

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ทุนองค์ความรู้ใหม่ฯ สกว. และสสว. IUG5080029
โครงการ สมบัติทางวิศวกรรม การจำลองทางคอมพิวเตอร์ และผลของความร้อน
และแสงยูวีของผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมระหว่างพลาสติกกับผงซีลีเนียม

โดย
ศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

กันยายน 2552

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ท้องทุ่งความรู้ใหม่ฯ สกว. และ สสว. IUG5080029
โครงการ สมบัติทางวิศวกรรม การจำลองทางคอมพิวเตอร์ และผลของความร้อน
และแสงยูวีของผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมระหว่างพลาสติกกับผงซีลีเนียม

คณะผู้วิจัย

1. ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
2. ดร. ทวิช พูลเงิน
3. นางสาวกัลทิมา เขาว์ชาญชัยกุล
4. นายวรกิตติ ประพฤติ

สังกัด

ม.พระจอมเกล้าธนบุรี
ม.พระจอมเกล้าธนบุรี
ม.พระจอมเกล้าธนบุรี
ม.พระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดย

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

และ

สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ สสว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

หัวหน้าโครงการฯ ขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.) เป็นอย่างยิ่งในการให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวิชัย โรซาร์พิทักษ์ กรรมการผู้จัดการบริษัท วี.พี. วู้ด จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์ สำหรับการทดสอบ ในงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สารบัญรายงาน

หัวข้อ	เลขหน้า
ปกหน้า	1
กิตติกรรมประกาศ	3
สารบัญรายงาน	4
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	6
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	9
รายละเอียดรายงานฉบับสมบูรณ์	
ส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ WPC ที่มีหน้าตัดและขนาดของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันและรูปแบบการยึดต่อของหน้าตัด	12
ส่วนที่ 1.1 การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมสำหรับผลิตภัณฑ์ WPC ที่มีรูปร่างและขนาดของหน้าตัดต่างๆ	12
ส่วนที่ 1.2 การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของคานหน้าตัดประกอบที่ได้จากการยึดต่อด้วยอุปกรณ์ยึดแบบต่างๆ	12
ส่วนที่ 1.3 การปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปสำหรับการออกแบบโครงสร้าง	31
ส่วนที่ 1.4 การศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex ในปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ทางบริษัทใช้	46
ส่วนที่ 2 การศึกษาผลของแสงยูวีและความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ WPC	52
ส่วนที่ 2.1 การปรับปรุงการเสื่อมสภาพของวัสดุผสมพีวีซีและซีลียไม้เนื่องจากความร้อน	52
ส่วนที่ 2.2 การปรับปรุงการเสื่อมสภาพของวัสดุผสมพีวีซีและซีลียไม้เนื่องจากแสงยูวี	53
Research Output ที่ได้จากงานวิจัยในโครงการ	55
กิจกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย	56
ภาคผนวก	
เอกสารแนบ 1 ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการนานาชาติ เรื่องที่ 1	
เอกสารแนบ 2 ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการนานาชาติ เรื่องที่ 2	
เอกสารแนบ 3 ลิขสิทธิ์	
เอกสารแนบ 4 ผลการทดสอบสมบัติวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและเส้นใยธรรมชาติซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่างที่ทางบริษัทผู้ร่วมวิจัยนำมาจากต่างประเทศ	

สารบัญรายงาน (ต่อ)

หัวข้อ	เลขหน้า
ภาคผนวก (ต่อ)	
เอกสารแนบ 5 ผลการทดสอบสมบัติการติดไฟของวัสดุ WPC ซึ่งเป็น ผลิตภัณฑ์ของทางบริษัทผู้ร่วมวิจัย	
เอกสารแนบ 6 คู่มือการทดสอบสมบัติของวัสดุ WPC	
เอกสารแนบ 7 การทดสอบสมบัติการรับแรงดัดของวัสดุ WPC ที่มีการ เติมผงทลคัมเปรียบเทียบกับ การเติมแคลเซียม คาร์บอเนต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของทางบริษัท	

สารบัญรายงาน

หัวข้อ	เลขหน้า
ปกหน้า	1
กิตติกรรมประกาศ	3
สารบัญรายงาน	4
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	6
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	9
รายละเอียดรายงานฉบับสมบูรณ์	
ส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ WPC ที่มีหน้าตัดและขนาดของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันและรูปแบบการยึดต่อของหน้าตัด	12
ส่วนที่ 1.1 การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมสำหรับผลิตภัณฑ์ WPC ที่มีรูปร่างและขนาดของหน้าตัดต่างๆ	12
ส่วนที่ 1.2 การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของคานหน้าตัดประกอบที่ได้จากการยึดต่อด้วยอุปกรณ์ยึดแบบต่างๆ	12
ส่วนที่ 1.3 การปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปสำหรับการออกแบบโครงสร้าง	31
ส่วนที่ 1.4 การศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex ในปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ทางบริษัทใช้	46
ส่วนที่ 2 การศึกษาผลของแสงยูวีและความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ WPC	52
ส่วนที่ 2.1 การปรับปรุงการเสื่อมสภาพของวัสดุผสมพีวีซีและซีลียไม์เนื่องจากความร้อน	52
ส่วนที่ 2.2 การปรับปรุงการเสื่อมสภาพของวัสดุผสมพีวีซีและซีลียไม์เนื่องจากแสงยูวี	53
Research Output ที่ได้จากงานวิจัยในโครงการ	55
กิจกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย	56
ภาคผนวก	
เอกสารแนบ 1 ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการนานาชาติ เรื่องที่ 1	
เอกสารแนบ 2 ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการนานาชาติ เรื่องที่ 2	
เอกสารแนบ 3 ลิขสิทธิ์	
เอกสารแนบ 4 ผลการทดสอบสมบัติวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและเส้นใยธรรมชาติซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่างที่ทางบริษัทผู้ร่วมวิจัยนำมาจากต่างประเทศ	

สารบัญรายงาน (ต่อ)

หัวข้อ	เลขหน้า
ภาคผนวก (ต่อ)	
เอกสารแนบ 5 ผลการทดสอบสมบัติการติดไฟของวัสดุ WPC ซึ่งเป็น ผลิตภัณฑ์ของทางบริษัทผู้ร่วมวิจัย	
เอกสารแนบ 6 คู่มือการทดสอบสมบัติของวัสดุ WPC	
เอกสารแนบ 7 การทดสอบสมบัติการรับแรงดัดของวัสดุ WPC ที่มีการ เติมผงทลคัมเปรียบเทียบกับ การเติมแคลเซียม คาร์บอเนต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของทางบริษัท	

Abstract

Project Code: IUG5080029
Project Title: Engineering Properties, Computer Simulations and Thermal and UV light Effects of Wood Plastic Composite (WPC) Products
Main Researcher: Professor Dr Narongrit Sombatsompop
Email address: narongrit.som@kmutt.ac.th
Project Period: 28st September 2007 – 27st September 2009

Objectives:

1. To study the engineering properties of wood polymer composites (WPC) products with different sizes and cross-sections for beam and floor applications.
2. To propose joining methods of WPC members for optimum engineering properties for various WPC cross-sections.
3. To study the effects of thermal and UV ageing on the physical, structural and mechanical properties of WPC products and to explore possibility of using Ca/Zn complex stabilizer for replacement of the existing thermal stabilizer of V.P. Wood Co. Ltd.
4. To encourage small-medium enterprise research works in collaboration between private sector and university.

Methodology, Result and Discussion

The content of this research project was divided into two parts, which were (Part 1) studies on engineering properties of wood-polymer composites (WPC) with different sizes and cross-sections as well as their joint properties, and (Part 2) effects of thermal and UV ageing on the properties of WPC composites products.

Part 1 involved the effects of sizes and cross-sections of WPC products and loading direction on engineering properties of wood-polymer composites (WPC), and proposed methods of joining all the WPC parts for structural applications. This part can be described in 4 sub-parts. Part 1.1 assessed the engineering properties of five different cross-sections which were designated as M001, M005, M009, M014 and M015. The experimental results suggested that the M005 gave the highest flexural properties. Higher flexural properties were obtained when testing the WPVC composites in edge-wise loading direction. The findings in this work suggested that low number of hollow cores with thick flanges and webs should be used to obtain the composite with higher flexural properties. The WPVC composite with low density was observed to exhibit lower flexural strength. The rate of loading had a marginal effect on the flexural properties of the composites. Part 1.2 studied the methods of joining WPC products. In this part, four different joining configurations were proposed, these including I-

Beam, II-Beam, Rectangular Beam and Square Beam and three joining methods were used, these being screw, screw-adhesive and adhesives. The results suggested that joining the WPC members with adhesives gave the most satisfaction in terms of ultimate strength capacity and cost savings. Part 1.3 involved upgrading and improving the ready-to-use computer program by adding the engineering properties of a wider range of single and jointed WPC members obtained in Parts 1.1 and 1.2 into the existing program obtained in our previous projects with the V.P. Wood Co. Ltd. Part 1.4 studied the effect of Ca/Zn complex stabilizer on the thermal stability of WPC by varying the Ca/Zn stabilizer of 2.5, 5.0 and 7.5 parts per hundred PVC in order to replace the toxic-metal based thermal stabilizer. The results suggested that Ca/Zn complex stabilizer gave the same stabilizing effect and mechanical properties of the WPC products as compared with the metal based stabilizer that was being used by the V.P. Wood Co. Ltd.

Part 2 investigated the effects of thermal and UV ageing on the properties of WPC composites products and this part was considered by two separate parts. Part 2.1 aimed to improve the thermal stability of PVC using zinc stearate, lead stearate and zeolite by varying their loadings from 2.4–4.8 phr PVC, and assess thermal stabilities in terms of yellowness index, polyene content, %weight loss, decomposition temperature (T_d) before and after thermal ageing. It was found that the additions of Zn and Pb stearates into PVC and wood/PVC composite could improve the thermal stability of the PVC. At low test temperature, the additions of Zn and Pb stearates could improve the thermal stabilities of PVC by retarding the unzipped reaction and by reducing the conjugated double bonds in PVC, Pb stearate being the most suitable for thermally stabilizing the PVC. Around the T_d range, the addition of Zn stearate reduced the T_d value of PVC whereas that of Pb stearate had no effect on the change in T_d value. Zeolite loading could shift the T_d value of the PVC from 264 to 280°C. The addition of wood particles increased the polyene content and decreased the decomposition temperature of the PVC. The effect of wood flour on the thermal and structural changes of PVC overruled that of thermal stabilizer loading. Part 2.2 currently focuses on the effects of UV stabilizer type and loading as well as wood content on mechanical and structural properties of WPC products before and after QUV ageing. This part of work is yet to complete since the twin-screw extruder, which is the main equipment for this work, was broken down. In addition, carrying out the work in QUA equipment is time-consuming. However, all the problems have now been solved and we are the process of analyzing the experimental results and preparing a manuscript for publishing in an international journal. All are expected to be finalized by the end of December 2009.

At present, the research outputs obtained from this work were two accepted publications in international journals with impact factors and one patent application (under consideration).

- **Sombatsompop N, Prapruit W, Chaochanchaikul K, Pulngern T & Rosarpitak V** – Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beams – *Journal of Vinyl & Additive Technology* (in press) (JIF = 0.658)
- **Sombatsompop N, Taptim K, Chaochanchaikul K, Thongpin C & Rosarpitak V** (2008) Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite – *Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry*, 45(7): 534–541.(JIF = 0.720)
- Reinforcing and stabilizing Methods for Wood/PVC Composite Products by Synthetic Glass Fiber and Thermal-UV Stabilizers, *Thai Patent Application*, Number 0801004853, filed on 22nd September 2008, owned by TRF, V.P. Wood Co. Ltd. and KMUTT.

Keywords: Wood Sawdust, Design, Composite, Engineering Properties, Weatherin

บทคัดย่อ

รหัสงานวิจัย: IUG5080029

ชื่องานวิจัย: สมบัติทางวิศวกรรม การจำลองทางคอมพิวเตอร์ และผลของความร้อนและแสงยูวีของผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมระหว่างพลาสติกกับผงซีลี้อยไม้

ผู้วิจัยหลัก: ศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

ที่อยู่อิเล็กทรอนิกส์: narongrit.som@kmutt.ac.th

ระยะเวลาการดำเนินงาน: ตั้งแต่วันที่ 28 กันยายน 2550 ถึง 27 กันยายน 2552

วัตถุประสงค์:

1. เพื่อศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ Wood Polymer Composites (WPC) ที่มีหน้าตัดและขนาดของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันสำหรับโครงการคานและโครงสร้างพื้น
2. เพื่อศึกษารูปแบบการยึดต่อของหน้าตัดที่มีประสิทธิภาพในการรับแรงสูงสุดของผลิตภัณฑ์ WPC ที่มีหน้าตัดต่างๆ
3. เพื่อศึกษาผลของแสงยูวีและความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างเคมีและสมบัติทางกลเชิงวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ WPC และศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ Ca/Zn complex แทนการใช้สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของทางบริษัท
4. เพื่อสนับสนุนการพัฒนาผลผลิตเชิงคุณภาพแก่ภาคเอกชนที่เป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงขนาดกลาง โดยผ่านกระบวนการวิจัยจากหน่วยงานภาครัฐ

วิธีการทดลอง ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ มีการดำเนินใน 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ WPC ที่มีหน้าตัดและขนาดของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันและรูปแบบการยึดต่อของหน้าตัด และส่วนที่ 2 การศึกษาผลของแสงยูวีและความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ WPC สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 1 ประกอบด้วยงานวิจัย 4 ส่วนย่อย ดังนี้ ส่วนที่ 1.1 เป็นการศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมของชิ้นงาน WPC ที่มีรูปร่างและขนาดของหน้าตัดแตกต่างกัน หน้าตัดที่ทำการศึกษามีทั้งสิ้น 5 หน้าตัด ได้แก่ รหัสหน้าตัด M001, M005, M009, M014 และ M015 โดยทำการศึกษาผลของรูปร่างหน้าตัดและทิศทางการทดสอบที่มีต่อสมบัติการรับแรงดัด ผลการศึกษาพบว่า ชิ้นงานหน้าตัด M005 มีสมบัติในการรับแรงดัดสูงสุด และปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการรับแรงดัด คือ จำนวนของช่องกลวง (hallow core) ความหนาของผนังชิ้นงานในแนวตั้ง (web) ความหนาของผนังชิ้นงานในแนวนอน (flange) และความหนาแน่นของชิ้นงาน จากนั้นได้ทำการศึกษางานวิจัยส่วนที่ 1.2 ศึกษาแนวทางการต่อยึดคานหน้าตัดประกอบแบบต่างๆ โดยใช้หน้าตัด M001 ชิ้นงานหลักในการประกอบ โดยลักษณะของคานหน้าตัดประกอบมี 4 แบบ คือ I-Beam, II-Beam, Rectangular Beam และ Square Beam และมีรูปแบบการยึดต่อใน 3 รูปแบบ คือ การยึดต่อโดยใช้ตะปูเกลียว การยึดต่อโดยใช้ตะปูเกลียวร่วมกับกาว และการยึดต่อโดยใช้กาว ผลการทดสอบพบว่า คานหน้าตัดประกอบ I-Beam ที่ยึดด้วยกาวเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยพิจารณาจากสมบัติการรับกำลังและต้นทุนการผลิต งานในส่วนที่ 1.3 เป็นการปรับปรุงโปรแกรม

คอมพิวเตอร์สำเร็จรูปสำหรับการออกแบบโครงสร้าง โดยการนำข้อมูลที่ได้จากส่วนแรกและส่วนที่สองมาปรับปรุงและปรับแก้ในโปรแกรมสำเร็จรูปที่ได้ทำการพัฒนา ซึ่งจากการปรับปรุงโปรแกรมสำเร็จรูปทำให้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่มีความหลากหลายของหน้าตัด และมีประสิทธิภาพในการใช้งานสะดวกมากยิ่งขึ้น โดยโปรแกรมสามารถใช้งานได้ครอบคลุมหน้าตัดของคานและพื้นที่ทางบริษัทผู้ร่วมทุนวิจัยผลได้อยู่ งานส่วนที่ 1.4 เป็นการศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn Complex ในปริมาณต่าง ๆ เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ทางบริษัท วีพีวูด จำกัด ใช้อยู่ โดยทำการปรับสัดส่วน Ca/Zn Complex ในปริมาณ 2.5, 5.0 และ 7.5 ส่วนในพลาสติก PVC 100 ส่วน จากการศึกษาพบว่า สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn Complex มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ทางบริษัท วีพีวูด จำกัด ใช้อยู่ โดยพิจารณาจากสมบัติทางเสถียรภาพทางความร้อน และสมบัติทางกล

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นการศึกษาผลของแสงยูวีและความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ WPC สามารถแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนย่อย โดยมีรายละเอียดดังนี้ ส่วนที่ 2.1 เป็นการปรับปรุงการเสื่อมสภาพทางความร้อนของวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยู่ไม้ โดยในงานวิจัยได้มีการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน โดยสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่นำมาทำการศึกษา ประกอบด้วย สเตียเรทของสังกะสี (zinc stearate), สเตียเรทของตะกั่ว (lead stearate) และซีโอไลท์ (zeolite) และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ตั้งแต่ 2.4 และ 4.8 phr และทำการประเมินผลจากการวัดการเปลี่ยนแปลงสีและค่าดัชนีความเหลือง (CIE yellowness index) ก่อนและการบ่มเร่งด้วยความร้อน, ค่าดัชนีพอลิอิน (polyene index), เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไป (%weight loss) และอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) จากผลการศึกษาวิจัย พบว่า การใช้สเตียเรทของสังกะสี และสเตียเรทของตะกั่วเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนมีส่วนช่วยในการปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของพีวีซีทั้งในกรณีของพีวีซี และวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยู่ไม้ โดยสารเพิ่มเสถียรภาพความร้อนทั้ง 2 ชนิด มีส่วนช่วยในการหน่วงการเกิดปฏิกิริยา unzip ในสายโซ่ของพีวีซีให้เกิดได้ช้าลงส่งผลให้เกิดพันธะคู่ แบบคอนจูเกต (conjugated double bond) ในสายโซ่พีวีซีได้ลดลง ผลของการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวของพีวีซี พบว่า การเติมสเตียเรทของสังกะสีมีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของพีวีซีมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การเติมสเตียเรทของตะกั่วไม่มีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของพีวีซีเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนการเติมซีโอไลท์มีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของพีวีซีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 264 เป็น 280°C จากการพิจารณาผลของเสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัว พบว่า สเตียเรทของตะกั่วเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับพีวีซีมากที่สุด ส่วนผลของการเติมผงซีลี้อยู่ลงในพีวีซี พบว่า ผงซีลี้อยู่มีส่วนเหนียวนาให้พีวีซีเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนได้ง่ายขึ้น สำหรับงานวิจัยในส่วนที่ 2.2 การปรับปรุงการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงยูวีของวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยู่ไม้ ทางคณะวิจัยฯ ได้ทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเพิ่มเสถียรภาพทางแสงยูวี และผลของปริมาณผงซีลี้อยู่ ภายใต้สภาวะการบ่มเร่งในเครื่องเร่งสภาวะ QUV และสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ และทำการประเมินผลจากสมบัติทางกล ทางกายภาพ และโครงสร้างทางเคมี งานวิจัยในส่วนนี้ยังดำเนินการไม่แล้วเสร็จ เนื่องจากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่ใช้เป็นเครื่องมือหลักในการวิจัยชำรุดเสียหายหลายครั้ง นอกจากนี้ ขั้นตอนการบ่มเร่งสภาวะด้วยแสงยู

วีเกิดความล่าช้า เนื่องจากต้องรอการใช้เครื่องบ่มแรงสภาวะด้วยแสงยูวี อย่างไรก็ตามทางคณะวิจัยฯ ขณะนี้ ปัญหาต่างๆ ผ่านไปได้ด้วยดีแล้ว และขณะนี้อยู่ระหว่างเก็บผลการทดลอง และคาดว่าจะสามารถ ดำเนินการวิจัยจนสามารถผลิตบทความวิจัยตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติจากงานวิจัยในส่วนดังกล่าวนี้ ได้จำนวน 1 บทความ ภายในเดือนธันวาคม 2552

ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการวิจัย จนถึงขณะนี้ คือบทความวิจัยได้รับการตอบรับในตีพิมพ์ใน วารสารวิชาการนานาชาติที่มีค่า journal impact factors จำนวน 2 บทความ และสิทธิบัตร จำนวน 1 สิทธิบัตร มีดังนี้

- Sombatsompop N, Prapruit W, Chaochanchaikul K, Pulngern T & Rosarpitak V - Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beams - *Journal of Vinyl & Additive Technology* (in press) (JIF = 0.658) มีรายละเอียดตั้งเอกสารแนบ 1
- Sombatsompop N, Taptim K, Chaochanchaikul K, Thongpin C & Rosarpitak V (2008) Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite - *Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry*, 45(7): 534-541.(JIF = 0.720) มีรายละเอียดตั้งเอกสารแนบ 2
- สิทธิบัตร เรื่อง “กรรมวิธีการเสริมแรงผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมพีวีซีและซีลียไม้โดยเส้นใยแก้วสังเคราะห์และสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและแสงยูวี” สิทธิบัตรไทย เลขที่คำขอ 0801004853 ณ วันที่ 22 กันยายน 2551 มีรายละเอียดตั้งเอกสารแนบ 3

คำสำคัญ ผงซีลียไม้, การออกแบบ, วัสดุผสม, สมบัติทางวิศวกรรม, ความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม

ส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ WPC ที่มีหน้าตัดและขนาดของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันและรูปแบบการยึดต่อของหน้าตัด

1.1 การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมสำหรับผลิตภัณฑ์ WPC ที่มีรูปร่างและขนาดของหน้าตัดต่าง ๆ

งานวิจัยในส่วนนี้เป็นการศึกษาสมบัติการรับแรงดัดของชิ้นงานคานวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยไม้ (WPVC) ที่มีการเติมผงซีลี้อยไม้ในปริมาณสูงซึ่งทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ในระดับโรงงาน โดยทำการศึกษาผลของรูปร่างหน้าตัดที่มีต่อสมบัติการรับแรงดัด โดยการนำชิ้นงานคานที่มีขนาดหน้าตัดที่แตกต่างกัน จำนวน 5 หน้าตัด มาทำการศึกษา และศึกษาผลของสภาวะการทดสอบ โดยทำการศึกษาผลของทิศทางการให้แรงกระทำ, ผลของขนาด, จำนวนช่องกลวง, ความหนาแน่น, ความหนาชิ้นงาน, ระยะฐานการรองรับของคาน, อัตราการให้แรงกระทำ จากผลการทดลอง พบว่า รูปร่างหน้าตัดของผลิตภัณฑ์คาน WPVC มีผลอย่างมากต่อสมบัติการรับแรงดัด ชิ้นงาน WPVC ที่มีจำนวนของช่องกลวง (hollow core) ภายในหน้าตัดของคานที่น้อย และความหนาของผนังชิ้นงานคานในแนวตั้ง (web) และความหนาของผนังชิ้นงานคานในแนวนอน (flange) ที่มีความหนามากมีผลทำให้ชิ้นงานคาน WPVC มีสมบัติการรับแรงดัดที่เพิ่มสูงขึ้น สำหรับผลของทิศทางการให้แรงกระทำ พบว่า การให้แรงกระทำกับชิ้นงานในแนวตั้ง (edge-wise) มีผลทำให้ชิ้นงานมีสมบัติการรับแรงดัดที่สูงกว่ากรณีการรับแรงในนอน (flat-wise) ชิ้นงาน WPVC ที่มีความหนาแน่นต่ำถูกสังเกตพบว่ามีค่าความทนทานต่อการดัดงอต่ำ การเปลี่ยนแปลงอัตราการให้แรงกระทำไม่ค่อยส่งผลต่อสมบัติการรับแรงดัดของวัสดุผสมมากนัก ระยะฐานการรองรับของคานเริ่มไม่มีผลต่อสมบัติการรับแรงดัดเมื่ออัตราส่วนระหว่างระยะฐานการรองรับคานและความหนาของชิ้นงานทดสอบ (L/D) มากกว่า 10 และ 16 สำหรับการให้แรงกระทำในทิศทางแนวตั้งและแนวนอน ตามลำดับ งานวิจัยในส่วนที่ 1.1 นี้ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์ในวารสาร *Journal of Vinyl & Additive Technology* (JIF = 0.658) ในชื่อเรื่อง “Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beams” โดยมีรายละเอียดดังเอกสารแนบ 1

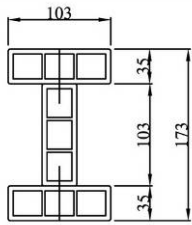
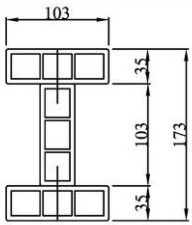
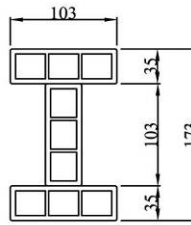
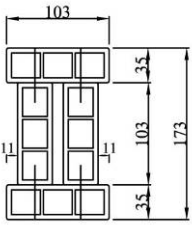
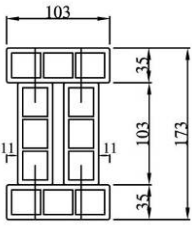
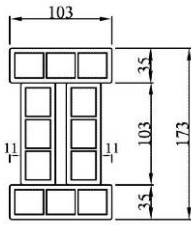
1.2 การศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของคานหน้าตัดประกอบที่ได้จากการยึดต่อด้วยอุปกรณ์ยึดแบบต่าง ๆ

งานวิจัยในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของคานหน้าตัดประกอบโดยเน้นสมบัติการรับแรงดัดและแรงเฉือน ได้แก่ Modulus of Elasticity, Modulus of Rapture และ Shear Modulus ของชิ้นงานคานหน้าตัดประกอบ ซึ่งประกอบจากวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยไม้ (WPVC) ที่มีอัตราส่วน 100:100 โดยน้ำหนัก โดยใช้น้ำหนัก โดยใช้หน้าตัด M001 ประกอบกันให้ได้คานหน้าตัด I-Section, II-Section และหน้าตัดสี่เหลี่ยมแบบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยรูปแบบการยึดต่อ 3 รูปแบบ แบบที่ 1 ยึดต่อโดยใช้ตะปูเกลียว แบบที่ 2 ยึดต่อโดยใช้ตะปูเกลียวร่วมกับกาว และแบบที่ 3 ยึดต่อกับกาว และนำมาทดสอบสมบัติการรับแรงดัดและแรงเฉือน อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D198(1998)และ ASTM D 790(1999)

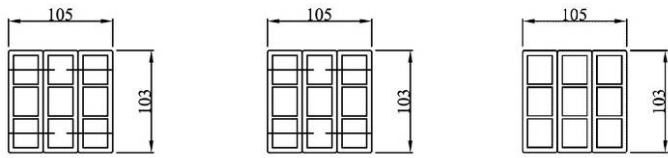
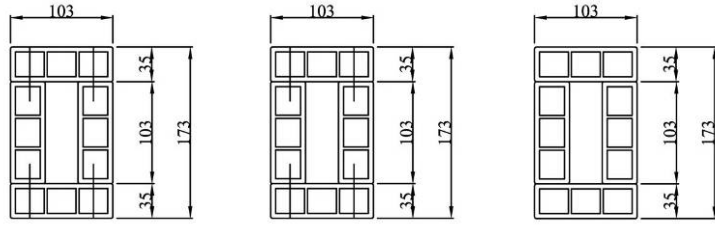
การประกอบคานหน้าตัดประกอบ

นำชิ้นงานหน้าตัด M001 มาทำการประกอบคานหน้าตัดประกอบแบบต่างๆ ด้วยอุปกรณ์ยึดต่อแบบต่างๆ คานประกอบหน้าตัดต่างๆ ประกอบด้วย คานหน้าตัด I-Section, II-Section และหน้าตัดสี่เหลี่ยมแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยกำหนดให้มีรูปแบบการยึดต่อ 3 รูปแบบ แบบที่ 1 ยึดต่อโดยใช้ตะปูเกลียว แบบที่ 2 ยึดต่อโดยใช้ตะปูเกลียวร่วมกับกาว และแบบที่ 3 ยึดต่อด้วยกาว ซึ่งการยึดต่อด้วยตะปูเกลียวจะทำการยึดต่อทุกๆ ระยะ 30 เซนติเมตร ส่วนการยึดต่อด้วยกาว ดำเนินการโดยการทาขาวตลอดแนวการยึดต่อและตำแหน่งที่ทาขาวดำเนินการขัดผิวชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานยึดติดได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 1 หน้าตัดคานประกอบที่ใช้ในการศึกษา

Specimen Code	Cross Section	Dimension (mm. x mm.)
หน้าตัดประกอบ I-Beam จาก M001 3 ชิ้น	   ยึดต่อโดยใช้ ตะปูเกลียว ยึดต่อโดยใช้ ตะปูเกลียวร่วมกับ กาว ยึดต่อโดยใช้ กาว	103 × 173
หน้าตัดประกอบ II-Beam จาก M001 4 ชิ้น	   ยึดต่อโดยใช้ ตะปูเกลียว ยึดต่อโดยใช้ ตะปูเกลียวร่วมกับ กาว ยึดต่อโดยใช้ กาว	103 × 173

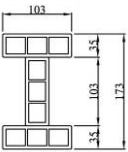
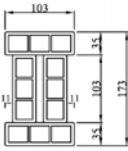
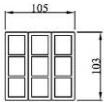
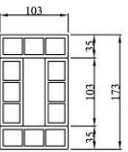
ตารางที่ 1 หน้าตัดคานประกอบที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

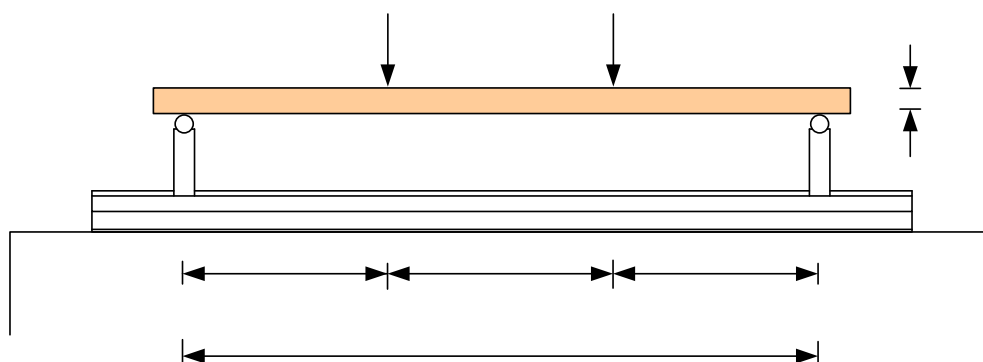
Specimen Code	Cross Section	Dimension (mm. x mm.)
หน้าตัดประกอบ Square Beam จาก M001 3 ชิ้น	 ยึดต่อโดยใช้ ตะปูเกลียว ยึดต่อโดยใช้ ตะปูเกลียวร่วมกับ กาว ยึดต่อโดยใช้ กาว	105 × 103
หน้าตัดประกอบ Rectangular Beam จาก M001 4 ชิ้น	 ยึดต่อโดยใช้ ตะปูเกลียว ยึดต่อโดยใช้ ตะปูเกลียวร่วมกับ กาว ยึดต่อโดยใช้ กาว	103 × 173

การทดสอบแรงดัด

สำหรับในการทดสอบการรับแรงดัด ในงานวิจัยนี้ได้รายงานความสามารถในการรับแรงดัดโดยเปรียบเทียบระหว่างวัสดุผสมพลาสติกต่อซี่เหล็ยไม้ที่มีอัตราส่วนผสมเดียวกันแต่มีรูปแบบของหน้าตัดประกอบต่างกัน สำหรับวิธีการ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D198(1998) ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาสมบัติของโครงสร้างไม้ และเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการคืบของวัสดุพลาสติก อัตราเร็วในการให้แรงกระทำกับวัสดุผสม ดำเนินการอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 790(1999) ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบพลาสติก ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น หน้าตัดคานประกอบที่ใช้ในการทดสอบมีรูปทรงและขนาดหน้าตัด ดังแสดงในตารางที่ 1 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทำการทดสอบแรงดัดแต่ละแบบ คือ 3 ชิ้นงาน ระยะการวางฐานรองรับการกด ระยะหักกด และอัตราเร็วในการกด แสดงใน รูปที่ 1 ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระยะและอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกดของการทดสอบแรงดัด

หน้าตัด วัสดุทดสอบ	เงื่อนไขการทดสอบ	วัสดุผสมพลาสติกและซีเมนต์ PVC:SD (100:100)
	ระยะ a (เมตร)	0.92
	ระยะ L (เมตร)	2.77
	อัตราเร็วในการกด (มม./นาที)	81.93
	ระยะ a (เมตร)	0.92
	ระยะ L (เมตร)	2.77
	อัตราเร็วในการกด (มม./นาที)	81.93
	ระยะ a (เมตร)	0.55
	ระยะ L (เมตร)	1.65
	อัตราเร็วในการกด (มม./นาที)	48.78
	ระยะ a (เมตร)	0.92
	ระยะ L (เมตร)	2.77
	อัตราเร็วในการกด (มม./นาที)	81.93



รูปที่ 1 รูปแบบการทดสอบสมบัติการรับแรงดัดแบบ 4 จุด (Four point bending)

รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบแรงดัดแบบ 4 จุดของคานหน้าตัดประกอบ การรายงานผลการทดสอบแรงดัด ประกอบด้วย ค่ามอดูลัสอีลาสติก และค่ามอดูลัสการแตกหัก โดยใช้สมการที่ 1 และ 2 ในการคำนวณ ตามลำดับ



รูปที่ 2 การติดตั้งการทดสอบแรงดัดแบบ 4 จุดของวัสดุหน้าตัดประกอบ

$$E = \frac{Pa}{12\Delta I} (3La - 4a^2)$$

สมการที่ 1

$$S_R = \frac{Mc}{I}$$

สมการที่ 2

เมื่อ

P = น้ำหนักกระทำช่วงอิลาสติก (นิวตัน)

a = ระยะจากฐานรองรับถึงตำแหน่งที่แรงกระทำ ซึ่งเท่ากับ $L/3$ (มิลลิเมตร)

L = ระยะความยาวช่วงคาน (มิลลิเมตร)

I = โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกนสะเทินของรูปตัด (มิลลิเมตรกำลังสี่)

Δ = ระยะการโก่งของคาน ณ ตำแหน่งที่แรงกระทำ (มิลลิเมตร)

M = โมเมนต์ดัดสูงสุด (นิวตันมิลลิเมตร)

c = ระยะจากแกนสะเทินของรูปตัดถึงขอบ (มิลลิเมตร)

ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสมฟิบริซ์และซีเมนต์ (100:100) หน้าตัดคานประกอบ โดยการยัดรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแรงดัดของหน้าตัดประกอบที่มีสูตรผสมเป็น PVC:SD (100:100)

Section	Characteristics	Specimen Inertia of x- axis (I_x) (mm. ⁴)	Deflection at Max. load $\times 10^{-2}$ (m)	Max. load (N)	Max. bending (N-m)	Modulus of rupture (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
I - Beam 	ยัดด้วยตะปูเกลียว		6.73	3,709	1,715	9.5(0.12)	1,850(62.60)
	ยัดด้วยตะปูเกลียวและกาว	15,675,807	6.94	9,388	4,596	25.4(1.24)	3,444(132.18)
	ยัดด้วยกาว		8.73	9,983	4,616	25.5(0.85)	3,476 (34.23)
II - Beam 	ยัดด้วยตะปูเกลียว		6.70	6,184	2,859	14.4(0.08)	2,815(46.37)
	ยัดด้วยตะปูเกลียวและกาว	17,225,696	6.43	9,468	4,377	22.0(0.55)	3,437(48.64)
	ยัดด้วยกาว		8.04	11,174	5,166	25.9(0.70)	3,453 (77.76)
Rectangular Beam 	ยัดด้วยตะปูเกลียว		7.64	6,180	2,857	14.3(0.24)	2,145(163.24)
	ยัดด้วยตะปูเกลียวและกาว	17,225,696	5.97	8,931	4,129	20.7(2.10)	3,403(25.40)
	ยัดด้วยกาว		8.41	11,661	5,391	27.1(0.48)	3,487(58.54)
Square Beam 	ยัดด้วยตะปูเกลียว		4.39	7,766	2,140	23.7(0.40)	3,417(145.26)
	ยัดด้วยตะปูเกลียวและกาว	4,649,667	3.48	6,775	1,868	20.7(3.17)	3,755(89.14)
	ยัดด้วยกาว		5.03	8,959	2,470	27.4(1.33)	3,827(31.61)

The values in parentheses indicate standard deviation (SD).

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดัดของคานหน้าตัดประกอบหน้าตัดต่างๆ จากการทดสอบพบว่า การยึดต่อคานประกอบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การยึดด้วยกาว รองลงมาคือ การยึดด้วยตะปูเกลียวร่วมกับกาว และการยึดด้วยตะปูเกลียว ตามลำดับ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมบัติการรับแรงดัดของคานหน้าตัดประกอบของแต่ละแบบ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้การยึดคานหน้าตัดประกอบด้วยกาวมีประสิทธิภาพก็คือ กาวจะเป็นตัวประสานคานหน้าตัดประกอบให้ติดกันทำให้คานประกอบสามารถรับแรงได้มาก ในขณะที่การยึดคานประกอบโดยมีตะปูเกลียวเป็นตัวยึด ตรงตำแหน่งที่ยึดโดยตะปูเกลียวเป็นจุดที่อ่อนแอของวัสดุผสม ส่งผลทำให้ความสามารถในการรับแรงน้อยที่สุด ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่ามอดูลัสการแตกหักและค่ามอดูลัสฮิสเทติก และจากการทดสอบพบว่า หน้าตัดประกอบทั้ง 4 แบบ มีสมบัติการรับแรงดัดใกล้เคียงกัน สำหรับลักษณะการวิบัติของวัสดุหน้าตัดประกอบ การวิบัติที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณผิวด้านล่างของชิ้นงาน ซึ่งเป็นบริเวณที่รับแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเมื่อพิจารณาถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความเปราะเพราะมีการโก่งตัวที่น้อยก่อนการวิบัติ



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 3 การวิบัติของชิ้นงานทดสอบแรงดัดวัสดุหน้าตัดประกอบหน้าตัดต่างๆ

(a) I – Beam

(c) Rectangular Beam

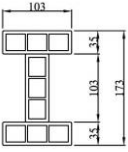
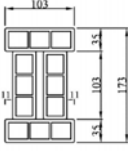
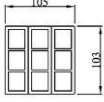
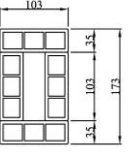
(b) II – Beam

(d) Square Beam

การทดสอบแรงเฉือน

การทดสอบแรงเฉือนใช้วิธีการดัดแบบ 5 จุด (Five point bending) เพื่อให้เกิดการวิบัติจากแรงเฉือนภายในคานเนื่องจากการดัด ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีรูปทรงและขนาดหน้าตัดเช่นเดียวกันกับการทดสอบแรงดัดซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 1 จำนวนชิ้นงานที่ใช้ทำการทดสอบแรงเฉือนแต่ละหน้าตัด คือ 3 ชิ้นงาน ระยะการวางฐานรองรับการกดและหักกดได้ระบุไว้ในรูปที่ 4(a) และมีรายละเอียดของตำแหน่งหักกด ความยาวช่วง และอัตราเร็วในการกด ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระยะและอัตราการเคลื่อนที่ของหักกดของการทดสอบแรงเฉือน

หน้าตัด วัสดุทดสอบ	เงื่อนไขการทดสอบ	วัสดุผสมพลาสติกและซีลี้อย PVC:SD (100:100)
	ระยะ a (เมตร) ระยะ L (เมตร) อัตราเร็วในการกด (มม./นาที)	0.87 1.73 8.00
	ระยะ a (เมตร) ระยะ L (เมตร) อัตราเร็วในการกด (มม./นาที)	0.87 1.73 8.00
	ระยะ a (เมตร) ระยะ L (เมตร) อัตราเร็วในการกด (มม./นาที)	0.52 1.03 4.76
	ระยะ a (เมตร) ระยะ L (เมตร) อัตราเร็วในการกด (มม./นาที)	0.87 1.73 8.00

รูปที่ 4(b) เป็นแผนภาพแสดงขนาดและทิศทางของแรงเฉือน (Shear force diagram) ณ ตำแหน่งต่างๆ ของคานขณะที่รับแรงดัดแบบ 5 จุด สำหรับการทดสอบแบบนี้คานจะเกิดแรงเฉือนตลอดความยาวช่วงคานและขนาดของแรงเฉือนสูงสุดมีค่าเท่ากับ $\frac{11P}{16}$ ในการรายงานผลการทดสอบจะแสดงค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) ซึ่งคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3

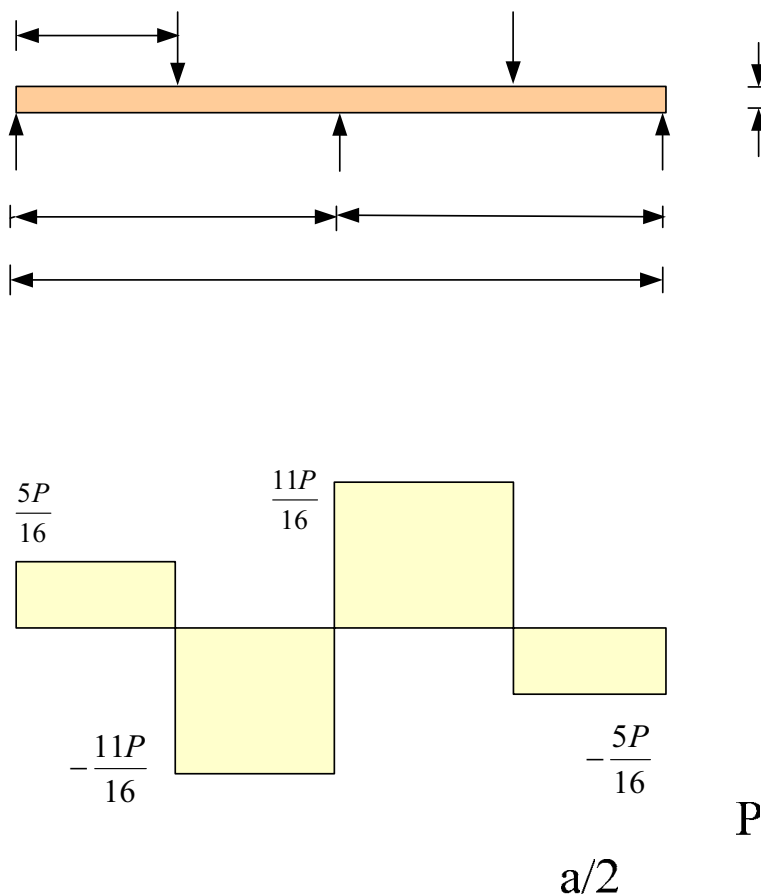
$$\tau = \frac{VQ}{Ib}$$

สมการที่ 3

เมื่อ

 τ = หน่วยแรงเฉือน (นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร) Q = โมเมนต์รอบแกนสะเทินของพื้นที่จากขอบหน้าตัดถึงแนวที่ต้องการหาหน่วยแรงเฉือน (มิลลิเมตรกำลังสาม) V = แรงเฉือนสูงสุดที่กระทำต่อคาน (นิวตัน) I = โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกนสะเทินของรูปตัด (มิลลิเมตรกำลังสี่) b = ความกว้างของรูปตัดส่วนที่ต้องการหาหน่วยแรงเฉือน (มิลลิเมตร)

รูปที่ 4(a) เป็นตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือน โดยที่ระยะการวางฐานรองรับการกดมีระยะห่างเท่ากับ a และระยะหัวกดระยะห่างเท่ากับ $a/2$



รูปที่ 4 รูปแบบการทดสอบการรับแรงเฉือน

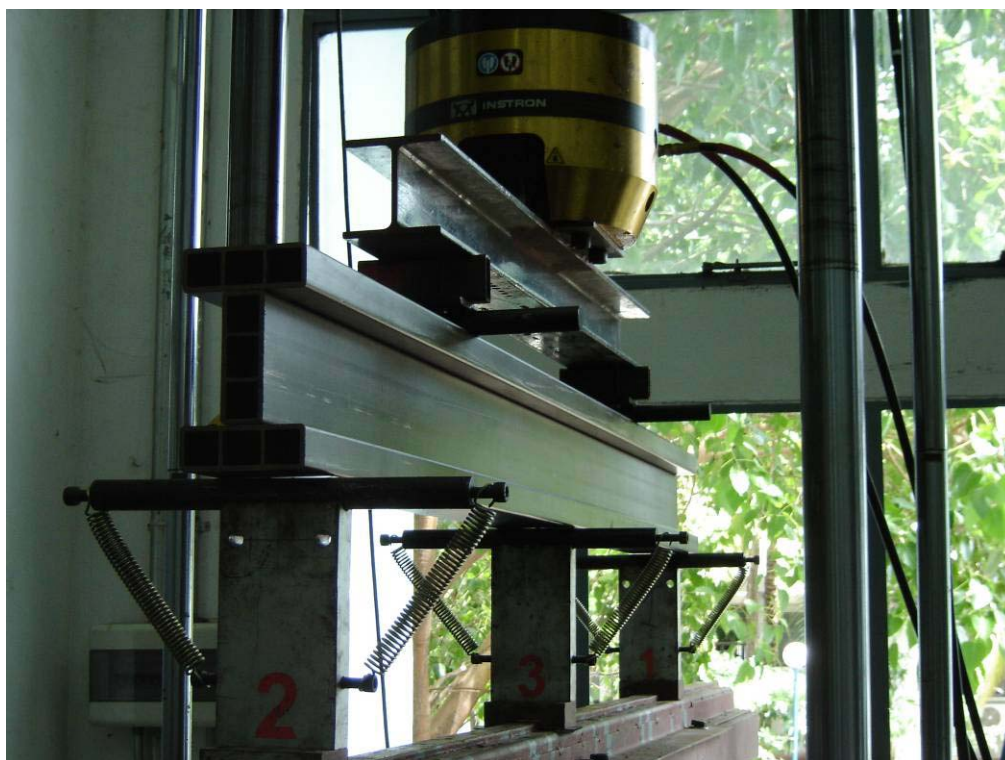
(a) ระยะการวางฐานรองรับการกด และระยะหัวกด

