

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนโดยใช้เส้นใยจากกากกล้วยน้ำว้าเป็นสารเติมแต่ง



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 107798
วัน,เดือน,ปี 14 พ.ค. 2553

๒. 12212337
๓.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation of Polyurethane Foam Using Banana fiber as an Additive



Mr. Waranyu

Issarathikul

Mr. Aroon

Singh

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ การเตรียมโพรโทคอลยูริเทน โดยใช้เส้นใยจากกากกล้วยน้ำว้าเป็นสารเติมแต่ง
นักศึกษา นาย วรวิญญู อิศราธิกุล
นาย อรุณ ชิงห์
ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์
สาขา เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2549
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้ โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ
กรรมการ อ. สุจินต์ ตันติพิสิฐกุล
กรรมการ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์

.....
(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)
หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ	การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนโดยใช้เส้นใยจากกากกล้วยน้ำว้าเป็นสารเติมแต่ง	
นักศึกษา	นาย วรรณ	อิสราธิกุล
	นาย อรุณ	ชิงห์
ภาควิชา	เคมี คณะวิทยาศาสตร์	
สาขา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2549	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. มาลินี	ชัยศุภกิจสินธุ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนผสมและไม่ผสมเส้นใยกล้วย เพื่อใช้เป็นวัสดุกันกระแทกที่สามารถย่อยสลายได้ เส้นใยกล้วย 2 ขนาดคือชนิดหยาบและชนิดละเอียดถูกใช้ในปริมาณ 36, 42, 48 และ 54 %w/w ต่อน้ำหนักเรซินผสม ตรวจวัดความหนาแน่นสมบัติการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และ การย่อยสลายของโฟมที่เติมเส้นใยกล้วยเปรียบเทียบกับโฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่ได้เติม

ผลการทดลองพบว่า เวลาในการฟูตัวของโฟมนานขึ้นเมื่อเติมเส้นใยกล้วยโดยเส้นใยชนิดหยาบและชนิดละเอียดจะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน โดยรวมแล้วเส้นใยหยาบทำให้ความหนาแน่นขึ้นงานเพิ่มมากขึ้น เส้นใยชนิดละเอียดทำให้โฟมดูดซึมน้ำมากขึ้น การเติมเส้นใยกล้วยลงไป โฟมพอลิยูรีเทนทำให้ความสามารถรับแรงกดอัดและค่ามอดูลัสลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนในโฟมพอลิยูรีเทนที่ผสมเส้นใยกล้วยทั้งชนิดหยาบและชนิดละเอียดลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่เส้นใยหยาบให้ขนาดรูพรุนใหญ่กว่าเล็กน้อย ผลการฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน พบว่า น้ำหนักโฟมที่ผสมเส้นใยกล้วยลดลงมากกว่าโฟมที่ไม่ผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นใยละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Preparation of Polyurethane Foam Using Banana fiber as an Additive
Name	Mr. Waranyu Issarathikul Mr. Aroon Singh
Department	Chemistry
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2006
Special Project Advisor	Assoc. Prof. Dr. Malinee Chaisupakitsin

ABSTRACT

This project aims to study on preparation of polyurethane foam mixed with and without banana fibers as impact resistant foam which can undergo biodegradation. Two types of banana fibers, coarse and fine, were used in the range of 36, 42, 48, and 54 %w/w to weight of resin. Measuring the density, water absorption, mechanical properties, morphology and biodegradation of polyurethane foam with banana fibers compare to foam without fibers.

The experimental results indicated that cream time was slower when adding banana fibers into foam. Coarse banana fibers increase density of polyurethane foam, on the other hand, fine banana fibers increase water absorption. Mixing banana fibers into polyurethane foam decreases the compressive force and modulus but has no effect on the dimensional change under low and high temperature. Scanning electron micrograph showed that the average porosity of polyurethane foam with banana fibers were reduced. However, the coarse banana fibers showed slightly larger. The result from burial in soil after 3 months indicated that weight loss of polyurethane mixed with fibers was found to higher than polyurethane without fibers especially polyurethane with fine banana fibers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานในโครงการนี้สำเร็จลุล่วง
ไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยสุขกิจสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ ที่ให้
ความกรุณาในการให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะ
วิทยาศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อผู้เช่าห้อง และ หม้อต้มน้ำ

ขอขอบพระคุณ คุณสังข์ชัย สังข์ชนะสกุล สำหรับคำแนะนำและให้ความช่วยเหลือใน
การติดต่อบริษัทที่มีสารเคมีให้

ขอขอบพระคุณ คุณสมภพ เดิศจันทนากุล และ บริษัท ไทยมิตซูบิชิเซลส์เคมికอล ที่ให้
ความอนุเคราะห์สารเคมีให้ที่ใช้ในโครงการพิเศษ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ภาคิวิชาเคมีทุกท่าน และ ขอขอบคุณ
พี่ๆ เพื่อนๆ น้อง ๆ และ ท่านอื่นที่มิได้กล่าวถึง ที่คอยให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่าง ๆ
รวมทั้งกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

นาย วิริญญู

นาย อรุณ

อิสราธิกุล

ชิงห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 โฟมพอลิยูรีเทน	
2.1.1 พอลิยูรีเทน	3
2.1.2 การขึ้นรูปโฟมพอลิยูรีเทน	11
2.1.3 ชนิดของโฟมพอลิยูรีเทน	11
2.1.4 ปฏิกิริยาพื้นฐานของโฟมพอลิยูรีเทน	13
2.2 เส้นใยกล้วย	
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของกล้วย	16
2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของกล้วย	16
2.3 พลาสติกกับการย่อยสลายได้	
2.3.1 เสถียรภาพของพลาสติก	17
2.3.2 การกำจัดพลาสติกโดยการทำให้เสื่อมสลายไป	17
2.3.3 การค้นคว้าวิจัยเพื่อผลิตพลาสติกย่อยสลายได้	18
2.3.4 พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยวิธีการอื่น	19
2.3.5 มาตรฐานในการตรวจสอบการย่อยสลาย	19
2.4 วัสดุกันกระแทก	20
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี	25
3.2 อุปกรณ์	25
3.3 วิธีการทดลอง	25
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	
4.1 การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล	
4.1.1 การหาค่า Cream time , Gel time และ Tack free time	29
4.1.2 การตรวจวัดความหนาแน่นชิ้นงาน โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง	30
4.1.3 การตรวจสอบการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงาน เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	32
4.1.4 การทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ	33
4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา	34
4.3 การทดสอบการย่อยสลาย	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 พอลิออลที่นิยมใช้เตรียม พอลิยูรีเทน	5
ตารางที่ 2.2 แสดงความว่องไวของเอมีนคดียูรีที่มีผลต่อปฏิกิริยาระหว่าง ฟีนิลไอโซไซยาเนตและบิวทานอล	7
ตารางที่ 2.3 ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนจากฟีนิลไอโซไซยาเนต	8
ตารางที่ 2.4 สมบัติของสารช่วยให้เกิดฟอง	10
ตารางที่ 3.1 สูตรของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีการเติมเส้นใยแก้ว	25
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ย Cream Time , Gel Time และ Tack free Time ของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรต่างๆ	29
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยความหนาแน่น , ค่าแรงกดอัดสูงสุด และค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของ โฟมพอลิยูรีเทนสูตรต่างๆ	30
ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดที่เปลี่ยนไปเฉลี่ยของ โฟมพอลิยูรีเทนเมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง	32
ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดที่เปลี่ยนไปเฉลี่ยของ โฟมพอลิยูรีเทนเมื่อนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ - 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน	33
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของ โฟมพอลิยูรีเทนสูตรต่างๆเมื่อนำไปทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ	33
ตารางที่ 4.6 แสดงขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ โฟมพอลิยูรีเทนที่ได้จากภาพสัณฐานวิทยาจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM	34
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าน้ำหนักที่หายไปของ โฟมพอลิยูรีเทนสูตรต่างๆเมื่อทดสอบสมบัติการย่อยสลาย	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 4.1 แสดงความหนาแน่นเฉลี่ยของ โฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีและมีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณ 32 , 37 , 43 และ 48 %w/w ตามลำดับ	30
รูปที่ 4.2 แสดงค่าแรงกดสูงสุดเฉลี่ยของ โฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีและมีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณ 32 , 37 , 43 และ 48 %w/w ตามลำดับ	31
รูปที่ 4.3 แสดงค่ามอดูลัสเฉลี่ยของ โฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีและมีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณ 32 , 37 , 43 และ 48 %w/w ตามลำดับ	32
รูปที่ 4.4 แสดงค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของ โฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีและมีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณ 32 , 37 , 43 และ 48 %w/w ตามลำดับ	34
รูปที่ 4.5 แสดงขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ โฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีและมีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณ 32 , 37 , 43 และ 48 %w/w ตามลำดับ	35
รูปที่ 4.6 แสดงภาพSEMกำลังขยาย50เท่าของ โฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีการเติมเส้นใยกล้วย	35
รูปที่ 4.7 แสดงภาพSEMกำลังขยาย50เท่าของ โฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วย ชนิดหยาบ 32% w/w (สูตรที่ 2)	36
รูปที่ 4.8 แสดงภาพSEMกำลังขยาย50เท่าของ โฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วย ชนิดละเอียด 32 % w/w (สูตรที่ 6)	36
รูปที่ 4.9 แสดงน้ำหนักที่หายไปของ โฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณต่างๆหลังนำไปทดสอบการย่อยสลายเดือนที่ 1	38
รูปที่ 4.10 แสดงน้ำหนักที่หายไปของ โฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณต่างๆหลังนำไปทดสอบการย่อยสลายเดือนที่ 2	38
รูปที่ 4.11 แสดงน้ำหนักที่หายไปของ โฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณต่างๆหลังนำไปทดสอบการย่อยสลายเดือนที่ 3	39
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้วยกล้อง Digital แสดงลักษณะของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลาย โดยให้ a-e เป็นภาพ โฟมสูตรที่ 1-5 ก่อนการฝังกลบในดิน ให้ A-E เป็นภาพ โฟมสูตรที่ 1-5 หลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 3 เดือน ให้ f-i เป็นภาพ โฟมสูตรที่ 6-9 ก่อนการฝังกลบในดิน และให้ F-I เป็นภาพ โฟมสูตรที่ 6-9 หลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 3 เดือน	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบัน โฟมได้รับความนิยมนำมาใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับเป็นวัสดุกันกระแทก เนื่องจากสามารถป้องกันความเสียหายสิ่งของที่บรรจุภายในได้ ยกตัวอย่างเช่น ใช้เป็นวัสดุกันกระแทกสำหรับ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ เครื่องแก้ว งาน ชาม หรือแม้กระทั่งผลิตผลทางการเกษตรไม่ว่าจะเป็น กล้วยหอม แอปเปิ้ล องุ่น ส้ม ลูกแพร์ และผลไม้ส่งออกที่มีราคาแพงต่าง ๆ เนื่องจากโฟมมีข้อดีหลายประการ เช่น มี น้ำหนักเบา มีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันการกระแทก ยืดหยุ่นได้ดี ไม่เป็นฝุ่น และกักความร้อนได้น้อย แต่จะใช้เวลาในการย่อยสลายนาน จึงได้มีแนวคิดนำเอาพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น เซลลูโลสซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่าสองหมู่ต่อ โมเลกุล และได้จากพืชผักหรือจากส่วนต่างๆของต้นไม้มาเป็นสารตัวเติมในโฟมพอลิยูรีเทน เพื่อเร่งให้เกิดการย่อยสลายและยังเป็นตัวช่วยในเรื่องของการเป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนอีกด้วย วัสดุที่ใช้ทำโฟมมีหลายชนิดได้แก่ พอลิโอฟีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิยูรีเทน

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาผลของการใช้เส้นใยกล้วยเป็นสารตัวเติมในโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง พอลิยูรีเทนเตรียมจากปฏิกิริยาการพอลิเมอไรเซชันแบบความแน่น พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ฟังก์ชันในการเกิดปฏิกิริยา 2 หมู่หรือมากกว่านั้นต่อ 1 โมเลกุล (ไดออล หรือ พอลิออล) และไอโซไซยาเนตที่มีหมู่ฟังก์ชันในการเกิดปฏิกิริยา 2 หมู่หรือมากกว่านั้น ต่อ 1 โมเลกุล (ไดไอโซไซยาเนต หรือ พอลิไอโซไซยาเนต) พันธะภายในโมเลกุลเรียกว่า พันธะยูรีเทน (urethane linkage)

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยทั่วไปโฟมพอลิยูรีเทนจะย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยากมาก งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการทำโฟมพอลิยูรีเทนที่สามารถย่อยสลายได้ และมีราคาถูกโดยอาศัยการเติมเส้นใยกล้วยที่มีอยู่มากในประเทศไทยนำมาใช้เป็นสารตัวเติม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยธรรมชาติมาผสมโฟมเพื่อใช้เป็นวัสดุกันกระแทก
2. เพื่อศึกษาสภาวะในการผลิต โฟมที่มีองค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติให้มีสมบัติที่ดีสามารถนำมาใช้งานได้และราคาถูก
3. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของ โฟมธรรมชาติกับโฟมที่มีองค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ
4. เพื่อศึกษาการย่อยสลายของโฟมที่มีเส้นใยธรรมชาติเป็นองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้ คือ สามารถผลิตโฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วยเพื่อให้เกิดการย่อยสลายและเป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุน โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิต โฟมพอลิยูรีเทนที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุกันกระแทก
2. ปริมาณของเส้นใยกล้วยที่เหมาะสมที่สามารถใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนสำหรับทำวัสดุกันกระแทก
3. ความสามารถในการเสริมแรงของเส้นใยกล้วยในโฟมพอลิยูรีเทน
4. ความสามารถในการย่อยสลายของโฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วย

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการทดลอง
3. ดำเนินการทดลองดังนี้

ทำการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วยนำโฟมพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ และทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเพิ่มทางเลือกในการนำต้นกล้วยซึ่งเป็นผลผลิตที่เหลือทิ้งทางการเกษตรและมีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทยซึ่งเป็นผลิตผลที่ไม่มีควมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมเพื่อเป็นการเพิ่มค่าให้กับผลิตผลทางการเกษตร
2. ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากขยะ โฟม
3. ลดปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตโฟม
4. ศึกษาผลของสารตัวเติมที่มีผลในเรื่องของการลดต้นทุนและมีผลต่อการย่อยสลายของพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 โฟมพอลิยูรีเทน

2.1.1 พอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทน คือ การเชื่อมต่อยูรีเทนกับสารประกอบหมู่อื่นๆ เช่น อีเทอร์ เอสเทอร์ ไบยูเรต อัลโลฟานต เอไมด์ และสารประกอบหมู่อื่นๆ ที่นอกเหนือจากนี้อาจจะรวมอยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์นี้ได้

วิธีที่ใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนที่นิยมใช้มาก คือ ปฏิกิริยาของไดฟังก์ชันนอล หรือ พอลิฟังก์ชันนอลของสารประกอบไฮดรอกซิล เช่น Hydroxyl – terminated polyether/polyester กับ ไดฟังก์ชันนอล หรือ พอลิฟังก์ชันนอลของไอโซไซยาเนต

2.1.1.1 วัตถุดิบสำหรับพอลิยูรีเทน [1]

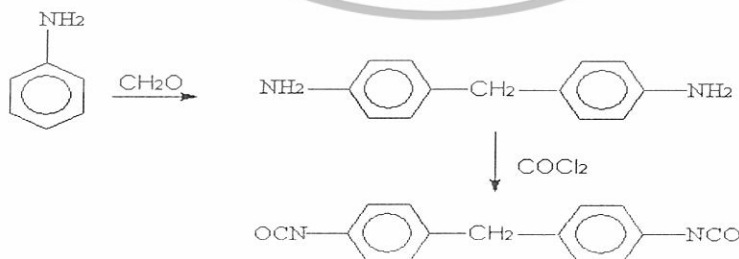
วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนจะมีเพียงไดไอโซไซยาเนตและไดออล หรือพอลิออล เนื่องจากการเตรียมพอลิยูรีเทนในทางอุตสาหกรรมจะมาจากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างไดไอโซไซยาเนตและไดออล หรือ พอลิออล

1.) ไดไอโซไซยาเนต ไดไอโซไซยาเนตสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างเอมีน และ ฟอสจีนดังนี้



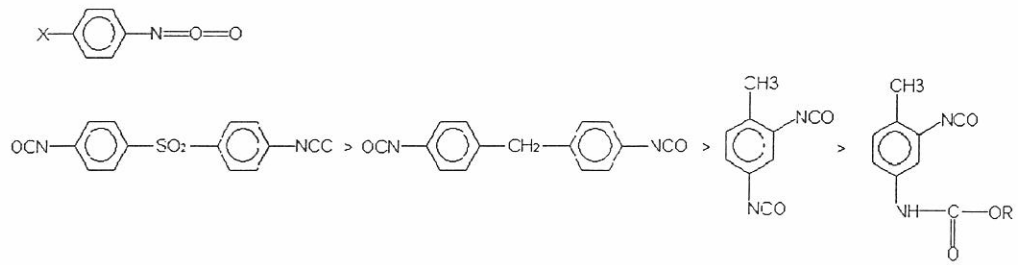
ไดไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้ได้แก่

