การผลิตโฟมย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน

Production of Biodegradable Foam from Cassava Starch Reinforced with Oil Palm Fibre

อังศุมา บุญไชยสุริยา

Aungsuma Boonchaisuriya

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University
2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตโฟมย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน

ชื่อผู้เขียน นางสาวอังศุมา บุญไชยสุริยา

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

……

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร)

คณะกรรมการสอบ

……..ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

…….....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร)

…….....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมชาย ชูโฉม)

…….....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

…….....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตโฟมย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน
ผู้เขียน	นางสาวอังศุมา บุญไชยสุริยา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันเป็นปัญหาสำคัญที่ทั่วโลกให้ความสนใจซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดจากการกระทำของมนุษย์ พลาสติกและโฟมเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ก่อให้เกิดปัญหา เช่น ปัญหาการย่อยสลายของวัสดุ ซึ่งพลาสติกต้องใช้เวลากว่าร้อยปีในการย่อยสลาย และปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งพลาสติกในปัจจุบันเป็นพลาสติกพื้นฐานปิโตรเลียมที่มีการใช้น้ำมันดิบเป็นวัตถุดิบหลักแต่ในปัจจุบันพบว่าน้ำมันดิบกำลังหมดไป วิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจการผลิตวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากวัตถุดิบธรรมชาติ โดยใช้แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตมากในประเทศไทยเป็นวัตถุดิบหลัก กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ PVA เป็นสารเติมแต่ง น้ำเป็นตัวช่วยในการละลายส่วนประกอบเข้าด้วยกัน และใช้เส้นใยปาล์มน้ำมันในการเสริมแรงด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์สแตนเลสรูปสี่เหลี่ยมขนาด 127 mm x 127 mm x 1.9 mm ในการผลิตเป็นแผ่นผลิตภัณฑ์โฟมย่อยสลายได้ ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกลที่ประกอบด้วย ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง ค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุด และค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงาน โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 0-20.0 ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 0-15.0 และปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ร้อยละ 0-7.5 ออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองของกระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน คือ อุณหภูมิ 170°C ความดัน 2,000 psig และเวลา 5 min จากการทำ Regression Analysis ของผลการทดลองที่ได้ ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่ศึกษา (ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน กลีเซอรอล และ PVA) อันส่งผลต่อค่าตอบสนองของความทนแรงดัดโค้งและค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ จากการวิเคราะห์ด้วย ANOVA เพื่อหาค่าความแปรปรวนของการทดลอง พบว่าตัวแปรอิสระที่ทำศึกษามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของชิ้นงานที่ความเชื่อมั่น 95% และใช้โปรแกรม Solver ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ศึกษาในการผลิตชิ้นงาน คือ ปริมาณเส้นใยร้อยละ 11.2 กลีเซอรอลร้อยละ 6.1 และ PVA ร้อยละ 7.5 ให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งสูงสุดจากการทดลอง 1.23 MPa ค่าการดูด

ซับน้ำ 0.26 กรัมน้ำต่อกรัม และค่าความหนาแน่น 0.14 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยแต่ละตัวแปรที่ศึกษามีผลต่อการเสริมแรง ความยืดหยุ่น และช่วยลดการดูดซับน้ำของชิ้นงาน ตามลำดับ จากสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโฟมย่อยสลายได้ นำไปศึกษาผลของการเคลือบด้วยพาราฟินแว๊กซ์เพื่อลดการดูดซับน้ำของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานที่เคลือบด้วยพาราฟินแว๊กซ์จะให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและให้ค่าการดูดซับน้ำที่ลดลง 93% ชิ้นงานที่ผลิตได้สามารถย่อยสลายได้และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทดแทนวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น ถาดโฟมบรรจุอาหารแห้ง แผ่นโฟมรองของที่ระลึก เป็นต้น

Thesis Title	Production of Biodegradable Foam from Cassava Starch Reinforced with Oil Palm Fibre
Author	Miss Aungsuma Boonchaisuriya
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2011

ABSTRACT

In the present, environmental problems from human activities were an interesting issue. Plastic was also the one of them. The main problem of petroleum plastic and foam using are the degradation because of spending several years for decomposition. This research interested in biodegradable foam production from natural. Raw materials in this production consist of cassava starch, glycerol, polyvinyl alcohol (PVA), and oil palm fibre. Oil palm fibre was added to reinforcement of biodegradable foam. Biodegradable foams were prepared by compression molding in stainless plate size 127 x 127 x 1.9 mm. Factors of oil palm fibre (0-20%), glycerol (0-15.0%), and PVA content (0-7.5%) were investigated since these factors affected on physical properties, mechanical properties (maximum bending stress and strain), and water absorption of the specimen. Experiments were designed by Microsoft Excel using RSM technique. The optimum conditions of compression molding process were 170°C and 2,000 psig for 5 minutes. The correlation equation between independent parameters (oil palm fibre, glycerol, and PVA content) and dependent parameters (maximum bending stress and water absorption) were obtained from experimental data by regression method. Analysis of Variance (ANOVA) was selected to determine the deviation value. The results show that independent parameters were on bending stress at significant 95% of confidence. The solver program in MS Excel was used for determining the optimum condition, which was oil palm fibre 11.2%, glycerol 6.1%, and PVA content 7.5%. From the condition, the specimen was tested on bending stress, water absorption, and density that were 1.234 MPa, 0.26 g H_2O/g, and 0.14 g/cm^3, respectively. Oil palm fibre, glycerol, and PVA content affected on reinforcement, flexible, and water absorption of specimen, respectively. The biodegradable foam production from the optimum condition had been studied for water adsorption resistant by paraffin wax coating. The result showed that the slightly

increased in bending stress and the water absorption was also decreased to 93%. The applications of biodegradable foam can possible be used as foam trays, souvenirs packaging and so on.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา คอยชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา อีกทั้งยังช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ และ รองศาสตราจารย์ สมชาย ชูโฉม กรรมการผู้แทนคณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่จัดสรรเงินทุนในการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณทีมงานของหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการบำบัดมลพิษและสิ่งแวดล้อม (PTRU) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคอยแนะนำการแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน ที่มีส่วนช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อังศุมา บุญไชยสุริยา

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer)	5
2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable Plastic)	6
2.3 โฟมพลาสติก (Plastic Foam)	9
2.4 กระบวนการอัดขึ้นรูปพลาสติก	11
2.5 แป้ง (Starch)	13
2.6 สารเคมีสำคัญในอุตสาหกรรมพลาสติก	20
2.7 เส้นใย (Fiber)	22
2.8 Response Surface Methodology (RSM)	28
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	34
3.1 สารเคมี	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	35
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	53
4.1 สภาวะการอัดขึ้นรูปโฟมที่เหมาะสม	53
4.2 ผลของการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้	56
4.3 ผลของการเติมกลีเซอรอลต่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้	62
4.4 ผลของการเติม PVA ต่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้	65
4.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตโฟมย่อยสลายได้	68
4.6 การเคลือบชิ้นงานด้วยพาราฟินแว็กซ์	84
4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต (Economic analysis)	86
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	88
5.1 สรุปผลการทดลอง	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
เอกสารอ้างอิง	90
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	96
ภาคผนวก ข ข้อมูลสารเคมี	104
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม Solver	107
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	110
ประวัติผู้เขียน	123

รายการตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน 15

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่างๆ 16

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งชนิดต่างๆ 19

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยปาล์มน้ำมัน 26

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรอิสระ ระดับขอบเขต และสัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลอง 44

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองการเตรียมโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วย
เส้นใยปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิค RSM ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร 46

ตารางที่ 3.3 ผลการแปลงรหัสการออกแบบการผลิตโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วย
เส้นใยปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปรและตัวแปร
ตาม 2 ตัวแปร 47

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้จากออกแบบ
การทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD 70

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของการทดลองมี
รูปแบบสมการเป็น Quadratic model 71

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ
ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ 72

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ซึ่งออกแบบการทดลอง
ด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD 77

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของการทดลอง
มีรูปแบบสมการเป็น Quadratic model 78

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลทางสถิติการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ 79

ตารางที่ 4.7 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) และขอบเขต (Boundary Limit)
ในการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้ 83

ตารางที่ 4.8 สภาวะดำเนินการที่เหมาะสมของโฟมย่อยสลายได้ต่อ
ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งจากโปรแกรม Solver และจากการทดลอง 84

ตารางที่ 4.9 สภาวะดำเนินการที่เหมาะสมของการเคลือบชิ้นงาน
โฟมย่อยสลายได้ด้วยพาราฟิน แว๊กซ์ 85

รายการตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ใน
กระบวนการผลิตโฟมย่อยสลายได้ 86
ตารางที่ 4.11 อัตราค่าไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็ก ซึ่งมีความต้องการพลังงาน
ไฟฟ้าเฉลี่ยในเวลา 15 นาทีสูงสุดต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์
โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว 86
ตารางที่ 4.12 ผลของการคำนวณค่าวัตถุดิบทั้งหมดที่ใช้ในการผลิต
โฟมย่อยสลายได้ต่อ 1 ชิ้น 87

รายการภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 2.1 การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ชีวภาพ 5

ภาพประกอบ 2.2 กลไกการย่อยสลายแบบคอมโพสท์ที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติในการผลิตเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 8

ภาพประกอบ 2.3 ลักษณะรูปร่างเซลล์ของโฟมพลาสติก 10

ภาพประกอบ 2.4 เครื่องอัดแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดชิ้นงานทรงแบน 12