(b) ขนาดและทิศทางแรงเฉือนที่กระทำต่อคาน

RA

RB

a



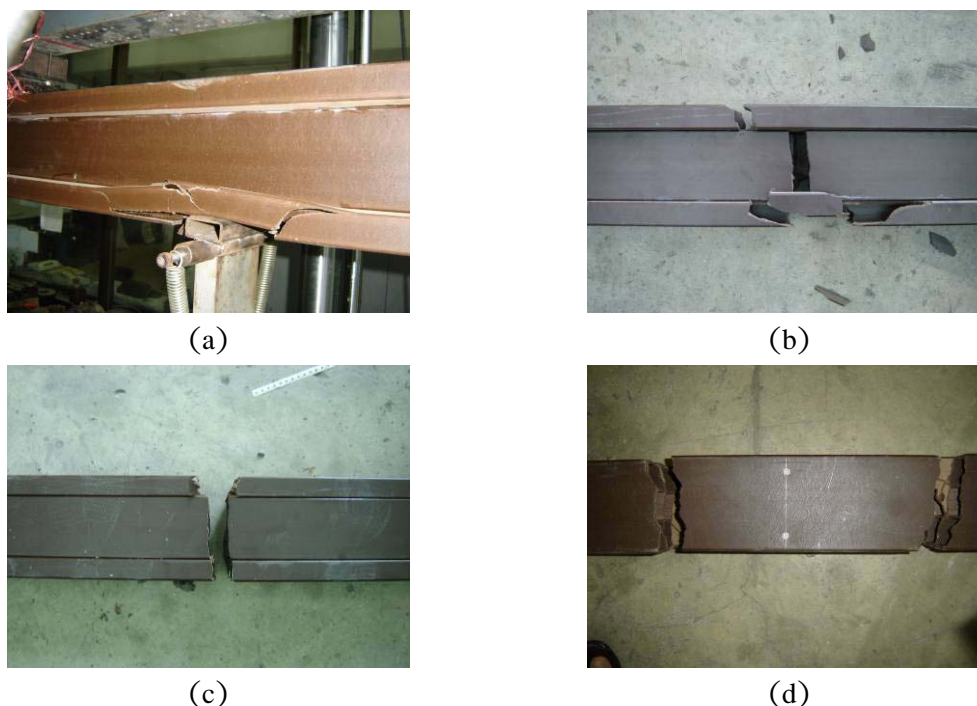
รูปที่ 5 การติดตั้งการทดสอบแรงเฉือนแบบคาน 5 จุดของวัสดุหน้าตัดประกอบ

ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นงานวัสดุผสมฟิวิซีและซีล้อย (100:100) หน้าตัดคานประกอบโดยยึดรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5
 ตารางที่ 5 ผลการทดสอบแรงเฉือนของหน้าตัดประกอบที่มีสูตรผสมเป็น PVC:SD (100:100)

Section	Characteristics	Specimen Inertia of x- axis (I_x) (mm. ⁴)	Deflection at Max. load (mm)	Max. applied load (kN)	Max. shear force (kN)	Shear strength (MPa)
I – Beam 	ยึดด้วยตะปูเกลียว		1.15	17.1	5.88(0.50)	4.47(0.38)
	ยึดด้วยตะปูเกลียวและกาว	15,675,807	0.97	24.9	8.57(0.70)	6.52(0.53)
	ยึดด้วยกาว		0.98	36.1	12.39(0.07)	9.43(0.06)
II – Beam 	ยึดด้วยตะปูเกลียว		1.14	31.5	10.84(1.02)	4.40(0.42)
	ยึดด้วยตะปูเกลียวและกาว	17,225,696	1.08	45.7	15.69(0.12)	6.37(0.05)
	ยึดด้วยกาว		1.13	44.9	15.42(0.29)	6.26(0.12)
Rectangular Beam 	ยึดด้วยตะปูเกลียว		1.35	26.8	9.21(0.34)	3.74(0.14)
	ยึดด้วยตะปูเกลียวและกาว	17,225,696	1.08	43.4	14.90(0.56)	6.05(0.23)
	ยึดด้วยกาว		1.09	46.8	16.09(1.74)	6.53(0.71)
Square Beam 	ยึดด้วยตะปูเกลียว		1.23	54.9	18.87(0.34)	8.36(0.15)
	ยึดด้วยตะปูเกลียวและกาว	4,649,667	1.04	62.6	21.5 (1.03)	9.52(0.46)
	ยึดด้วยกาว		1.06	63.3	21.8(0.87)	9.63(0.39)

The values in parentheses indicate standard deviation (SD).

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของคานหน้าตัดประกอบแบบต่างๆ จากการทดสอบพบว่า การยึดต่อคานประกอบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การยึดด้วยกาว รองลงมาคือ การยึดด้วยตะปูเกลียวร่วมกับกาว และการยึดด้วยตะปูเกลียว ตามลำดับเช่นเดียวกันกับกำลังการรับแรงดัด ทั้งนี้เพราะการยึดคานประกอบโดยมีตะปูเกลียวเป็นตัวยึดทำให้จุดที่ยึดโดยตะปูเกลียวเป็นจุดที่อ่อนแอของวัสดุผสมฟิวิซีและซีลีส้อยไม้ และทำให้พื้นที่รับแรงเฉือนลดลง จึงทำให้คานหน้าตัดประกอบรับแรงได้ไม่เต็มที่ โดยพิจารณาได้จากกำลังรับแรงเฉือน และจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าคานหน้าตัดประกอบ Square Beam มีประสิทธิภาพในการรับแรงมากที่สุด รองลงมาคือ I-Beam, ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ถือว่าคานหน้าตัดประกอบแบบ I-Beam และ Square Beam มีสมบัติการรับแรงเฉือนที่ดีใกล้เคียงกัน ส่วนสาเหตุที่ทำให้คานหน้าตัดประกอบแบบ Rectangular Beam และ II-Beam มีกำลังรับแรงเฉือนน้อย คือ วัสดุผสมฟิวิซีและซีลีส้อยไม้ (100:100) ไม่สามารถทนต่อแรงอัดได้จึงทำให้คานหน้าตัดประกอบเกิดแรงเฉือนเฉพาะที่ (local shear failure) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการวิบัติของวัสดุหน้าตัดประกอบ แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การวิบัติของชิ้นงานทดสอบแรงเฉือนวัสดุหน้าตัดประกอบหน้าตัดต่างๆ

- | | |
|---------------|----------------------|
| (a) I – Beam | (c) Rectangular Beam |
| (b) II – Beam | (d) Square Beam |

จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดัดและแรงเฉือนของคานหน้าตัดประกอบรูปแบบต่างๆ พบว่าคานหน้าตัดประกอบทั้ง 4 แบบ มีสมบัติการรับแรงดัดที่ดีใกล้เคียงกัน ส่วนสมบัติการรับแรงเฉือน คานหน้าตัดประกอบแบบ I-Beam และ Square Beam สามารถรับแรงได้มากกว่า II-Beam และ Rectangular

Beam และหากพิจารณาจากต้นทุนในการผลิต คานหน้าตัดประกอบ I-beam มีความเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นคานประกอบมากที่สุด รายละเอียดราคาต้นทุนในการผลิตแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ราคาต้นทุนในการผลิตต่อเมตรของคานหน้าตัดประกอบหน้าตัดต่างๆ ที่มีสูตรผสมเป็น VPVC:SD (100:100)

Section	ราคา(บาท/เมตร)					
	Characteristics	WPC	กาบ	ตะปูเกลียว	เหล็ก	รวม
I – Beam 	ยึดด้วยตะปูเกลียว	720	–	5.2	–	725.2
	ยึดด้วยตะปูเกลียวและกาบ	720	5.6	5.2	–	730.8
	ยึดด้วยกาบ	720	5.6	–	–	725.6
II – Beam 	ยึดด้วยตะปูเกลียว	960	–	10.4	–	970.4
	ยึดด้วยตะปูเกลียวและกาบ	960	8.4	10.4	–	978.8
	ยึดด้วยกาบ	960	8.4	–	–	968.4
Rectangular Beam 	ยึดด้วยตะปูเกลียว	960	–	10.4	–	970.4
	ยึดด้วยตะปูเกลียวและกาบ	960	8.4	10.4	–	978.8
	ยึดด้วยกาบ	960	8.4	–	–	968.4
Square Beam 	ยึดด้วยตะปูเกลียว	720	–	10.4	–	730.4
	ยึดด้วยตะปูเกลียวและกาบ	720	5.6	10.4	–	736.0
	ยึดด้วยกาบ	720	5.6	–	–	725.6

จากการทดสอบข้างต้นพบว่าการยึดคานประกอบด้วยกาวมีประสิทธิภาพมากที่สุดและคานหน้าตัดประกอบ I-Beam มีประสิทธิภาพในการรับแรงมากที่สุด ดังนั้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเสริมแรงทางคณะวิจัย ได้มีการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของคานหน้าตัดประกอบเพิ่มเติม ได้แก่ คานหน้าตัดประกอบ I-Beam เสริมเหล็ก, I-Beam M005 และ I-Beam เต็มใยแก้ว โดยมีการยึดต่อ I-Beam เสริมเหล็ก 2 รูปแบบ แบบที่ 1 ยึดด้วยตะปูเกลียวร่วมกับกาว และแบบที่ 2 ยึดด้วย Bolt ร่วมกับกาว ส่วน I-Beam M005 และ I-Beam ดำเนินการยึดต่อคานประกอบด้วยกาว ดังแสดงในตารางที่ 7 และนำมาทดสอบสมบัติการรับแรงดัด และแรงเฉือนเช่นเดียวกันกับ การทดสอบในหัวข้อ 1.2 ระยะการวางฐานรองรับการกด ระยะหักกด และอัตราเร็วในการกดเช่นเดียวกันกับคานหน้าตัดประกอบ I-Beam

การประกอบคานหน้าตัดประกอบ

คานหน้าตัดประกอบ I-Beam เสริมเหล็ก

นำชิ้นงานหน้าตัด M001 จากวัสดุผสมฟิวิซีและผงซีลี้อยไม้ ที่มีอัตราส่วน 100:100 มาทำการประกอบให้เป็นคานหน้าตัด I-Beam จากนั้นนำเหล็กกล่องขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว x 2 มิลลิเมตร สอดเข้าไปในช่องกลวงตรงกลางของชิ้นงานบนและล่างของคานประกอบ โดยมีเป้าหมายให้เกิดการทำงานร่วมกันระหว่างวัสดุผสมและเหล็กเสริมโดยเหล็กจะทำหน้าที่รับแรงดัดที่ขอบล่างของหน้าตัดประกอบขณะที่รับแรงดัดและเหล็กเสริมส่วนบนจะทำหน้าที่ร่วมกับวัสดุผสมในการรับแรงอัด ทำให้คานหน้าตัดประกอบมีประสิทธิภาพในการรับแรงดัดมากขึ้น การศึกษานี้จะทำการยึดต่อชิ้นงานโดยใช้รูปแบบการยึดต่อ 2 รูปแบบ แบบที่ 1 ยึดด้วยตะปูเกลียวร่วมกับกาว และแบบที่ 2 ยึดด้วย Bolt ร่วมกับกาว โดยตำแหน่งการยึดตะปูเกลียว และ Bolt นั้น ดำเนินการยึดต่อทุก ๆ ระยะ 30 เซนติเมตร ส่วนการยึดด้วยกาว ดำเนินการโดยการทาทั่วตลอดแนวการยึดต่อและตำแหน่งที่ทาทั่วดำเนินการขัดผิวชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานยึดติดได้ดียิ่งขึ้น

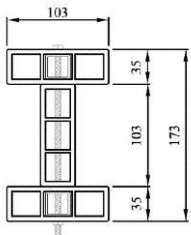
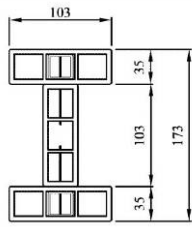
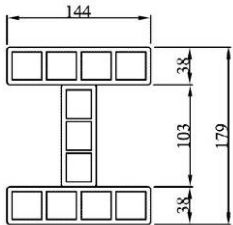
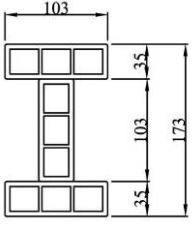
คานหน้าตัดประกอบ I-Beam M005

นำชิ้นงานหน้าตัด M001 และ M005 จากวัสดุผสมฟิวิซีและผงซีลี้อยไม้ ที่มีอัตราส่วน 100:100 มาทำการประกอบคานหน้าตัดประกอบหน้าตัด I-Beam ทั้งนี้ในขณะที่คานประกอบรับแรงดัดจะเกิดแรงดัดที่ด้านล่างของหน้าตัดและแรงอัดที่ด้านบนของหน้าตัด การเปลี่ยนมาให้ชิ้นงาน M005 ซึ่งมีขนาดและความหนามากกว่าหน้าตัด M001 เป็นชิ้นงานส่วนบนและล่างของคานหน้าตัดประกอบจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการรับแรงดัดและพื้นที่ในการรับแรงอัด ทำให้คานประกอบสามารถรับแรงได้มากขึ้น การยึดต่อจะทำการยึดโดยกาวโดยทำการทาทั่วตลอดแนวการยึดต่อและตำแหน่งที่ทาทั่วจะทำการขัดผิวชิ้นงานให้มีความหยาบเพื่อให้ชิ้นงานยึดติดกันได้ดียิ่งขึ้น

คานหน้าตัดประกอบ I-Beam เต็มใยแก้ว

นำชิ้นงานหน้าตัด M001 จากวัสดุผสมฟิวิซีและผงซีลี้อยไม้และเส้นใยแก้วที่มีอัตราส่วน 100:100:10 มาทำการประกอบคานหน้าตัดประกอบหน้าตัด I-Beam ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่เต็มใยแก้วจะมีความสามารถในการรับแรงในแต่ละหน้าตัดมากกว่า ทำให้หน้าตัดประกอบรับแรงได้มากขึ้น การยึดต่อยังคงยึดโดยใช้กาวโดยทาทั่วตลอดแนวการยึดต่อและตำแหน่งที่ทาทั่วจะทำการขัดผิวชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานยึดติดได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 7 หน้าตัดคานประกอบที่ใช้ในการศึกษา

Specimen Code	Cross Section	Dimension (mm. x mm.)
หน้าตัดประกอบ I-Beam เสริมเหล็ก จาก M001 3 ชิ้น	  ยึดต่อโดยใช้Bolร่วมกับ กาว ยึดต่อโดยใช้ตะปูเกลียว ร่วมกับกาว	103 × 173
หน้าตัดประกอบ I-Beam M005 จาก M001 1 ชิ้น จาก M005 2 ชิ้น	 ยึดต่อโดยใช้กาว	103 × 173
หน้าตัดประกอบ I-Beam เติมใยแก้ว จาก M001 3 ชิ้น	 ยึดต่อโดยใช้กาว	103 × 173

ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสมฟิวิซีและซีล้อย (100:100) หน้าตัดคานประกอบโดยยึดรูปแบบต่าง ๆ ของคานหน้าตัดประกอบ I-Beam ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบแรงดัดของหน้าตัดประกอบที่มีสูตรผสมเป็น PVC:SD (100:100)

Section	Characteristics	Specimen Inertia of x- axis (I_x) (mm. ⁴)	Deflection at Max. load $\times 10^{-2}$ (m)	Max. load (N)	Max. bending (N-m)	Modulus of rupture (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
I – Beam เสริมเหล็ก 	ยึดด้วยตะปูเกลียวและกาว	78,975,248	5.37	14,033	6,488	7.1(1.87)	1,216(70.95)
	ยึดด้วย Bolt และกาว		5.39	12,423	5,744	6.3(0.91)	899(147.80)
I – Beam M005 	ยึดด้วยกาว	26,817,519	9.13	16,553	7,653	25.5(0.75)	3,142(40.03)
I-Beam เต็ม ใยแก้ว 	ยึดด้วยกาว	15,675,807	5.50	8,356	3,863	21.3(0.24)	3,876(90.79)

The values in parentheses indicate standard deviation (SD).

ตารางที่ 8 แสดงผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดัดของคานหน้าตัดประกอบหน้าตัด I-Beam แบบต่างๆ จากการทดสอบพบว่า คานหน้าตัดประกอบ I-Beam ที่มีสมบัติการรับแรงดัดได้มากที่สุด คือ I – Beam M005 รองลงมาคือ I-Beam เติมใยแก้ว และ I-Beam เสริมเหล็ก ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ถือว่า I – Beam M005 และ I-Beam เติมใยแก้ว สามารถรับแรงดัดได้ใกล้เคียงกัน โดยสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

- การทดสอบคานหน้าตัดประกอบ I-Beam เสริมเหล็ก พบว่า การเสริมเหล็กมีผลในการรับแรงที่ดีขึ้น ระยะแฉ่งตัวน้อยลง แต่เมื่อพิจารณาถึงโมดูลัสกลับมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก ความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ เหล็กเสริมและวัสดุผสมไม่เกิดการทำงานร่วมกัน
- การทดสอบคานหน้าตัดประกอบ I-Beam M005 พบว่า สามารถรับแรงดัดได้ดี และเมื่อพิจารณาถึงโมดูลัสซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคานหน้าตัดประกอบ I-Beam ในตารางที่ 3 แต่การประกอบคานหน้าตัดประกอบ I-Beam M005 มีความสามารถในการรับแรงได้ดีกว่าคานหน้าตัดประกอบ I-Beam ทั้งนี้เนื่องจากมีหน้าตัดในการรับแรงดัดและแรงอัดมากกว่า
- การทดสอบคานหน้าตัดประกอบ I-Beam เติมใยแก้ว พบว่า การใช้หน้าตัดเสริมเส้นใยแก้วมาทำเป็นหน้าตัดประกอบไม่ส่งผลต่อการรับกำลังมากนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการขึ้นรูปที่ไม่ดี สำหรับลักษณะการวิบัติของวัสดุหน้าตัดประกอบ การวิบัติที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณผิวด้านล่างของชิ้นงาน ซึ่งเป็นบริเวณที่รับแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 7



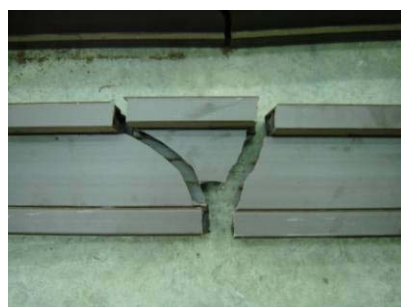
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 7 การวิบัติของชิ้นงานทดสอบแรงดัดวัสดุหน้าตัดประกอบ I-Beam แบบต่างๆ

- | | |
|---|---|
| (a) I – Beam เสริมเหล็กยึดด้วยตะปูเกลียว และกาว | (c) I – Beam เสริมเหล็กยึดด้วยตะปูเกลียว และกาว |
| (b) I – Beam M005 ยึดด้วยกาว | (d) I – Beam เติมใยแก้ว ยึดด้วยกาว |

ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของชิ้นงานวัสดุผสมฟิวิซีและซีล้อย (100:100) หน้าตัดคานประกอบโดยยึดรูปแบบต่าง ๆ ของคานหน้าตัดประกอบ I-Beam ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบแรงเฉือนของหน้าตัดประกอบที่มีสูตรผสมเป็น PVC:SD (100:100)

Section	Characteristics	Specimen Inertia of x- axis (I_x) (mm. ⁴)	Deflection at Max. load (mm)	Max. applied load (kN)	Max. shear force (kN)	Shear strength (MPa)
I - Beam เสริมเหล็ก	ยึดด้วยตะปูเกลียวและกาว	78,975,248	1.56	37.4	12.86(0.86)	9.26(0.62)
	ยึดด้วย Bolt และกาว		1.66	39.6	13.60(0.26)	9.80(0.19)
I - Beam M005	ยึดด้วยกาว	26,817,519	1.20	42.0	14.45(0.03)	10.63(0.02)
						
I-Beam เต็มใบ แก้ว	ยึดด้วยกาว	15,675,807	0.84	28.0	9.64(1.20)	7.31(0.92)
						

The values in parentheses indicate standard deviation (SD).

ตารางที่ 9 แสดงผลการทดสอบสมบัติการรับแรงเฉือนของคานหน้าตัดประกอบแบบ I-Beam แบบต่างๆ จากการทดสอบพบว่า คานหน้าตัดประกอบ I-Beam ที่มีสมบัติการรับแรงเฉือนได้มากที่สุด คือ I – Beam M005 รองลงมาคือ I-Beam เติมใยแก้ว และ I-Beam เสริมเหล็ก ตามลำดับ สอดคล้องกับการทดสอบแรงดัด สำหรับลักษณะการวิบัติของวัสดุหน้าตัดประกอบ การวิบัติที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณผิวด้านล่างของชิ้นงาน ซึ่งเป็นบริเวณที่รับแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 8



(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 8 การวิบัติของชิ้นงานทดสอบแรงเฉือนวัสดุหน้าตัดประกอบ I-Beam แบบต่างๆ

- | | |
|---|---|
| (a) I – Beam เสริมเหล็กยึดด้วยตะปูเกลียว และกาว | (c) I – Beam เสริมเหล็กยึดด้วยตะปูเกลียว และกาว |
| (b) I – Beam M005 ยึดด้วยกาว | (d) I – Beam เติมใยแก้ว ยึดด้วยกาว |

จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดัดและแรงเฉือนของคานหน้าตัดประกอบ I-Beam แบบต่างๆ พบว่า การประกอบคานหน้าตัดประกอบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลทำให้คานหน้าตัดประกอบ มีความสามารถในการรับแรงได้มากขึ้น

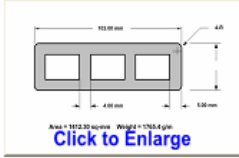
1.3 การปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปสำหรับการออกแบบโครงสร้าง

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและปรับแก้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปสำหรับการออกแบบโครงสร้างสำเร็จรูป ที่คณะวิจัยได้ทำการพัฒนาไว้ในโครงการวิจัยระยะที่ 4 ซึ่งใช้ออกแบบโครงสร้างพื้นและคานของวัสดุผสมพอลิเมอร์ (พีวีซีและพอลิพรอพิลีน) และซีลี้อยไม้ โดยทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม Microsoft excel จำนวน 4 โปรแกรม ได้แก่

- โปรแกรมออกแบบพื้นแบบช่วงเดียว (Floor simple span loading)
- โปรแกรมออกแบบพื้นแบบต่อเนื่อง (Floor continuous span loading)
- โปรแกรมออกแบบคานแบบช่วงเดียว (Beam simple span loading)
- โปรแกรมออกแบบคานแบบต่อเนื่อง (Beam continuous span loading)

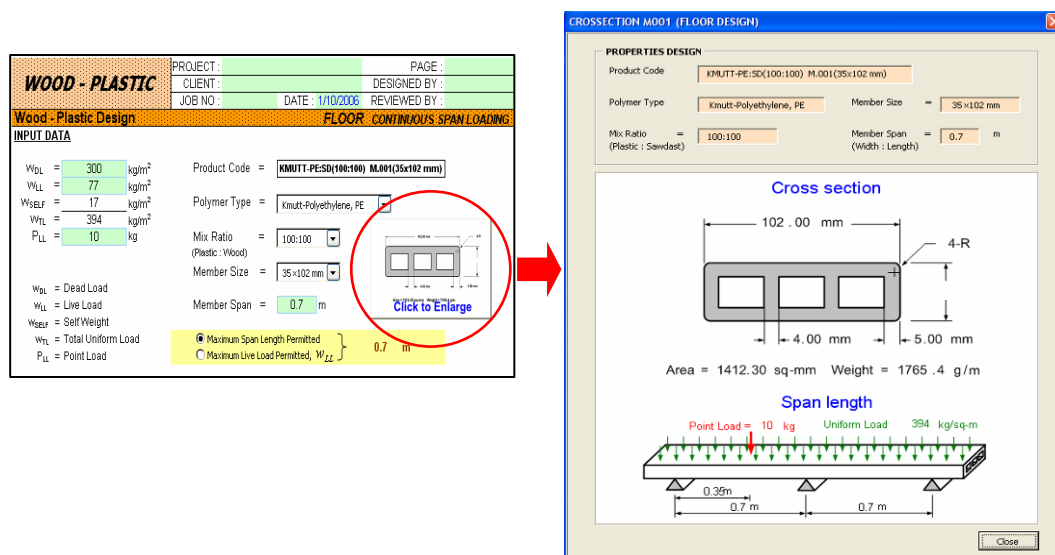
โดยตัวอย่างของโปรแกรมสำเร็จรูปแสดงได้ในรูปที่ 9

โปรแกรมที่ได้แสดงในรูปที่ 9 นี้มีข้อจำกัดที่ใช้สำหรับการออกแบบคานหรือพื้นเฉพาะหน้าตัด M001 ซึ่งเป็นหน้าตัดกลวงแบบ 3 ช่อง ซึ่งเป็นกลุ่มของวัสดุที่ได้ทำการทดสอบหาสมบัติทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการแล้วเท่านั้น สาเหตุที่โปรแกรมออกแบบสำเร็จรูปที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ได้เฉพาะหน้าตัดที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแล้ว เนื่องจากวัสดุผสมระหว่างพลาสติกและซีลี้อย (Wood-polymer composites) เป็นวัสดุที่คุณสมบัติทางวิศวกรรมแปรเปลี่ยนตามขนาดและรูปแบบของหน้าตัด จากการทดสอบที่ผ่านมา วัสดุผสมที่มีส่วนผสมชนิดเดียวกัน แต่รับแรงในทิศทางเดียวกันหรือมีขนาดหน้าตัดที่แตกต่างกัน จะได้ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุผสมประเภทนี้เป็น anisotropic material ค่ามอดุลัสจากการทดสอบแรงดัดของชิ้นทดสอบในแนวนอน Flat-wise และแนวตั้ง Edge-wise มีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งแตกต่างจากวัสดุในงานโครงสร้างประเภทอื่น ๆ เช่น เหล็ก คอนกรีต หรือไม้ ดังนั้น คณะวิจัยฯ ต้องระมัดระวังในการออกแบบเสมอ ผู้ออกแบบต้องพิจารณาทิศทางการรับแรงของโครงสร้างจริง และใส่คุณสมบัติของวัสดุให้สอดคล้องกับทิศทางการรับน้ำหนักบรรทุก จากการที่วัสดุผสมระหว่างพลาสติกและซีลี้อยไม้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมแปรเปลี่ยนตามรูปร่างและขนาดของหน้าตัด ดังนั้นการที่จะออกแบบโครงสร้างที่มีหน้าตัดใด ๆ จะต้องทำการทดสอบเพื่อหาสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการก่อนเสมอ จากข้อจำกัดดังกล่าวนี้ ทำให้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการออกแบบที่มีอยู่ในปัจจุบันยังขาดความหลากหลายและมีความจำเป็นต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานให้ครอบคลุมหน้าตัดคานหรือพื้นที่ทางบริษัทผู้ร่วมทุนวิจัยผลิตอยู่ทั้งหมด

WOOD - PLASTIC		PROJECT :	PAGE :
		CLIENT :	DESIGNED BY :
		JOB NO :	REVIEWED BY :
Wood - Plastic Design		DATE : 10/11/2006	FLOOR : SIMPLE SPAN LOADING
INPUT DATA			
$W_{DL} = 100 \text{ kg/m}^2$ $W_{LL} = 393 \text{ kg/m}^2$ $W_{SELF} = 17 \text{ kg/m}^2$ $W_{TL} = 510 \text{ kg/m}^2$ $P_{LL} = 10 \text{ kg}$	Product Code = VP-PE:SD(100:100) M.001(35x102 mm) Polymer Type = VP-Polyethylene, PE Mix Ratio (Plastic : Wood) = 100:100 Member Size = 35x102 mm Member Span = 0.50 m	Help 	
W_{DL} = Dead Load W_{LL} = Live Load W_{SELF} = Self Weight W_{TL} = Total Uniform Load P_{LL} = Point Load	☐ Maximum Length Permitted ☒ Maximum Live Load Permitted, W_{LL}	393 kg/sq-m	
DESIGN SUMMARY			
$L = 0.5 \text{ m}$ $W_{TL} = 510 \text{ kg/m}^2$ $P_{LL} = 10 \text{ kg}$	Click to Analysis Part		
1. Check Bending Stress: $M/S < F_b$ $19 \text{ ksc} < 43 \text{ ksc}$ OK			
2. Check Shear Stress: $1.5 V/A < F_v$ $2 \text{ ksc} < 21 \text{ ksc}$ OK			
3. Check Live Load Deflection Control: $\Delta_{LL} \leq \frac{L}{360}$ $0.14 \text{ cm} \leq 0.14 \text{ cm}$ OK			
4. Check Long-term Deflection Control: $\Delta_{(DL+LL)} \leq \frac{L}{240}$ $0.16 \text{ cm} \leq 0.21 \text{ cm}$ OK			

รูปที่ 9 โปรแกรมออกแบบพื้นช่วงเดียว (ตัวอย่าง)

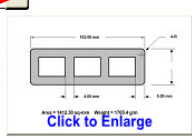
ดังนั้น ในงานวิจัยครั้งนี้ จะเป็นการพัฒนาต่อเนื่องจากโปรแกรมออกแบบเดิมให้สามารถออกแบบครอบครัววัสดุผสมที่มีขนาดและหน้าตัดอื่น ๆ นอกเหนือจาก M001 เช่น หน้าตัดกลางที่มีขนาดและจำนวนช่องเปิดเพิ่มขึ้น และคานหน้าตัดประกอบ อย่างไรก็ดีตาม จะต้องดำเนินการในหัวข้อที่ 1.1 และ 1.2 คือการทดสอบหาสมบัติทางกลของวัสดุหน้าตัดนั้น ๆ ก่อน เพื่อนำสมบัติของวัสดุที่ทดสอบแล้วเพิ่มลงในโปรแกรม รูปที่ 10 แสดงวิธีการเรียกดูรูปร่างหน้าตัดของวัสดุและรูปแบบของน้ำหนักบรรทุก พร้อมรายละเอียดต่างๆ ตามที่ผู้ใช้งานกำหนดลงในโปรแกรม ของโปรแกรมที่มีอยู่เดิม การเรียกดู ทำได้โดยการคลิกที่รูปที่มีข้อความ Click to Enlarge ในส่วนของฐานข้อมูลในรูปที่ 10 นี้ จะเป็นส่วนหลักในการพัฒนาโปรแกรมออกแบบต่อไป ฐานข้อมูลตรงบริเวณนี้จะต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้ครอบคลุมหน้าตัดในหลายรูปแบบตามที่ต้องการ และที่สำคัญคือ เมื่อใดก็ตามที่ผู้ใช้งานโปรแกรมต้องการเพิ่มหรือลดข้อมูล จะต้องสามารถทำได้ทันทีด้วยกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน หรือง่ายต่อการใช้งาน กล่าวโดยสรุป ในส่วนของการพัฒนาโปรแกรมสำเร็จสำหรับการออกแบบคานและพื้น จะเป็นการพัฒนาให้โปรแกรมใช้งานได้กับหน้าตัดคานและพื้นที่หลากหลายขึ้น และเพิ่มกระบวนการในการเพิ่มลดฐานข้อมูลให้ง่ายต่อการใช้งาน



รูปที่ 10 ปุ่มสำหรับเลือกดูรูปร่างหน้าตัดวัสดุและรายละเอียดที่ผู้ใช้งานกำหนด

การปรับปรุงโปรแกรมคอมพิวเตอร์

หลังจากการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุหน้าตัดต่าง ๆ และคานหน้าตัดประกอบในหัวข้อ 1.1 และ 1.2 แล้ว ได้นำข้อมูลที่ได้ใส่ลงในโปรแกรมสำเร็จรูป โดยจะนำข้อมูลการทดสอบสมบัติทางกลในหัวข้อ 1.1 ใส่ในโปรแกรมทั้ง 4 โปรแกรม ส่วนข้อมูลการทดสอบสมบัติทางกลในหัวข้อ 1.2 ซึ่งเป็นการทดสอบสมบัติทางกลของคานหน้าตัดประกอบเพิ่มลงในโปรแกรมออกแบบคานแบบช่วงเดียว และโปรแกรมออกแบบคานแบบต่อเนื่อง เท่านั้น เนื่องจากว่า การทำหน้าตัดประกอบมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นคานมากกว่า ตัวอย่างโปรแกรมการออกแบบพื้นและคานที่มีการปรับปรุงแล้ว แสดงในรูปที่ 11-18

WOOD - PLASTIC		PROJECT :	PAGE :
		CLIENT :	DESIGNED BY :
		JOB NO. :	REVIEWED BY :
Wood - Plastic Design		FLOOR SIMPLE SPAN LOADING	
INPUT DATA			
$W_{DL} = 0$ kg/m ² $W_{LL} = 1$ kg/m ² $W_{SELF} = 17$ kg/m ² $W_{TL} = 18$ kg/m ² $P_{LL} = 0$ kg W_{DL} = Dead Load W_{LL} = Live Load W_{SELF} = Self Weight W_{TL} = Total Uniform Load P_{LL} = Point Load	Product Code = VP-PVC:SD(100:100) M001(35x103 mm) Help Polymer Type = VP-Polyvinyl chloride, PVC Mix Ratio (Plastic : Wood) = 100:100 Member Size = 35x103 mm Member Span = 1.00 m ☐ Maximum Length Permitted ☒ Maximum Live Load Permitted, W_{LL}	 Click to Enlarge	
DESIGN SUMMARY			
$L = 1$ m $W_{TL} = 18$ kg/m ² $P_{LL} = 0$ kg	Click to Analysis Part 1. Check Bending Stress: $M/S < F_b$ $2 \text{ ksc} < 55 \text{ ksc}$ OK 2. Check Shear Stress: $2.78 V/A < F_v$ $0 \text{ ksc} < 10 \text{ ksc}$ OK 3. Check Live Load Deflection Control: $\Delta_{LL} \leq \frac{L}{360}$ $0.00 \text{ cm} \leq 0.28 \text{ cm}$ OK 4. Check Long-term Deflection Control: $\Delta_{(DL+LL)} \leq \frac{L}{240}$ $0.00 \text{ cm} \leq 0.42 \text{ cm}$ OK		

รูปที่ 11 โปรแกรมออกแบบพื้นช่วงเดียว

Image1

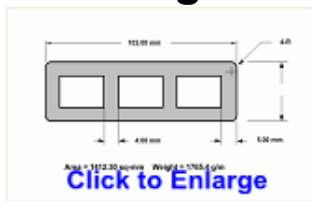


Image2



Image3

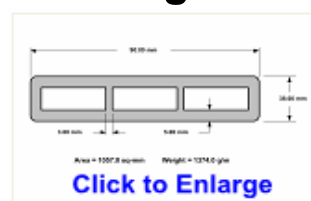


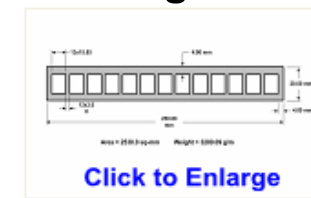
Image4



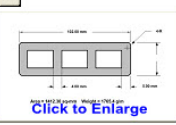
Image5



Image6



รูปที่ 12 หน้าตัดที่ได้ทำการเพิ่มเติมลงในโปรแกรมออกแบบพื้นช่วงเดียว

WOOD - PLASTIC		PROJECT :	PAGE :
		CLIENT :	DESIGNED BY :
		JOB NO :	REVIEWED BY :
Wood - Plastic Design		DATE : 8/29/2009	FLOOR: CONTINUOUS SPAN LOADING
INPUT DATA			
W_{DL} = 0 kg/m ² W_{LL} = 1 kg/m ² W_{SELF} = 17 kg/m ² W_{TL} = 18 kg/m ² P_{LL} = 0 kg w_{DL} = Dead Load w_{LL} = Live Load W_{SELF} = Self Weight w_{TL} = Total Uniform Load P_{LL} = Point Load	Product Code = VP-PVC:SD(100:100) M.001(35x103 mm) Help Polymer Type = VP-Polyvinyl chloride (PVC) Mix Ratio = 100:100 (Plastic : Wood) Member Size = 35x103 mm Member Span = 1.00 m ☐ Maximum Span Length Permitted ☒ Maximum Live Load Permitted, W_{LL}	 Click to Enlarge	
DESIGN SUMMARY			
L = 1 m w_{TL} = 18 kg/m ² P_{LL} = 0 kg	Click to Analysis Part 1. Check Bending Stress Control: $M/S < F_b$ $1 \text{ ksc} < 55 \text{ ksc}$ OK 2. Check Shear Stress Control: $2.78 V/A < F_v$ $0 \text{ ksc} < 10 \text{ ksc}$ OK 3. Check Live Load Deflection Control: $\Delta_{LL} \leq \frac{L}{360}$ $0.00 \text{ cm} \leq 0.28 \text{ cm}$ OK 4. Check Long-term Deflection Control: $\Delta_{(DL+LL)} \leq \frac{L}{240}$ $0.00 \text{ cm} \leq 0.42 \text{ cm}$ OK		

รูปที่ 13 โปรแกรมออกแบบพื้นต่อเนื่อง

Image1

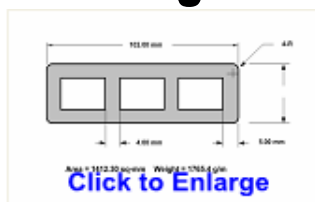


Image2



Image3

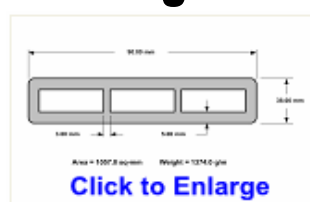


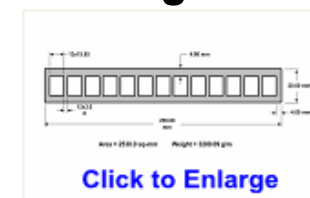
Image4



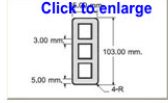
Image5



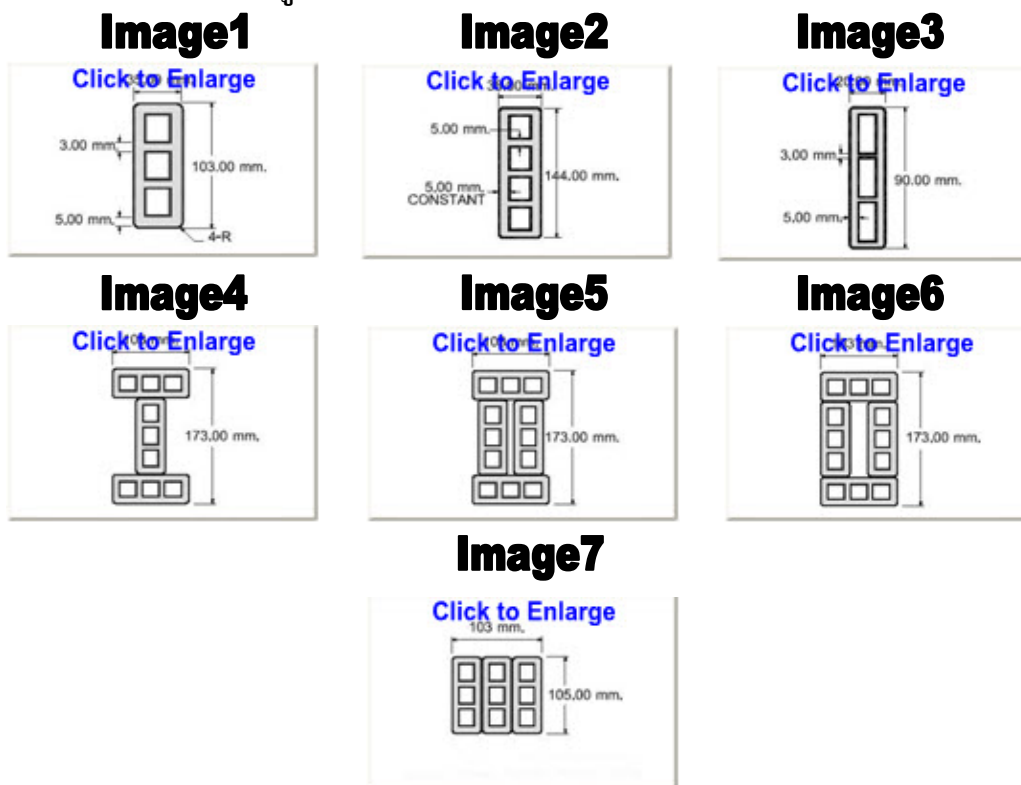
Image6



รูปที่ 14 หน้าตัดที่ได้ทำการเพิ่มเติมลงในโปรแกรมออกแบบพื้นต่อเนื่อง

WOOD - PLASTIC		PROJECT :	PAGE :
Wood - Plastic Design		CLIENT :	DESIGNED BY :
INPUT DATA		JOB NO. :	DATE : 8/29/2009
		REVIEWED BY :	
$W_{DL} = 0$ kg/m $W_{LL} = 1$ kg/m $W_{SELF} = 1$ kg/m $W_{TL} = 2$ kg/m $P_{LL} = 0$ kg W_{DL} = Dead Load W_{LL} = Live Load W_{SELF} = Self Weight W_{TL} = Total Uniform Load P_{LL} = Point Load	Product Code = VP-PVC:SD(100-100) M001(35x103 mm) Help Polymer Type = VP-Polyvinyl chloride, PVC Mix Ratio = 100:100 (Plastic : Wood) Member Size = 35x103 mm Member Span = 0.79 m Method of Joining : ☐ Screw Joint ☒ Adhesive-Bonded Joint ☒ Maximum Span Length Permitted ☐ Maximum Live Load Permitted W_{LL} } 4.23 m		
DESIGN SUMMARY $L = 0.79$ m $W_{TL} = 2$ kg/m $P_{LL} = 0$ kg $M = \frac{W_{TL}L^2}{8} + \frac{P_{LL}L}{4} = 0.16$ kg-m $V = \left(\frac{L}{2} - d\right)W_{TL} + P_{LL} = 0.59$ kg $\Delta_{LL} = \frac{5W_{LL}L^4}{384EI} + \frac{P_{LL}L^3}{48EI} = 0.00$ cm $\Delta_{(DL+LL)} = \frac{5W_{(DL+LL)}L^4}{384EI} + \frac{P_{LL}L^3}{48EI} = 0.00$ cm		Click to Analysis Part 1. Check Bending Stress: $M/S < F_b$ $1 \text{ ksc} < 55 \text{ ksc}$ OK 2. Check Shear Stress: $1.91 V/A < F_v$ $0 \text{ ksc} < 10 \text{ ksc}$ OK 3. Check Live Load Deflection Control: $\Delta_{LL} \leq \frac{L}{360}$ $0.00 \text{ cm} \leq 0.22 \text{ cm}$ OK 4. Check Long-term Deflection Control: $\Delta_{(DL+LL)} \leq \frac{L}{240}$ $0.00 \text{ cm} \leq 0.33 \text{ cm}$ OK	

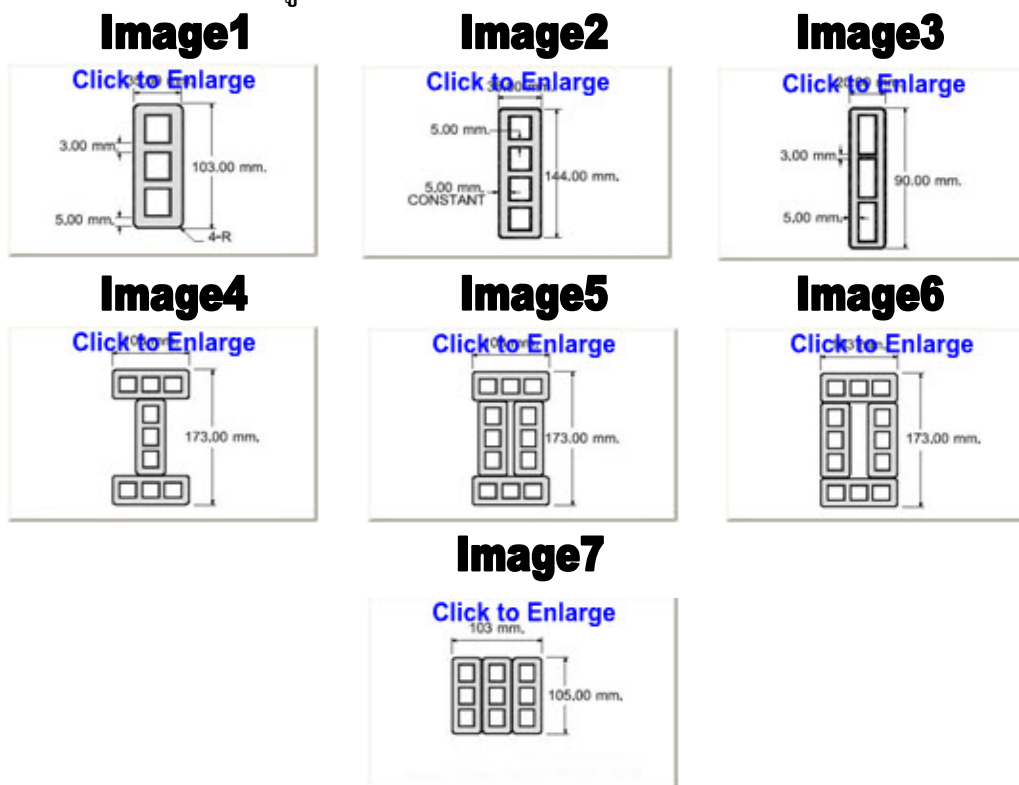
รูปที่ 15 โปรแกรมออกแบบคานช่วงเดียว



รูปที่ 16 หน้าตัดที่ได้ทำการเพิ่มเติมลงในโปรแกรมออกแบบคานช่วงเดียว

WOOD - PLASTIC		PROJECT :	PAGE :
Wood - Plastic Design		CLIENT :	DESIGNED BY :
BEAM - CONTINUOUS SPAN LOADING		JOB NO :	REVIEWED BY :
INPUT DATA			
W_{DL} = 0 kg/m W_{LL} = 1 kg/m W_{SELF} = 1 kg/m W_{TL} = 2 kg/m P_{LL} = 0 kg	Product Code = VP-PVC-SD(100:100) M.00(35x103 mm) Help Polymer Type = VP-Polyvinyl chloride (PVC) Mix Ratio = 100:100 (Plastic:Wood) Member Size = 35x103 mm Member Span = 1.00 m Method of Joining : ☐ Screw Joint ☒ Adhesive-Bonded Joint		
W_{DL} = Dead Load W_{LL} = Live Load W_{SELF} = SelfWeight W_{TL} = Total Uniform Load P_{LL} = Point Load		☐ Maximum Span Length Permitted ☒ Maximum Live Load Permitted, W_{LL} = 58 kg/m	
DESIGN SUMMARY			
L = 1 m W_{TL} = 2 kg/m P_{LL} = 0 kg	Click to Analysis Part		
$V = \frac{5W_{TL}L}{4} + P_{LL} = 2.50$ kg $M = \frac{W_{TL}L^2}{8} + \frac{13P_{LL}L}{64} = 0.25$ kg-m $\Delta_{LL} = \frac{W_{TL}L^4}{185EI} + \frac{P_{LL}L^3}{67EI} = 0.00$ cm $\Delta_{(DL+LL)} = \frac{W_{(DL+LL)}L^4}{185EI} + \frac{P_{LL}L^3}{67EI} = 0.00$ cm			
1. Check Bending Stress: $M/S < F_b$ 1 ksc < 55 ksc OK			
2. Check Shear Stress: $1.91 V/A < F_v$ 0 ksc < 10 ksc OK			
3. Check Live Load Deflection Control: $\Delta_{LL} \leq \frac{L}{360}$ 0.00 cm ≤ 0.28 cm OK			
4. Check Long-term Deflection Control: $\Delta_{(DL+LL)} \leq \frac{L}{240}$ 0.00 cm ≤ 0.42 cm OK			

รูปที่ 17 โปรแกรมออกแบบคานต่อเนื่อง



รูปที่ 18 หน้าตัดที่ได้ทำการเพิ่มเติมลงในโปรแกรมออกแบบคานต่อเนื่อง

ส่วนประกอบของโปรแกรม

โปรแกรมการออกแบบพื้นและคาน ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนของการป้อนข้อมูลเบื้องต้นที่ผู้ใช้งาน หรือส่วน INPUT DATA ส่วนที่สองเป็นการสรุปผลของการออกแบบตามข้อมูลที่ผู้ใช้ป้อนลงไปในส่วนแรก หรือส่วน DESIGN SUMMARY โดยรายละเอียดโปรแกรมในแต่ละส่วนแสดงได้ดังนี้

INPUT DATA คือ ส่วนของโปรแกรมที่ให้ผู้ใช้งานป้อนข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบลงไป เช่น น้ำหนักที่กระทำต่อคาน ความยาวช่วงคาน พร้อมทั้งเลือกขนาดหน้าตัดและชนิดวัสดุผสม (Wood-plastic composite) ที่ต้องการใช้งาน โดยรายละเอียดของข้อมูลที่ต้องป้อนลงในโปรแกรมมี ดังนี้

w_{DL} คือ น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่แบบแผ่กระจายสม่ำเสมอที่กระทำต่อตัวโครงสร้างที่ออกแบบ เช่น น้ำหนักของวัสดุตกแต่งผิวพื้น และน้ำหนักผนัง (Wall load) เป็นต้น

w_{LL} คือ น้ำหนักบรรทุกจรแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอหรือน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพการทำงาน เช่น น้ำหนักคนและน้ำหนักเฟอร์นิเจอร์

w_{SELF} คือ น้ำหนักของวัสดุ Wood-plastic ที่ออกแบบ

w_{TL} คือ ผลรวมของน้ำหนักแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอทั้งหมด (w_{DL} , w_{LL} และ w_{SELF})

P_{LL} คือ น้ำหนักบรรทุกแบบจุด โดยกระทำที่ตำแหน่ง ๆ ใด บนยาวช่วงคาน (Span)

Product Code คือ ส่วนที่แสดงรหัสของวัสดุผสมที่เลือกในการออกแบบใช้งาน ซึ่งจะบอกในส่วน of ชนิดวัสดุ อัตราส่วนผสม และขนาดวัสดุ

Polymer Type คือ ชนิดของพลาสติกที่ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุ Wood-plastic

Mix Ratio คือ อัตราส่วนผสมระหว่างพลาสติกต่อไม้ (Plastic: wood)

Member Size คือ ขนาดหน้าตัดของวัสดุที่ต้องการใช้งาน

Member Span คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ

Method of Joining เป็นส่วนที่ให้เลือกรูปแบบการยึดต่อคานหน้าตัดประกอบ ซึ่งสามารถเลือกได้เมื่อมีการเลือก Member Size ของคานหน้าตัดประกอบ โดยมีรูปแบบการยึดต่อให้เลือก 2 วิธี ได้แก่ การยึดด้วยตะปูเกลียว (Screw Joint) และการยึดด้วยกาว (Adhesive-Bonded Joint)

Maximum Span Length Permitted เป็นส่วนของการแสดงผลการคำนวณหาระยะความยาวช่วงสูงสุด (Maximum Span Length) เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดโดยที่คานหรือพื้นยังคงสามารถรับน้ำหนักตามน้ำหนักบรรทุกที่ผู้ใช้ป้อนค่าลงโปรแกรมได้อย่างปลอดภัยเป็นไปตามเงื่อนไข การรับแรงดัด การรับแรงเฉือนและการโก่งตัวได้ ซึ่งเป็นเครื่องมือในการป้อนข้อมูลและช่วยให้ผู้ใช้โปรแกรมทราบว่า ระยะความยาวช่วงคานหรือพื้น ที่เหมาะสมในการออกแบบ โดยไม่ต้องทดลองสุ่มค่าหาระยะความยาวช่วง (Span)

Maximum Live Load Permitted เป็นส่วนของการแสดงผลการคำนวณหาค่าน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดของพื้นและคานเมื่อวางพาดอยู่ในระยะความยาวช่วงคาน (Span) ที่กำหนดตามที่ผู้ใช้ป้อนค่าลงโปรแกรมได้อย่างปลอดภัยเป็นไปตามเงื่อนไข การรับแรงดัด การรับแรงเฉือนและการโก่งตัว ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการป้อนข้อมูลและช่วยให้ผู้ใช้โปรแกรมทราบถึงน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่จะใช้ออกแบบได้โดยไม่ต้องทดลองลุ่มค่าน้ำหนักบรรทุก

Click to Enlarge คือ ปุ่มสำหรับเลือกดูรูปร่างหน้าตัดวัสดุและรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ใช้งานกำหนด

DESIGN SUMMARY คือ ส่วนของการแสดงผลของการออกแบบตามข้อมูลเบื้องต้นที่ผู้ใช้ป้อนเข้าไปจากส่วนที่ 1 โดยโปรแกรมจะบอกให้ผู้ออกแบบทราบว่า เมื่อกำหนดความยาวช่วง (Member span) ที่ต้องการประเภทพลาสติก (Polymer type) และขนาดของหน้าตัด (Member size) คานหรือพื้นไม้ คานหรือพื้นนั้น ๆ จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ ได้หรือไม่ โดยโปรแกรมจะแสดงผลการตรวจสอบค่าแรงเค้นที่เกิดขึ้นจริงเปรียบเทียบกับค่าที่วัสดุรับได้ และแสดงการตรวจสอบตามเงื่อนไขของการออกแบบที่กำหนดไว้ในโปรแกรมทั้ง 4 ขั้นตอน ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

Click to Analysis Part คือ ปุ่มสำหรับให้ผู้ออกแบบดูรายละเอียดการคำนวณวิเคราะห์ผลของโปรแกรม ซึ่งรายละเอียดในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ผู้ใช้โปรแกรมต้องป้อนรหัสผ่านก่อนเข้าดูได้

หมายเหตุ โปรแกรมจะคำนวณค่าที่แรงดัดสูงสุด แรงเฉือนสูงสุด และค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้โดยอัตโนมัติเพื่อใช้ตรวจสอบกับค่าที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก

การใช้งานโปรแกรมเบื้องต้น

ขั้นตอนการออกแบบ

โปรแกรมจะกำหนดให้ผู้ใช้ สามารถแก้ไขได้เฉพาะในส่วนของ INPUT DATA เท่านั้น โดยเริ่มต้นการใช้งานโปรแกรม ดังนี้

1. ป้อนค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ (w_{DL}) น้ำหนักบรรทุกจร (w_{LL}) และ น้ำหนักแบบจุด (P_{LL}) ที่ต้องการออกแบบ ในช่อง w_{DL} , w_{LL} และ P_{LL} ตามลำดับ
2. เลือกชนิดวัสดุที่ต้องการออกแบบ ในช่อง Polymer type
3. เลือกอัตราส่วนผสมวัสดุระหว่างพลาสติกต่อไม้ (Plastic: Wood) ในช่อง Mix ratio
4. เลือกขนาดวัสดุที่ต้องการในช่อง Member size
5. ป้อนค่าระยะความยาวช่วงคานและพื้น (Span) ที่ต้องการออกแบบ ในช่อง Member span
6. ตรวจสอบค่าการออกแบบว่าผ่านตามเงื่อนไข ตามที่โปรแกรมกำหนดไว้หรือไม่ โดยสังเกตในส่วนของ DESIGN SUMMARY ถ้าผ่านตามเงื่อนไขโปรแกรมจะขึ้นคำว่า **OK** ทั้งหมด หากโปรแกรมแสดงคำว่า **NO OK** ขึ้นมา แสดงว่าการออกแบบไม่ผ่านตามเงื่อนไขที่โปรแกรมกำหนดไว้

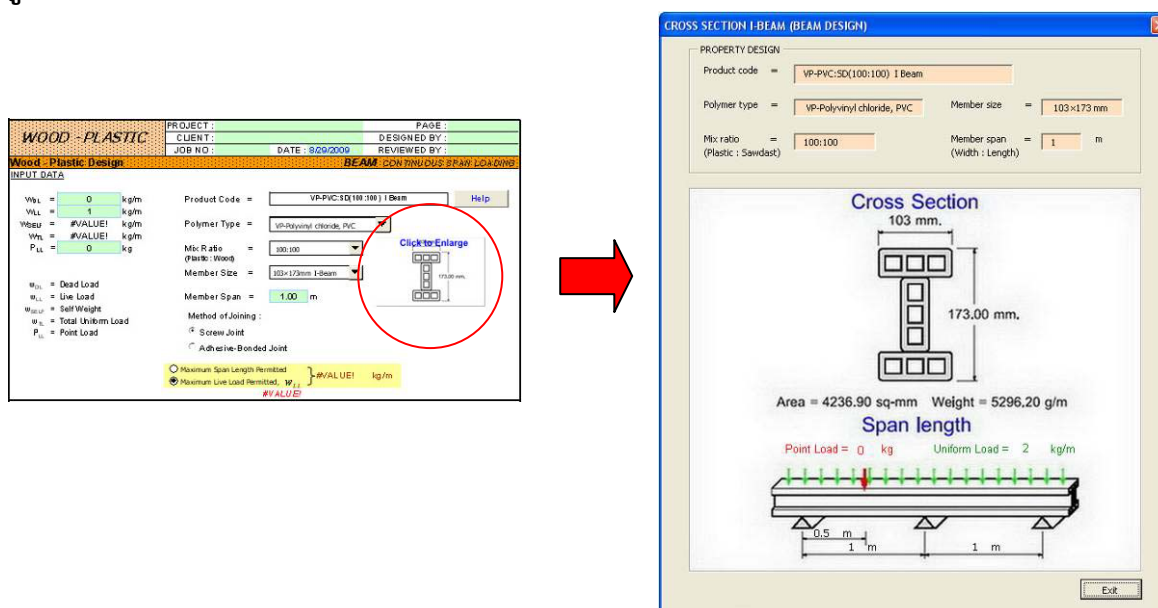
WOOD - PLASTIC		PROJECT :	PAGE :
Wood - Plastic Design		CLIENT :	DESIGNED BY :
FLOOR CONTINUOUS SPAN LOADING		JOB NO :	REVIEWED BY :
INPUT DATA W _{DL} = 250 kg/m ² W _{LL} = 218 kg/m ² W _{SELF} = 17 kg/m ² W _{TLL} = 485 kg/m ² P _{LL} = 10 kg W _{DL} = Dead Load W _{LL} = Live Load W _{SELF} = Self Weight W _{TLL} = Total Uniform Load P _{LL} = Point Load		Product Code = VP-PVC:SD(100:100) M.001(35x102 mm) Help Polymer Type = VP-Polyvinyl chloride, PVC Mix Ratio = 100:100 Member Size = 35x102 mm Member Span = 1.00 m ☐ Maximum Span Length Permitted ☒ Maximum Live Load Permitted, W _{LL} } 217 kg/sq.m	
DESIGN SUMMARY L = 1 m W _{TLL} = 485 kg/m ² P _{LL} = 10 kg $V = \frac{5W_{TLL}bL}{4} + P_{LL} = 71.84 \text{ kg}$ $M = \frac{W_{TLL}bL^2}{8} + \frac{13P_{LL}L}{64} = 8.22 \text{ kg-m}$ $\Delta_{LL} = \frac{W_{LL}bL^4}{185EI} + \frac{F_{LL}L^3}{67EI} = 0.28 \text{ cm}$ $\Delta_{(DL+LL)} = \frac{W_{(DL+LL)}bL^4}{185EI} + \frac{F_{LL}L^3}{67EI} = 0.42 \text{ cm}$		Click to Analysis Part 1. Check Bending Stress Control: $M/S < F_b$ 55 ksc < 100 ksc OK 2. Check Shear Stress Control: $1.5 V/A < F_v$ 8 ksc < 41 ksc OK 3. Check Live Load Deflection Control: $\Delta_{LL} \leq \frac{L}{360}$ 0.28 cm ≤ 0.28 cm NO OK 4. Check Long-term Deflection Control: $\Delta_{(DL+LL)} \leq \frac{L}{240}$ 0.42 cm ≤ 0.42 cm NO OK	

รูปที่ 19 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

จากรูปที่ 19 แสดงขั้นตอนการใช้งานของโปรแกรม หมายเลขที่ปรากฏในรูปจะแสดงขั้นตอนการใช้โปรแกรมที่สอดคล้องกับลำดับขั้นตอนข้างต้น

การเรียกดูขนาดหน้าตัดของวัสดุที่เลือกออกแบบ

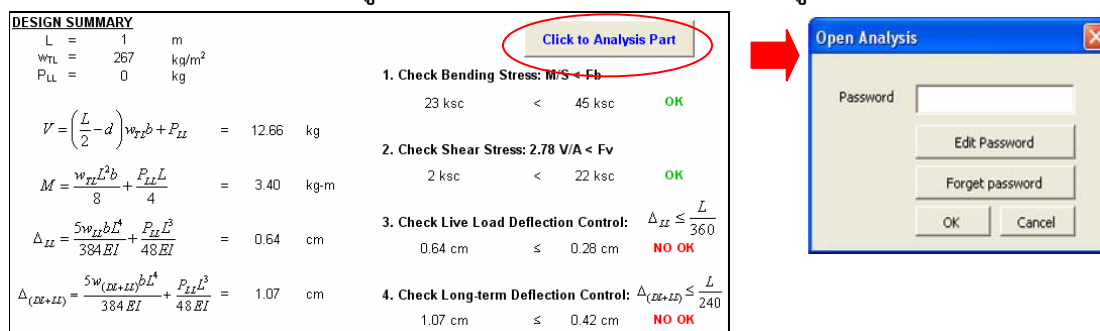
ผู้ใช้งานสามารถดูรูปร่างหน้าตัดของวัสดุและลักษณะของแรงที่กระทำต่อวัสดุ พร้อมกับรายละเอียดต่างๆตามที่ผู้ใช้งานได้กำหนดลงในโปรแกรม โดยเลือกที่รูปที่มีข้อความ Click to Enlarge ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ปุ่มสำหรับเลือกดูรูปร่างหน้าตัดวัสดุและรายละเอียดที่ผู้ใช้งานกำหนด

การเลือกให้โปรแกรมแสดงรายละเอียดการคำนวณ

ผู้ใช้งานสามารถดูรายละเอียดการคำนวณวิเคราะห์ผลของโปรแกรม โดยเลือกที่ Click to analysis part และต้องผ่านขั้นตอนการป้อนรหัสผ่าน จึงสามารถเข้าดูได้ ดังรูปที่ 21 ในส่วนนี้ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนรหัสผ่านตามที่ต้องการและในกรณีที่ผู้ใช้งานลืมรหัสผ่าน ผู้ใช้งานสามารถเข้าดูรหัสผ่านได้โดยต้องตอบคำถามตามที่โปรแกรมตั้งไว้ให้ถูกต้อง โปรแกรมจึงจะให้รหัสผ่านแก่ผู้ใช้งาน



DESIGN SUMMARY

L =	1	m
w _{TL} =	267	kg/m ²
P _{LL} =	0	kg

1. Check Bending Stress: $M/S < F_b$
 23 ksc < 45 ksc **OK**

2. Check Shear Stress: $2.78 V/A < F_v$
 2 ksc < 22 ksc **OK**

3. Check Live Load Deflection Control: $\Delta_{LL} \leq \frac{L}{360}$
 0.64 cm ≤ 0.28 cm **NO OK**

4. Check Long-term Deflection Control: $\Delta_{(DL+LL)} \leq \frac{L}{240}$
 1.07 cm ≤ 0.42 cm **NO OK**

Open Analysis

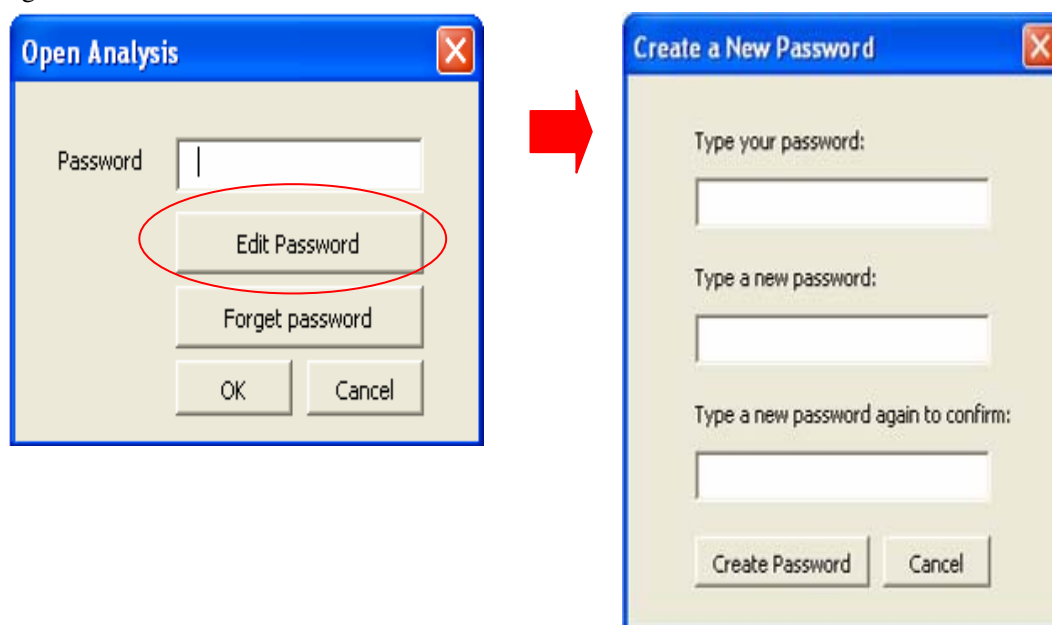
Password:

Edit Password
 Forget password
 OK Cancel

รูปที่ 21 ปุ่มเลือกดูรายละเอียดการคำนวณวิเคราะห์ผลของโปรแกรม

การเปลี่ยนรหัสผ่านที่ใช้เปิดเข้าในส่วนรายละเอียดการคำนวณ (Analysis part)

การเปลี่ยนรหัสผ่าน ให้ผู้ใช้งานเลือกที่ปุ่ม Edit password จะปรากฏหน้าต่าง Create a new password สำหรับเปลี่ยนรหัสผ่านขึ้นมา ดังรูปที่ 22 ผู้ใช้งานจะต้องป้อนรหัสผ่านเดิมในช่อง Type your password และป้อนรหัสผ่านใหม่ในช่อง Type a new password และยืนยันรหัสผ่านในช่อง Type a new password again to confirm



Open Analysis

Password:

Edit Password
 Forget password
 OK Cancel

Create a New Password

Type your password:

Type a new password:

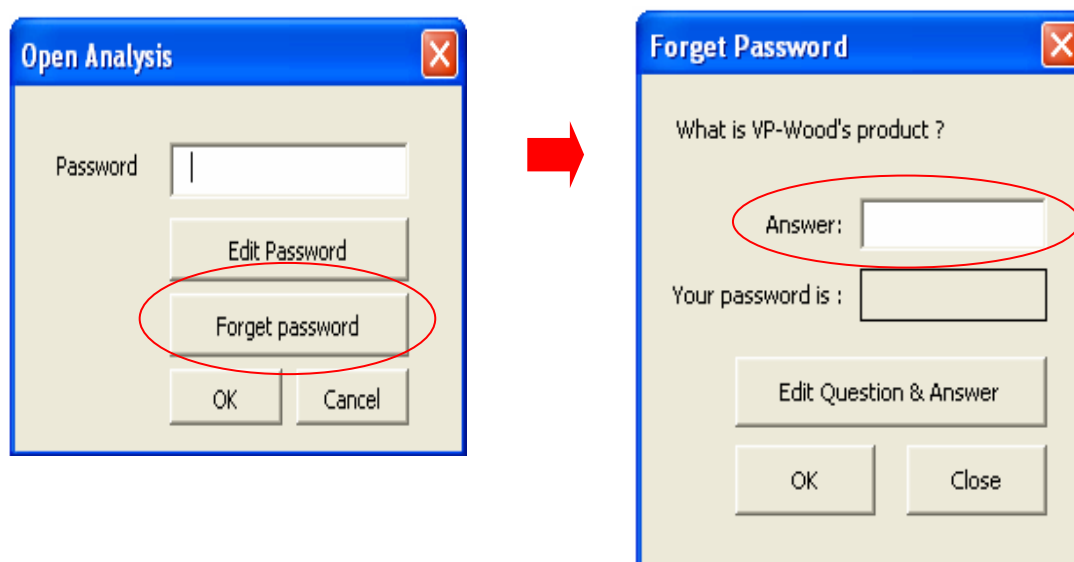
Type a new password again to confirm:

Create Password Cancel

รูปที่ 22 ปุ่มเลือกเปลี่ยนรหัสผ่านในการเข้าดูรายละเอียดการคำนวณวิเคราะห์ผลของโปรแกรม

การตรวจดูรหัสผ่านเมื่อลืมรหัสผ่านที่ใช้เปิดเข้าส่วนรายละเอียดการคำนวณ

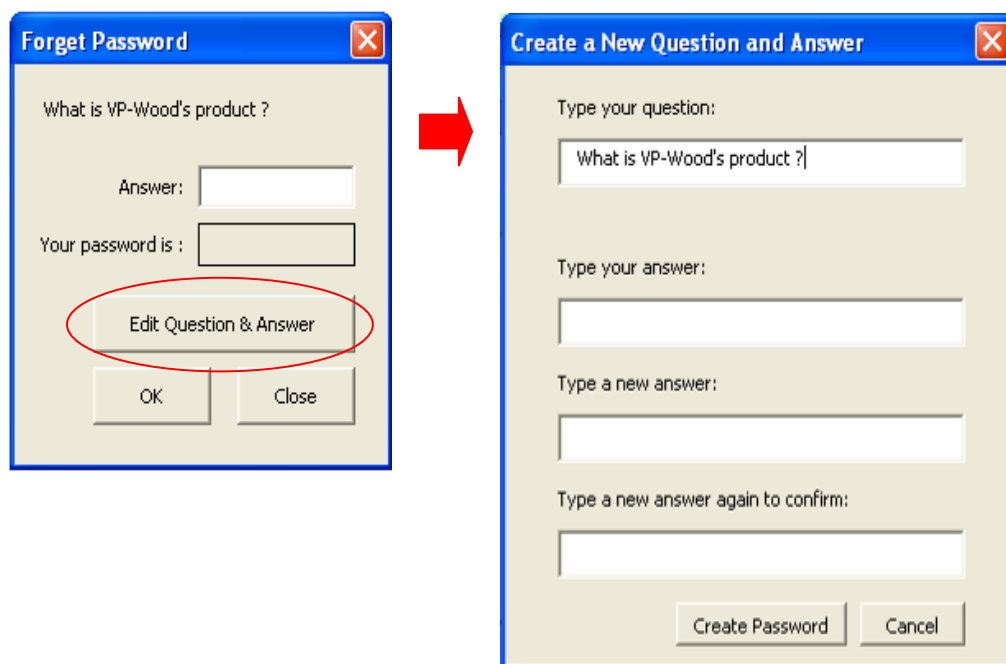
การเข้าดูรหัสผ่านกรณีลืมรหัสผ่าน ให้ผู้ใช้งานเลือกที่ปุ่ม Forgot password จะปรากฏหน้าต่าง Forgot password ผู้ใช้งานจะต้องป้อนคำตอบให้ถูกต้องในช่อง Answer แล้วโปรแกรมจะให้รหัสผ่านในช่อง Your password is ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 ปุ่มเลือกสำหรับเข้าดูรหัสผ่านกรณีลืมรหัสผ่าน

การเปลี่ยนคำถามและคำตอบที่ใช้สำหรับกรณีลืมรหัสผ่าน

การเปลี่ยนคำถามและคำตอบที่ใช้สำหรับกรณีลืมรหัสผ่าน ให้ผู้ใช้เลือกที่ปุ่ม Edit question & answer จะปรากฏหน้าต่าง Create a new question and answer ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนคำถามในช่อง Type your question ซึ่งจะมีคำถามเดิมปรากฏอยู่ ในการเปลี่ยนคำตอบ ผู้ใช้จะต้องป้อนคำตอบเดิมที่ช่อง Type your answer และป้อนคำตอบใหม่ในช่อง Type a new answer และยืนยันคำตอบใหม่ในช่อง Type a new answer again to confirm ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 ปุ่มเลือกสำหรับเปลี่ยนคำถามและคำตอบที่ใช้สำหรับกรณีลืมรหัสผ่าน

การแก้ไขโปรแกรมเมื่อการออกแบบไม่ผ่านตามเงื่อนไข

ในการใช้งานโปรแกรมออกแบบ Wood-plastic design หากค่าที่ออกแบบในส่วนของ DESIGN SUMMARY ไม่ผ่านตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ ให้เปลี่ยนแปลงค่าในส่วน INPUT DATA ดังนี้

การแก้ไขการออกแบบโดยลดระยะความยาวช่วง Span

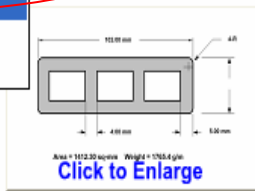
การแก้ไขการออกแบบให้ผ่านตามเงื่อนไขโดยลดระยะความยาวช่วง Span ลง สามารถทำได้โดยตรวจสอบเช็คระยะ Span ในส่วน INPUT DATA/Maximum length permitted ซึ่งแสดงค่าของระยะ Span สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ แล้วให้ทำการเปลี่ยนค่าระยะ Span ในช่อง Member span (ดูรูปที่ 25 ประกอบ)

WOOD - PLASTIC		PROJECT :	PAGE :
		CLIENT :	DESIGNED BY :
		JOB NO. :	DATE : 2/26/2007
		REVIEWED BY :	
Wood - Plastic Design		FLOOR : SIMPLE SPAN LOADING	
INPUT DATA			
$W_{DL} = 100 \text{ kg/m}^2$ $W_{LL} = 150 \text{ kg/m}^2$ $W_{SELF} = 17 \text{ kg/m}^2$ $W_{TL} = 267 \text{ kg/m}^2$ $P_{LL} = 0 \text{ kg}$	Product Code = KMUTT-PE:SD(100:100) M.001(35x102 mm) Polymer Type = Kmutt-Polyethylene, PE Mix Ratio (Plastic : Wood) = 100:100 Member Size = 35x102 mm	Help 	
W_{DL} = Dead Load W_{LL} = Live Load W_{SELF} = Self Weight W_{TL} = Total Uniform Load P_{LL} = Point Load	Member Span = 1.00 m ☒ Maximum Length Permitted ☐ Maximum Live Load Permitted, W_{LL}	0.75 m Click to Enlarge	

รูปที่ 25 การแก้ไขโปรแกรมโดยการลดระยะความยาวช่วง (Span)

การแก้ไขการออกแบบโดยเปลี่ยนชนิดวัสดุ

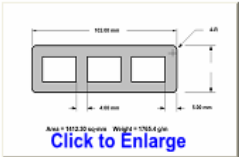
การแก้ไขการออกแบบให้ผ่านตามเงื่อนไขโดยเปลี่ยนไปเลือกชนิดวัสดุ Wood-plastic ที่สามารถรับน้ำหนักได้ดีขึ้นในส่วน INPUT DATA/Polymer type (วัสดุที่รับน้ำหนักได้มาก ความเปราะของวัสดุจะมากขึ้น) วัสดุที่รับน้ำหนักเรียงลำดับจากน้อยไปมากจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คือ PE(100:100), PP(100:100), PVC(100:50) และ PVC(100:100) (ดูรูปที่ 26ประกอบ)

WOOD - PLASTIC		PROJECT :	PAGE :
		CLIENT :	DESIGNED BY :
		JOB NO :	DATE : 2/26/2007
		REVIEWED BY :	
Wood - Plastic Design		FLOOR : SIMPLE SPAN LOADING	
INPUT DATA			
$W_{DL} = 100 \text{ kg/m}^2$ $W_{LL} = 150 \text{ kg/m}^2$ $W_{SELF} = 17 \text{ kg/m}^2$ $W_{TL} = 267 \text{ kg/m}^2$ $P_{LL} = 0 \text{ kg}$	Product Code = KMUTT-PE:SD(100:100) M.001(35x102 mm) Help Polymer Type = Kmutt-Polyethylene, PE Mix Ratio (Plastic : Wood) = VP-Polyethylene, PE Member Size = 35 x 102 mm Member Span = 1.00 m		
W_{DL} = Dead Load W_{LL} = Live Load W_{SELF} = Self Weight W_{TL} = Total Uniform Load P_{LL} = Point Load	☒ Maximum Length Permitted ☐ Maximum Live Load Permitted, W_{LL}	0.75 m	

รูปที่ 26 การแก้ไขโปรแกรมโดยการเปลี่ยนชนิดวัสดุ

การแก้ไขการออกแบบโดยเปลี่ยนขนาดวัสดุ

การแก้ไขการออกแบบให้ผ่านตามเงื่อนไขโดยเปลี่ยนไปเลือกขนาดของวัสดุ Wood-plastic ในส่วน INPUT DATA/Member size ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (ดูรูปที่ 27 ประกอบ)

WOOD - PLASTIC		PROJECT :	PAGE :
		CLIENT :	DESIGNED BY :
		JOB NO :	DATE : 2/26/2007
		REVIEWED BY :	
Wood - Plastic Design		FLOOR : SIMPLE SPAN LOADING	
INPUT DATA			
$W_{DL} = 100 \text{ kg/m}^2$ $W_{LL} = 150 \text{ kg/m}^2$ $W_{SELF} = 17 \text{ kg/m}^2$ $W_{TL} = 267 \text{ kg/m}^2$ $P_{LL} = 0 \text{ kg}$	Product Code = KMUTT-PE:SD(100:100) M.001(35x102 mm) Help Polymer Type = Kmutt-Polyethylene, PE Mix Ratio (Plastic : Wood) = 100:100 Member Size = 35 x 102 mm Member Span = 1.00 m		
W_{DL} = Dead Load W_{LL} = Live Load W_{SELF} = Self Weight W_{TL} = Total Uniform Load P_{LL} = Point Load	☒ Maximum Length Permitted ☐ Maximum Live Load Permitted, W_{LL}	0.75 m	

รูปที่ 27 การแก้ไขโปรแกรมโดยเปลี่ยนขนาดของวัสดุ

การแก้ไขการออกแบบโดยลดน้ำหนักบรรทุกจร

การแก้ไขการออกแบบให้ผ่านตามเงื่อนไขโดยลดน้ำหนักบรรทุกจรลง สามารถทำได้โดยตรวจเช็คน้ำหนักบรรทุก ในส่วน INPUT DATA/ Maximum weight permitted แสดงค่าของน้ำหนักบรรทุกจรสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งในโปรแกรมนี้กำหนดให้เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าน้ำหนักบรรทุกจร (w_{LL}) และให้คงค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ (w_{DL}) ไว้ นอกจากนี้ในส่วนของน้ำหนักบรรทุก w_{SELF} จะเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติตามหน้าตัดของคาน (Member Size) ที่เลือกไว้ (ดูรูปที่ 28 ประกอบ)

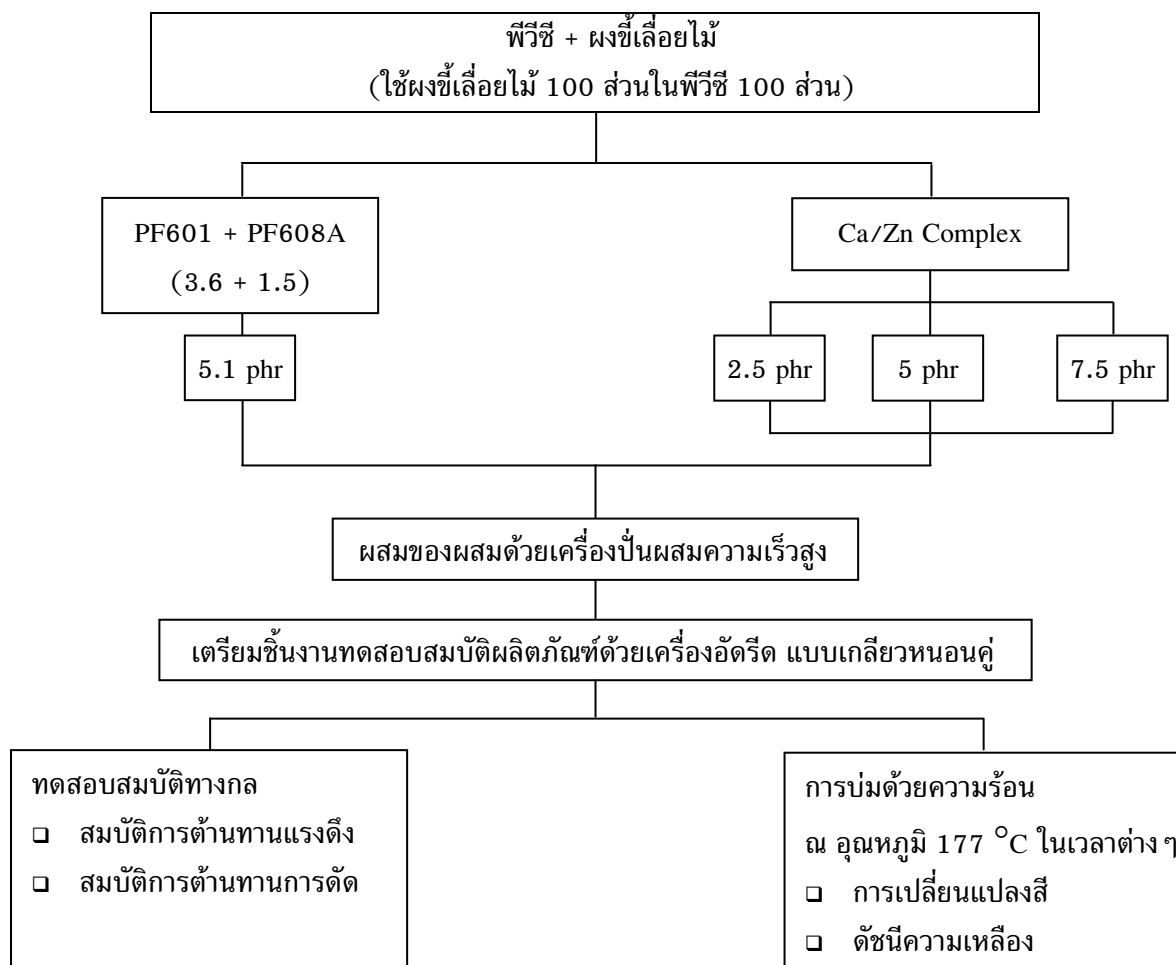
WOOD - PLASTIC		PROJECT :	PAGE :
		CLIENT :	DESIGNED BY :
		JOB NO :	DATE : 2/26/2007
		REVIEWED BY :	
Wood - Plastic Design		FLOOR SIMPLE SPAN LOADING	
INPUT DATA			
w_{DL} =	100 kg/m ²	Product Code =	KMUTT-PE:SD(100:100) M.001(35x102 mm) Help
w_{LL} =	150 kg/m ²	Polymer Type =	Kmutt-Polyethylene, PE
w_{SELF} =	17 kg/m ²	Mix Ratio =	100:100
w_{TL} =	267 kg/m ²	(Plastic : Wood)	
P_{LL} =	0 kg	Member Size =	35 x 102 mm
w_{DL} = Dead Load w_{LL} = Live Load w_{SELF} = Self Weight w_{TL} = Total Uniform Load P_{LL} = Point Load		Member Span =	1.00 m
		☐ Maximum Length Permitted ☒ Maximum Live Load Permitted, w_{LL}	
		46 kg/sq-m	

รูปที่ 28 การแก้ไขโปรแกรมโดยการเปลี่ยนขนาดน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load, LL)

จากการปรับปรุงโปรแกรมสำเร็จรูป ทำให้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการออกแบบที่มีอยู่ในปัจจุบันมีความหลากหลายและมีประสิทธิภาพการในใช้งาน และครอบคลุมหน้าตัดคานหรือพื้น ที่ทางบริษัทผู้ร่วมทุนวิจัยผลิตอยู่

1.4 การศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ชนิด Ca/Zn complex ในปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ทางบริษัทใช้

สำหรับงานวิจัยในส่วนนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ Ca/Zn complex แทนการใช้สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ทางบริษัทใช้ และเพื่อศึกษาหาปริมาณของ Ca/Zn complex ที่เหมาะสมในการทำวัสดุผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และผงซีลี้อยไม้ เพื่อให้ได้วัสดุผสมที่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีของวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยไม้ ในอัตราส่วน 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยรายละเอียดการวิจัยในส่วนที่ 1.4 เป็นดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 แผนการดำเนินงานการศึกษาผลของชนิด และปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพทางความร้อน

ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและซีลี้อย (100:100) ที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท

จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและซีลี้อย (100:100) ที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท รายละเอียดของผลการทดลองแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน

Formula	Max. load (N)	Strain at Break (%)	Max. tensile stress (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
PVC:SD (100:100)	351.7	3.2	12.3(0.3)	721(73.2)
PVC:SD (100:100)+ Ca/Zn 2.5 phr	362.2	3.8	12.4(0.5)	698(43.8)
PVC:SD (100:100)+ Ca/Zn 5.0 phr	367.6	2.2	12.1(0.7)	847(42.5)
PVC:SD (100:100)+ Ca/Zn 7.5 phr	312.2	2.3	10.3(1.2)	704(64.6)

The values in parentheses indicate standard deviation (SD).

จากการทดสอบการรับแรงดึงของวัสดุ WPC ที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท พบว่าการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex ให้ผลการรับแรงดึงไม่แตกต่างจากกรณีของสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัทมากนัก

ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและซีลี้อย (100:100) ที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท

จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและซีลี้อย (100:100) ที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท รายละเอียดของผลการทดลองแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของชิ้นงาน

Formula	Max. load (N)	Max. stress	Modulus of elasticity
		(MPa)	(MPa)
PVC:SD (100:100)	18.3	21.4(1.1)	1,388(172.1)
PVC:SD (100:100)+ Ca/Zn 2.5 phr	24.9	19.0(0.5)	1,346(89.8)
PVC:SD (100:100)+ Ca/Zn 5.0 phr	26.3	23.8(1.0)	1,828(138.1)
PVC:SD (100:100)+ Ca/Zn 7.5 phr	26.2	20.9(2.6)	1,526(224.9)

The values in parentheses indicate standard deviation (SD).

จากการทดสอบการรับแรงดัดของวัสดุ WPC ที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท พบว่าการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex ส่งผลต่อการรับแรงดัดของวัสดุ WPC ไม่แตกต่างจากกรณีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัทมากนัก เช่นเดียวกันกับการรับแรงดึงของวัสดุ WPC

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ของชิ้นงานที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท ณ อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท ณ อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส รายละเอียดของผลการทดลองแสดงในตารางที่ 12 และ 13

ตารางที่ 12 ค่า Hue/value/chroma ของชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและซีล้อยไม้ (100:100) ณ เวลาในการอบต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส

Formula	Hue/value/chroma at vary time in oven (min)				
	0	30	60	120	270
VP Formula	7.8YR/4.1/ 2.5	4.6YR/3.7/ 2.3	3.7YR/3.4/ 2.0	4.2YR/3.3/ 1.8	2.5YR/2.8/ 0.7
Ca/Zn 2.5 phr	7.6YR/4.7/ 2.9	3.9YR/3.7/ 2.3	3.4YR/3.4/ 2.1	3.3YR/3.1/ 1.6	7.7R/2.7/ 0.5
Ca/Zn 5.0 phr	7.5YR/4.2/ 2.7	3.3YR/3.4/ 2.1	2.6YR/3.1/ 1.7	2.7YR/3.0/ 1.3	7.2R/2.5/ 0.3
Ca/Zn 7.5 phr	8.1YR/4.5/ 2.7	3.8YR/3.5/ 2.2	3.0YR/3.1/ 1.7	3.1YR/2.9/ 1.1	9.0R/2.6/ 0.5

ตารางที่ 13 สีของชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ชนิด Ca/Zn complex ในปริมาณ ต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการเติมสารประกอบตะกั่วสูตร VP ณ เวลาในการอบต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส

Aging time (min.)	VP formula	Ca/Zn 2.5 phr	Ca/Zn 5.0 phr	Ca/Zn 7.5 phr
0				
30				
45				
60				
90				
120				
180				
270				
360				

จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท ณ อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส พบว่า สีชิ้นงานเริ่มต้นมีสีใกล้เคียงกัน และเมื่อเวลาผ่านไปพบว่า ชิ้นงานที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เริ่มมีสีเข้ม ณ เวลา 90 นาที ซึ่งเข้มเร็วกว่าชิ้นงานที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท บ่งบอกว่า ชิ้นงานที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ชนิด Ca/Zn complex มีการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้เร็วกว่ากรณีสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท แต่เมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป กรณีการ

เติมสารเพิ่มเสถียรภาพความร้อน ชนิด Ca/Zn complex และกรณีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัทถือว่ามีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ของชิ้นงานที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส รายละเอียดของผลการทดลองแสดงในตารางที่ 14 และ 15

ตารางที่ 14 ค่า Hue/value/chroma ของชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและซีล้อยไม้ (100:100) ณ เวลาในการอบต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Formula	Hue/value/chroma at vary time in oven (min)				
	0	4	12	20	24
VP Formula	7.8YR/4.1/ 2.5	7.8YR/4.4/ 2.5	7.9YR/4.3/ 2.5	7.9YR/4.5/ 2.5	8.1YR/4.4/ 2.6
Ca/Zn 2.5 phr	7.6YR/4.7/ 2.9	7.6YR/4.5/ 2.8	7.6YR/4.5/ 3.0	7.5YR/4.5/ 2.8	7.7YR/4.6/ 2.9
Ca/Zn 5.0 phr	7.5YR/4.2/ 2.7	7.6YR/4.2/ 2.7	7.7YR/4.2/ 2.7	7.8YR/4.3/ 2.8	7.8YR/4.2/ 2.8
Ca/Zn 7.5 phr	8.1YR/4.5/ 2.7	8.0YR/4.4/ 2.7	8.1YR/4.4/ 2.7	7.8YR/4.4/ 2.9	8.0YR/4.4/ 2.8

ตารางที่ 15 สีของชิ้นงานพีวีซีที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ชนิด Ca/Zn complex ในปริมาณ ต่าง ๆ กัน เปรียบเทียบกับกรณีการเติมสารประกอบตะกั่วสูตร VP ณ เวลาในการอบต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Aging time (hrs.)	VP formula	Ca/Zn 2.5 phr	Ca/Zn 5.0 phr	Ca/Zn 7.5 phr
0				
2				
4				
6				
9				
12				
16				
20				
24				

จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของชิ้นงานที่มีการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนชนิด Ca/Zn complex เปรียบเทียบกับสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของบริษัท ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าสีชิ้นงานเริ่มต้นมีสีใกล้เคียงกัน และเมื่อเวลาผ่านไปพบว่าสีชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง

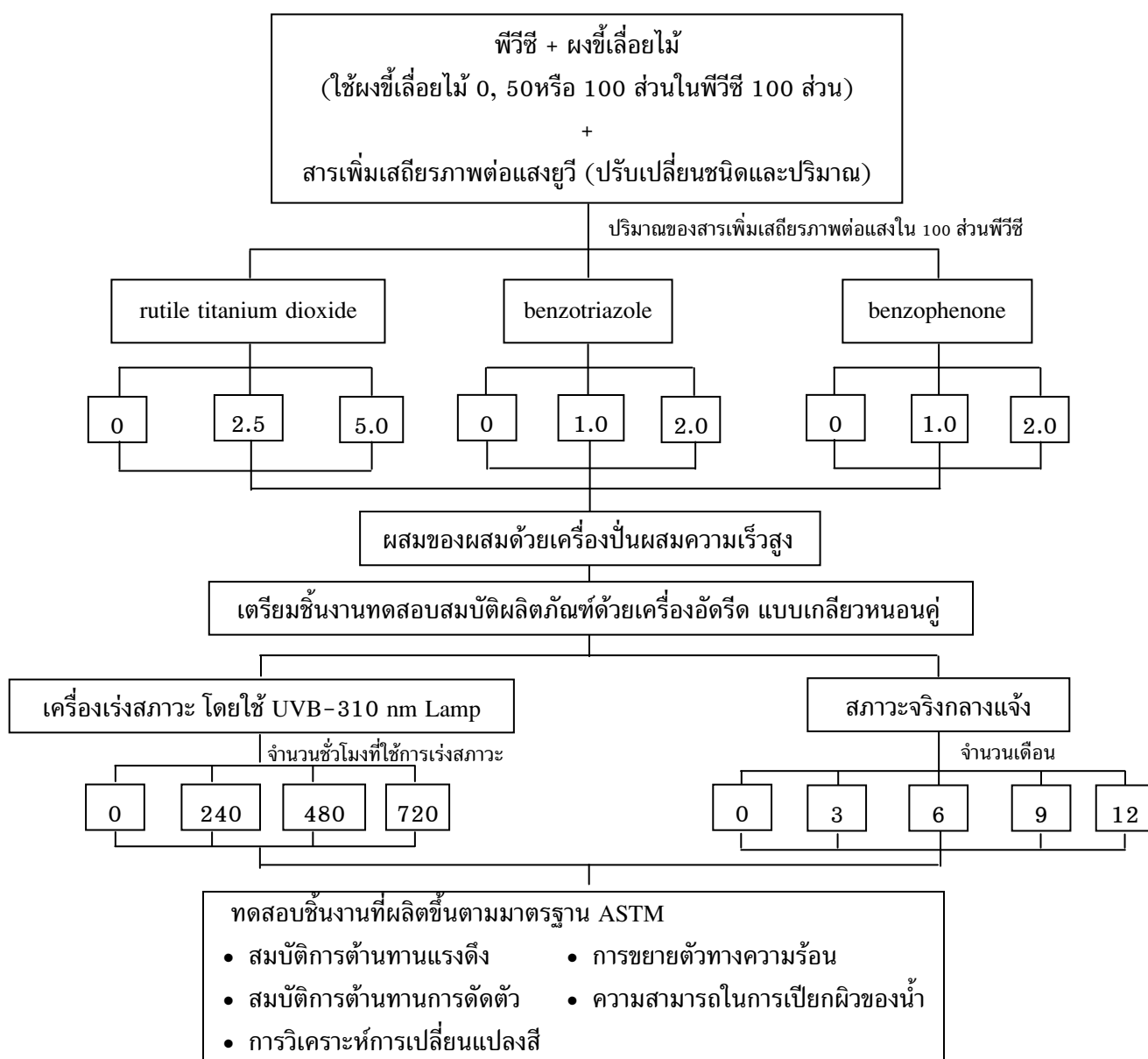
ส่วนที่ 2 การศึกษาผลของแสงยูวีและความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ WPC

2.1 การปรับปรุงการเสื่อมสภาพของวัสดุผสมพีวีซีและซีล้อยไม้เนื่องจากความร้อน

สำหรับงานวิจัยในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวัสดุผสมพีวีซีและผงซีล้อยไม้ ในอัตราส่วน 100:0 และ 100:50 ส่วนโดยน้ำหนัก สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่นำมาทำการศึกษามีทั้งหมด 3 ชนิด คือ สเตียเรทของสังกะสี (zinc stearate), สเตียเรทของตะกั่ว (lead stearate) และซีโอไลต์ (zeolite) และมีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ตั้งแต่ 2.4 และ 4.8 phr สำหรับการประเมินผลการวิจัย ทางคณะวิจัยฯ ได้ทำการประเมินผลจากการวัดการเปลี่ยนแปลงสีและค่าดัชนีความเหลือง (CIE yellowness index) ก่อนและการบ่มเร่งด้วยความร้อน, ค่าดัชนีพอลิอิน (polyene index), เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไป (%weight loss) และอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) จากผลการศึกษาวิจัย พบว่า การใช้สเตียเรทของสังกะสี และสเตียเรทของตะกั่วเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนมีส่วนช่วยในการปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของพีวีซีทั้งในกรณีของพีวีซีและวัสดุผสมพีวีซีและผงซีล้อยไม้ การบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 177 องศาเซลเซียส พบว่า การเติมสเตียเรทของสังกะสี และสเตียเรทของตะกั่วสามารถช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของพีวีซี โดยการหน่วงการเกิดปฏิกิริยา unzip ให้เกิดได้ช้าลง และทำให้การเกิดพันธะคู่ แบบคอนจูเกต (conjugated double bond) ในสายโซ่พีวีซีเกิดได้ลดลง ผลของการเติมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวของพีวีซี พบว่า การเติมสเตียเรทของสังกะสีมีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของพีวีซีมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การเติมสเตียเรทของตะกั่วไม่มีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของพีวีซีเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนการเติมซีโอไลต์มีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของพีวีซีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 264 ไปเป็น 280 องศาเซลเซียส จากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่เหมาะสมกับพีวีซีมากที่สุด คือ สเตียเรทของตะกั่ว ส่วนผลของการเติมผงซีล้อยลงในพีวีซี พบว่า ผงซีล้อยมีส่วนเหนี่ยวนำให้พีวีซีเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนได้ง่ายขึ้น งานวิจัยในส่วนที่ 2.1 นี้ได้ถูกนำไปเผยแพร่ในวารสาร *Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry* (JIF = 0.720) ในชื่อเรื่อง “Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite” โดยมีรายละเอียดดังเอกสารแนบ 2 และผลงานวิจัยบางส่วนได้ถูกนำไปยื่นขอจดสิทธิบัตร เลขที่คำขอ 0801004853 รายละเอียดของสิทธิบัตรดังกล่าวดังเอกสารแนบ 2

2.2 การปรับปรุงการเสื่อมสภาพของวัสดุผสมพีวีซีและซีล้อยไม้เนื่องจากแสงยูวี

งานวิจัยในส่วนนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงยูวีของวัสดุผสมพีวีซีและผงซีล้อยไม้ โดยการศึกษาผลชนิดและปริมาณของสารเพิ่มเสถียรภาพต่อแสงยูวี และผลของปริมาณผงซีล้อย ภายใต้สภาวะการบ่มเร่งในเครื่องเร่งสภาวะ QUV และสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ โดยทำการประเมินผลจากสมบัติทางกล ทางกายภาพ และโครงสร้างทางเคมี โดยรายละเอียดการวิจัยในส่วนที่ 2.2 เป็นดังรูปที่ 30



รูปที่ 30 แผนผังการดำเนินการวิจัยการปรับปรุงการเสื่อมสภาพของวัสดุผสมพีวีซีและผงซีล้อยไม้เนื่องจากแสงยูวี

จากแผนการดำเนินงานวิจัยข้างต้น ขณะนี้ทางคณะวิจัยฯ ยังไม่สามารถดำเนินการวิจัยได้ตรงตามแผน เนื่องจากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่มีสภาพที่ไม่ค่อยสมบูรณ์ เสียหลายครั้ง และมีผู้ที่ใช้งานเครื่องดังกล่าวเป็นจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและซีลี้อยู่ที่มีการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณสารป้องกันการเสื่อมสภาพจากแสงยูวีได้ครบทุกสูตร และในส่วนของขั้นตอนการบ่มเร่งสภาวะด้วยแสงยูวี เกิดความล่าช้า เนื่องจากต้องรอการใช้เครื่องบ่มเร่งสภาวะด้วยแสงยูวี ซึ่งการใช้งานเครื่องแต่ละครั้งมีช่วงเวลาการใช้งานเป็นเดือนๆ ติดต่อกัน จึงทำให้การดำเนินงานส่วนที่ 2.2 เกิดความล่าช้า แต่อย่างไรก็ตาม ผลงานวิจัยบางส่วนของงานวิจัยส่วนที่ 2.2 ได้ถูกนำไปยื่นขอจดสิทธิบัตร เลขที่คำขอ 0801004853 โดยมีรายละเอียดดังเอกสารแนบ 3 สำหรับระยะเวลาที่คาดว่าจะใช้ในการดำเนินงานวิจัยในส่วนที่ 2.2 เสร็จสิ้น และผลที่คาดว่าจะได้รับมีรายละเอียดดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 รายละเอียดของระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยส่วนที่ 2.2 และผลที่คาดว่าจะได้รับ

รายละเอียดของงาน	ระยะเวลาที่คาดว่าจะดำเนินการเสร็จ	ผลที่คาดว่าจะได้รับ
1. การศึกษาการปรับปรุงการเสื่อมสภาพของวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยู่ไม่เนื่องจากแสงยูวีภายใต้สภาวะการบ่มเร่งในเครื่องเร่งสภาวะ QUV	ธันวาคม 2552	บทความวิจัย จำนวน 1 บทความ ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ
2. การศึกษาการปรับปรุงการเสื่อมสภาพของวัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยู่ไม่เนื่องจากแสงยูวีภายใต้สภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ	กุมภาพันธ์ 2554	สมการความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงยูวีของวัสดุผสมพีวีซีและซีลี้อยู่ไม่ภายใต้สภาวะการใช้งานจริงกับสภาวะการบ่มเร่งในเครื่องเร่งสภาวะ

ตารางที่ 17 Research Output ที่ได้จากงานวิจัยในโครงการ

ส่วนงานที่	Research Output
ส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติด้านวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ WPC ที่มีหน้าตัดและขนาดของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันและรูปแบบการยึดต่อของหน้าตัด	● Sombatsompop N, Prapruit W, Chaochanchaikul K, Pulngern T & Rosarpitak V - Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beams - Journal of Vinyl & Additive Technology (accepted) (JIF = 0.658) ● โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปสำหรับการออกแบบโครงสร้างคาน และพื้น WPC
ส่วนที่ 2 การศึกษาผลของแสงยูวีและความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ WPC	● Sombatsompop N, Taptim K, Chaochanchaikul K, Thongpin C & Rosarpitak V (2008) Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite - Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry, 45(7): 534-541.(JIF = 0.720) ● ลิขสิทธิ์ เรื่อง กรรมวิธีการเสริมแรงผลิตภัณฑ์จากวัสดุผสมพีวีซีและซีลื้อยไม้โดยเส้นใยแก้วสังเคราะห์ และสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและแสงยูวี เลขที่คำขอ 0801004853 ● บทความวิจัย จำนวน 1 บทความ ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ <u>อยู่ระหว่างการดำเนินการวิจัย และเตรียมต้นฉบับ</u>

กิจกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ได้รับทุน

- การทดสอบสมบัติวัสดุผสมพอลิเอทิลีนและเส้นใยธรรมชาติซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่างที่ทางบริษัทผู้ร่วมวิจัยนำมาจากต่างประเทศ เพื่อเปรียบเทียบผลกับผลิตภัณฑ์ของทางบริษัท ดังเอกสารแนบ 4
- ทางคณะวิจัยฯ ได้เป็นนักวิจัยพี่เลี้ยงในโครงการ 2B-KMUTT ซึ่งเป็นโครงการปลูกฝังสร้างยุวชนให้เข้าสู่งานด้านการวิจัย มจร. รุ่นที่ 4
- การทดสอบสมบัติการติดไฟของวัสดุ WPC ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของทางบริษัทผู้ร่วมวิจัย ซึ่งประกอบด้วย วัสดุผสมพอลิเอทิลีนและซีลี้อย ในอัตราส่วน 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก วัสดุผสมพอลิพรอพิลีนและซีลี้อย ในอัตราส่วน 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก และวัสดุผสมพีวีซีและซีลี้อย ในอัตราส่วน 100:100 ส่วนโดยน้ำหนัก ดังเอกสารแนบ 5
- จัดทำคู่มือการทดสอบสมบัติของวัสดุ WPC มอบให้แก่บริษัทผู้ร่วมวิจัย ดังเอกสารแนบ 6
- การทดสอบสมบัติการรับแรงดัดของชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและซีลี้อย (100:100) ที่มีการเติมผงทัลคัมเปรียบเทียบกับการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของทางบริษัท ดังเอกสารแนบ 7
- การศึกษาสมบัติการรับแรงเฉือนของกาวที่ยึดติดชิ้นงานวัสดุผสมพีวีซีและซีลี้อยไม้ (100:100) เอกสารแนบ 8

(ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ)
หัวหน้าโครงการ

ภาคผนวก

เอกสารแนบ 1

- ผลงานวิจัย Sombatsompop N, Prapruit W, Chaochanchaikul K, T. Pulngern & Rosarpitak V - Effect of Cross-section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/PVC Composite Beam, *Journal of Vinyl & Additive Technology* (accepted)(JIF = 0.658)

Effect of Cross-Section Design and Testing Conditions on Flexural Properties of Wood/Poly(vinyl chloride) Composite Beams

N. Sombatsompop,¹ W. Prapruit,¹ K. Chaochanchaikul,¹ T. Pulngern,² V. Rosarpitak³

¹ Polymer PROCESSING and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thongkru, Bangmod, Bangkok 10140, Thailand

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thongkru, Bangmod, Bangkok 10140, Thailand

³ V.P. Wood Co., Ltd., 25/5 Moo 4, Soi Suksawad 66, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140, Thailand

Highly filled wood/poly(vinyl chloride) (WPVC) composites were manufactured in five different cross-sections using an industrial-scale twin-screw extruder and the flexural properties of such composites were evaluated, the effects of sample direction, span length, and rate of loading were also taken into account. The experimental results suggested that the cross-section design of WPVC composite products had a significant effect on the flexural properties. Higher flexural properties were obtained when testing the WPVC composites in edge-wise loading direction. The findings in this work suggested that low number of hollow cores with thick flanges and webs should be used to obtain the composite with higher flexural properties. The WPVC composite with low density was observed to exhibit lower flexural strength. The rate of loading had a marginal effect on the flexural properties of the composites. The minimum length/depth ratios of the WPVC beam to be used for steady flexural properties were 10 under edge-wise direction and 16 under flat-wise direction. *J. VINYL ADDIT. TECHNOL.*, 00:000-000, 2009. © 2009 Society of Plastics Engineers

INTRODUCTION

Natural fibers such as wood, pineapple, sisal, coconut coir, jute, palm, cotton, rice husk, and bamboo are widely used as reinforcing materials in thermoplastics, thermosets, and rubbers [1–4], as they offer low-density and low-cost products with good mechanical properties, better dimensional stability, recyclability, and environmental

advantage. Wood fibers were initially used for reducing and disposing large amounts of natural fiber waste materials and for cost reduction, but now preferably used as reinforcing materials in polymers. The production of wood/polymer composite (WPC) articles is usually governed by conveying, forming, and consolidating processes. Recently, WPC products have been extensively developed and used in buildings and constructions, automobiles, and for gardening and outdoor products, although their strength limits are still questionable.

Reinforcements of the wood members have been carried out extensively, for example, laminating the wood members with reinforced-plastic sheets [5–7] while those of the WPC products have just been attractive to researchers and engineers. The reinforcements of the WPC have been carried out by the addition of glass fiber [8–10], and by the selection of suitable processing methods [11, 12]. Tungjitpornkull et al. [8] suggested that the mechanical moduli and strengths of the wood/poly(vinyl chloride) (WPVC) composites increased with increasing glass-fiber contents. At low glass-fiber contents, the concentration of carbonyl groups to form chemical interaction with WPVC composites was important, whereas at high glass-fiber loading, the final length of glass fiber after final processing exhibited the dominant effect. Rizvi and Semeralul [9] found the tensile properties of the wood/high-density polyethylene (HDPE) composites were improved by addition of 5% glass fiber, whereas Jiang et al. [10] did not find positive effects when adding short glass fibers into WPVC composites. Liu et al. [11] found that higher impact strength of kenaf fiber reinforced soy-based bio-composites was obtained by compression molding when compared with extrusion and injection processes due to low voids present in the composite samples. Tungjitpornkull and Sombatsompop [12] suggested that the glass-fiber

Correspondence to: N. Sombatsompop; e-mail: narongrit.som@kmutt.ac.th
Contract grant sponsor: Thailand Research Fund (TRF), Small and Medium Enterprise (SME), V.P. Wood Co., Ltd.; contract grant number: IUG 5080029.
DOI 10.1002/vnl.20202
Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).
© 2009 Society of Plastics Engineers

JOURNAL OF VINYL & ADDITIVE TECHNOLOGY—2009

reinforced WPVC composites produced from the compression molding process had better mechanical properties than those from the extrusion process as a result of lower shearing stress, which resulted in less thermal degradation of poly(vinyl chloride) (PVC) and lower breakage of glass fiber, and higher specific density. Ermolaeva et al. [13] showed how structural optimization could be used during material selections using a wide range of metals, alloys, synthetic fiber/polymer, and natural fiber/polymer composites. They suggested that steel was the best choice for the heavily loaded application whereas natural fiber/polymer composites were suitable for the lightly loaded structure, unless the orientations of the fiber were taken into account.

Improvement of WPVC composites could also be carried out through coextrusion technique and additions of nanoparticles [14–17]. Jin and Matuana [14] found that the moisture uptake rate could be reduced together with an increase in flexural strength of WPVC composites by applying rigid PVC with a small amount of wood content as cap layer onto WPVC composite extrudate. Faruk and Matuana [15] investigated the effect of nanoclay addition into wood/HDPE to enhance the mechanical properties, and suggested that melt blending technique was the best approach for incorporating the nanoclay into the HDPE before adding the wood particles to form the final composites. The approach of melt blending technique was well applicable in the case of WPVC composites using carbon nanotube as reinforcing agent [16]. Matuana and Faruk [17] improved the mechanical properties of nanoclay-filled WPVC by using chitin as chemical coupling agent and found that the properties of the WPVC composites were very similar to solid wood.

Recent literature, apart from the aforementioned works [1–13], indicate that the articles on the property developments and structure-property relationships of WPC products have been extensively published, but effects on cross-section design and testing conditions (loading directions, span length, and rate of loading) on the mechanical properties for these types of composites are very rare and still open for discussion, most of the evidences are available for woods, metals, concretes, and synthetic fiber-reinforced composites [4–6, 18–21]. This work aimed to assess the flexural properties of WPVC composites produced by an industrial-scale twin-screw extruder through the effects of product cross-section design, span-to-depth ratio, loading direction, and rate of loading. The measurement of the flexural properties of WPVC composites using industrial-scale test-specimens would discriminate this work from other published works, which usually reported the mechanical properties of such composites with laboratory-scale specimens [2, 3, 8–12, 22–24]. In addition, the wood flour content used in this work was relatively high [25], enhancing the possibility of using wood flour as reinforcing and extending (cost reducing) fillers in PVC matrix. The ratio of the wood:PVC used for making the composite was 1:1. The effects of cross-

section design and testing conditions, which were referred to as testing direction, span length, and rate of loading, on flexural properties were then considered. The experimental results in this work will offer some preferred characteristics of the cross-section design for optimum flexural properties of the WPVC composites.

EXPERIMENTAL

Raw Materials

Suspension PVC powder was supplied by V.P. Wood Co., Ltd. (Bangkok, Thailand) in the form of powder and used trade name as SIAMVIC 266RB having a K value of 66. The PVC powder was dry-blended with various necessary additives to give PVC compound for further melt-blending with wood particles in making WPVC composites. The details and quantities of the additives were used as employed in previous works [8, 12] for making PVC compounds. Wood sawdust particles used had average size of 100–300 μm , supplied by V.P. Wood Co., Ltd. (Bangkok, Thailand). In this work, a very high content of wood particles in the PVC compounds was fixed at 100 parts per hundred (phr) of PVC powder, and the wood particles were chemically treated with 1.0 wt% N -2(aminoethyl)3-aminopropyl trimethoxysilane (KBM603, $M_w = 222.4$). The detailed experimental procedure on the KBM603 silane treatment was already given in our previous work [26].

Melt-Blending and Sample Preparation of WPVC Composites

An industrial-scale twin-screw extruder with counter-rotating screws was used for melt-blending PVC compound and wood particles, and also for producing the test specimens with five different cross-section configurations. The compounding and sample-production processes were started by drying the wood particles in an oven at a temperature of 80°C for 24 h until the weight of the wood particles was constant. Subsequently, the PVC compound was dry-blended with dried wood particles using a high-speed mixer for 2 min before being melt-blended in the twin-screw extruder (KMD-90-36, KraussMaffei Technologies GmbH, Germany). The screws used had the diameter and length of 90 and 3240 mm, respectively. The blending temperature profiles of the barrel from hopper to die zones were varied depending on the positions on the extruder length as shown in Fig. 1. The blending temperature set on the screw zones were 180°C for Zones 1 and 2, 170°C for Zone 3, 175°C for Zone 4, and 180°C for Zones 5 and 6. The screw rotating speed was 15 rpm. Dies with five cross-section configurations were used to produce WPVC extrudates (test samples), which were then solidified by passing through a cooling system and a size-control device for further mechanical characteriza-

F1

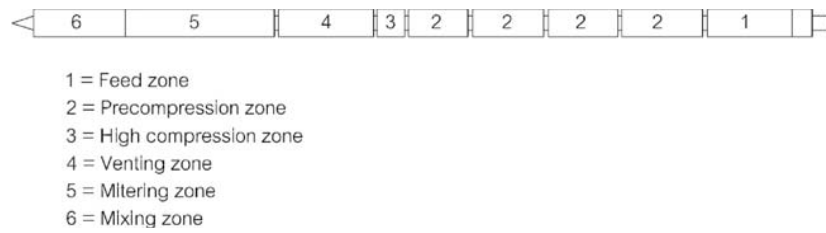


FIG. 1. Screw zones for temperature profile setting in the twin-screw extruder.

T1 tions. The sample codes, cross-section configurations, and dimensions are shown in Table 1.

CHARACTERIZATIONS

Flexural Properties

Effect of Cross-Section Design and Loading Direction. The flexural properties in terms of four-point bending test for WPVC composites with five different cross-sections were evaluated. The loading directions (edge-wise and flat-wise) and span length for each cross-section were also considered. The flexural properties of the WPVC composites were determined in accordance with ASTM-D198 (1998), focusing on modulus of elasticity (E) and modulus of rupture (S_R) in Eqs. 1 and 2, respectively. The dimensions of the test specimens were already given in Table 1. The rate of loading (R) used in this section (the effects of cross-section design and loading direction) were calculated using Eq. 3 in ASTM-D790 (1999). Figure 2 shows experimental arrangement for four-point bending tests for WPVC-1-test specimen in edge-wise and flat-wise directions. The experimental results reported in this work were averaged from at least five independent determinations.

F2

$$E = \frac{Pa}{12\Delta I} (3La - 4a^2) \quad (1)$$

$$S_R = \frac{Mc}{I} \quad (2)$$

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (3)$$

where P is the applied load (N), a is the distance from reaction to nearest load point (mm), L is the span length of composite beam (mm), I is the moment of inertia of the cross-section (mm^4), Δ is the deflection (mm), M is the maximum bending moment (N mm), c is the distance from neutral axis of beam to extreme outer fiber (mm), Z is the rate of straining of outer fiber (mm/mm/min), and d is the depth of composite beam (mm).

Effects of Span Length/Depth Ratio and Rate of Loading. In this section, a selected cross-section was used to determine the effects of the span length/depth (L/D) ra-

tio and rate of loading. The former one was carried out by varying the span/depth ratio of the selected composite specimen and the flexural properties were measured in accordance with ASTM-D198 (1998). For the effect of rate of loading (R), the span length was fixed and the rate of loading was independent of the specimen thickness. In this case, the rate of loading was varied from 10 to 250 mm/min for edge-wise loading and 5 to 65 mm/min for flat-wise loading.

Specific Density

The specific density of WPVC composite specimen was determined using a specific density tester (EW

TABLE 1. Specimen code, cross-section, and dimensions for WPVC composites used in this work.

Specimen code	Cross-section	Dimension (mm)
WPVC-1		35 × 103
WPVC-2		38 × 144
WPVC-3		20 × 90
WPVC-4		20 × 200
WPVC-5		20 × 250



FIG. 2. An experimental arrangement for four-point bending tests for WPVC-1-test specimen in edge-wise and flat-wise directions for WPVC composite. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at www.interscience.wiley.com.]

AQ4

120SG), supplied by Mirage trading Co., Ltd., Company (Bangkok, Thailand). The test procedure followed the ASTM D6111 (2003).

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of Cross-Section and Loading Direction

F3 Figure 3 shows load-displacement curves for WPVC composites using two cross-sections (WPVC-1 and WPVC-2) at edge-wise (Fig. 3a) and flat-wise (Fig. 3b) loading directions and their flexural properties are listed in Table 2. It can be seen that the load-displacement curves and their flexural properties of these two cross-sections were different and the results were also affected by the loading direction. Considering the effect of cross-section, it can be seen that the modulus of elasticity and modulus of rupture for WPVC-2 were greater than those for WPVC-1. The differences in modulus of elasticity measured at small

T2

AQ5

deformation between these two cross-sections ($\sim 23\%$) were more significant than those in modulus of rupture measured at large deformation ($\sim 10\%$). This suggested that the intrinsic properties of the WPVC were changed by the cross-section design. The reason for the greater moduli of WPVC-2 compared with those of WPVC-1 may be associated with greater web thickness in WPVC-2 sample when compared with those in WPVC-1. Similar behavior on the effect of core thickness on flexural modulus was also found with other materials such as aluminum-foam sandwich structures [27]. Moreover, the greater modulus for WPVC-2 member obtained in this work may also be associated with the overall size effect when compared with the WPVC-1. This view was also the case for construction materials such as wood particleboards, oriented-strand and fiber boards, and concretes [28, 29].

For the effect of loading direction, it was found that for a given cross-section, the specimens with edge-wise loading direction yielded higher modulus of elasticity and modulus of rupture than those with flat-wise loading

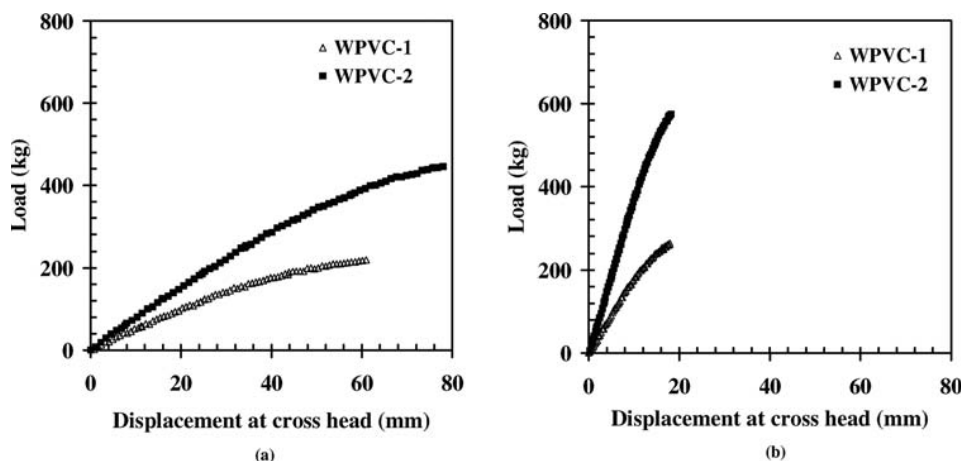


FIG. 3. Load-displacement curves for WPVC composites using WPVC-1 and WPVC-2: (a) Edge-wise direction and (b) flat-wise direction.

AQ6

TABLE 2. Flexural properties for WPVC composites using WPVC-1 and WPVC-2 in edge-wise and flat-wise directions.

Specimen code	Loading direction	Specimen span (mm)	Specimen inertia of X-axis (I_x) (mm^4)	Deflection at max. load $\times 10^{-2}$ (m)	Max. load (N)	Max. bending (N m)	Modulus of rupture (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
WPVC-1	Edge-wise	1654	1,549,889	5.72	2012	555	18.4 (1.49)	2255 (141)
WPVC-2		2314	4,845,114	7.31	4279	1650	24.5 (0.59)	3028 (32)
WPVC-1	Flat-wise	560	254,729	1.84	2594	242	16.6 (0.58)	1839 (23)
WPVC-2		618	491,492	1.83	5629	580	22.4 (0.41)	2460 (154)

The values in parentheses indicate standard deviation (SD).

direction. However, after taking statistical values into account, it was observed that the effect of loading direction on modulus of rupture was less pronounced than that on modulus of elasticity. Generally, the flexural properties of more homogeneous materials like metallic and concrete materials are unaffected by the loading directions because of their isotropic properties [30]. WPVC composites, in this case, were heterogeneous and anisotropic due to incompatibility between strongly hydrophilic cellulose fibers and hydrophobic polymers, leading to low-mechanical strength of the composites. Work by Sombatsompop and Chaochanchaikul [26], and Choudhury [1] suggested that introduction of chemical coupling agents could improve the dispersion of the wood fibers in polymer matrices, and therefore enhance the mechanical properties of the composites.

Load-displacement curves and flexural properties for WPVC composites for WPVC-3, WPVC-4, and WPVC-5 are shown in Fig. 4 and Table 3, respectively. It was observed that though the slenderness ratios for all specimens were the same, the modulus of elasticity and the modulus of rupture were different. WPVC-3 yielded the highest modulus of elasticity and the modulus of rupture, whereas the lowest values were given by WPVC-5. The differences in the flexural properties were thought to be affected by two main reasons, number of hollow cores and thickness of flanges and webs as previously mentioned [27]. Comparing WPVC-3 and WPVC-4 with WPVC-5, it was clearly seen that the number of hollow cores for WPVC-5 was greater together with thinner flanges and webs when compared with those for the other two cross-sections. With these reasons, it was likely that more difficult flow would have occurred when extruding the WPVC-5 extrudate. If this was the case, greater shearing stresses during the flow for WPVC-5 extrudate would be expected. As a result, the solidified WPVC-5 specimen would have lower resistances to flexural loading. These explanations could be substantiated by composite density

F4, T3

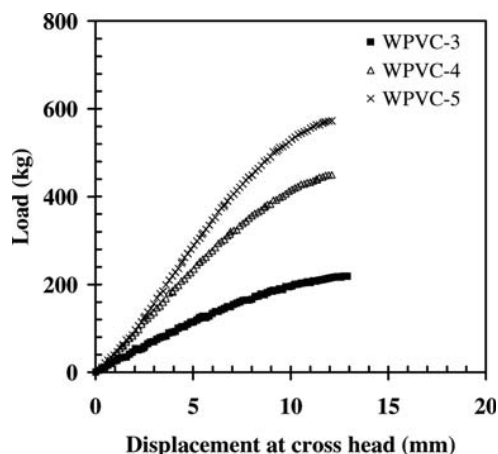


FIG. 4. Load-displacement curves for WPVC composites using WPVC-3, WPVC-4, and WPVC-5 in flat-wise loading direction.

TABLE 3. Flexural properties for WPVC composites using WPVC-3, WPVC-4, and WPVC-5 in flat-wise direction.

Specimen code	Loading direction	Specimen span (mm)	Specimen inertia of X-axis (I_x) (mm^4)	Deflection at max. load $\times 10^{-2}$ (m)	Max. load (N)	Max. bending (N m)	Modulus of rupture (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
WPVC-3	Flat-wise	320	53,917	1.24	2127	113	21.0 (0.37)	2097 (74)
WPVC-4		320	115,642	1.20	4387	234	20.2 (0.12)	1849 (28)
WPVC-5		320	145,260	1.19	5604	299	20.6 (0.31)	1425 (108)

The values in parentheses indicate standard deviation (SD).

T4 results as given in Table 4. It can be seen that the density for WPVC-5 appeared to be much lower than the other composite specimens. This was caused by the difficulty in flowing of the composite melt through the WPVC-5 die. It was also thought that the composite melt in WPVC-5 cross-section was fracturing at high-shear stress to form voids that resulted in low density and modulus. The results in Figs. 3 and 4, and Tables 2 and 3 suggested that different shear stresses in various parts of the WPVC specimen account for differences in properties of various WPVC specimens and differences of edge-wise and flat-wise directions.

Effect of Span Length and Rate of Loading

T5, T6 Considering the optimum flexural properties in Tables 2 and 3, WPVC-2 composite specimen was selected for studying the effect of span length. Tables 5 and 6 show the flexural properties of WPVC-2 member for different span/depth (L/D) ratios in edge-wise and flat-wise loading directions, respectively. For both loading directions, the flexural moduli were affected by the span length and appeared to increase with increasing L/D ratio, this finding being in line with Pang and Fancey [31]. The moduli for the edge-wise direction approached a steady state when the L/D ratio was about 10, whereas those for the flat-wise direction reached a plateau when the L/D ratio was 16. As WPVC composites in this case were heterogeneous and likely anisotropic, the different L/D ratios to reach the steady moduli at the edge-wise and flat-edge directions would be expected, this being also suggested by L/D effect in plywood and laminate lumbers [32]. ASTM-D790 (1999) has recommended that the L/D ratio for determination of flexural properties of reinforced plastics is 16, whereas ASTM-D198(2005a) has suggested the L/D ratio for testing lumbers is 11–15 for lumbers. It was interesting to note that our findings on minimum L/D ratios to be used were positioned in between these two ASTM testing standards, these being 10 for edge-wise direction and 16 for flat-wise direction. This was reasonable because the tested specimen used in this work was a mixture of plastic and wood. In summary, the minimum L/D ratio that should be used for WPVC composites,

regardless of loading direction, should be at least 16 for obtaining the steady flexural properties. Lower values may be used if the specimen was specifically tested in edge-wise loading direction.

The WPVC-2 composite member with L/D ratio of 16 was used for investigating the sensitivity of flexural properties of WPVC composites to the rate of loading through four-point bending test. Figure 5 shows load-displacement curves for WPVC-2 composite specimens in edge-wise and flat-wise directions under various rates of loadings. It can be seen that the rate of loading had a small effect for WPVC composite materials. However, the slope variations in load-displacement curves were observed, indicating that the flexural properties of the tested specimen increased with increasing rate of loading. This behavior was also found with steels, woods, and wood fasteners [33–35].

In summary, the experimental results from this work could be beneficial for scientists and engineers in WPC industries to realize that the stiffness of the WPVC composites was varied by the design of product cross-sections. The experimental results obtained in this work recommended that the WPVC cross-section with low number of hollow cores with thick flanges and webs should be used to obtain the optimum flexural strength. Besides, higher compactness of the composites, referred to as bulk composite density tended to give better flexural strength. As the formulation of the WPVC composites used for manufacturing all WPVC cross-sections and the processing parameters on the screw extruder used were not adjusted, but clearly indicated by being referred to our previous works [8, 12], the changes in the experimental results obtained were truly affected by the design of the cross-

TABLE 4. Bulk density results for WPVC composite beams.

Specimen code	Density (g/cm^3)
WPVC-1	1.39 (0.010)
WPVC-2	1.38 (0.010)
WPVC-3	1.33 (0.020)
WPVC-4	1.30 (0.030)
WPVC-5	1.14 (0.030)

The values in parentheses indicate standard deviation (SD).

TABLE 5. Flexural properties of WPVC-2 composite specimen for different span/depth (L/D) ratios in edge-wise loading direction.

Sample code	L/D ratio	Span length (mm)	Deflection at max. load $\times 10^{-2}$ (m)	Max. load (N)	Max. bending (N m)	Modulus of rupture (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
WPVC-2: L1	2.2	320	1.71	21,900	1168	17.4 (0.45)	344 (15)
WPVC-2: L2	4.3	618	1.26	17,747	1828	27.2 (0.63)	1539 (1)
WPVC-2: L3	10.1	1450	3.00	7462	1804	26.8 (0.03)	2920 (4)
WPVC-2: L4	11.5	1654	3.87	6284	1732	25.7 (1.09)	2888 (38)
WPVC-2: L5	16.1	2314	7.62	4153	1602	23.8 (0.64)	2823 (00)

The values in parentheses indicate standard deviation (SD).

TABLE 6. Flexural properties of WPVC-2 composite specimen for different span/depth (L/D) ratios in flat-wise loading direction.

Sample code	L/D ratio	Span length (mm)	Deflection at max. load $\times 10^{-2}$ (m)	Max. load (N)	Max. bending (N m)	Modulus of rupture (Mpa)	Modulus of elasticity (MPa)
WPVC-2: L1	8.4	320	0.75	9727	519	20.0 (0.41)	1036 (22)
WPVC-2: L2	16.3	618	1.86	6295	649	25.1 (0.79)	2974 (7)
WPVC-2: L3	38.2	1450	8.57	2078	502	19.4 (0.38)	2983 (5)
WPVC-2: L4	43.5	1654	11.12	1938	534	20.6 (0.16)	3195 (6)
WPVC-2: L5	60.9	2314	N/A	N/A	N/A	N/A	3106 (281)

The values in parentheses indicate standard deviation (SD). N/A, not applicable.

sections used. Therefore, any extrusion plants could use the experimental data, even though they may have different PVC compound formulations and processing parameter settings, for obtaining a most suitable cross-section of their WPVC products with optimum flexural properties. Moreover, this work measured the flexural properties of WPVC composites using industrial-scale test-specimens and this would discriminate the findings in this work from other existing works, which usually determined the mechanical properties of WPCs with laboratory-scale specimens. In addition, using industrial-scale test-specimens could also minimize a scaling-up problem when requiring to utilize the data for industrial productions of WPVC composites by other extrusion plants.

CONCLUSION

In this work, the flexural properties of WPVC composites in an industrial-scale specimen form, which were manufactured using dies with different cross-section designs were investigated in terms of loading direction and span length. The experimental results suggested that the flexural properties were greatly affected by cross-section design due to a change in the intrinsic properties of the WPVC during processing. The WPVC composites with edge-wise loading direction seemed to give higher flexural properties than those with the flat-wise direction. The number of hollow cores, thickness of flanges, and webs and composite density of the WPVC composites

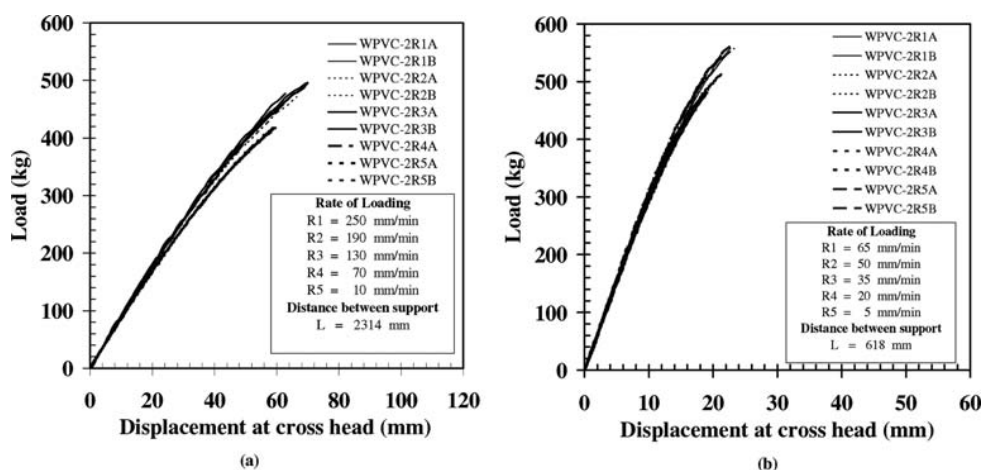


FIG. 5. Effect of rate of loading on load-displacement curves for WPVC-2 composite specimen: (a) Edge-wise direction and (b) flat-wise direction.

played important roles in changes in the flexural properties when considering different designs of composite cross-sections. The L/D ratio for the WPVC composites was dependent on the loading direction, and the minimum L/D ratios found in this work were 10 for edge-wise direction and 16 for flat-wise direction. The flexural properties were slightly affected by the rate of loading.

REFERENCES

1. A. Choudhury, *Mater. Sci. Eng. A.*, **491**, 492 (2008).
2. S.M. Sapuan, A. Leenie, M. Harimi, and Y.K. Beng, *Mater. Des.*, **27**, 689 (2006).
3. Y.-F. Shih, *Mater. Sci. Eng. A.*, **445**, 289 (2007).
4. D. García, J. López, R. Balart, R.A. Ruseckaite, and P.M. Stefani, *Mater. Des.*, **28**, 2234 (2007).
5. F. Taheri, M. Nagaraj, and P. Khosravi, *Compos. Struct.*, **88**, 481 (2009).
6. T. Triantafillou, *ASCE J. Mater. Civil Eng.*, **9**, 65 (1997).
7. P. Alam, M.P. Ansell, and D. Smedley, *Compos. B.*, **40**, 95 (2009).
8. S. Tungjitpornkull, K. Chaochanchaikul, and N. Sombatsompop, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **20**, 535 (2007).
9. G.M. Rizvi and H. Semeralul, *J. Vinyl Addit. Technol.*, **14**, 39 (2008).
10. H. Jiang, D.P. Kamdem, B. Bezubic, and P. Ruede, *J. Vinyl Addit. Technol.*, **9**, 138 (2003).
11. W. Liu, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, and M. Misra, *Compos. B.*, **38**, 352 (2007).
12. S. Tungjitpornkull and N. Sombatsompop, *J. Mater. Process. Technol.*, **209**, 3079 (2009).
13. N.S. Ermolaeva, K.G. Kaveline, and J.L. Spoormaker, *Mater. Des.*, **23**, 459 (2002).
14. S. Jin and L.M. Matuana, *J. Vinyl Addit. Technol.*, **14**, 197 (2008).
15. O. Faruk and L.M. Matuana, *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 2073 (2008).
16. O. Faruk and L.M. Matuana, *J. Vinyl Addit. Technol.*, **14**, 60 (2008).
17. L.M. Matuana and O. Faruk, *SPE ANTEC Tech. Pap.*, **65**, 1248 (2007).
18. M.A. Ferreira, *Am. J. Orthod. Dentofac.*, **115**, 275 (1999).
19. P. Soroushian, J. Sim, and J.W. Hsu, *ACI Struct. J.*, **88**, 17 (1991).
20. N. Anwar and M. Qaasim, *Key Eng. Mater.*, **400**, 269 (2009).
21. P. Alander, L.V.J. Lassil, and P.K. Vallittu, *Dent. Mater.*, **21**, 347 (2005).
22. P.-Y. Kuo, S.-Y. Wang, J.-H. Chen, H.-C. Hsueh, and M.-J. Tsai, *Mater. Des.*, **30**, 3489 (2009).
23. N. Rocha, A. Kazlauciunas, M.H. Gil, P.M. Gonçalves, and J.T. Guthrie, *Compos. A.*, **40**, 653 (2009).
24. H. Djidjelli, J. Martinez-Vega, J. Farenc, and D. Benachour, *Macromol. Mater. Eng.*, **287**, 611 (2002).
25. J.M. Pilarski and L.M. Matuana, *J. Vinyl Addit. Technol.*, **11**, 1 (2005).
26. N. Sombatsompop and K. Chaochanchaikul, *J. Appl. Polym. Sci.*, **96**, 213 (2004).
27. M. Styles, P. Compson, and S. Kalyanasundaram, *Compos. Struct.*, **80**, 513 (2007).
28. M. Fan, P. Bonfield, J. Dinwoodie, and V. Enjily, *J. Eng. Mech., ASCE*, **132**, 815 (2006).
29. S. Saddik, *J. Mater. Civil Eng.*, **9**, 46 (1997).
30. A.P. Boresi and R.J. Schmidt, *Advanced Mechanic of Materials*, 6th ed., Wiley, New York (2002).
31. J.W.C. Pang and K.S. Fancey, *Compos. A.*, **40**, 784 (2009).
32. E.J. Biblis, *Forest Prod. J.*, **51**, 81 (2001).
33. H. Sugiyama, *Wood Sci. Technol.*, **1**, 289 (1967).
34. M. Bursak and I. Mamuzic, *Metallurgija*, **45**, 57 (2006).
35. D.V. Rosowsky and T.A. Reinhold, *J. Struct. Eng., ASCE*, **125**, 719 (1999).

AQ1: Please confirm that all author names are OK and are set with first name first, surname last.

AQ2: Please note that the "superscript Arabic numeral 1" linked with the first author has been deleted.

AQ3: Kindly check whether the affiliations are OK as typeset.

AQ4: Please confirm whether the color figures should be reproduced in color or black and white in the print version. If the color figures must be reproduced in color in the print version, please fill the color charge form immediately and return to Production Editor. Or else, the color figures for your article will appear in color in the online version only.

AQ5: Please note that "2a" and "2b" given in the sentence "Figure 3 shows load.....Table 2" have been changed as "Fig. 3a" and "Fig. 3b," respectively. Kindly check whether it is appropriate.

AQ6: Kindly check whether Tables 2–6 are OK as typeset.

AQ7: Please note that decimal values have been given for ratios in the second column of Tables 5 and 6. Kindly check whether it is OK.

AQ8: Kindly confirm whether the grant information is OK as typeset.



เอกสารแนบ 2

- ผลงานวิจัย Sombatsompop N, Taptim K, Chaochanchaikul K, Thongpin C & Rosarpitak V (2008) - Improvement of Structural and Thermal Stabilities of PVC and Wood/PVC Composites by Pb and Zn Stearates, and Zeolite, *Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry*, (ตีพิมพ์แล้ว) (JIF = 0.720) Vol.45, No.7, pp.534-541