- ไดฟีนิลเทมไดไอโซไซยาเนต มีการสังเคราะห์ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า อะโรมาติกไอโซไซยานเนต จะมีความว่องไวกว่าอะลิฟาติกไอโซไซยานเนตและไอโซไซยาเนตที่มีหมู่ตั้งอเล็กตรอนจะทำให้อัตราการเกิดพอลิยูรีเทนได้เร็วขึ้น ดังนี้



2.) ไดออลและพอลิออล

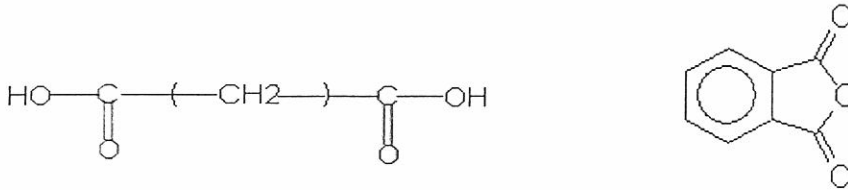
ไดออลและพอลิออลที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่

ตารางที่ 2.1 พอลิออลที่นิยมใช้เตรียมพอลิยูรีเทน

พอลิออล	น้ำหนักโมเลกุลทั่วไป	หมู่ฟังก์ชัน
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{OH} \\ \\ \text{OH} \end{array}$	400-4000	2
$\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{OH} \\ \\ \text{OH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{OH} \end{array}$	300-6000	3
$\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{OH} \\ \\ \text{OH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{OH} \\ \\ \text{CH}_2 - \text{OH} \end{array}$	400-600	4
$\text{OH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{OH}$	350-750	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

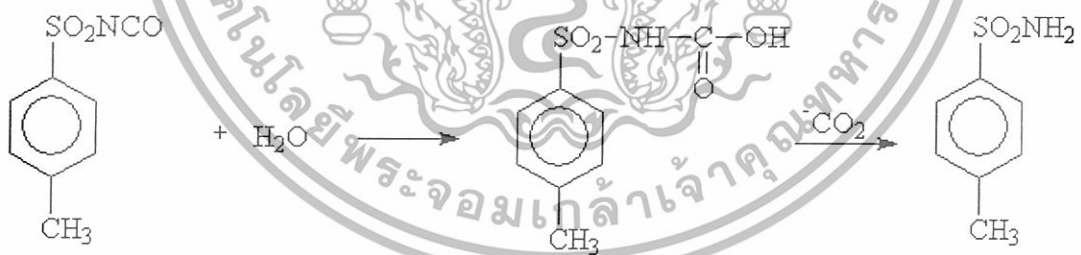
- พอลิเอสเทอร์ พอลิเอสเทอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล จัดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการเตรียมพอลิยูรีเทน เกิดจากการใช้ไดไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับไดออลที่มากเกิดพอ น้ำหนักโมเลกุลที่นิยมใช้จะอยู่ในช่วง 1000 – 4000 ตัวอย่างไดไอโซไซยาเนตที่ใช้ เช่น



และไดออลที่ใช้ เช่น



พบว่าโมเลกุลที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่วางไว้ในการทำปฏิกิริยา ที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอน จะทำให้อัตราการเกิดพอลิยูรีเทนได้เร็วกว่าดังนี้

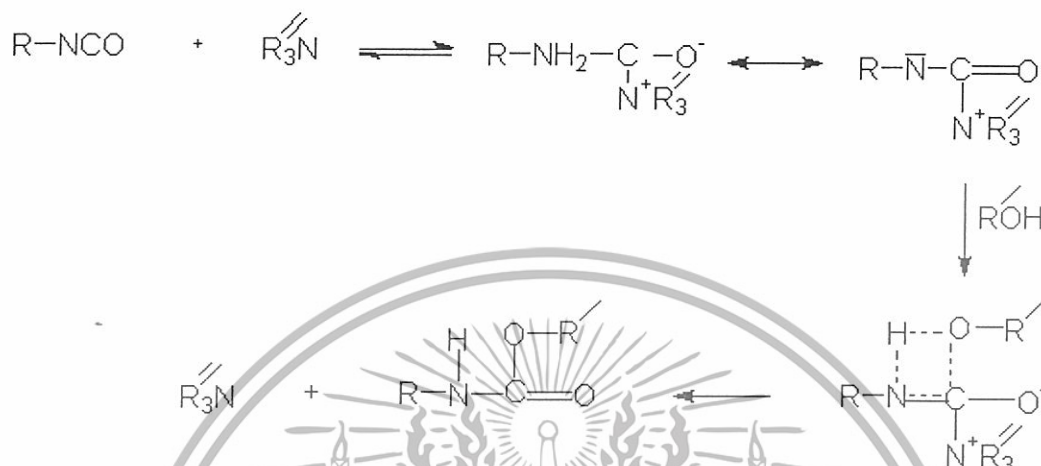


ซึ่งจะเห็นว่ามีความว่องไวกว่าแอลกอฮอล์ (หรือไดออล) ดังนั้นจึงมักเติมสารที่ทำให้แห้งหรือตัวที่เสถียร หรืออาจเรียกว่าตัวขยับยั้งลงไปด้วย ไม่เช่นนั้นจะสูญเสีย -NCO เกิดเป็น R-NH_2 ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อกับ -NCO ใหม่ได้ นอกจากนี้วัตถุดิบแล้วการเตรียมพอลิยูรีเทนยังต้องเติมสารประกอบอื่นๆอีกเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาการเตรียมพอลิยูรีเทนในทางอุตสาหกรรมมักมีการเติมตัวเร่งไปด้วย ตัวเร่งที่นิยมใช้คือ เอมีนตติภูมิ (Tertiary amine) หรือสารประกอบของโลหะบางชนิด โดยเฉพาะสารประกอบของโลหะดีบุก (Sn) กลไกการเกิดไอโซไซยาเนตโดยใช้เอมีน เป็นดังนี้



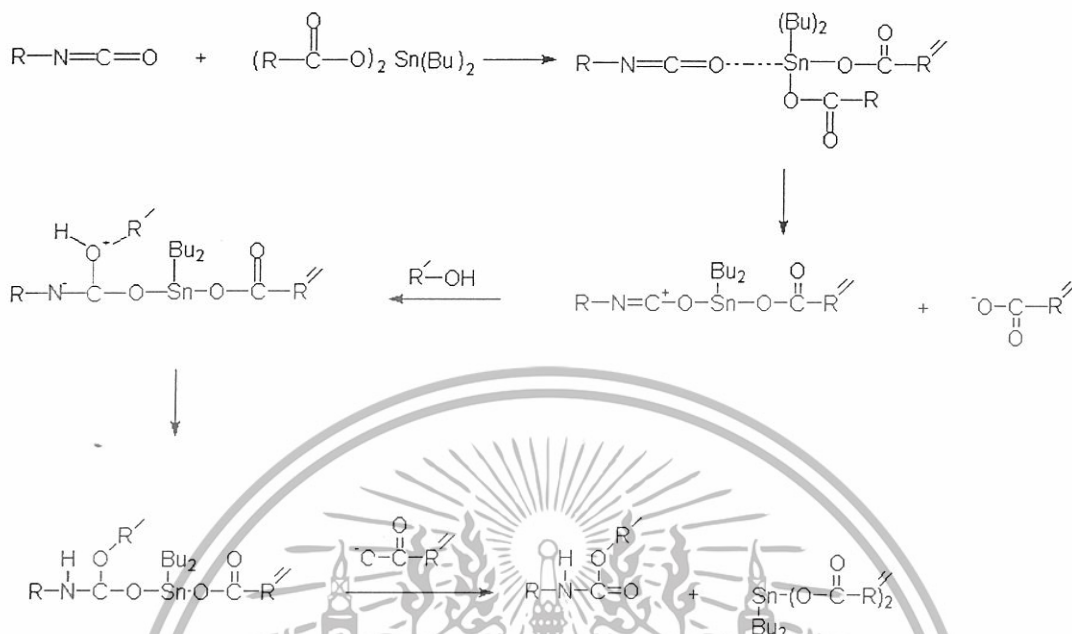
เอมีนตติภูมิที่มีหมู่แทนที่ขนาดใหญ่ จะมีความแข็งแรงของความเป็นเบสมากขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความเกะกะ (Steric effect) จะทำให้มีความว่องไวมากขึ้น

ตารางที่ 2.2 แสดงความว่องไวของเอมีนตติภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาระหว่าง ฟีนิลไอโซไซยาเนต และบิวทานอล

Amine	Base strength (pKa)	ความว่องไวสัมพัทธ์
Trimethylamine	9.9	2.2
Ethylidimethylamine	10.2	1.6
Diethylidimethylamine	10.4	1.0
Triethylamine	10.8	0.9
Triethylenediamine	8.2	3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบของโลหะดีบุกที่นิยมใช้ เช่น สแตนเนสออกโตเนต (Stannous octonate) หรือ ไดบิวทิลทินไดอะซิเตต



นอกจากนี้ยังพบว่าปฏิกิริยาการเตรียมไอโซไซยานเนตขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ด้วย ซึ่งพบว่าสารประกอบของโลหะดีบุกจะมีความไวที่สุด ดังตารางที่ 2.3 และพบว่าสารประกอบของโลหะดีบุกมีความไวในการเตรียมไอโซไซยานเนตแบบปฏิกิริยาการเติมด้วยตัวเอง (Self addition reactions)

ตารางที่ 2.3 ความไวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนจากเฟนิลไอโซไซยานเนต

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราเร็วสัมพัทธ์ที่เกิดปฏิกิริยากับ		
	n-บิวทานอล	น้ำ	ไดเฟนิลยูเรีย
ไม่มี	1.0	1.1	2.2
N-methylmorpholine	40	25	10
Triethylamine	86	47	4
Tetramethyl-1,3-butanediamine	260	100	12
Triethylenediamine	1200	380	90
Tributyltin acetate	8000	14000	8000
Dibutyltin diacetate	600000	100000	120000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ตัวทำละลาย (Solvent)

พอลิยูรีเทนที่เตรียมได้หากมีจุดหลอมเหลวมากกว่า 200 องศาเซลเซียส จะยากแก่การเตรียมจากวิธีการเกิดพอลิเมโรไลเซชันแบบหลอมเหลว (Melt polymerization) เพราะพันธะยูรีเทนไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 220 องศาเซลเซียส การสลายตัวของยูรีเทนที่เกิดจากไอโซไซยานตกับแอลกอฮอล์ อาจเป็นแบบ

- แยกตัวกลับไปเป็น ไอโซไซยานต และ แอลกอฮอล์



- แยกตัวกลายเป็น เอมีนปฐมภูมิ คาร์บอน ไดออกไซด์ และ โอลิฟิน



- แยกตัวกลายเป็น เอมีนทุติยภูมิ และ คาร์บอน ไดออกไซด์



หรือเมื่ออุณหภูมิสูง หมู่ไอโซไซยานตอาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้ ซึ่งจะทำให้เสียสมดุลไป เช่น อาจเกิดไตรเมโรไลเซชัน หรือ เกิดอัลโลฟานต (Allophanate) ได้

ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง จึงเตรียมพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิไม่สูงนัก คือ น้อยกว่า 120 องศาเซลเซียสและเป็นการเกิดพอลิเมอร์แบบสารละลาย (Solution polymerization) ซึ่งพบว่า การเลือกตัวทำละลาย มีความสำคัญในการเตรียมพอลิยูรีเทน การที่จะได้พอลิยูรีเทนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะต้องเลือกตัวทำละลายพอลิยูรีเทนที่สามารถละลายพอลิยูรีเทนที่เกิดขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น โดเมทิลซัลฟอกไซด์, N-เมทิลไพโรลิโน และซัลโฟเลน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. สารช่วยให้เกิดฟอง (Blowing agent)

พอลิยูรีเทนมักนำไปใช้เป็นโฟม ทั้งโฟมยืดหยุ่นและโฟมแข็ง สารช่วยให้เกิดฟองเป็นสารเติมแต่งที่สำคัญในการทำให้เกิดโฟม โดยสารช่วยให้เกิดฟองจะทำให้พอลิยูรีเทนมีความเป็นรูพรุน (Pores) ได้ สารช่วยให้เกิดฟองที่นิยมใช้ ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ และ ของเหลวที่ระเหยได้ง่าย (Volatile liquids) คือ มีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) สูงๆ แต่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น สารประเภทฟลูออรีเนตอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Fluorinated aliphatic hydrocarbon) (ตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 สมบัติของสารช่วยให้เกิดฟอง

สารช่วยให้เกิดฟอง	น้ำหนักโมเลกุล	ความหนาแน่น (g/cm ³)	จุดเดือด(°C)
Cyclohexane	84.00	0.774	80.8
Trichloroethylene	131.00	1.466	87.2
1,2 Dichloroethane	98.97	1.245	83.5
1,1,2-Trichlorotrifluoroethane	187.39	1.565	47.6
Acetone	58.08	0.785	56.2

การเตรียมพอลิยูรีเทนการเกิดฟองอาศัยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยานาตกับน้ำ หรือโดยการเติมสารช่วยให้เกิดฟองจำพวก ฟลูออรีเนตไฮโดรคาร์บอน แต่เนื่องจากสารตัวนี้ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศอย่างมาก ปัจจุบันจึงใช้สารหรือของเหลวระเหยง่ายอื่นๆแทน

การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน ขั้นตอนในการเกิดฟองหรือก๊าซ จะเกิดพร้อมกับการเกิดพอลิยูรีเทน (เกิดการพอลิเมอไรเซชัน) ดังนั้นจะต้องให้ปฏิกิริยาทั้งสองนั้นเกิดสมดุลกัน คือต้องให้ฟองก๊าซติดอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ (Polymer matrix) ถ้าการเกิดฟองเร็วเกินไปจะทำให้การพองตัวของโฟมไม่ถาวร ก็จะยุบลงมาได้ เนื่องจากการพอลิเมอไรเซชันยังไม่ได้สร้างพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะกักก๊าซเหล่านั้นไว้ได้ แต่ถ้าพอลิเมอไรเซชันเกิดเร็วเกินไปโฟมก็จะไม่เกิดการพองตัว บางครั้งจึงต้องเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เช่น ซิลิโคนพอลิอัลคิลีนออกไซด์ บล็อกโคพอลิเมอร์ (Silicone-polyalkylene block copolymer) ด้วยเพื่อทำให้โฟมเสถียร เมื่อพอลิเมอร์ที่เตรียมยังไม่แข็งแรงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การขึ้นรูปโฟมพอลิยูรีเทน

กระบวนการขึ้นรูปโฟมพอลิยูรีเทน โดยทั่วไปมี 3 วิธี ดังนี้

1.) กระบวนการ เตรียมโฟมยูรีเทนในขั้นตอนเดียว

สามารถใช้ทั้งพอลิเอสเทอร์พอลิออล และ พอลิอีเทอร์พอลิออลในการเตรียมพอลิยูรีเทนได้ โดยพอลิเอสเทอร์ที่ใช้นั้นจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2000 และของผสมทั้งหมดได้แก่ พอลิเอสเทอร์พอลิออล ไอโซไซยานเนต สารที่ทำให้เกิดฟอง ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดัดแปลงต่างๆจะถูกผสมกันในเตาปฏิกรณ์ประมาณ 2-3 นาที โฟมพอลิยูรีเทนจะเกิดได้อย่างเต็มที่ ในขณะที่พอลิอีเทอร์พอลิออลนั้นเมื่อผสมของผสมทั้งหมดซึ่งได้แก่ พอลิอีเทอร์พอลิออล สารไอโซไซยานเนต สารทำให้เกิดฟอง ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารเพิ่มเสถียรภาพแล้ว ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ โฟมพอลิยูรีเทนออกมานั้นนำไปอบประมาณ 10-24 ชั่วโมงก่อนจะนำออกไปใช้งาน

2.) กระบวนการ ฟรีพอลิเมอร์

สามารถใช้ได้ทั้งพอลิเอสเทอร์พอลิออล และ พอลิอีเทอร์พอลิออล แต่นิยมใช้พอลิอีเทอร์พอลิออลมากกว่า ทำได้โดยให้พอลิออลทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยานเนตที่มากเกินไปก่อนจะได้ฟรีพอลิเมอร์ปลายโซ่เป็นไดไอโซไซยานเนต ซึ่งเสถียรในสภาวะที่แห้งและเมื่อเติมสารที่ทำให้เกิดฟอง ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดัดแปลงลงไปจึงเกิดเป็นโฟมพอลิยูรีเทน

3.) กระบวนการ ควอลิฟรีพอลิเมอร์

วิธีนี้คล้ายกับกระบวนการฟรีพอลิเมอร์ แต่ใช้ปริมาณไดไอโซไซยานเนตจำนวนมากทำปฏิกิริยากับพอลิออล ได้พอลิยูรีเทนน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีไดไอโซไซยานเนตอิสระเหลืออยู่มาก จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยากับพอลิออลต่อในขั้นตอนที่ 2 พร้อมเติมสารที่ทำให้เกิดฟอง ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดัดแปลงลงไปจึงเกิดเป็นโฟมพอลิยูรีเทน

2.1.3 ชนิดของโฟมพอลิยูรีเทน

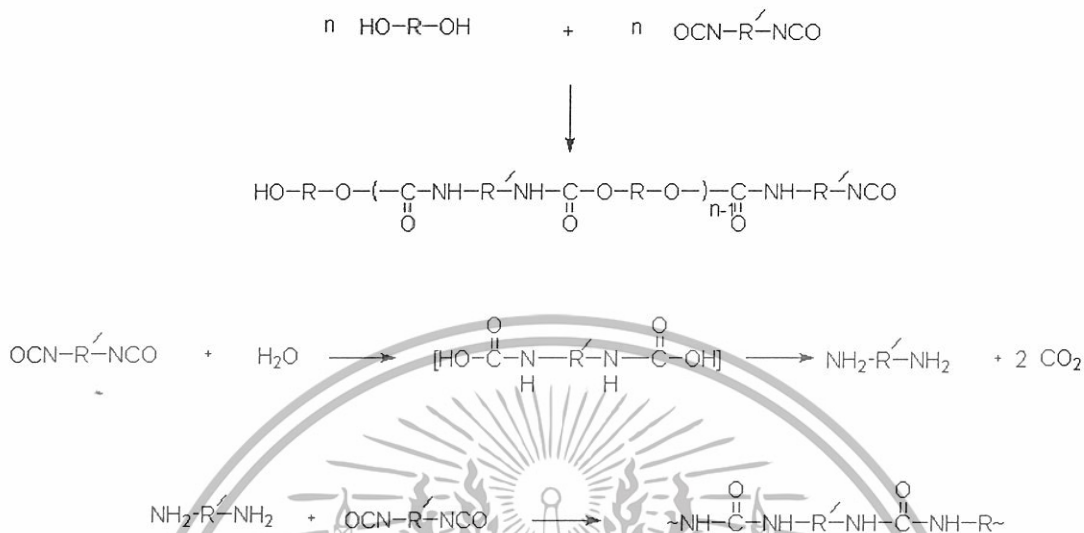
โฟมพอลิยูรีเทนแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

- โฟมยืดหยุ่น (Flexiber foam)
- โฟมแข็ง (Rigid foam)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โฟมยืดหยุ่น (Flexiber foam)

การผลิตโฟมยืดหยุ่นจะประกอบด้วยการใช้ พอลิออล ไดไอโซไซยานเนต และสารช่วยให้เกิดฟอง เกิดปฏิกิริยา ดังนี้



โดย จะใช้พอลิออลทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยานเนตที่มากเกินพอ จนกระทั่งกลายเป็นพรีพอลิเมอร์ หรือ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำก่อน แล้วจึงเติมสารที่ทำให้เกิดฟองและตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป ไดไอโซไซยานเนตที่นิยมใช้ในการเตรียมโฟมยืดหยุ่นคือ โทลูอิน ไดไอโซไซยานเนต ส่วนพอลิออลที่ใช้ อาจเป็นพอลิอีเทอร์หรือพอลิเอสเทอร์ก็ได้ โดยส่วนใหญ่ประมาณ 80 % ของโฟมยืดหยุ่นจะเตรียมจากพอลิอีเทอร์เพราะทนต่อการแตกตัวด้วยน้ำได้ดีกว่า ส่วนโฟมพอลิเอสเทอร์จะทนต่อตัวทำละลายต่างๆ ได้ดีกว่า

- โฟมแข็ง (Rigid foam)

การผลิตโฟมแข็งมีกระบวนการเหมือนกับการผลิตโฟมยืดหยุ่นแต่จะต่างกันตรงระดับการเชื่อมโยง โดยโฟมแข็งจะมีการเชื่อมโยงมากกว่าโฟมยืดหยุ่น ส่วนใหญ่จะเตรียมจากพอลิอีเทอร์ และมีการเติมสารช่วยให้เกิดฟอง เช่น ฟลูออโรคาร์บอน และ คลอโรคาร์บอน เช่น เมทิลีนไดคลอไรด์

โฟมพอลิยูรีเทนมี ข้อดีกว่าโฟมทั่วไปคือ มีสภาพนำความร้อนต่ำ ทนความร้อนได้ดีมาก มีการซึมผ่านของก๊าซต่ำ น้ำหนักเบาและผลิตได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ปฏิกริยาพื้นฐานของโฟมพอลิยูรีเทน

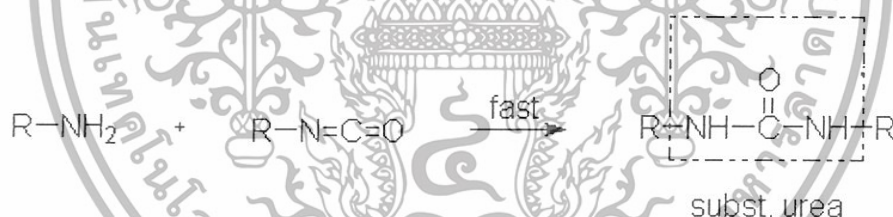
ปฏิกริยาในการเกิดพอลิยูรีเทนที่สำคัญมี 2 ปฏิกริยา คือ ปฏิกริยาระหว่างไอโซไซยานเนตกับสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นส่วนประกอบ และ ปฏิกริยาระหว่างไอโซไซยานเนตกับน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกริยาพื้นฐานสำหรับการเกิดหมูยูรีเทน และอาจพิจารณาได้จากปฏิกริยาลูกโซ่ สำหรับปฏิกริยาอย่างง่าย ๆ นำเสนอโดยสารประกอบแบบมอนอเมอร์ฟังก์ชันนอล ดังสมการด้านล่าง



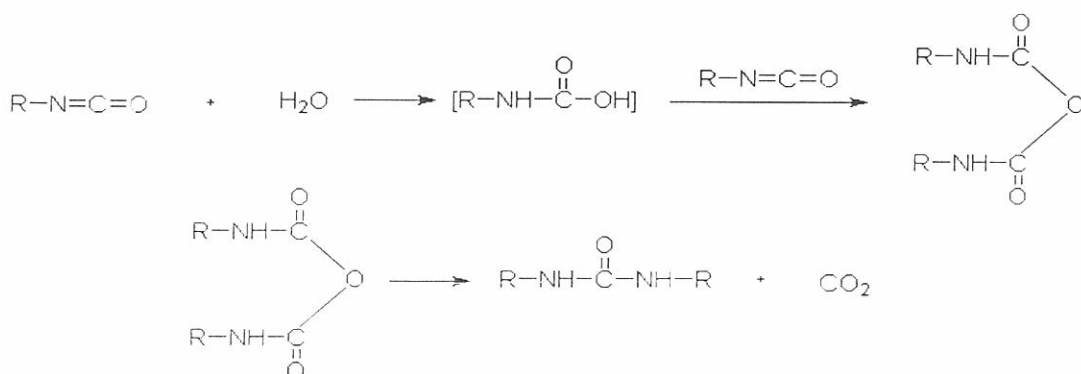
ปฏิกริยาที่สองที่ใช้สำหรับการเกิดพอลิยูรีเทน ในการผลิตโฟมแบบยืดหยุ่น โดยการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาพร้อมกับการเกิดหมูของยูรีเทียที่ใช้แทนที่ ขั้นตอนแรกของปฏิกริยานี้เป็นการเกิดกรดคาร์บามิกที่ไม่เสถียร (Unstable carbamic acid) ที่แตกตัวเพื่อก่อตัวเป็นเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการ



เอมีนจะทำปฏิกริยากับไอโซไซยานเนตที่เดินลงไปเพื่อก่อตัวเป็นพอลิยูรีเทนแทนที่ตามสมการปฏิกริยาโดยรวม ดังนี้

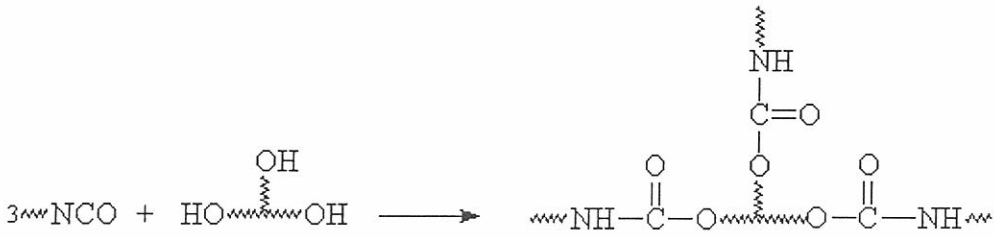


สมการแสดงกลไกของการเปลี่ยนแปลง ที่ก่อให้เกิดกรดคาร์บามิกแอนไฮไดรด์ตามด้วยการแตกตัวไปเป็นยูเรียที่ใช้แทนที่ และ คาร์บอนไดออกไซด์ แสดงได้ดังนี้

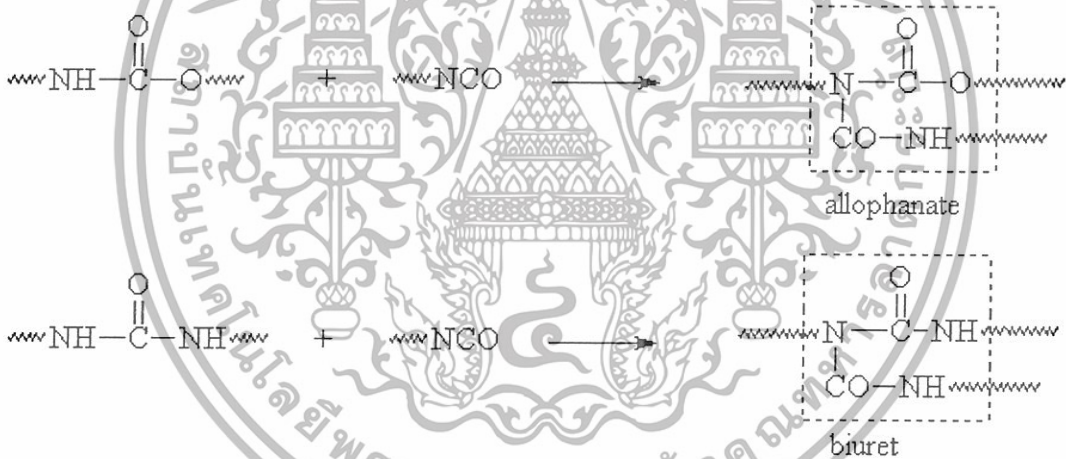


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

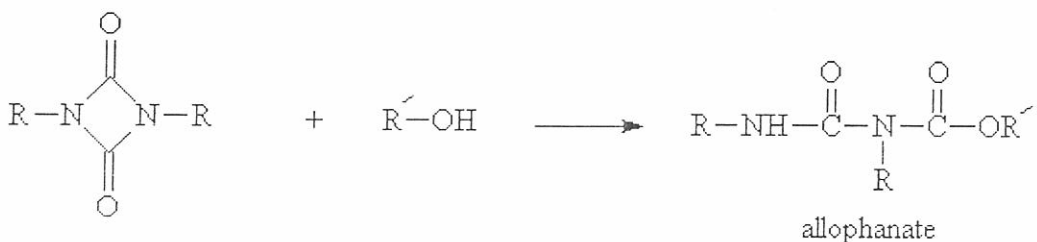
ปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมโยงที่ธรรมดาที่สุด มาจากการใช้ พอลิออลที่มีค่าฟังก์ชันนอลลิตีเป็น 3 หรือมากกว่า การก่อตัวของพันธะเชื่อมโยงของยูรีเทนในปฏิกิริยากับไอโซไซยานเนต เป็นไปตามสมการ



ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (100 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า) หรือ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าในการทดลอง จะมีหมู่ยูรีเทนแน่นอน ที่ทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานเนตในปริมาณมาก เพื่อก่อตัวเป็นโครงสร้างร่างแห อัลโลฟานเนต (Allophanate linkage) ตามสมการด้านล่าง และในทำนองเดียวกันหมู่ยูเรียจะ ทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยานเนต เพื่อให้ผลเป็นร่างแห ไบยูเรต (Biuret linkage)

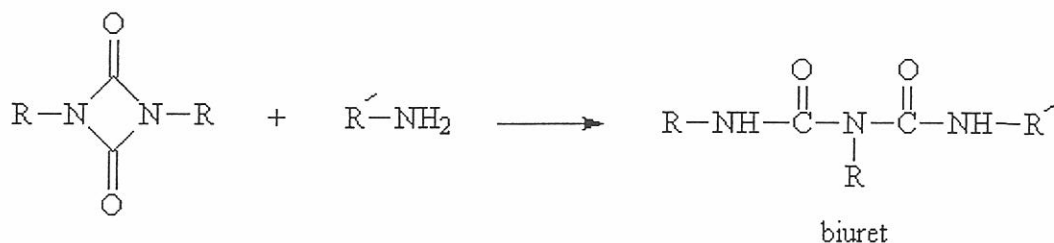


อัลโลฟานเนต อาจเกิดจากการก่อตัวในปฏิกิริยาของแอลกอฮอล์ กับ ไดเมอร์อะโรมาติก ไอโซไซยานเนตตามสมการด้านล่าง

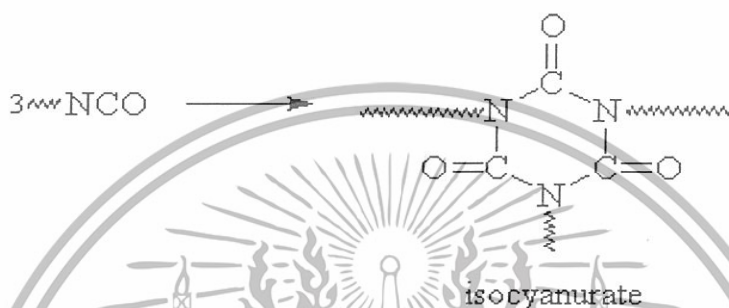


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอโซไซยานตไดเมอร์ทำปฏิกิริยากับเอมีนจะให้ ไบยูเรต ที่สอดคล้องกัน ตามสมการ



ปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อม โยงอีกปฏิกิริยาหนึ่งที่เกิดขึ้นคือ การเกิดไตรเมอร์ที่นำไปสู่การเกิดวงแหวน ไอโซไซยานต ตามสมการ



2.2 เส้นใยกล้วย [2]

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของกล้วย

กล้วย เป็นพรรณไม้ล้มลุกเขตร้อนอยู่ในสกุล *Musa* มีหลายชนิด เช่น กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม กล้วยไข่ กล้วยตานี กล้วยหักมุก บางชนิดออกหน่อ บางชนิดไม่ออกหน่อ ใบแบนยาวใหญ่ ก้านใบตอนล่างเป็นกาบยาวหุ้มห่อซ้อนกันเป็นลำต้นส่วนลำต้นจริงอยู่ใต้ดินเรียกว่า เหง้า ออกดอกที่ปลายลำต้นเป็นช่อเรียกว่า ปลี ออกลูกเป็นหวี หลายนหวีอยู่รวมกันเรียกว่า เครือ ทุกส่วนของต้นกล้วยสามารถนำไปใช้ประโยชน์หลากหลาย มีคุณค่าทางอาหารสูง นิยมปลูกอยู่ทั่วทุกภาคในประเทศไทย

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของกาบกล้วย

เส้นใยที่นำมาผสมเพื่อทำวัสดุกันกระแทกเป็นเส้นใยที่ได้มาจากกาบกล้วยน้ำว้าที่มีคุณสมบัติทนและมีความเหนียว ซึ่งจากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของกาบกล้วยมีดังนี้

1. ฮอลโลเซลลูโลส (Hollo Cellulose)
2. อัลฟาเซลลูโลส (Alfa Cellulose)
3. เพนโตแซนส์ (Pentosans)
4. สารที่ละลายในน้ำร้อน (Hot water Solubility)
5. สารลิกนิน ไม่มีเถ้าถ่าน (Lignin ash free)
6. สารละลายในแอลกอฮอล์และเบนซีน (Alcohol Benzene Solubility)
7. ทราาย (Silica)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 พลาสติกกับการย่อยสลายได้ [1]

2.3.1 เสถียรภาพของพลาสติก

พลาสติกเข้ามามีบทบาทในการใช้ชีวิตประจำวันของคนเรามากขึ้นเนื่องจากพลาสติกมีความทนทานต่อการใช้งานและสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี แต่ก็มีปัญหาคือ มีความยุ่งยากในการกำจัดหรือทำลายขยะที่เป็นพลาสติกให้หมดไป

ได้มีการศึกษาว่าเหตุใดพลาสติกที่เกิดจากสารพอลิเมอร์ที่ได้มาจากการสังเคราะห์จึงไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ ซึ่งสามารถสรุปเหตุผลได้ 2 ข้อ คือ

1.) พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียมและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง สายโซ่พอลิเมอร์มีความยาวของสายโซ่มาก ทำให้มีความต้านทานต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ได้ดี

2.) พลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ค่าการซึมผ่านของความชื้นต่ำ ลักษณะไม่เป็นรูพรุน พื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากในระหว่างการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ จะไม่มีการปลดปล่อยเอนไซม์ผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำไปยังพลาสติก เอนไซม์จะทำหน้าที่ย่อยสลายโมเลกุลของพลาสติกที่มีขนาดเล็กลงโดยผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ เพื่อเปลี่ยนให้เป็นสารชนิดอื่นต่อไป แต่เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติไม่ชอบน้ำ และยังมีค่าการซึมผ่านของความชื้นต่ำ จึงทำให้เอนไซม์สัมผัสกับผิวหน้าของพลาสติกได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และการที่พลาสติกไม่มีความเป็นรูพรุนทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสยิ่งน้อยลงไปอีกจึงเป็นการยากที่จะทำให้พลาสติกจะถูกย่อยสลายได้

2.3.2 การกำจัดพลาสติกโดยการทำให้เสื่อมสลายไป

สามารถทำได้ 3 วิธี ดังนี้

1.) การนำไปถมในที่ว่าง

วิธีนี้เป็นการใช้ในการกำจัดขยะที่ใช้กันอยู่เดิมเป็นจำนวนมาก เพราะเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด แต่ควรทำอย่างถูกลักษณะคือใช้แผ่นพลาสติกคลุมและถมดินทับอีกครั้งหนึ่ง

ข้อเสียของวิธีนี้ คือ พื้นที่ที่ถมมักเกิดปัญหาในเรื่องของการยุบตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใช้เป็นพื้นที่สำหรับก่อสร้าง การบดย่อยพลาสติกให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนอาจช่วยแก้ปัญหาได้บ้างแต่นั่นก็เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย

2.) การนำไปเผาทิ้ง

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่สะดวกและรวดเร็วในการกำจัดพลาสติก และ มีการใช้อยู่อย่างกว้างขวาง เป็นวิธีที่สามารถใช้ได้ดี และไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษหากทำให้ถูกวิธี

ข้อเสียของการกำจัดพลาสติกด้วยวิธีการเผาทิ้ง นอกจากจะต้องสร้างเตาเผาอย่างถูกต้องซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นแล้ว ข้อเสียใหญ่ก็คือการอาจเกิดก๊าซพิษหากมีขยะที่มีโครงสร้าง

ประกอบด้วยคลอรีน เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ หรือ มีองค์ประกอบของไนโตรเจน เช่น พอลิยูรีเทน พอลิเอไมด์ หรือ เรซินเมลามีนปนอยู่ด้วย

3.) การทำให้พลาสติกสลายตัวได้

วิธีการนี้หมายถึง การทำให้พลาสติกสลายตัวได้เองตามธรรมชาติเหมือนขยะประเภทอื่นๆ ในภาวะแวดล้อมธรรมชาติ สิ่งที่จะช่วยให้พลาสติกสลายตัวได้ คือ แสง น้ำ และ จุลินทรีย์ ฉะนั้น พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ อาจทำได้โดยทำให้เป็น

- พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยแสง

เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยแสง ซึ่งพลาสติกชนิดนี้จะมีหมู่คาร์บอนิล เมื่อได้รับแสงอาทิตย์จะสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลต ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการสลายตัว

- พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ในทางชีวภาพ

พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยกระบวนการการย่อยสลายทางชีวเคมีของพลาสติกอื่น เกิดจากการกระทำของจุลินทรีย์เช่น แบคทีเรีย และรา เป็นต้น และจะเกิดใน 3 ลักษณะ คือ

ก. พลาสติกไม่ได้ถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายโดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสารเติมแต่งประเภทอื่น ๆ ทำให้เหลือพลาสติกในโครงสร้างรูพรุนและต่อไปก็จะกลายเป็นผงละเอียด

ข. การเสื่อมสลายที่เกิดขึ้นเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์สลายต่อไป

ค. การเสื่อมสลายเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้นโดยตรง เช่น พอลิคาร์โพรแลกโตน และ พอลิไฮดรอกซีบีวาทิวเรทอริเท เป็นต้น

2.3.3 การค้นคว้าวิจัยเพื่อผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ สามารถแบ่งออกเป็น 3 แนวทางคือ

1.) การปรับปรุงสารพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เป็นการนำเอาสารพอลิเมอร์ ที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติมาปรับปรุงโดยใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือ ทางชีวภาพ เพื่อทำการผลิตพลาสติกให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

2.) การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ ดังที่กล่าวมาแล้วว่า พลาสติกสังเคราะห์ประเภทพอลิเอสเทอร์สามารถย่อยสลายได้ ดังนั้น จะต้องมีการสังเคราะห์เป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ และ นอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์อีกหลายชนิดเช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก และ พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่งของอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ชนิดต่างๆ ซึ่งก็เป็นความพยายามของนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผลิตได้ให้ดีขึ้น

นอกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่กล่าวมาแล้ว ยังมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมระหว่างมอนอเมอร์ที่ใช้ทั่วไป เช่น เอทิลีน หรือ สไตรีนกับมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น อะคริลิกแอซิดอะคริลาไมด์ หรือ ไวนิลอะซิเตตจะทำให้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติการย่อยสลายดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) การศึกษาการใส่สารเติมแต่งลงในพลาสติกเพื่อปรับปรุงให้พลาสติกมีความสามารถในการย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ วิธีนี้จะแตกต่างจากวิธีที่กล่าวมาโดยจะทำการศึกษาเพื่อนำสารเติมแต่งใส่ลงไปพลาสติกที่ไ้กันทั่วไป ซึ่งจะทำให้พลาสติกมีความสามารถในการย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ สารเติมแต่งที่สนใจ และนำมาทำการศึกษาคือ เส้นใยกล้วย

การเติมเส้นใยกล้วยเพียงอย่างเดียวลงในพลาสติกโดยไม่ใส่สารเติมแต่งชนิดอื่นพลาสติกประเภทนี้จะถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในส่วนของเส้นใยกล้วย ทำให้เหลือโครงสร้างพลาสติกในรูปโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ต่อมาก็จะกลายเป็นผงละเอียด ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ พลาสติกที่ใช้ส่วนมากจะเป็น เทอร์โมพลาสติก สามารถทำการผลิตได้โดยใช้กระบวนการผลิตแบบเดิมได้ โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงเครื่องจักร

2.3.4 พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยวิธีการอื่น

พลาสติกสามารถสลายตัวได้โดยวิธีอื่นอีกมากมายหลายวิธี เช่น การสลายตัวได้ด้วยน้ำและการสลายตัวได้โดยใช้วิธีการทางชีวภาพและแสง เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ดังกล่าวเป็นสิ่งที่น่าสนใจมาก เพราะเป็นการรวมเอาข้อดีของพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้แต่ละวิธีเอาไว้ เช่น พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยเอโซอะโรมาติก (Azoaromatic) และ หมู่คีโต (Keto group) ที่ว่องไวต่อแสง ในระหว่างใช้งาน หมู่เอโซ (Azo) จะช่วยป้องกันการสลายตัวเนื่องจากแสง และหลังจากเลิกใช้งานไปแล้ว พลาสติกชนิดนี้จะถูกทิ้งไว้ในสิ่งแวดล้อม ทำให้ หมู่เอโซ ถูก จุลินทรีย์ย่อยสลาย และเหลือหมู่ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยแสง ดังนั้นเมื่อทิ้งไว้ในที่ที่มีแสงก็จะสามารถย่อยสลายได้

2.3.5 มาตรฐานในการตรวจสอบการย่อยสลาย

ในปัจจุบันมีหลายองค์กร เช่น ASTM (American Society for Testing and Materials) และ ISO (Internation Standards Organization) ได้พัฒนาการคำนวณความสามารถในการย่อยสลายภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ กัน เช่น ดิน น้ำทะเล ระบบน้ำเสีย การย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนหรือ การทำปุ๋ยหมัก

ASTM มีวิธีการวิเคราะห์การย่อยสลาย 5 วิธีคือ

- 1.) วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติก โดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในขณะที่มี Municipal sewage sludge (D5209-91)
- 2.) วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติก โดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในขณะที่มี Municipal sewage sludge (D5210-91)
- 3.) วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติก โดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในระบบน้ำเสีย Activated sludge (D5271-92)
- 4.) วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติก โดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในระบบที่มีการควบคุมสภาวะแบบหมัก (D5338-93)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.) วิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติก โดยกระบวนการทางชีวภาพในสถานะที่มีออกซิเจนในขณะที่มีจุลินทรีย์ที่ได้รับการเลือกมา (D5247-92)

สองวิธีแรกจะจำลองสภาพแวดล้อมของระบบน้ำเสียนั้นคือสภาวะการหมักและระบบบำบัดน้ำเสีย ให้ให้สามารถทราบว่าการย่อยสลายควรใช้ระบบใด ในส่วนของวิธีสุดท้ายไม่ได้ทดสอบระบบจริงแต่เป็นวิธีที่มาตรฐานในการทดสอบสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ที่ทราบชนิดแน่นอนที่พบทั่วไปในสิ่งแวดล้อม

2.4 วัสดุกันกระแทก [10]

- วัสดุกันกระแทก คือ วัสดุที่ถูกนำมาใช้เพื่อ ปกป้องสินค้าจากการ สูญเสียเนื่องมาจากการกระแทกอย่างรุนแรง และ/หรือการสั่นสะเทือน ระหว่างกระบวนการขนส่ง เคลื่อนย้าย ขนถ่าย

หลักการพื้นฐานที่สำคัญ 2 ประการของวัสดุกันกระแทกในการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับสินค้า คือ

1. วัสดุกันกระแทกถูกนำมาใช้เพื่อดูดซับแรงกระแทกและป้องกันการส่งผ่านแรงกระแทกมายังตัวสินค้า
2. วัสดุกันกระแทกมีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของสินค้าในหีบห่อ ซึ่งเป็นการลดการเคลื่อนที่มากระแทกกันจากการสั่นสะเทือนในปัจจุบันมีวัสดุหลายชนิดได้รับการนำมาใช้เพื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุกันกระแทก การเลือกใช้วัสดุที่ให้ผลในการคุ้มครองเพียงพอในระดับราคาที่เหมาะสมจะช่วยควบคุมต้นทุนของสินค้าและลดการสูญเสียของสินค้าลงได้

- ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาเลือกวัสดุกันกระแทก

1. รูปทรง ขนาด และน้ำหนักของสินค้า
2. ความเปราะบางของสินค้า
3. ความแตกต่างของการขนส่งแต่ละแบบ ว่าได้รับแรงกระแทกและการสั่นสะเทือนแบบใด ขนาดของแรงประมาณเท่าใด
4. คุณสมบัติ ราคา และการใช้ประโยชน์ของวัสดุกันกระแทก แต่ละชนิด

- ชนิดของวัสดุกันกระแทก

วัสดุกันกระแทกที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ แผ่นกระดาษลูกฟูก , โฟมพอลิสไตรีน , โฟมพอลิยูรีเทน , โฟมพอลิเอทิลีน , แผ่นพลาสติกอัดอากาศ , ฝอยไม้ และฝอยกระดาษ วัสดุแต่ละชนิดมีคุณลักษณะประจำตัว และความเหมาะสมต่อการใช้งาน แตกต่างกันไปดังนี้

แผ่นกระดาษลูกฟูก

ใช้ทำหน้าที่แผ่นรอง ตัวกันหรือแผ่นกัน เพื่อเก็บสินค้าภายใน บรรจุกู้ภัณฑ์ หรือทำหน้าที่เป็นตัวห่อหุ้มสินค้า แผ่นกระดาษลูกฟูกมีข้อจำกัดในการดูดซับแรงกระแทกอย่างรุนแรง และมักคืนรูปกลับเป็นอย่างเดิม หลังถูกแรงกระทำ มีการดูดซึมความชื้น และอ่อนตัวลงในสภาวะอากาศที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความชื้นสูง แต่เนื่องจากการที่สามารถนำกลับเข้ากระบวนการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาจากเศษวัสดุเหลือหลังใช้งาน ตัวอย่างการนำกระดาษถูกฟูกมาใช้งาน ได้แก่ การใช้แผ่นชนิด 3 ชั้น ในการกั้นแบ่งช่องของกล่องบรรจุเครื่องแก้ว เพื่อป้องกันการกระทบกระแทกซึ่งกันและกัน หรือใช้ทำหน้าที่ลดการเคลื่อนที่ภายในกล่องหัตถกรรมที่มี รูปทรงแปลกๆ ชนิด 2 ชั้น (กระดาษ ถูกฟูกหน้าเดียว) ใช้เพื่อการห่อหุ้ม เป็นหลัก เช่น ใช้ห่อหุ้มชิ้นส่วน ของเฟอร์นิเจอร์หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักร

โฟมพอลิสไตรีน

โครงสร้างวัสดุเป็นเซลล์ปิดน้ำหนักเบามาก มีคุณสมบัติที่ป้องกันการกระทบได้เป็นอย่างดี ไม่ดูดซับความชื้น แต่มีขีดจำกัดในการขึ้นรูป ทำให้ไม่เหมาะกับงานที่รับการกระทบอย่างรุนแรงหลายๆ ครั้ง ลักษณะกึ่งแข็งสามารถขึ้นรูปทรงที่ซับซ้อนได้ในราคาที่เหมาะสม เช่น ใช้ในรูปของการทำตามแม่แบบเฉพาะตามรูปแบบของสินค้า แผ่น สี่เหลี่ยมขนาดความหนาต่างๆ และขึ้นเล็กๆ ในกรณีใช้งานหลายๆ การใช้ แม่แบบในการผลิตจะดีมาก และถ้ามีการใช้น้อยจะใช้วิธีตัดขึ้นรูปได้จากแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีความหนาต่างๆ ส่วนขึ้นเล็กๆ มีการผลิตในหลายๆ รูปทรง และสามารถเติมสีลงไปช่วยเสริมให้เกิดความสวยงาม โฟมพอลิสไตรีนมี การใช้อย่างแพร่หลาย แต่การใช้งานก่อให้เกิดปัญหาเศษวัสดุเหลือหลัง ใช้งานเพราะสลายตัวยาก ตัวอย่างการนำโฟมพอลิสไตรีนมาใช้งาน ได้แก่ การนำโฟมชนิดขึ้นรูปจากแม่แบบ ใช้กับพวกเครื่องแก้ว เซรามิก อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องมือเครื่องใช้ที่มีความประณีต ชนิดขึ้นเล็กๆ ใช้สำหรับเติมในช่องว่างของกล่องที่ใช้ในการขนส่งผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงแปลกๆ

โฟมพอลิยูรีเทน

โครงสร้างมีลักษณะเป็นเซลล์เปิดจนถึงมีเซลล์ปิด 80 เปอร์เซ็นต์ ขอบให้อากาศหนีออกเมื่อได้รับแรงกระทบและดูดอากาศกลับเมื่อหมดแรง กระทบ การขึ้นรูปดีมากทำให้เป็นวัสดุกันกระทบที่ดี ไม่ดูดซับความชื้นในอากาศ มีการใช้งานทั้งชนิดขึ้นรูปจากแม่แบบมาก่อน และขึ้นรูปด้วยการฉีดเข้าไปขยายตัวในช่องว่าง ในกรณีขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดให้เข้าไปขยายตัวใน ช่องว่าง สินค้าจะถูกนำมาห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติก (ปกติใช้ฟิล์มพอลิเอทิลีน) เพื่อป้องกันการติดของโฟมที่ใส่ไม่ให้เกาะติด สินค้า จากนั้นวางสินค้านั้นลงในกล่องแล้วฉีดโฟมลงในที่ว่าง การใช้เครื่องเติมโฟมประเภทมือถือจะช่วยให้งานสะดวกมากขึ้น การใช้งานโฟม ชนิดนี้จะพบในการห่อสินค้าที่ค่อนข้างละเอียดอ่อน เครื่องมือมีราคาแพงหรือสินค้าที่มีขนาดรูปทรงเปลี่ยนแปลงบ่อยๆ จนไม่คุ้มกับการลงทุน โฟมชนิดขึ้นรูปมาก่อน

โฟมพอลิเอทิลีน

มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเซลล์ปิด มีการขึ้นรูปดีหลังรับแรง กระทบ น้ำหนักเบา ทนทานต่อสารเคมี โฟมพอลิเอทิลีนมีการใช้ 2 รูป คือ Crosslink และ Non-crosslink ชนิด Crosslink จะมีน้ำหนักมากกว่า และมีราคาแพงกว่าชนิด Non-crosslink แต่จะให้สมบัติในการเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุกันกระแทกที่ดีกว่า มีการผลิตโฟมชนิดนี้ในรูปแบบสี่เหลี่ยมที่มีความหนาต่างๆ สามารถตัดหรือเลื่อยแล้วนำมาเชื่อมต่อด้วยความร้อนหรือกาวเพื่อให้ได้รูปทรงต่างๆ การผลิตอีกวิธีหนึ่งคือผลิตจากแม่แบบ ตัวอย่างการใช้งานของโฟมชนิดนี้ได้แก่ โฟมที่มีความหนาใช้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน เครื่องมือต่างๆ แผ่นโฟมชนิดบางนำมาใช้ห่อหุ้มสินค้า พวกหัตถกรรมอุปกรณ์และเครื่องมือ

แผ่นพลาสติกอัดอากาศ

ทำจากแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีน 2 แผ่น ประกบกัน โดยทำให้เกิดที่กันอากาศเล็กๆ เกิดขึ้นระหว่างแผ่น มีการผลิตออกมาในรูปแบบ้วน ปกติใช้ประโยชน์ในการห่อหุ้มสินค้าชิ้นเล็กๆ เช่น เซรามิก หัตถกรรม บางครั้งก็มีการใช้ห่อหุ้มภายนอกของอุปกรณ์ใช้งานภายในบ้าน เช่น ตู้เย็น ซึ่งมีการขนส่งโดยแท่นรองรับสินค้า แผ่นพลาสติกอัดอากาศมีความเหนียว สะอาด และไม่เป็นตัวการทำให้เกิดการผุกร่อน ไม่มีการดูดซับความชื้น ทนต่อแรงกระแทก แต่ไม่เหมาะกับสินค้าที่มีความอ่อนไหวต่อการสัมผัสความร้อน จาการที่มีผลิตเป็นม้วนจึงนำมาใช้งานได้ง่ายกับสินค้าที่มี รูปร่างและขนาดต่างๆ กัน

ฝอยไม้

เป็นวัสดุกันกระแทกที่มีการใช้งานมานาน โดยใช้ใส่ลงในช่องว่างของกล่องหรือลัง ความสามารถในการเป็นวัสดุกันกระแทก ขึ้นกับความหนาแน่นในการบรรจุและความชื้น ซึ่งปกติมีค่าประมาณ 12 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในอดีตฝอยไม้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางกับสินค้าต่างๆ ตั้งแต่ผัก ผลไม้ จนกระทั่งสินค้าอุตสาหกรรม ปัจจุบันประเทศอุตสาหกรรมมักไม่นิยมใช้ฝอยไม้ เนื่องจากการไม่ยอมรับกรณีที่อาจเสี่ยงต่อการปนเปื้อนเมื่อใช้กับผักและผลไม้ ในขณะที่ความชื้นของฝอยไม้เองจะก่อให้เกิดการผุกร่อนกับสินค้าอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามในสินค้าบางประเภทก็ยังมีความต้องการใช้เนื่องจากเป็นวัสดุที่ให้ลักษณะของความเป็นธรรมชาติ เมื่อนำไปใช้กับสินค้าประเภทของขี้ผึ้ง หรือสินค้าที่แสดงถึงความมีคุณค่าสูง เช่น หินแกะสลักขนาดเล็กหรืองานฝีมือพวกเซรามิก

ฝอยกระดาษ

มีการใช้งานเช่นเดียวกับฝอยไม้ เป็นวัสดุที่มีราคาถูก และหาได้ง่าย มีข้อเสีย อยู่บ้างคือดูดซับความชื้นในอากาศได้ง่าย มีการปนเปื้อนของฝุ่นละอองและไม่สะอาด ในประเทศอุตสาหกรรมจะไม่นิยมใช้ โดยเฉพาะฝอยกระดาษที่ได้จากกระดาษที่ผ่านการพิมพ์มาก่อน

ในปัจจุบันวัสดุกันกระแทกประเภทโฟม มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถผลิตให้ได้ความหนาแน่นต่างๆ ที่เหมาะสมกับสินค้ามากมาย แต่เนื่องจากโฟมบางชนิดมีการสลายตัวได้ยาก และบางชนิดไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ จึงก่อให้เกิดปัญหา กับการจัดการเศษวัสดุที่เหลืออยู่ การนำมาใช้งานจึงควรพิจารณาถึงจุดดังกล่าวด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kawai [3] สรุปการศึกษาการย่อยสลายที่เกิดกับพอลิเอเทอร์ และอธิบายเกี่ยวกับการย่อยสลายของ copoly (ether/ether) s และ copoly (ether/ester) s โดยพอลิเอเทอร์จะเกิดการย่อยสลายได้โดยแบคทีเรียและไลเปส พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่มีมวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (M_n) ระหว่าง 400-6000 สามารถเปลี่ยนอาหารให้เป็นสารดูดซึมได้โดยจุลินทรีย์หลายชนิด พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่มระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอลกับพอลิพรอพิลีนไกลคอล (PEG-PPG) สามารถย่อยสลายได้โดย PEG และ/หรือ PPG จะเกิดการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ผลจากการศึกษางานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า พอลิเอเทอร์เป็นส่วนที่ช่วยให้ส่วนที่แข็ง (hard segment) สามารถยืดหยุ่นได้ ซึ่งนำไปใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมที่เกิดการย่อยสลายได้

Sung-Il Lee , Soo-Chang Yu , Youn-Silk Lee [4] พอลิยูรีเทนที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอาจจะถูกนำไปใช้ในการผลิตฟิล์มพลาสติกซึ่งสามารถใช้แทนที่ฟิล์มธรรมดาที่เตรียมได้จากพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่น พอลิเอทิลีน และ พอลิพรอพิลีน พรีพอลิเมอร์ ถูกสังเคราะห์จากพอลิบิวทีลีนซัคซินิกโพลีออล (PBS , M_n 1,650) พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG , M_n 1000) และ 4,4-ไดโซไซโคเฮกซิลมีเทนไดโอะไซไซยานต โดยใช้ 1,4-บิวเทนไดออลเป็นเซนเอ็กเทนเคอร์ ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสารจะอยู่ที่ 30000-38000 และมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 99-101 องศาเซลเซียส ค่า tensile strength (2.0 - 2.4 kg / mm^2) ของพอลิเมอร์ที่ได้มีค่าค่อนข้างจะดีกว่าค่าของ PBS (1.6 kg / mm^2) ที่ได้รายงานไว้เมื่อเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลที่เท่ากัน (M_n 20000) แต่อย่างไรก็ตามค่าแรงดึงยึดที่จุดขาด (230 - 330%) มีค่าดีกว่า PBS (42%) พอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้นี้สามารถเสีสภาพได้อย่างรวดเร็วในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถวัดได้จากน้ำหนักที่หายไป 30 - 60% ภายใน 2 วัน ซึ่งผลจากการเสีสภาพนี้จะขึ้นอยู่กับส่วน Hard segment ของ PEG หรืออีกนัยหนึ่งกล่าวได้ว่าพอลิยูรีเทนที่มีส่วนผสมของ PBS เป็น Soft segment จะทำให้อัตราการเสีสภาพได้ช้ากว่าภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกัน

Wales and Sagar [5] ศึกษาผลของโครงสร้างพอลิยูรีเทนที่สามารถย่อยสลายได้ชีวภาพ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีกับโครงสร้างของจุลินทรีย์ของตัวอย่างการขึ้นรูปฟิล์มพอลิยูรีเทนและผลของจุลินทรีย์ต่อสมบัติแรงดึง พบว่าพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์จากไดโอะไซไซยานตที่แตกต่างกันมีส่วนที่เรียกว่า “ hard block ” และ “ soft block ” โดยทำการแทนที่ส่วนต่างด้วยสปอร์ของจุลินทรีย์ ค่าความแข็งแรงดึงที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้จากองศาการย่อยสลายโดยตรวจวัดได้จากน้ำหนักโมเลกุลที่หายไป จากการทดลองให้ผลว่าความสัมพันธ์ระหว่างหมู่ยูรีเทนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรไลซิสกับความยาวของสายโซ่คาร์บอนในพอลิยูรีเทนแปรผกผันกัน โดยพอลิเอเทอร์แทนทานต่อการย่อยของจุลินทรีย์ได้มากกว่าพอลิเอสเทอร์

Gary T. Howard [6] บทความเกี่ยวกับพอลิยูรีเทนที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ ซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ความเป็นผลึก การเชื่อมโยงและหมู่ฟังก์ชันของสารเคมีจากการศึกษาพบว่าหมู่เอสเทอร์ในพอลิเมอร์พอลิออลสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ในจุลินทรีย์ โดยเอนไซม์เอสเทอร์จะทำการไฮโดรไลซิสพันธะเอสเทอร์

Huang et al. [7] ศึกษาโครงสร้างและลักษณะพื้นฐานวิทยาการสลายตัวของพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 40000 ทำการตรวจสอบจากการเติมไนโตรเจน พบว่าพอลิยูรีเทนทั้งที่มีเป็นอะลิฟาติกไดโอโซไซยานเนตและอะโรมาติกไดโอโซไซยานเนตสลายตัวได้โดยอะโรมาติกพอลิเมอร์จะสลายตัวช้ากว่า อะลิฟาติกพอลิเมอร์ โดยการเติมไนโตรเจนจะไปลดการสลายตัว

Hatakeyama et al. [8] ศึกษาคุณสมบัติของพอลิยูรีเทนซีสและพอลิยูรีเทนโพลี โดยการนำพอลิเอทิลีนไกลคอลมาผสมกับคากาน้ำตาล , ลิกนิน , เศษไม้หรือกากกาแฟก่อนนำไปทำปฏิกิริยากับไดเพนิลมีเทนไดโอโซไซยานเนตที่อุณหภูมิห้องจะได้พอลิยูรีเทนซีส ส่วนพอลิยูรีเทนโพลีเตรียมได้จากการนำส่วนแรกทีกล่าวมาทำการผสมไดเพนิลมีเทนไดโอโซไซยานเนตที่เติมพลาสติกไซเซออร์ , สารลดแรงตึงผิว , ตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมน้ำจากนั้นนำไปปั่นจนจากการทดลองสามารถสรุปว่าได้พอลิยูรีเทนที่เติมจากส่วนที่เหลือใช้ของเศษไม้และลิกนินจะทำปฏิกิริยาที่ส่วนที่แข็งของพอลิยูรีเทนและพบว่าพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน ส่วนพอลิยูรีเทนที่เติมคากาน้ำตาลและกาแฟ อัตราส่วนการย่อยสลายทางชีวภาพขึ้นอยู่กับ cryptomeria และ beech

Coppola and Conn [9] ศึกษาการเตรียม Semi-rigid พอลิยูรีเทนสำหรับใช้เป็นวัสดุกันกระแทกและบรรจุภัณฑ์ของสินค้าที่เกิดการสั่นสะเทือนแล้วเสียหายง่าย โดยโพลีสังเคราะห์ได้จากพอลิเอเทอร์พอลิออลพอลิเมอร์ลิกไดโอโซไซยานเนตกับน้ำปริมาณมาก และ สารทำให้เกิดโฟม โดยการทำให้ปฏิกิริยาของของผสมมีดัชนีระหว่าง NCO/OH ค่าประมาณ 30-60 เดิมซิลิโคนเป็นสารลดแรงตึงผิวคิดเป็น 1.8-3 ส่วนในพอลิออล 100 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. กาบกล้วยน้ำว้าจากต้นกล้วยที่ตัดเครือแล้ว
2. ไอโซไซยานเนต (ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยมิตซูยสเปเชียลตี้เคมีคอล)
3. พอลิออลเรซินผสมซิลิโคน (ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยมิตซูยสเปเชียลตี้เคมีคอล)

3.2 อุปกรณ์

1. ตะแกรงร่อนรูพรุน ขนาด 1x1 มิลลิเมตร
2. แม่แบบไม้ขนาด 5x5 นิ้ว
3. เครื่องปั่นน้ำผลไม้ National
4. ใบพัดกวน Stainless แบบ 2 ใบพัด
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
6. Universal Testing Machine รุ่น LR5K
7. มอเตอร์ปั่นกวนชนิดปรับรอบ รุ่น RW20DZM
8. กระจับปิ้งพลาสติก
9. นาฬิกาจับเวลา
10. ตะเกียบไม้

3.3 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมเส้นใยกล้วย

นำกาบกล้วยมาหั่นให้มีขนาดเล็ก ตากแดดให้แห้งประมาณ 2 วัน จากนั้นนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาปั่นและนำใยกล้วยที่ปั่นแล้วมาคัดขนาดด้วยตะแกรงที่มีรูพรุนขนาด 1x1 มิลลิเมตร เก็บไว้ในถุงพลาสติกปิดสนิทไว้ใช้ในการทดลองต่อไปโดยเส้นใยที่ผ่านตะแกรงออกมาเป็นเส้นใยละเอียด ส่วนที่ไม่ผ่านตะแกรงเป็นเส้นใยหยาบ

ตอนที่ 2 การเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

1. ชั่งสารเคมีแต่ละสูตรตามตาราง โดยอัตราส่วนของไอโซไซยานเนตต่อเรซิน เป็น 50 : 43

ตารางที่ 3.1 สูตรของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่มีการเติมเส้นใยกล้วย

สูตร	1	2	3	4	5
สาร	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
ไอโซไซยานเนต	50	50	50	50	50
เรซิน	43	43	43	43	43
เส้นใย	-	30	35	40	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำเส้นใยกล้วยชนิดเส้นใยหยาบมาผสมกับเรซินและคนให้เข้ากันในกระป๋องพลาสติก
3. เติมไอโซไซยาเนตแล้วนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นที่ความเร็ว 1700 รอบ / นาที เป็นเวลา 10 วินาที
4. เทของผสมลงในแม่แบบสี่เหลี่ยมขนาด 5x5 นิ้ว ปล่อยให้ของผสมเกิดการพองตัวเป็นโฟมอย่างสมบูรณ์โดยไม่ยุบตัวทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที แล้วจึงนำออกจากแม่แบบ
5. ทำซ้ำจนได้โฟมครบทุกสูตร โดยสูตรที่ 6 , 7 , 8 และ 9 ใช้เส้นใยละเอียดแทนเส้นใยหยาบ
6. โฟมแต่ละสูตรจะมีปริมาณเส้นใยต่อน้ำหนักเรซินคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักได้ดังนี้

สูตรที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
% w/w	-	32	37	43	48	32	37	43	48

ตอนที่ 3 การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

1. การหาค่า Cream time , Gel time และ Tack free time

หลังจากปั่นกวนและเทของผสมลงในแม่แบบแล้ว ขณะที่ปล่อยให้ของผสมเกิดการพองตัวเป็นโฟมอย่างสมบูรณ์นั้นจะทำการจับเวลาเพื่อหาค่า Cream time , Gel time และ Tack free time ไปด้วยโดยเริ่มจับเวลาดังแต่เทลงแม่แบบ ค่าต่างๆหาได้ดังนี้

- Cream time คือ ช่วงเวลาที่ของผสมเริ่มเปลี่ยนเป็นสีครีมและเริ่มพองตัว
- Gel time คือ หลังจากได้ค่า Cream time แล้ว นำตะกั่วไปจุ่มบริเวณผิวโฟมจนมีเจลติดขึ้นมาเป็นเส้นจะได้ค่า Gel time
- Tack free time คือ ช่วงเวลาที่โฟมพองตัวเต็มที่แล้ว ใช้นิ้วสัมผัสบริเวณผิวโฟมจนกระทั่งเนื้อโฟมไม่ติดที่นิ้วขึ้นมาจะได้ค่า Tack free time

ค่า Cream time , Gel time และ Tack free time มีความสำคัญ คือเป็นค่าที่แสดงถึงเวลาในการพองตัวเป็นโฟมที่สมบูรณ์ของโฟมพอลิยูรีเทน หลังจากการปั่นกวนของผสมระหว่าง ไอโซไซยาเนต กับ พอลิออลเรซิน

2. การตรวจวัดความหนาแน่นชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

(อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D 1622)

ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความหนาแน่นควรมีรูปร่างสี่เหลี่ยมที่สามารถคำนวณหาปริมาตรที่แน่นอนได้ จำนวนไม่น้อยกว่า 5 ชิ้นงาน

ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานด้วยเครื่องชั่งมาตรฐาน โดยมีนัยสำคัญ 1 % ในหน่วยน้ำหนักกรัม วัดความกว้าง ความยาว และ ความหนา ด้วยเครื่องมือวัดในหน่วยความยาว คำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงานได้จาก

$$\text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{น้ำหนักของชิ้นงาน (g)}}{\text{ปริมาตรของชิ้นงาน (cm}^3\text{)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การตรวจสอบการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวและหดตัวควรมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 1 นิ้ว ยาว 1 นิ้ว หนา 1 นิ้ว จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ชิ้นงาน

ตัดชิ้นงานให้มีขนาด กว้าง 1 นิ้ว ยาว 1 นิ้ว หนา 1 นิ้ว วัดและบันทึกขนาดชิ้นงาน แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง และนำไปแช่ในตู้เย็นของคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ที่อุณหภูมิ - 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน จึงนำออกมาวัดขนาด เพื่อตรวจสอบการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงาน

4. การทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ

ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำควรมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 1 นิ้ว ยาว 1 นิ้ว หนา 1 นิ้ว จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ชิ้นงาน

ตัดชิ้นงานให้มีขนาด กว้าง 1 นิ้ว ยาว 1 นิ้ว หนา 1 นิ้ว นำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำไปแช่น้ำโดยใส่ในถุงซิปล็อคเติมน้ำให้เต็มแล้วปิดผนึก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำออกมาชั่งและบันทึกน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบหาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและนำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำจากสูตรแล้วนำไปหาค่าเฉลี่ย

$$\% \text{ การดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}} \times 100$$

5. การตรวจวัดแรงกดชิ้นงานโพรพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

(อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D1621_04)

ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงกดควรมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด กว้าง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้ว หนา 1 นิ้ว ซึ่งได้จากการขึ้นรูปในแม่พิมพ์ จำนวนไม่น้อยกว่า 5 ชิ้นงาน

นำชิ้นงานโพรพอลิยูรีเทนที่ได้จากการขึ้นรูปในแม่พิมพ์ไปตัดให้มีขนาด กว้าง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้ว หนา 1 นิ้ว นำชิ้นงานเข้าเครื่องทดสอบแรงกดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (5K) โดยใช้ความเร็วในการกดชิ้นงาน เท่ากับ 2.5 ± 0.25 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อหาค่าแรงกดสูงสุด และ ค่ามอดูลัส

ตอนที่ 4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

นำตัวอย่างโพรที่ได้ไปตรวจสอบเพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy ; SEM) เพื่อส่องดูพื้นผิวของวัสดุอย่างละเอียดที่กำลังขยาย 20 และ 50 เท่า

การเตรียมตัวอย่างทำได้โดย เลือกชิ้นงานตรงส่วนกลาง ตัดเป็นชิ้นเล็กประมาณ 1 cm นำชิ้นงานมาเคลือบทองและนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 5 การทดสอบการย่อยสลาย

ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลายควรมีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด กว้าง 1 นิ้ว ยาว 2 นิ้วหนา 1 นิ้ว จำนวน 3 ชิ้นงาน

ตัดชิ้นงาน ชั่งและบันทึกน้ำหนักทั้ง 3 ชิ้นไว้นำไปฝังดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร รดน้ำทุกวัน เมื่อครบ 1 เดือนจึงนำขึ้นมาล้างดินออก นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบหาน้ำหนักที่หายไป จนครบเวลา 3 เดือน โดยน้ำหนักที่หายไปในแต่ละเดือนจะนำไปคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายได้จากสูตร

$$\% \text{ การย่อยสลาย} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนฝังดิน} - \text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ}} \times 100$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

4.1.1 การหาค่า Cream time , Gel time และ Tack free time

จากตาราง 4.1 จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อมีการเติมเส้นใยกล้วยเป็นสารเติมแต่ง จะทำให้โฟมใช้เวลามากขึ้นในการฟูตัว แสดงว่าเส้นใยที่เติมลงไปจะไปหน่วงเหนี่ยวการเกิดปฏิกิริยาของโฟม ถ้าปริมาณเส้นใยที่เติมมากขึ้นก็จะยิ่งทำให้ค่าเวลาต่างๆเพิ่มมากขึ้น โดยเส้นใยชนิดหยาบและชนิดละเอียดจะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

ตาราง 4.1 แสดงค่าเฉลี่ย Cream Time , Gel Time และ Tack free Time ของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรต่างๆ

สูตรที่	Cream Time (min)	Gel Time (min)	Tack free Time (min)
1	0.32	2.01	3.04
2	0.36	2.07	3.23
3	0.45	2.28	3.43
4	0.48	2.20	3.36
5	0.56	2.41	3.44
6	0.36	2.16	3.17
7	0.47	2.35	3.19
8	0.49	2.32	3.20
9	0.53	2.48	3.46

หมายเหตุ

สูตรที่ 1 ไอโซไซยานต : เรซิน ไม่ผสมเส้นใย

สูตรที่ 2, 3, 4 และ 5 ไอโซไซยานต : เรซิน ผสมเส้นใยหยาบ 30, 35, 40 และ 45 กรัมตามลำดับ

สูตรที่ 6, 7, 8, และ 9 ไอโซไซยานต : เรซิน ผสมเส้นใยละเอียด 30, 35, 40 และ 45 กรัมตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

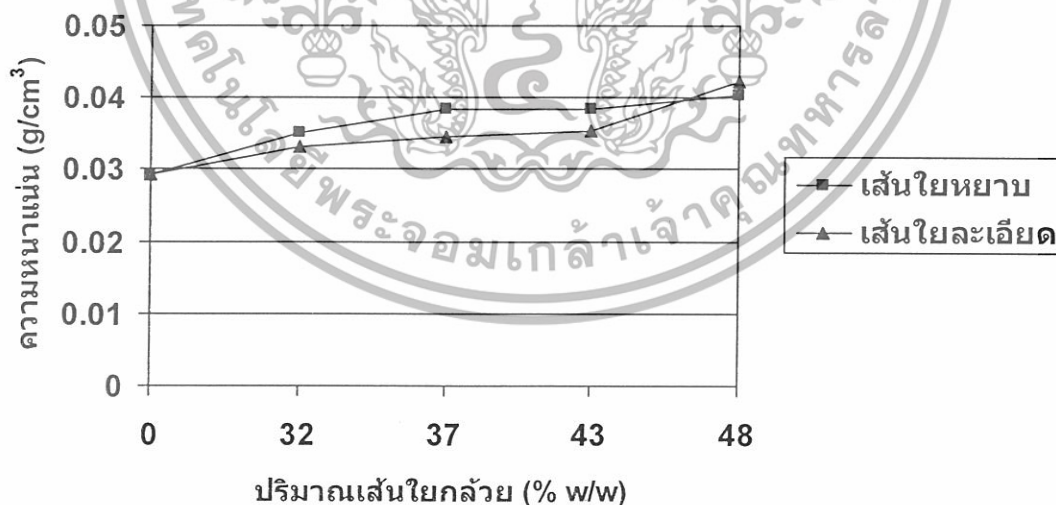
4.1.2 การตรวจวัดความหนาแน่นชิ้นงานและสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

ความหนาแน่น ความสามารถในการรับแรงกดอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของโฟมที่เตรียมได้จากสูตรต่างๆแสดงใน ตารางที่4.2

ตาราง 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยความหนาแน่น ค่าแรงกดอัดสูงสุด และ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรต่างๆ

สูตรที่	ความหนาแน่น (g/cm ³)	แรงกดอัดสูงสุด (N)	มอดุลัสยืดหยุ่น (N/mm ²)
1	0.02936	675.57	1.0402
2	0.03503	257.43	0.4503
3	0.03835	290.00	0.4985
4	0.03839	369.50	0.7388
5	0.04024	452.70	0.5556
6	0.03304	499.80	0.9159
7	0.03450	281.17	0.4182
8	0.03546	277.87	0.4275
9	0.04220	254.10	0.2646

ก. ความหนาแน่น

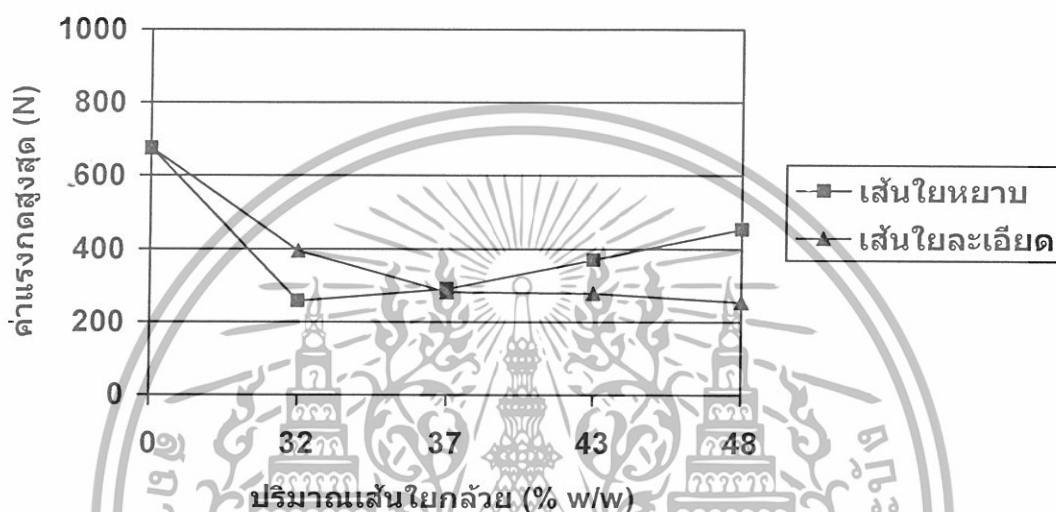


รูปที่ 4.1 แสดงความหนาแน่นเฉลี่ยของ โฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีและมีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณ 32 , 37 , 43 และ 48 % w/w ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตาราง 4.2 และรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเติมเส้นใยกล้วยเป็นสารเติมแต่งจะทำให้โฟมมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเส้นใยมีมากขึ้นแต่ปริมาตรของชิ้นงานมีขนาดเท่าเดิม ซึ่งโดยรวมแล้วเส้นใยหยาบจะให้ค่าความหนาแน่นมากกว่าเส้นใยละเอียดเล็กน้อย เนื่องจากเส้นใยหยาบมีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใยละเอียด

ข. ความสามารถในการรับแรงกดอัดของชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง

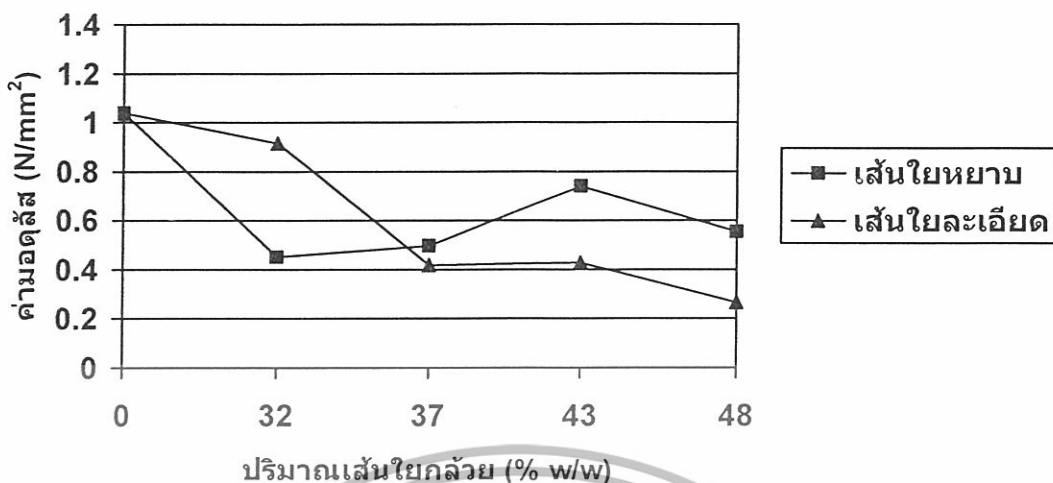


รูปที่ 4.2 แสดงค่าแรงกดสูงสุดเฉลี่ยของโฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีและมีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณ 32, 37, 43 และ 48 % w/w ตามลำดับ

จากตาราง 4.2 และรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมเส้นใยกล้วยลงไปจะทำให้โฟมพอลิยูรีเทนรับแรงกดสูงสุดได้น้อยลง แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยหยาบกับเส้นใยละเอียดพบว่า เมื่อเติมเส้นใยชนิดหยาบในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้รับค่าแรงกดได้มากขึ้น แสดงว่าเส้นใยที่มีขนาดใหญ่และหนาจะสามารถช่วยรับแรงกดได้ดีขึ้น ส่วนเส้นใยชนิดละเอียดพบว่าเมื่อเติมในปริมาณที่มากขึ้นจะยังทำให้รับแรงกดได้น้อยลง เนื่องจากเส้นใยชนิดละเอียดมีขนาดเล็กสามารถเข้าไปอยู่ในโครงสร้างโฟมได้ดี เมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้นแต่โฟมที่ใช้มีปริมาณเท่าเดิม ชิ้นงานที่นำมาทดสอบจึงมีปริมาณเนื้อโฟมน้อยลง ทำให้รับค่าแรงกดได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ค่ามอดุลัส



รูปที่ 4.3 แสดงค่ามอดุลัสเฉลี่ยของโฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีและมีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณ 32 , 37 , 43 และ 48 % w/w ตามลำดับ

จากตาราง 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่าแรงกดสูงสุดโดยค่ามอดุลัสเฉลี่ยของเส้นใยชนิดหยาบจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้นและค่ามอดุลัสเฉลี่ยของเส้นใยชนิดละเอียดจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น

4.1.3 การตรวจสอบการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ตาราง 4.3 แสดงขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ยของโฟมพอลิยูรีเทนเมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

สูตรที่	ขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังอบ (cm)		
	กว้าง	ยาว	หนา
1	0	0	+0.04
2	+0.03	0	-0.03
3	0	0	+0.03
4	+0.04	0	0
5	-0.04	0	0
6	+0.03	-0.04	+0.03
7	0	0	0
8	+0.04	+0.03	+0.03
9	-0.03	+0.03	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.4 แสดงขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปเฉลี่ยของโฟมพอลิยูรีเทนเมื่อนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ - 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน

สูตรที่	ขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังแช่แข็ง (cm)		
	กว้าง	ยาว	หนา
1	-0.03	+0.04	0
2	-0.03	+0.03	-0.04
3	-0.03	0	+0.04
4	0	+0.03	+0.04
5	-0.03	-0.03	-0.04
6	+0.03	-0.03	-0.03
7	-0.06	-0.03	+0.03
8	+0.03	0	-0.04
9	-0.03	+0.03	-0.03

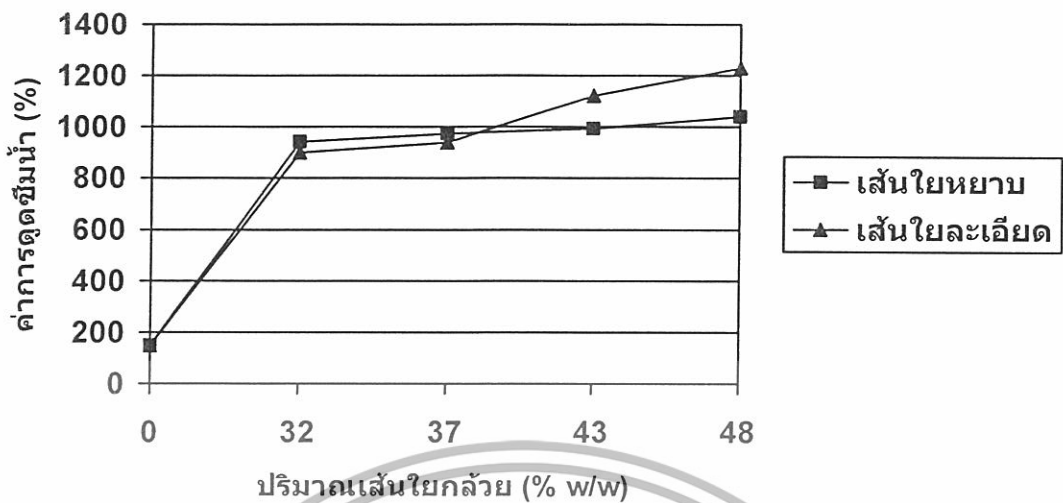
จากตาราง 4.3 และตาราง 4.4 จะเห็นได้ว่าขนาดเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปของโฟมพอลิยูรีเทนที่ผ่านการอบและแช่แข็งมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.06 เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมากอาจเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการใช้เครื่องมือวัด จึงสรุปได้ว่าโฟมพอลิยูรีเทนทั้ง 9 สูตรไม่เกิดการหดหรือขยายตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้สภาวะการทดลอง

4.1.4 การทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ

ตาราง 4.5 แสดงค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของโฟมพอลิยูรีเทนสูตรต่างๆเมื่อนำไปทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ

สูตรที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ค่าการดูดซึมน้ำ (%)	147.89	940.36	974.21	993.66	1040.86	898.44	939.65	1120.40	1228.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของโฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีและมีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณ 32 , 37 , 43 และ 48 % w/w ตามลำดับ

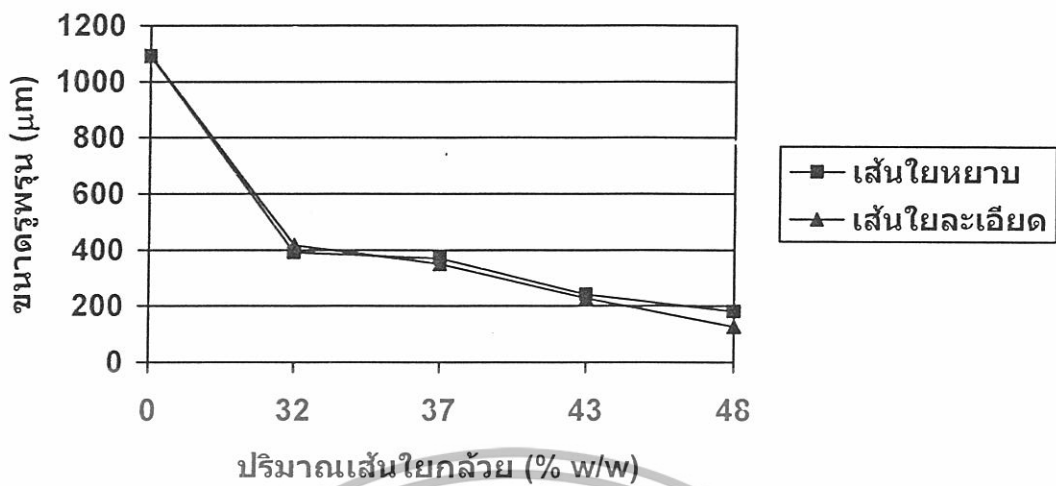
จากตาราง 4.5 และรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเติมเส้นใยลงไปจะทำให้โฟมสามารถดูดซึมน้ำไว้ในโครงสร้างได้มากขึ้น โดยในการเติมเส้นใยชนิดหยาบและละเอียดปริมาณ 32 และ 37 % w/w โฟมจะมีค่าการดูดซึมน้ำไม่ต่างกันมากนักแต่เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น เส้นใยชนิดละเอียดจะทำให้โฟมดูดซึมน้ำได้มากกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำมากกว่าเส้นใยชนิดหยาบ

4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา (Morphology)

นำชิ้นงานโฟมพอลิยูรีเทนที่ไม่มีการเติมเส้นใยกล้วย(สูตรที่ 1) ชนิดที่มีการเติมเส้นใยกล้วยชนิดหยาบ(สูตรที่ 2 , 3 , 4 , 5) และชนิดที่มีการเติมเส้นใยกล้วยละเอียด(สูตรที่ 6 , 7 , 8 , 9) รวม 9 สูตร ทำการตัดส่วนตรงกลางชิ้นงานให้มีขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM เพื่อตรวจสอบลักษณะและขนาดของรูพรุนในชิ้นงาน ได้ผลการทดลองดังนี้ ตาราง 4.6 แสดงขนาดรูพรุนเฉลี่ยของโฟมพอลิยูรีเทนที่ได้จากภาพพื้นฐานวิทยาจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

สูตรที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ขนาดรูพรุน (µm)	1090.9	390.90	368.88	240.74	180.74	417.07	349.09	227.27	127.27

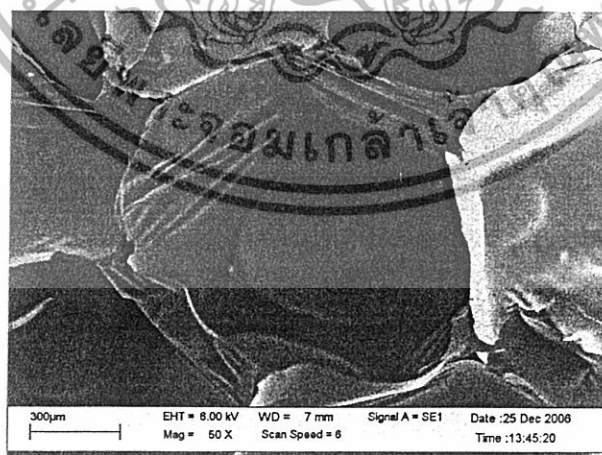
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของโพลีเอทิลีนที่ไม่มีและมีการเติมเส้นใยถั่ว 2 ชนิดใน ปริมาณ 32 , 37 , 43 และ 48 % w/w ตามลำดับ

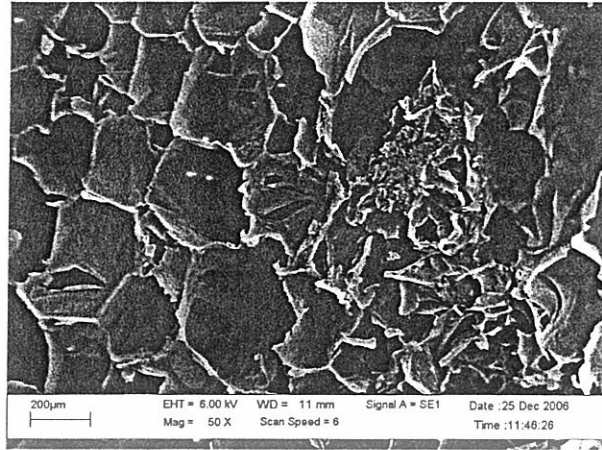
จากตาราง 4.6 และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าการเติมเส้นใยลงไปจะทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลงอย่างมาก ยิ่งปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้นขนาดอนุภาคก็จะยิ่งเล็กลง โดยเส้นใยหยาบจะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเส้นใยละเอียดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ลักษณะเซลล์ของโพลีเอทิลีนที่ไม่มีมีการเติมเส้นใย แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 โพลีเอทิลีนที่มีการเติมเส้นใยหยาบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และโพลีเอทิลีนที่มีการเติมเส้นใยละเอียด แสดงได้ดังรูปที่ 4.8

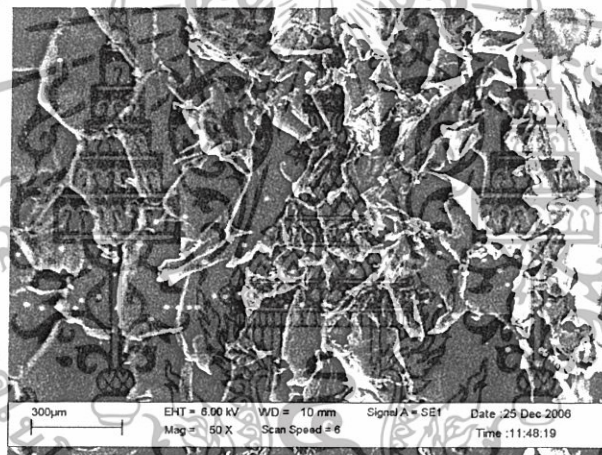


รูปที่ 4.6 แสดงภาพ SEM กำลังขยาย 50เท่าของโพลีเอทิลีนที่ไม่มีมีการเติมเส้นใยถั่ว(สูตรที่1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงภาพ SEM กำลังขยาย 50 เท่าของ โฟมพอลิเอทีนที่มีการเติมเส้นใยถ่านด้วยชนิดหยาบ 32% w/w (สูตรที่ 2)



รูปที่ 4.8 แสดงภาพ SEM กำลังขยาย 50 เท่าของ โฟมพอลิเอทีนที่มีการเติมเส้นใยถ่านด้วยชนิดละเอียด 32% w/w (สูตรที่ 6)

จากรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 จะเห็นได้ว่าการเติมเส้นใยจะทำให้ขนาดรูพรุนของโฟมเล็กลงและไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากเนื้อโฟมจะมาเกาะกันรอบๆเส้นใย โดยเส้นใยละเอียดจะกระจายตัวในเนื้อโฟมได้ดีกว่าเส้นใยหยาบจึงมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าเส้นใยหยาบ

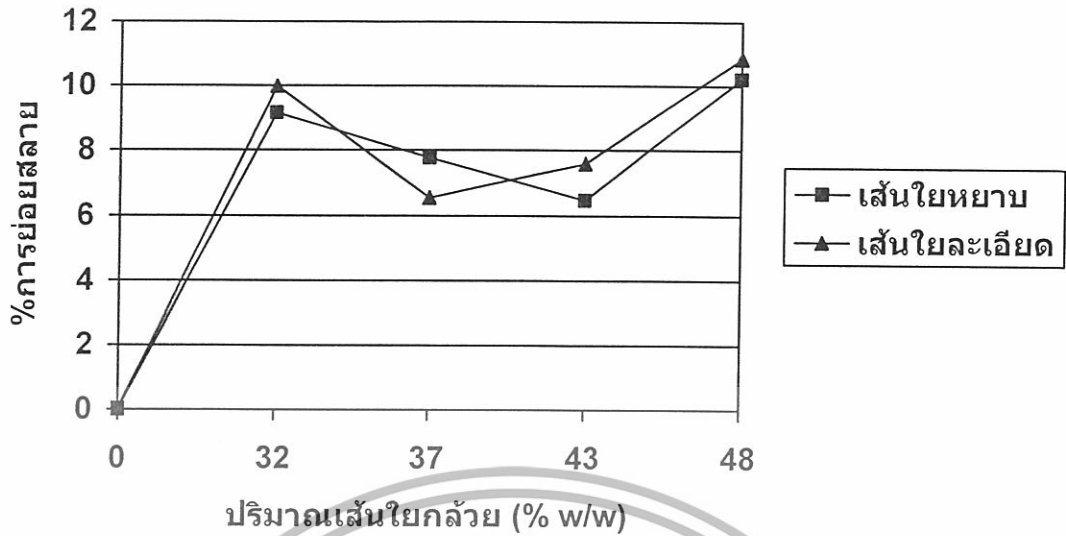
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบการย่อยสลาย

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า%การย่อยสลายของโพรพอลิยูรีเทนสูตรต่างๆเมื่อทดสอบการย่อยสลาย

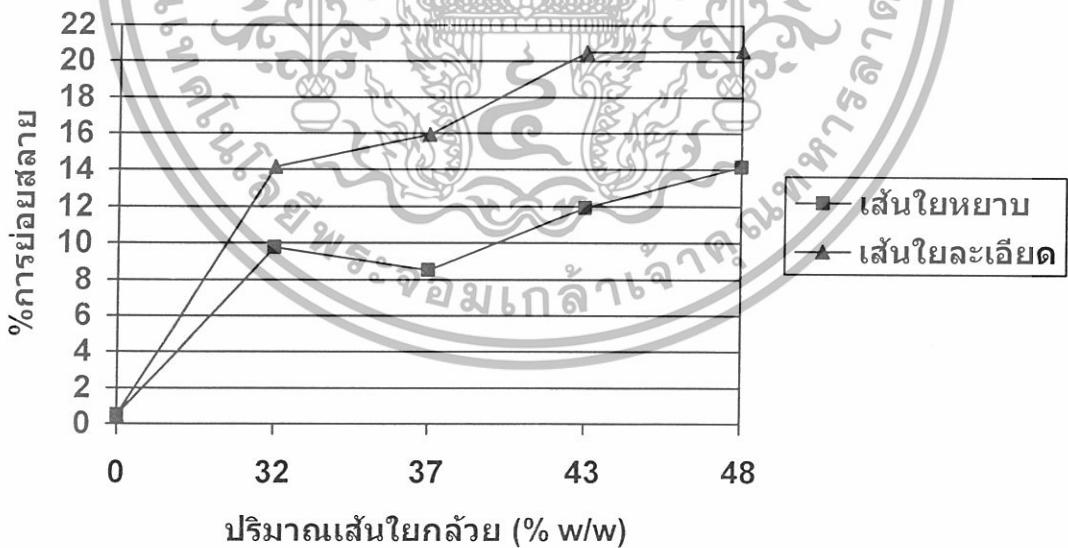
สูตรที่ / เดือนที่	น้ำหนักก่อนฝัง(g)	น้ำหนักหลังฝัง(g)	น้ำหนักที่หายไป(g)	%การย่อยสลาย
1 / 1	1.0295	1.0293	0.0002	0.019
1 / 2	0.9335	0.9288	0.0047	0.503
1 / 3	0.9730	0.9706	0.0024	0.247
2 / 1	1.1995	1.0896	0.1099	9.162
2 / 2	1.4138	1.2757	0.1381	9.768
2 / 3	1.5772	1.3139	0.2633	16.694
3 / 1	0.8923	0.8230	0.0693	7.766
3 / 2	1.6091	1.4720	0.1371	8.520
3 / 3	1.1420	0.9323	0.2097	18.363
4 / 1	1.8594	1.7393	0.1201	6.459
4 / 2	1.0948	0.9642	0.1306	11.929
4 / 3	0.9807	0.7825	0.1982	20.210
5 / 1	1.2397	1.1130	0.1267	10.220
5 / 2	1.1722	1.0061	0.1661	14.170
5 / 3	1.1597	0.8821	0.2776	23.937
6 / 1	1.1751	1.0578	0.1173	9.982
6 / 2	1.6708	1.4345	0.2363	14.143
6 / 3	1.4894	1.2041	0.2853	19.155
7 / 1	1.5484	1.4471	0.1013	6.542
7 / 2	1.8454	1.5514	0.2940	15.932
7 / 3	1.8559	1.5566	0.2993	16.127
8 / 1	1.5845	1.4643	0.1202	7.586
8 / 2	1.2197	0.9695	0.2502	20.513
8 / 3	1.3960	1.0689	0.3271	23.431
9 / 1	1.7904	1.5962	0.1942	10.847
9 / 2	1.3120	1.0422	0.2698	20.564
9 / 3	1.8145	1.4085	0.4060	22.375

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



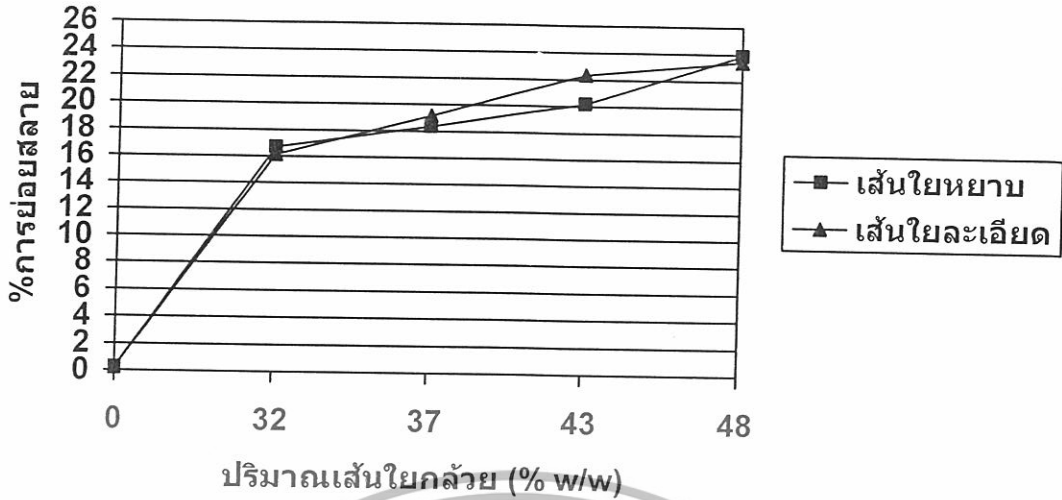
รูปที่ 4.9 แสดง%การย่อยสลายของโฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณต่างๆหลังนำไปทดสอบการย่อยสลายเดือนที่ 1

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.9 จะแสดงให้เห็นว่า การเติมเส้นใยกล้วยจะทำให้โฟมเกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น โดยปริมาณเส้นใยที่เติม 32 , 37 และ 43 % w/w จะให้ผลใกล้เคียงกันทั้งเส้นใยหยาบและเส้นใยละเอียด แต่ในปริมาณเส้นใย 48 % w/w เส้นใยละเอียดจะย่อยสลายได้ดีกว่าเส้นใยหยาบค่อนข้างมาก



รูปที่ 4.10 แสดง%การย่อยสลายของโฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดในปริมาณต่างๆหลังนำไปทดสอบการย่อยสลายเดือนที่ 2

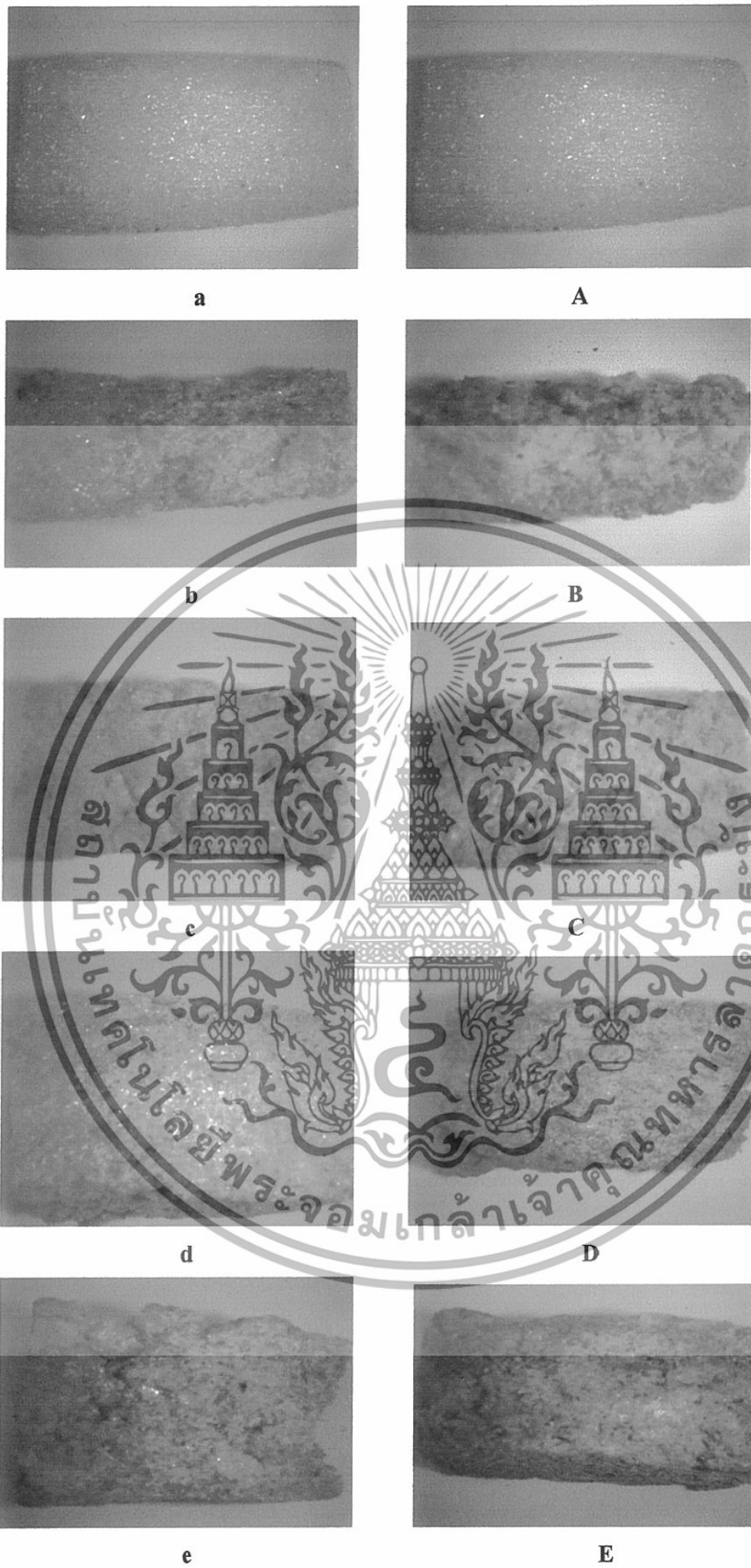
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



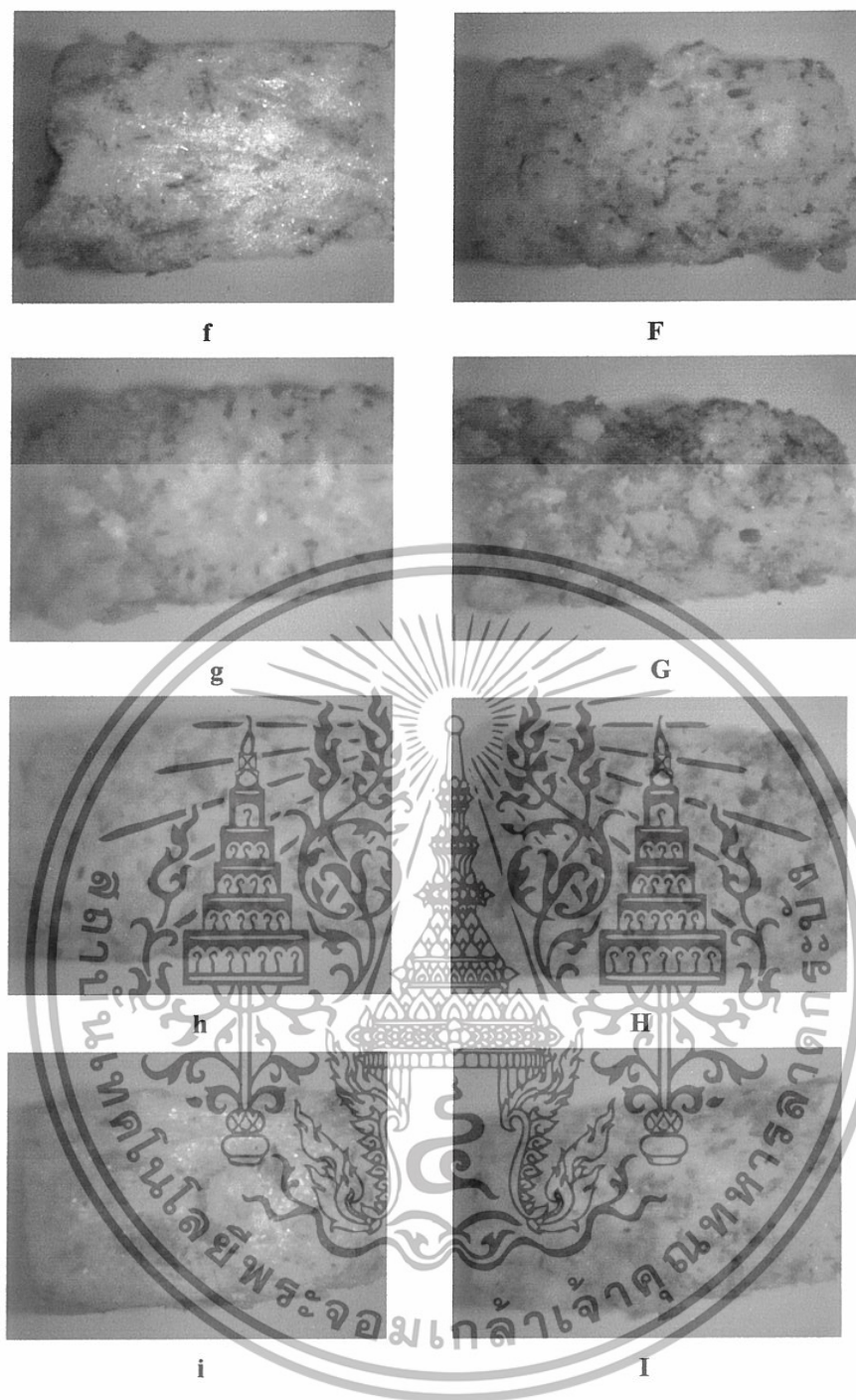
รูปที่ 4.11 แสดง%การย่อยสลายของโพลิเมอร์ที่ทำการเติมเส้นใยกล้วย 2 ชนิดใน ปริมาณต่างๆหลังนำไปทดสอบการย่อยสลายเดือนที่ 3

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะแสดงให้เห็นว่า เส้นใยละเอียดย่อยสลายได้ดีกว่าเส้นใยหยาบมาก ยิ่งเมื่อใช้เวลาในการทดสอบมากขึ้นก็จะยิ่งเห็นผลชัดเจนยิ่งขึ้น

ลักษณะชิ้นงานที่นำไปทดสอบการย่อยสลายเป็นเวลา 3 เดือนของชิ้นงานที่ไม่มีการเติมเส้นใย และมีการเติมเส้นใยชนิดหยาบและละเอียดแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้วยกล้อง Digital แสดงลักษณะของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายโดยให้ a-e เป็นภาพโพลีเมอร์ที่ 1-5 ก่อนการฝังกลบในดิน ให้ A-E เป็นภาพโพลีเมอร์ที่ 1-5 หลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 3 เดือน ให้ f-i เป็นภาพโพลีเมอร์ที่ 6-9 ก่อนการฝังกลบในดิน และให้ F-I เป็นภาพโพลีเมอร์ที่ 6-9 หลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 3 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมโคมพอลิยูรีเทนโดยใช้เส้นใยกล้วยเป็นสารเติมแต่ง เพื่อใช้เป็นวัสดุกันกระแทกที่สามารถย่อยสลายได้ โดยศึกษาผลของปริมาณและขนาดของเส้นใยที่เติมลงไป เป็นสารตัวเติม โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติของโคมพอลิยูรีเทนที่ทำการเติมเส้นใยกล้วย 2 ขนาด จากนั้นตรวจสอบสมบัติเชิงกล ความหนาแน่น และสัญญาณวิทยาของโคม ทำการเปรียบเทียบสมบัติกับโคมพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยไม่มีการเติมเส้นใยกล้วย และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานเป็นวัสดุกันกระแทก ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

เวลาในการฟู

เมื่อมีการเติมเส้นใยกล้วยเป็นสารเติมแต่ง โคมใช้เวลาในการฟูตัวนานขึ้น เส้นใยชนิดหยาบและชนิดละเอียดจะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

ความหนาแน่นชิ้นงาน

เมื่อมีการเติมเส้นใยกล้วยเป็นสารเติมแต่งจะทำให้โคมมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นเส้นใยหยาบจะให้ค่าความหนาแน่นมากกว่าเส้นใยละเอียดเล็กน้อย

การรับแรงกดอัด

เมื่อเติมเส้นใยกล้วยลงไปจะทำให้โคมพอลิยูรีเทนรับแรงกดสูงสุดได้น้อยลง และเส้นใยหยาบที่มากขึ้นจะทำให้รับค่าแรงกดได้มากขึ้น

ค่ามอดูลัส

มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกับค่าแรงกดอัด

การขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ไม่เกิดการหดหรือขยายตัวเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้สภาวะการทดลอง

การดูดซึมน้ำ

เมื่อมีการเติมเส้นใยลงไปจะทำให้โคมสามารถดูดซึมน้ำมากขึ้นเพราะขนาดรูพรุนเล็กลง จำนวนรูพรุนมากขึ้นเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างโคม เส้นใยและน้ำ เส้นใยชนิดละเอียดจะทำให้โคมดูดซึมน้ำได้มากกว่าเส้นใยชนิดหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัณฐานวิทยา

ขนาดเฉลี่ยของรูพรุนในโฟมพอลิยูรีเทนที่ผสมเส้นใยกล้วยทั้งชนิดหยาบและชนิดละเอียดพบว่า ลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น จึงเท่ากับเป็นการเพิ่มจำนวนรูพรุนในโฟม ทำให้ดูดซึมน้ำได้มากขึ้น

การย่อยสลาย

การใช้เส้นใยกล้วยเป็นสารตัวเติม โดยเฉพาะเส้นใยละเอียดช่วยให้โฟมพอลิยูรีเทนย่อยสลายได้เร็วเมื่อฝังในดินเป็นเวลา 3 เดือน โดยวัดจากการที่สูญเสียน้ำหนักมากกว่าโฟมพอลิยูรีเทนไม่ผสมเส้นใย นั่นคือการใช้เส้นใยธรรมชาติช่วยเร่งการย่อยสลายของโฟม

5.2 ข้อเสนอแนะ

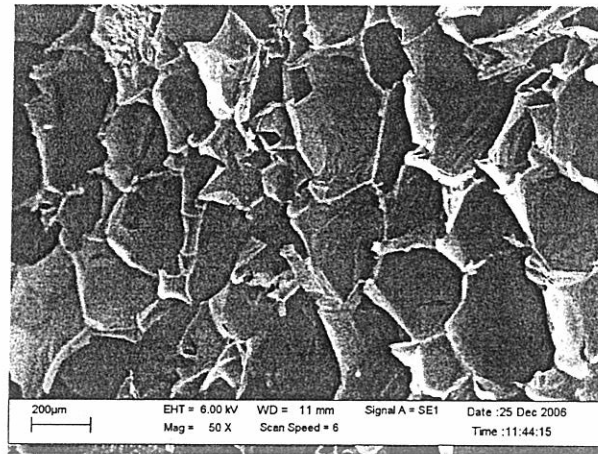
1. ถ้านำชิ้นงานไปใช้ในอุตสาหกรรมจริงควรทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิค Reaction Injection Moulding
2. สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุรับแรงกับงานที่รับแรงกระทำไม่สูงนักได้
3. ไม่ควรนำไปใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นสูง
4. อาจทำการปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้นใยหยาบผสมกับเส้นใยละเอียด เพื่อให้ได้โฟมที่มีสมบัติการเสริมแรงจากเส้นใยหยาบและสมบัติการย่อยสลายจากเส้นใยละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

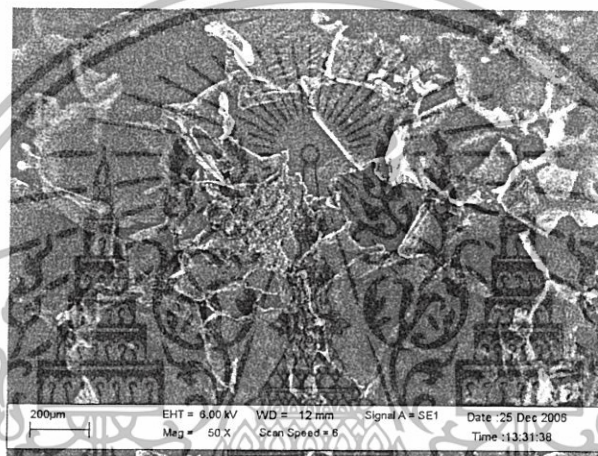
ภาคผนวก



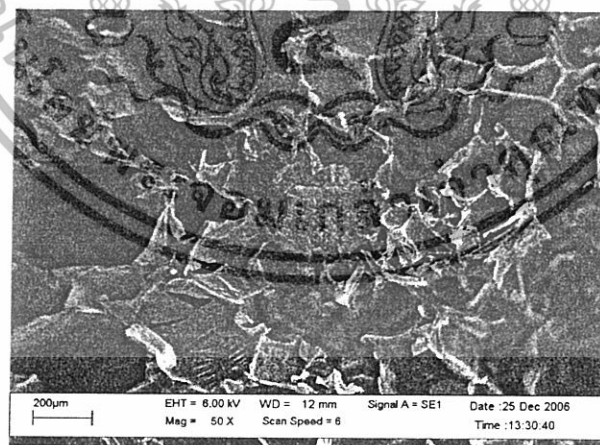
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.



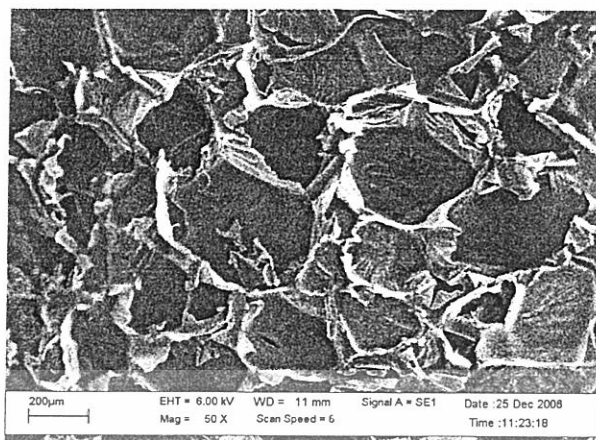
ข.



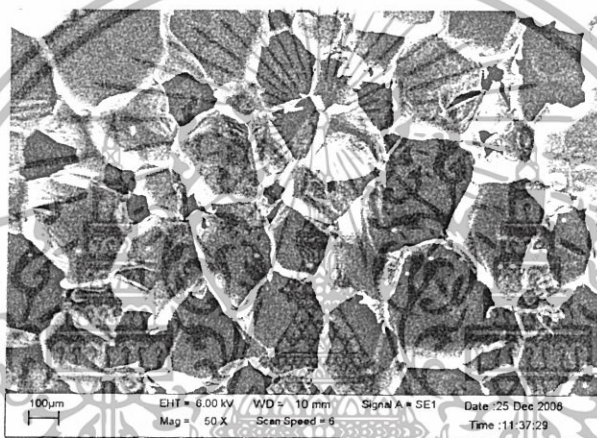
ค.

แสดงภาพ SEM กำลังขยาย 50 เท่าของ โฟมพอลิอิมิเดินที่มีการเติมเส้นใยกล้วยชนิดหยาบ
 ก. 37 % w/w (สูตรที่ 3), ข. 43 % w/w (สูตรที่4), ค. 48 % w/w (สูตรที่5) ตามลำดับ

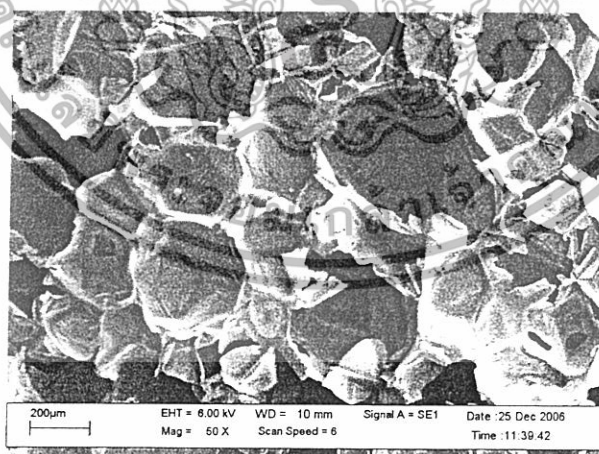
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง.



จ.



ฉ.

แสดงภาพ SEM กำลังขยาย 50 เท่าของ โฟมพอลิยูรีเทนที่มีการเติมเส้นใยกล้วยชนิดละเอียด
 ง. 37 % w/w (สูตรที่ 7), จ. 43 % w/w (สูตรที่8), ฉ. 48 % w/w (สูตรที่9) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ชิดชนก แจ่มหิรัญ และ สุรัญญา สิทธิศิริพร. 2548. การศึกษาผลของสารตัวเติมในโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. โครงการงานพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2. เกวลิน ชันธุ์ชัยภูมิ และ ศักดิ์สิทธิ์ ดอนมอญ. 2548. การเตรียมและพัฒนากระดาษจากกากกล้วยเพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์. โครงการงานพิเศษ. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
3. F. Kawai. 1992 . **Mechanisms of Bacterial Degradation of Polyethers and their copolymer** . In M. Vert , J. Feigen , A. Albertson , G. Scott and E. Chiellieni (eds). Biodegradable of Polymer and Plastic. Cambridge. The Royal Society of Chemistry.
4. Sung-Il Lee , Soo-Chang Yu and Youn-Silk Lee. 2001. **Degradable polyurethane containing poly(butylenes succinate) and poly(ethylene glycol)**. Polymer Degradation and Stability. 72:81-87.
5. D.S. Wales and B.F. Sagar. 1991. **Effect of Structure on Susceptibility of Polyurethane to Biodegradation**. In H.W. Rossmoore (eds.) , Biodeterioration and Biodegradation. 8:241-248.
6. G.T. Howard. 2002. **Biodegradation of polyurethane:a review**. International Biodeterioration and Biodegradation. 49:245-252.
7. S.J. Huang , M.S. Roby , C.A. Macri and J.A. Carmeron. 1992. **The effects of Structure and Morphology on the degradation of Polymer with Multiple Groups**. In M. Vert , J. Feigen , A. Albertson , G. Scott and E. Chiellieni (eds). Biodegradable of Polymer and Plastic. Cambridge. The Royal Society of Chemistry.
8. H. Hatakeyama , S. Hirose , T. Hatakeyama , N. Kunio , K. Kobashigawa and N. Morohoahi. 1995. **Biodegradable Polyurethane from Plant Components**. In A. Albertson and S.J. Huang (eds.) , Degradable Polymers , Recycling and Plastic Waste Management.
9. P.J. Coppola and M. Conn. 1978. **Semi-Rigid Polyurethane Foam Used in Packaging**. U.S. Patent no. 4,087,389.
10. www.tistr.or.th.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้