



246706



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมและสมบัติโฟมป้องกันการกระแทกเตรียมจาก
แป้งมันสำปะหลังผสมน้ำยางธรรมชาติ

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ ตันรัตน์กุล และคณะ

26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552

600251058

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



246706

สัญ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมและสมบัติโพลิเมอร์ป้องกันการกระแทกเตรียมจาก
แป้งมันสำปะหลังผสมน้ำยางธรรมชาติ

คณะผู้วิจัย

1. รองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ ตันรัตนกุล
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิราภรณ์ ไชยบัญญัติษฐ์
3. นางสาววรรณภา ชูเมฆา

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ

คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)



กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ในการวิจัย

สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	i
แบบสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)	1
บทคัดย่อ	4
Abstract	5
อักษรย่อและสัญลักษณ์	6
บทที่ 1 บทนำ	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและรายงานที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วิธีวิจัย	38
3.1 สารเคมี	38
3.2 อุปกรณ์	38
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	39
3.4 วิธีการทดลอง	39
3.4.1 การสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์	39
3.4.2 การตรวจสอบกราฟท์โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)	40
3.4.3 การตรวจสอบกราฟท์โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)	40
3.4.4 การขึ้นรูปโฟม	41
1) การขึ้นรูปโฟมแข็ง	41
2) การขึ้นรูปโฟมแข็งผสมยางธรรมชาติ	41
3) การขึ้นรูปโฟมที่มีการเติมสารเติมแต่งอื่นๆ	42
3.4.5 การเก็บตัวอย่าง	42
3.4.6 การวัดความหนาแน่น (density)	42
3.4.7 การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง (flexural properties testing)	43
3.4.8 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact resistance testing)	43
3.4.9 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM)	43
3.4.10 การตรวจสอบหาปริมาณผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)	43
3.4.11 การทดสอบการเสื่อมสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน (soil burial testing)	43
3.4.12 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี (gel permeation chromatography, GPC)	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	46
4.1 ผลการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์	46
4.1.1 ผลการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ของแป้งดิบ	46
4.1.2 ผลการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ของแป้งออกซิไดซ์ (Gelsize-75)	52

4.1.3 ผลการสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ของแป้งแอมโฟเทอริก (Geltron-245)	53
4.2 ผลการตรวจสอบกราฟท์โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี	55
4.3 ผลการตรวจสอบกราฟท์โคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรสโกปี	59
4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และความดันที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมแป้ง	64
4.5 อิทธิพลของกลีเซอรอลต่อความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแป้ง	66
4.6 อิทธิพลของปริมาณสารฟู่ต่อความหนาแน่นและสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแป้ง	68
4.7 อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติต่อความหนาแน่น สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของโฟมแป้ง	69
4.7.1 ผลการทดสอบความหนาแน่น	70
4.7.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	71
4.7.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติด้วยเทคนิค การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	75
4.7.4 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยา	76
4.8 อิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวต่อความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของ โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมยางธรรมชาติ	79
4.9 อิทธิพลของสารฟู่ต่อความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมยางธรรมชาติ	82
4.9.1 โซเดียมไบคาร์บอเนต	82
4.9.2 อะโซไดคาร์บอนาไมด์ (ADC)	84
4.10 อิทธิพลของสารริเริ่มปฏิกิริยาต่อความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของ โฟมแป้งมันสำปะหลังผสมน้ำยางธรรมชาติ	87
4.10.1 การแปรปริมาณ PPS ที่ปริมาณยางธรรมชาติคงที่	87
4.10.2 การแปรปริมาณยางธรรมชาติที่ปริมาณ PPS คงที่	92
4.10.3 การแปรปริมาณ BPO ที่ปริมาณยางธรรมชาติคงที่	99
4.10.4 การแปรปริมาณยางธรรมชาติที่ปริมาณ BPO คงที่	102
4.10.5 การเปรียบเทียบการเติม PPS และ BPO ที่มีการแปรปริมาณยางธรรมชาติ	108
4.11 อิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บโฟมแป้งผสมยางธรรมชาติ	111
4.12 ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย	114
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	120
เอกสารอ้างอิง	123
ภาคผนวก	131
ก. ตารางเปรียบเทียบวัตถุดิบ	132
ข. สมบัติเชิงกลของโฟมพอลิสไตรีนทางการค้า	134
ค. อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์	136
ง. Manuscript	157
จ. บทคัดย่อและโปสเตอร์ในงานประชุมวิชาการ EPF09	171
ฉ. รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการที่มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง	174
ช. การปรับปรุงแก้ไขรายงานตามข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	185

แบบสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ชื่อโครงการ การเตรียมและสมบัติโฟมป้องกันกระแทกเตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมน้ำยางธรรมชาติ
Preparation and Properties of Thermoplastic Starch-Based Packaging Foam Made From
Cassava Starch Blended With Natural Rubber Latex

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

รองศาสตราจารย์ ดร.วารกรณ์ ตันรัตนกุล

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

โทรศัพท์ 074-288361 โทรสาร 074-446925 E-mail address: varaporn.t@psu.ac.th

นักศึกษา / ผู้ร่วมวิจัย นางสาววรรณภา ชูเมฆา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิราภรณ์ ไชยบัณฑิตย์

งบประมาณทั้งโครงการ 350,000 บาท

ระยะเวลาดำเนินการ 20 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน 2550 ถึงวันที่ 31 พฤษภาคม 2552

ปัญหาที่ทําวิจัยและความสำคัญ

โฟมพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมาจากพลาสติกสังเคราะห์ เช่น พอลิสไตรีน พลาสติกชนิดนี้มีความแข็งแรงแต่มีการเสื่อมสลายยากเช่นเดียวกับพลาสติกชนิดอื่นๆ ปัญหาขยะพลาสติกได้ถูกนำมาพิจารณาทั้งในประเทศที่เจริญแล้วและประเทศไทย ในอนาคตอันใกล้รัฐบาลของกลุ่มประเทศยุโรป (EU) สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น จะมีมาตรการควบคุมชนิดของพลาสติก โดยจะเน้นการใช้พลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ง่าย ตัวอย่างเช่น โฟมพลาสติกที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์เพื่อกันกระแทกจะต้องเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ หรือเป็นโฟมที่มีการเสื่อมสลายได้ง่ายกว่าโฟมพลาสติกสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ โฟมที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังมีศักยภาพสูงมากแต่ยังมีข้อเสียด้านความเปราะสูง และมีความชอบน้ำค่อนข้างสูง แต่สามารถแก้ไขข้อเสียนี้ได้ด้วยการเติมพอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่นสูงและไม่ชอบน้ำ เช่น ยางธรรมชาติ ประเทศไทยมีผลผลิตทั้งยางธรรมชาติ และแป้งมันสำปะหลังสูงมาก ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงจะผลิตโฟมจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น เพื่อทำเป็นโฟมพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ง่าย สามารถนำไปใช้ในงานด้านการป้องกันการกระแทกหรืองานบรรจุภัณฑ์

วัตถุประสงค์

1. เตรียมและศึกษาสมบัติต่างๆของโฟมแป้งมันสำปะหลังที่มีน้ำยางธรรมชาติเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยากราฟท์ (grafting reaction) ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและน้ำยาง

ผลการดำเนินงาน

ได้ทำการทดลองสังเคราะห์กราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติ โดยมีน้ำเป็นตัวกลาง ใช้โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ใช้แป้งมันสำปะหลัง 3 ชนิด คือ แป้งดิบ แป้งออกซิไดซ์ และแป้งแอมโฟเทอริก ทำการสังเคราะห์ที่สภาวะต่างๆ โดยแปรอุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ รวมทั้งปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยา และอัตราส่วนระหว่างแป้งและยาง ผลการทดลองพบว่าแป้งดิบดีที่สุด เนื่องจากแป้งออกซิไดซ์มีการจับตัวเป็นก้อนหลังผสมน้ำยางธรรมชาติ และแป้งแอมโฟเทอริกมีความหนืดสูงมากเกินไปเมื่อแขวนลอยในน้ำ ทำการตรวจสอบการเกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ ด้วยการสกัดยางธรรมชาติที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไปด้วยโทลูอีนซึ่งเป็นตัวทำละลายของยางธรรมชาติ ที่ 110 °C (จุดเดือดของโทลูอีน) เป็นเวลา 40 ชั่วโมง ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า Soxhlet

extraction วิเคราะห์ตะกอนที่เหลือจากการสกัดด้วยเทคนิค FTIR และ $^1\text{H-NMR}$ ผลการทดลองพบว่ามีกราฟที่โคพอลิเมอร์เกิดขึ้น แต่เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการสังเคราะห์ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการขึ้นรูปเป็นโฟม ถึงแม้ว่าจะมีกราฟที่โคพอลิเมอร์เกิดขึ้นก็ตาม เพราะการสังเคราะห์ใช้น้ำปริมาณมาก ทำให้มีของแข็ง (total solid content) ต่ำมาก เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นโฟม ทำให้ต้องเติมเบงลงไปอีก และเบงจับตัวเป็นก้อน ทำให้ไม่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมได้ นอกจากนี้ พอลิเมอร์ผสมนี้เกิดการแยกเฟสเมื่อวางทิ้งไว้ และหลังการตกตะกอนเพื่อแยกพอลิเมอร์ผสมออกจากน้ำ จะมียางธรรมชาติแยกเฟสออกมาจากเบง ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ เพราะจะทำให้โฟมมีการแยกเฟสของเบงและยางธรรมชาติมากขึ้น ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงไม่นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการสังเคราะห์มาใช้ในการขึ้นรูปโฟม อย่างไรก็ตาม มีการตรวจสอบการเกิดกราฟที่โคพอลิเมอร์ระหว่างเบงและยางธรรมชาติ ที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปโฟม ด้วยการนำโฟมดังกล่าว ไปทำการสกัดแบบ Soxhlet extraction ดังที่กล่าวมาแล้ว และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่ามีกราฟที่โคพอลิเมอร์เกิดขึ้น

ทำการเตรียมโฟมเบงและโฟมเบงผสมน้ำยางธรรมชาติ โดยให้มีเนื้อยางแห้ง 15-35 ส่วนต่อ 100 ส่วนของเบงโดยน้ำหนัก กำหนดเรียกหน่วยนี้ว่า parts per hundred (pph) ใช้เบงดิบและน้ำยางข้น ใช้โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟตและเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มการเกิดปฏิกิริยาในปริมาณต่างๆ ทำการเก็บตัวอย่างที่ความชื้นสัมพัทธ์ 2 ค่า คือ 40 %RH และ 70 %RH เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 2 วัน และ 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง (flexural properties, 4-point bending) ความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact resistance) และความหนาแน่น ทดลองหาสูตรที่เหมาะสมและสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสม ทดลองแปรชนิดและปริมาณของสารฟู (โซเดียมไบคาร์บอเนตและอะโซไดคาร์บอเนต) ศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวในน้ำยางธรรมชาติ ตรวจสอบสถานะวิทยาของโฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบการเสื่อมสลายทางชีวภาพของโฟมด้วยการฝังดินเป็นเวลานานถึง 20 สัปดาห์

สรุปผลการวิจัย

ยางธรรมชาติทำให้โฟมเบงมีคุณสมบัติความหนาแน่นและความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งและค่าความเค้นสูงสุดต่อแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากเติมยางธรรมชาติในโฟมเบง แต่ค่าความเครียด ณ จุดขาด และความเครียด ณ ความเค้นสูงสุด มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ชนิดของสารฟูมีผลต่อความหนาแน่นและสมบัติเชิงกล โดยที่โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารฟูที่ใช้ได้ดีกับเบงมีนํ้าหนักเบงและมีราคาถูก แต่ไม่เหมาะสมที่จะทำใหยางธรรมชาติเป็นโฟม จึงทำให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามเนื้อยางที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารฟูชนิดนี้ การเพิ่มปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนตทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่โฟมจะเหนียวเกาะติดแม่แบบ ไม่เหมาะต่อกระบวนการขึ้นรูป และโฟมมีสีคล้ำมากขึ้น ส่วนอะโซไดคาร์บอเนตเป็นสารฟูที่ดีของยางธรรมชาติ จึงทำให้โฟมมีความหนาแน่นลดลง สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งสูงขึ้นแต่ความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง การเติมสารริเริ่มชนิดโปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟตช่วยให้โฟมมีความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เป็นเพราะการเกิดกราฟที่โคพอลิเมอร์ระหว่างเบงและยางธรรมชาติ แต่โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟตทำใหยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งลดลง เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์สามารถทำใหยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลได้ จึงทำให้โฟมมีความหนาแน่นมากขึ้น และสมบัติเชิงกลสูงขึ้น ถึงแม้ว่าสารลดแรงตึงผิวจะช่วยให้ยางธรรมชาติเข้ากันได้ดีกับเบงมากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น แต่ก่อให้เกิดปัญหาการเหนียวเกาะติดแม่แบบ ไม่เหมาะต่อการขึ้นรูป การทดสอบการฝังดินพิสูจน์ให้เห็นว่า การใช้ยางธรรมชาติในปริมาณ 15 pph โฟมยังคงเกิดการเสื่อมสลายทางชีวภาพได้เป็นอย่างดีภายในเวลา 16 สัปดาห์ ส่วนการใช้ยางธรรมชาติมากๆ เช่น 30 pph อาจจะต้องใช้เวลาในการย่อยสลายทางชีวภาพนานหลายเดือน ความชื้นสัมพัทธ์มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของโฟม

โครงการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการเตรียมโฟมป้องกันการกระแทก จากแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติที่มีกราฟท์โคพอลิเมอร์เกิดขึ้น

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง
ทดลองเตรียมโฟมในสเกลที่ใหญ่ขึ้น เปลี่ยนชนิดของสารฟูและสารริเริ่มปฏิกิริยา

ผลงานวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

บทความวิชาการเรื่อง “Effect of Potassium Persulfate on Graft Copolymerization and Mechanical Properties of Cassava Starch/Natural Rubber Foams” ได้รับการตอบรับตีพิมพ์ในวารสาร Journal of Applied Polymer Science (ดูภาคผนวก ง)

การเสนอผลงานวิชาการ

1. เสนอผลงานแบบโปสเตอร์เรื่อง Cassava starch foam toughened with natural rubber latex ในการประชุมวิชาการ European Polymer Congress 2009 (EPF09) ระหว่างวันที่ 12-17 กรกฎาคม 2552 ที่ประเทศออสเตรเลีย (ดูภาคผนวก จ).
2. เสนอผลงานในการประชุมวิชาการของ สกว. ระหว่างวันที่ 5-6 มิถุนายน 2552
3. เสนอผลงานในวันนักวิจัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วันที่ 27 พฤษภาคม 2552 และสัปดาห์ มอ. วิชาการ ระหว่างวันที่ 16-19 สิงหาคม 2552
4. เสนอผลงานในการประชุมวิชาการที่มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ระหว่างวันที่ 26-28 พฤศจิกายน 2551 (ดูภาคผนวก ฉ)

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อแรงกระทำของโฟมแข็งเทอร์โมพลาสติก ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมน้ำยางธรรมชาติ และทำให้เกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติด้วยการใช้โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา กราฟท์โคพอลิเมอร์ (NR-g-starch) เกิดขึ้นทั้งในส่วนที่ทำการสังเคราะห์ในสารละลายและการขึ้นรูปเป็นโฟม ซึ่งถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ ทำการขึ้นรูปโฟมด้วยการอัดที่ 190 °C และผสมยางธรรมชาติในปริมาณ 0-35 ส่วนต่อ 100 ส่วนโดยน้ำหนักของแป้ง ยางธรรมชาติทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความต้านทานต่อแรงกระทำให้กับโฟมแข็ง และในบางสัดส่วนยังช่วยเพิ่มมอดูลัสต่อแรงตึงอีกด้วย ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ดีระหว่างแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติในระดับหนึ่ง บ่งชี้เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ดี การเกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์ช่วยให้โฟมมีความต้านทานต่อแรงกระทำสูงขึ้น แต่ไม่ได้ช่วยเพิ่มสมบัติความทนต่อแรงตึง เนื่องจากโปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟตทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลง กราฟท์โคพอลิเมอร์น่าจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าระหว่างเฟสแป้งและเฟสยางธรรมชาติ และทำหน้าที่เป็นสารที่เพิ่มความเข้ากันได้ให้กับแป้งและยางธรรมชาติ ส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสมากขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของโฟมแข็ง เนื่องจากแป้งสามารถดูดซับไอน้ำจากบรรยากาศได้ เนื่องจากโฟมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณเนื้อยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น จึงควรมีการพิจารณาความต้านทานต่อแรงกระทำจำเพาะ (ค่าความต้านทานต่อแรงกระทำต่อค่าความหนาแน่น) การทดสอบการเสื่อมสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดินพบว่า โฟมแข็งสามารถเสื่อมสลายได้ภายใน 8 สัปดาห์ ส่วนโฟมแข็งที่มียางธรรมชาติ 15 ส่วน จะเสื่อมสลายได้ดีภายใน 16 สัปดาห์

The objective of this study was to improve impact strength of thermoplastic starch foam prepared from cassava starch blended with natural rubber latex by *in situ* graft copolymerization and using potassium persulfate as an initiator. The *in situ* graft copolymer (NR-g-starch) was fruitfully performed in both solution and melt blending based on $^1\text{H-NMR}$ and FTIR characterization. Foams were prepared by baking and contained 0-35 pph of natural rubber. Natural rubber acted as an impact modifier of thermoplastic starch foam. Natural rubber also increased flexural modulus at certain composition, indicating compatible blend. The presence of NR-g-starch enhanced impact strength of the blends but did not improve flexural modulus because potassium persulfate decreased molecular weight of natural rubber. NR-g-starch occurred at interphase between starch and natural rubber and acted as a compatibilizer by increasing interfacial adhesion. Relative humidity also played an important role on mechanical properties. Since foam density increased with increasing natural rubber content, the specific impact strength was considered. Soil burial test showed that cassava starch foam was fully degraded within 8 weeks while foam containing 15 pph of natural rubber was largely degraded within 16 weeks.

อักษรย่อและสัญลักษณ์

อักษรย่อ	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
ADC	azodicarbonamide	อะโซไดคาร์บอนาไมด์
AGU	anhydroglucose units	หน่วยกลูโคส
BPO	benzoyl peroxide	เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์
DCP	dicumyl peroxide	ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์
DMTA	dynamic mechanical thermal analysis	การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต
DSC	differential scanning calorimeter	เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลลอริมิเตอร์
EPS	expanded polystyrene	โฟมพอลิสไตรีน
FTIR	fourier transform infrared spectrometer	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์
GPC	gel permeation chromatography	เจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี
NaHCO ₃	sodium bicarbonate	โซเดียมไบคาร์บอเนต
NMR	nuclear magnetic resonance spectrometer	เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์
PPS	potassium persulfate	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต
PVOH	polyvinyl alcohol	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
RH	relative humidity	ความชื้นสัมพัทธ์
SEM	scanning electron microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
TEM	transmission electron microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
TPS	thermoplastic starch	แป้งเทอร์โมพลาสติก
TGA	thermogravimetric analysis	การวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก
XRD	x-ray diffractometer	เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
UV	ultra violet	รังสีอัลตราไวโอเล็ต

สัญลักษณ์	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
$^{\circ}\text{C}$	degree Celsius	องศาเซลเซียส (องศาเซนติเกรด)
cm	centimeter	เซนติเมตร
E	flexural modulus	มอดุลัสแรงดัดโค้ง
g	gram	กรัม
g/cm^3	gram per cubic centimeter	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
h	hour	ชั่วโมง
kg/cm^2	kilogram per square centimeter	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
kJ/mol	kilojoule per mole	กิโลจูลต่อโมล
J/m^2	joule per square meter	จูลต่อตารางเมตร
mg	milligram	มิลลิกรัม
ml	milliliter	มิลลิลิตร
mm	millimeter	มิลลิเมตร
ml/g	milliliter per gram	มิลลิลิตรต่อกรัม
mm/min	millimeter per minute	มิลลิเมตรต่อนาที
min	minute	นาที
MPa	Mega Pascal	เมกะพาสคาล
nm	nanometer	นาโนเมตร
pph	parts per hundred	ส่วนในร้อยส่วน
psi	pound per square inch	แรงปอนด์ต่อตารางนิ้ว
rpm	round per minute	รอบต่อนาที
sec	second	วินาที
T_g	glass transition temperature	อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน
T_m	melting temperature	อุณหภูมิการหลอมเหลว
X_c	degree of crystallinity	ปริมาณผลึก
σ_{max}	flexural stress at maximum load	ค่าความเค้นสูงสุด
ϵ_{max}	flexural strain at maximum load	ค่าความเครียดสูงสุด
ϵ_b	flexural strain at break	ค่าความเครียด ณ จุดขาด
μm	micrometer	ไมโครเมตร
wt%	percentage by weight	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก