การพัฒนาและการประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติเชิงอุตสาหกรรม

ชาตรี หอมเขียว*

บทคัดย่อ

วัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่กำลังเติบโตเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ ก่อสร้าง และเรือ เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีข้อดีคือ ความหนาแน่นต่ำ ความทนทานและต้านทานต่อความชื้นและการบุกรุกจากเชื้อราที่ดี มีความสามารถในการหลอมและนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ (Recycle-ability) อย่างไรก็ตามในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ผู้ผลิต วิศวกร และนักวิจัยจำเป็นต้องมีองค์ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ การปรับปรุงสมบัติเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ และกรรมวิธีการผลิตที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ดังนั้นบทความฉบับนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติ วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสม การปรับปรุงสมบัติทางกล และกรรมวิธีการผลิตวัสดุเชิงประกอบ ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

คำสำคัญ : วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้, เส้นใยธรรมชาติ, เทอร์โมพลาสติก

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ติดต่อ, อีเมล์: chatree.h@rmutsv.ac.th รับเมื่อ 17 มิถุนายน 2557 ตอบรับเมื่อ 13 สิงหาคม 2557

Development and Applications of Natural Fiber/Thermoplastic Composites for Industrial

Chatree Homkhiew*

Abstract

Natural fiber/thermoplastic composites are one of the most materials which is considerably growing in many area of applications, including automotive industries, construction and marine; this is because of a variety of advantages, for examples, light weight (low density), high durability and resistances for humidity and fungal attacks, and the ability for recycling. Regarding the manufacturing for wood-plastic composites (WPCs) products, basic knowledge according to materials formulation, improving method for the desirable properties and processing technique for WPCs are need, especially for manufacturers, engineers and researchers. Therefore, in the current article, the overview for the developments of material formulations, way to improve the mechanical properties and production methods for natural fiber/thermoplastic composites as well as their applications in many areas were reviewed and presented.

Keywords : Wood-plastic composites, Natural fiber, Thermoplastic

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya.

* Corresponding author, E-mail: chatree.h@rmutsv.ac.th Received 17 June 2014, Accepted 13 August 2014

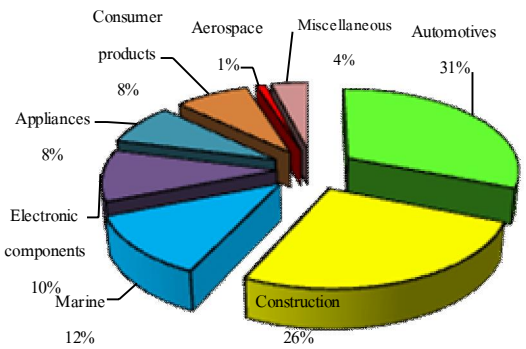
1. บทนำ

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมากลุ่มกรีนพีช (Greenpeace) และเอ็นจีโอ (Non-governmental organizations, NGOs) ในหลายๆ ประเทศรวมทั้งประเทศไทยมีการกล่าวถึงผลกระทบของวัสดุทางเคมีว่าเป็นปัญหาต่อโลกเพิ่มมากขึ้น [1] ส่งผลให้รัฐบาลในหลายๆ ประเทศตระหนักถึงผลกระทบของวัสดุทางเคมีและพยายามลดการใช้วัสดุทางเคมี พลาสติกนับว่าเป็นวัสดุทางเคมีประเภทหนึ่ง การใช้พลาสติกซ้ำ (Reuse) การรีไซเคิลพลาสติก (Recycle) และการลดปริมาณการใช้พลาสติก (Reduce) เป็นหลัก 3R ที่ใช้เพื่อลดผลกระทบของวัสดุพลาสติกที่มีต่อโลกตลอดจนภาวะโลกร้อน (Global warming) ปัจจุบันการนำเส้นใยธรรมชาติที่อยู่ในรูปของผง เส้นใย และขี้เลื่อยมาเติมในพลาสติกเพื่อผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-plastic composites, WPCs) ถือได้ว่าเป็นการลดปริมาณการใช้พลาสติกวิธีการหนึ่ง และเป็นการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกให้มีความแข็งแรงและแข็งแกร่งมากขึ้น เช่นเดียวกันการนำเส้นใยธรรมชาติในรูปต่างๆ มาเติมในพลาสติกไม่เพียงแต่เป็นการลดปริมาณการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติที่ใช้สังเคราะห์เป็นพลาสติกแต่ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุเหลือใช้และใช้ประโยชน์เส้นใยธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ผู้ผลิตและวิศวกรในอุตสาหกรรมพลาสติกกำลังให้ความสนใจในการนำมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและเพิ่มสมบัติทางกล ทางกายภาพและทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นบทความฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการพัฒนาของวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติ วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสม การปรับปรุงสมบัติทางกล และกรรมวิธีการผลิตวัสดุเชิงประกอบ เพื่อเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ตลอดจนนักวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

2. วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่กำลังเติบโตเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ ก่อสร้าง เรือ อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค และการบินและอวกาศ (รูปที่ 1) ซึ่งวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้สามารถผลิตได้โดยการนำเส้นใยหรือผงไม้จากธรรมชาติผสมกับพลาสติกและสารเติมแต่งต่างๆ เช่น สารเพิ่มการยึดเกาะ สารต้านทานรังสียูวี สารหล่อลื่น และผงสี เป็นต้น จากนั้นทำการขึ้นรูป ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้สามารถกระทำได้หลากหลายวิธีแต่กรรมวิธีที่นิยมใช้คือ การอัดรีด (Extrusion) การอัดร้อน (Hot press) และการฉีดเข้าเบ้า (Injection molding) [2]



รูปที่ 1 สัดส่วนการประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ในปี ค.ศ. 2002 [1]

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1916 โดยบริษัทโรลส์รอยซ์ (Rolls royce) ซึ่งทำการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์คันโยกเกียร์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1970s วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีการเกิดขึ้นใหม่อีกครั้งในรูปแบบที่ทันสมัยขึ้นในประเทศอิตาลี จากนั้นในปี ค.ศ. 1983 ในประเทศสหรัฐอเมริกาบริษัทอเมริกันวู๊ดสต็อก (American woodstock) ได้ทำการอัดรีดวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพีลีนกับผงไม้โดยใช้ผงไม้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อผลิตเป็นอุปกรณ์ตกแต่งในอุตสาหกรรมรถยนต์ และวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ยังเป็นที่นิยมกันมากในอเมริกาเหนือในปี ค.ศ. 1990s ต่อจากนั้นในตอนต้นของศตวรรษที่ 21 เทคโนโลยีวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีการแพร่กระจายเข้าสู่ประเทศอินเดีย สิงคโปร์ มาเลเซีย ญี่ปุ่น และจีน [3-4] เช่นเดียวกันในปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตและประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะการใช้งานในพื้นที่ใกล้ทะเล นอกจากนี้ในปัจจุบันวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีการนำมาประยุกต์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น โครงสร้างเรือ แผ่นเรียบ รั้ว หน้าต่าง ประตู เฟอร์นิเจอร์ในสวน ชิ้นส่วนไม้กอล์ฟ ด้ามมีด และชิ้นส่วนรถยนต์ [5-7] ดังรูปที่ 2 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เป็นชิ้นส่วนในรถยนต์ เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับไม้จากธรรมชาติ เช่น ต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ ความทนทานและต้านทานเชื้อราสูง ความเสถียรทางด้านรูปร่างสูง ดูดซับน้ำน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถนำมารีไซเคิลได้เช่นเดียวกับวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกทั่วไป [4, 8-9]

รูปที่ 2 วัสดุเชิงประกอบเส้นใยปอ ป่าน และป่านศรนารายณ์ ถูกใช้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ MercedesBenz รุ่น E-Class [38, 19]

สำหรับปริมาณการผลิตของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ในยุโรปพบว่ามีประมาณ 99,288 ตันในปี ค.ศ. 2005 และเพิ่มขึ้นเป็น 145,000 ตันในปี ค.ศ. 2009 ซึ่งมีมูลค่าถึง 290 ล้านยูโร โดยส่วนใหญ่ผลิตจากพลาสติกพอลิโพรพีลีนแบบบริสุทธิ์และพอลิไวนิลคลอไรด์ (ประมาณ 4-5 อุตสาหกรรม) [10] เช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบปริมาณส่วนแบ่งทางการตลาดของแผ่นเรียบ (Decking) ที่ผลิตจากไม้ธรรมชาติ พลาสติก และวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ดังแสดงในตารางที่ 1 [11] พบว่าส่วนแบ่งทางการตลาดของแผ่นเรียบที่ผลิตจากไม้ธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน สิ่งนี้เป็นเพราะว่าไม้ธรรมชาติมีปริมาณลดลงและราคาสูงขึ้นตลอดจนในปัจจุบันมีการตระหนักถึงการอนุรักษ์ธรรมชาติเพิ่มขึ้นเพื่อต้องการลดภาวะโลกร้อน ทำให้เกิดการวิจัยเพื่อหาวัสดุทดแทนการใช้ไม้จากธรรมชาติ และวัสดุเหล่านั้นคือ พลาสติกและวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ อย่างไรก็ตามพลาสติกยังไม่เป็นที่นิยมมากนักเพราะจากข้อมูลพบว่ามีแนวโน้มการนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับในอดีต สิ่งนี้เป็นเพราะว่าพลาสติกมีความเสถียรทางความร้อนต่ำและ

วัตถุดิบมีราคาแพง แต่จากข้อมูลพบว่าวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีแนวโน้มส่วนแบ่งทางการตลาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีข้อดีหลายประการดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น จากข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้จะเข้ามามีบทบาทและมีการประยุกต์ใช้งานทดแทนไม้จากธรรมชาติในอนาคต

ตารางที่ 1 ส่วนแบ่งทางการตลาดของแผ่นเรียบ (Decking) ในแต่ละวัสดุ [11]

Year	Market ($ billions)	Share of (%)		
		Wood	Plastic	WPCs
1992	2.3	97	1	2
2002	3.4	91	2	7
2005	5.1	77	4	19
2006	5.5	73	5	22
2011	6.5	66	4	30

3. เมทริกซ์พลาสติก

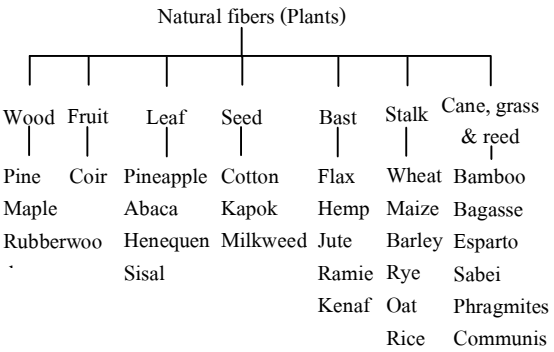
พลาสติกที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกบริสุทธิ์เช่น พอลิโพรพีลีน (Polypropylene, PP) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความแข็งแรงและความแข็งแกร่ง รวมถึงมีความต้านทานความร้อนสูง พอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูง (High-density polyethylene, HDPE) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวและมีความสามารถในการยืดตัวสูง แต่มีความแข็งแรงและทนทานต่อสารเคมีที่ดี พอลิเอทีลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-density polyethylene, LDPE) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทั้งความทนแรงกระแทก ความยืดหยุ่น และความเหนียวที่สูง และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) เป็นพอลิเมอร์ที่แข็งแรง และทนทานต่อการเสียดสี Kociszewski และคณะ [12] ได้ศึกษาผลกระทบของขนาดผงไม้ที่มีต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์และผงไม้เนื้ออ่อน พบว่า สมบัติความทนแรงดัด ความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทกมีค่าลดลงตามปริมาณผงไม้ Petchwattana และคณะ [13] ได้ประเมินผลกระทบของปริมาณแกลบ (Rice hull) ต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูง คณะวิจัยพบว่าสมบัติความทนแรงดัดและความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณการผสมแกลบ อย่างไรก็ตามการเติมแกลบส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความเปราะและมีสมบัติความทนแรงกระแทกลดลง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันการศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่ใช้พลาสติกรีไซเคิลเป็นส่วนผสมยังมีอยู่เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพลาสติกบริสุทธิ์ [2] และจากการวิจัยพบว่าสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพลาสติกพอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิล และพอลิโพรพีลีนรีไซเคิลใกล้เคียงหรือบางสมบัติดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพลาสติกบริสุทธิ์ [2, 14] เช่นเดียวกัน Panthapulakkal และคณะ [15] พบว่าสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูงรีไซเคิลจากขวดนมมีความใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนผสมของพลาสติกบริสุทธิ์

ในปัจจุบันการผลิตและการใช้พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากยกตัวอย่างในปี ค.ศ. 2008 อย่างน้อย 33.6 ล้านตันของพลาสติกถูกผลิตเพื่อบริโภคในประเทศสหรัฐอเมริกา และประมาณ 85.8 เปอร์เซ็นต์ถูกกำจัดโดยการนำไปทิ้งในพื้นที่กำจัดขยะ (Landfills)

ประมาณ 7.7 เปอร์เซ็นต์ ถูกกำจัดโดยการนำไปเผาให้เกิดเป็นพลังงาน และประมาณ 6.5 เปอร์เซ็นต์ ถูกนำมารีไซเคิล จะเห็นได้ว่าสัดส่วนการรีไซเคิลพลาสติกมีปริมาณน้อยมาก [16] ดังนั้นในอนาคตหากมีการนำพลาสติกรีไซเคิลมาผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นจะไม่เพียงแต่เป็นการลดการบริโภคพลังงานและทรัพยากรทางธรรมชาติแต่ยังเป็นวิธีการกำจัดขยะพลาสติกที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย [17] Nourbakhsh และคณะ [18] ได้แสดงความเห็นว่าขยะพลาสติกคือ วัตถุดิบที่เป็นมิตรสำหรับการผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ราคาถูก ดังนั้นการใช้พลาสติกรีไซเคิลเพื่อผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เป็นการกำจัดขยะพลาสติกที่มีประสิทธิภาพและช่วยลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์

4. เส้นใยธรรมชาติจากพืช

เทคโนโลยีการนำเส้นใยธรรมชาติเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์เกิดขึ้นเป็นระยะเวลากว่า 3,000 ปีแล้ว [19] ซึ่งเส้นใยธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ เส้นใยจากสัตว์ซึ่งประกอบไปด้วยโปรตีน (Proteins) และเส้นใยจากพืชซึ่งประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose) [1] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเส้นใยจากพืชกำลังเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เสริมแรงให้กับพลาสติก [20] เนื่องจากมีข้อดีหลายประการคือ ความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก สามารถรีไซเคิลได้ (สามารถใช้ซ้ำได้) ไม่กัดกร่อนเครื่องจักร (ไม่ส่งผลให้เครื่องจักรเกิดการสึกหรอ) และบริโภคพลังงานต่ำในการขึ้นรูป เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์เช่น เส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน [21] เส้นใยจากพืชมาจากเนื้อไม้ (Wood) ผล (Fruit) ใบ (Leaf) เมล็ด (Seed) เยื่อ (Bast) ก้าน (Stalk) และหญ้าหรือกก (Cane, grass & reed) [20] ดังแสดงในรูปที่ 3 และพืชที่นิยมนำมาใช้เสริมแรงให้กับพลาสติกคือ ไม้สน (Pine) ไม้เมเปิล (Maple) ไม้ไผ่ (Bamboo) ไม้ยางพารา (Rubberwood) ปอกระเจา (Jute) ใบสับปะรด (Pineapple) เป็นต้น ซึ่งจะอยู่ในรูปของขี้เลื่อย (Sawdust) ผง (Flour) และเส้นใย (Fiber)



รูปที่ 3 ประเภทของเส้นใยธรรมชาติจากพืช [20]

ชนิดของเส้นใยธรรมชาติถือได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ เนื่องจากสายพันธุ์ของเส้นใยแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบทางเคมี โครงสร้าง ผิว และรูพรุนภายในที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้สายพันธุ์ของเส้นใยเพื่อเป็นวัสดุเสริมแรงต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะของเส้นใย ความแข็งแรง โครงสร้าง และส่วนประกอบทางเคมี [22] งานวิจัยของ Bouafif และคณะ [22] พบว่าวัสดุเชิงประกอบผลิตจากแกนกลางของไม้มีการดูดซับน้ำน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตจากเปลือกไม้ และการดูดซับน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใย เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนผลของการเพิ่มปริมาณ

เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบสามารถปรับปรุงสมบัติด้านความแข็ง และความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบ แต่สมบัติการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดต่ำลง [23] งานวิจัยของ Slaughter [9] พบว่า สมบัติความต้านทานแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตจากไม้เมเปิลมีค่าสูงกว่าที่ผลิตจากไม้สน เนื่องจากสายพันธุ์ของไม้ที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อการประสานยึดเกาะในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ เช่นเดียวกันสายพันธุ์ของเส้นใยแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบทางเคมีเช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เพราะหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) ของลิกนินคือตัวประสานกับไฮโดรเจนอะตอม ณ ตำแหน่งแอลฟราเมทริกซ์พลาสติก [24] และเส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงสูงขึ้นและมีอิทธิพลหลักต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ [25] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบบทบาทของแต่ละส่วนประกอบทางเคมีเป็นพลาสติกเสริมแรงสามารถเทียบเซลลูโลสได้เป็นเส้นใยธรรมชาติ เฮมิเซลลูโลสเทียบได้เป็นเมทริกซ์พลาสติก และลิกนินเทียบได้เป็นสารคู่ควบ (Coupling agent) [26]

นอกจากนี้ขนาดของเส้นใยหรืออนุภาคของผงไม้คืออีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ เช่น การดูดซับน้ำและการบวมของวัสดุเชิงประกอบสามารถปรับปรุงได้ด้วยการใช้ผงไม้ที่มีขนาดเล็ก [27] งานวิจัยของ Kuo และคณะ [14] พบว่าสมบัติความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของผงไม้ลดลงและขนาดของผงไม้ที่เล็กกว่า 80 เมช (<180 ไมโครเมตร) ถูกแนะนำสำหรับใช้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ เช่นเดียวกันขนาดอนุภาคของผงไม้ประมาณ 210 ไมโครเมตร ทำให้การประสานยึดเกาะของวัสดุเชิงประกอบง่ายขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบสูงขึ้นและการดูดซับน้ำลดลง [28] นอกจากนี้งานวิจัยของ Bengtsson และคณะ [23] พบว่า การนำเส้นใยไม้ (Wood fiber) เสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกมีการใช้น้อยกว่าการใช้ผงไม้ (Wood flour) เนื่องจากผลของความยาวเส้นใยจะส่งผลต่อความสามารถในกระบวนการขึ้นรูป อีกทั้งเส้นใยไม้ยังมีราคาที่แพงกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุเสริมแรงแบบผงไม้

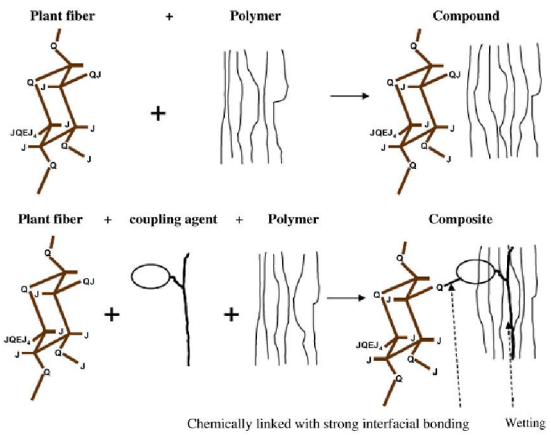
ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ [20]

Fiber	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (wt.%)
Coir	32-43	0.15-0.25	40-45
Cotton	85-90	5.7	-
Flax	71	18.6-20.6	2.2
Hemp	70-74	17.9-22.4	3.7-5.7
Henequen	77.6	4-8	13.1
Jute	61-71.5	13.6-20.4	12-13
Kenaf	45-57	21.5	8-13
Ramie	68.6-76.2	13.1-16.7	0.6-0.7
Rubberwood	39	29	28%
Sisal	66-78	10-14	10-14

5. การปรับปรุงสมบัติวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

เส้นใยธรรมชาติมีข้อเสียอย่างหนึ่งคือ การยึดเกาะที่ไม่ดีกับเมทริกซ์พลาสติกส่งผลให้การกระจายตัวของ

เส้นใยในเมทริกซ์พลาสติกไม่เป็นเนื้อเดียวกันและสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีค่าต่ำ [1] Ashori [1] กล่าวว่าพลาสติกและไม้เปรียบเสมือนน้ำกับน้ำมันซึ่งไม่สามารถผสมกันได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการยึดเกาะและความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์พลาสติกส่วนใหญ่ถูกปรับปรุงโดยวิธีการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยและวิธีการปรับปรุงเมทริกซ์พลาสติก [29] ในปัจจุบันงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยโดยใช้สารเคมีมีอยู่เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการปรับปรุงเมทริกซ์พลาสติก เช่น Ichazo และคณะ [30] ปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยด้วย Sodium hydroxide และ Vinil-tris-(2-metoxietoxi)-silane และพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ถูกปรับปรุงผิวด้วยสารเคมีทั้ง 2 ชนิดนี้มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงและมอดูลัสการดึง และ Gwon และคณะ [31] กล่าวว่าการปรับปรุงผิวของเส้นใยโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้เกิดการลดลงของสิ่งเจือปนทางธรรมชาติเช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตลอดจนลดช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พลาสติก เช่นเดียวกันวิธีการปรับปรุงเมทริกซ์พลาสติกนิยมนำสารคู่ควบ (Coupling agent) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งกลไกการทำงานของสารคู่ควบระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์พลาสติกถูกแสดงในรูปที่ 4 และสารคู่ควบที่นิยมนำมาใช้คือ Maleic anhydride-grafted polypropylene; MAPP, Maleic anhydride-grafted polyethylene; MAPE, Maleic anhydride-grafted polystyrene; MAPS และ Polyethylenimine; PEI ยกตัวอย่าง Kuo และคณะ [14] กล่าวว่าการเติม MAPP สามารถปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยไม้และเมทริกซ์พลาสติก ซึ่งทำให้สมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น การเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลดีที่สุดเมื่อใช้ MAPP ประมาณ 3.0-4.5 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบสามารถปรับปรุงโดยการเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์หรือการเติมสารคู่ควบ [27] Chow และ Ooi [32] กล่าวว่าสมบัติความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม MAPS ในวัสดุเชิงประกอบแต่มอดูลัสการดัดมีค่าลดลง และ Bengtsson และคณะ [23] กล่าวว่าการเติม MAPP สามารถเพิ่มค่ามอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบและลดค่าการยืด ณ จุดขาด เพราะการเติม MAPP สามารถปรับปรุงการกระจายตัวของเส้นใยเซลลูโลสในเมทริกซ์ของพอลิโพรพีลีน ซึ่งทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยและพอลิโพรพีลีนดีขึ้น เช่นเดียวกันการใช้สารคู่ควบมีผลกระทบต่ออุณหภูมิการเสื่อมสลายของเส้นใย ซึ่งการเติม MAPP ในวัสดุเชิงประกอบส่งผลให้อุณหภูมิการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้น [33]



รูปที่ 4 กลไกการทำงานของสารคู่ควบ (Coupling agent) ระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์พลาสติก [1, 40]

สารคู่ควบที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ในแต่ละเกรดหรือยี่ห้อจะส่งผลต่อสมรรถนะของวัสดุเชิงประกอบที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้สารคู่ควบจึงต้องพิจารณา

ถึงน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของระดับการยึดติดของมาเลอิกซ์บนโมเลกุล (Maleic grafted content) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพในการใช้งาน สารคู่ควบบางชนิดจะส่งผลกระทบต่อส่วนผสมอื่นๆ เช่น Flow agent element ซึ่งสารนี้สามารถปรับปรุงคุณลักษณะการไหลของวัสดุเชิงประกอบ แต่ทำให้สมรรถนะของความแข็งแรงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พลาสติกต่ำลง [34]

6. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติ

การผลิตผลิตภัณฑ์จากวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติโดยปกติจะประกอบด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอนคือ 1. กระบวนการผสมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติกับสารคู่ควบหรือสารอื่นๆ เช่น สารต้านทานรังสียูวี สารเพิ่มความเสถียรภาพทางความร้อน ผงสี และสารต้านทานการติดไฟ และ 2. กระบวนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์โดยวิธีการต่างๆ เช่น การอัดรีด การฉีดเข้าเบ้าและการอัดร้อน

กระบวนการอัดรีด เป็นกระบวนการที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานให้มีความยาวต่อเนื่อง และรูปร่างชิ้นงานจะมีลักษณะที่เหมือนกับรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของดาย (Die) ตลอดทั้งชิ้นงาน ในกระบวนการอัดรีดพลาสติกจะถูกส่งเข้าไปให้ความร้อน จากนั้นพลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกบังคับให้ออกทางท่อเปิดหรือดายตามรูปร่างที่ต้องการด้วยสกรูหมุน พลาสติกที่ถูกรีดออกมาจะถูกทำให้เย็นต่ำกว่าจุดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นคล้ายยาง (Glass transition temperature, Tg) โดยใช้ระบบลมเป่าหรือระบบน้ำเย็นหล่อ [35]

กระบวนการฉีดเข้าเบ้า เป็นวิธีการที่ใช้ผลิตเทอร์โมพลาสติกหรือวัสดุเชิงประกอบให้มีรูปร่างสำเร็จรูปตามที่ต้องการโดยใช้เบ้าหรือแม่พิมพ์เป็นตัวบังคับรูปร่าง ในกระบวนการฉีดเข้าเบ้าเม็ดพลาสติกจะถูกส่งลงมาจากเบ้ารับเม็ดพลาสติก (Hopper) เพื่อส่งต่อไปยังกระบอกฉีดที่มีสกรูอยู่ จากนั้นเม็ดพลาสติกจะถูกทำให้หลอมเหลว โดยการหมุนของสกรูและแถบให้ความร้อน (Heater band) ที่ติดไว้ที่ผนังกระบอกหลอมเหลว (Barrel) เมื่อพลาสติกเหลวที่ปลายสกรูมีมากพอจะทำการหยุดหมุนสกรู จากนั้นสกรูจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ขับดันพลาสติกหลอมเหลวผ่านหัวฉีด (Nozzle) ผ่านเข้าสู่เบ้าหล่อ (Cavity) ของแม่พิมพ์ โดยมีการรักษาระดับแรงดันให้คงที่จนกระทั่งชิ้นงานแข็งตัว จากนั้นสกรูจะทำการหมุนเพื่อหลอมพลาสติกอีกครั้งหนึ่ง โดยจะเคลื่อนตัวถอยหลังกลับมาและเข้าสู่กระบวนการเดิมคือการสะสมเนื้อพลาสติกหลอมเหลวหน้าสกรูก่อนที่จะทำการฉีดเข้าสู่เบ้าพิมพ์ เบ้าที่ใช้ขึ้นรูปจะมีน้ำเย็นเข้าไปหล่อ เพื่อให้พลาสติกแข็งตัวเร็ว ขั้นตอนสุดท้ายเบ้าจะเปิดออกและชิ้นงานจะหลุดออกมาจากเบ้าโดยการใช้อากาศหรือสปริงดันออกมา [35]

กระบวนการอัดร้อน เป็นวิธีการขึ้นรูปพลาสติกและวัสดุเชิงประกอบที่ง่ายไม่ซับซ้อน และลงทุนต่ำ แต่ใช้เวลาในการผลิตชิ้นงานค่อนข้างนาน ในกระบวนการอัดร้อนเม็ดพลาสติกหรือวัสดุเชิงประกอบจะถูกนำไปใส่ในเบ้าที่ร้อนซึ่งอยู่ในเครื่องอัดร้อน พลาสติกจะถูกอัดด้วยแรงดันสูงทำให้พลาสติกที่หลอมเหลวเกิดการไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในเบ้า จากนั้นเบ้าจะถูกทำให้เย็นตัวและพลาสติกภายในเบ้าเกิดการแข็งตัว [36]

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติมีกรรมวิธีการขึ้นรูปที่เหมือนกับการขึ้นรูปพลาสติก 100 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบมีกระบวนการผสมเป็นกระบวนการที่สำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากเพื่อเป็นการกระจายเส้นใยธรรมชาติเข้าสู่พลาสติกที่หลอมเหลว เช่นเดียวกันเวลาการผสมที่เหมาะสมและอุณหภูมิที่ผสมสามารถปรับปรุงคุณภาพของการผสมและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ [2] ดังนั้นกรรมวิธีการผลิตวัสดุเชิงประกอบของงานวิจัยในอดีตจึงมีความแตกต่างกัน ยกตัวอย่าง Gao และคณะ [37] อบเส้นใยไม้เพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C โดยให้เส้นใยไม้มีความชื้นต่ำกว่า 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นผสมพอลิโพรพีลีน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และเส้นใยไม้ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเครื่องผสมความเร็วสูง และผสมซ้ำอีกครั้งโดยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่แบบหมุนตามกัน (Co-rotating twin-screw extruder) ให้เป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบ (Wood-plastic composite pellets) การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการอัดรีดอยู่ในช่วง 150-180 °C Doan และคณะ [25] ผสมพอลิโพรพีลีน ปอกระเจา (Jute) และ MAPP ให้เป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบ โดยการใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่แบบหมุนตามกัน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้อัดรีดอยู่ในช่วง 165-193 °C และขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบให้เป็นชิ้นงานทดสอบโดยการใช้เครื่องฉีดเข้าเบ้า Adhikary และคณะ [27] ผสมพอลิเอทีลีน ความหนาแน่นสูง 45-70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขี้เลื่อยไม้สน 30-50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และ MAPP 3.0-5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้เป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบโดยใช้เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่แบบหมุนตามกัน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้อัดรีดอยู่ในช่วง 170-200 °C จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบโดยใช้วิธีการอัดขึ้นรูปร้อนโดยอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปคือ 200 °C ทั้งนี้ สำหรับเทคนิคการอัดขึ้นรูปเป็นการอัดขึ้นรูป 2 ขั้นตอนโดยครั้งที่ 1 อัดเป็นเวลา 4 นาที ภายใต้แรงดัน 1 MPa และอัดซ้ำอีกครั้งเป็นเวลา 5 นาที ภายใต้แรงดัน 5 MPa จากงานวิจัยเหล่านี้เห็นได้ว่าการผลิตวัสดุเชิงประกอบจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักดังที่กล่าวในข้างต้น ซึ่งกระบวนการอัดรีดโดยเฉพาะเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) มักถูกนำมาใช้ในการผสมพลาสติกกับเส้นใยธรรมชาติ โดยจะทำการอัดส่วนผสมออกมาเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบดังแสดงในรูปที่ 5 จากนั้นเม็ดวัสดุเชิงประกอบจะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตัวอย่างโดยกระบวนการการอัดรีด การฉีดเข้าเบ้า และการอัดร้อน

รูปที่ 5 เม็ดวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพีลีนและผงไม้ยางพารา

7. สรุปผล

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์จากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีการขยายตัวทางการตลาดเพิ่มขึ้นมากในประเทศไทย เนื่องจากไม้ธรรมชาติมีการขาดแคลนและมีราคาสูงขึ้น โดยผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์ทางการก่อสร้าง เช่น ไม้พื้น ไม้ระแนง ไม้ฝ้า และไม้วงกบ เป็นต้น และการประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่ใช้ในที่โล่งแจ้ง (Outdoor) และพื้นที่ใกล้ทะเลเนื่องจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีความทนทานสูง นอกจากนี้ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ เส้นใยธรรมชาติคือวัตถุดิบที่เป็นเนื้อหลักรองมาจากพลาสติก ดังนั้นการผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้จำเป็นต้องใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นจำนวนมาก ซึ่งประเทศไทยถือว่าเหมาะแก่การผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เป็นอย่างยิ่ง เพราะประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีของเสียหรือของเหลือใช้ (Waste) ที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรมเกษตรเป็นจำนวนมากเช่น ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย เส้นใยเปลือกมะพร้าว ใยปาล์ม และกะลาปาล์ม ตลอดจนขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เป็นของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตเฟอร์นิเจอร์และการแปรรูปไม้ยางพารา ในขณะเดียวกันการผลิตวัสดุเชิงประกอบจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีความรู้และความเข้าใจพื้นฐานในวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสม การปรับปรุงสมบัติทางกล และกรรมวิธีการผลิตวัสดุเชิงประกอบ ดังที่ได้สรุปในบทความฉบับนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Ashori, “Wood–Plastic Composites as Promising Green-Composites for Automotive Industries!”, Bioresource Technology 11, 2008, pp. 4661-4667.

[2] K.B. Adhikary, “Development of Wood Flour-Recycled Polymer Composite Panels as Building Materials”, PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand. 2008.

[3] G. Pritchard, “Two Technologies Merge: Wood Plastic Composites”, Plastics Additives & Compounding, July-August, 2004, pp. 18-21.

[4] C. Clemons, “Wood-Plastic Composites in the United States”, Forest Products Journal 52, 2002, pp. 10-18.

[5] A.J. Schildmeyer, “Temperature and Time Dependent Behaviors of a Wood-Polypropylene Composite”, Master Thesis, Washington State University, United States. 2006.

[6] D.J. Pooler, “The Temperature Dependent Non-Linear Response of a Wood Plastic Composite”, Master Thesis, Washington State University, United States. 2001.

[7] J.A. Youngquist, G.E. Myers, J.H. Muehl, A.M. Krzysik, C.M. Clemons, “Composites from Recycled Wood and Plastics”, 1995.

[8] M.C. Hatch, “Processing, Mechanical, and Environmental Performance of Engineering Polymer Wood-Plastic Composites”, Master Thesis, Washington State University, United States. 2008.

[9] A.E. Slaughter, "Design and Fatigue of a Structural Wood-Plastic Composite", Master Thesis, Washington State University, United States. 2004.

[10] Hackwell, "Wood-Plastic Composite Growth Taking Off in Europe", Additives for Polymer, 2006, pp. 9-10.

[11] A.A. Klyosov, *"Wood-Plastic Composites* (1st ed.)", John Wiley & Son Inc., 2007.

[12] M. Kociszewski, C. Gozdecki, A. Wilczynski, S. Zajchowski, J. Mirowski, "Effect of Industrial Wood Particle Size on Mechanical Properties of Wood-Polyvinyl Chloride Composites", European Journal of Wood and Wood Products 70, 2012, pp. 113-118.

[13] N. Petchwattana, S. Covavisaruch, S. Chanakul, Mechanical Properties, Thermal Degradation and Natural Weathering of High Density Polyethylene/ Rice Hull Composites Compatibilized with Maleic Anhydride Grafted Polyethylene", Journal of Polymer Research 19, 2012, pp. 1-9.

[14] P.Y. Kuo, S.Y. Wang, J.H. Chen, H.C. Hsueh, M.J. Tsai, "Effects of Material Compositions on the Mechanical Properties of Wood–Plastic Composites Manufactured by Injection Molding", Materials and Design 30, 2009, pp. 3489–3496.

[15] S. Panthapulakkal, S. Law, M. Sain, "Properties of Recycled High-Density Polyethylene from Milk Bottles", Journal of Applied Polymer Science 43, 1991, pp. 2147-2150.

[16] N.J. Themelis, M.J. Castaldi, J. Bhatti, L. Arsova, "Energy and Economic Value of Nonrecycled Plastics (NRP) and Municipal Solid Wastes (MSW) that are Currently Landfilled in the Fifty States", EEC Study of Non-recycled Plastics, Earth Engineering Center, Columbia University, 2011.

[17] Z.A. Khan, S. Kamaruddin, A.N. Siddiquee, "Feasibility Study of Use of Recycled High Density Polyethylene and Multi Response Optimization of Injection Moulding Parameters Using Combined Grey Relational and Principal Component Analyses", Materials and Design 31, 2010, pp. 2925–2931.

[18] A. Nourbakhsh, A. Ashori, H.Z. Tabari, F. Rezaei, "Mechanical and Thermo-Chemical Properties of Wood-Flour/Polypropylene Blends", Polymer Bulletin 65, 2010, pp. 691–700.

[19] M. Jawaid, H.P.S.A. Khalil, "Cellulosic/Synthetic Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites: A Review", Carbohydrate Polymers 86, 2011, pp. 1-18.

[20] H.M. Akil, M.F. Omar, A.A.M. Mazuki, S. Safiee, Z.A.M. Ishak, A.A. Bakar, "Kenaf Fiber Reinforced Composites: A Review", Materials and Design 32, 2011, pp. 4107-4121.

[21] Y. Xie, C.A.S. Hill, Z. Xiao, H. Militz, C. Mai, "Silane Coupling Agents Used for Natural Fiber/ Polymer Composites: A Review", Composites Part A 41, 2010, pp. 806–819.

[22] H. Bouafif, A. Koubaa, P. Perre, A. Cloutier, "Effects of Fiber Characteristics on the Physical and Mechanical Properties of Wood Plastic Composites", Composites Part A 40, 2009, pp. 1975–1981.

[23] M. Bengtsson, M.L. Baillif, K. Oksman, "Extrusion and Mechanical Properties of Highly Filled Cellulose Fibre–Polypropylene Composites", Composites Part A 38, 2007, pp. 1922–1931.

[24] X.C. Ge, X.H. Li, Y.Z. Meng, "Tensile Properties, Morphology, and Thermal Behavior of PVC Composites Containing Pine Flour and Bamboo Flour", Journal of Applied Polymer Science 93, 2004, pp. 1804-1811.

[25] T.T.L. Doan, S.L. Gao, E. Mader, "Jute/ Polypropylene Composites I. Effect of Matrix Modification", Composite Science and Technology 66, 2006, pp. 952–963.

[26] D.N.S. Hon, N. Shiraishi, *"Wood and Cellulosic Chemistry* (2nd ed)", Marcel Dekker Inc., 2001.

[27] K.B. Adhikary, S. Pang, M.P. Staiger, "Dimensional Stability and Mechanical Behaviour of Wood-Plastic Composites based Recycled and Virgin High-Density Polyethylene (HDPE)", Composites Part B 39, 2008, pp. 807-815.

[28] L. Danyadi, J. Moczo, B. Pukanszky, "Effect of Various Surface Modifications of Wood Flour on the Properties of PP/Wood Composites", Composites Part A 41, 2010, pp. 199–206.

[29] M.A.S. Spinace, K.K.G. Fermoseli, M.A.D. Paoli, "Recycled Polypropylene Reinforced with Curaua Fibers by Extrusion", Journal of Applied Polymer Science 112, 2009, pp. 3686–3694.

[30] M.N. Ichazo, C. Albano, J. Gonzalez, R. Perera, M.V. Candal, "Polypropylene/Wood Flour Composites: Treatments and Properties", Composite Structures 54, 2001, pp. 207-214.

[31] J.G. Gwon, S.Y. Lee, S.J. Chun, G.H. Doh, J.H. Kim, "Effects of Chemical Treatments of Hybrid Fillers on the Physical and Thermal Properties of Wood Plastic Composites", Composites Part A 41, 2010, pp. 1491–1497.

[32] W.A. Chow, K.H. Ooi, "Effects of Maleic Anhydride Grafted Polystyrene on the Flexural and Morphological Properties of Polystyrene/ Organo-Montmorillonite Nanocomposites", Malay Polymer Journal 2, 2007, pp. 1-9.

[33] S.M.B. NachtigalI, G.S. Cerveira, S.M.L. Rosa, "New Polymeric-Coupling Agent for Polypropylene/Wood-Flour Composites", Polymer Testing 26, 2007, pp. 619–628.

[34] H.N.P. San, L.A. Nee, H.C. Meng, "Physical and Bending Properties of Injection Moulded Wood Plastic Composites Boards", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 3, 2008, pp. 13-19.

[35] M. Amornsit, S. Akaratiwa, T. Udommun, *"Foundations of Materials Science and Engineering* (4th ed)", McGraw-Hill, 2551. (in Thai)

[36] M. Biron, *"Thermoplastics and Thermoplastic Composites",* Elsevier Ltd., 2007.

[37] H. Gao, Y.M. Song, Q.W. Wang, Z. Han, M.L. Zhang, "Rheological and Mechanical Properties of Wood Fiber-PP/PE Blend Composites", Journal of Forestry Research 19, 2008, pp. 315-318.

[38] J. Holbery, D. Houston, "Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications", Journal of the Minerals, Metals, and Materials Society 58, 2006, pp. 80-86.

[39] Sue Elliott-Sink [Internet]. 2012 [updated 2013 Dec 31; cited 2014 Mar 19]. Available from: http://www.edmunds.com/fuel-economy/special-report-cars-made-of-plants.html.

[40] H.S. Yang, H.J. Kim, H.J. Park, B.J. Lee, T.S. Hwang, "Effect of Compatibilizing Agents on Rice-Husk Flour Reinforced Polypropylene Composites", Composite Structures 77, 2007, pp. 45–55.