ภาพประกอบ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส 14

ภาพประกอบ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพคติน 15

ภาพประกอบ 2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล 21

ภาพประกอบ 2.8 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 22

ภาพประกอบ 2.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส 23

ภาพประกอบ 2.10 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส 24

ภาพประกอบ 2.11 เส้นใยที่ได้จากเปลือกนอกของผลปาล์มน้ำมัน 26

ภาพประกอบ 2.12 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม 27

ภาพประกอบ 3.1 เส้นใยปาล์มน้ำมันที่ได้จากเปลือกนอกของผลปาล์มน้ำมัน 36

ภาพประกอบ 3.2 เส้นใยปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการล้างและอบ 37

ภาพประกอบ 3.3 เครื่องปั่นสำหรับบดเส้นใยปาล์มน้ำมัน 37

ภาพประกอบ 3.4 เส้นใยปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการปั่นและแยกขนาดเส้นใย 38

ภาพประกอบ 3.5 แป้งมันสำปะหลังสำหรับการนำไปใช้งาน 38

ภาพประกอบ 3.6 สารละลาย PVA 39

ภาพประกอบ 3.7 ของผสมระหว่างกลีเซอรอลและสารละลาย PVA 39

ภาพประกอบ 3.8 การกวนวัตถุดิบต่างๆ ด้วยเครื่องช่วยผสม 40

ภาพประกอบ 3.9 ของผสมที่มีการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันสำหรับใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเพื่อผลิตวัสดุย่อยสลายได้ 41

ภาพประกอบ 3.10 ชุดแม่พิมพ์สแตนเลสรูปสี่เหลี่ยม 41

ภาพประกอบ 3.11 ชุดแม่พิมพ์สแตนเลสรูปสี่เหลี่ยมรองด้วยแผ่นไมลาร์ 42

ภาพประกอบ 3.12 การใส่แม่พิมพ์ในเครื่องอัดความดัน 42

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 3.13 แม่พิมพ์หลังจากออกจากเครื่องอัดความดันวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 43

ภาพประกอบ 3.14 ชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน 43

ภาพประกอบ 3.15 แสดงหน้าโปรแกรม Solver เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม 48

ภาพประกอบ 3.16 ชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้สำหรับการเคลือบชิ้นงานด้วยพาราฟิน แว๊กซ์ 49

ภาพประกอบ 3.17 พาราฟิน แว๊กซ์ก่อนหลอมละลาย 49

ภาพประกอบ 3.18 การเคลือบชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ด้วยพาราฟิน แว๊กซ์ 50

ภาพประกอบ 3.19 ชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น 51

ภาพประกอบ 3.20 การทดสอบการดัดโค้งของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ 52

ภาพประกอบ 3.21 การทดสอบการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ 52

ภาพประกอบ 4.1 โฟมย่อยสลายได้ขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป 55

ภาพประกอบ 4.2 ภาพตัดขวางของโฟมย่อยสลายได้ที่เติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน 57

ภาพประกอบ 4.3 พื้นผิวของโฟมย่อยสลายได้ที่เติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน 58

ภาพประกอบ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน
ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 15 กับความหนาแน่นเมื่อปริมาณกลีเซอรอล
ร้อยละ 2.5 และ PVA ร้อยละ 3.8 59

ภาพประกอบ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน
ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 15 กับค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง
เมื่อปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และ PVA ร้อยละ 3.8 60

ภาพประกอบ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมเส้นใย
ปาล์มน้ำมันในช่วงร้อยละ 0 ถึง 15.0 กับค่าการดูดซับน้ำ
เมื่อปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และ PVA ร้อยละ 3.8 61

ภาพประกอบ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมกลีเซอรอล
ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 5.0 กับปริมาณความชื้น เมื่อปริมาณ
เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และ PVA ร้อยละ 3.8 63

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลีเซอรอล
ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 5.0กับค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุด เมื่อปริมาณ
เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และ PVA ร้อยละ 3.8 63
ภาพประกอบ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลีเซอรอล
ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 5กับค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง เมื่อปริมาณ
เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และ PVA ร้อยละ 3.8 65
ภาพประกอบ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PVA ในช่วง
ร้อยละ 0 ถึง 7.5 กับปริมาณความชื้นได้ เมื่อปริมาณ
เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และกลีเซอรอล ร้อยละ 2.5 66
ภาพประกอบ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PVA ในช่วง
ร้อยละ 0 ถึง 7.5 กับค่าความทนต่อแรงดัดโค้งเมื่อปริมาณ
เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และ กลีเซอรอลร้อยละ 2.5 67
ภาพประกอบ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PVA ในช่วง
ร้อยละ 0 ถึง 7.5 กับค่าการดูดซับน้ำเมื่อปริมาณเส้นใย
ปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และ กลีเซอรอลร้อยละ 2.5 68
ภาพประกอบ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความทนต่อแรงดัดโค้ง
ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายของแบบจำลอง 73
ภาพประกอบ 4.14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของ
เส้นใยปาล์มน้ำมันและ PVA ที่มีผลต่อค่าความทน
ต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ 74
ภาพประกอบ 4.15 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของปริมาณ PVA
และกลีเซอรอลที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ 76
ภาพประกอบ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้
ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายของแบบจำลอง 79

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 4.17 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของปริมาณกลีเซอรอลและเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีผลต่อค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ 81
ภาพประกอบ 4.18 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของปริมาณ PVA และเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีผลต่อค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ 82
ภาพประกอบ 4.19 แสดงชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ 85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากการกระทำของมนุษย์ที่มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างสิ้นเปลือง ก่อให้เกิดปัญหาตามมามากมาย ทั้งปัญหาภาวะโลกร้อน ปัญหาด้านมลภาวะต่างๆ รวมไปถึงปัญหาที่สำคัญที่ทุกประเทศกำลังหาแนวทางแก้ไข คือ ปัญหาขยะ ประเทศไทยมีปริมาณขยะทั่วประเทศ 14 ล้านตันหรือวันละ 40,000 ตัน โดยเป็นขยะพลาสติกมากถึงร้อยละ 17 คิดเป็นประมาณ 2.4 ล้านตันต่อปี หรือ6,000 ตันต่อวัน (ศูนย์ประสานงานโครงการส่งเสริมเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ, 2551) เนื่องมาจากพลาสติกมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ต่างๆ โฟม (Foam) เป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปโฟมจะผลิตจากพลาสติกต่างๆ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน เป็นต้น โดยพลาสติกส่วนใหญ่เป็นพลาสติกสังเคราะห์พื้นฐานปิโตรเลียม (Petroleum) ที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตจากน้ำมันดิบ ปัจจุบันพบว่าปริมาณน้ำมันดิบลดลงเนื่องจากการขุดมาใช้อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ราคาต้นทุนการผลิตพลาสติกและโฟมเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก พลาสติกและโฟมต้องใช้เวลานับร้อยปีในการย่อยสลาย หลายประเทศตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมและปัญหาขาดแคลนน้ำมันดิบ จึงมีความตื่นตัวในการคิดค้นและใช้งานวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Composite) มากขึ้น โดยวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ จึงไม่ก่อให้เกิดการตกค้างของขยะภายหลังการใช้งานและหาใหม่ทดแทนได้ (Renewable) วัสดุชนิดนี้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการผลิตพื้นฐานทางพลาสติก เช่น กระบวนการฉีด (Injection Process) กระบวนการอัดรีด (Extrusion Process) และกระบวนการอัด (Compression Process) เป็นต้น

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการผลิตวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น มันสำปะหลัง (Cassava) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch) รายใหญ่ของโลก แต่แป้งมันสำปะหลังมักประสบปัญหาผลผลิตล้นตลาด ราคาตกต่ำ และถูกนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าต่ำ เช่น อาหารสัตว์

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง ราคาถูก มีปริมาณมาก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นโฟมได้ง่าย (Deng *et al*, 2006; วรรณภา, 2552) จึงเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมสำหรับประเทศไทยในการพัฒนาวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลผลิตทางการเกษตรได้อีกทางหนึ่ง การผลิตโฟมจากแป้งจะต้องมีการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งาน สารเติมแต่งจะเข้าไปกระจายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุโดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญๆ ของวัสดุ สารเติมแต่งที่สำคัญ คือ สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เช่น กลีเซอรอล (Glycerol) ซอลบิทอล (Sorbital) และโพรพิลีนไกลคอล (Propylene Glycol) เป็นต้น ใช้เติมเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น จึงมีการนำสารพลาสติกไซเซอร์มาเติมในการผลิตวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยสารพลาสติกไซเซอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ กลีเซอรอล เนื่องจากกลีเซอรอลมีคุณสมบัติเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ดีช่วยปรับปรุงความยืดหยุ่น หาได้ง่าย และราคาถูก

ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ที่เจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของประเทศไทย ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจากผลปาล์มจะได้ของเสียหลักอย่างหนึ่ง คือ เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber) ซึ่งเป็นส่วนของเปลือกนอกของผลปาล์ม (Mesocarp) ที่หีบน้ำมันออกแล้ว โดยปกติโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจะใช้เส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อผลิต ไอน้ำ (ธีระพงศ์, 2551) เส้นใยปาล์มน้ำมันมีส่วนประกอบของเซลลูโลส 65% ลิกนิน 19% และ เฮมิเซลลูโลส 16% (Sreekala *et al*, 2002) เส้นใยปาล์มมีคุณสมบัติช่วยพัฒนาคุณสมบัติหลายประการ เช่น ความสามารถในการทนความร้อน การลดอัตราการดูดซับความชื้น รวมไปถึงการหดตัวขณะขึ้นรูป จึงมีความสนใจในการนำเส้นใยปาล์มมาเสริมแรงในการผลิตวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ด้วยการผสมให้กระจายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุทำให้วัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีความแข็งแรงขึ้นและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเส้นใยปาล์มน้ำมันอีกทางหนึ่ง

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA) เป็นพลาสติกสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่สามารถละลายน้ำได้ดีและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เมื่อนำมาผสมกับแป้งซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงมีความสามารถในการเข้ากันได้สูง (ณัติฐพล, 2552) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติทางกลที่ดีกว่าแป้งมันสำปะหลังซึ่งทำให้โฟมจากแป้งมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นและมีความสามารถในการต้านทานความชื้นได้ดีขึ้น (Preechawong *et al*, 2004) จากการศึกษาพบว่าการเติม PVA ในรูปของเหลวผสมกับแป้ง ทำให้ค่าความแข็งแรง ค่าความยืดหยุ่น และค่าความต้านทานน้ำของโฟมจากแป้งดีขึ้น (Cinelli *et al*, 2005)

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการผลิตโฟมย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังโดยการนำเส้นใยปาล์มน้ำมันมาใช้ในการเสริมแรง ใช้กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ และใช้ PVA

เป็นสารเติมแต่ง ทำการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Process) ในแม่แบบสี่เหลี่ยม โดยตัวแปรที่สนใจศึกษาประกอบด้วยปริมาณของกลีเซอรอล PVA และเส้นใยปาล์ม วัสดุโฟมที่ผลิตได้นำไปทำการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใย คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล (ความทนต่อแรงดัดโค้งและค่ามอดุลัสแรงดัดโค้ง) และสมบัติการดูดซึมน้ำของโฟมย่อยสลายได้ จากนั้นทำการศึกษาการเคลือบโฟมย่อยสลายได้ด้วยพาราฟิน แว็กซ์ (Paraffin Wax) เพื่อป้องกันความชื้นและการดูดซึมน้ำของโฟมย่อยสลายได้ เนื่องจากโฟมย่อยสลายได้มีความไวต่อความชื้นและการดูดซึมน้ำ ซึ่งโฟมย่อยสลายได้ที่ผลิตขึ้นจากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของบรรจุภัณฑ์หรือการนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันสำหรับการใช้ทดแทนวัสดุโฟมพื้นฐานปิโตรเลียม
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณกลีเซอรอล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และเส้นใยปาล์มน้ำมันในการผลิตโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์ม
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มเปรียบเทียบกับโฟมย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลัง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการผลิตโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มด้วยกระบวนขึ้นรูปแบบอัดความดัน (Compression Process) โดยใช้แป้งมันสำหลัง กลีเซอรอล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต
2. ศึกษาการเตรียมโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของโฟมย่อยสลายได้ ได้แก่ ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 0-15 ปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 0-7.5 และปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 0-20

3. ศึกษาสมบัติของโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์ม ได้แก่ ความหนาแน่น ปริมาณความชื้น สมบัติความต้านทานต่อแรงดัดโค้ง (Flexural Properties) ค่าการดูดซับน้ำ (Water Absorption) และศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM)
4. ศึกษาและวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

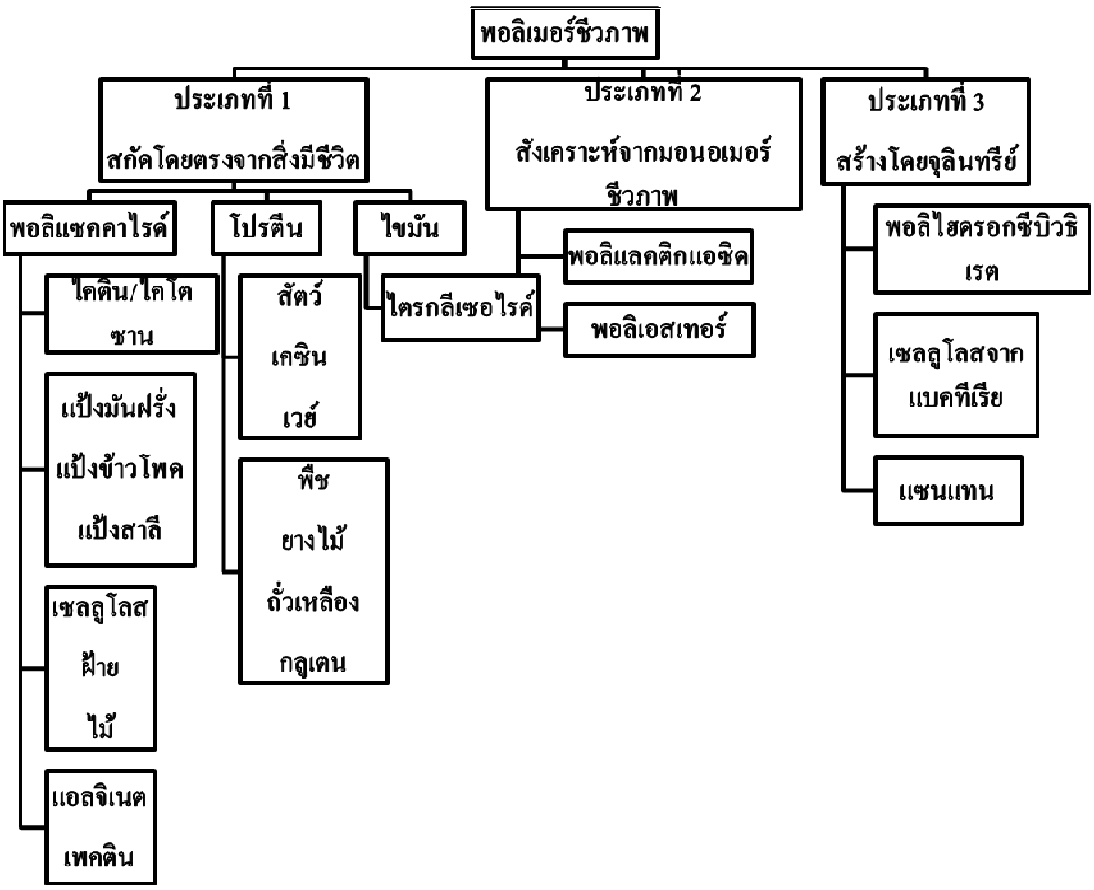
1. สามารถใช้ของเสียจากชีวมวลเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตโฟมย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังแทนวัตถุดิบจากน้ำมันดิบในการผลิตโฟม
2. ใช้เป็นแนวทางในการผลิตวัสดุที่สามารถลดการก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการใช้โฟมและพลาสติกสังเคราะห์พื้นฐานปิโตรเลียม
3. เพื่อเพิ่มมูลค่าของแป้งมันสำปะหลังและเส้นใยปาล์มน้ำมันในการผลิตโฟมย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลัง
4. เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาการผลิตโฟมย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer)

พอลิเมอร์ชีวภาพ หมายถึง พอลิเมอร์ที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตซึ่งเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติทางชีวภาพที่ไม่สูญสิ้นสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ ไม่ว่าพอลิเมอร์จะมาจากการสกัด การสังเคราะห์ หรือการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี การสร้างขึ้นจากแหล่งธรรมชาติถือว่าเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพทั้งสิ้น พอลิเมอร์ชีวภาพสามารถจำแนกตามแหล่งที่มาได้ดังภาพประกอบที่ 2.1



ภาพประกอบที่ 2.1 การจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ชีวภาพ (มยุรา, 2547)

พอลิเมอร์ชีวภาพสามารถจำแนกตามแหล่งที่มาได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. พอลิเมอร์ที่สกัดจากสิ่งมีชีวิต พอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ที่สกัดจากสิ่งมีชีวิตหรือพืช วัสดุเหล่านี้ตามธรรมชาติจะมีสมบัติไม่ทนน้ำ บางชนิดอาจก่อให้เกิดผลึกซึ่งเป็นปัญหากับกระบวนการผลิต แต่วัสดุจำพวกนี้มีข้อดี คือ ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่สกัดจากสิ่งมีชีวิต เช่น พอลิแซคคาไรด์ โปรตีน เป็นต้น

2. พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์มอนอเมอร์ธรรมชาติด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) โดยกรดแลคติกเป็นมอนอเมอร์ของพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักคาร์โบไฮเดรตจากข้าวโพด ข้าวสาลีหรืออาจใช้จากของเสียอุตสาหกรรม เป็นต้น พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหารได้มากมาย เนื่องจากสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในทำให้สามารถเลือกกระบวนภาคผลิตได้หลากหลาย โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโมเลกุล

3. พอลิเมอร์ที่ถูกผลิตขึ้นโดยจุลินทรีย์ ได้แก่ พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoate, PHA_s) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้จากการรวมตัวซ้ำๆ กันของกรดไฮดรอกซี (Hydroxy Acid) โดยแบคทีเรียสายพันธุ์หนึ่งซึ่งเกิดจากการใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและพลังงาน พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตเป็นวัสดุพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ (Bio-Degradable Thermoplastic Material)

2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable Plastic)

พลาสติกย่อยสลายได้ตามนิยามของ ASTM คือ พลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเนื่องจากมีการสูญเสียคุณสมบัติ สามารถแบ่งประเภทของการย่อยสลายออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable Plastic) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี เช่น หมู่คีโตนอยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งไม่เสถียร เข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่

2. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradable Plastic) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing Additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

3. พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradable Plastic) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดรายด์ พอลิคาร์บอเนตและพอลิยูริเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic Hydrolysis) และไม่ใช้คะตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis)

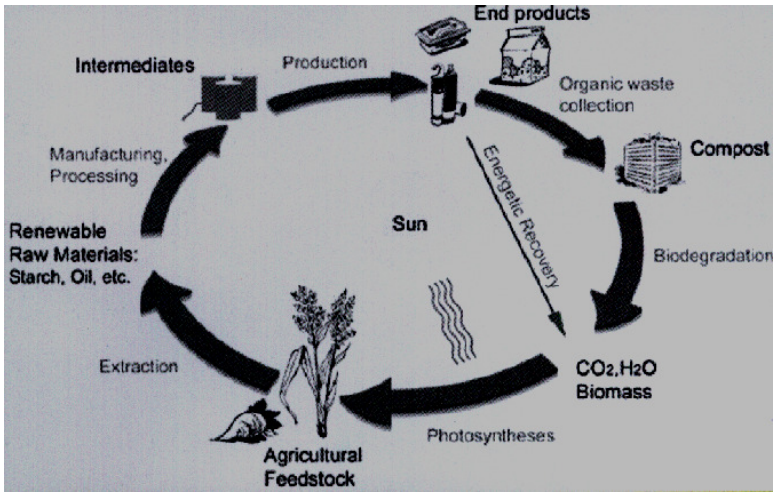
4. พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable Plastic) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอ็นไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-Enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบและแบบ Exo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate Biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีความหมายหรือคำจำกัดที่แตกต่างกันเล็กน้อยตามมาตรฐานของแต่ละองค์กร ดังนี้ มาตรฐาน ASTM D6400 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา และสาหร่าย ISO 472 กล่าวว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็น

เกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น ส่วน DIN FNK 103.2 ให้คำนิยามว่าวัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก็ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อมและมีอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีกลไกการย่อยสลายแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation) เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่สำคัญ คือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์ สะอาด ไม่เป็นพิษ และในสภาวะแวดล้อมที่กำหนดผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารประกอบขนาดเล็กและพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน

2. การคอมโพสท์ (Composting) เป็นกระบวนการหมักเพื่อทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่มีการควบคุม พลาสติกจะย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นสารที่มีลักษณะคล้ายฮิวมัส (Humus) หรือดินดำและยังได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และแร่ธาตุต่างๆ เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ไม่เหลือเศษตกค้างและไม่เป็นพิษ สามารถนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช กลไกการย่อยสลายแบบคอมโพสท์ที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติในการผลิตเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังภาพประกอบที่ 2.2



ภาพประกอบที่ 2.2 กลไกการย่อยสลายแบบคอมโพสท์ที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติในการผลิตเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Siracusa *et al*, 2008)

3. การย่อยสลายโดยใช้น้ำ (Hydro-Biodegradation) จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

4. การย่อยสลายโดยใช้แสง (Photo-Biodegradation) จะเกิดปฏิกิริยาด้วยแสงก่อนแล้วจึงเกิดการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.3 โฟมพลาสติก (Plastic Foam)

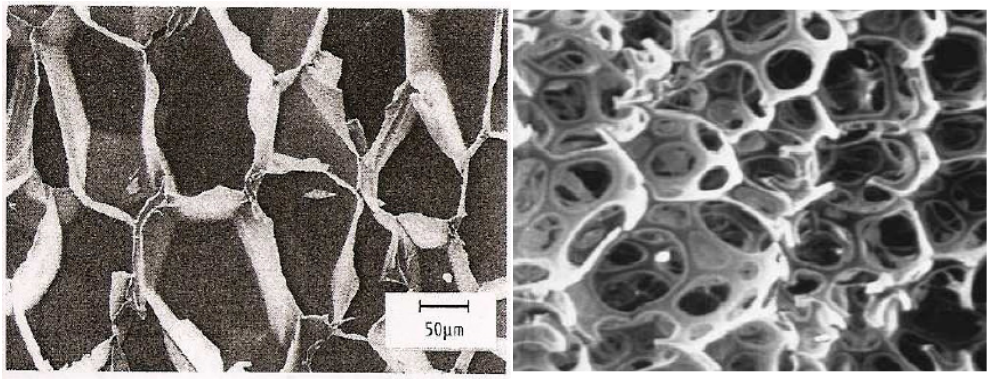
2.3.1 ความหมายและคำจำกัดความ

โฟมหรือโฟมพลาสติก เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเป็นวัสดุที่น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายง่ายและนำมาใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น กล่องใส่อาหาร ถ้วยขนมหวาน นอกจากนี้ยังใช้เป็นแผ่นรองกันการกระแทกในภาชนะบรรจุภัณฑ์ ฉนวนกันความร้อน และงานศิลป์ด้านต่างๆ โฟมพลาสติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่หาซื้อได้ง่าย ผิวเรียบ สะอาด และสวยงาม เก็บรักษาความร้อนหรือความเย็นของผลิตภัณฑ์อาหารไว้ได้ ไม่ดูดน้ำและน้ำมัน มีความเป็นกลางและปลอดภัยในการสัมผัสอาหาร แต่โฟมพลาสติกก็ยังมีข้อเสียอีกหลายประการ คือไม่เหมาะกับการบรรจุอาหารร้อนจัดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 85°C หรืออาหารน้ำมันล้วนๆ เป็นบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง (มยุรา, 2547)

โฟมหรือโฟมพลาสติก หมายถึง วัสดุที่มีโพรงเล็กๆ (Cellular Materials) มากมายกระจายในเนื้อพลาสติก โดยเกิดจากสารขยายตัว (Blowing Agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่ลดความหนาแน่นของเนื้อพลาสติก เช่น เพนเทน (Pentane) เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene Chloride) โฟมสามารถแบ่งตามรูปร่างเซลล์ได้ 2 ชนิด ดังนี้

1. เซลล์ปิด (Closed-Cell Foam) เกิดจากการขยายตัวของวัสดุเป็นโพรงอากาศพร้อมกันหลายๆ เซลล์และถูกอัดด้วยความดันทำให้ผนังเซลล์มาชนต่อกันเป็นโพรงอากาศระหว่างเซลล์โฟมที่มีเซลล์ปิดนี้มีระดับความแข็ง (Hardness) ที่หลากหลายขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเซลล์หรือโพรงอากาศภายในตัวโฟม จึงทำให้โฟมชนิดนี้แข็งแรงหรือแข็งเพราะว่าโพรงอากาศภายในแข็งแรงมากพอที่จะรับแรงหรือความดันสูงๆ ได้นิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง เช่น โฟมพอลิสไตรีน เป็นต้น

2. เซลล์เปิด (Open Cell) โฟมที่มีผนังเซลล์เปิดหรือผิวหน้าของโพรงอากาศถูกทำให้แตกออก อากาศเข้าไปแทนที่พื้นที่ผิวในตัววัสดุทำให้โฟมมีลักษณะนิ่ม มีความหนาแน่นต่ำ มีความยืดหยุ่นสูง อากาศสามารถออกได้เมื่อได้รับการกดและคืนรูปได้เร็วเมื่อไม่มีแรงกดทับ เช่น โฟมพอลิยูรีเทน (สมศักดิ์, 2547; พรพรรณ, 2528)



(a) (b)

ภาพประกอบที่ 2.3 ลักษณะรูปร่างเซลล์ของโฟมพลาสติก (a) เซลล์ปิดของโฟมพอลิสไตรีน (b) เซลล์เปิดของโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น (http://www.dss.go.th/)

โฟมสามารถจำแนกออกตามความแข็ง (Stiffness) หรือค่าความทนต่อแรงกดอัด (Compressive Strength at 10% Deformation) ทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53421 หรือ ISO 844 ออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. โฟมชนิดแข็ง (Rigid Foam) มีค่ามอดุลัสสูงกว่า 7,000 kg/cm^3 หรือ100, 000 psi หรือมีค่าความทนต่อแรงกดอัดมากกว่า 0.08 MPa เช่น โฟมทำผนังตู้เย็น โฟมฉีดหลังคา เป็นต้น

2. โฟมชนิดนิ่ม (Flexible Foam) มีค่ามอดุลัสสูงกว่า 10,000 psi หรือมีค่าความทนต่อแรงกดอัดมากกว่า 0.08 MPa เช่น ฟองน้ำ เบาะรถยนต์ เป็นต้น

3. โฟมชนิดยืดหยุ่น (Integral Skin Foam) มีค่ามอดุลัสอยู่ระหว่าง 10,000-100,000 psi หรือมีค่าความทนต่อแรงกดอัดอยู่ระหว่าง 0.015-0.08 MPa เช่น เบาะรองแขน และพวงมาลัยรถยนต์ เป็นต้น

2.3.2 กลไกการเกิดโฟม (วรรณภา, 2552)

การเกิดโฟมในขั้นตอนแรก คือ การก่อตัวของฟองก๊าซเล็กๆ จำนวนมากในเนื้อของพอลิเมอร์เหลว อาจเกิดได้เองจากการสลายตัวของสารเคมีซึ่งจะคายความร้อนออกมา ทำให้แรงตึงผิวของพอลิเมอร์เหลวลดต่ำลงหรือจากการกระตุ้นโดยของแข็งที่อนุภาคเล็กๆ การเกิดฟองเล็กๆ พบได้บริเวณผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับของแข็ง โดยการแพร่กระจายไปในเนื้อของเหลวอย่างรวดเร็ว หลังจากที่มีฟองเล็กๆ เกิดขึ้นจนใกล้จุดอิ่มตัว ฟองก๊าซจะเริ่มขยายตัว (Bubble Growth) ใหญ่ขึ้นโดยมีปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. การขยายตัวเนื่องจากความร้อน
2. การแพร่ของก๊าซจากพอลิเมอร์เหลวเข้าสู่ฟองก๊าซ

3. การขยายตัวเนื่องจากการลดลงของความดัน
4. แรงตึงผิว (Surface Tension) ของพอลิเมอร์ พบว่าลดต่ำลงจากการคายความร้อนของสารเคมี ถ้าแรงตึงผิวต่ำการขยายตัวของฟองก๊าซจะทำได้ดีขึ้น
5. การรวมตัวเข้าด้วยกันเอง เนื่องจากแรงดันที่ต่างกันของฟองก๊าซ ซึ่งฟองก๊าซขนาดเล็กจะมีแรงดันมากจึงสามารถขยายขนาดใหญ่ขึ้นได้เรื่อยๆ และสามารถรวมเข้ากับฟองก๊าซอื่นๆ ทำให้ได้ขนาดใหญ่กว่าเดิม

การเกิดฟองในช่วงแรกมีปริมาตรก๊าซน้อย ฟองก๊าซจะเป็นรูปทรงกลมเมื่อฟองก๊าซมีปริมาตรขยายมากขึ้น เนื่องจากเฟสของไหลรักษารูปทรงไว้ไม่ดี จึงทำให้ฟองก๊าซเปลี่ยนรูปทรง เป็นลักษณะที่มีผิวด้านเรียบมากกว่าหรือเท่ากันอย่างน้อยทั้งสี่ด้าน เรียกฟองก๊าซเมื่อเป็นรูปทรงดังกล่าวว่า เซลล์ (Cell)

ฟองก๊าซเมื่อเกิดการขยายตัวส่งผลให้ผนังเซลล์บางลง ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างเซลล์ที่ต่อกัน โดยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเซลล์ที่ต่อกัน พลังงานอิสระของระบบที่เพิ่มขึ้นอาจมีผลทำให้โฟมที่ได้ไม่เสถียรซึ่งจะเกิดการยุบตัว การเพิ่มความเสถียรให้ฟองก๊าซ (Bubble Stability) สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเชื่อมโยงโครงสร้างตาข่ายในพอลิเมอร์ (Cross Linking)

2.3.3 ประเภทของโฟม

โฟมสามารถจำแนกประเภทได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. โฟมเทอร์โมเซต (Thermoset Foam) เป็นโฟมพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ที่รู้จักกันดี ได้แก่ โฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane Foam: PU Foam) และโฟมยาง หรือฟองน้ำยาง เป็นต้น

2. โฟมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Foam) เป็นโฟมพลาสติกที่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ เช่น โฟมพอลิสไตลีน (Polystyrene Foam, PS Foam) โฟมพอลิเอททิลีน (Polyethtltne Foam, PE Foam) เป็นต้น

2.4 กระบวนการอัดขึ้นรูปพลาสติก (http://www.luckyinter.com/press-mac.html)

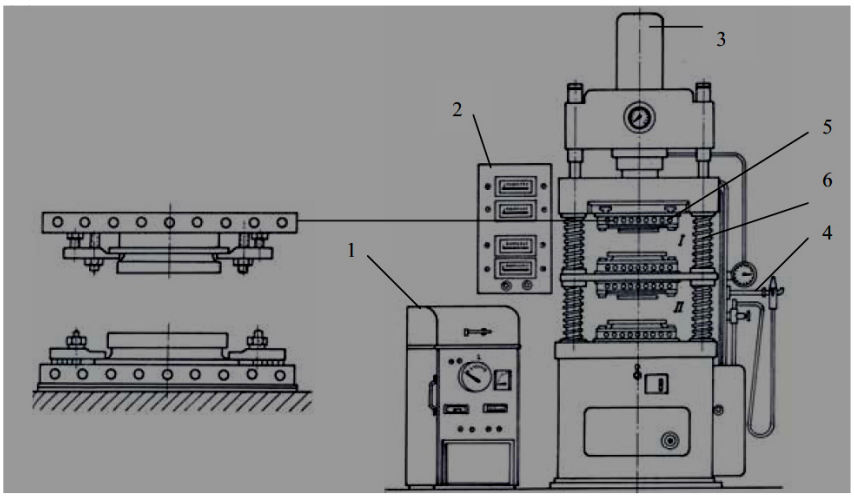
กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกมีหลายวิธีในอุตสาหกรรมพลาสติก กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีการแปรรูปพอลิเมอร์ที่เก่าแก่ที่สุดเทคนิคหนึ่ง แต่ยังมีการใช้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีหลักการสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกง่ายๆ

ในการศึกษาจึงเลือกใช้ คือ กระบวนการอัดขึ้นรูปในการขึ้นรูปโฟมย่อยสลายได้ ส่วนประกอบหลักของเครื่อง คือ

1. แผ่นเหล็กอัด (Plates) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้อีกแผ่นจะถูกยึดติดกับที่ทำให้สามารถทำการปิดและเปิดเบ้าได้เนื่องจากเบ้าถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้

2. ส่วนประกอบอื่นๆ คือ อุปกรณ์ให้ความร้อน ระบบควบคุมอุณหภูมิ ระบบควบคุมความดัน ระบบไฮดรอลิค และอาจจะมีอุปกรณ์หล่อเย็น

การขึ้นรูปโดยวิธีการอัดนี้เป็นเทคนิคที่อาศัยการไหลของพลาสติกร้อนภายในแม่แบบ (Mould) ในขณะทำการอัด แม่แบบจะถูกปิดลงอย่างช้าๆ พลาสติกจะเริ่มหลอมตัวและไหลตัวในขณะที่แม่แบบถูกปิดสนิทพลาสติกส่วนเกินจะไปไหลล้นออกนอกแม่แบบเวลาที่แม่แบบถูกปิดอยู่ เรียกว่า เวลาการบ่ม (Cured Time) ในช่วงเวลานี้พลาสติกจะเกิดการจัดเรียง ตัวของโมเลกุล ระยะเวลาในการอัดขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของพลาสติกที่ใช้ ขนาด ความหนาของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการอัด เป็นต้น นอกจากนี้ในการผลิตอาจได้ผลิตภัณฑ์ดีหรือไม่ดีซึ่งขึ้นกับแม่แบบ โดยเฉพาะพื้นผิวสัมผัสของแม่แบบกับผลิตภัณฑ์จะต้องเรียบและนำเอาผลิตภัณฑ์ออกได้ง่าย แม่แบบจะต้องมีความแข็งแรงทนทานต่อความดันสูงด้วยแม่แบบที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นโลหะ เครื่องอัดแบบอัตโนมัติแสดงดังภาพประกอบที่ 2.4



ภาพประกอบที่ 2.4 เครื่องอัดแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดชิ้นงานทรงแบนและการจับยึดแม่พิมพ์บนเครื่องอัด (http://www.luckyinter.com/press-mac.html)

เครื่องอัดแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดชิ้นงานทรงแบนในภาพประกอบที่ 2.4 ตำแหน่งของตัวเลขในภาพประกอบแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. เครื่องให้ความร้อนพลาสติกแบบไฮฟรีเควนซี
2. เครื่องมือวัดและควบคุมอุณหภูมิ
3. ปั๊มไฮดรอลิค
4. หัวเป่าลมอัดเพื่อทำความสะอาดแม่พิมพ์
5. ฮีทเตอร์
6. สปริง

2.5 แป้ง (Starch)

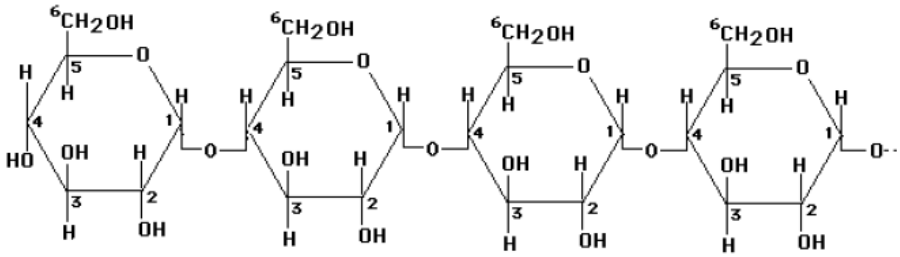
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว แป้งในกระบวนการผลิต หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนส่วนใหญ่ มีสิ่งอื่นเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มากจะเรียกว่า ฟลาวร์ (Flour) เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูงก็จะจัดอยู่ในประเภทฟลาวร์ สิ่งเจือปน โปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่นๆสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ เรียกว่า แป้งสตาร์ช (Starch) สำหรับแป้งมันสำปะหลังปัจจุบันผลิตโดยกรรมวิธีทันสมัย มีความบริสุทธิ์สูง แป้งสตาร์ชที่ยังไม่ถูกทำการดัดแปรหรือแปรรูป เรียกว่า แป้งดิบ (Native Starch) ส่วนแป้งที่ถูกดัดแปรหรือแปรรูปแล้ว เรียกว่า โมดิไฟด์สตาร์ช (Modified Starch) หรือแป้งดัดแปร

2.5.1 องค์ประกอบภายในเม็ดแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 สูตรเคมีโดยทั่วไป $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic Linkage) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นและอะไมโลเพคติน (Amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง วางตัวในแนวรัศมีแสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้ง แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้งมีดังนี้

2.5.1.1 อะไมโลส

อะไมโลส (Amylose) เป็นพอลิมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic Linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 (α-1, 4) ดังภาพประกอบที่ 2.5



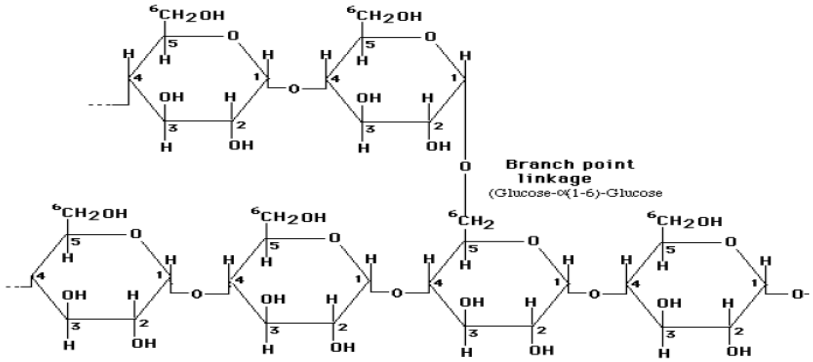
ภาพประกอบที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส (Chaplin *et al*, 2001)

แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่งและแป้งสาคูมีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 20% แป้งข้าวเหนียว (waxy starch) ไม่มีอะไมโลสเลย แป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization, DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline)

2.5.1.2 อะไมโลเพคติน

อะไมโลเพคติน (Amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α-1, 4 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลสและมีอัตราการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินถือว่ามีความสำคัญมากกว่าอะไมโลสทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่และการนำไปใช้ ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้ปริมาณของอะไมโลสและ

อะไมโลเพคตินที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกัน โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพคตินแสดงดังภาพประกอบที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพคติน (Chaplin *et al*, 2001)

ตารางที่ 2.1 สมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α-1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α-1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ α-1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

2.5.1.3 สารตัวกลาง

สารตัวกลาง (Intermediate Material) มีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพคติน แต่ใหญ่กว่าอะไมโลส

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่างๆ (Swinkels *et al*, 1985b)

ชนิดแป้ง	ความชื้น	% ไขมัน	% โปรตีน	% เถ้า	% ฟอสฟอรัส
แป้งข้าวโพด	13	0.6	0.35	0.1	0.015
แป้งมันฝรั่ง	19	0.05	0.06	0.4	0.08
แป้งสาลี	14	0.8	0.4	0.15	0.06
แป้งมันสำปะหลัง	13	0.1	0.1	0.2	0.01
แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว	13	0.2	0.25	0.07	0.007
แป้งข้าวฟ่าง	13	0.7	0.3	0.08	-
แป้งข้าวเจ้า	-	0.8	0.45	0.5	0.01
แป้งสาคู	-	0.1	0.1	0.2	0.02
แป้ง Amylomaize	13	0.4	-	0.2	0.07
แป้งมันเทศ	13	-	-	0.1	-

2.5.2 คุณสมบัติของแป้ง

แป้งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป ได้แก่ การดูดซับน้ำ การพองตัว การละลาย ความหนืด การเกิดเจลลาไนเซชัน และการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยแสดงดังนี้

2.5.2.1 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงไปในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17% แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ (Gelatinize) เนื่องจากมีพันธะไฮไดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำใน

สารละลายแป้งและการดัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งมีหลายประเภทดังนี้

1. ชนิดของแป้ง แป้งแต่ละชนิดมีรูปแบบในการพองตัวและการละลายที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาตามความสามารถในการพองตัวและการละลายของแป้งแล้ว สามารถแบ่งแป้งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ แป้งจากธัญพืช แป้งจากส่วนหัว และแป้งจากส่วนรากหรือส่วนกลางลำต้น (Pith) ซึ่งแป้งที่ใช้ในการศึกษาเป็นแป้งจากส่วนรากหรือส่วนกลางลำต้น เช่น แป้งมันสำปะหลังมีการพองตัวเพียงขั้นเดียว กำลังการพองตัวและการละลายมีค่าสูงกว่าแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีจำนวนพันธะน้อยกว่า แป้งจากส่วนรากจะเกิดเจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช

2. ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง คือ จำนวนและชนิดของพันธะภายในเม็ดแป้ง ในระดับโมเลกุลมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อจำนวนของพันธะ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบและการกระจายตัวของร่างแหภายในเม็ดแป้ง อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโมเลกุล จำนวนกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัว และความยาวของสาขาในอะไมโลเพคติน

3. สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต สิ่งเจือปนเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง นอกจากนั้นการใส่สารลดแรงตึงผิวในแป้งจะมีผลต่อกำลังการพองตัวของเม็ดแป้ง

4. คุณสมบัติหลังการดัดแปรทางเคมี คุณสมบัติการพองตัวและการละลายของแป้งจะเปลี่ยนไปเมื่อมีการดัดแปรทางเคมี การดัดแปรด้วยกรดหรือ การเกิดออกซิเดชันด้วยเกลือไฮโปคลอไรด์ (Hypochlorite) จะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะภายในร่างแห ทำให้เม็ดแป้งกระจายออกเป็นชิ้นเล็กๆ การละลายและการพองตัวสูงขึ้น การทำครอสลิง (Cross Linking) จะทำให้ความแข็งแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งเพิ่มขึ้น ความสามารถในการพองตัวและการละลายจึงลดลง

5. ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว สารละลายที่มีปริมาณแป้งต่ำกว่า 20% ค่าการละลายจะสูงกว่า เมื่อมีแป้งสูงกว่า 20% การพองตัวอย่างอิสระและการละลายที่สูงขึ้นจะถูกยับยั้งในสภาพที่สารละลายมีปริมาณน้ำน้อย สารประกอบอื่นๆ เช่น ซูโครส กลูโคส และ

สารอิเล็กโทรไลต์ มีผลกระทบต่อการพองตัวของแป้ง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซูโครสและลดปริมาณแป้งลงทำให้แป้งสามารถละลายได้เพิ่มขึ้น

2.5.2.2 ความหนืด

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้งและการดัดแปรทางกายภาพ เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์หรืออัลฟาสตาร์ช ดัดแปรโดยให้ความร้อนแก่แป้งทำให้แป้งสุกหรือเกิดเจลาติไนซ์แล้วทำให้แห้งโดยเครื่องทำแห้ง แป้งที่ได้กระจายตัวในน้ำเย็นให้ความหนืดทันทีและไม่เกิดเจล

2.5.2.3 การเกิดเจลาติไนเซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Groups) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์เมื่อตรวจโดยเครื่องมือวัดความหนืดมักเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting Temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting Time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด แป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง จะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิจากแป้งธัญพืช

การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งออกได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ (Micelles) ยืดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (Birefringence) เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่าง

รวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึงระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำเม็ดแป้งไปทำให้เย็นจะเกิดเป็นเจล การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลต่างๆ ของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น ความหนืดสูงสุดของสารละลายน้ำแป้งในระหว่างเจลาติไนซ์จะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของแป้ง แป้งชนิดต่างๆมีการเกิดเจลที่ต่างกันไปแสดงค่าดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งชนิดต่างๆ (Leach *et al*, 1965)

Type of starch	Gelatinization at 95°C		
	Temperature range (°C)	Swelling power[1]	Solubility (%)
Potato	56-66	1,000	82
Tapioca	58.5-70	71	48
Corn	62-72	24	25
Sorghum	68.5-75	22	22
Wheat	52-63	21	41
Rice	61-77.5	19	18
Waxy maize	63-72	64	23
Waxy sorghum	67.5-74	49	19

[1]Swelling power มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเม็ดแป้งที่พองตัวที่ตกตะกอนออกมาต่อกรัมของแป้ง

2.5.2.4 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยตัวให้เย็น โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัว (Setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่น และมีความหนืดเพิ่มขึ้น การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่

ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง

2.6 สารเคมีสำคัญในอุตสาหกรรมพลาสติก

การผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยทั่วไปจะต้องใช้วัสดุและสารเคมีอย่างอื่นมาผสมเพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น ของผสมที่ได้จากการเจือวัสดุและสารเคมีลงไปในอุตสาหกรรมพลาสติกเรียกว่า คอมพาวด์ (Compound) ส่วนประกอบที่สำคัญของคอมพาวด์อาจแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ที่สำคัญดังนี้

2.6.1 พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติกไซเซอร์ คือ สารเติมแต่งที่เติมลงไป เพื่อทำให้พลาสติกนิ่มเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในทางอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอ (Flexibility) ความสามารถในการยืดออก (stretchability) โดยการทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ของพลาสติกลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง เพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic Flow) และลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ทำให้กระบวนการขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น สามารถแบ่งสารพลาสติกไซเซอร์เป็น 2 ประเภท คือ

1. พลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ (Primary Plasticizers) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีคุณภาพสูง ใช้ได้โดยตรงแต่มักมีราคาแพง

2. พลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary Plasticizers) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีคุณภาพค่อนข้างต่ำกว่าประเภทแรกนำไปใช้โดยตรงไม่ได้จะต้องใช้ควบคู่กับพลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ แต่พลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิจะเพิ่มคุณสมบัติเฉพาะอย่างได้ดีกว่า

กลไกการทำงานของพลาสติกไซเซอร์ แสดงได้ดังต่อไปนี้

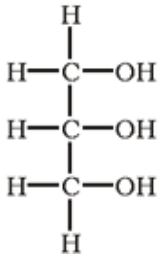
1. Lubricity Theory เป็นกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซอร์ทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่น (Lubricant) โดยไปลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่เลื่อนไถลผ่านไปมาซึ่งกันและกัน

2. Gel Theory เป็นกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซอร์ที่จะทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยการแยกส่วนที่มีขั้วของพอลิเมอร์ให้อยู่ห่างกัน

3. Free-Volume Theory เป็นกลไกการทำงานของพลาสติกไซเซอร์โดยจะเพิ่มพื้นที่ว่างหรือปริมาตรอิสระระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

2.6.2 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอลเป็นสารประกอบอินทรีย์พวกแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่มีคาร์บอน (C) 3 อะตอม และมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ทั้ง 3 หมู่ มีสูตรทางเคมี คือ $C_3H_8O_3$ มีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ สูตรโครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอลแสดงดังภาพประกอบที่ 2.7 กลีเซอรอลเป็นของเหลวข้น ไม่มีสี จุดเดือด 290°C สมบัติละลายน้ำได้ โดยกลีเซอรอลดิบเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยชั้นของสารอินทรีย์ในกลีเซอรอลดิบถูกนำไปผลิตไบโอดีเซลเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิต และชั้นของกลีเซอรอลถูกนำไปหมักด้วยกระบวนการทางชีวภาพในอนาคต



ภาพประกอบที่ 2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล

(http://isite.lps.org/sputnam/Biology/U2Biochemistry/lipid_lab.htm)

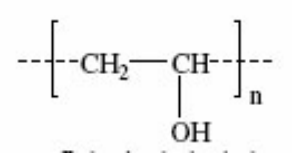
2.6.3 สารเติมแต่ง (Additives)

สารเติมแต่งเป็นสารที่เติมลงไปในพอลิเมอร์ด้วยวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้นและคงทนต่อการใช้งานได้มากขึ้น ช่วยให้กระบวนการผลิตหรือการขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการใช้สารเติมแต่งชนิดอื่น สมบัติของสารเติมแต่งพอลิเมอร์ที่สำคัญได้แก่ การทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการเป็นสารเติมแต่ง เสถียรภายใต้สภาวะการขึ้นรูป เสถียรภายใต้สภาวะการใช้งาน ไม่เป็นพิษและไม่ทำให้เกิดกลิ่นหรือรส ไม่เกิดการคายสี (Bleeding) หรือการเกิดเป็นฝ้า (Blooming) มีราคาถูก และไม่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เสียไป

2.6.4 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นพลาสติกสังเคราะห์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถละลายน้ำได้ดีและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความหนาแน่น 1.298 g/cm^3 มีสมบัติคล้ายแป้ง คือ เกิดสีน้ำเงินกับไอโอดีน น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 25,000-250,000 เมื่อมาผสมกับสตาร์ชซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงมีความสามารถในการเข้ากันได้สูง (วรรณภา,

2551) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีลักษณะเป็นผงสีขาวที่ได้จากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลแอซีเทต (Polyvinyl Acetate) ลักษณะโครงสร้างโดยส่วนใหญ่เป็นสายโซ่แบบเส้นตรงที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติที่พร้อมละลายน้ำได้ โดยเฉพาะจากกระบวนพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสารละลายเป็นวิธีการผลิตที่สะดวกและนิยมใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย ซึ่งสามารถแยกตะกอนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ออกมาได้โดยตรง แสดงดังภาพประกอบที่ 2.8 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ และการเคลือบต่างๆ (Modi *et al*, 1980; ปรีชา, 2530; ขวัญชนก, 2550)



ภาพประกอบที่ 2.8 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีลักษณะโมเลกุลแบบอะแทกติก ไม่มีความเป็นผลึกจึงมีลักษณะอ่อนนิ่มมากจนเป็นของเหลวข้นหนืดสีขุ่นขาว เมื่อแห้งจะใสเนื่องจากความอ่อนนิ่มจนมีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด จึงไม่สามารถหล่อขึ้นรูปด้วยวิธีแม่พิมพ์ใดๆได้ สมบัติโดยทั่วไปคือ อ่อนนิ่ม ง่ายต่อการทำเป็นอีมัลชัน อุณหภูมิของการหล่อแม่พิมพ์ต่ำ จึงไม่เหมาะที่จะหล่อขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีรส เมื่อแห้งจะมีความโปร่งใสมากขึ้น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

2.7 เส้นใย (Fiber) (http://www.2.mtec.or.th/**,** 2550)

เส้นใย หมายถึง วัสดุหรือสารใดๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect Ratio) เท่ากับหรือมากกว่า 100

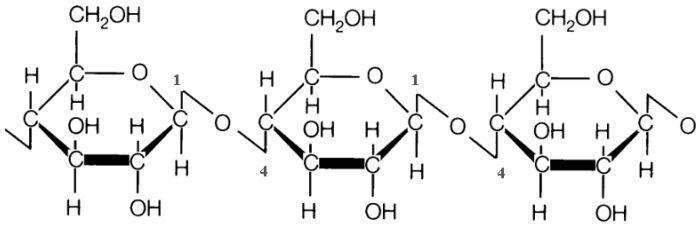
2.7.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber)

เส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรียวัตถุที่สำคัญหาได้ง่ายจากธรรมชาติได้จากพืช สัตว์ หรือธาตุ มีปริมาณมาก สามารถเกิดขึ้นได้ใหม่เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ การนำเส้นใยธรรมชาติจากพืชมาใช้ประโยชน์ในการทำคอมโพสิท (Composite) มีประโยชน์อย่างมากต่อ

การเสริมประสิทธิภาพและความแข็งแรงของพอลิเมอร์ เช่น เส้นใยปอ เส้นใยสับปะรด เส้นใยมะพร้าว เส้นใยป่านศรนารายณ์ เส้นใยปาล์ม เป็นต้น ยังเป็นการลดต้นทุนและเสริมแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์ โครงสร้างและองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญของเส้นใย คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบอื่นๆ ดังนี้

2.7.1.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยประเภทเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยขั้นพื้นฐานซึ่งเรียกว่า Anhydro-d-Glucose $(C_6H_{10}O_5)_n$ ยึดเกาะกันด้วย 1, 4-B-D-Anhydroglucosidic Bonding ต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาว แต่ละหน่วยของกลูโคสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน (เป็น Primary Group 1 หมู่และSecondary Group 2 หมู่) ซึ่งเหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไป แต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกันยาวเป็นลูกโซ่ทำให้ไม่สามารถละลายน้ำเหมือนกับที่เกิดกับน้ำตาล โครงสร้างทางเคมีนี้นับว่ามีบทบาทอย่างยิ่งต่อการกำหนดสมบัติของเส้นใย กล่าวคือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จะเป็นตัวดึงดูดน้ำทำให้มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี อีกทั้งเป็นจุดที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยากับกรดแอซีติกได้เป็นเซลลูโลสแอซีเทตหรือเส้นใยประดิษฐ์ชนิดแอซีเทตนั่นเอง ลักษณะการเรียงตัวเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาว ทำให้มีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย



ภาพประกอบที่ 2.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

(http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/cellulose)

สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

1. การละลาย เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid) เป็นต้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรด ที่อุณหภูมิห้องและจะหยุดปฏิกิริยาที่

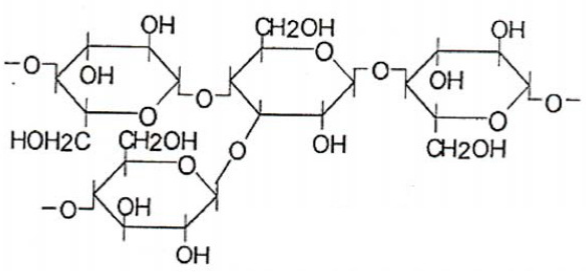
อุณหภูมิต่ำซึ่งเซลลูโลสจะสามารถบวมตัวได้ในสารละลายของเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น สารละลายแอลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali Hydroxide)

2. ความหนืด เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส โดยถ้าความเข้มข้นของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมีผลทำให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้น

3. การดูดซับความชื้น เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับความชื้นโดยปริมาณความชื้นที่เซลลูโลสดูดซับมีผลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการของเส้นใย เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้นเส้นใยจะมีค่าทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

2.7.1.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ซึ่งคล้ายกับเซลลูโลสมีสูตรทางเคมี คือ $(C_6H_{10}O_5)_{2n}$ แสดงดังภาพประกอบที่ 2.10 เฮมิเซลลูโลสพบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารประกอบอื่นๆ เช่น ลิกนินและเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสจะมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยและถูกไฮโดรไลซิสได้ง่ายในกรดเจือจาง



ภาพประกอบที่ 2.10 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

(www.agri.cmu.ac.th/hort/course/359331)

2.7.1.3 ลิกนิน (http://www.tistr.or.th)

ลิกนิน (Lignin) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของพืชในไม้เนื้อแข็ง จะมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 17–25 ในไม้เนื้ออ่อนจะมีสัดส่วนประมาณ ร้อยละ 24–32 ในเส้นใยเปลือกลำต้น (Bast Fibres) เช่น ป่านลินิน ป่านมนิลาและปอมีอยู่เล็กน้อยและแทบจะไม่มีเลยในเส้นใยฝ้าย ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ไม่มีรูปผลึกจะเกาะกันอยู่ในชั้นระหว่างเส้นใย (middle lamella) ซึ่งทำหน้าที่ ยึดเกาะเส้นใยเข้าด้วยกัน และมีบางส่วนผสมอยู่ในเส้นใยด้วย ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด ซึ่งเป็น

สารอะโรมาติก ลิกนินไม่ละลายน้ำไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น ลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางดังนี้ ใช้เป็นสารยึดติด (Adhesives) ด้านเคมีภัณฑ์เกษตร (Agricultural Chemicals) เคมีภัณฑ์สำหรับผลิตน้ำให้บริสุทธิ์ และเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ใช้ผสมในซีเมนต์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติ ใช้ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน ใช้ในอุตสาหกรรมยางเป็นสารเติมแต่ง สารเร่งปฏิกิริยา สารช่วยให้มีการยืด (Elastomer) และสารช่วยให้ความเป็นพลาสติกดีขึ้น (Plasticizer) เป็นต้น

2.7.2 สมบัติของเส้นใย

2.7.2.1 โครงสร้างทางกายภาพ

โครงสร้างทางกายภาพหรือโครงสร้างทางสัณฐาน (Morphology) ของเส้นใยสามารถสังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ที่มีกำลังขยาย 250-1000 เท่า โครงสร้างทางกายภาพนั้นครอบคลุมถึง ความยาว ขนาดหรือเส้นผ่าศูนย์กลาง รูปร่างภาคตัดขวาง (Cross-Sectional Shape) รูปร่างของผิวเส้นใย และความหยักของเส้นใย

2.7.3.2 องค์ประกอบทางเคมีและการเรียงตัวของโมเลกุล

เส้นใยประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมาก โมเลกุลเหล่านี้มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียกว่าพอลิเมอร์ (Polymer) ที่เกิดจากการเรียงตัวของหน่วยโมเลกุลเล็ก ๆ คือมอนอเมอร์ (Monomer) และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีด้วยกระบวนการสังเคราะห์ที่เรียกว่า พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ขนาดของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความยาวของโมเลกุลซึ่งบอกได้จากจำนวนของมอนอเมอร์ที่อยู่ในพอลิเมอร์นั้น (Degree of Polymerization) พอลิเมอร์ที่มีเส้นโมเลกุลยาวจะมีน้ำหนักโมเลกุล มากกว่าพอลิเมอร์ที่มีเส้นโมเลกุลสั้นเนื่องจากจำนวนมอนอเมอร์ที่มากกว่านั่นเอง ซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยที่พอลิเมอร์นั้นเป็นองค์ประกอบอยู่

โมเลกุลหรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในเส้นใยจะมีการเรียงตัวแตกต่างกัน เมื่อแต่ละโมเลกุลมีการเรียงตัวอย่างไร้ทิศทาง (Random) ก็จะทำให้เส้นใยบริเวณนั้นมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ส่วนในบริเวณที่โมเลกุลมีการเรียงซ้อนขนานอย่างเป็นระเบียบก็จะมีความเป็นผลึก (Crystalline) เกิดขึ้น เส้นใยที่มีความเป็นผลึกมากก็จะมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่มีความเป็นผลึกน้อย การจัดเรียงตัวโมเลกุลที่อยู่ในทิศทางที่ขนานกับแกนตามความยาวของเส้นใย ก็จะช่วยให้เส้นใยมีความแข็งแรงมาก เนื่องจากโมเลกุลเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำต่อเส้นใย

2.7.3 เส้นใยเปลือกผลปาล์ม (Mesocarp Fiber)

เส้นใยเปลือกผลปาล์มเป็นส่วนของเปลือกนอกของผลปาล์มที่หีบน้ำมันออกแล้ว แสดงดังภาพประกอบที่ 2.11 โดยปกติในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจะใช้เส้นใยเปลือกผลปาล์มเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อผลิตไอน้ำ (Boiler) เพื่อนำไอน้ำไปนึ่งทะลายและผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้

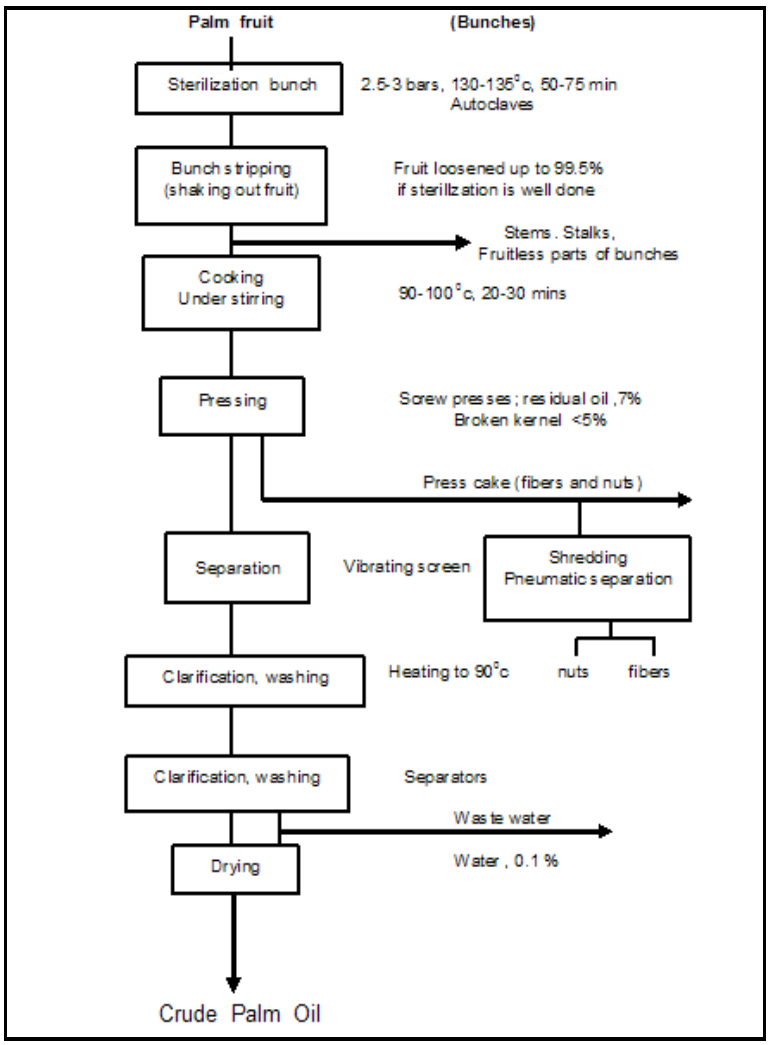
ในโรงงาน เส้นใยเปลือกผลปาล์มมีปริมาณธาตุอาหารใกล้เคียงกับทะลายเปล่าแต่มีปริมาณโพแทสเซียมน้อยกว่า (โพแทสเซียมประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์) จึงสามารถนำไปเป็นวัสดุการผลิตปุ๋ยหมักได้เช่นกัน (ธีระพงศ์, 2551) คุณสมบัติทั่วไปของเส้นใยปาล์มน้ำมันแสดงดังตารางที่ 2.4

ภาพประกอบที่ 2.11 เส้นใยที่ได้จากเปลือกนอกของผลปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยปาล์มน้ำมัน (Jacob *et al*., 2004)

Physical properties of oil palm fiber	
Diameter mm	150–500
Density g/cc	0.7–1.55
Tensile strength (MPa)	248
Elongation at break%	14
Microfibrillar angle (°)	46

หลังการเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มน้ำมันจะมีการขนส่งผลผลิตเข้าสู่โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีกระบวนการสกัดน้ำมัน 2 แบบ คือ แบบมาตรฐาน (หีบน้ำมันแยก) และแบบหีบน้ำมันผสม โดยโรงงานแบบมาตรฐานเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตสูงประมาณ 30 - 80 ตัน/ชั่วโมงและน้ำมันที่ได้จัดเป็นน้ำมันเกรดเอ เนื่องจากมีการแยกชนิดของน้ำมันปาล์ม กระบวนการผลิตแสดงดังภาพประกอบที่ 2.12 สำหรับโรงงานแบบหีบน้ำมันผสมเป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตค่อนข้างต่ำและน้ำมันที่สกัดได้เป็นน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันปาล์มจากเปลือกและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม



ภาพประกอบที่ 2.12 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

โรงงานสกัดน้ำมันแบบมาตรฐานกระบวนการผลิตจะมี 4 ขั้นตอน คือ

1. การอบทะลายด้วยไอน้ำ (Sterilization) อบที่อุณหภูมิ 130 - 135°C ความดัน 2.5 - 3 bar นาน 50 - 75 min การอบทะลายจะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซีสที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์มและช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดจากขั้วผลได้ง่าย

2. การแยกผล (Stripping) เป็นการส่งทะลายเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลาย สำหรับทะลายเปล่าจะถูกแยกออกไปจากนั้นนำผลปาล์มไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์มเพื่อให้ส่วนเปลือกแยกออกจากเมล็ด

3. การสกัดน้ำมัน (Oil Extraction) นำส่วนเปลือกอบที่อุณหภูมิ 90 - 100°C นาน 20 - 30 min จากนั้นผ่านเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบที่มีองค์ประกอบคือ น้ำมัน 66% น้ำ 24 % และของแข็ง 10 %

4. การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (