



การพัฒนาไม้เทียมจากพลาสติกและเส้นใยมะพร้าว

รองศาสตราจารย์ ดร.สิงหนเดช แต่งจวง



สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ



ARIT00018420

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริม

วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.)

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ประจำปีงบประมาณ 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการผลิตวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก (WPCs) จากพลาสติกความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และใยมะพร้าว LLDPE และ ใยมะพร้าวผสมกันในอัตราส่วน 100:0, 95:5, 90:10, และ 85:15 โดยน้ำหนัก และถูกเติมด้วยแอมโมเนียมซิลิเฟตที่ใช้เป็นสารหน่วงไฟในอัตราส่วน 0, 1, 3 และ 5% จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแผ่นที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ในเตาอบไฟฟ้า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปถูกนำไปทดสอบหา ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และสมบัติเชิงกลตามมาตรฐานของ ASTM ผลการทดสอบแสดงว่าเมื่อปริมาณสัดส่วนของเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้น ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ของไม้พลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สมบัติความแข็งแรงดึง และสมบัติความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง และเช่นเดียวกันผลการวิเคราะห์ของการเติมแอมโมเนียมซิลิเฟตต่อสมบัติเชิงกล พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงกระแทกมีคุณภาพลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณแอมโมเนียมซิลิเฟต สำหรับการด้านการลามไฟของ WPCs ถูกทดสอบตามมาตรฐาน UL94 ตามแนวนอน พบว่าการเติมแอมโมเนียมซิลิเฟตจะเพิ่มสมบัติการด้านการลามไฟได้ดีขึ้น

คำสำคัญ : LLDPE; เส้นใยมะพร้าว; สมบัติทางกายภาพ; สมบัติเชิงกล; การลามไฟ

Abstract

In this work, wood plastic composites (WPCs) were produced from linear low density polyethylene (LLDPE) and coir fiber. LLDPE and coir fiber were mixed at various weight ratios of 100:0, 95:5, 90:10, and 85:15. Then addition of ammonium sulfate 0, 1, 3 and 5% was used as fire retardants. The mixed materials were formed by a flated-press method at temperatures 170 °C for 40 min. in an electric oven. The density, water absorption, tensile and impact strength of WPCs samples were determined according to the American society for testing and materials method (ASTM). The results indicated that an increment in the coir fiber contents led to an increase in the water absorption and density and the reduction in the mechanical of WPCs. Mechanical properties of the flame retardant WPCs were also analysed using tensile and impact tests. Existence of ammonium sulfate in WPCs resulted in a deterioration in the tensile and impact properties. Horizontal burning (UL-94) test was used to study the flammability of WPCs and the result showed that the addition of ammonium sulfate had a synergistic effect on their fire performance.

Keywords : LLDPE; coir fiber; physical properties; mechanical properties; flammability

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่ายด้วยกัน อาทิเช่น นายปัญญาพล เพ็ญสามารถ น.ส.สายฝน ขาสี นักศึกษาหลักสูตรฟิสิกส์ นายเชาวฤทธิ์ วันเสาร์ และ นายนพตล บุญยรัตพันธุ์ เจ้าหน้าที่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่มีส่วนร่วมในงานวิจัย WPCs. ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ผู้ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยผ่าน มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยนี้จนสำเร็จลงไปด้วยดี

ท้ายสุดนี้หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใดผู้วิจัยขอภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงมีประโยชน์บ้างไม่มากก็น้อยสำหรับผู้สนใจจะศึกษารายละเอียดต่อไป



A handwritten signature in black ink, appearing to be "รศ.ดร.สิงห์เดช แดงจวง".

รศ.ดร.สิงห์เดช แดงจวง
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญภาพ	(5)
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 บริษัทนวัตกรรมกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
วัสดุเชิงประกอบ	4
การเตรียมพลาสติกเพื่อกระบวนการขึ้นรูป	5
กระบวนการอัด	8
การทดสอบสมบัติทางกล	10
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	16
วัสดุอุปกรณ์	16
แผนผังแสดงกระบวนการทำงาน	17
วิธีการทดลอง	17
การทดสอบ	18
บทที่ 4 ผลงานวิจัย และการอภิปรายผล	21
ผลการวิจัย	21
ความหนาแน่น	21
การซึมน้ำ	22
ความแข็งแรงดึง	23
แรงกระแทก.	24
การลามไฟ	24
วิจารณ์ผลการวิจัย	25
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	30
สรุปผลงานวิจัย	30
ข้อเสนอแนะ	30
บรรณานุกรม	32

สารบัญญภาพ

ภาพที่

หน้า

1. ลักษณะชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน (ASTM D638)	10
2. การทดสอบแรงกระแทกแบบเพนคูล์ม	11
3. ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด	12
4. ก. แสดงพลาสติก LLDPE และ ข. โยมะหะวีว	17
5. แสดงแบบพิมพ์ทำจากสแตนเลส	18
6. เครื่องมือทดสอบแรงดึง	19
7. เครื่องมือสำหรับทดสอบแบบไอซอด (Izod test)	19
8. ลักษณะการทดสอบการลามไฟตามแนวนอน	20
9. ลักษณะตัวอย่างชิ้นงาน WPCs ที่เตรียมได้	21
10. การทดสอบความหนาแน่นของ WPCs.	22
11. การทดสอบการซึมน้ำของ WPCs.	23
12. การทดสอบความแข็งแรงดึงของ WPCs.	23
13. การทดสอบแรงกระแทกของ WPCs.	24
14. การทดสอบการลามไฟของ WPCs.	25

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันไม้เทียมหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก (wood plastic composites : WPCs) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากทั่วโลกทั้งในยุโรป อเมริกา หรือในเอเชีย รู้จักในชื่อทั่วไปว่า “ไม้เทียม” โดยไม้พลาสติกเป็นการนำเอาความรู้ของวงการไม้และวงการพลาสติกมารวมกันทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุทางวิศวกรรมได้อีกชนิดหนึ่ง การนำไปใช้หลักๆ ของ WPCs ก็คือ อุตสาหกรรมยานยนต์ ด้านโครงสร้างสำหรับอาคารก่อสร้างที่อยู่อาศัย เฟอร์นิเจอร์ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมและ สินค้าอุปโภคบริโภค (Stark และคณะ, 2010) โดยทั่วไปแล้วไม้ซึ่งประกอบด้วยไฟเบอร์ (fiber) จะใช้เป็นวัสดุเสริมแรง (reinforcing material) นอกจากการใช้เป็นวัสดุเสริมแรงแล้วได้มีนักวิจัยหลายๆท่านได้ทำวิจัยโดยการนำวัสดุอื่นที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส นำมาสร้างไม้เทียม เช่น ฟางข้าวสาลี ฟางลินิน ชิงข้าวโพด ก้านพริกไทย ก้านดอกทานตะวัน เปลือกถั่วลิสง หนุ่ย เป็นต้น (Buyuksari และคณะ (2010) ส่วนพลาสติกที่ใช้เป็นเนื้อวัสดุหลักหรือเมทริกซ์ (matrix) หากมองในภาพรวมแล้วการเพิ่มไฟเบอร์ลงไปพลาสติกเป็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามที่ต้องการใช้งานทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุดิบ ปฏิริยาเคมี กระบวนการผลิต สารเติมแต่งที่ใช้ และสัดส่วนของไฟเบอร์และพลาสติกต่างก็มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของไม้พลาสติกทั้งสิ้น ชนิดของพลาสติกมีหลายประเภทด้วยกันได้แก่พอลิพรอพิลีน (PP) พอลิเอทิลีน (PE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพลาสติกพอลิสไตรีน (PS) เป็นต้น แต่พลาสติกที่นิยมมาใช้ทำ WPCs กันอย่างแพร่หลายได้แก่พลาสติกประเภท PP, PE และ PVC (Garcia และคณะ, 2009) พลาสติกเหล่านี้เป็นเทอร์โมพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนจะหลอมตัวเป็นของเหลวหนืดและกลายเป็นของแข็งเมื่อปล่อยให้เย็นลง จากสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถเติมวัสดุอื่น ๆ ลงไปผสมกับพลาสติกก่อนการขึ้นรูปเพื่อออกแบบเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุเชิงประกอบ (composite) โดยมีคุณสมบัติตามที่ต้องการได้เช่น สามารถทนทานต่อแสงแดดและฝน มีสีลื่นและลวดลายหลากหลาย หรือสามารถทำสีได้ตามความต้องการ ปลอดภัยจากการรุกรานของปลวก เป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น และมีน้ำหนักเบาขึ้น เป็นต้น (Najafi และคณะ, 2006)

ต่ออย่างไรก็ตามพลาสติกเป็นวัสดุพอลิเมอร์ซึ่งมีสมบัติในการลुकติดไฟได้เป็นอย่างดีเมื่อถูกเผาไหม้ วัสดุพอลิเมอร์จึงเป็นจุดบอดในการผลิตวัสดุเชิงประกอบที่ประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นโครงสร้างภายในอาคารบ้านเรือน ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาวิจัยเพิ่มมากขึ้นเพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลสำหรับที่จะแก้ไขการลुकติดไฟของระบบวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ขึ้น จากรายงานวิจัยที่หลากหลาย (Kalali และคณะ, 2019, Kim และคณะ, 2016, Stark และคณะ, 2010) พบว่าสารตัวเติมหรือสารหน่วงไฟที่

มีคุณสมบัติในการต้านการลुकติดไฟได้เป็นอย่างดี ได้แก่ สารที่มีองค์ประกอบพื้นฐานจำพวกฮาโลเจน แต่อย่างไรก็ตามสารที่มีองค์ประกอบจำพวกฮาโลเจนเมื่อถูกเผาไหม้จะปลดปล่อยควันจำนวนมาก และเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ต่อมาพบว่าสารทวงไฟที่มีสมบัติที่ดีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมก็คือ สารที่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัส และไนโตรเจน ซึ่งองค์ประกอบของสารเหล่านี้จะเข้าไปยับยั้งการลुकติดไฟในระหว่างการเผาไหม้ของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ ประกอบกับปัจจุบันทั่วโลกมีการใช้ไม้ในการทำโครงสร้างสำหรับการก่อสร้างที่อยู่อาศัยและเฟอร์นิเจอร์ปริมาณมากส่งผลให้ต้นไม้มีจำนวนลดลงอย่างรวดเร็ว และก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางด้านอากาศตามมา และเช่นเดียวกันก็มีการใช้พลาสติกอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน เช่น ขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำมันพืช ถุงพลาสติก เป็นต้น พลาสติกดังกล่าวหลังจากการใช้งานแล้วกลายเป็นขยะจำนวนมากทำให้เกิดปัญหามลภาวะต่อโลก และปัญหาต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตซึ่งจะร้ายแรงเพิ่มขึ้นทุกๆวัน

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นเพื่อเป็นการสนับสนุนการลดปัญหาขยะพลาสติก และลดปัญหามลภาวะทางอากาศที่เกิดจากการตัดไม้ทำลายป่า ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการผลิตวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกที่เตรียมจากเส้นใยมะพร้าว และพลาสติกประเภทความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) ที่ใช้กันมากในถุงพลาสติกใส่อาหาร ใส่ผลไม้ และพวกถุงทั่วไปของต่างๆในชีวิตประจำวัน และใช้สารแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นสารทวงไฟโดยศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และศึกษาสมบัติการลามไฟที่สัมพันธ์กับสารตัวเติมแอมโมเนียมซัลเฟต ทั้งนี้ยังไม่มีรายงานวิจัยที่ตีพิมพ์เกี่ยวกับงานวิจัยนี้ นอกจากนี้งานวิจัยนี้จะมีประโยชน์หลากหลายด้วยกันกล่าวคือ เป็นการเพิ่มมูลค่าในการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ เป็นการเพิ่มการใช้ประโยชน์จากเส้นใยมะพร้าวให้นำมาใช้ประโยชน์ให้หลากหลายขึ้น และเป็นการเพิ่มทางเลือกอีกทางหนึ่งของการใช้ไม้เทียมเป็นวัสดุที่นำมาใช้ทดแทนไม้ได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ผลิตไม้เทียมจากพลาสติก และเส้นใยมะพร้าวโดยใช้แอมโมเนียมซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) เป็นสารทวงไฟ
2. ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพได้แก่ทดสอบความหนาแน่น ทดสอบการซึมน้ำ สมบัติเชิงกลได้แก่ ทดสอบแรงดึง ทดสอบความแข็งแรงกระแทก และสมบัติการต้านการลुकติดไฟตามมาตรฐาน UL-94 ของไม้เทียมที่ผลิตได้

ขอบเขตของการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการผลิตไม้เทียม คือ พลาสติก และ เส้นใยมะพร้าว
2. สารทวงไฟที่ใช้ คือ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ซึ่งจะเติมลงไปเป็นอัตราส่วน 0, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมระหว่างพลาสติก และเส้นใยมะพร้าว

3. พลาสติกและเส้นใยมะพร้าวจะถูกผสมกันในอัตราส่วน 100:0, 95:5, 90:10 และ 85:15 ก่อนทำการขึ้นรูปทำการผสมวัสดุด้วยเครื่องผสม หลังจากนั้นทำการขึ้นรูปโดยวิธีด้วยวิธีอัดแผ่น (flat-pressed method) ในแบบขนาด $8 \times 30 \times 0.4$ เซนติเมตร แล้วนำชิ้นงานออกเพื่อนำไปวัดคุณสมบัติต่างๆต่อไป

4. ทดสอบคุณสมบัติต่างๆของไม้เทียมที่ได้จำนวน 5 ครั้งต่อหนึ่งมาตรฐาน โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลต่าง ๆ ดังนี้ ทดสอบความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM D792 ทดสอบการซึมน้ำ ASTM D570 การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D638 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact test) ตามมาตรฐาน ASTM D256 และการทดสอบการติดไฟ (Flammability test) ตามมาตรฐาน UL-94

วิธีวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับ WPCs
2. เตรียมวัสดุอุปกรณ์ แล้วผสมใยมะพร้าว พลาสติก LLDPE และ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ด้วยเครื่องผสมตามอัตราส่วนและเทลงแบบพิมพ์เพื่อขึ้นรูปตามอุณหภูมิที่กำหนด
3. นำชิ้นทดสอบตัวอย่างมาทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบการซึมน้ำ การทดสอบแรงดึง การทดสอบความแข็งแรงกระแทก และการทดสอบการหน่วงไฟ
4. สรุปผลและจัดทำเอกสารรายงานการวิจัย

สถานที่ทำงานวิจัย

อาคารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคาร 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับใยมะพร้าว และขยะพลาสติก
2. ได้ WPCs ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้
3. เป็นพื้นฐานในการวิจัยในการเตรียม WPCs ระหว่าง LLDPE และใยมะพร้าว
4. เพื่อเพิ่มพูนความรู้อันจะนำไปสู่งานวิจัยที่สูงยิ่งขึ้นต่อไป
5. นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สาระสำคัญของบทนี้ประกอบด้วยสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกจะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวมถึงขั้นตอนวิธีการในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ และการทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบ และในส่วนที่สองจะเป็นกล่าวถึงปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวัสดุเชิงประกอบจากนักวิจัยต่างๆทั่วโลกซึ่งเป็นการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจากวัสดุชนิดต่างๆที่หลากหลาย โดยมีการรายงานผลการศึกษาวិธีการเตรียม และการทดสอบสมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบ (Composites material)

วัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิดที่มีสมบัติแตกต่างกันเมื่อผสมกันแล้วจะมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน แต่ละองค์ประกอบย่อยที่มาประกอบกับวัสดุเชิงประกอบจัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญมาก ในปัจจุบันเป็นที่นิยมและมีปริมาณการใช้วัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากวัสดุเชิงประกอบมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงทนทาน สีสรรสวยงาม ขึ้นรูปได้ง่ายและต้นทุนในการผลิตต่ำ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานแทนวัสดุอื่นๆและวัสดุธรรมชาติได้อีกด้วย สมบัติของวัสดุเชิงประกอบสามารถเตรียมได้ให้มีความหลากหลายตามต้องการการนำไปใช้งานขึ้นอยู่กับการยึดเกาะระหว่างวัสดุย่อย (ตัวเสริมแรง) และวัสดุหลัก (เมทริกซ์) สมบัติของเมทริกซ์และวัสดุเสริมแรง อัตราส่วนผสมของเมทริกซ์ วัสดุเสริมแรง สารช่วยประสาน และสารเติมแต่ง กระบวนการผลิต การกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงในเมทริกซ์ วัสดุเชิงประกอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

1. ส่วนเมทริกซ์ (Matrix phase) ส่วนนี้จะเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุเชิงประกอบจัดเป็นส่วนที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) เมทริกซ์ที่นิยมได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก เมทริกซ์เป็นส่วนที่ห่อหุ้มและยึดส่วนเสริมแรงเข้าไว้ด้วยกันโดยทั่วไปเมทริกซ์มักจะมีคุณสมบัติเหนียวสูง ความแข็งแรงและมอดูลัสต่ำกว่าส่วนเสริมแรง หน้าที่ของเมทริกซ์ในพอลิเมอร์เชิงประกอบ ได้แก่

- 1.1 รักษาความเสถียรในรูปร่าง และขนาดวัสดุเชิงประกอบ
- 1.2 รักษาการกระจายตัวของส่วนเสริมแรง และแยกไม่ให้เห็นส่วนเสริมแรงมารวมกัน
- 1.3 ทำให้วัสดุเชิงประกอบ ทนต่อการเสียสภาพภายใต้อุณหภูมิหรือแรงกระทำ
- 1.4 สามารถกระจายหรือส่งถ่ายแรงที่ได้รับจากภายนอกไปยังส่วนเสริมแรงได้
- 1.5 ช่วยให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมและมีความเสถียรภาพในตัวกลางต่าง ๆ

2. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement phase) ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งแรงมักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) ซึ่งมีลักษณะรูปร่างหลายแบบอาจเป็นแผ่น เส้นใย (fiber) หรืออนุภาคเล็ก ๆ โดยตัวเสริมแรงที่นิยมใช้มีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่องหรือเส้นใยสั้น เส้นใยที่ใช้เสริมแรงในพอลิเมอร์เชิงประกอบ ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น

การเตรียมพลาสติกเพื่อกระบวนการขึ้นรูป (ฉกาจ จบนุช, 2556)

การเตรียมพลาสติกเพื่อกระบวนการแปรสภาพเป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการเตรียมพลาสติก ซึ่งอยู่ในลักษณะวัตถุดิบให้พร้อมที่จะนำมาผลิตเป็นชิ้นงานได้ โดยปกติพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปจะต้องมีการผสมสารเคมีที่เรียกว่า สารเติมแต่ง (Additives) หลายชนิดเพื่อปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานพลาสติก และปรับปรุงความสามารถในการแปรรูปพลาสติกเพื่อให้แปรสภาพได้ง่ายขึ้น กระบวนการเตรียมพลาสติกเพื่อกระบวนการขึ้นรูปจึงประกอบด้วย การบดย่อย การผสมขณะที่เป็นของแข็ง (Mixing) การผสมขณะที่เป็นของเหลว (Compounding) และการทำพลาสติกเม็ด (Pelletizing)

1. การบดย่อย

การบดย่อยหมายถึง การลดขนาดของพลาสติกแข็งโดยวิธีทางกลเพื่อให้พลาสติกมีขนาดและรูปร่างเหมาะสมซึ่งสามารถนำไปขึ้นรูปต่อได้ ในการบดย่อยจะทำให้ได้พลาสติกที่มีขนาดเล็กแตกต่างกันตามความต้องการ เหตุผลที่จำเป็นต้องบดย่อยพลาสติกมีหลายอย่างเช่นเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสเมื่อทำการผสมทำให้อบแห้งได้ดี ป้อนเข้าเครื่องจักรขึ้นรูปได้อย่างสม่ำเสมอ หลอมละลายได้เร็ว เป็นต้น เครื่องบดย่อยมีหลายชนิดซึ่งสร้างไว้ให้เหมาะสมกับชนิดของพลาสติก เช่น เครื่องรีดย่อย โม่ตี โม่กวน โม่ตัด โม่แท่งตี และโม่รีด เป็นต้น ลักษณะการทำงานของเครื่องบดย่อยต่างๆแตกต่างกัน เช่น เครื่องรีดย่อยใช้แรงตัด เครื่องโม่ตีใช้การตัดเฉือนและเครื่องโม่แท่งใช้การตีให้กระจายและการเสียดสี เครื่องโม่ตัดเป็นเครื่องย่อยที่มีใช้มากในการย่อยพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการย่อยเศษพลาสติกหรือชิ้นงานที่เสียเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เครื่องโม่ตัดประกอบด้วยเรือนเหล็กหล่อที่มั่นคง มีคมตัดติดอยู่กับเรือน 4 คม ตอนล่างจะมีตะแกรงประกอบอยู่วัสดุที่จะตัดถูกส่งเข้าทางปล่องด้านบนตรงกลางจะมีเพลาลูกซึ่งมีเม็ดตัดติดอยู่ 3 เล่ม เศษพลาสติกที่ใส่ลงไปจะถูกมีดหมุนจับและนำไปตัดกับเม็ดซึ่งติดอยู่กับเรือนเครื่องโดยเครื่องจะทำงานช้าๆไปจนกว่าพลาสติกจะละเอียดพอที่จะลอดตะแกรงได้ ความเร็วตัดจะอยู่ระหว่าง 12-14 เมตรต่อวินาที ระยะห่างระหว่างเม็ดหมุนและมีอยู่กันที่ประมาณ 0.25-0.5 มิลลิเมตร โม่ตัดมีขนาดทำงานได้ตั้งแต่ 10-2,500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

2. การผสม

การผสมเป็นการนำวัสดุต่างชนิดมารวมกันและให้เฉลี่ยเข้ากัน ได้แก่ การผสมสารเติมแต่งกับพลาสติกซึ่งส่วนใหญ่เป็นการผสมของแข็งกับของแข็งหรือของแข็งกับของเหลวเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องผสม (Mixer หรือ blender) โดยทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่กระแทกเสียดสีและคลุกเคล้า

กันจนได้สภาพการผสมที่ต้องการด้วยการหมุนของใบกวนในถังเปิดหรือปิด ผลของการผสมทำให้เกิดการกระจายตัวของวัสดุต่างชนิดกันเข้ากันอย่างทั่วถึงแต่ยังคงสามารถแยกอนุภาคของสารแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน เครื่องผสมที่ใช้ในการผสมมีลักษณะการผสมแบบรุ่น (Batch mixer) ซึ่งเกิดการผสมโดยการทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่คลุกเคล้ากันโดยไม่ให้พลาสติกได้รับแรงเฉือนมากนัก เทคนิคการผสมนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การผสมแบบเย็น (Cold mixing) และการผสมแบบร้อน (Hot mixing)

2.1 การผสมแบบเย็น เทคนิคการผสมแบบนี้เป็นการผสมจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องสามารถใช้ผสมพลาสติกและสารเติมแต่งที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน ตัวอย่างเครื่องผสมแบบผสมเย็น เช่น

2.1.1 เครื่องผสมแบบถังหมุน (Drum tumbler) เครื่องผสมแบบถังหมุนทำให้เกิดการผสมของสารเติมแต่งชนิดต่างๆกับพลาสติกเข้าด้วยกันโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและการหมุนเหวี่ยงของถังหมุนซึ่งแรงเหล่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนขนาดอนุภาคของสารต่างๆเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เครื่องผสมชนิดนี้มีหลายแบบแต่แบบที่นิยมใช้และราคาถูกที่สุดคือ เครื่องผสมแบบถังหมุนปกติ (Tumbling barrel) มักใช้สำหรับการผสมสารเติมแต่งปริมาณไม่มากลงในพลาสติกประกอบด้วยถังผสมขนาดประมาณ 130-210 ลิตรซึ่งถูกขับให้หมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ประสิทธิภาพการผสมขึ้นกับปริมาณวัสดุและเวลาที่ใช้ในการผสม นอกจากนี้ยังมีเครื่องผสมแบบถังหมุนแบบอื่น ๆ ที่ให้การผสมเข้ากันได้ดีกว่าเนื่องจากมีการหมุนและการเหวี่ยงของถังผสมในเวลาเดียวกัน เช่น ถังหมุนแบบกรวยคู่ (Double cone mixer) และถังหมุนแบบภาพตัววี (V-shape mixer) เป็นต้น

2.1.2 เครื่องผสมแบบริบบอน (Ribbon blender) เครื่องผสมแบบริบบอนมีความผสมซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะขดวนคล้ายสปริงเรียกว่า ริบบอนบรรจุอยู่ในถังผสมที่ยึดติดอยู่กับที่ แผ่นริบบอนนี้ถูกยึดติดกับเพลาขับที่สามารถหมุนด้วยความเร็วประมาณ 20-60 รอบต่ออนาที เครื่องผสมแบบนี้นิยมใช้ในการผสมวัสดุที่มีลักษณะเป็นผงหรือก้อนเล็ก ๆ โดยทั่วไปในขณะที่การผสมจะไม่เกิดความร้อนขึ้นเนื่องจากขณะทำการผสมจะไม่เกิดแรงเฉือนระหว่างวัสดุและระหว่างริบบอนกับผนังของถังผสม

2.1.3 เครื่องผสมแบบกรวยที่มีสกรูภายใน (Conical screw mixer) เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยถังผสมที่มีลักษณะเป็นกรวยกลมและมีสกรูบรรจุอยู่ภายในถังโดยวางแนวอยู่ใกล้กับผนังของถังผสมสกรูนี้สามารถหมุนได้ 2 ลักษณะคือ หมุนรอบแกนสกรูและหมุนเคลือบที่ในแนวเส้นรอบวงของถังความเร็วในการหมุนสามารถปรับเปลี่ยนได้ เครื่องผสมแบบนี้สามารถผสมสารที่มีปริมาณเล็กน้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 การผสมแบบร้อน เทคนิคการผสมแบบนี้การให้ความร้อนแก่วัสดุที่ทำการผสมโดยอุณหภูมิของห้องผสมอาจสูงถึง 140 องศาเซลเซียส ดังนั้นสารเติมแต่งบางชนิดอาจหลอมแล้วกระจายตัวเข้าไปในพลาสติกซึ่งยังคงสถานะเป็นของแข็ง ตัวอย่างเครื่องผสมแบบนี้ ได้แก่ เครื่องผสม

เทอร์บูแลนต์ (Turbulent mixer) ซึ่งประกอบด้วยถังผสมร้อนและถังหล่อเย็นภายในถังผสมร้อนมีใบพัดกวนที่มีความเร็วสูง เป็นตัวช่วยในการผสมองค์ประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกันหลังจากผสมกันแล้วจะถ่ายของผสมร้อนลงในถังหล่อเย็นเพื่อทำให้ของผสมร้อนเย็นตัวลงเหลือประมาณ 35 องศาเซลเซียส ระยะเวลาผสมของเครื่องผสมแบบนี้สั้นมากคือประมาณ 10 นาทีต่อครั้ง ขนาดของเครื่องผสมร้อนโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1,000-1,500 ลิตร และเครื่องผสมเย็นประมาณ 2,000-3,000 ลิตร

3. การคอมปาวด์

การคอมปาวด์เป็นการผสมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ กับพลาสติกโดยพลาสติกจะถูกให้ความร้อนจนอยู่ในสภาวะหลอมจากนั้นสารเติมแต่งและพลาสติกหลอมจะถูกนวดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เทคนิคการคอมปาวด์พลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น การคอมปาวด์แบบรุ่น (Batch compounding) และการคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous compounding)

3.1 การคอมปาวด์แบบรุ่น ตัวอย่างของเครื่องผสมแบบนี้ได้แก่

3.1.1 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยลูกกลิ้งสองลูกซึ่งทำจากเหล็กหล่อที่มีการเคลือบผิวให้มีความแข็งและลื่นลูกกลิ้งทั้งสองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 300-500 มิลลิเมตร และความยาวระหว่าง 800-1,500 มิลลิเมตร โดยวางขนานกันและหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วแตกต่างกันเล็กน้อย ในขณะที่ทำการผสมจะมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกผ่านผิวลูกกลิ้งทั้งสอง โดยความร้อนของลูกกลิ้งมาจากชุดให้ความร้อนไฟฟ้าหรือการไหลเวียนของน้ำร้อนหรือน้ำมันร้อนผ่านภายในลูกกลิ้ง ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้คือสามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมเข้ากันของสารเติมแต่งและพลาสติกได้สามารถทำการผสมในปริมาณที่แตกต่างกันได้สะดวกในการทำความสะอาดรวมทั้งการผสมแบบนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะแผ่นซึ่งเหมาะสำหรับการแปรรูปต่อ เช่น การอัด (Compression molding) สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ผู้ปฏิบัติต้องมีทักษะในการใช้เครื่องและมีความรู้เกี่ยวกับการคอมปาวด์สูงต้องมีการช่วยผสมโดยการปาดพลาสติกให้เข้าไปอยู่ตรงกลางระหว่างลูกกลิ้งเสมอ ความสม่ำเสมอในการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างต่ำและเกิดการสูญเสียสารเคมีหรือการปนเปื้อนได้ง่ายเนื่องจากการผสมในระบบเปิด

3.1.2 เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer) เครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งมีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกลิ้งจำนวนสองชุดบรรจุอยู่ในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้โดยใช้น้ำมันร้อนหรือน้ำไหลหมุนเวียน โรเตอร์ทั้งสองหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วในการหมุนที่สามารถปรับได้การหมุนของโรเตอร์ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมากจึงทำให้การกระจายตัวของสารเติมแต่งในพลาสติกเกิดขึ้นได้ดี ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้ คือ ใช้เวลาในการผสมสั้นผู้ปฏิบัติไม่จำเป็นต้องมีทักษะสูงไม่มีการสูญเสียวัสดุหรือเกิดการปนเปื้อนเนื่องจากการผสมทำในระบบปิดขนาดและความสม่ำเสมอของการผสมในแต่ละ

ครั้งก่อนข้างแน่นอน สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้คือไม่สามารถมองเห็นการผสมได้และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก

3.2 การคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้ววิธีการคอมปาวด์แบบต่อเนื่องมักใช้เครื่องอัดรีด (Extruder) หรือเครื่องนวดผสมร่วม (Co-Kneader) ซึ่งประกอบด้วยสกรูหรือฟันนวดที่หมุนอยู่ภายในกระบอกอัดรีด การหมุนของสกรู ทำให้เกิดแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวไปทุกทิศทุกทางของส่วนผสมซึ่งทำให้การผสมเกิดขึ้นในระดับที่ละเอียดกว่าการคอมปาวด์แบบรูน เครื่องอัดรีดที่ใช้ในการคอมปาวด์พลาสติกมักจะใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เป็นหลัก สำหรับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดียวนั้น จะใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการความพิถีพิถันในการคอมปาวด์มากนัก ตัวอย่างของเครื่องผสมแบบนี้ได้แก่เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) โดยทั่วไปเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่ใช้ในการแปรรูปพลาสติกมักใช้สกรูแบบธรรมดาซึ่งไม่สามารถผสมสารเติมแต่งให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกับพลาสติกได้เนื่องจากการหมุนของสกรูแบบนี้ไม่ก่อให้เกิดแรงเฉือนมากพอที่จะทำให้สารเติมแต่งต่าง ๆ เกิดการกระจายตัวได้ดีถึงระดับโมเลกุล ดังนั้นการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวในการคอมปาวด์พลาสติกจึงต้องปรับปรุงลักษณะของสกรูโดยการเพิ่มส่วนที่เพิ่มแรงเฉือนของสกรู

กระบวนการอัด (Compression molding) (ฉกาจ จบนุช, 2556)

กระบวนการอัดนี้เป็นเทคนิคการขึ้นรูปพลาสติกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นเทคนิคที่ขึ้นรูปไม่ซับซ้อนและเป็นวิธีการที่ใช้กันมาตั้งแต่สมัยอดีตจนถึงปัจจุบัน ตัวอย่างชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดที่พบเห็นและใช้กันจำนวนมากในชีวิตประจำวัน ได้แก่ ช้อน ขาม จาน ที่เขียนหูหรี สวิตช์ไฟ กล้องบรรจุสุวิทซ์ หูหม้อ หูกระทะ มือจับเตารีด แผ่นเสียง ตัวกวนของเครื่องซักผ้า ที่รองนั่งโถชักโครก เป็นต้น

1. ลักษณะเครื่องอัด (Compression molding machine)

แม่แบบสำหรับกระบวนการอัดพลาสติกนั้นต้องรับการเสียดสีสูงมากจากพลาสติกและสารเติมแต่ง ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำแม่แบบควรทนต่อความดันหรือแรงอัดสูง ทนต่ออุณหภูมิสูง ทนต่อการขีดสี และทนต่อการกัดกร่อน หลักการทำงานของกระบวนการอัด คือ การนำเม็ดหรือผงพลาสติกมาอัดในแม่แบบ (Mold) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ (Cavity) ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ แผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุดซึ่งแผ่นหนึ่งจะสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ (Movable platen) ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะถูกยึดติดกับที่ (Fixed platen) แม่แบบสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกทั้งตัวผู้และตัวเมียจะถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่น

2. วัฏจักรกระบวนการอัด (Compression molding cycle)

กระบวนการอัดเริ่มจากการยึดแม่แบบติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่นแล้วให้ความร้อนแก่แม่แบบตามชนิดของพลาสติก โดยทั่วไปอุณหภูมิแม่แบบสำหรับการอัดเทอร์โมเซตจะเป็นอุณหภูมิ

การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โพลิเมอร์ซึ่งอยู่ในช่วง 140-200 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงเติมเม็ดหรือผงพลาสติกหรือพลาสติกคอมปาวด์โดยปริมาณการเติมต้องเหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน จากนั้นปิดแม่แบบโดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดลงด้วยความดันที่เหมาะสมพลาสติกจะเกิดการหลอมหรืออ่อนตัวไหลเข้าสู่ช่องว่าง (Cavity) ของแม่แบบสำหรับพลาสติกเทอร์โมเซตต้องปล่อยให้อยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมินี้ระยะหนึ่งตามระยะเวลาการสุก (Cure time) ของพลาสติกเทอร์โมเซตนั้นๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเกิดอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นความดันภายในแม่แบบจะลดลงในขณะที่ทำการหล่อเย็นจากนั้นจึงเปิดแม่แบบโดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดขึ้นปลดชิ้นงานออกจากแม่แบบซึ่งในการปลดชิ้นงานออกจะต้องเป็นช่วงที่พลาสติกแข็งตัวเรียบร้อยแล้วเพื่อป้องกันความเสียหายหรือการบิดตัวของชิ้นงาน แล้วเริ่มเติมพลาสติกลงในแม่แบบเพื่อทำงานในวัฏจักรต่อไป

3. ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการอัด

แม้การขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดจะเป็นเทคนิคที่ใช้กันมานานแต่ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้งานสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการอัดมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับกระบวนการแปรสภาพด้วยเทคนิคอื่นๆหลายประการดังนี้

3.1 แม่แบบมีราคาถูกและผลิตได้ง่าย

3.2 มีการสูญเสียวัสดุ น้อยมาก คือมีครีบหรือ Flash เกิดขึ้นน้อยมากประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

3.3 โพลิเมอร์ของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Reorientation) น้อยมากเนื่องจากในระหว่างการอัดเกิดการไหลของพลาสติกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

3.4 เครื่องอัดมีราคาถูกกว่าเครื่องขึ้นรูปพลาสติกชนิดอื่น ๆ

3.5 ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (Weld line) บนชิ้นงานซึ่งเส้นรอยเชื่อมนี้เป็นจุดบกพร่องที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย

3.6 แม่แบบสำหรับกระบวนการอัดไม่มีส่วนของท่อวิ่ง (Runners) ท่อนำ (Sprue) และประตูเข้า (Gates) ทำให้ไม่มีรอยตำหนิบนชิ้นงาน

ถึงแม้ว่ากระบวนการอัดจะมีข้อได้เปรียบดังได้กล่าวมาแล้ว แต่เทคนิคนี้ก็ยังมีข้อเสียเปรียบหลายประการ เช่น

1. วัสดุอยู่ในสถานะของแข็งหรือกึ่งของแข็ง ทำให้เกิดความเครียดภายในแม่แบบสูงมาก ในขณะที่การอัดจึงไม่สามารถใส่วัสดุอื่น ๆ เช่น โลหะ ลงไปในแม่แบบได้เนื่องจากจะทำให้โลหะเกิดการบิดเบี้ยวและแม่แบบเกิดการเสียหายได้จึงทำให้ไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์แบบหุ้มด้วยเทคนิคนี้ได้

2. ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้

3. เวลาของวัฏจักรการผลิต (Cycle time) ค่อนข้างยาวทำให้กำลังการผลิตต่ำ

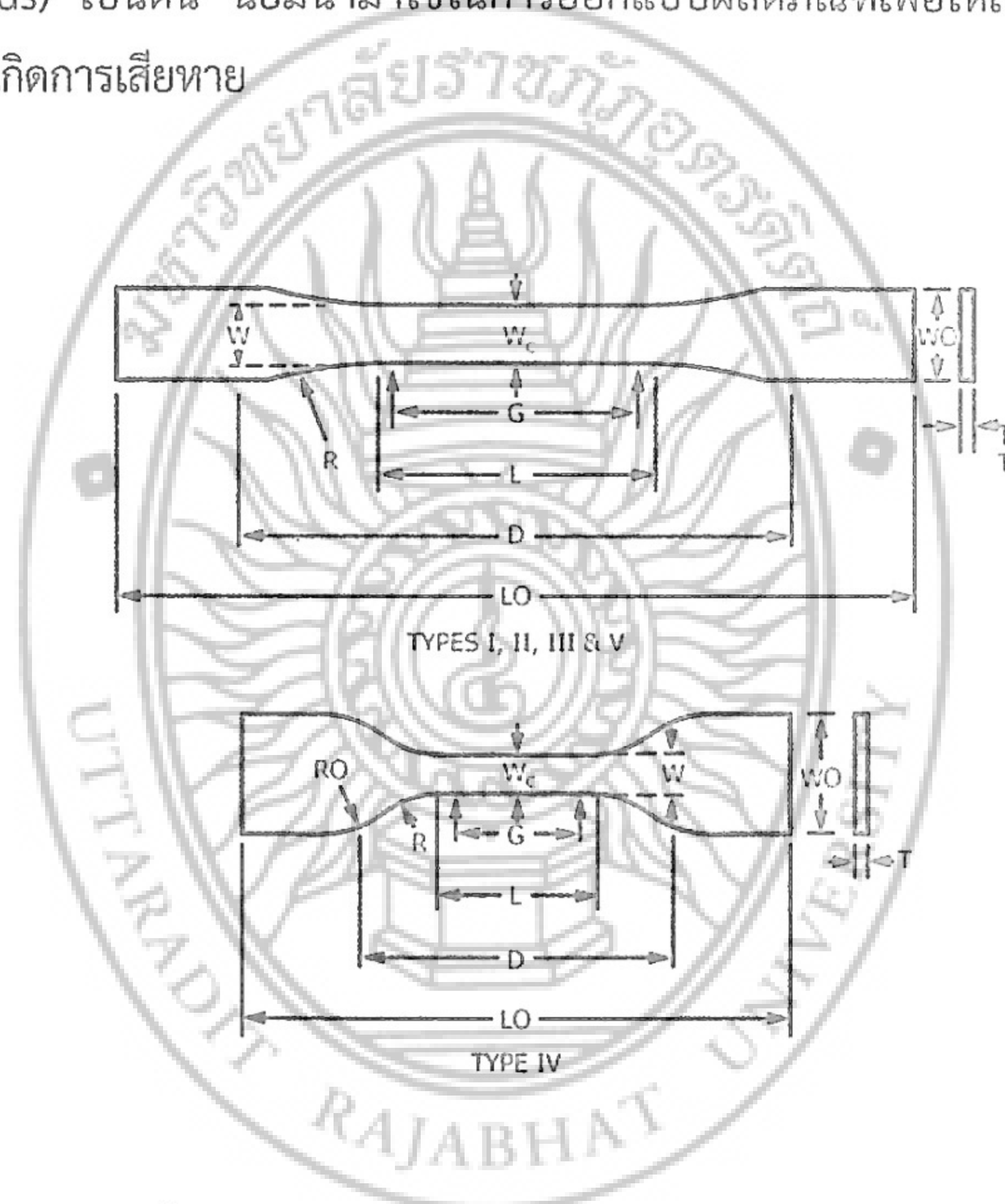
4. การผลิตชิ้นงานที่หนาต้องใช้เวลาานาน

การทดสอบสมบัติทางกล

สำหรับการทดสอบสมบัติทางกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกระแทก และการทดสอบการท่อนว่งไฟมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (จันทร์จิรา อภิรักษ์เมธาวงศ์, 2557)

1. การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลที่สำคัญมากเนื่องจากค่าที่ได้จากการทดสอบแรงดึง เช่น จุดคราก (Yield point) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัสของยัง (Young's modulus) เป็นต้น นิยมนำมาใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์โดยไม่เกิดการเสียหาย



ภาพที่ 1. ลักษณะชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน (ASTM D638)

(ที่มา : จันทร์จิรา อภิรักษ์เมธาวงศ์, 2557)

สำหรับการทดสอบแรงดึงนี้จะวัดระยะการยืดตัวหรือระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ และแรงที่กระทำกับชิ้นงานหรือความเค้นที่เกิดขึ้น เมื่อมีการให้ภาระกรรมกับวัสดุโดยภาระกรรมที่ให้ มีหลายลักษณะด้วยกันไม่ว่าจะเป็นการให้อัตราความเครียด (Strain rate) คงที่หรือความเร็วในการดึง (Speed) คงที่ซึ่งวัสดุที่ต่างกันจะทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันด้วย สำหรับการทดสอบแรงดึงของพอลิเมอร์นั้นมาตรฐานในการทดสอบที่นิยมใช้กันคือมาตรฐาน ASTM D638 เป็นมาตรฐานสำหรับ

การทดสอบพลาสติกที่มีการเสริมแรงและไม่เสริมแรงโดยลักษณะของชิ้นทดสอบตามมาตรฐานแสดงดังภาพที่ 1.

2. การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

การทดสอบแรงกระแทกเป็นการทดสอบโดยให้แรงกระทำชิ้นทดสอบด้วยความเร็วสูงซึ่งความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันออกไปโดยประเมินจากปริมาณของพลังงาน (Impact energy) ที่วัสดุสามารถดูดซับไว้ก่อนที่ชิ้นทดสอบจะเกิดการแตกหักหรือปริมาณพลังงานที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหัก ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกนี้ใช้บ่งชี้ว่าวัสดุเปราะหรือวัสดุเหนียวได้โดยพิจารณาจากค่าพลังงานที่ดูดซับหรือค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระแทก หากพลังงานที่วัสดุนั้นดูดซับได้มีปริมาณมากหรือค่าการต้านทานแรงกระแทกมากแสดงว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุเหนียวซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด การทดสอบแรงกระแทกนั้นมี 2 ลักษณะด้วยกัน คือ แบบ pendulum test และ filling weight test แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงการทดสอบแรงกระแทกแบบ pendulum เท่านั้น



ภาพที่ 2. การทดสอบแรงกระแทกแบบเพนดูลัม
(ที่มา : จันทร์จีรา อภีรักษ์เมธาวงค์, 2557)

การทดสอบแรงกระแทกแบบเพนดูลัม (Pendulum test) จะใช้ค้อนเหวี่ยงลงมากระแทกชิ้นงานพลังงานส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักซึ่งสามารถอ่านค่าพลังงานที่ใช้ไปได้จากเข็มหน้าปัดของเครื่องทดสอบ หากทดสอบแล้วชิ้นงานไม่หักแสดงว่าพลังงานไม่พอให้เพิ่มขนาดพลังงานของเพนดูลัมโดยเพิ่มปริมาณน้ำหนักของหัวค้อนโดยน้ำหนักหัวค้อนมาตรฐานอยู่ที่ 2.7 จูล การทดสอบแรงกระแทกแบบเพนดูลัมสามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy test) และ แบบไอซอด (Izod test) โดยการทดสอบทั้ง 2 ประเภทนี้มีพื้นฐานการทดสอบเช่นเดียวกันแต่แตกต่างกันในลักษณะของการขึ้นทดสอบดังภาพที่ 2.

ชั้นทดสอบของวัสดุพอลิเมอร์นั้นจะสามารถดูดซับแรงกระแทกได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของพลังงานที่ถูกดูดซับเข้าไป หากพลังงานมีการกระจายตัวมากก็จะส่งผลให้ชั้น ทดสอบมีการเสียหายน้อย ดังนั้นการทดสอบแรงกระแทกนี้จะมีการทกรอยบาก (Notch) ทำหน้าที่ เป็นจุดศูนย์รวมแรงเพื่อส่งผลให้เกิดความเค้นหนาแน่น (Stress concentration) ที่บริเวณรอยบากทำ ให้ลดการกระจายของพลังงานเพื่อเหนี่ยวนำให้ชั้นทดสอบเกิดการเสียหายบริเวณนี้ หากไม่มีรอยบาก แรงเค้นจะกระจายไปทั่วชั้นทดสอบทำให้เกิดการเสียหายรูปแบบถาวรจากการตัดมากกว่าที่จะเกิดการ แตกหัก สำหรับการทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอดตามมาตรฐาน ASTM D256-10 กำหนดให้ทำ ขนาดชั้นทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3. โดยที่ความหนาของชั้นทดสอบสามารถอยู่ในช่วง 3.00 – 12.70 mm.



ภาพที่ 3. ขนาดของชั้นทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (ASTM D256-10)

(ที่มา : จันทร์จีรา อภีรักษ์เมธาวงศ์, 2557)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้เป็นการกล่าวอ้างถึงผลงานวิจัยจากนักวิจัยหลายๆท่านทั่วโลกที่เกี่ยวข้องกับ งานวิจัยนี้ซึ่งได้สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยต่าง ๆ ได้ดังนี้

Garcia และคณะ (2009) ศึกษาการเตรียมไม้เทียมจากพลาสติกโพลีเอททีลีนความหนาแน่น สูงกับไฟเบอร์ไม้โดยเติมสารหน่วงไฟ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต และแอมมोनียมไฮดรอกไซด์ และ ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการต้านไฟ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเติมปริมาณไฟเบอร์ไม้เพิ่มขึ้นสมบัติ เชิงกล ได้แก่ความแข็งแรงดึง และด้านการอัดแผ่นไม้ดีขึ้น สำหรับผลการลुकติดไฟบนชิ้นงานพบว่าการ เติมสารหน่วงไฟทั้งสองสามารถทำให้การลुकติดไฟบนชิ้นงานดับได้ด้วยตัวเอง

Baysala และคณะ (2007) ศึกษาการเตรียมไม้พลาสติกไวนิลโมโนเมอร์กับกระพีไม้สน

สก็อตในอัตราส่วน 50 : 50 และเติมส่วนผสมกรดบอริกที่ความเข้มข้น 1% พบว่าส่วนผสมของกรดบอริก และบอแรกซ์ สามารถยับยั้งและป้องกันเชื้อราในไม้พลาสติกได้อย่างดี และปรับแก้ไขสมบัติการต้านไฟของ WPCs ให้ดีขึ้น แต่ค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นลดลง

Suppakram และคณะ (2009) ศึกษาผลการเติมสารหน่วงไฟแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิงบอเรต ในวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกที่เตรียมจากพลาสติก PP กับปานศรนารายณ์ พบว่าการเติมสารหน่วงไฟสามารถปรับแก้ไขการต้านไฟได้ดีขึ้น แต่สมบัติเชิงกลมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการเตรียมไม้พลาสติกที่ไม่ได้เติมแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิงบอเรต

Naumann และคณะ (2012) ศึกษาการเติมสารหน่วงไฟได้แก่ กราไฟต์ และแอมโมเนียม-พอลิฟอสเฟตในไม้เทียมเพื่อศึกษาเปรียบเทียบในสมบัติที่เกี่ยวข้องกับสมบัติการต้านไฟ และการสลายเชื้อรา การศึกษาพบว่า การเติมกราฟไฟต์ใน WPCs จะทำให้มีสมบัติการต้านไฟ และการลดเชื้อราในไม้เทียมได้ดีกว่าการเติมแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต

Ayrlmis และคณะ (2012) ทำการวิจัยผลของการเติมสารหน่วงไฟได้แก่ บอแรกซ์ ซิงค์บอเรต โมโน และไอแอมมอเนียมพอสเฟตในไม้เทียมที่ทำจากพลาสติกโพลีโพรพิลีนกับไม้พื้นโดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านไฟ ผลการศึกษาพบว่าสารต้านไฟที่มีสารประกอบพอสเฟต มีสมบัติการต้านไฟได้ดีกว่าสารประกอบโบรอน แต่ไม้เทียมที่มีสารประกอบโบรอนจะให้สมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติต้านทานแรงดึง และสมบัติต้านแรงกระแทกได้ดีกว่า

Zhang ZX และคณะ (2012) ศึกษาการเตรียมไม้เทียมพลาสติก PP กับไฟเบอร์ไม้ โดยเติมสารหน่วงไฟแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต และซิลิกา โดยศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติต้านไฟด้วยวิธี LOI, TGA และ CONE ผลการศึกษาพบว่าสารหน่วงไฟซิลิกามีสมบัติการต้านไฟดีกว่าสารหน่วงไฟแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต สำหรับสมบัติเชิงกลความแข็งแรงดึงมีค่าลงเมื่อเติมสารหน่วงไฟมากขึ้น โดยที่ไม้เทียมที่เติมสารหน่วงไฟแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตจะมีสมบัติการทนแรงดึงน้อยกว่าไม้เทียมที่เติมสารหน่วงไฟซิลิกา

Stark และคณะ (2010) ศึกษาการเตรียมไม้เทียมจากพลาสติกโพลีเอทิลีน กับไม้พื้นโดยเติมหน่วงไฟได้แก่ สารแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต และสารหน่วงไฟที่มีองค์ประกอบของโบรมีน และศึกษาสมบัติการต้านไฟโดยวิธี LOI และ CONE เปรียบเทียบกับไม้เทียมที่ไม่ได้เติมสารหน่วงไฟ จากการศึกษาพบว่าไม้เทียมที่มีสารแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียมพอลิฟอสเฟตมีความสามารถในการต้านไฟได้ดีกว่าไม้เทียมที่มีสารหน่วงไฟที่มีสารประกอบของโบรมีน และได้ดีกว่าไม้เทียมที่ไม่ได้เติมสารหน่วงไฟ

Kamdern และคณะ (2004) ได้ศึกษาคุณสมบัติของ WPCs จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วกับผงไม้ที่ได้จากต้นสนที่มีอายุมากกว่า 21 ปีและผ่านการ Treat ด้วย Chromated copper arsenate (CCA) จากนั้นผสมด้วย HDPE ที่รีไซเคิล ด้วยอัตราส่วน 50:50 โดย

น้ำหนักแล้วขึ้นภาพด้วยวิธีอัดด้วยความร้อน (Compression molding) นำมาทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพ พบว่าไม้วัสดุที่ได้มีสมบัติการต้านแรงดัดที่สูงกว่าไม้สนที่ไม่ได้ผ่านการ Treat ด้วย CCA และพาร์ติเคิลบอร์ดที่ใช้ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เป็นตัวประสาน อีกทั้ง WPCs ที่ได้มีค่ามอดูลัส ยืดหยุ่นและมอดูลัสแตกร้าสูงกว่าด้วย

Gecoge และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ LDPE ที่เสริมด้วยเส้นใยสับปะรด โดยมีการเปรียบเทียบการเติม 2 วิธีคือ การผสมโดยทำเป็นสารละลาย (Solution mixing) และผสม ขณะหลอม (Melt mixing) พบว่าการเตรียมทั้ง 2 วิธีนี้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสจะเพิ่มขึ้น ตามปริมาณเส้นใย แต่การเตรียมแบบสารละลายจะให้ค่าที่สูงกว่า

Joseph และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาสมบัติแรงดึง (Tensile properties) ของ WPCs ที่ เกิดจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal fiber) พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ได้แก่ กระบวนการผสมเส้นใยกับพอลิเมอร์โดยที่การผสมพอลิเมอร์ กับเส้นใยแบบหลอมเหลว (Melt mixing) ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยลงไปจะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของ WPCs มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง

Xian และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาเส้นใยไม้ (Bamboo) กาบมะพร้าว (Coconut husk, Coir) และ หญ้า March (Phragmites) โดยใช้เสริมแรงกับพอลิเมอร์ เช่น Epoxy, Resorcinol Formaldehyde (RF), Urea Formaldehyde (UF) พบว่าความแข็งแรงในการเสริมแรงเรียงลำดับ จากมากไปน้อยได้เป็นดังนี้ คือ ไม้เส้นยาว (Long bamboo fiber) ไม้เส้นสั้น (Short bamboo fiber) ไม้ขี้ (Chipped bamboo fiber) กาบมะพร้าว (Coir fiber) และหญ้า (March) ตามลำดับ

ณัฐชัญญา ธนวัฒนาศิริกุล (2554) ได้ศึกษาและผลิตไม้พลาสติกจากไม้ปาล์มและพลาสติก เหลือใช้และใช้สารเติมแต่งคือมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ทำการขึ้นรูปโดยวิธีอัดร้อนที่อุณหภูมิ 130 150 และ 170 องศาเซลเซียส ความดัน 2500 psi โดยผสมผงไม้ต่อผงพลาสติก และมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ในอัตราส่วน 50:47:03 40:57:03 และ 30:67:03 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปทดสอบสมบัติทางกลพบว่า สมบัติทางกลของไม้พลาสติกมีค่าเพิ่มตามปริมาณสัดส่วนการเพิ่มของเศษผงพลาสติกและอุณหภูมิที่ ขึ้นรูป โดยพบว่าที่สัดส่วน 30:67:03 และอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติเชิงกลดีที่สุด

ธนาธิวัฒน์ นระประทีปต์ (2550) ได้ทำการศึกษาผลของสารช่วยให้เข้ากัน และสารประสาน ไซเลนของพอลิเมอร์เชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยปอแก้วและป่านศรนารายณ์ โดยการ ใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิพรอพิลีน ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิพรอพิลีนที่ใช้คือ 1,2,4,6,8 และ 10 ส่วนใน 100 ส่วนของพอลิเมอร์เชิงประกอบ โดยปริมาณที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์ เชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยปอแก้ว และพอลิเมอร์เชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีน กับป่านศรนารายณ์ คือ 2 ส่วน ใน 100 ส่วนของพอลิเมอร์เชิงประกอบ

สัญญา แก้วเกตุ และคณะ (2544) ทำการศึกษาผสมเกลบกับพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวและทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่เตรียมได้ สำหรับพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัวนั้นได้มาจากการสังเคราะห์พอลิพรอพิลีนมาลีเอทาเลต ซึ่งเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างพรอพิลีนไกลคอลกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพาลิกแอนไฮไดรด์ แล้วนำมาผสมเกลบขนาด 0.25 0.18 และ 0.125 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนเกลบต่อพอลิเอสเทอร์ 70:30 60:40 50:50 และ 40:60 โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีอัดร้อน และพบว่าวัสดุผสมที่ได้มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ความแข็งแรงดึง และความทนแรงกระแทก มีแนวโน้มสูงสุดเมื่อมีส่วนผสมของเกลบและพอลิเอสเทอร์เป็น 50:50

รัชดา ขวัญตน (2541) ได้ทำการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจากขวดน้ำและเส้นใยอ้อย โดยใช้เปรียบเทียบสารช่วยการยึดติด 2 ชนิด ได้แก่ PE-g-AA และ PE-g-MAH จากการทดลองพบว่าการเติมขานอ้อยลงไปคอมโพสิตจะทำให้คอมโพสิตมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงการกระแทก ลดลง และคอมโพสิตที่ใช้สารช่วยยึดติดระหว่าง PE-g-AA และ PE-g-MAH จะให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน

เฉลิมพล อิทธิวิวัฒน์ และสกุล บรรจงวุฒิ (2537) ได้ทำการศึกษาเส้นใยเซลลูโลส ได้แก่หญ้าสลาบลวง (*Typha angustifolia*) เป็นสารเสริมแรงในพอลิพรอพิลีนโดยผสมเส้นใยแก้วและสาร Silane เพื่อเป็นสารเชื่อมโยง (Coupling agent) จากการทดลองพบว่าเส้นใยช่วยเพิ่มความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงการกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตแต่มีแนวโน้มการลดลงของค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

พิชัย มนัสพัฒนา และศิริพงศ์ โรจน์วีระ (2533) ได้ทำการศึกษาขุยมะพร้าวและฟางข้าว กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิพรอพิลีน ผลวิจัยพบว่าขุยมะพร้าวทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิพรอพิลีนมีค่ามอดูลัสสูงขึ้นค่าความแข็งแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น และฟางข้าวทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสสูงขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

สาระสำคัญของบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการทำงานทั้งหมด ซึ่งจะเริ่มต้นจากวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลองเริ่มตั้งแต่กระบวนการการผสมวัสดุด้วยเครื่องผสมตามอัตราส่วนและอุณหภูมิที่กำหนด เมื่อได้วัสดุแล้วจึงนำไปเข้าสู่กระบวนการต่อไปคือ กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานตามแบบพิมพ์ด้วยความร้อน เมื่อได้ชิ้นงานแล้วจึงนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM

วัสดุอุปกรณ์

1. วัสดุ

1.1 LLDPE ได้มาจากถุงพลาสติกที่หาซื้อจากร้านสรรพสินค้าแล้วนำมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ พอประมาณที่จะสามารถนำเข้าเครื่องปั่นเพื่อจะผ่านกระบวนการปั่นเพื่อให้มีขนาดเล็กลงโดย LLDPE จะทำหน้าที่เป็นส่วนของเมทริกซ์ให้กับ WPCs

1.2 ไยมะพร้าวได้จากท้องถิ่นอุดรดิตถ์นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้น โดยขี้เลื่อยไม้จะทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับ WPCs

1.3 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ จาก ACI Labscan ใช้เป็นสารหน่วงไฟ

2. อุปกรณ์

2.1 เครื่องปั่นใช้เป็นเครื่องผสมเพื่อให้วัสดุเข้าผสมรวมตัวกันตามอัตราส่วนที่ต้องการ และมีขนาดเล็กพอที่สามารถนำไปหลอมเบื้องต้น และทำเป็นชิ้นงานได้

2.2 เครื่องชั่งดิจิตอล

2.3 แบบพิมพ์ชิ้นงาน

2.4 เตารอบไฟฟ้า

2.5 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) ใช้ทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึง

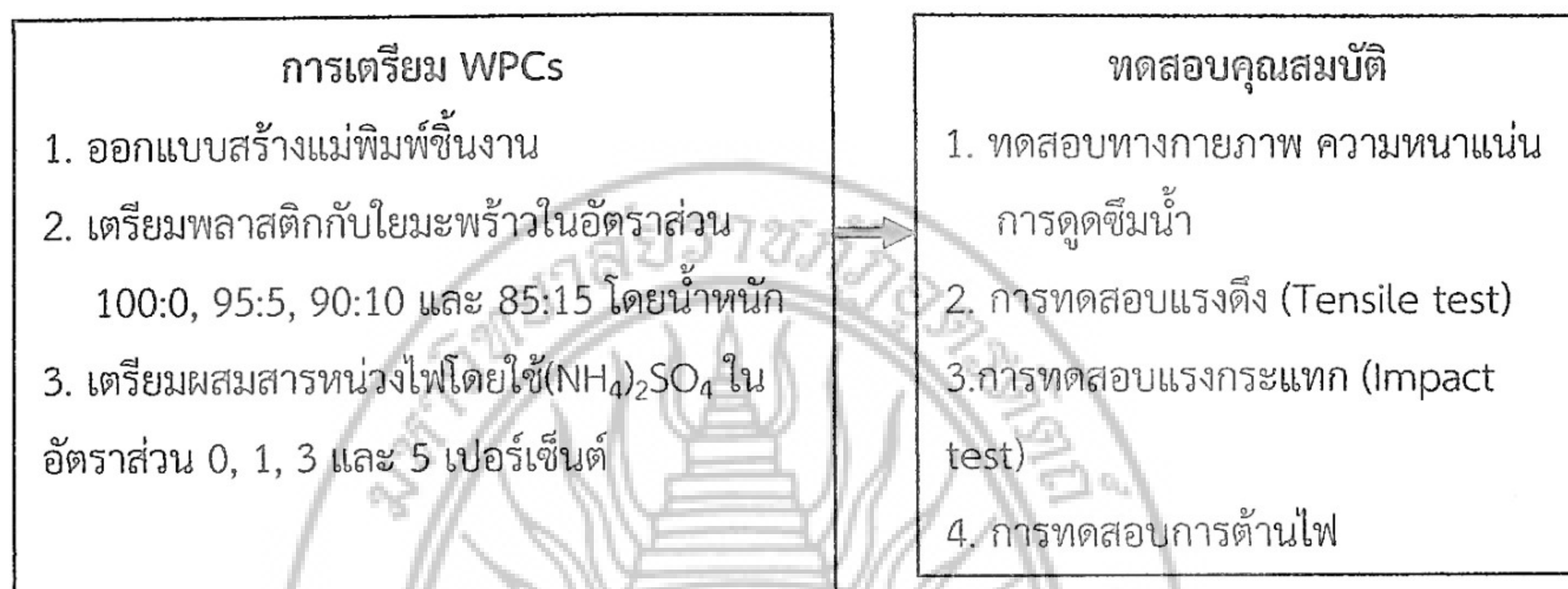
2.6 เครื่องทดสอบสมบัติการต้านไฟ

2.7 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Basic Pendulum Impact, BPI) ใช้ทดสอบการดูดซับพลังงานกระแทกโดยการทดลองเป็นแบบ Izod

2.8 ถูมือกันความร้อน ใช้ในกระบวนการอัด เนื่องจากมีอุณหภูมิสูงในการหีบชิ้นงาน หรือแม่พิมพ์ต้องใช้ถูมือกันความร้อน

แผนผังแสดงกระบวนการทำงาน

สามารถแสดงขั้นตอนกระบวนการทำงานได้ตามแผนภาพดังนี้



วิธีการทดลอง

1. การเตรียมวัสดุ

1.1 การเตรียมพลาสติก LLDPE หลังจากได้ถุงพลาสติกแล้วต้องนำมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ พอประมาณที่จะสามารถนำเข้าเครื่องปั่นผสมเพื่อทำให้มีขนาดเล็กลงแสดงในภาพที่ 4ก

1.2 การเตรียมใยมะพร้าว หลังจากได้ใยมะพร้าวมาแล้วขั้นตอนนำมาผึ่งแดดให้แห้งก่อนแล้วจึงไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้นแสดงในภาพที่ 4ข



ภาพที่ 4. ก แสดงพลาสติก LLDPE และ ข. ใยมะพร้าว

2. ขั้นตอนการผสมเพื่อทำคอมปาวด์

2.1 ชั่งโยมะพร้าว และพลาสติก LLDPE และ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้

2.2 นำส่วนผสมลงไปในเครื่องปั่นผสมใช้เวลาผสมทั้งหมด 10 นาที

2.3 นำส่วนผสมที่ผสมแล้วเข้าเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ส่วนผสมอ่อนตัวแล้วนำออกมาใส่แบบพิมพ์เพื่อขึ้นรูปโดยแบบพิมพ์เพื่อขึ้นรูปขึ้นงานทำจากสแตนเลสขึ้นรูปให้มีขนาด $8 \times 30 \times 0.4$ เซนติเมตร ที่ทำให้ได้ลักษณะรูปแบบของชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และการทง่วงไฟ เป็นไปตามมาตรฐานต่างๆตามต้องการแบบพิมพ์มีลักษณะดังภาพที่ 5 เมื่อใส่แบบพิมพ์แล้วจึงนำเข้าเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำออกเตาไฟฟ้าทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่อไป



ภาพที่ 5. แสดงแบบพิมพ์ทำจากสแตนเลส

การทดสอบ

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของ WPCs ทำการทดสอบมาตรฐานต่างๆดังนี้

1. การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ

การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพประกอบด้วย การหาค่าความหนาแน่นใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D792 และการทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570

2. ทดสอบสมบัติเชิงกล

2.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 การทดสอบจะใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) ใช้ตัวอย่าง 5 ชิ้น ในการทดสอบแต่ละครั้งโดยตัวอย่างชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์โดยลักษณะของชิ้นงานตามมาตรฐานแสดงดังภาพที่ 6 เครื่องทดสอบ Tensile ยี่ห้อ Hounsfield model H50KS



ภาพที่ 6. เครื่องมือทดสอบแรงดึง

2.2 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) เป็นการทดสอบแบบไอซอด (Izod test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 การทดสอบแต่ละครั้งใช้ตัวอย่าง 5 ชิ้น โดยใช้เครื่องทดสอบ Impact Izod ยี่ห้อ GOTECH model GT-7045 ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7. เครื่องมือสำหรับทดสอบแบบไอซอด (Izod test)

3. การทดสอบการหน่วงไฟ (Flammability test)

การทดสอบการลามไฟจะทดสอบตามมาตรฐาน UL-94 แบบแนวนอน (Horizontal Burning Test, HB) โดยชิ้นทดสอบมีขนาด 125x12.7 มิลลิเมตร ความหนา 3.2 มิลลิเมตร โดยจะมีการจับยึดชิ้นทดสอบในลักษณะแนวนอนแล้วจุดไฟจากตะเกียงด้วยเปลวไฟสีฟ้าโดยที่ตะเกียงทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ การเผาชิ้นทดสอบแสดงดังภาพที่ 8. สำหรับการลนไฟที่ชิ้นทดสอบจะใช้เวลา 30 วินาทีเท่านั้นหลังจากนั้นรอให้ชิ้นทดสอบเผาถึงตำแหน่งอ้างอิงที่ 1 แล้วจับเวลาไปจนกว่าชิ้นทดสอบจะเผาไปยังตำแหน่งอ้างอิงที่ 2 จากนั้นทำการหาอัตราการลามไฟที่เกิดขึ้นในช่วง 75 มิลลิเมตร



ภาพที่ 8. ลักษณะการทดสอบการลามไฟตามแนวนอน
(ที่มา : จันทร์จีรา อภิรักษ์เมธาวงศ์, 2557)

บทที่ 4

ผลงานวิจัย และการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเตรียม WPCs จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และใยมะพร้าวอัตราส่วนต่างๆที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกล และสมบัติทางการหน่วงไฟโดยใช้ใยมะพร้าวเป็นตัวเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยมี LLDPE เป็นเมทริกซ์ โดยผลจากการศึกษาสามารถเขียนเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ ดังนี้

ผลการวิจัย

WPCs. เตรียมที่อัตราส่วน LLDPE : เส้นใยมะพร้าวต่างๆนำมาอัดขึ้นรูปโดยใช้วิธีการขึ้นรูปแบบอัดแผ่นในแบบทิมพ์ขนาด $8 \times 30 \times 0.4$ เซนติเมตร ได้ชิ้นงานเป็นแผ่นดังลักษณะตัวอย่างในภาพที่ 9 โดยแผ่นสีขาวเป็นแผ่น LLDPE ที่ไม่ได้ผสมเส้นใยมะพร้าวส่วนแผ่นสีน้ำตาลจะเป็นแผ่น LLDPE ผสมเส้นใยมะพร้าวที่อัตราส่วนต่างๆและถูกนำมาทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และการลามไฟต่อไป สำหรับ LLDPE ที่ไม่ได้ผสมเส้นใยมะพร้าวไว้สำหรับเปรียบเทียบได้วิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆได้ค่าต่างๆดังต่อไปนี้ ค่าความหนาแน่น 880.99 kg/m^3 ค่าการดูดซึมน้ำ 0.10% ค่าความแข็งแรงดึง 169 MPa ค่าความแรงกระแทก 40.75 kJ/m^2 และค่าอัตราการลามไฟ 15.89 mm/min .

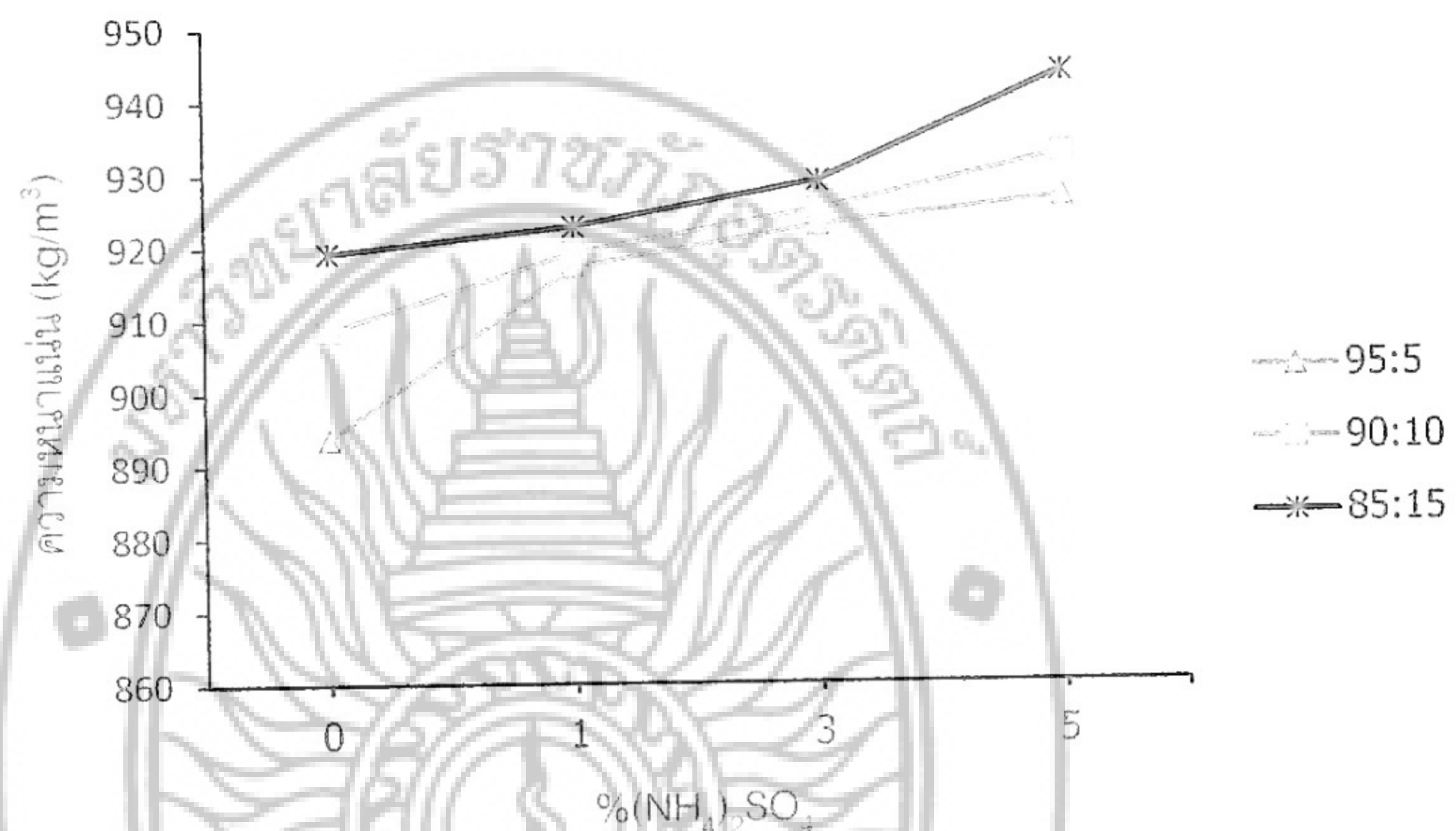
ภาพที่ 9. ลักษณะตัวอย่างชิ้นงาน WPCs ที่เตรียมได้

1. ความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D792 เมื่อพิจารณาชิ้นงาน WPCs. ที่แต่ละอัตราส่วนต่างๆพบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวและสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 10. โดยที่ค่าความหนาแน่นมากที่สุดคือ 944 kg/m^3 ที่อัตราส่วนของ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว : $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ คือ 85:15:5 และสำหรับค่าความหนาแน่นต่ำสุด

คือ 893 kg/m^2 อยู่ที่อัตราส่วน 95:5:0 พิจารณาที่ผสมในอัตราส่วนหลักต่างๆตามเส้นกราฟพบว่า เส้นกราฟที่อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวมากมีค่าความหนาแน่นมากขึ้น โดยที่ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว คือ 85 : 15 มีค่าความหนาแน่นมากที่สุดรองลงมา 90 : 10 และ 95 : 5 ตามลำดับ และเช่นเดียวกันได้เตรียมพลาสติกที่ไม่ได้ผสมเส้นใยมะพร้าว (LLDPE) เตรียมไว้เพื่อสำหรับเปรียบเทียบ พบว่ามีค่าความหนาแน่น 880.99 kg/m^2 ซึ่งมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากพลาสติกที่ผสมเส้นใยมะพร้าวในทุกอัตราส่วน

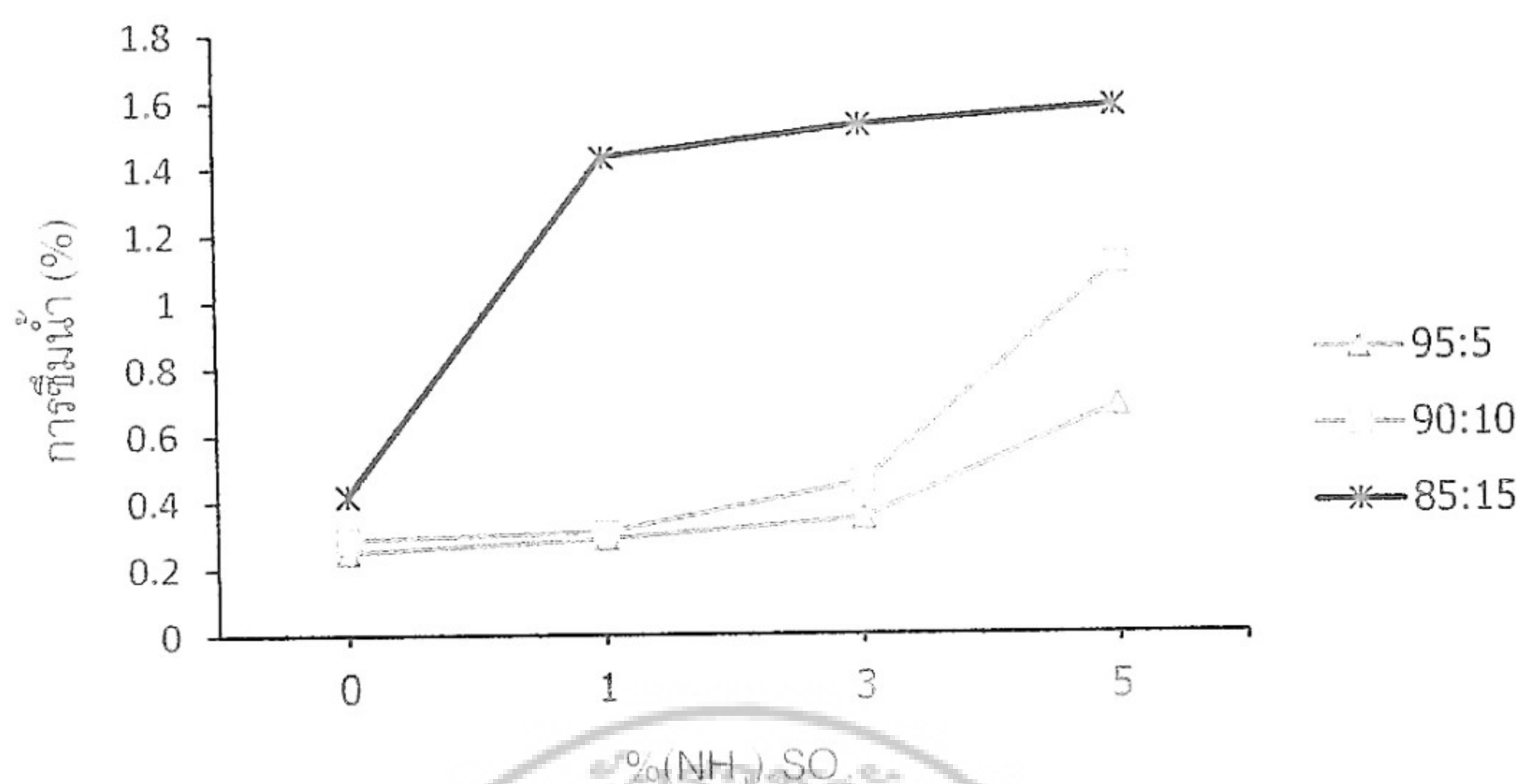
;



ภาพที่ 10. การทดสอบความหนาแน่นของ WPCs.

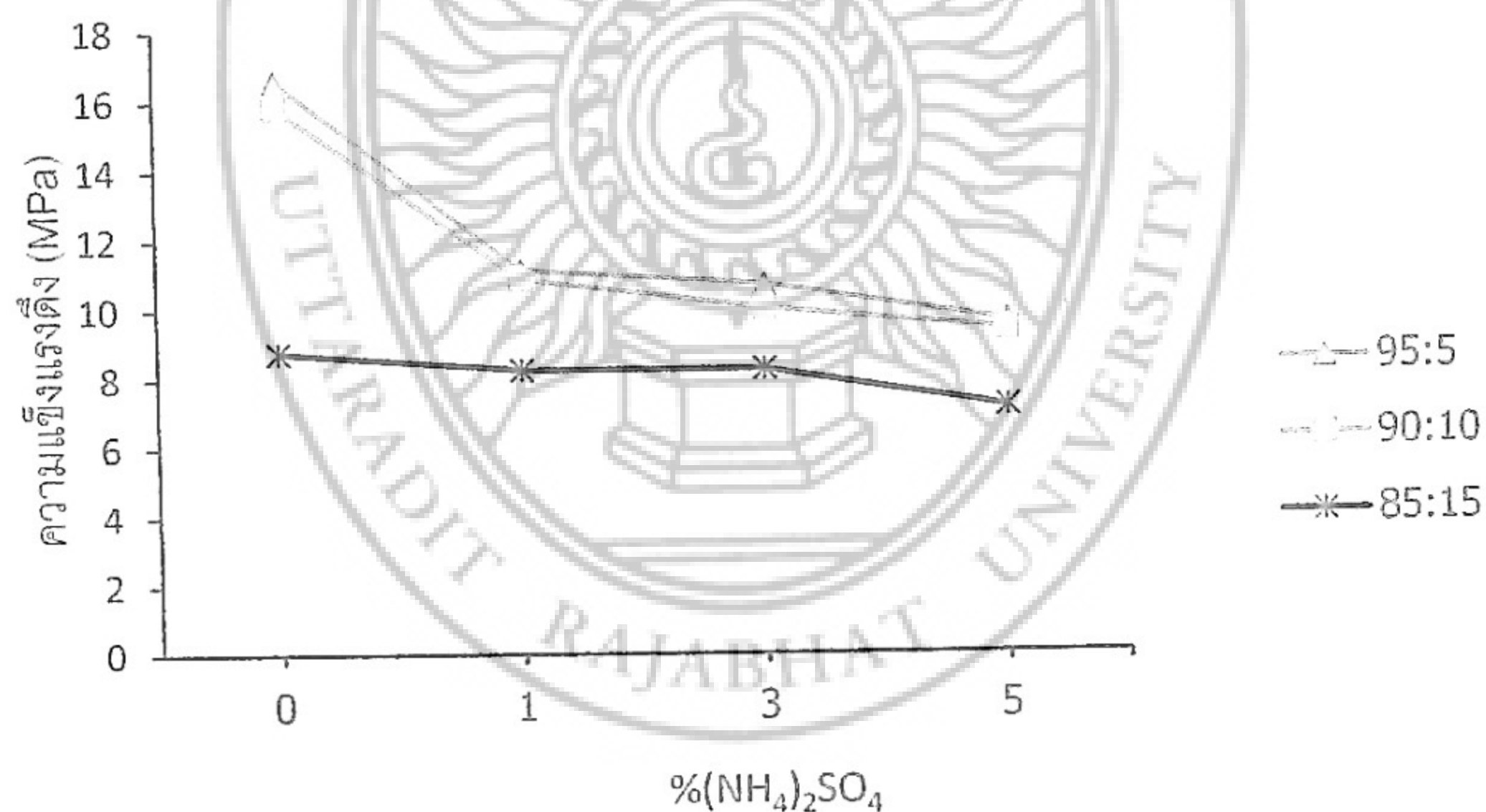
2. การซึมน้ำ

สำหรับการทดสอบการซึมน้ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การซึมน้ำของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวและสารทรวงไฟที่ผสมใน WPCs เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 11. โดยที่ค่าการซึมน้ำมากที่สุดคือ 1.60% ที่อัตราส่วนของ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว : (NH₄)₂SO₄ คือ 85:15:5 และสำหรับค่าการซึมน้ำต่ำสุดคือ 0.25% อยู่ที่อัตราส่วน 95:5:0 พิจารณา WPCs ในอัตราส่วนหลักต่างๆตามเส้นกราฟพบว่าเส้นกราฟที่อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวมากจะมีค่าการซึมน้ำมากขึ้นโดยที่ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว คือ 85 : 15 มีค่าการซึมน้ำมากที่สุดรองลงมา 90 : 10 และ 95 : 5 ตามลำดับ สำหรับ LLDPE มีค่า 0.10% มีค่าการซึมน้ำต่ำกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากพลาสติกที่ผสมเส้นใยมะพร้าวในทุกอัตราส่วน



ภาพที่ 11. การทดสอบการซึมน้ำของ WPCs.

3. ความแข็งแรงดึง



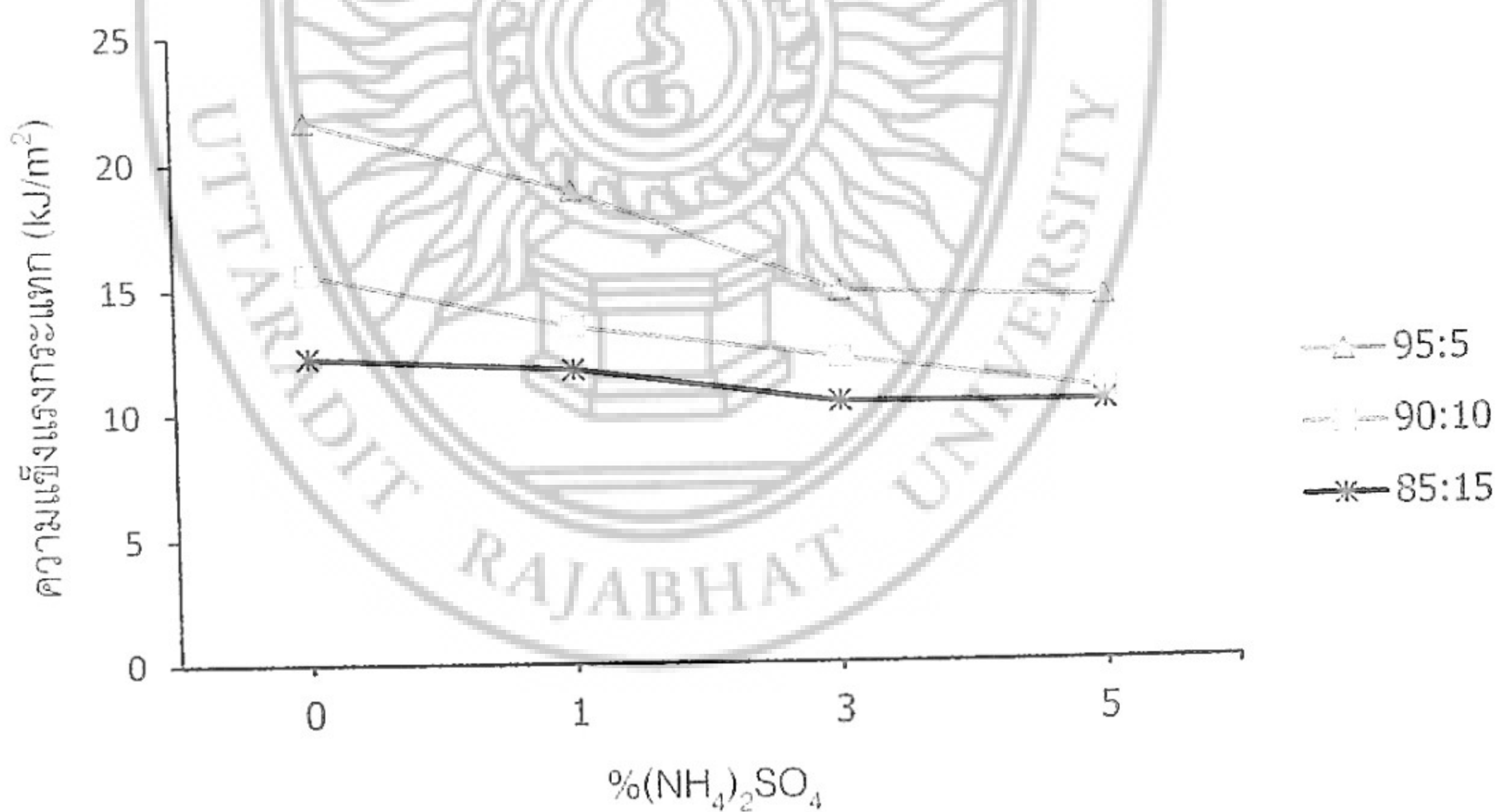
ภาพที่ 12. การทดสอบความแข็งแรงดึงของ WPCs.

การทดสอบความแข็งแรงดึงของ WPCs ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวและสารท่วงไฟเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 12. โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดคือ 16.60 MPa ที่อัตราส่วนของ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว : $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ คือ 95:5:0 และสำหรับค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุดคือ 7.10 MPa อยู่ที่อัตราส่วน 85:15:5 และ WPCs พิจารณาที่ผสมในอัตราส่วนหลักต่างๆพบว่าเส้นกราฟที่อัตราส่วนของเส้นใย

มะพร้าวมากจะมีค่าความแรงดิ่งต่ำลงโดยที่ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว คือ 95 : 5 มีค่าความหนา แข็งแรงดิ่งมากที่สุด รองลงมา 90 : 10 และ 85 : 15 ตามลำดับ สำหรับ LLDPE มีค่า 169 MPa ซึ่งมี ค่าความแข็งแรงดิ่งสูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากพลาสติกที่ผสมเส้นใยมะพร้าวในทุกอัตราส่วน

4. ความแข็งแรงกระแทก

การทดสอบแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 พบว่าค่าแรงกระแทกของชิ้นงานมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวและสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้นดัง แสดงในภาพที่ 13 โดยที่ค่าความแข็งแรงกระแทกมากที่สุดคือ 21.64 kJ/m^2 ที่อัตราส่วนของ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว : $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ คือ 95:5:0 และสำหรับค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำสุดคือ 10.27 kJ/m^2 อยู่ที่อัตราส่วน 85:15:5 และ WPCs พิจารณาที่ผสมในอัตราส่วนหลักต่างๆพบว่าเส้นกราฟที่อัตราส่วน ของเส้นใยมะพร้าวมากจะมีค่าความแข็งแรงกระแทกต่ำลง โดยที่ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว คือ 95 : 5 มีค่าความแข็งแรงกระแทกมากที่สุด รองลงมา 90 : 10 และ 85 : 15 ตามลำดับ สำหรับ LLDPE มีค่า 40.75 kJ/m^2 ซึ่งมีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากพลาสติกที่ผสมเส้นใยมะพร้าว ในทุกอัตราส่วน

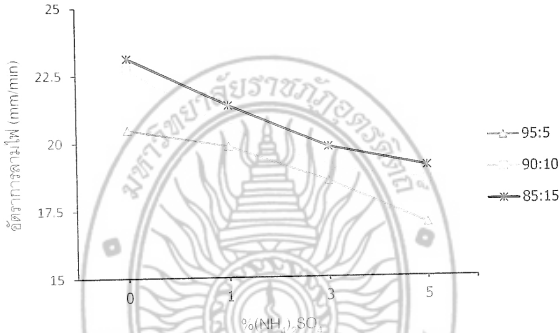


ภาพที่ 13. การทดสอบความแข็งแรงกระแทกของ WPCs.

5. การลามไฟ

การทดสอบการลามไฟของวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกทดสอบตามมาตรฐาน UL94 พบว่า อัตราการลามไฟของชิ้นงานมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 14 โดย

ที่ค่าอัตราการลามไฟมากที่สุดคือ 23.15 mm./min. ที่อัตราส่วนของ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว : $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ คือ 85:15:0 และสำหรับค่าอัตราการลามไฟน้อยที่สุดคือ 17.01 mm./min. อยู่ที่อัตราส่วน 95:5:5 พิจารณา WPCs ในอัตราส่วนหลักต่างๆพบว่าเส้นกราฟที่อัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวมากจะมีค่าอัตราการลามไฟมากขึ้น โดยที่ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว คือ 85 : 15 มีค่าอัตราการลามไฟมากที่สุด รองลงมา 90 : 10 และ 95 : 5 ตามลำดับ สำหรับ LLDPE มีค่า 15.89 mm./min.



ภาพที่ 14. การทดสอบการลามไฟของ WPCs.

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการทดสอบความหนาแน่นพบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน WPCs มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นและจะมีค่าความหนาแน่นมากกว่าแผ่นเทียบ LLDPE ที่ไม่ได้ผสม จะเห็นได้จากเส้นกราฟตามภาพที่ 10. โดยที่อัตราส่วนของ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว 85 : 15 มีค่าความหนาแน่นมากที่สุดคือ 944.17 kg/m^3 ในขณะที่ อัตราส่วน 90 :10 และ 95:5 มีค่าลดลงมาเท่ากับ 908.56 และ 893.70 kg/m^3 ตามลำดับ แสดงว่าขณะที่ LLDPE หลอมละลาย (พอลิเมอร์เมทริกซ์) ปริมาณของเส้นใยมะพร้าวจำนวนมากเข้าไปแทรกและสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับพอลิเมอร์เมทริกซ์มีมากขึ้นจึงทำให้รูพรุนหรือช่องว่างในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีจำนวนลดลง ดังนั้นชิ้นงานจึงมีความหนาแน่นมากขึ้นสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mohammed และคณะ, (2013) และ Kazayawoko และคณะ, (1999) ที่พบว่าระหว่างการผลิตชิ้นรูป WPCs. ที่อุณหภูมิสูงไฟเบอร์ธรรมชาติจะปลดปล่อยไอน้ำขณะที่พลาสติกสลายตัวจะให้สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่ายและนำไปสู่

การเกิดช่องว่างภายในหรือรูพรุนขึ้น และเช่นเดียวกับ Chen และคณะ, (2006) เตรียม WPCs. จากพลาสติกความหนาแน่นสูง (HDPE) และอนุภาคไม้ที่เหลือทิ้งรายงานว่าคุณสมบัติของไม้ที่เล็กๆจะทำให้พื้นผิว WPCs. บางชิ้นและทำให้เกิดอัตราส่วนการอัดแน่นได้สูงกว่า ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้ WPCs ที่เตรียมจากงานวิจัยนี้มีความหนาแน่นสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณา WPCs. ที่เติม $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ พบว่าความหนาแน่นสัมพันธ์โดยตรงกับเปอร์เซ็นต์การเติม $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ เช่นเส้นกราฟ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว ที่ 90 :10 จะพบว่ามีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น 908.56, 919.31, 925.18 และ 932.89 kg/m^3 ที่เปอร์เซ็นต์ของ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ที่ 0, 1 3 และ 5 ตามลำดับ อธิบายได้ว่าขณะที่ LLDPE หลอมละลายปริมาณของ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ จำนวนมากเข้าไปแทรกในช่องว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์มีมากขึ้นจึงทำให้การยึดเกาะผิวหน้าระหว่างเส้นใยมะพร้าวและพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ต่อเนื่องจึงทำให้มีช่องว่างเล็กๆเกิดขึ้นซึ่งทำให้แก๊สใน WPCs หลุดลอดออกมาได้อย่างรวดเร็วปริมาณของ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ จำนวนมากนี้จะเข้าไปอุดช่องว่างที่เกิดขึ้นจึงมีผลให้ความหนาแน่นของ WPCs มีค่าเพิ่มขึ้นผลนี้สอดคล้องกับการรายงานการวิจัยของ Zhang และคณะ, (2012)

สำหรับการทดสอบการซึมน้ำพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การซึมน้ำของชิ้นงาน WPCs มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นและจะมีค่าการซึมน้ำมากกว่าแผ่นเทียบ LLDPE จะเห็นได้จากเส้นกราฟตามภาพที่ 11. โดยที่อัตราส่วนของ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว 85 : 15 มีค่าเปอร์เซ็นต์การซึมน้ำมากที่สุดคือ 1.6 ในขณะที่อัตราส่วน 90 :10 และ 95:5 มีค่าลดลงมาเท่ากับ 0.29 และ 0.25 ตามลำดับ จากรายงานการวิจัยของ Clemons, (2002) กล่าวว่าองค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติแล้วเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งจัดเป็นหมู่ของไฮดรอกซิลที่พร้อมจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้เป็นอย่างดีโดยเข้าไปสร้างพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับโมเลกุลน้ำ ดังนั้นเมื่อเส้นใยมะพร้าวมีปริมาณมากขึ้นจึงมีปริมาณพันธะมากขึ้นดังนั้นจึงสามารถดูดซับน้ำได้เป็นอย่างดีในระหว่างการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ เช่นเดียวกันผลนี้สอดคล้องกับการรายงานการวิจัยของ Xiang และคณะ, (2014), Chen และคณะ, (2006), Rahman และคณะ, (2013) และ Adhikary และคณะ, (2008) ที่เตรียมวัสดุเชิงประกอบจากพลาสติก และอนุภาคไม้ และเมื่อพิจารณา WPCs.ที่เติม $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ พบว่าเปอร์เซ็นต์การซึมน้ำสัมพันธ์โดยตรงกับเปอร์เซ็นต์การเติม $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ เช่น เส้นกราฟ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว ที่ 85 :15 จะพบว่ามีเปอร์เซ็นต์การซึมน้ำเพิ่มขึ้น 0.42, 1.44, 1.54 และ 1.60 ที่เปอร์เซ็นต์ของ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0, 1 3 และ 5 ตามลำดับ อธิบายได้ว่าเนื่องจากปริมาณของอนุภาค $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ จำนวนมากเข้าไปแทรกในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีมากขึ้นทำให้การยึดเกาะผิวหน้าระหว่างเส้นใยมะพร้าว และพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ต่อเนื่องจึงทำให้มีช่องว่างเล็กๆเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อผง $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ มีปริมาณมากขึ้นจึงสามารถดูดซับน้ำได้เป็นอย่างดีในระหว่างการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ

การทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุ WPCs พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นแต่จะมีค่าความแข็งแรงดึงน้อยกว่าแผ่นเทียบ LLDPE จากเส้นกราฟตามภาพที่ 12. โดยที่อัตราส่วนของ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว 95 : 5 มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดคือ 16.6 ในขณะที่อัตราส่วน 90 : 10 และ 85 : 15 มีค่าลดลงมาเท่ากับ 15.85 และ 8.25 MPa ตามลำดับ อ้างถึงรายงานวิจัยของ Shibata และคณะ, (2002) และ Rahman และคณะ, (2013) กล่าวว่าอนุภาคของเส้นใยธรรมชาติซึ่งก็เป็นไฟเบอร์ (fiber) และตามปกติจะมีค่ามอดุลัสสูงกว่าพอลิเมอร์หรือเมทริกซ์อยู่แล้วเมื่อวัสดุ WPCs ได้รับแรงเค้น (stress) จะทำให้การส่งผ่านความเค้นระหว่าง 2 วัสดุ ก็คืออนุภาคเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์ได้ไม่ดีจึงทำให้เกิดช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุจึงเป็นจุดเริ่มของการแตกหัก ดังนั้นจากงานวิจัยนี้เมื่อเส้นใยมะพร้าวมีปริมาณมากขึ้นจึงทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของวัสดุเมทริกซ์เกิดมีรอยต่อวัสดุหรืออินเตอร์เฟซที่ไม่แข็งแรงเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้การต้านแรงดึงลดลง นอกจากนี้เส้นใยมะพร้าวที่แทรกตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีปริมาณมากทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศมากขึ้น ส่งผลให้การถ่ายโอนความเค้นระหว่างไฟเบอร์ (เส้นใยมะพร้าว) และเมทริกซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ความแข็งแรงดึงลดลงและผลนี้เช่นเดียวกันสอดคล้องกับการรายงานการวิจัยของ Xiang และคณะ, (2014) ที่เตรียมวัสดุเชิงประกอบจากพลาสติกความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และผงไม้บด (wood flour) และเมื่อพิจารณา WPCs. ที่เติม $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ พบว่าความแข็งแรงดึงสัมพันธ์แบบผกผันกับเปอร์เซ็นต์การเติม $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ เช่นเส้นกราฟ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว ที่ 95 : 5 จะพบว่าความแข็งแรงดึงลดลงเป็น 16.6, 11.11, 10.65 และ 9.55 MPa ที่เปอร์เซ็นต์ของ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0, 1 3 และ 5 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าปริมาณของ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ จำนวนมากเข้าไปแทรกในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีมากขึ้นจึงมีผลทำให้การยึดเกาะผิวหน้าของพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ต่อเนื่องทำให้เกิดช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุและจึงเป็นจุดเริ่มของการแตกหัก ดังนั้นเมื่อเติมผง $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ปริมาณมากขึ้นจึงทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของวัสดุเมทริกซ์มากขึ้นเกิดมีรอยต่อระหว่างวัสดุหรืออินเตอร์เฟซที่ไม่แข็งแรงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อาจอธิบายได้ว่าสาเหตุที่ความแข็งแรงลดลงเนื่องจากมีช่องว่าง (cavities) เกิดขึ้นใน WPCs ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของตัวเติม (fillers; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) และปลดปล่อยไอน้ำระหว่างกระบวนการให้ความร้อน ประกอบกับการยึดเกาะรวมตัวของสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ไม่ดีหรือไม่ต่อเนื่องไอน้ำก็สามารถหลุดออกจาก WPCs ไปได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดมีช่องว่างเกิดขึ้น และในทำนองเดียวกันนี้การเกาะกลุ่มเป็นก้อน (agglomerates) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อผง $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ มีปริมาณมากขึ้นซึ่งมีผลทำให้เป็นจุดศูนย์รวมแรงที่กระทำเกิดเป็นจุดเริ่มแรกของการแตกหักของชิ้นงานและเมื่อกระจายในเมทริกซ์แต่ละอนุภาคนี้ก็จะเป็นจุดรวมของแรงกระทำซึ่งทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของจุดแตกเล็กๆ (microcrack initiator) ใน WPCs และมีผลทำให้การต้านแรงดึงลดลงผลนี้สอดคล้องกับการรายงานการวิจัยของ Zhang และคณะ, (2012) และ Pavlidou และคณะ, (2005)

การทดสอบความแข็งแรงกระแทกของชิ้นงาน WPCs พบว่าค่าแข็งแรงกระแทกของชิ้นงาน มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นและจะมีค่าความแข็งแรงกระแทกน้อยกว่าแผ่น เทียบ LLDPE จากเส้นกราฟตามภาพที่ 13. โดยที่อัตราส่วนของ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว 95 : 5 มีค่า ความแข็งแรงกระแทกมากที่สุดคือ 21.64 ในขณะที่ อัตราส่วน 90 :10 และ 85 : 15 มีค่าลดลงมา เท่ากับ 15.61 และ 12.26 kJ/m² ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวที่แทรกตัวเข้าไปในพอลิเมอร์ เมทริกซ์ปริมาณมากทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศมากขึ้น (เส้นใยมะพร้าวเป็นเซลลูโลสจึงสามารถ ดูดซึมน้ำได้ดี) และสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสเส้นใยมะพร้าวแทนที่จะมีการ สร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายเซลลูโลสด้วยกันเองจึงทำให้มี ช่องว่างเล็กๆเกิดขึ้นระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์และก่อให้เกิดจุดแตกหักเล็กๆ (microcracks) เกิดขึ้น ใน WPCs เมื่อมีแรงกระทำจึงมีผลทำให้มีการดูดซับพลังงานแรงกระแทกของวัสดุ WPCs มีค่าลดลง ผลนี้สอดคล้องกับการรายงานการวิจัยของ Xiang และคณะ, (2014) และนอกจากนี้จากรายงานวิจัย ของ Chen และคณะ, (2006), Raj และคณะ, (1998) และ Rahman และคณะ, (2013) พบว่าการ กระจายตัวที่ไม่เป็นระเบียบของวัสดุเซลลูโลสจะส่งผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของ WPCs กล่าวคือ เมื่อวัสดุเซลลูโลสมีปริมาณมากขึ้นความสามารถในการเชื่อมต่อนของเมทริกซ์ก็จะลดลงมากขึ้นจึงส่งผลให้ WPCs เกิดการแตกหักได้ง่ายขึ้น เมื่อพิจารณา WPCs ที่เติม(NH₄)₂SO₄ พบว่าความแข็งแรงกระแทก สัมพันธ์แบบผกผันกับเปอร์เซ็นต์การเติม(NH₄)₂SO₄ เช่น เส้นกราฟ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว ที่ 85 : 15 จะพบว่าความแข็งแรงกระแทกลดลงเป็น 12.26, 11.77, 10.36 และ 10.27 kJ/m² ที่เปอร์เซ็นต์ ของ (NH₄)₂SO₄ 0, 1 3 และ 5 ตามลำดับ อธิบายได้ว่าเนื่องจากปริมาณของ(NH₄)₂SO₄ ที่เติมเข้าไป จำนวนมากจะเข้าไปแทรกในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีมากขึ้น จึงทำให้การยึดเกาะผิวหน้าของพอลิเมอร์ เมทริกซ์ไม่ต่อเนื่องทำให้เกิดช่องว่างเล็กๆ (microspaces) จำนวนมากระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์ ที่ บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคจึงเป็นจุดเริ่มของการแตกหักเล็กๆเกิดขึ้นจำนวนมากเมื่อมีแรงมา กระแทกและมีผลทำให้มีการดูดซับพลังงานแรงกระแทกของ WPCs มีค่าลดลง ผลที่เกิดขึ้นนี้ สอดคล้องกับการรายงานผลงานวิจัย Zhang และคณะ, (2012) และ Meng และคณะ, (2009)

ทดสอบการลามไฟ WPCs ทดสอบตามมาตรฐาน UL94 พบว่าอัตราการลามไฟของชิ้นงาน WPCs มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนเส้นใยมะพร้าวเพิ่มมากขึ้นและมากกว่าแผ่นเทียบ LLDPE จากเส้นกราฟตามภาพที่ 14. โดยสำหรับอัตราส่วนของ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว 95 : 5 มีค่า อัตราการลามไฟน้อยที่สุดคือ 20.49 ในขณะที่ อัตราส่วน 90 :10 และ 85 : 15 มีค่าเพิ่มขึ้นมาเท่ากับ 22.73 และ 23.15 mm./min. ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นเพราะว่า LLDPE ที่เติมเส้นใยมะพร้าวนั้น มีเส้นใยมะพร้าวซึ่งเป็นเซลลูโลสซึ่งง่ายต่อการติดไฟจึงไปช่วยให้การลุกติดไฟเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้มี อัตราการลามไฟมากกว่า เมื่อพิจารณา WPCs ที่เติม(NH₄)₂SO₄ พบว่าอัตราการลามไฟสัมพันธ์แบบ ผกผันกับการเติม(NH₄)₂SO₄ เช่น เส้นกราฟ LLDPE : เส้นใยมะพร้าว ที่ 90 : 10 จะพบว่าอัตราการ

ลามไฟลดลงเป็น 22.73, 20.60, 19.12 และ 18.66 mm./min. ที่เปอร์เซ็นต์การเพิ่มของ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0, 1 3 และ 5 ตามลำดับ อธิบายได้ว่า $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ มีส่วนเข้าไปช่วยกระตุ้นวัสดุเซลลูโลส เมื่อได้รับความร้อนทำให้เกิดเปลี่ยนสภาพเป็นถ่าน (char) ซึ่งจะเหมือนฉนวนความร้อนไปช่วยปกป้องพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยไปยับยั้งการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างพื้นผิวพอลิเมอร์ที่กำลังหลอมละลาย เป็นผลทำให้ WPCs การมีการต้านไฟเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าอัตราการลามไฟจึงมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ เพิ่มขึ้น ผลที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับการรายงานผลงานวิจัยของ Zhang และคณะ, (2012), Reza และคณะ, (2013), Bakar และคณะ, (2010) และ Shukor และคณะ, (2014) และจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าอัตราการลามไฟทุกอัตราส่วนจะมีค่าน้อยกว่า ≤ 40 mm./min. ตามมาตรฐาน UL94 ดังนั้นวัสดุ WPCs ที่เตรียมได้นี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยได้เตรียม WPCs หรือไม้เทียมจากพลาสติกความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นกับเส้นใยมะพร้าว ตามอัตราส่วน LLDPE : เส้นใยมะพร้าว = 100 : 0 , 95:15, 90:10, 85:15 และชิ้นงานที่ขึ้นรูปถูกนำไปทดสอบหา ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และสมบัติเชิงกลตามมาตรฐานของ ASTM และศึกษาสมบัติการต้านไฟโดยเติมสารหน่วงไฟคือ $(NH_4)_2SO_4$ ที่อัตราส่วน 0, 1, 3, และ 5% โดยน้ำหนักของ WPCs ผลการศึกษาวิจัยสรุปได้ดังนี้

การวัดความหนาแน่นจะพบ WPCs มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 893.70 - 944.17 Kg/m^3 และมีค่าเปอร์เซ็นต์การซึมน้ำอยู่ในช่วง 0.25 - 1.60% ค่าความแข็งแรงดึงอยู่ในช่วง 7.10 - 16.60 MPa และค่าแรงกระแทกอยู่ในช่วง 10.27 -21.64 KJ/m^2 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าความหนาแน่น และ การดูดซึมน้ำ ของ WPCs มีค่าเพิ่มขึ้น แต่สมบัติความแข็งแรงดึง และสมบัติความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ตามปริมาณสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของเส้นใยมะพร้าวในการขึ้นรูป จากผลการทดสอบการเติมผง $(NH_4)_2SO_4$ พบว่าตามปริมาณสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของผง $(NH_4)_2SO_4$ ค่าความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของ WPCs มีค่าเพิ่มขึ้นแต่สมบัติความแข็งแรงดึง และสมบัติความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง สำหรับอัตราการลามไฟมีค่าลดลงจาก 23.15 mm./min. เป็น 17.01 mm./min. ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบการลามไฟ UL94

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อนำผลการวิจัยไปใช้

1. จากผลการวิจัยไม้เทียมที่เตรียมได้มีความหนาแน่นที่ดี แต่เนื่องจากไม้เทียมมีการซึมน้ำมากจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างภายในเท่านั้น
2. ไม้เทียมที่เตรียมได้ รับแรงดึง และแรงกระแทกได้น้อยจึงเหมาะสมกับการประยุกต์ที่ใช้กับโครงสร้างที่รับน้ำหนักไม่มากนัก

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาการเตรียมไม้เทียมจากพลาสติกผสมกับวัสดุเซลลูโลสอื่นๆที่เหลือทิ้งอยู่จำนวนมากเพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้
2. ควรศึกษาการเติมสารหน่วงไฟชนิดอื่นๆด้วย เพื่อเปรียบเทียบกับสารหน่วงไฟที่ศึกษาในครั้งนี้

ดังนั้นในการวิจัยการเตรียม WPCs หรือไม้เทียมในครั้งนี้นี้มีประโยชน์หลายๆด้านด้วยกัน ได้แก่การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมโลกโดยการนำพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ซึ่งทำให้ประหยัดพลังงาน และลดมลภาวะ นอกจากนี้การใช้ใยมะพร้าวเป็นองค์ประกอบของไม้เทียมก็จะช่วยลดการตัดไม้ทำลายป่าธรรมชาติ เพิ่มสีเขียวให้แก่สิ่งแวดล้อม และขณะเดียวกันก็ช่วยเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไม้เทียม และยังสามารถนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมด้านโครงสร้างในการก่อสร้าง และเฟอร์นิเจอร์ หรืออื่นๆที่ใช้แทนไม้ธรรมชาติได้อย่างดี และเพิ่มรายได้ทางเศรษฐกิจอีกด้วย



บรรณานุกรม

- จันทร์จิรา อภิรักษ์เมธาวงศ์ (2557). การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเศษจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ฉกาจ จบนุช (2556). การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบจากยูคาลิปตัส และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เฉลิมพล อิทธิวิวัฒน์ และสกุล บรรจงวุฒิ (2547). การใช้เส้นใยเซลลูโลสผสมกับเส้นใยแก้วเพื่อเป็นสารเสริมแรงในพอลิเอทิลีน. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ณัฐชัญญาภา ธนวัฒน์ศิริกุล (2554). การปรับปรุงความแข็งแรงของไม้พลาสติกจากไม้ปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธนาธิวัฒน์ นระประทีปต์ (2550). ผลของสารช่วยให้เข้ากันและสารประกอบไขมันต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์เชิงประกอบระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พิชัย พันสพัฒนา และศิริพงศ์ ไรจน์วีระ (2543). วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิพรอพิลีน. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รัชดา ขวัญตน (2541). คอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วและเส้นใย้อย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สัญญา แก้วเกตุ, นิภารัตน์ อัครเมธากุล, ศิริศาสตร์ เอื้อใจ, ณรงค์ ผังวิวัฒน์ และวลัยพร ปฤษฎามารุณ (2544). การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเคลือบกับพอลิเอสเตอร์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (อุตสาหกรรมเคมี) สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าพรชนครเหนือ.
- Adhikary KB, Pang S, Staiger MP. (2008). Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). Compos Part B.

- ASTM D256. Committee on standard. (1993). Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastic and Electrical Insulating Materials. Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
- ASTM D683. Committee on standard. (1993). Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic (Metric). Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
- Ayrlmis N, Akbulut T, Dundar Y, White RH. (2012). Effect of boron and phosphate compounds on physical, mechanical, and fire properties of wood-polypropylene composites. *Constr Build Mater.*
- Bakar M.B, Ishak ZA, Taib R, Rozman HD, Jani SM. (2010). Flammability and mechanical properties of wood flour-filled polypropylene composites, *J. Appl. Polym. Sci.*
- Baysala E , Yalinkilicb MK, Altinok M. (2007). Some physical, wood polymer biological, mechanical, and fire properties of composite (WPC) pretreated with boric acid and borax mixture. *Constr Build Mater.*
- Buyuksari U , Ayrlmis N , Avci E , Koc E. (2010). Evaluation of the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard manufactured from waste stone pine (*Pinus pinea L.*) cones. *Bioresour Technol.*
- Chen HC, Chen TY, Hsu CH. (2006). Effects of wood particle size and mixing ratios of HDPE on the properties of the composites. *Holz Roh Werkst.*
- Clemons C. (2002). Wood-plastic composites in the United States: the interfacing of two industries. *Forest Prod J.*
- Garcia M, Hidalgo J, Garmendia I. (2009). Wood-plastics composites with better fire retardancy and durability performance. *Compos A.*
- George, J., et al. (1994). Mechanical and viscoelastic properties of shot pineapple fiber reinforced low-density polyethylene composite, *Polymer science recent advances*, (Bharwaj, I. Sed.) India: Allied publisher limited.
- Joseph, K., Thomas S . Pavithran C, Brahmakumar M. (1993). Tensile properties of short sisal fiber-reinforced polyethylene composites. *J.appl.polym.sci.*

- Kalali, E.N., Zhang, Lu., Shabestari, M.E., Croyal, J., Wang, D.y. (2019). Flame-retardant wood polymer composites (WPCs) as potential fire safe bio-based materials for building products: Preparation, flammability and mechanical properties. *Fire Safety Journal*.
- Kamdem, D.P., Jiang, H., Cui, W., Freed, J. and Matuana, L.M. (2004). Properties of Wood Plastics Composites made of Recycled HDPE and Wood Flour from CCA-Treated Wood Removed from Service, *J. Composites Part A : Applied Science And anufacturing*.
- Kim, N.K., Bhattacharyya, D. (2016). Development of fire resistant wool polymer composites: Mechanical performance and fire simulation with design perspectives. *Mater. Des.*
- Kazayawoko M, Balatinecz JJ, Matuana LM. (1999). Surface modification and adhesion mechanisms in wood fiber-polypropylene composites. *J Mater Sci*.
- Meng XY, Ye L, Zhang XG, Tang PM, Tang JH, Xu J. (2009). Effects of expandable graphite and ammonium polyphosphate on the flame-retardant and mechanical properties of rigid polyurethane foams. *J Appl Polym Sci*.
- Mohammed A, Maher M. (2013). Palm leave and plastic waste wood composite for out-door Structures. *Construction and Building Materials*.
- Najafi SK, Tajvidi M, Chaharmahli M. (2006). Long-term water uptake behavior of lignocellulosic- high density polyethylene composites. *J Appl Polym Sci*.
- Naumann A. (2012). Material resistance of flame retardant wood-polymer composite against fire and fungal decay. *Polym Degrad Stab*.
- Pascal Kamdem D, Jiang H, Cui W, Freed J, Matuana LM. (2004). Properties of wood plastics composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service. *Compos Part A*.
- Pavlidou E, Bikiaris D, Vassiliou A, Chiotelli M, Karayammidis G. (2005). Mechanical properties and morphological examination of isotactic polypropylene/SiO₂ nanocomposites containing PP-g-MA as compatibilizer. *J Phys: Conf Ser*.
- Rahman KS, Islam MN, Rahman MM, Hannan MO, Dungani, Khalil HPS. (2013). Flat-pressed wood plastic composites from sawdust and recycled polyethylene terephthalate (PET): physical and mechanical properties. *SpringerPlus*.

- Reza A, Atikah I, Azman H, Aznizam AB. (2017). Effects of ammonium polyphosphate content on mechanical, thermal and flammability properties of kenaf/polypropylene and rice husk/polypropylene composites.
- Shibata M, Takachiyo K, Ozawa K, Yosomiya R, Takeishi H. (2002). Biodegradable polyester composites reinforced with short abaca fiber. *J Appl Polym Sci*.
- Shukor F, Hassan A, Islam MS, Mokhtar M, Hasan M. (2014). Effect of ammonium polyphosphate on flame retardancy, thermal stability and mechanical properties of alkali treated kenaf fiber filled PLA biocomposites, *Mater. Des*.
- Stark NM, White RH, Mueller SA, Osswald TA. (2010). Evaluation of various fire retardants for use in wood flour- polyethylene composites. *Polym Degrad Stab*.
- Suppakarn N, Jarukumjorn K. (2009). Mechanical properties and flammability of sisal/PP composites: effect of flame retardant type and content. *Compos B*.
- Xian X.J. (1993). Mechanical behavior and microstructure of nature plant fiber reinforced composite material. *Proc.int.conf.compos.master*.
- Xiang L, Bingrong L, Zhidan L, Langhuan H, Shaozao T, Xiang C. (2014). The utilization of bamboo charcoal enhances wood plastic composites with excellent mechanical and thermal properties, *Materials and Design*.
- Zhang ZX, Zhang JZ, Lub BX, Xin ZX, (2012). Effect of flame retardants on mechanical properties, flammability and foamability of PP/wood-fiber composite. *Compos*.
- Zhen Xiu, Zhang X, Zhang J, Lub B-X, Xiang ZX. (2012). Effect of flame retardants on mechanical properties, flammability and foamability of PP/wood-fiber composites, *Composites*.