว OSB และชั้นยางพองน้ำในแบบพิมพ์เดียวกัน	16
2.5 การทดสอบคุณสมบัติ	17
2.6 ขางและสารฟูที่ใช้	18
บทที่ 3 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	19
3.1 สภาวะเบื้องต้นสำหรับการเตรียมชั้นผิว OSB	19
3.2 สภาวะเบื้องต้นในการเตรียมชั้นยางพองน้ำแกนกลาง	21
3.3 กระบวนการอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนและการทดสอบคุณสมบัติ	23
3.4 การอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนหนา 5 ซม.	31
บทที่ 4 บทสรุป	34
4.1 สรุปผลการวิจัย	34
4.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการทำวิจัยเพิ่มเติม	35
4.3 เอกสารอ้างอิง	38
4.4 คำชี้แจงการปรับปรุงงานวิจัยตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

ในอดีตแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปเป็นวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมสร้างห้องเย็น, Clean Room และตู้คอนเทนเนอร์ โดยแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปที่ผลิตโดยผู้ประกอบการในประเทศจะประกอบด้วยโฟมสังเคราะห์ ซึ่งใช้ expanded polystyrene (EPS) หรือ polyurethane foam (PU) เป็นวัสดุแกนกลางแล้วประกบผิวทั้งสองด้านด้วยแผ่นโลหะ (เช่น แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี) โดยมีกาวเป็นตัวยึดให้แผ่นโลหะติดกับโฟม แต่เนื่องจากแผ่นโลหะเป็นวัสดุที่มีราคาแพง มีน้ำหนักค่อนข้างมาก และมีการโก่งตัวสูงเมื่อรับน้ำหนัก จึงส่งผลให้การใช้งานแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปไม่เป็นที่นิยมในงานก่อสร้างอาคาร บ้านเรือน ต่อมาเมื่อเริ่มมีการรณรงค์การประหยัดพลังงานไฟฟ้าภายในตัวอาคาร (green building) ส่งผลให้ผู้ประกอบการธุรกิจก่อสร้างในต่างประเทศเปลี่ยนไปใช้วัสดุที่เป็นทั้งฉนวนกันความร้อนและมีความแข็งแรงในการก่อสร้างตัวอาคาร (structural insulated panels, SIP) โดยการใช้แผ่นผนังฉนวนที่ประกอบด้วยแผ่นไม้ประกอบจากแถบไม้เรียงเส้นซึ่งใช้เศษไม้จากไม้ปา (oriented strand board, OSB) ประกบอยู่ทั้งสองด้านของแผ่นโฟม EPS หรือ PU ซึ่งในอนาคตมีแนวโน้มที่จะใช้วัสดุชนิดนี้แทนการก่ออิฐฉาบปูนและแผ่นผนังคอนกรีตแบบเดิมมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ที่ต่ำกว่าผนังอิฐฉาบปูนและแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป (thermal conductivity ของ EPS และ PU มีค่า $\sim 0.02 - 0.05 \text{ W/m K}$ ส่วนของผนังอิฐฉาบปูนและแผ่นคอนกรีตมีค่า $\sim 0.6 - 1.1 \text{ W/mK}$) [1] นอกจากนั้นแผ่นผนังฉนวนชนิดนี้มีความสมบัติสามารถรับแรงดัดต่อหน่วยน้ำหนักได้สูง จึงสามารถใช้แทนแผ่นผนัง แผ่นหลังคา แผ่นฝ้าหลังคาได้ ในขณะที่มีน้ำหนักเบา จึงช่วยลดต้นทุนของค่าขนส่งวัสดุ ลดน้ำหนักของตัวอาคาร และลดมูลค่าก่อสร้างในส่วน of โครงสร้างตัวอาคารได้

เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือ การพัฒนาแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปโดยใช้แถบไม้ยางพาราที่ได้จากเศษไม้ที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราเป็นชั้นผิว OSB และใช้ยางฟองน้ำที่เตรียมจากยางธรรมชาติเป็นแกนกลางจากนั้นอัดขึ้นรูปทั้งสองส่วนไปพร้อมกันด้วยกระบวนการอัดร้อนซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นไม้ประกอบ

งานวิจัยนี้จึงน่าจะสามารถช่วยส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากไม้ยางพารา (ซึ่งเป็นไม้ปลูก) ให้คุ้มค่าที่สุดและส่งเสริมการเพิ่มปริมาณการใช้งานยางธรรมชาติในอุตสาหกรรม นอกจากนั้นยังช่วยลดกระแสต่อต้านการใช้โฟมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ในงานทางวิศวกรรม ซึ่งแผ่นผนังฉนวนที่เตรียมได้มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติอื่นๆ ตามมาตรฐานของวัสดุแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปทางการค้า ดังนั้นข้อได้เปรียบของแผ่นผนังฉนวนที่จะได้จากงานวิจัยนี้คือ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากแหล่งวัตถุดิบที่ยั่งยืน (ทดแทนไม้จากป่าและวัตถุดิบจากปิโตรเลียม) ที่น่าจะสามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการเดิมที่มีอยู่แล้วในโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศได้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมี OSB จากไม้ยางพาราเป็นวัสดุชั้นผิวและมียางฟองน้ำที่เตรียมจากยางธรรมชาติเป็นแกนกลาง

1.3 ทฤษฎี แนวคิดในการทำวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ประเด็นการวิจัยทางด้านวัสดุศาสตร์ที่มีความสำคัญในปัจจุบันคือ การลดการพึ่งพาแหล่งวัตถุดิบจากปิโตรเลียมที่มีแนวโน้มของราคาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และการลดกระแสต่อต้านการใช้โฟมสังเคราะห์ที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในวัสดุทางวิศวกรรม งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ **ยางธรรมชาติเป็นวัสดุทดแทนโฟมสังเคราะห์** ในส่วนของแกนกลางแผ่นฉนวน โดยจะใช้ยางแผ่นดิบเพื่อเตรียมเป็นยางฟองน้ำ (expanded natural rubber sponge) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวนความร้อนที่มีค่า thermal conductivity ในระดับเดียวกับโฟมสังเคราะห์

ดังที่ได้กล่าวถึงตอนต้นว่า แผ่นฉนวนความร้อนสำเร็จรูปที่ใช้ในงานก่อสร้างในต่างประเทศประกอบด้วยแผ่น OSB ประกอบอยู่ทั้งสองด้านของแผ่นโฟม EPS หรือ PU ซึ่งแผ่น OSB เป็นไม้ประกอบชนิดหนึ่งเตรียมจากแถบไม้ (strand) ผสมกาวและขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยการอัดภายใต้ความร้อนและความดัน [2-5] สำหรับแผ่นโฟม EPS นั้นมีกระบวนการผลิตโดยผสมเม็ดพลาสติกพอลิสไตรีนกับก๊าซเพนเทน (ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง จากนั้นเมื่อลดความดันลงก๊าซเพนเทนจะขยายตัวและระเหยออกจากเม็ดพลาสติกช่วยให้เม็ดพลาสติกเกิดการขยายตัวเป็นเม็ดโฟมที่มีขนาดเพิ่มขึ้นกว่า 30 เท่า ทำย่นสุดนำเม็ดโฟมที่ได้ไปผ่านขั้นตอนการอัดขึ้นรูปภายใต้ความร้อนเป็นแผ่นโฟม EPS ส่วนโฟม PU เตรียมจากส่วนผสมระหว่างไดไอโซไซยานเนตกับพอลิเอสเตอร์ ซึ่งในระหว่างเกิดปฏิกิริยาจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกเช่นกัน) ทำให้เกิดฟองอากาศเล็กๆมากมายในเนื้อโฟม PU [6] ดังนั้นในกระบวนการผลิตแผ่นผนังฉนวนสำเร็จรูปดังกล่าวจำเป็นต้องแยกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนการเตรียมแผ่น OSB และขั้นตอนการเตรียมแผ่นฉนวนโฟมแล้วจึงนำมาประกบติดกันด้วยกาวในภายหลัง [7]

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตแผ่นฉนวนสำเร็จรูปโดยผู้ประกอบการในประเทศทำโดยการนำแผ่นโลหะและแผ่นโฟมสังเคราะห์ที่ตัดให้มีขนาดตามต้องการ มาประกบติดเข้าด้วยกันโดยใช้กาวเป็นตัวประสาน แต่เนื่องจากน้ำหนัก (แผ่นโลหะมีความหนาแน่นประมาณ $2,700 - 7,800 \text{ kg/m}^3$) [1] และราคาที่สูงตลอดจนการโค้งตัวที่ค่อนข้างมากเมื่อรับแรงของแผ่นโลหะที่ใช้เป็นวัสดุชั้นผิวด้านนอก ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วัสดุชั้นผิวที่มีน้ำหนักเบา แต่มีความสามารถรับแรงดัดได้มากกว่าและเป็นวัสดุชนิดเดียวกับที่ใช้ในแผ่นผนังฉนวนที่ใช้ในต่างประเทศ นั่นคือ OSB ซึ่งแผ่น OSB มีน้ำหนักเบากว่าแผ่นโลหะ (ถ้าความหนาแน่นต่ำกว่า $1,000 \text{ kg/m}^3$) [1] โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่น OSB คือ แถบไม้ที่เตรียมได้จากเศษเหลือของไม้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา ซึ่งแต่ก่อนเศษไม้ยางเหล่านี้จะถูกใช้ทำถ่านไม้ ไม้ฟืน หรือไม้ก่อกองไฟไปพร้อมกับปลายไม้และตอไม้

สำหรับประเด็นด้านความแข็งแรงของแผ่นไม้ประกอบ OSB นั้น ได้มีงานวิจัยรายงานว่า มีความแข็งแรงทนทานถึงขั้นใช้กับงานโครงสร้างของตัวอาคารได้ การขึ้นรูปวัสดุดังกล่าวทำได้โดย นำแถบไม้ยางพาราที่มีการจัดเรียงให้ทิศทางของเส้นใยไม้อยู่ในแนวที่ต้องการ มาอัดด้วยความร้อนและความดันโดยใช้กาว Phenol Formaldehyde (PF) และ/หรือ Isocyanate (MDI) เป็นตัวยึดประสานแถบไม้ไว้ด้วยกัน [8-10] ซึ่งในต่างประเทศมีการใช้วัสดุดังกล่าวในงานก่อสร้างได้เกือบทุกส่วนของอาคารบ้านเรือนตั้งแต่ ไม้แบบ แผ่นผนัง งานตกแต่งภายใน แผ่นพื้นสำเร็จรูป ตลอดจนถึงงานโครงสร้าง และมีรายงานว่า OSB ยังให้ค่าความต้านทานแรงดัดต่อน้ำหนักที่สูงกว่าแผ่นโลหะด้วย [5] ดังนั้นการเมื่อมีการนำ OSB มาใช้งานร่วมกับแผ่นโฟมสังเคราะห์เพื่อใช้เป็นแผ่นผนังฉนวน SIP จึงมีการกำหนดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่นี้คล้ายกับคุณสมบัติของ OSB [11] นอกจากนั้นยังต้องมีความสามารถในการรับแรงกระทำในลักษณะต่างๆ ได้แก่ dead load, live loads, wind loads and seismic loads ซึ่งมีค่าที่กำหนดแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศและแต่ละพื้นที่ของประเทศนั้นๆ และได้เพิ่มเติมคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับแผ่นโฟมแกนกลางเข้าไปด้วย เช่น การนำความร้อน, ความหนาแน่น

ดังที่ได้กล่าวถึงแล้วว่า กระบวนการผลิตแผ่นผนังฉนวนที่ประกอบด้วย OSB และโฟมสังเคราะห์ให้วิธีการขึ้นรูปแผ่น OSB และแผ่นฉนวน EPS/PU แยกกันแล้วจึงนำมาติดประกบกันด้วยกาวในภายหลัง ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปแผ่นผิว OSB ไปพร้อมกับชั้นฉนวนยางพองน้ำภายใต้อุณหภูมิและความดันในกระบวนการขึ้นรูปคราวเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นไม้ประกอบของผู้ประกอบการในประเทศได้

สำหรับคุณสมบัติพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ SIP ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.1 อย่างไรก็ตามเป้าหมายสำหรับงานวิจัยในช่วงแรกนี้ คือสามารถเตรียมตัวอย่างในระดับห้องปฏิบัติการที่มีคุณสมบัติในระดับเดียวกับผลิตภัณฑ์ในกลุ่มแผ่นผนังสมาร์ทบอร์ด (smart board) ที่ใช้งานภายในประเทศ โดยได้แสดงคุณสมบัติของแผ่นสมาร์ทบอร์ดในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแผ่นผนังฉนวน (SIP) ในต่างประเทศ

ความหนาแน่น	ไม่ต่ำกว่า 1.27 ซม.
ความหนาของชั้น OSB (กรณีใช้ OSB เป็นวัสดุผิว)	ไม่ต่ำกว่า 1 ซม.
ความหนาแน่นของชั้นฉนวน	0.02 – 0.05 g/cm ³
thermal conductivity ของชั้นฉนวน	0.02-0.052 W/mK
internal bonding	ไม่ต่ำกว่า 0.26 MPa
modulus of elastic, MOE (in bending) from minor axis testing	ไม่ต่ำกว่า 1,200 MPa
thickness swelling	ไม่เกิน 2 %

compressive resistance at 10% deformation (with skins intact) (ในกรณีใช้เป็น EPS ชั้นฉนวน)	ไม่ต่ำกว่า 104 kPa
--	--------------------

แหล่งข้อมูล: Construction Specification Institute, CSI, North American Retail Hardware Association, NRHA, Huntsman Corporation

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติแผ่นผนังสมาร์ทบอร์ดที่ใช้ในประเทศ

ความหนา (ใช้งานภายในและภายนอก)	ไม่ต่ำกว่า 0.6 และ 0.8 ซม.
ความหนาแน่น	ประมาณ 1,500 kg/m ³
การดูดซึมน้ำ	ไม่เกิน 35 %
MOR	ไม่ต่ำกว่า 4 – 7 MPa
screw withdrawal force	150 N

แหล่งข้อมูล: <http://www.living-center.com/?product=fiberock>

<http://www.sherasolution.com/th/trader/products/application/wall-application/series/30123/info/67/>

2.1 การเตรียมแถบไม้ยาง (strand)

งานวิจัยนี้ใช้ไม้จากกิ่งของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุ 25–30 ปี (เพื่อลดปัจจัยที่จะมีอิทธิพลต่อความแตกต่างของเส้นใยไม้ให้เหลือน้อยที่สุด) โดยนำไม้สดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ~ 8 ซม. ยาว ~ 15 ซม. ไปปอกเปลือกออกจนหมดก่อนนำเข้าเครื่อง disc flaker (รูปที่ 2.1) เพื่อแปรรูปเป็นแถบไม้ที่มีขนาดประมาณ 15 x 2.5 x 0.1 ซม. แล้วอบแห้งด้วยเครื่อง rotary drum oven (รูปที่ 2.2) เพื่อให้เหลือความชื้นต่ำกว่า 3% แล้วผสมด้วยกาว Isocyanate Resins (MDI) ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก (โดยทั่วไปปริมาณกาว MDI ที่ใช้เพื่อขึ้นรูปแผ่น OSB อยู่ในช่วง 2-7%) ในถังผสมกาวแบบหมุนเพื่อมิให้แถบไม้เกิดการแตกหัก



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของท่อนไม้สดกลมที่กำลังป้อนเข้าสู่เครื่อง disc flaker



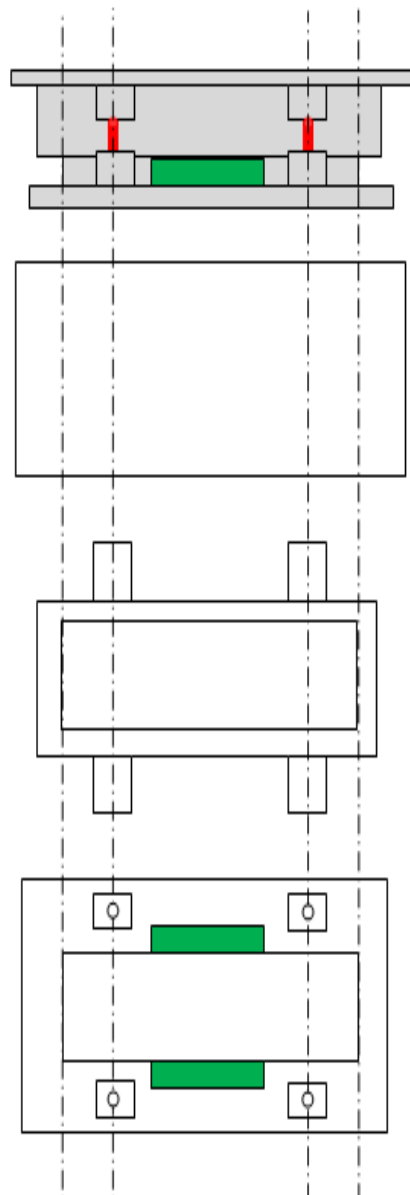
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะแถบไม้ที่เตรียมได้ในขณะอบใน rotary drum oven

2.2 การเตรียมคอมพาวด์

เพื่อเตรียมชั้นยางแกนกลางให้เป็นยางฟองน้ำ ผู้วิจัยใช้ (กลุ่ม) สารเคมีดังต่อไปนี้ในปริมาณที่เหมาะสม ยางแผ่นดิบ สารฟู่ kicker สารวัลคาไนซ์ต่างๆ และ Anti-oxidant โดยผสมในเครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง เพื่อป้องกันมิให้อุณหภูมิของคอมพาวด์สูงเกินไปซึ่งอาจจะทำให้สารฟู่เกิดการสลายตัวก่อนกำหนดได้ จากนั้นจึงคอมพาวด์ที่ผสมได้ไว้ข้ามคืนก่อนการทดสอบหาคุณสมบัติของการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง oscillating disc rheometer (ODR) เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปยางฟองน้ำ

2.3 สร้างแบบพิมพ์ที่ปรับระยะความลึกของ mold cavity ได้

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบพิมพ์สำหรับใช้ขึ้นรูปแผ่นฉนวนขนาด $\sim 11 \times 15$ ตารางนิ้ว (ขนาดแบบพิมพ์ถูกจำกัดด้วยขนาดของเครื่องอัดในห้องปฏิบัติการ) ซึ่งเป็นแบบพิมพ์ที่สามารถปรับระยะความหนาของ mold cavity ได้โดยการตั้งระยะการเคลื่อนที่ของ layer 3 ที่อัดเข้าไปใน layer 2 ของแบบพิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงภาพฉายของแบบพิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ซึ่งแบบพิมพ์ที่ได้สร้างขึ้น เมื่อประกอบกับเครื่องอัดไฮโดรลิกแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 2.4 จากรูป 2.4 ก) จะเห็นส่วนของ layer 2 สวมทับอยู่กับส่วนของ layer 3 แล้วเกิดเป็นช่องว่างของ mold cavity ซึ่งสามารถปรับความหนาของ mold cavity นี้ได้โดยการใช้ spacer (แสดงโดยชิ้นส่วนสีทึบในรูปที่ 2.3) ที่มีขนาดตามต้องการกั้นระหว่าง layer 2 และ 3 นอกจากนั้นยังมีร่องเล็ก ๆ บนกรอบของ layer 2 สำหรับใช้เสียบ thermocouple เพื่อให้สามารถวัดอุณหภูมิของชั้นยางฟองน้ำที่อยู่กึ่งกลางแผ่นฉนวนในขณะขึ้นรูปได้ โดยสายไฟสีดำในรูป 2.4 ข) คือ สายของ thermocouple



ก)

ข)



รูปที่ 2.4 ลักษณะของแบบพิมพ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยขณะติดตั้งกับเครื่องอัดไฮโดรลิก ก) ขณะเปิด ข) ขณะปิด

2.4 การขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่ประกอบด้วยชั้นผิว OSB และชั้นยางฟองน้ำในแบบพิมพ์เดียวกัน

- เตรียม blank สำหรับใช้อัดเป็นแผ่นฉนวนประกบยางฟองน้ำ โดยใช้แถบไม้ผสมกาวที่ได้จากข้อ 2.1 เป็นชั้นผิวทั้งสองด้านและใช้ยางคอมพาวด์ที่ได้จากข้อ 2.2 เป็นชั้นยางแกนกลาง โดยเรียงแถบไม้ผสมกาวและชั้นยางคอมพาวด์แกนกลางให้ได้ปริมาณตามต้องการก่อนใส่ลงในแบบพิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของ blank ที่ประกอบด้วยชั้นแถบไม้ประกบชั้นยางคอมพาวด์แกนกลางและในขณะ blank อยู่ในแบบพิมพ์

- *การอัดร้อน* อัด blank ดังกล่าวในเครื่องอัดร้อน โดยทำการอัดเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรก ปรับระยะอัดของแบบพิมพ์เพื่อให้ layer ทั้ง 3 ชั้นของแบบพิมพ์กดอัดชั้นแถบไม้และยางให้แน่นภายใต้ความดันประมาณ 24 kg/cm^2 และอุณหภูมิที่ต้องการเพื่อช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นไม้เข้าสู่เนื้อยางคอมพาวด์ที่อยู่บริเวณกึ่งกลาง และช่วงที่สอง ขยายระยะอัดของแบบพิมพ์ให้มากขึ้นเพื่อให้ได้ความหนาของช่องว่างในแบบพิมพ์ที่เท่ากับความหนาของแผ่นฉนวนตามที่ต้องการ ซึ่งจะเปิดโอกาสให้เซลล์อากาศในชั้นยางพองน้ำสามารถขยายตัวออกได้และเกิดการเชื่อมขวางของชั้นยางพองน้ำขณะเกิดการวัลคาไนซ์ อนึ่งระยะเวลาที่ใช้อัดทั้งสองช่วงจะต้องไม่เกินระยะ optimum cure ของชั้น OSB ซึ่งสามารถหาระยะ optimum cure ของชั้น OSB ได้จากการสังเกตลักษณะของแผ่นฉนวน และจากนำแผ่นฉนวนตัวอย่างไปทดสอบค่า internal bonding

2.5 การทดสอบคุณสมบัติ

- *Internal bonding* เพื่อทดสอบระดับการเชื่อมประสานของกาวกับแถบไม้ในชั้น OSB โดยใช้เครื่อง universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน EN319

- *Compression set* เพื่อทดสอบความสมบูรณ์ของการวัลคาไนซ์ในชั้นยางพองน้ำโดยใช้วิธีการตามมาตรฐาน ASTM D395 โดยตัดเลาะยางพองน้ำแกนกลางออกจากแผ่นฉนวน จากนั้นนำไปอัดระหว่างแผ่นโลหะที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชม. และคำนวณค่า compression set ด้วยสมการ

$$\text{compression set (\%)} = (t_o - t_i) / t_o \times 100$$

เมื่อ t_o คือ ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนการอัด และ t_i คือ ความหนาหลังผ่านการอัด

- Thickness swelling เพื่อทดสอบความต้านทานน้ำของแผ่นฉนวน ใช้วิธีการเอาชิ้นผิว OSB, ชั้นยางฟองน้ำแกนกลาง และใช้แผ่นฉนวนทั้งชิ้น แช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม. แล้วคำนวณหาค่า thickness swelling ด้วยสมการ

$$\text{thickness swelling (\%)} = (t_o - t_i) / t_o \times 100$$

เมื่อ t_o คือ ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ และ t_i คือ ความหนาหลังแช่น้ำ

- Modulus of elastic in bending เพื่อทดสอบความสามารถในการรับแรงคดของแผ่นฉนวน ใช้วิธีการตามมาตรฐาน EN 310 โดยเอาเฉพาะชั้นผิว OSB ไปทดสอบโดยการ bending ด้วยเครื่อง UTM เนื่องจากไม่มีระยะ span length สำหรับติดตั้งชิ้นทดสอบที่มีความหนามากๆได้

- Compressive strength เพื่อทดสอบความสามารถในการรับแรงกดของแผ่นฉนวนตามมาตรฐาน ASTM D1621 โดยวัดหาค่า ณ จุดที่แผ่นฉนวนถูกกดให้มีระยะยุบตัว 10 %

- Thermal conductivity เพื่อทดสอบความสามารถในการเป็นฉนวนความร้อนโดยเอาชิ้นผิว OSB, ชั้นยางฟองน้ำแกนกลาง และแผ่นฉนวนทั้งชิ้นไปทดสอบตามมาตรฐาน EN 12667 ด้วยเครื่อง hot disk thermal constant analyzer

2.6 ยางและสารฟู่ที่ใช้

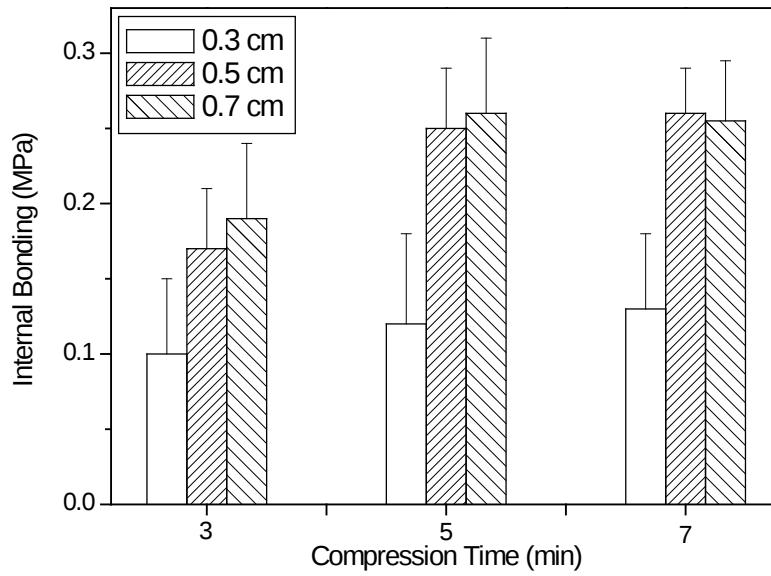
ใช้ยางแผ่นดิบในพื้นที่ จ.นครศรีธรรมราชและสุราษฎร์ธานี สารฟู่คือ Azo dicarbonamide (ADC), Dinitroso pentamethylene tetramine (DPT) และ Oxybis benzenesulfonylhydrazide (OBSh) จาก Merck

บทที่ 3

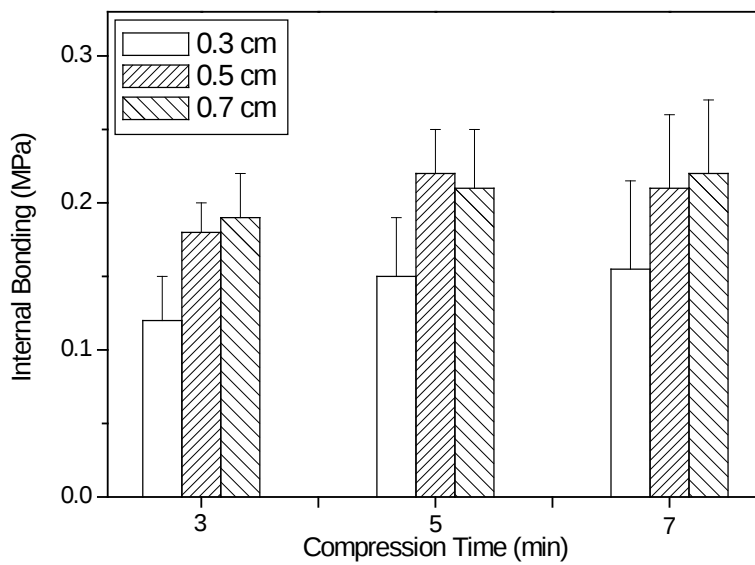
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1 สภาพแวดล้อมสำหรับการเตรียมชั้นผิว OSB

เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นผิว OSB ของแผ่นผนัง ผู้วิจัยได้ทดลองเตรียมชั้นผิว OSB โดยอัดด้วยเครื่องอัดร้อนด้วยการให้อุณหภูมิแก่ขึ้นตัวอย่างด้วย hotplate เพียงซีกเดียวที่ 150 และ 160 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาอัดร้อนนาน 3, 5 และ 7 นาที เพื่อเลียนแบบการได้รับความร้อนของชั้นผิว OSB จริงในขณะขึ้นรูปเป็นแผ่นผนังจนจนกว่าความร้อน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจาก hotplate ด้านตรงข้ามเกิดขึ้นได้น้อยมากเนื่องจากความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีของชั้นผิว OSB และชั้นยางพองน้ำที่อยู่ด้านตรงข้าม จากนั้นนำแผ่นชั้นผิว OSB ดังกล่าวไปทดสอบหาค่า internal bonding เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของการยึดติดของแถบไม้ พบว่าชั้นผิวที่มีความหนา ~ 0.3 ซม. ให้ค่า internal bonding ต่ำที่สุดที่ทุกๆระยะเวลาของการอัดร้อน ส่วนชั้นผิว OSB ที่หนา ~ 0.5 และ 0.7 ซม. ให้ค่า internal bonding ที่ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 3.1) นอกจากนี้ยังพบว่า ชั้นผิว OSB ที่อัดร้อนเป็นระยะเวลา 3 นาทีมีค่า internal bonding ต่ำที่สุด แต่เมื่ออัดด้วยระยะเวลา 5 และ 7 นาที มีค่าสูงขึ้นและอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน อนึ่งค่า internal bonding ที่ได้จากชั้นผิว OSB หนา ~ 0.5 และ 0.7 ซม. และที่ได้จากการอัดด้วยระยะเวลา 5 และ 7 นาที มีค่าอยู่ในระดับเฉลี่ยของแผ่น OSB ทั่วไป คือมีค่าประมาณ 2.5 MPa [11] ส่วนการอัดชั้นผิว OSB ด้วยอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ในสถานะเดียวกันให้แนวโน้มของค่า internal bonding ที่คล้ายกัน กล่าวคือ ชั้นผิว OSB ที่มีความหนา ~ 0.3 ซม. มีค่าต่ำกว่าที่ ~ 0.5 และ 0.7 ซม. (รูปที่ 3.2) อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการอัดด้วยระยะเวลา 5 และ 7 นาทีอยู่ในระดับต่ำกว่าระดับเฉลี่ยของแผ่น OSB ทั่วไป ทั้งนี้ค่าว่าเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงส่งผลให้กาวเกิด over cure ของกาว ดังนั้นผลการทดลองนี้จึงบ่งชี้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นผิว OSB คือ 150 องศาเซลเซียส โดยความหนาของชั้นผิว OSB แต่ละด้านที่จะใช้ขึ้นรูปเป็นแผ่นผนังไม่ควรต่ำกว่า ~ 0.5 ซม. เนื่องจากความหนาชั้นแถบไม้ที่น้อยเกินไปส่งผลให้การยึดติดกันของกาวระหว่างแถบไม้ต่ำ ซึ่งความหนาดังกล่าวส่งผลให้ความหนาของชั้นผิว OSB รวมทั้งสองด้านของแผ่นผนังผนังนี้เป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนดตามค่าในตาราง 1.1 (คือไม่ต่ำกว่า 1 ซม.) ส่วนระยะเวลาการอัดในช่วงแรกที่เหมาะสมไม่ควรต่ำกว่า 5 นาที เพื่อให้กาวเกิดการเชื่อมประสานกับชั้นแถบไม้ได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.1 ค่า Internal Bonding ของชั้นผิว OSB ที่เตรียมโดยการอัดและให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส เพียงซีกเดียว

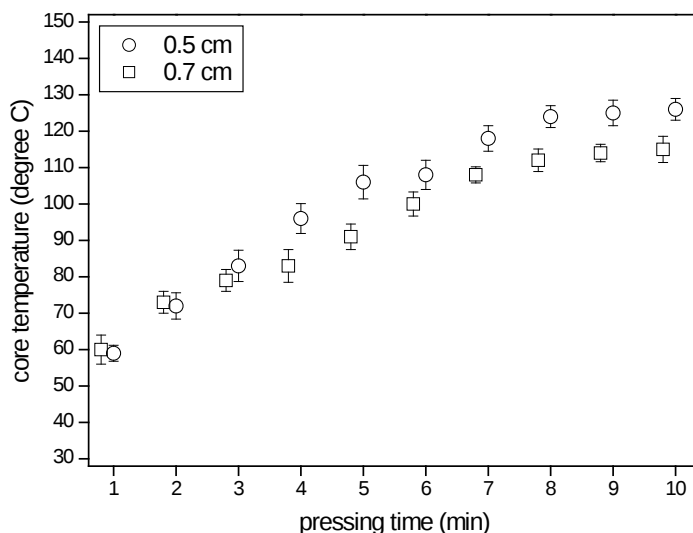


รูปที่ 3.2 ค่า Internal Bonding ของชั้นผิว OSB ที่เตรียมโดยการอัดและให้ความร้อนที่ 160 องศาเซลเซียส เพียงซีกเดียว

3.2 สถานะเบื้องต้นในการเตรียมชั้นยางพองน้ำแกนกลาง

ในช่วงแรก ผู้วิจัยได้ทดลองใช้สูตรยางเพื่อเตรียมเป็นชั้นยางพองน้ำแกนกลางหลายสูตร โดยมี CBS และ TMTD เป็นสารตัวเร่ง และใช้ ADC, OBSH และ DPT เป็นสารฟูล พบว่าเมื่อเตรียมแผ่นผนังฉนวนโดยมีชั้นผิว OSB ประกบด้านบน-ล่าง (หนาแต่ละ 0.5 ซม.) และมีชั้นยางคอมพาวด์อยู่ตรงกลางแล้วอัดร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ไม่มียางคอมพาวด์สูตรใดที่เกิดการวัลคาไนซ์สมบูรณ์แม้ระยะเวลาในการอัดร้อนจะผ่านไปถึง 30 นาที และพบว่ายางคอมพาวด์สูตรที่ใช้ OBSH เท่านั้นที่เกิดฟองอากาศในชั้นยางซึ่งคาดว่าน่าจะเนื่องจากการอุปสรรคของการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นผิว OSB และชั้นยางแกนกลาง ส่งผลให้อุณหภูมิจริงที่ชั้นยางแกนกลางต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส

เพื่อทดสอบสมมติฐานดังกล่าว ผู้วิจัยจึงทดลองวัดอุณหภูมิของชั้นยางแกนกลางในขณะอัดร้อนแผ่นผนังฉนวนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยใช้ชั้นผิว OSB ที่มีความหนา ~ 0.5 และ 0.7 ซม. พบว่าชั้นยางแกนกลางมีอุณหภูมิ ณ จุดสมดุล ~ 125 องศาเซลเซียสเท่านั้น (ใช้ระยะเวลาในการอัดนาน 10 นาที) ดังนั้นผลการทดลองนี้จึงบ่งชี้ว่า มีความจำเป็นต้องปรับสูตรยางคอมพาวด์ชั้นแกนกลางให้สามารถเกิดการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ ~ 125 องศาเซลเซียส โดยการใช้สารตัวเร่ง ZDEC ส่วนสารฟูลที่เหมาะสมคือ OBSH เนื่องจากสามารถสลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจน (เป็นส่วนใหญ่) ได้ที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนั้นยังพบว่าแผ่นฉนวนที่มีความหนาของชั้นผิว OSB ที่หนาขึ้นเป็น 0.7 ซม. ส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิชั้นยางแกนกลางเกิดขึ้นช้าลงจนถึงระยะเวลาของการอัดนาน 10 นาที พบว่าอุณหภูมิของชั้นยางแกนกลางมีค่าต่ำกว่ากรณีการใช้ชั้นผิว OSB หนา 0.5 ซม. ถึงประมาณ 15 องศาเซลเซียส ดังนั้นชั้นผิว OSB ที่มีความหนา 0.5 ซม. น่าจะมีความเหมาะสมต่อการถ่ายเทความร้อนสู่ชั้นยางแกนกลางมากกว่า



รูปที่ 3.3 อุณหภูมิชั้นยางแกนกลางแผ่นผนังฉนวนในขณะอัดร้อนด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อชั้นผิว OSB แต่ละด้านมีความหนาประมาณ 0.5 และ 0.7 ซม.

ดังนั้นเพื่อให้ชั้นยางพองน้ำแกนกลางสามารถเกิดการวัลคาไนซ์และเกิดฟองอากาศที่อุณหภูมิ ~ 125 องศาเซลเซียสได้ จึงมีการปรับสูตรยางคอมพาวด์ใหม่ได้เป็นสูตรตามที่แสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งพบว่า คอมพาวด์สามารถวัลคาไนซ์ได้ที่อุณหภูมิ 120 ± 2 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาประมาณ 8 นาที

ตารางที่ 3.1 สูตรยางคอมพาวด์ชั้นแกนกลางและคุณสมบัติการวัลคาไนซ์

Ingredients	Quantity (part per hundred rubber, phr)		
	1	2	3
STR 5L	100	100	100
Stearic acid	1	1	1
ZnO	5	5	5
OBSH	2.5	5	10
Kicker	1	1.5	3
CBS	-	-	-
TMTD	-	-	-
ZDEC	2.5	2.5	2.5
Sulphur	2.5	2.5	2.5
ZMP	1	1	1
	คุณสมบัติเฉลี่ยของการวัลคาไนซ์ที่ $120 \pm 2^{\circ}\text{C}$		
M_L (dN-M)	4.0	3.5	3.3
M_H (dN-M)	21.8	22.6	22.4
ts5 (m:s)	3.4	2.4	2.7
Tc90 (m:s)	8.6	7.3	7.8

จากนั้นเพื่อหาสัดส่วนของปริมาตรยางคอมพาวด์ต่อปริมาตรของแบบพิมพ์ที่เหมาะสม เพื่อใช้เตรียมเป็นชั้นยางพองน้ำแกนกลางสำหรับขึ้นรูปเป็นแผ่นผนังฉนวน ผู้วิจัยได้ทดลองอัดร้อนยางพองน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที (ประมาณ 2 เท่าของ tc90) ด้วยยางคอมพาวด์ตามสูตรในตารางที่ 3.1 โดยใช้สัดส่วนคอมพาวด์ต่อปริมาตรของช่องว่างในแบบพิมพ์ที่แตกต่างกันที่ 25, 35 และ 45% ของปริมาตรช่องว่างแบบพิมพ์ ซึ่งพบว่าคอมพาวด์สูตรที่ 3 ซึ่งใช้ OBSH ในปริมาณ 10 phr และการใช้ยางคอมพาวด์ปริมาตร 35 และ 45% ของปริมาตรแบบพิมพ์เท่านั้นที่ให้ยางพองน้ำฟูเต็มแบบพิมพ์ อย่างไรก็ตาม

ตามหากเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่ใช้คอมพาวด์ปริมาตร 35 และ 45% พบว่าการใช้คอมพาวด์ปริมาตร 35% น่าจะมีความเหมาะสมกว่า เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่า (ซึ่งบ่งชี้ว่ายางฟองน้ำมีฟองอากาศในปริมาณที่สูงกว่า และสิ้นเปลืองปริมาณยางคอมพาวด์น้อยกว่า)

ตารางที่ 3.2 ค่าความหนาแน่นของยางฟองน้ำแกนกลาง เมื่ออัดร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที

ปริมาณ OBSH (phr)	ความหนาแน่นของยางฟองน้ำ (g/cm ³)		
	% ปริมาณยางต่อปริมาตรของแบบพิมพ์		
	25	35	45
2.5	**	**	**
5	**	**	**
10	**	0.27±0.02	0.30±0.02

** ยางฟองน้ำฟูไม่เต็มแบบพิมพ์

3.3 กระบวนการอัดขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนและการทดสอบคุณสมบัติ

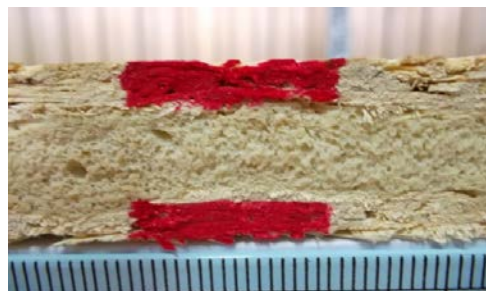
การวิจัยในช่วงนี้ผู้วิจัยตั้งเป้าเพื่อเตรียมแผ่นผนังที่มีความหนารวมเท่ากับ 2 ซม. (ความหนาค่าสุดของแผ่นผนังที่ใช้ในงานก่อสร้างในประเทศคือ 0.8 ซม. และในต่างประเทศคือ 1.27 ซม.) โดยใช้ชั้นผิว OSB ที่มีความหนาแต่ละ ~ 0.5 ซม. เป็นชั้นผิวทั้งสองด้าน ซึ่งการควบคุมความหนาของชั้นผิว OSB สามารถทำได้โดยการชั่งน้ำหนักของแถบไม้ที่ผสมกาวแล้วให้ได้ปริมาณตามที่ต้องการ ดังนั้นความหนาของส่วนชั้นฟองน้ำแกนกลางที่ต้องการคือ ~ 1 ซม. ซึ่งจะต้องใช้ยางคอมพาวด์สูตรที่ 3 ตามที่แสดงในตารางที่ 3.1 ริดให้เป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 0.35 ซม. (35% ของความหนาชั้นยางฟองน้ำแกนกลางที่ต้องการ) แล้วตัดแผ่นยางคอมพาวด์ให้มีขนาดเท่ากับความกว้างและยาวของแบบพิมพ์เพื่อใช้วางไว้ตรงกลางระหว่างชั้นแถบไม้ผสมกาวทั้งด้านบนและล่าง จากนั้นอัดร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอัดรวม 15 นาที โดยมีขั้นตอนการอัดขึ้นรูปดังนี้

1. การอัดช่วงแรก: กดแบบพิมพ์เพื่ออัดให้แถบไม้ผสมกาวเกิดการคงรูปและเพื่อให้ความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ชั้นยางคอมพาวด์ ซึ่งการอัดในช่วงนี้วัสดุในแบบพิมพ์จะถูกกดอัดให้มีความหนาเหลือที่ประมาณ 1.3 – 1.4 ซม. โดยแปรระยะเวลาอัดในช่วงแรกนี้เป็น 3, 4, 5, 6 และ 7 นาที
2. การอัดช่วงที่สอง: ขยายระยะอัดของแบบพิมพ์โดยใช้แท่งเหล็ก spacer กันเพื่อให้ได้ความหนารวมของแผ่นผนังฉนวนเท่ากับ 2 ซม. ซึ่งเป็นความหนาที่ต้องการ เพื่อเปิดโอกาสให้ฟองอากาศในชั้นยางแกนกลางเกิดการขยายตัว และคงรูปจากการเกิดวัลคาไนซ์เซชัน โดยใช้ระยะเวลาอัด

ในช่วงนี้ต่อจากช่วงที่ 1 ที่ได้กล่าวมาแล้ว ไปจนครบ 15 นาที (ระยะเวลาประมาณ 2 เท่าของ tc90 ของสูตรยางแกนกลาง)

ลักษณะของแผ่นผนังฉนวนที่เตรียมได้จากขั้นตอนข้างต้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 จากนั้นนำแผ่นฉนวนที่อัดได้ไปวัดความหนาและหาความหนาแน่นรวมทั้งแผ่น แล้วเลาะเอาเฉพาะชั้นยางฟองน้ำแกนกลางไปหาค่าความหนาแน่น ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 3.3 ซึ่งพบว่าแผ่นฉนวนที่อัดด้วยระยะเวลาการอัดช่วงแรก 3, 4, 5 และ 6 นาที มีความหนาใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ (2 ซม.) มีค่าความหนาแน่นของชั้นยางฟองน้ำแกนกลางและความหนาแน่นโดยรวมของแผ่นฉนวนที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากค่าความหนาแน่นโดยรวมของแผ่นฉนวนที่แสดงในตาราง พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงของกลุ่มผนังเบา (light weight panel คือแผ่นผนังที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า 0.5 g/cm^3) [11] ส่วนแผ่นฉนวนที่อัดด้วยระยะเวลาช่วงแรก 7 นาที ให้แนวโน้มที่ต่างกัน คือมีค่าความหนาของแผ่นผนังฉนวนที่ต่ำกว่า 2 ซม. และแสดงแนวโน้มการมีความหนาแน่นของชั้นยางฟองน้ำและความหนาแน่นโดยรวมของแผ่นฉนวนที่สูงขึ้น ทั้งนี้คาดว่าระยะเวลาการอัดในช่วงแรกที่ยาวขึ้นเป็น 7 นาที ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ชั้นยางคอมพาวด์ที่อยู่แกนกลางชิ้นงานได้มากขึ้น ทำให้ระดับการวัลคาไนซ์ในชั้นยางเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับที่เป็นอุปสรรคต่อการขยายตัวของยางฟองน้ำในขั้นตอนการขยายแบบพิมพ์เพื่อให้ได้แผ่นฉนวนที่มีความหนา 2 ซม. ส่งผลให้หนารวมต่ำกว่า 2 ซม. และแผ่นผนังมีความหนาแน่นสูงขึ้นเนื่องจากฟองอากาศในชั้นยางเกิดการขยายตัวได้น้อยลง

อนึ่งในการทดลองเดียวกันนี้ ผู้วิจัยเคยใช้ระยะเวลาอัดในช่วงที่สองจนได้ระยะเวลารวม 12 นาที พบว่าบริเวณแกนกลางของชั้นยางฟองน้ำยังมีลักษณะที่เยิ้ม คาดว่าเนื่องจากเกิดการวัลคาไนซ์ที่ไม่สมบูรณ์



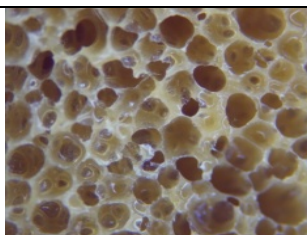
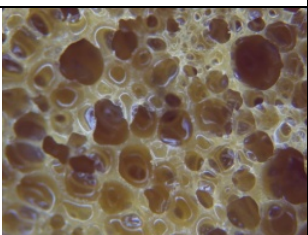
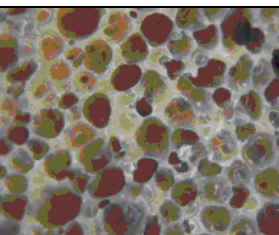
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของตัวอย่างแผ่นผนังฉนวนที่เตรียมได้โดยใช้ OBSH เป็นสารฟู และ ZDEC เป็นสารตัวเร่ง แถบสีแดงบนตัวอย่างแสดงความหนาของชั้นผิว OSB ทั้งสองด้านและมีส่วนของชั้นยางฟองน้ำอยู่ระหว่างแถบสีแดง

ตารางที่ 3.3 แสดงอิทธิพลของระยะเวลาของการอัดร้อนช่วงแรกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นผนังฉนวนหนา 2 ซม.

ระยะเวลาอัด ช่วงแรก (นาทื)	ความหนาของแผ่น ผนัง (ซม.)	ความหนาแน่นรวม ของแผ่นผนัง (g/cm ³)	ความหนาแน่นของชั้น ยางแกนกลาง (g/cm ³)
3	2.1±0.3	0.41±0.03	0.26±0.02
4	2.0±0.2	0.42±0.03	0.25±0.02
5	1.9±0.2	0.42±0.04	0.24±0.03
6	1.9±0.2	0.43±0.03	0.26±0.02
7	1.7±0.3	0.46±0.04	0.28±0.02

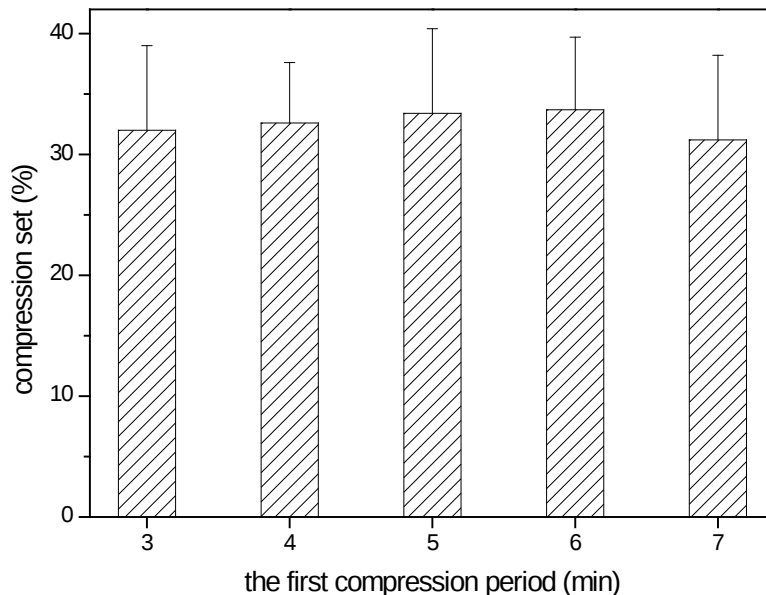
เพื่อตรวจสอบลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในชั้นยางพองน้ำ ผู้วิจัยได้นำชั้นยางพองน้ำแกนกลางที่เลาะออกจากแผ่นผนังที่อัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาอัดในช่วงแรก 3, 5 และ 7 นาทื แล้วอัดต่อช่วงที่สองจนครบ 15 นาทื ไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าฟองอากาศในชั้นยางจากทุกตัวอย่างดังกล่าว มีลักษณะเป็นเซลล์ปิดเกือบทั้งหมด (ตารางที่ 3.4) โดยตัวอย่างที่อัดโดยใช้ระยะเวลาอัดช่วงแรก 3 และ 5 นาทื มีค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดฟองอากาศอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันคือ ~0.07 ซม.² ส่วน ตัวอย่างที่อัดโดยใช้ระยะเวลาอัดช่วงแรกนาน 7 นาทื ให้ค่าพื้นที่หน้าตัดฟองอากาศที่ต่ำกว่าคือมีค่า ~0.05 ซม.² ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของชั้นยางพองน้ำที่สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆดังที่กล่าวถึงในตารางที่ 3.3 อนึ่ง การที่พบว่าฟองอากาศในชั้นยางพองน้ำมีลักษณะเป็นเซลล์ปิดย่อมส่งผลดีต่อความเป็นฉนวนความร้อนของแผ่นผนังฉนวนที่เตรียมได้

ตารางที่ 3.4 แสดงลักษณะของฟองอากาศ (air cells) ภายในชั้นยางพองน้ำของแผ่นผนังที่อัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาอัดในช่วงแรก 3, 5 และ 7 นาทื (ค่าในวงเล็บแสดงค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดฟองอากาศ)

3 นาทื (~0.07 ซม. ²)	5 นาทื (~0.07 ซม. ²)	7 นาทื (~0.05 ซม. ²)
		

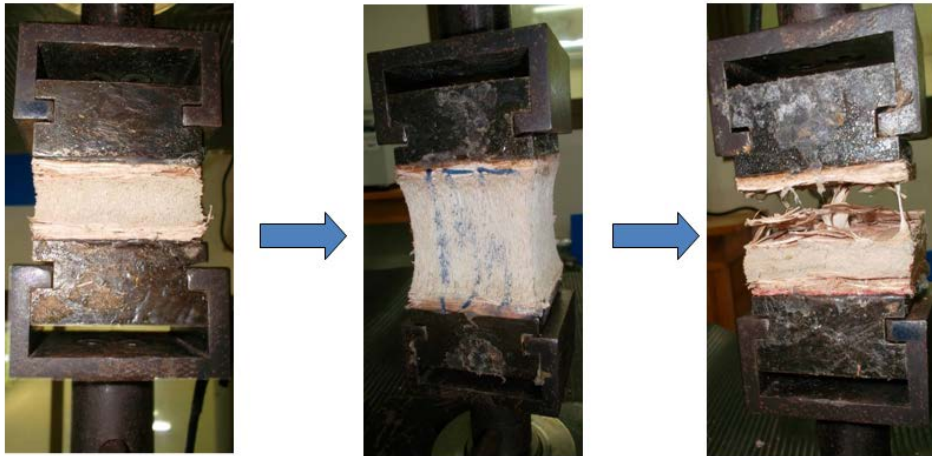
เพื่อยืนยันว่ากระบวนการอัดแผ่นผนังฉนวนดังกล่าวสามารถทำให้ชั้นยางพองน้ำแกนกลางเกิดการวัลคาไนซ์ได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยได้นำชั้นยางพองน้ำแกนกลางที่เลาะออกจากแผ่นฉนวนไปทดสอบหาค่า compression

set ซึ่งพบว่าค่าที่ได้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วงประมาณ 31-34% (รูปที่ 3.5) นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองนี้กับค่าที่ได้จากการทดสอบ compression set ของยางพองน้ำสูตรเดียวกันที่อัดให้ความร้อนในแบบพิมพ์โดยตรงด้วยสภาวะเดียวกัน (ใช้ยางคอมพาวด์ปริมาตร 35% ของช่องว่างแบบพิมพ์) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 30-34 % เช่นเดียวกัน ดังนั้นสภาวะที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ น่าจะสามารถให้ระดับการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์แก่ชั้นยางพองน้ำแกนกลางได้



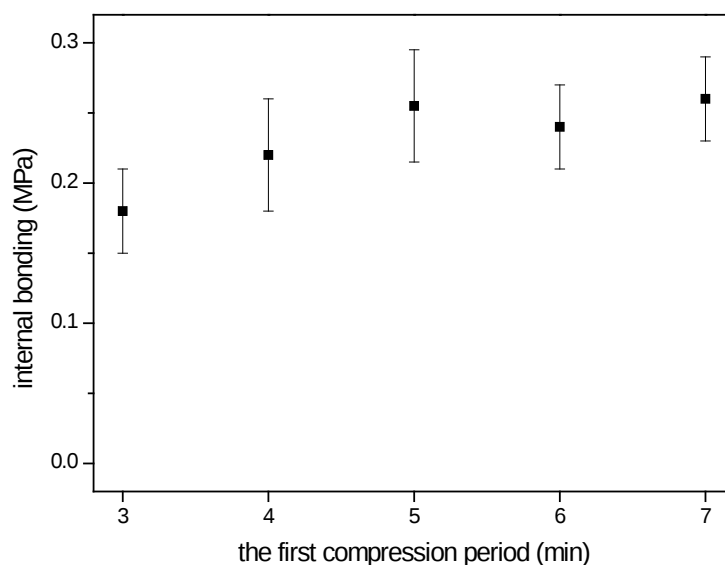
รูปที่ 3.5 ค่า compression set ของชั้นยางพองน้ำแกนกลางที่เลาะออกจากแผ่นฉนวนจากการอัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาในการอัดช่วงแรกที่แตกต่างกัน

จากนั้นได้นำชิ้นทดสอบจากแผ่นฉนวนที่เตรียมได้จากการแปรระยะเวลาการอัดในช่วงแรกตามวิธีการข้างต้นไปทดสอบหาค่า internal bonding พบว่าชิ้นตัวอย่างทั้งหมดเกิดการเสียสภาพในชั้นผิว OSB ทั้งสิ้น (ดังแสดงลักษณะการเสียสภาพของชิ้นตัวอย่างในรูปที่ 3.6)



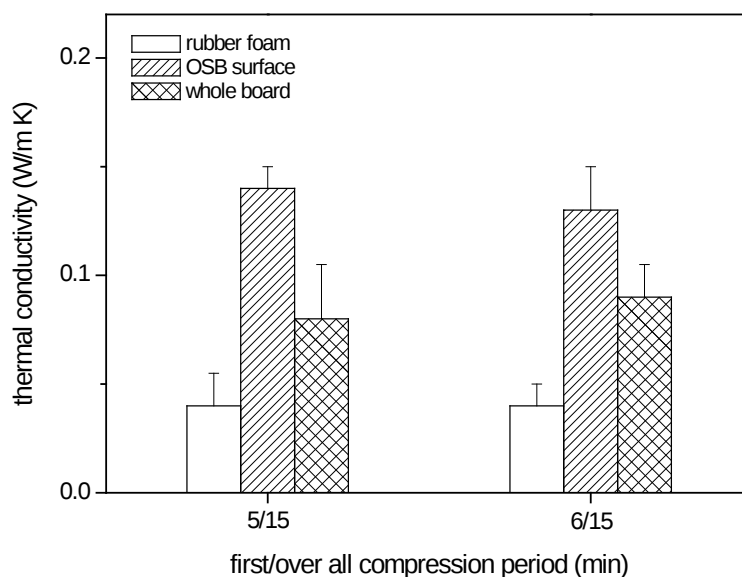
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะการเลื่อยสภาพของชิ้นตัวอย่างในขณะทดสอบหาค่า internal bonding

ส่วนค่า internal bonding ของแผ่นฉนวนที่วัดได้แสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการอัดช่วงแรกจนเข้าสู่ระดับสมดุลที่ 5 นาที ตามที่แสดงผลในรูปที่ 3.7 (ค่าที่สมดุลอยู่ในระดับเดียวกับค่าเฉลี่ยของแผ่น OSB ทั่วไป คือประมาณ 0.25 MPa) ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้ระยะเวลาในการอัดช่วงแรกที่สูงกว่า 5 นาทีส่งผลให้การประสานกันของกาวระหว่างแถบไม้ในชั้นผิว OSB ยังไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวถึงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ดังนั้นผลการทดลองทั้งหมดจนถึงช่วงซึ่งบ่งชี้ว่า สภาวะที่น่าจะเหมาะสมสำหรับใช้ขึ้นรูปแผ่นฉนวนคือ มีระยะเวลาการอัดช่วงแรกไม่ต่ำกว่า 5 นาที เพื่อให้ชั้นกาวในชั้นผิว OSB เกิดการเชื่อมประสานกันสมบูรณ์ และไม่นานเกินกว่า 6 นาที เพื่อให้ชั้นยางพองน้ำสามารถพองตัวได้ในการอัดช่วงที่สองที่มีการขยายแบบพิมพ์ให้ได้ความหนาตามต้องการแล้วอัดต่อไปจนครบ 15 นาที



รูปที่ 3.7 ค่า internal bonding ของแผ่นฉนวนที่เตรียมโดยใช้ระยะเวลาในการอัดช่วงแรกที่แตกต่างกัน

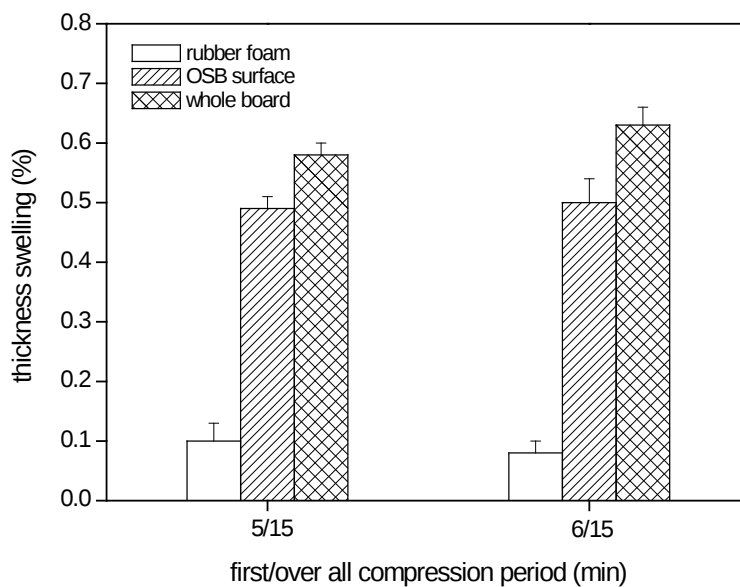
เพื่อทดสอบคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของแผ่นผนังฉนวนในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้หาค่า thermal conductivity ของแผ่นผนังฉนวนทั้งแผ่น, ของชั้นผิว OSB และของชั้นยางพองน้ำแกนกลางที่เลาะออกจากแผ่นฉนวนที่เตรียมโดยอัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาอัดช่วงแรก 5 และ 6 นาที แล้วอัดต่อในช่วงที่สองจนครบ 15 นาที ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 3.8 ซึ่งพบว่าค่า thermal conductivity ของแผ่นผนังฉนวนทั้งแผ่นมีค่าประมาณ 0.6-0.7 W/mK ส่วนค่า thermal conductivity ของชั้นผิว OSB และยางพองน้ำแกนกลางที่เลาะออกจากแผ่นฉนวนอยู่ในระดับประมาณ 0.14 และ 0.04 W/mK ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าการรายงานค่า thermal conductivity ของแผ่นผนังฉนวนในทางการค้าที่ใช้ในต่างประเทศ มีการรายงานเฉพาะค่าของชั้นโฟมสังเคราะห์แกนกลางเท่านั้น คาดว่าเนื่องจากเป็นส่วนประกอบหลักที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของแผ่นฉนวน ซึ่งค่าที่รายงานไว้อยู่ในช่วง 0.02-0.05 W/mK ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาแน่นของโฟม [1] ดังนั้นค่า thermal conductivity ของชั้นยางพองน้ำแกนกลางที่เตรียมได้จากงานวิจัย (ซึ่งมีค่าประมาณ 0.04 W/mK) จึงมีค่าอยู่ในระดับเดียวกับแผ่นฉนวนทางการค้าที่ใช้ในต่างประเทศ ส่วนค่า thermal conductivity ของชั้นผิว OSB จากแผ่นฉนวนที่เตรียมได้ก็อยู่ในระดับเดียวกับค่าของแผ่น OSB ทางการค้า (ประมาณ 0.13 W/mK) ผลการทดลองนี้จึงบ่งชี้ว่าค่า thermal conductivity ของแผ่นฉนวนที่มีวัสดุผิวเป็น OSB และชั้นแกนกลางเป็นยางพองน้ำจากงานวิจัย น่าจะอยู่ในระดับที่ไม่ด้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในต่างประเทศ



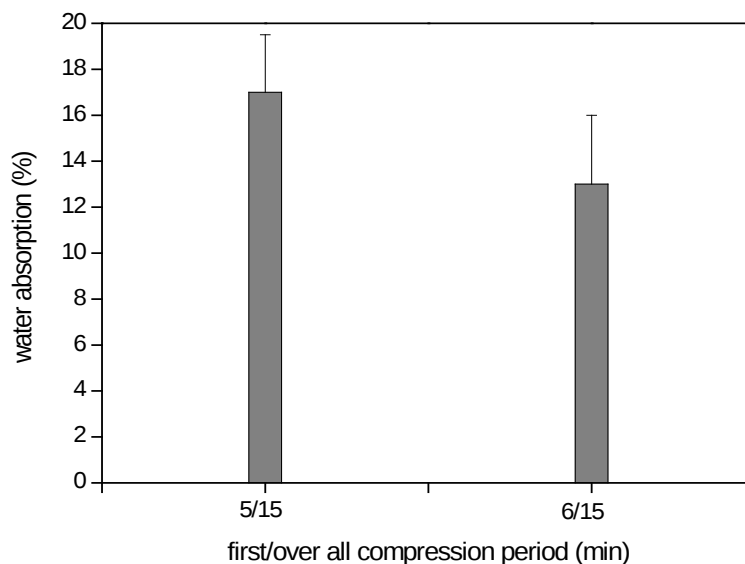
รูปที่ 3.8 ค่า thermal conductivity ของชั้นยางพองน้ำแกนกลางที่เลาะออกจากแผ่นผนังฉนวน (rubber foam), ของผิว OSB (OSB surface) และของแผ่นผนังฉนวนทั้งแผ่น (whole board) จากการอัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาอัดช่วงแรก 5 และ 6 นาที แล้วอัดต่อในช่วงที่สองจนครบ 15 นาที

เพื่อยืนยันว่าแผ่นผนังที่ได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาอัดช่วงแรก 5 และ 6 นาที แล้วอัดต่อในช่วงที่สองจนครบ 15 นาที มีคุณสมบัติเบื้องต้นที่เหมาะสมกับการใช้งานก่อสร้างอาคารได้ ผู้วิจัยได้ทดสอบความต้านทานน้ำโดยการวัดค่า thickness swelling และ water absorption ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่แผ่นผนังถูกแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชม.(แสดงผลการทดลองในรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ)

ผลการทดสอบ thickness swelling แสดงให้เห็นว่า ความหนาของแผ่นผนังมีค่าเพิ่มขึ้นต่ำกว่า 0.7 % อันเนื่องจากการบวมพองหลังผ่านการแช่น้ำ ซึ่งค่าดังกล่าวต่ำกว่าค่าตามมาตรฐานของ SIP (ข้อมูลจาก Huntsman) ซึ่งกำหนดค่า thickness swelling ไว้ไม่เกิน 2 % ตามมาตรฐาน ASTM D2162 (thickness swelling ต่ำ มีความต้านทานน้ำดีกว่า) โดยการพองตัวของแผ่นผนังที่เตรียมได้นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการพองตัวของชั้นผิว OSB เป็นส่วนใหญ่ ส่วนชั้นยางพองน้ำมีการพองตัวที่น้อยมาก คือต่ำกว่า 0.1 % และผลการทดสอบ water absorption แสดงให้เห็นว่า แผ่นผนังมีความต้านทานต่อการดูดซึมน้ำที่ดี คือมีค่า water absorption ประมาณ 13-17 % ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าจากแผ่นสมาร์ทบอร์ดทางการค้าซึ่งกำหนดค่าการดูดซึมน้ำไว้ไม่เกิน 35 % (ตารางที่ 1.2)



รูปที่ 3.9 ค่า thickness swelling ของแผ่นผนังทั้งแผ่น (whole board) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากชั้นยางพองน้ำ แกนกลางที่เลาะออกจากแผ่นฉนวน (rubber foam) และค่าที่ได้จากชั้นผิว OSB (OSB surface) ที่เลาะออกจากแผ่นผนังตัวอย่างที่ผ่านการอัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาอัดช่วงแรก 5 และ 6 นาที และอัดต่อในช่วงที่สองจนครบ 15 นาที



รูปที่ 3.10 ค่า water absorption ของแผ่นผนังตัวอย่างที่ผ่านการอัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาอัดช่วงแรก 5 และ 6 นาที และอัดต่อในช่วงที่สองจนครบ 15 นาที

จากนั้นได้ทดสอบหาค่า modulus of elastic, modulus of rupture (MOE และ MOR, in bending) และ compressive resistance ของแผ่นฉนวนที่เตรียมได้ โดยการทดสอบหาค่า MOE และ MOR นั้น ผู้วิจัยเลาะเอาเฉพาะชั้นผิว OSB (หนา ~ 0.5 ซม.) ไปทดสอบ เนื่องจากระยะ span length ของเครื่องทดสอบไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบชิ้นงานทั้งชิ้นที่มีความหนา 2 ซม. ได้ ทั้งนี้ผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 3.5 บ่งชี้ว่า ค่า MOE และ MOR ของชั้นผิว OSB จากแผ่นผนังฉนวนที่เตรียมได้จากการใช้ระยะเวลาในการอัดช่วงแรกนาน 5 และ 6 นาที มีค่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งค่า MOE ที่ได้ มีค่าสูงกว่าค่าตามมาตรฐานของ SIP (ซึ่งมีค่า MOE ประมาณ 1200 MPa, ตารางที่ 1.1) และค่า MOR ที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าตามมาตรฐานของแผ่นสมาร์ทบอร์ดทางการค้า (ซึ่งมีค่า MOR ประมาณ 7 MPa, ตารางที่ 1.2) ส่วนค่า compressive resistance ของตัวอย่างทั้งสองก็มีค่าที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 130 kPa ซึ่งสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานของ SIP (ซึ่งมีค่า 104 kPa, ตารางที่ 1.1) ดังนั้นผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่า แผ่นผนังฉนวนกันความร้อนที่เตรียมได้จากงานวิจัยน่าจะมีคุณสมบัติสูงพอที่จะพัฒนาขยายขนาดให้สามารถใช้งานได้จริง

ตารางที่ 3.5 แสดงค่า MOE และ MOR (in bending), compression strength และ screw withdrawal force ของแผ่นฉนวนที่เตรียมได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาอัดช่วงแรก 5 และ 6 นาที แล้วอัดต่อในช่วงที่สองจนครบ 15 นาที

สถานะอัดขึ้นรูป ระยะเวลาอัด ช่วงแรก (นาที)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	compressive strength at 10% deformation (kPa)	screw withdrawal force (N)
5	1410±150*	13±1.8	124±12	390±30
6	1480±120*	14±2.1	131±10	420±20

* เป็นค่าที่ได้จากการทดลองในแนว minor axis

3.4 การอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนหนา 5 ซม.

ในช่วงสุดท้ายของการทำงานวิจัย ผู้วิจัยได้ทดลองขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่มีความหนา 5 ซม. เพื่อยืนยันว่า กระบวนการที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่มีความหนามากขึ้นได้ ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการอัดขึ้นรูปสองขั้นตอนเช่นเดิม และใช้ข้อมูลพื้นฐานจากการเตรียมชั้นผิว OSB และชั้นยางพองน้ำเช่นเดิม (ชั้นผิว OSB หนาด้านละ ~ 0.5 ซม. ชั้นยางพองน้ำแกนกลางหนา 4 ซม.) โดยมีขั้นตอนการอัดขึ้นรูปดังนี้

1. การอัดช่วงแรก: อัดแบบพิมพ์ด้วยความดันประมาณ 24 kg/cm^2 ซึ่งการอัดในช่วงนี้วัสดุในแบบพิมพ์จะถูกกดอัดให้มีความหนาเหลือที่ประมาณ 2.3 – 2.5 ซม. โดยแปรระยะเวลาอัดในช่วงแรกนี้เป็น 7, 9, 12, 15 และ 18 นาที
2. การอัดช่วงที่สอง: ขยายระยะอัดของแบบพิมพ์โดยใช้แท่งเหล็ก spacer กันเพื่อให้ได้ความหนา รวมของแผ่นฉนวนเท่ากับ 5 ซม. ซึ่งเป็นความหนาที่ต้องการ โดยใช้ระยะเวลาอัดในช่วงนี้ต่อจากช่วงที่ 1 ที่ได้กล่าวมาแล้ว ไปจนครบ 20 และ 30 นาที (พบว่าต้องใช้เวลาอย่างน้อย 18 นาที อุณหภูมิของยางแกนกลางจึงมีค่า 120 องศาเซลเซียส)

ซึ่งพบว่าสถานะที่สามารถใช้อัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนแล้วขึ้นงานในลักษณะที่สมบูรณ์มี 4 สถานะ คือ การอัดขึ้นรูปในช่วงแรกด้วยระยะเวลา 12 และ 15 นาที แล้วขยายแบบพิมพ์ เพื่ออัดต่อในช่วงที่สองไปจนครบ 20 และ 30 นาที ตามที่ได้แสดงผลการทดลองในตารางที่ 3.6 ทั้งนี้สาเหตุของการเกิดโพรงอากาศขึ้นบริเวณรอยต่อของชั้นผิว OSB และชั้นยางพองน้ำ ในกรณีการอัดขึ้นรูปด้วยระยะเวลาช่วงแรก 7 และ 9 นาที

คาดว่า การอัดในช่วงแรกด้วยระยะเวลาที่สั้นเกินไป น่าจะส่งผลให้มีการการถ่ายเทความร้อนผ่านเข้าสู่ชั้นยางน้อย จึงเกิดระดับการวัลคาไนซ์ภายในยางคอมพาวด์ต่ำในขณะอัดช่วงแรก เมื่อขยายความหนาของแบบพิมพ์เพื่ออัดต่อในช่วงที่สอง ฟองอากาศที่เกิดจากการสลายตัวของสารฟูล์จิงสามารถไหลไปรวมกันในตำแหน่งที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด นั่นคือตรงบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น OSB และชั้นยาง แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอัดช่วงแรกนานขึ้นเป็น 12 และ 15 นาที ระดับการวัลคาไนซ์ในชั้นยางเกิดได้มากขึ้น ความหนืดของชั้นยางก็สูงขึ้นด้วย จึงเป็นอุปสรรคต่อการไหลของฟองอากาศ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมติดกันระหว่างชั้น OSB และยางฟองน้ำเกิดดีขึ้น ส่วนการอัดด้วยระยะเวลาอัดในช่วงแรก 18 นาที ส่งผลให้ชั้น OSB อยู่ภายใต้สภาวะแรงอัดและอุณหภูมิที่สูงนานเกินไป กาวและเซลลูลอสในแถบนี้จึงเริ่มเกิดการสลายตัว (เกิดรอยไหม้) และที่สภาวะดังกล่าวยังเป็นผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ชั้นยางคอมพาวด์จนระดับการวัลคาไนซ์ที่เกิดขึ้นในชั้นยางเป็นอุปสรรคต่อการขยายตัวของฟองอากาศในชั้นยางฟองน้ำ ค่าความหนาของแผ่นฉนวนจึงต่ำกว่า 5 ซม.

ตารางที่ 3.6 ลักษณะของแผ่นฉนวนหนา 5 ซม. ที่เตรียมได้จากสภาวะการอัดขึ้นรูปต่าง ๆ กัน

ระยะเวลา อัดช่วงแรก (นาที)	อัดช่วงที่สองต่อ จนครบระยะเวลา (นาที)	ลักษณะแผ่นฉนวนที่เตรียมได้
7	20	มีโพรงอากาศอยู่ทั่วระหว่างชั้นผิว OSB และชั้นยาง ชั้นยางฟองน้ำส่วนกลางๆ เกิดการวัลคาไนซ์ไม่สมบูรณ์
	30	มีโพรงอากาศอยู่ทั่วระหว่างชั้นผิว OSB ผิว OSB มีสีเข้มขึ้น และ ชั้นยางฟองน้ำส่วนกลางๆ เกิดการวัลคาไนซ์ไม่สมบูรณ์
9	20	มีโพรงอากาศอยู่บางตำแหน่งระหว่างชั้นผิว OSB และชั้นยาง ฟองน้ำส่วนกลางๆ เกิดการวัลคาไนซ์มากขึ้นแต่ยังไม่สมบูรณ์
	30	มีโพรงอากาศอยู่บางตำแหน่งระหว่างชั้นผิว OSB ผิว OSB มีสี เข้มขึ้น และชั้นยางฟองน้ำส่วนกลางๆ เกิดการวัลคาไนซ์มากขึ้น แต่ยังไม่สมบูรณ์
12	20	ชั้นผิว OSB และชั้นยางเชื่อมติดกันดี ชั้นยางฟองน้ำขยายตัวได้มากและเกิดวัลคาไนซ์อย่างทั่วถึง
	30	ชั้นผิว OSB และชั้นยางเชื่อมติดกันดี ผิว OSB มีสีเข้มขึ้น ชั้นยางฟองน้ำขยายตัวได้มากและเกิดวัลคาไนซ์อย่างทั่วถึง
15	20	ชั้นผิว OSB และชั้นยางเชื่อมติดกันดี ชั้นยางฟองน้ำขยายตัวได้มากและเกิดวัลคาไนซ์อย่างทั่วถึง

	30	ชั้นผิว OSB และชั้นยางเชื่อมติดกันดี ผิว OSB มีสีเข้มขึ้น ชั้นยางฟองน้ำขยายตัวได้มากและเกิดวัลคาไนซ้อย่างทั่วถึง
18	20	ชั้นผิว OSB และชั้นยางเชื่อมติดกันดี แต่ผิว OSB มีรอยไหม้ เกิดฟองอากาศในชั้นยางฟองน้ำในปริมาณน้อยลง ชั้นยาง ฟองน้ำขยายตัวได้ลดลง ความหนาแผ่นฉนวนไม่ถึง 5 ซม.
	30	ชั้นผิว OSB และชั้นยางเชื่อมติดกันดี แต่ผิว OSB มีรอยไหม้ มากขึ้น เกิดฟองอากาศในชั้นยางฟองน้ำในปริมาณน้อยลง ชั้น ยางฟองน้ำขยายตัวได้ลดลง ความหนาแผ่นฉนวนไม่ถึง 5 ซม.

ผู้วิจัยได้แสดงลักษณะแผ่นฉนวนตัวอย่างที่อัดขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์คือ ใช้สภาวะอัดในช่วงแรกนาน 12 และ 15 นาที แล้วอัดต่อในช่วงที่สองจนครบ 20 และ 30 นาที ไว้ในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงแผ่นฉนวนหนา 5 ซม. ที่มีลักษณะสมบูรณ์จากการอัดขึ้นรูปในช่วงแรกด้วยระยะเวลา 12 และ 15 นาที แล้วอัดต่อในช่วงที่สองจนครบ 20 และ 30 นาที

บทที่ 4

บทสรุป

4.1 สรุปผลการวิจัย

1. สามารถอัดขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนความร้อนสำเร็จรูปที่ประกอบด้วยชั้นผิวที่เป็นแถบไม้อัดเรียงสลับ (oriented strand board, OSB) และชั้นยางพองน้ำแกนกลาง ที่มีความหนา รวมทั้งแผ่นฉนวนเท่ากับ 2 ซม. ได้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเดียวกัน
2. ชั้นผิว OSB ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแผ่นฉนวนคือ มีความหนาแต่ละ 0.5 ซม. โดยชั้นผิว OSB ที่บางกว่านี้จะส่งผลให้เกิดการบิดประสานของชั้นแถบไม้ไม่ดี ส่วนชั้นผิว OSB ที่หนากว่านี้จะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ชั้นยางพองน้ำแกนกลางได้น้อยลง
3. ชั้นยางพองน้ำแกนกลางต้องประกอบด้วยสารฟูคือ OBSH ในปริมาณ 10 phr เพื่อให้สามารถเกิดฟองอากาศได้ที่อุณหภูมิของชั้นยางแกนกลางประมาณ 125 องศาเซลเซียส โดยปริมาณของ blank ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชั้นยางพองน้ำที่ขยายตัวแล้วส่งผลให้ได้แผ่นฉนวนมีความหนา 2 ซม.คือ มีปริมาตร ~ 35 % ของช่องว่างแบบพิมพ์
4. กระบวนการอัดขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนที่มีความหนา 2 ซม.ต้องทำในแบบพิมพ์ที่สามารถปรับระยะความลึกของช่องว่างในแบบพิมพ์ได้ โดยใช้ขั้นตอนในการอัด 2 ขั้นตอน คือ ช่วงแรกอัดเป็นระยะเวลา 5 และ 6 นาที เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นผิว OSB จนกว่า MDI เกิดการประสานกับแถบไม้ และเกิดการถ่ายเทความร้อนต่อเข้าสู่ชั้นยางแกนกลางเพื่อให้ OBSH เกิดการสลายตัวให้ฟองอากาศ จากนั้นอัดต่อในช่วงที่สอง โดยขยายแบบพิมพ์เพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ (2 ซม.) ไปจนครบ 15 นาที เพื่อให้ชั้นยางพองน้ำขยายตัวและเกิดการวัลคาไนซ์
5. ค่า internal bonding (ประมาณ 0.25 MPa) และค่าความหนาแน่นของแผ่นผนังฉนวนที่อัดได้บ่งชี้ว่า การอัดแผ่นผนังฉนวนที่มีความหนา 2 ซม.ในช่วงแรกด้วยระยะเวลาอัด 5 และ 6 นาที แล้วอัดต่อช่วงที่สองจนครบ 15 นาที น่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการประสานของกาวในชั้นผิว OSB และเกิดฟองอากาศรวมถึงระดับการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมในชั้นยางพองน้ำแกนกลาง
6. คุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นผนังฉนวน ได้แก่ ค่าความหนาแน่น thickness swelling, (ประมาณ 0.6 %), water absorption (ประมาณ 14 - 17 %) และ thermal conductivity (ประมาณ 0.08 W/mK) และคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฉนวน ได้แก่ modulus of elastic (ประมาณ 1400 MPa), modulus of rupture (ประมาณ 13 MPa) และ compressive strength (ประมาณ 130 kPa) บ่งชี้ว่าน่าจะสามารถพัฒนาแผ่นฉนวนเพื่อใช้ในงานก่อสร้างอาคารได้จริง
7. กระบวนการขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่ได้จากงานวิจัย น่าจะสามารถใช้ในการขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่มีความหนา มากขึ้นถึง 5 ซม.ได้
8. แผนภาพโดยสรุปแสดงกระบวนการขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนจากงานวิจัย
9. ข้อดีของแผ่นผนังฉนวนจากงานวิจัย
 - 9.1 จัดเป็น green product เนื่องจากผลิตจากวัสดุจากธรรมชาติ คือ ไม้ยางพาราและยางธรรมชาติ

- 9.2 เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถเพิ่มค่าคาร์บอนเครดิตให้กับผู้ผลิต เนื่องจากใช้เศษไม้(ซึ่งแต่ก่อนนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิง) และยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งช่วยกักคาร์บอนไว้ในตัวผลิตภัณฑ์
- 9.3 มีกระบวนการผลิตที่สั้นกว่าการผลิต SIP (ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ลักษณะเดียวกัน) เนื่องจากสามารถขึ้นรูปชั้นผิว OSB และชั้นฟองยางแกนกลางได้ในการอัดขึ้นรูปครั้งเดียวกัน ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นพบว่าอยู่ในระดับเดียวกับมาตรฐานของ SIP
- 9.4 ค่าความหนาแน่นของแผ่นผนังที่เตรียมได้จากงานวิจัยอยู่ในกลุ่มของผนังเบา จึงสามารถใช้ในงานก่อสร้างลักษณะเดียวกับผนังเบาได้
- 9.5 มีน้ำหนักเบากว่าผนังก่ออิฐฉาบปูนและผนังคอนกรีตสำเร็จรูปประมาณ (ที่มีปริมาตรเท่ากัน) ประมาณ 5 เท่า และมีความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่าประมาณ 12 เท่า
- 9.6 มีน้ำหนักเบากว่าแผ่นสมาร์ทบอร์ด (ที่มีปริมาตรเท่ากัน) ประมาณ 3 เท่า แต่มีความแข็งแรง (modulus of rupture) สูงกว่าแผ่นสมาร์ทบอร์ดประมาณ 2 เท่า ความต้านทานน้ำ (water absorption) ดีกว่าประมาณ 2 เท่า ความแข็งแรงของการยึดสกรู (screw withdrawing force) สูงกว่าเกือบ 3 เท่า ดังนั้นจึงสามารถติดตั้งในตัวอาคารได้โดยไม่ต้องมีโครงคร่าวของผนัง
10. ข้อดีของแผ่นผนังฉนวนจากงานวิจัย คือวัตถุดิบที่ใช้มีราคาสูงกว่าวัตถุดิบที่ใช้ผลิตแผ่นสมาร์ทบอร์ด เนื่องจากชั้นฟองยางที่เป็นยางธรรมชาติมีราคาสูงกว่าวัตถุดิบที่ใช้ผลิตแผ่นสมาร์ทบอร์ดซึ่งใช้ซีเมนต์และเส้นใยเซลลูโลส (เยื่อกระดาษ) แต่คาดว่าจะสามารถลดต้นทุนในส่วนวัตถุดิบที่ใช้ในชั้นฟองยางลงได้อีก 50% อย่างไรก็ตามข้อดีนี้อาจจะมีใช้เป็นอุปสรรคของการทำการตลาดสำหรับตัวผลิตภัณฑ์นี้ เนื่องจากตัวผลิตภัณฑ์นี้เด่นที่มีคุณสมบัติสูงกว่าสมาร์ทบอร์ดและความเป็น green product อนึ่ง กระบวนการผลิตที่มีระยะเวลาการขึ้นรูปแผ่นผนังที่สั้นลง จะสามารถช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิตลงได้ ซึ่งคาดว่าจะกระบวนการอัดขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนโดยการให้ความร้อนด้วยวิธีการ dielectric heating น่าจะสามารถใช้ลดระยะเวลาในการขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนนี้ได้

4.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการทำวิจัยเพิ่มเติม

1. ทดสอบคุณสมบัติของแผ่นฉนวนหนา 5 ซม.ต้นแบบที่เตรียมได้ หากพบว่ามีคุณสมบัติตามกำหนดของ SIP ที่ใช้ในต่างประเทศและแผ่นสมาร์ทบอร์ดในทางการค้า ก็จะเป็นผลการทดลองที่ยืนยันว่า กระบวนการนี้ น่าจะสามารถขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนความร้อนที่มีความหนาถึง 5 ซม.ได้
2. ผู้วิจัยมีความเห็นว่า ประเด็นที่ต้องศึกษาเพิ่มมี 2 ส่วน คือ

ส่วนแรก เป็นงานที่ทำในห้องปฏิบัติการ

1. เนื่องจากราคาต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตยังสูงกว่าแผ่นสมาร์ทบอร์ด ทั้งนี้ต้นทุนส่วนนี้มาจากราคายางธรรมชาติซึ่งผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถลดต้นทุนส่วนนี้ลงได้ 50 % ซึ่งเป็นงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไป

2. กระบวนการอัดขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนด้วยความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยใช้ระยะเวลากระบวนการอัดขึ้นรูปรวม 15 นาที เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทไปยังบริเวณส่วนแกนกลางของแผ่นฉนวนได้ยาก เพราะความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีของยางธรรมชาติ ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณแกนกลางชั้นยางมีค่าเพียงประมาณ 125 องศาเซลเซียส จึงต้องใช้ระยะเวลาเพื่อให้ชั้นยางฟูและเกิดการวัลคาไนซ์ นอกจากนี้วิธีการขึ้นรูปด้วยการอัดร้อนน่าจะใช้เตรียมแผ่นผนังฉนวนที่มีความหนามากขึ้นได้ยากด้วย เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทไปยังบริเวณส่วนแกนกลางของแผ่นฉนวนที่มีความหนามาก เกิดขึ้นน้อยลงส่งผลให้สารฟูในชั้นยางคอมพาวด์ที่แกนกลางไม่สลายตัวให้ก๊าซและไม่เกิดการวัลคาไนซ์ และถึงแม้จะใช้วิธีการขึ้นรูปแยกชั้นผิว OSB และชั้นฉนวนยางฟองแยกกันก็ตาม ชั้นยางฟองแกนกลางที่หนาขึ้นจะเป็นอุปสรรคของการถ่ายเทความร้อน (SIP ในทางการค้าไม่มีปัญหา) นี้ เพราะชั้นฉนวนที่เป็น EPS จะถูกเตรียมให้เป็นเม็ดโฟมมาก่อนล่วงหน้า แล้วให้ความร้อนแก่เม็ดโฟมเพื่ออัดขึ้นรูปเป็นแผ่น ส่วนกรณีของโฟม PU นั้น ฟองอากาศเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของ PU อยู่แล้ว)

ดังนั้นการอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนเพื่อให้มีระยะเวลาของการขึ้นรูปที่สั้นลงและเพื่อให้สามารถเตรียมแผ่นผนังที่มีความหนาขึ้นในระยะเวลาที่สั้นเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต น่าจะต้องเปลี่ยนไปใช้วิธีให้ความร้อนด้วย dielectric (inductive) heating แทน ซึ่งกระบวนการนี้เป็นวิธีการที่ใช้ทั่วไปในการ cure กาวสำหรับการอัดไม้ประกอบเพื่อลดระยะเวลาของการนำความร้อนเข้าสู่ชิ้นไม้ จึงสามารถใช้อัดขึ้นรูปขึ้นไม้ประกอบที่มีความหนาหลายๆ ได้ และเป็นวิธีการที่ใช้กันทั่วไปสำหรับช่วยวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาหลายๆ

ส่วนที่สอง เป็นงานที่ต้องขยายขนาดการขึ้นรูปแผ่นฉนวนหนา 2 ซม. (และที่หนากว่า หากพบว่ามีความเหมาะสมตามกำหนด) ให้มีขนาดใหญ่ (กว้าง x ยาว) เท่ากับที่ใช้งานจริง เช่น ขนาดประมาณ $1.2 \times 2.4 \text{ m}^2$ (ซึ่งเป็นขนาดเล็กที่สุดตามที่กำหนด) ทั้งนี้เพื่อยืนยันว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปจากงานวิจัยนี้ ใช้ผลิตแผ่นฉนวนได้จริง และเพื่อใช้เตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบคุณสมบัติทางเชิงกลอื่นๆ (ตามมาตรฐานของ SIP ที่ใช้งานในต่างประเทศ) ได้แก่ ความสามารถในการรับแรงกระทำในลักษณะต่างๆ คือ dead load, live loads, wind loads and seismic loads ซึ่งต้องใช้ชิ้นตัวอย่างขนาดใหญ่ ดังนั้นการขยายขนาดคงต้องอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนด้วยเครื่องอัดขนาดใหญ่ในโรงงาน อย่างไรก็ตามการเข้าไปทดลองอัดขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนขนาดใหญ่เท่าจริงเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ระยะเวลาเพื่อหาสภาวะต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป ซึ่งจะส่งผลต่อการผลิตหลักของโรงงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

งานวิจัยนี้จึงต้องพึ่งภาคอุตสาหกรรมในขั้นตอนที่จะยืนยันว่าสามารถนำไปใช้ผลิตจริงได้ ดังนั้นผู้วิจัยมีความเห็นว่า น่าจะทำการศึกษาในส่วนที่สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการ จนได้แผ่นฉนวนที่มีต้นทุนของวัตถุดิบที่ต่ำลง ตลอดจนได้วิธีการขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่มีระยะเวลาการอัดขึ้นรูปที่สั้นลงและสามารถขึ้นรูปแผ่นฉนวนที่มีความหนาขึ้นให้ได้เสียก่อน (ข้อจำกัดทางด้านการผลิตแผ่นผนังที่มีความหนาหลายๆ ขึ้นอยู่กับวิธีการในการอัดขึ้นรูป ส่วนข้อจำกัดทางด้านการผลิตแผ่นฉนวนที่มีขนาดใหญ่ๆ ขึ้นอยู่กับขนาด

ของเครื่องอัด) ณ เวลานั้นข้อมูลที่ได้จากการทำวิจัย น่าจะมากพอที่ทำให้อุตสาหกรรมมีความกล้าในการ
ลองอัดขึ้นรูปแผ่นฉนวนดังกล่าวมากยิ่งขึ้น

4.3 เอกสารอ้างอิง

1. Available at: http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html, accessed on Aug. 2013.
2. Chirasatitsin, S.; Prasertsan, S.; Wisutmethangoon, W.; Kyokong, B. Mechanical properties of rubberwood oriented strandlumber (OSL): The effect of strand length, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2005, 27, 1047-1055 and references therein.
3. Preechatiwong, W.; Yingprasert, W.; Kyokong, B. Effects of phenol-formaldehyde/isocyanate hybrid adhesives on properties of oriented strand lumber (OSL) from rubberwood waste, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2007, 29, 1367-1375 and references therein.
4. Malanit, P.; Barbu, M.C.; Frühwald, A. Physical and mechanical properties of oriented strand lumber made from an Asian bamboo, *European Journal of Wood and Wood Products*, 2010, 69, 27-36 and references therein.
5. Malanit, P.; Kyokong, B. and Laemsak, N. Oriented Strand Lumber from Rubberwood Residues, *Walailak J Sci & Tech.*, 2005, 2, 115-125.
6. Klempner, D.; Sendijarevic, V. **Handbook of polymeric foams and foam technology**, 2nd ed., Hanser Gardner Publications: Ohio, 2004.
7. http://en.wikipedia.org/wiki/Structural_insulated_panel, accessed on Mar. 2012.
8. Hartley, I.D.; Wang, S.; Zhang, Y. Water vapor sorption isotherm modeling of commercial oriented strand panel based on species groups and resin type, *Building and Environment*, 42, 2007, 3655-3659.
9. Oudjehane, A. and Lam, F. On the density profile within random and oriented wood-based composite panels: horizontal distribution, *Composites Part B: Engineering*, 29, 1998, 687-694.
10. del Coz Díaz, J.J.; García Nieto, P.J.; Álvarez Rabanal, F.P.; Betegón Biempica, C. Finite element analysis of thin-walled composite two-span wood-based loadbearing stressed skin roof panels and experimental validation, *Thin-Walled Structures*, 46, 2008, 276-289.
11. European Panel Federation at <http://www.europanel.org>, accessed on Oct. 2013.
12. http://www.solutionsforwood.ca/_docs/reports/TP09-01LightweightPanels.pdf, accessed on Aug. 2013.

4.4 คำชี้แจงต่อความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ

ท่านที่ 1

“ขอให้ตรวจสอบความชัดเจนของตัวหนังสือ โดยละเอียด เนื่องจากตัวหนังสือบางส่วน ไม่ชัดเจน และทำให้อ่านไม่ได้”

ได้ปรับปรุงการทำสำเนารายงานฉบับสมบูรณ์ให้ชัดเจนแล้ว

ท่านที่ 2

1. “นักวิจัยไม่ได้แสดงปริมาณงานและคุณภาพของงานที่ได้ ทำให้ขาดความน่าเชื่อถือว่าได้
ดำเนินการวิจัยในแต่ละขั้นตอนอย่างไร”

ในรายงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการดำเนินงานตั้งแต่เริ่มต้น โครงการที่ได้ศึกษา
สถานะเบื้องต้นของกระบวนการเตรียมชั้นผิว OSB โดยใช้ค่า internal bonding เป็นเกณฑ์บ่งชี้
คุณภาพของชั้นผิว OSB ที่เตรียมได้ จากนั้นกล่าวถึงการพัฒนาสูตรยางคอมพาวด์ชั้นแกนกลาง
เพื่อให้สอดคล้องกับความหนาของชั้นผิว OSB และอุณหภูมิที่ได้จริงจากการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่
ชั้นยางแกนกลางในขณะอัดขึ้นรูป โดยใช้ค่าระยะเวลาในการวัลคาไนซ์และระดับการฟูของชั้นฟอง
ยางแกนกลางเป็นเกณฑ์บ่งชี้คุณภาพ ต่อจากนั้นจึงรายงานผลการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปแผ่น
ผนังฉนวนโดยใช้สถานะที่ได้จากผลการศึกษาการเตรียมชั้นผิว OSB และชั้นยางแกนกลางโดยใช้
ค่าความหนาแน่น, ความหนาของแผ่นผนัง, ขนาด air cell, compression set, internal bonding,
thermal conductivity, thickness swelling, water absorption, MOR และ MOE เป็นเกณฑ์บอก
คุณภาพของแผ่นผนังฉนวนที่เตรียมได้ และได้เปรียบเทียบในรายงานด้วยว่า คุณสมบัติตาม
มาตรฐานของแผ่นผนังฉนวนที่เตรียมได้ มีค่าสูงกว่าแผ่นสมาร์ทบอร์ดที่ใช้งานอยู่ภายในประเทศ
ในและมียังอยู่ในระดับเดียวกับ SIP ที่ใช้งานในต่างประเทศ

ดังนั้นผู้วิจัยมั่นใจว่าผลการทดลองซึ่งแสดงด้วยคุณสมบัติต่างๆที่ได้จากการทดสอบ
ตัวอย่างที่ได้รายงานในแต่ละหัวข้อ สามารถแสดงให้เห็นเหตุและผลของการดำเนินการวิจัยในแต่ละ
ขั้นตอนได้อย่างชัดเจน

“เช่น แผ่นไม้อัดแต่ละข้างเป็นอย่างไร”

คุณสมบัติที่แสดงคุณภาพของชั้นผิว OSB คือ ค่า internal bonding ซึ่งได้ทดสอบ
คุณสมบัติดังกล่าวตั้งแต่ช่วงศึกษาสถานะเบื้องต้นในการเตรียมชั้นผิว OSB และในขั้นตอนการอัด
ขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวน ซึ่งผลการทดลองบ่งชี้ว่าชั้นผิว OSB มีคุณภาพในระดับเดียวกับแผ่น OSB
ทั่วไป

“คุณภาพฟองน้ำและความสมบูรณ์ในการคงรูปฟองน้ำ เป็นต้น”

ได้แสดงค่าความหนา, ความหนาแน่น และขนาดของ air cells ในชั้นยางฟองน้ำ เพื่อบ่งชี้ความสมบูรณ์ (ความมากน้อยของการสลายตัวของสารฟูในยางคอมพาวด์) ของชั้นยางฟองน้ำเมื่อแปรรูตรคอมพาวด์และสถานะที่แตกต่างกันในการเตรียมตัวอย่าง และแสดงค่า compression set เพื่อบ่งชี้ความสมบูรณ์ของการคงรูปของฟองน้ำ

2. “ควรมีภาพแสดงผลการทำงานแต่ละขั้นตอน”

เข้าใจว่าผู้ทรงคุณวุฒิหมายถึงภาพแสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นผนังฉนวนและแสดงลักษณะของแผ่นผนังฉนวนที่เตรียมได้ ซึ่งผู้วิจัยได้แสดงรูปของขั้นตอนการเตรียมแผ่นผนังฉนวนตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมแถบไม้ รูปการเตรียม blank ที่ประกอบด้วยชั้นผิว OSB และชั้นยางแกนกลางลงในแบบพิมพ์ รูปแสดงลักษณะของแบบพิมพ์ที่สามารถปรับระยะความลึก ในบทที่ 2 วิธีการแล้ว จากนั้นได้แสดงลักษณะของชั้นยางฟองน้ำที่เตรียมได้จากสถานะต่างๆ และลักษณะของแผ่นผนังฉนวนที่ได้ในบทที่ 3 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย เรียบร้อยแล้ว

“และสรุปผลให้เป็นค่าที่วัดได้”

ได้เพิ่มเติมค่าที่วัดได้จากผลการทดลองลงในหัวข้อ 4.1 สรุปผลการวิจัย ตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิแนะนำ

“และควรให้ข้อมูลด้วยว่าผลงานที่ได้มีข้อดี-ข้อเสียอย่างไรบ้าง”

ได้เพิ่มเติมข้อดีและข้อด้อยของแผ่นฉนวนที่ได้จากงานวิจัยลงในหัวข้อ 4.1 สรุปผลการวิจัย ตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิแนะนำ