The Journal of Applied Science **Vol. 13 No. 1:14-29 [2014]**
วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
ISSN 1513-7805 Printed in Thailand

Research Article

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์อาหารจากฟางข้าวที่พัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ

An analysis of the efficiency of development package food from the rice straw for enhances economical cost

สุนทรี เด่นเทศ[1] และ สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา[2]

Sunthree Denthet[1] and Siriorn Isarankura Na Ayutthaya[2]

[1] ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
Department of Applied Science and Social, College of Industrial Technology,
King Mongkut'sUniversity of Technology North Bangkok.

[2] วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
College of Industrial Technology, King Mongkut'sUniversity of Technology North Bangkok.

E-mail :srd_kmutnb@hotmail.com , sirindion@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟางข้าวมาพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อทดแทนการใช้ถ้วยโฟม- พอลิสไตรีน โดยการนำมาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยฟางข้าวที่ปริมาณต่างๆ ทำการผสมและขึ้นรูป วัสดุเชิงประกอบดังกล่าวด้วยเครื่องผสมลูกกลิ้งคู่ และเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติเชิงกล ซึ่งได้แก่ ค่าการทนแรงดึง ค่าการยืดตัว ค่าการทนแรงกระแทก และค่าความแข็ง นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปเป็นภาชนะถ้วย และศึกษาการทนความร้อนของภาชนะจากเตาอบไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนและเส้นใยฟางข้าวที่ปริมาณต่างๆ จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยฟางข้าวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าการทนแรงดึง ค่าการยืดตัว และค่าการทนแรงกระแทก จะมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความแข็งจะมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยเมื่อนำสมบัติต่างๆ มาเปรียบเทียบกับสมบัติของพอลิสไตรีน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดที่นำมาขึ้นรูปเป็นภาชนะโฟมนั้น พบว่าค่าความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว มีค่าน้อยกว่าของพอลิสไตรีน แต่ในส่วนของค่าการยืดตัวจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทดสอบ

ความแตกต่างของประสิทธิภาพของวัสดุเชิงประกอบ พบว่า บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากของพอลิพรอพิลีนและวัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนของเส้นใยฟางข้าวในปริมาณต่างๆ มีค่าการทนแรงดึง ค่าการยืดตัว ค่าการทนแรงกระแทก และค่าความแข็งไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05 ในด้านการศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปเป็นภาชนะถ้วย พบว่าภาชนะที่มีปริมาณเส้นใยฟางข้าว 10-30 ส่วน เมื่อเทียบกับปริมาณพอลิพรอพิลีน 100 ส่วน ภาชนะที่ขึ้นรูปได้จะมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีการแตกร่อนของผิวชิ้นงานบางส่วน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณใยฟางข้าว เป็น 50 ส่วน เมื่อเทียบกับปริมาณพอลิพรอพิลีน 100 ส่วน พบว่าภาชนะมีความเนียนเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ ภาชนะดังกล่าวยังสามารถทนความร้อนจากเตาอบไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ได้นานถึง 3 นาที โดยรูปร่างชิ้นงานไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ : บรรจุภัณฑ์อาหาร, ฟางข้าว, พอลิพรอพิลีน, สมบัติเชิงกล

Abstract

This research studied about the possibility to turn the rice straw residues into value-added composite food packaging bowl instead of polystyrene foam bowl. Polypropylene (PP) and rice straw were mixed and fabricated to be samples by two-roll mill technique and hot-compression molding technique, respectively. The mechanical properties such as tensile strength, elongation, impact strength and hardness were studied. Besides, the PP/rice straw composites bowls were fabricated. The PP/rice straw composite bowls were tested by using microwave oven. From the mechanical testing results, it was found that the increasing of rice straw contents made the decreasing of tensile strength, percentage of elongation and impact strength. Meanwhile, the hardness properties had not changed. In comparing with polystyrene, the material that used for produced foam bowl, it was found that the tensile strength of PP/rice straw composites was lower than PS. The percentage elongations of the composites were the same with PS. About the possibility to produced bowl, the bowl that had rice straw content 10-30 pph was broken, peeled out surface and heterogeneous. After increasing of rice straw content to 50 pph, the bowl surface was smoothed. In addition, the smooth bowl could resist the heat from microwave oven at 700 watts for 3 minutes.

Keywords: Food packaging, Rice straw, Polypropylene, Mechanical properties

1. บทนำ

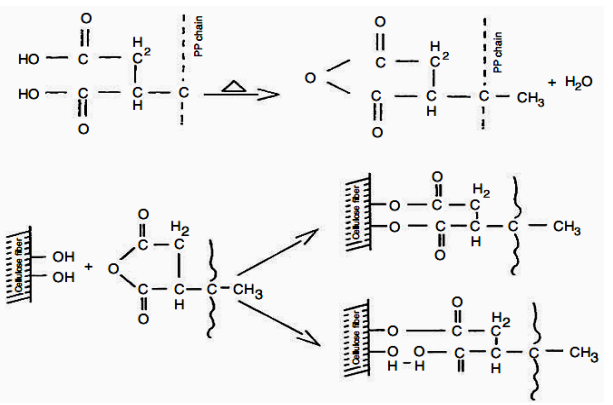
การสำรวจข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษพบว่า ประเทศไทยมีปริมาณฟางข้าวที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวสูงถึงประมาณ 50 ล้านตัน [1] เนื่องจากการทำนาปรังปีละ 2-3 ครั้ง [2] แม้จะนำฟางข้าวมาทำเป็นปุ๋ย หลังคา อาหารสัตว์ และเส้นใยในอุตสาหกรรมกระดาษ [3] ก็ยังมีฟางข้าวเหลือใช้อีกจำนวนมาก ดังนั้นหากสามารถเพิ่มมูลค่าจากการใช้ประโยชน์ของฟางข้าวได้จะสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรอีกทางหนึ่ง ฟางข้าว ประกอบด้วยเคมีอินทรีย์ หลักๆ ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) ประมาณ 37% เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) ประมาณ 24% ลิกนิน (lignin) ประมาณ 14% และส่วนอื่นๆ (ได้แก่ สารสกัดและเถ้า) ประมาณ 25% [4] โดยเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นส่วนของโครงสร้าง เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์แทรกอยู่ระหว่างไมโครไฟบริลของเซลลูโลส (cellulose microfibrils) ส่วนลิกนินเป็นส่วนเปลือกด้านนอกมีทำหน้าที่รวมมัดของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกัน [5] หากมีสัดส่วนของเซลลูโลสมากจะทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงมาก ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ แบบอสัณฐาน (amorphous) [6] ทีมงานวิจัย จึงนำเส้นใยจากฟางข้าวมาเป็นส่วนผสมในการผลิตภาชนะบรรจุอาหารแทนโฟม เพราะโฟมที่นำไปใช้บรรจุอาหารที่มีน้ำมัน และความร้อนสูงทำให้เกิดอันตรายจากสารปนเปื้อน ได้แก่ เบนซีน (benzene) และสไตรีน (styrene) สารดังกล่าวหากเข้าสู่ร่างกายเป็นเวลานานอาจทำให้เป็นโรคโลหิตจาง (anemia) หรือมะเร็งเม็ดเลือดขาว (leukemia) [7] ได้ สำหรับพอลิเมอร์ที่มีความเหมาะสมในการนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์นั้น ได้แก่ พอลิพรอพิลีน (polypropylene) ซึ่งมีความสามารถในการทนความร้อนได้ดี สามารถต้านทานการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำได้ดี อีกทั้งยังมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 130-171 องศาเซลเซียส และทนต่อสารเคมีได้ดี จึงเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นภาชนะบรรจุอาหาร [8] คณะผู้วิจัย จึงพัฒนาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากเส้นใยฟางข้าวมาผสมกับพอลิพรอพิลีน เพื่อเป็นภาชนะบรรจุอาหารแทนถ้วยโฟม

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2552 Mulkapuram และคณะ [9] ได้ทำการรวบรวม สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง จากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา ซึ่งเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิพรอพิลีนผสมกับเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ ได้แก่ เส้นใยปอกระเจา (jute) ป่านลินิน (flax) และกาบมะพร้าว (coir) เพื่อต้องการนำเส้นใยต่างๆ มาใช้ทดแทนวัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น เส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน จากการศึกษาข้อมูลต่างๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเส้นใยแต่ละชนิดมีสมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ที่มีอยู่ในเส้นใยนั้นๆ นอกจากนี้ ยังพบว่า ความชื้นของเส้นใยทำให้สมบัติเชิงกลลดต่ำลง [10] โดยสมบัติเชิงกลนั้นจะมีค่าดีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักๆ คือ ความเข้ากันได้ (การยึดติดกัน) ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้เคยมีการเตรียมผิวเส้นใยทั้งทางกายภาพ (physical method) และทางเคมี (chemical method) โดยวิธีการเตรียมเส้นใยด้วยวิธีทางกายภาพ (เช่น การดึงยืดเส้นใย การบำบัดเส้นใยด้วยความร้อน) จะไม่ทำ

ให้ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยเกิดการเปลี่ยนแปลง จะเปลี่ยนแปลงเฉพาะลักษณะทางกายภาพเส้นใยและลักษณะพื้นผิวเส้นใยเท่านั้น ในส่วนการเตรียมเส้นใยด้วยวิธีทางเคมี มี 3 วิธีหลักๆ คือ การบำบัดผิวเส้นใย การดัดแปลงเส้นใย และการทำกราฟท์โคพอลิเมอร์ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (graft copolymerization of matrix) [11] เนื่องจากปกติเส้นใยจะมีสมบัติชอบน้ำ (แต่เมทริกซ์ เช่น พอลิพรอพิลีน นั้นมีสมบัติในทางตรงกันข้าม คือไม่ชอบน้ำ) ด้วยเหตุนี้ เพื่อให้เส้นใยและเมทริกซ์มีความเข้ากันได้ จึงต้องมีการบำบัดหรือดัดแปลงเส้นใยเพื่อให้มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำเช่นเดียวกับเมทริกซ์ ตัวอย่างของการบำบัดและการดัดแปลงผิวเส้นใย ได้แก่ การบำบัดโดยนำเส้นใยไปแช่ในพอลิไวนิลอะซิเตท การดัดแปลงเส้นใยโดยนำเส้นใยไปแช่ในกรดสเตียริก เพื่อปรับให้เส้นใยมีสมบัติไม่ชอบน้ำและยังช่วยให้เส้นใยกระจายตัวในเมทริกซ์ได้ดีขึ้น ในส่วนการทำกราฟท์โคพอลิเมอร์นั้น สามารถทำได้โดยใช้สารคู่ควบประเภทต่างๆ (coupling agents) (ได้แก่ สารมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) [12-14] สารไอโซไซยาเนท (isocyanates) [15-16] และสารคู่ควบในตระกูลออร์แกโนไซเลน (Organosilanes coupling agents) [17] เป็นต้น) มาทำการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดเดียวกับเมทริกซ์ เพื่อทำให้เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใย ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กลไกการทำปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยเซลลูโลส และพอลิพรอพิลีนกราฟท์มาเลอิก [9]

โดยตัวเชื่อมประสาน ทำหน้าที่คือปลายของสายโซ่ด้านหมู่มาเลอิกจะไปจับกับหมู่ไฮดรอกซีบนพื้นผิวเส้นใย ส่วนปลายสายโซ่อีกด้าน ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ จะเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ด้วยเหตุนี้ หากสามารถเตรียมได้ในสัดส่วน ปริมาณและสภาวะที่เหมาะสม จึงน่าจะทำให้เส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์สามารถเข้ากันได้ดีขึ้น แต่การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใย ด้วยวิธีการบำบัดและดัดแปลงเส้นใยด้วยสารเคมีต่างๆ ที่ได้กล่าวถึงข้างต้นนั้น สารเคมีที่นำมาใช้ เช่น สารมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [18] และสารคู่ควบออร์แกโนไซเลน [19] ล้วนแต่เป็นอันตรายต่อสุขภาพทั้งสิ้น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ การพัฒนาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพบรรจุภัณฑ์อาหารจากฟางข้าว ซึ่งบรรจุภัณฑ์อาหารนั้นไม่ต้องมีความแข็งแรงมากนัก เมื่อเทียบกับนำไปทำเป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง หรือวัสดุเสริมแรงต่างๆ แต่บรรจุภัณฑ์อาหารนั้นต้องสะอาด และไม่มีสารอื่นออกมาปนเปื้อนกับอาหาร ในปริมาณที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 295 (พ.ศ.2528) นอกจากนี้ภาชนะบรรจุอาหารที่ดีต้องสามารถบรรจุอาหารได้ โดยที่ภาชนะไม่เกิดการเสียรูป [20]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

พอลิพรอพิลีน (Polypropylene : PP) จากบริษัท เอ็กซ์ทรีม แพคเกจจิ้ง จำกัด ตำบลหอมศีล อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา และฟางข้าว จากอำเภอบางปะหัน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

3.2 การเตรียมวัสดุ พอลิเมอร์ผสม และการทดสอบ

ขั้นที่ 1 การเตรียมเส้นใยจากฟางข้าว นำฟางข้าวมาแช่น้ำ แล้วล้างทำความสะอาด นำไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้เส้นใยอ่อนตัว จากนั้นนำฟางข้าวผสมกับน้ำในอัตราส่วน ฟาง:น้ำ = 1:3 จนเป็นเส้นใยแล้วนำไปตากแดดให้แห้งสนิท

ขั้นที่ 2 นำพอลิพรอพิลีนผสมกับเส้นใยฟางข้าว โดยทำการผสมเส้นใยฟางข้าวลงในพอลิพรอพิลีนที่ปริมาณ 0, 10, 20, 30 และ 50 ส่วน เมื่อเทียบกับปริมาณพอลิพรอพิลีน 100 ส่วน (pph) โดยเครื่องผสมลูกกลิ้งคู่ (two roll mill) ยี่ห้อ Labtech รุ่น LRM 110 ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที นาน 20 นาที แล้วนำวัสดุผสมพอลิเมอร์ที่ได้มาตัดให้มีความยาวประมาณ 5 มิลลิเมตร

ขั้นที่ 3 นำพอลิเมอร์ผสมที่บดตัดแล้วมาทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding machine) ยี่ห้อ Labtech รุ่น LP-20 ให้เป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดต่างๆ ตามมาตรฐาสากล เพื่อนำไปทดสอบหาคุณสมบัติต่างๆที่ต้องการศึกษา

ขั้นที่ 4 ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ โดยเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน และเครื่องมือในการทดสอบ โดยใช้แบบแผนการทดลอง การสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely randomized design : CRD) ดังนี้

การทดสอบความทนแรงกระแทก (impact test) แบบไอซอด (Izod test) (ซึ่งเป็นการทดสอบโดยชิ้นงานจะถูกวางในแนวตั้ง และทิศทางการตีของฆ้อนจะตีเข้าบริเวณรอยบากโดยตรง) นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน มาเตรียมให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งมีขนาดกว้าง*ยาว*หนา เท่ากับ 30*100*3 มิลลิเมตร และมีรอยบากที่มีความลึก 2.5 เซนติเมตร (เครื่องสำหรับทำรอยบากคือ เครื่อง Notch-Impact Tester รุ่น Notchvis ยี่ห้อ CEAST (ประเทศอิตาลี)) จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความทนแรงกระแทก โดยเครื่อง Resil Impactor ยี่ห้อ CEAST (ประเทศอิตาลี) โดยตีด้วยความเร็ว 3.460 m/s ที่มุม 150 องศา ค้อนตีชิ้นงานหนัก 2.75 Joule (ตามมาตรฐาน ASTM D 256)

การทดสอบความแข็ง (hardness test) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง ได้แก่ เครื่อง hardness tester ยี่ห้อ Desik group โดยใช้หัวกดแบบ Shore A ในการทดสอบหาค่าความแข็งตามมาตรฐานดังกล่าวนั้น ชิ้นงานควรจะมีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร และในการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานควรวัดความแข็งของชิ้นงานที่จุดต่างๆ บนชิ้นงานอย่างน้อย 10 จุด ทำการจดบันทึกผลและหาค่าเฉลี่ย

การทดสอบแรงดึง (tensile test) ขึ้นรูปวัสดุผสมพอลิเมอร์สูตรต่างๆ ให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638 (gauge length 50 มิลลิเมตร) จากนั้นนำมาทำการดึงด้วยเครื่อง Instron Universal Testing Machine (UTM) ความเร็วที่ใช้ในการดึงคือ 100 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบสมบัติการทนต่อความร้อน (thermal test) ด้วยเตาอบไมโครเวฟ โดยนำชิ้นงานสูตรต่างๆที่ผ่านการขึ้นรูป (เช่นเดียวกับถ้วยโฟม) มาอบด้วยเตาอบไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที นำถ้วยที่ผ่านการอบดังกล่าวมาสังเกตุลักษณะการเปลี่ยนแปลง/ลักษณะการเสียรูป ของภาชนะดังกล่าวหลังผ่านความร้อนจากเตาไมโครเวฟ

ขั้นที่ 5 บันทึกผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติการทนต่อความร้อน นำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ และสรุปผลการทดลอง

3.3 แผนการทดลองที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองครั้งในใช้แผนการทดลอง CRD เนื่องจากควบคุมชิ้นงานก่อนการทดลองให้มีความกว้าง ความหนา หรือความกว้างของรอยบากของสิ้นงานให้มีค่าไม่แตกต่างกัน ทำให้หน่วยทดลอง (Experimental unit) มีลักษณะเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous) โดยแหล่งความผันแปรของตัวแบบ (Source of variance : SOV) ประกอบด้วยทรีทเมนต์ (Treatment) และความคลาดเคลื่อน (Error) โดยตัวแบบที่ใช้คือ Model I (fixed effects model) ใช้เมื่อทรีทเมนต์ที่นำมาใช้ในการทดลองถูกเลือกอย่างเจาะจงโดยผู้วิจัย และผลวิจัยที่ได้นำไปอ้างอิงกับ ทรีทเมนต์ที่นำมาทดลองเท่านั้น โดยใช้รูปแบบ [21]

$$X_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij} \quad ;i = 1,...,k \text{ และ } j = 1,...,n_i$$

เมื่อ X_{ij} = การสังเกตุที่ j ของกลุ่มที่ได้รับทรีทเมนต์ i

μ = ค่าเฉลี่ยของประชากร

τ_i = ผลของทรีทเมนต์ i

e_{ij} = ความคลาดเคลื่อนของการสังเกตที่ j ของกลุ่มที่ได้รับทรีทเมนต์ i ซึ่งเป็นอิสระและมีการแจกแจงปกติ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และความแปรปรวนเป็น σ_e^2

3.4 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติเชิงพรรณนาสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไป ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean : $\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation : SD) โดยมีสูตรดังนี้

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n_i} x_j \text{ และ } SD_i = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1}\sum_{j=1}^{n}\left(x_j - \bar{x}_i\right)^2}$$

สถิติเชิงอนุมานสำหรับการเปรียบเทียบค่าความทนแรงกระแทก ค่าความแข็ง สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) หรือสถิติเอฟ สรุปขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

1. หา $T = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}$, $T_i = \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}, CT = \frac{T^2}{N}$, $N = \sum_{i=1}^{k} n_i$

2. หา SS: $SST = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - CT$, $SSTr = \sum_{i=1}^{k}\frac{T_i}{n_i} - CT$ และ $SSE = SST - SSE$

3. หา MS: $MSE = SSE/(N-k), MSTr = SSTr/(k-1)$

4. หาค่าคำนวณ F: $F = \frac{MSTr}{MSE}$

5. ถ้า F ที่คำนวณได้มากกว่าค่าจากตาราง F ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = .05$ และ (k-1, N-k) หรือ $p\text{-value} \le \alpha$ จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก $H_0 : \mu_i = 0$ โดยในที่นี้ผู้วิจัยใช้โปรแกรม R [22] ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยตัวอย่างการเขียนโปรแกรม [23] ดังนี้

```
data<-c(c(0.0360, 0.0095,  0.0083, 0.0058, 0.0056,
          0.0562, 0.0098, 0.0067, 0.0064, 0.0047,
          0.0540, 0.0109, 0.0070, 0.0055, 0.00543)
k = 5              # number of treatment levels
n = 3              # observations per treatment
df1<-matrix(data,nrow=n,ncol=k)
r = c(t(as.matrix(df1))) # response data
f = c ("Item1", "Item2", "Item3", "Item4", "Item5")   # treatment levels
tm = gl(k, 1, n*k, factor(f))   # matching treatments
av = aov(r ~ tm)
summary (av)
```

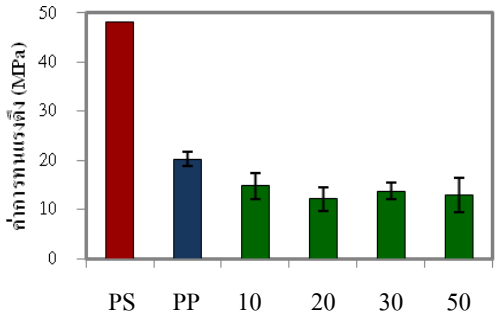
4. ผลการวิจัย

ผลของปริมาณเส้นใยฟางข้าวที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยฟางข้าว

ผลการทดสอบสมบัติสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยฟางข้าว ที่มีปริมาณของเส้นใยฟางข้าว 0 10 20 30 และ 50 pph นั้น มีค่าดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบสมบัติการทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ (Tensile strengths)

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าการทนแรงดึงของพอลิพรอพิลีนมีค่าประมาณ 20 MPa ส่วนค่าการทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนของเส้นใยฟางข้าวในปริมาณต่างๆ มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อมีการเติมเส้นใยฟางข้าวเพิ่มมากขึ้น คืออยู่ในช่วงประมาณ 15 MPa และยังมีค่าการทนแรงดึงต่ำกว่าพอลิสไตรีน (ที่จะนำมาขึ้นรูปเป็นโฟมบรรจุอาหารในขั้นตอนต่อไป ซึ่งมีค่ามาตรฐานเท่ากับ 48 MPa [24]) โดยสาเหตุที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบต่างๆ มีค่าลดลงนั้น อาจเกิดจากเส้นใยฟางข้าวมีความเข้ากันได้ไม่ดีกับพอลิพรอพิลีน เนื่องจากการที่ในเส้นใยฟางข้าวมีหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้มีสมบัติชอบน้ำ จึงเข้ากันได้ไม่ดีกับพอลิพรอพิลีนที่มีสมบัติในทางตรงกันข้าม คือ มีสมบัติไม่ชอบน้ำ เกิดเป็นช่องว่างระหว่างเฟสทั้งสอง จึงทำให้มีค่าการทนแรงดึงลดลง [25] แต่อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 1 เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าการทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบฯ พบว่า บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากของพอลิพรอพิลีนและวัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนของเส้นใยฟางข้าวในปริมาณต่างที่ต่างกัน จะมีค่าการทนแรงดึงไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05



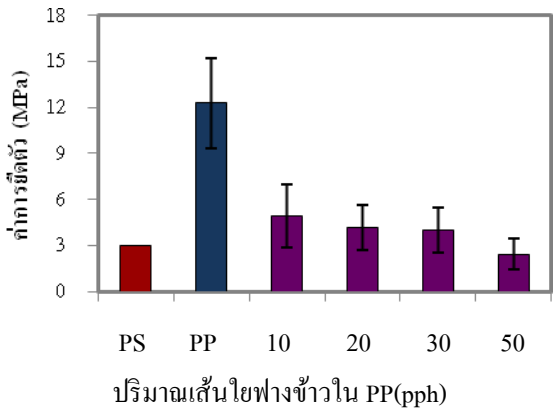
รูปที่ 2 ค่าการทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีน กับเส้นใยฟางข้าวที่สัดส่วนผสมต่างๆ (PS (Pure PS) หมายถึง ฟางข้าว:PS = 0%:100% , PP (Pure PP) หมายถึง ฟางข้าว:PP = 0%:100%)

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่าการทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยฟางข้าวที่สัดส่วนผสมต่างๆ

SOV	df	SS	MS	F	p-value
Treatment	4	15.9	3.97	0.222	0.923
Error	20	357.0	17.85		

4.2 ผลการทดสอบสมบัติการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบ (Percentage of elongation at break)

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบ มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมเส้นใยฟางข้าวในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการที่มีปริมาณเส้นใยฟางข้าวเพิ่มมากขึ้น (ซึ่งเส้นใยฟางข้าวนั้นมีสมบัติการยืดตัวต่ำกว่าพอลิพรอพิลีนอยู่แล้ว) สัดส่วนของพอลิพรอพิลีนจึงมีค่าลดน้อยลง จึงส่งผลให้ค่าการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อมีปริมาณเส้นใยฟางข้าวเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 2 เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบ พบว่า บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากของพอลิพรอพิลีนและวัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนของเส้นใยฟางข้าวในปริมาณต่างๆ มีสมบัติการยืดตัวไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05



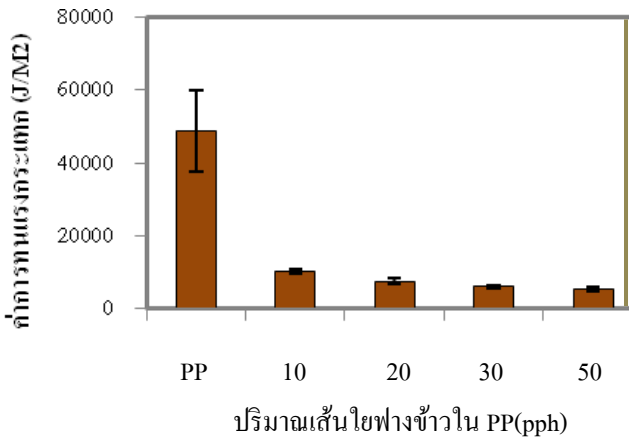
รูปที่ 3 ค่าการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีน กับเส้นใยฟางข้าวที่สัดส่วนผสมต่างๆ (PS (Pure PS) หมายถึง ฟางข้าว:PS = 0%:100% , PP (Pure PP) หมายถึง ฟางข้าว:PP = 0%:100%)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยฟางข้าวที่สัดส่วนผสมต่างๆ

SOV	Df	SS	MS	F	p-value
Treatment	4	30.45	7.614	0.515	0.725
Error	20	295.56	14.778		

4.3 ผลการทดสอบสมบัติการทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ (Impact testing)

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าการทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมเส้นใยฟางข้าวในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เกิดจากปัญหาเช่นเดียวกับที่ทำให้ค่าการทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลง นั่นคือพอลิพรอพิลีนมีความเข้ากันได้ที่ไม่ดีกับเส้นใยฟางข้าว (อันเนื่องจากเส้นใยไม่ได้ทำการดัดแปลง) ดังนั้น เมื่อวัสดุเชิงประกอบมีปริมาณเส้นใยฟางข้าวเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้มีพื้นที่บริเวณรอยต่อหรือช่องว่างระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยฟางข้าวเพิ่มมากขึ้นด้วย จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบฯ มีค่าความแข็งแรงโดยรวมลดลงด้วยนั่นเอง [22] แต่อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 3 เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าการทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบ พบว่า บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากของพอลิพรอพิลีนและวัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนของเส้นใยฟางข้าวในปริมาณต่างๆ มีค่าการทนแรงกระแทกไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05



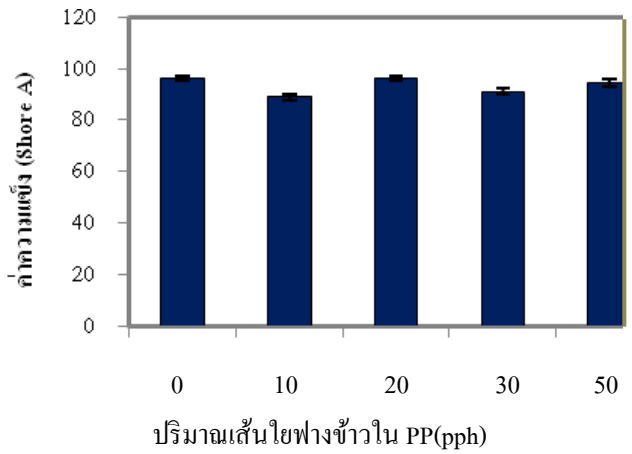
รูปที่ 4 ค่าการทนแรงกระแทกของวัสดุผสมระหว่างพอลิพรอพิลีน กับเส้นใยฟางข้าวที่สัดส่วนผสมต่างๆ (PS (Pure PS) หมายถึง ฟางข้าว:PS = 0%:100% , PP (Pure PP) หมายถึง ฟางข้าว:PP = 0%:100%)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าการทนแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยฟางข้าวที่สัดส่วนผสมต่างๆ

SOV	df	SS	MS	F	p-value
Treatment	4	0.000802	0.0002006	0.551	0.703
Error	10	0.003637	0.0003637		

4.4 ผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ (Hardness testing)

จากรูปที่ 5 พบว่าค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบ นั้นถึงแม้ว่าจะมีสัดส่วนของเส้นใยฟางข้าวเพิ่มมากขึ้น แต่กลับไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เนื่องจากในวัสดุเชิงประกอบฯ แม้ว่าจะเป็นสูตรที่มีเส้นใยฟางข้าวมากที่สุด (ได้แก่ 50 pph) ก็ยังมีปริมาณเส้นใยฟางข้าวเพียง 1 ส่วนใน 3 ส่วน ของวัสดุเชิงประกอบ นั่นคือ วัสดุเชิงประกอบก็ยังคงมีส่วนที่เป็นพอลิพรอพิลีนอยู่มากกว่า (2 ใน 3 ส่วน) ด้วยเหตุนี้ในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน เมื่อพอลิพรอพิลีนได้รับความร้อน จะเปลี่ยนสภาวะจากของแข็งไปเป็นของเหลว ซึ่งในขณะทำการขึ้นรูปนอกจากจะใช้ความร้อนในการขึ้นรูปแล้ว ยังต้องใช้แรงดันเพื่อทำให้พอลิเมอร์ หลอมเหลวมีการเคลื่อนตัวเพื่อให้ไหลตัวให้เต็มแม่พิมพ์ แต่เนื่องจากแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบมีขนาดค่อนข้างเล็ก โดยมี ความกว้าง*ความยาว*ความหนา เท่ากับ 3*10*3 มิลลิเมตร จึงทำให้เส้นใยฟางข้าวซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ไม่หลอมเหลวนั้นเคลื่อนที่ไปตามช่องว่างในแม่พิมพ์ได้ไม่ง่ายเท่ากับพอลิพรอพิลีน (อันเนื่องจากแม่พิมพ์มีขนาดเล็กทำให้เส้นใยฟางข้าวเคลื่อนตัวได้ลำบาก) ทำให้บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแม่พิมพ์กับวัสดุเชิงประกอบฯ มีช่องว่างระหว่างเส้นใยฯกับแม่พิมพ์เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ ในขณะขึ้นรูปด้วยความร้อนพอลิพรอพิลีนที่เกิดการหลอมเหลวได้ไหลตัวเพื่อเติมเต็มบริเวณผิวชิ้นงานได้เป็นอย่างดี ทำให้บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานจะเป็นส่วนของพอลิพรอพิลีนเคลือบอยู่เป็นส่วนใหญ่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าความแข็งที่วัดได้จากบริเวณพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบฯ สูตรต่างๆ มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีส่วนประกอบของพอลิพอพิลีนเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 4 เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพบว่า บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากของพอลิพรอพิลีนและวัสดุเชิงประกอบที่มีสัดส่วนของเส้นใยฟางข้าวในปริมาณต่างๆ มีค่าความแข็งไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05



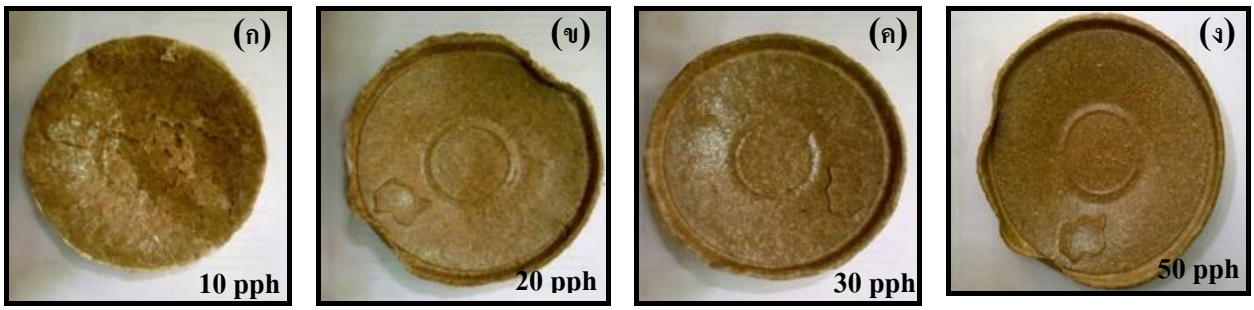
รูปที่ 5 ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีน กับเส้นใยฟางข้าวที่สัดส่วนผสมต่างๆ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยฟางข้าว ที่สัดส่วนผสมต่างๆ

SOV	df	SS	MS	F	p-value
Treatment	4	7.5	1.88	0.183	0.946
Error	45	461.7	10.26		

4.5 ผลของปริมาณเส้นใยฟางข้าวในวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนกับเส้นใยฟางข้าวที่มีต่อความสามารถในการขึ้นรูปเป็นภาชนะด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน

นอกจากการทดสอบสมบัติทางกลแล้ว งานวิจัยฯ นี้ ยังได้ทำการทดลองขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบของพอลิพรอพิลีนและเส้นใยฟางข้าวสูตรต่างๆ (ที่มีปริมาณเส้นใยฟางข้าว 10 20 30 และ 50 pph) ให้เป็นภาชนะรูปทรงแบบเดียวกับถ้วยโฟม ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 วินาที เมื่อขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุเชิงประกอบฯ สูตรต่างๆ แล้วจะได้ภาชนะที่มีลักษณะแตกต่างกันดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะถ้วยที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนของวัสดุผสมพอลิเมอร์ระหว่างพอลิพรอพิลีนและเส้นใยฟางข้าว ที่มีปริมาณเส้นใย (ก) 10 pph (ข) 20 pph (ค) 30 pph และ (ง) 50 pph

โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อภาชนะที่ขึ้นรูปจากวัสดุเชิงประกอบมีปริมาณของเส้นใยฟางข้าวที่ 10 pph พบว่าพื้นผิวชิ้นงานมีลักษณะไม่เนียนเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน และมีการแตกร่อนบริเวณผิวชิ้นงาน ซึ่งน่าจะเกิดจากเส้นใยในชิ้นงานเกิดการเกาะกลุ่มกัน ทำให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการแยกเฟสอย่างชัดเจน จึงทำให้ชิ้นงานมีลักษณะร่อนตัวแยกออกจากกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยฟางข้าวให้มากขึ้นตั้งแต่ 20 - 50 pph จะพบว่าชิ้นงานดูเนียนเรียบมากขึ้นตามปริมาณเส้นใยฟางข้าวที่มากขึ้น โดยสูตรที่มีความเนียนเรียบสม่ำเสมอมากที่สุด คือสูตรที่มีการเติมเส้นใยฟางข้าว 50 pph ดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 (ข-ค) เป็นรูปชิ้นงานที่มีเส้นใยฟางข้างในปริมาณ 20 และ 30 pph จะเห็นได้ว่าเมื่อเทียบกับที่มีการผสมเส้นใยฟางข้าว 10 pph พบว่าลักษณะผิวชิ้นงานมีการแตกร่อนลดน้อยลง มีความเข้ากันได้ดีขึ้น แต่ก็ยังไม่ถึงกับ

เป็นเนื้อเดียวกัน เพราะยังเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเส้นใยฟางข้าวยังไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเท่าที่ควร ซึ่งเกิดการการกลับมาเกาะกลุ่มกันเองของเส้นใยและพอลิพรอพิลีนขณะหลอมเหลว แต่เมื่อผสมเส้นใยฟางข้าวในปริมาณที่มากขึ้น คือ 50 pph (รูปที่ 6 (ค)) จะเห็นได้ว่า พื้นผิววัสดุไม่เกิดการแตกร่อน มีลักษณะเข้ากันกับเมทริกซ์ได้ดีขึ้น พื้นผิวมีความเนียนเรียบมากขึ้น ทั้งนี้น่าจะเกิดจากเส้นใยฟางข้าวมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการอัดแน่นจนไม่เกินการเคลื่อนตัวและไม่เกิดการแยกเฟสของเส้นใยฟางข้าวและพอลิพรอพิลีน นอกจากนี้ ในขณะที่พอลิพรอพิลีนเกิดการหลอมเหลว พอลิพรอพิลีนบางส่วนก็เกิดการแพร่ออกมาบริเวณช่องว่างระหว่างเส้นใยฟางข้าวกับผิวของแม่พิมพ์ จึงทำให้ภาชนะดังกล่าวมีลักษณะเนียนเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน

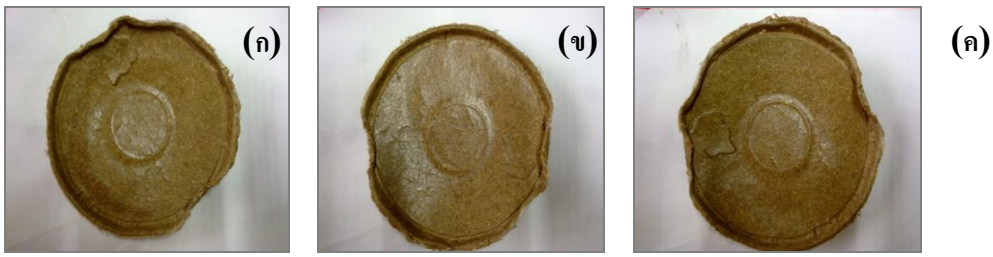
จากการทดลองจะเห็นได้ว่า งานวิจัย นี้สามารถทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนและเส้นใยฟางข้าวได้ให้เป็นภาชนะถ้วยได้อย่างดี โดยสัดส่วนที่สามารถขึ้นรูปถ้วยได้ดีที่สุด คือสูตรที่มีการผสมเส้นใยฟางข้าวที่ปริมาณ 50 pph เนื่องจากการนำไปใช้งานจริง มีแนวโน้มที่จะต้องนำไปบรรจุอาหาร ด้วยเหตุนี้ โดยงานวิจัย นี้จึงได้สนใจนำภาชนะวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว (ที่มีการเติมเส้นใย 50 pph) มาทำการทดสอบสมบัติการทนความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งจะขอกล่าวถึงในลำดับถัดไป

4.6 ผลของการศึกษาสมบัติการทนความร้อนจากเตาอบไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยฟางข้าว

รูปที่ 7 แสดงลักษณะภายนอกของถ้วยที่ขึ้นรูปจากวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยฟางข้าว (ที่มีปริมาณเส้นใยฟางข้าว 50 pph) ที่ผ่านการอบจากเตาไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ที่เวลาต่างๆ (1-5 นาที)

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวผ่านการอบด้วยเตาไมโครเวฟ เป็นเวลา 1-3 นาที พบว่าชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงและมีความร้อนเกิดขึ้นบนชิ้นงาน แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการอบด้วยไมโครเวฟเป็นเวลา 5 นาที พบว่าชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวมีความอ่อนตัวลง ผิวหน้ามีความเหนียวและชิ้นงานมีความร้อน

จากการทดสอบความสามารถในการทนต่อความร้อนจากการอบด้วยเตาไมโครเวฟ ที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ พบว่าเวลาที่มากที่สุด ที่ไม่ทำให้ภาชนะที่ขึ้นรูปจากวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว (พอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยฟางข้าวที่ปริมาณ 5 pph) เกิดการเปลี่ยนแปลง คือ ระยะเวลา 3 นาที



รูปที่ 7 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของถ้วยที่ทำจากวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยฟางข้าว (ที่มีปริมาณเส้นใยฟางข้าว 50 pph) หลังผ่านการทดสอบการทนความร้อนด้วยเตาอบไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ที่เวลา (ก) 1 นาที (ข) 3 นาที และ (ค) 5 นาที

5. บทสรุปงานวิจัย

จากการศึกษาสมบัติเชิงกล ความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติความต้านทานความร้อนจากเตาอบไมโครเวฟของวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยฟางข้าวนั้น สามารถสรุปได้ว่าสามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพอลิพรอพิลีนผสมเส้นใยฟางข้าวได้เป็นอย่างดี และยังสามารถทนความร้อนจากเตาไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ ได้เป็นเวลาถึง 3 นาที ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวไปนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารทดแทนการใช้ถ้วยโฟมได้

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ เพื่อต้องการพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตขึ้นจากฟางข้าว ด้วยเหตุนี้จึงควรที่จะนำภาชนะที่ขึ้นรูปได้จากงานวิจัยนี้ ไปทำการทดสอบสมบัติต่างๆ เพิ่มเติม ได้แก่ การทดสอบหาปริมาณสารปนเปื้อนลงสู่อาหาร การตรวจหาการแพร่กระจายของสารในภาชนะพลาสติกลงสู่อาหาร เพื่อเป็นข้อมูลเพิ่มเติมและเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้บริโภคต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ดาเรศน์ กิตติโยภาส,เจนจบ สุขสด, อนุรักษ์ เรือนหล้า,ทะนง พรประดับเกียรติ และอมรภัทร ทัศนประสิทธิผล, (2547). “ผลกระทบจากการเผาในที่โล่ง”, วารสารเกษตรกรรมปลอดการเผา. 1 (2) :1-4.

[2] กลุ่มระบบงานวิจัย กองแผนงาน กองแผนงาน ร่วมกับกลุ่มวิจัยและพัฒนาอินทรียวัตถุเพื่อการเกษตรสำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน, “การไถกลบตอซังเพื่อปรับปรุงดินและเพิ่มผลผลิตข้าว”, Available : http://www.ldd.go.th/menu_moc/POSTER/Rice/rice.htm, 29 May 2013. (in Thai)

[3] ความรู้เกี่ยวกับข้าว-ชาวนา กลุ่มถ่ายทอดวิทยาการผลิตเม็ดพันธุ์ดี ศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวขอนแก่น “การใช้ประโยชน์จากฟางข้าว” Available: http://kkn-rsc.ricethailand.go.th/rice/product/rice_xx2-08_ produce0019.html, 29 May 2013. (in Thai)

[4] K. Subramanian and K.Ram, (2011). "Biochemical conversion of rice straw into bioethanol - an exploratory investigation", Journal of Biofuels, 2: 33-41.

[5] กิตติศักดิ์ บัวศรี, (2001). “การผลิตแผ่นฉนวนความร้อนจากฟางข้าว”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ประเทศไทย.

[6] สมพงษ์ พิริยายนต์, (2003). “การผลิตและทดสอบวัสดุมุงหลังคาที่ทำจากของผสมปอแก้วและยางธรรมชาติ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ประเทศไทย.

[7] จงกลนี วิทยารุ่งเรืองศรี และ สุชัญญา พลเพชร, (2013). “พลาสติกบรรจุอาหารและกล่องโฟม ใช้อย่างไรให้ปลอดภัย” Available: http://www.fda.moph.go.th/ project/ foodsafety/foodbackhome/news, 29 May 2013. (in Thai)

[8] C. Maier and T. Calafut, (2008). “*Polypropylene: the definitive user's guide and databook*”, New York: Plastics design library;

[9] R. Malkapuram, V. Kumar and Y. S. Negi, (2009). “Recent development in natural fiber reinforced in polypropylene composites”, Journal of reinforced plastic and composites 28:1169-1189.

[10] E. Ana, V. Francisco and K. Sigbritt, (2004). “Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties”, Composites: Part A, 35: 1267–1276.

[11] S. Borysiak and B. Doczekalska, (2006). “Influence of chemical modification of wood on the crystallisation of polypropylene”, Holz als Roh- und Werkstoff, 64: 451–454.

[12] A. K. Bledzki and O. Faruk,(2006). “Injection moulded microcellular wood fibre–polypropylene composites”, Composites: Part A, 37: 1358–1367.

[13] V. N. Hristov, R. Lach and W. Grellmann, (2004). “Impact fracture behavior of modified polypropylene/wood fiber composites”, Polymer Testing, 23: 581–589.

[14] S. Jungil, D. J. Gardner, S. O’Neill and C. Metaxas, (2003). “Understanding the Viscoelastic Properties of Extruded Polypropylene Wood Plastic Composites”, Journal of Applied Polymer Science, 89: 1638–1644.

[15] C. Joly, R. Gauthier and B. Chabert, (1996).”Physical chemistry of the interface in polypropylene/cellulosic-fibre composites”, Composites Science and Technology, 56: 761–765.

[16] A. Karmarkar, S. S. Chauhan, J. M. Modak and M. Chanda, (2007). “Mechanical properties of wood–fiber reinforced polypropylene composites: Effect of a novel compatibilizer with isocyanate functional group”, Composites: Part A, 38: 227–233.

[17] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M. N. Belgacem and A. Dufresne, (2007). “Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of Silane Coupling Agents and Fibres Loading”, Composites Science and Technology, 67: 1627–1639.

[18] กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ, (2011). “ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์” Available : http://msds.pcd.go.th/pdf/159.pdf , 12 December 2011. (in Thai)

[19] กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ, (2011). “ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์” Available : http://msds.pcd.go.th/searchName.asp? vID=2402, 12 December 2011. (in Thai)

[20] ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 295), (2011). “กำหนดคุณภาพหรือมาตรฐานของภาชนะบรรจุที่ทำจากพลาสติก” Available : http://www.centrallabthai.com/web/uploadfiles/pdf/Qualities_or_standard_for_container_made_from_plastics_(No295)_B.E._2548_(2005)(Thai).pdf, 12 December 2011. (in Thai)

[21] Kempthorne, Oscar (1979). The Design and Analysis of Experiments (Corrected reprint of (1952) Wiley ed.). Robert E. Krieger. ISBN 0-88275-105-0.

[22] R Development Core Team, (2004). “A Language and Environment for Statistical Computing”, R foundation for statistical computing, Austria, http://www,T-profect.org,

[23] Tutorial, “Completely Randomized Design” Available: http://www.r-tutor.com/elementary-statistics/analysis-variance/completely-randomized-design, 29 May 2013.

[24] Total petrochemical, technical datasheet, (2011). “Polystyrene crystal” Available http://www.totalrefiningchemicals.com/Site-CollectionDocuments/Technical%20Datasheets/1160EN.pdf, 15 December 2011. (in Thai)

[25] Md. R. Rahman, Md. M. Huque, Md. N. Islama and M. Hasan, (2009). "Mechanical properties of polypropylene composites reinforced with chemically treated abaca", Composites: Part A, 40: 511–517.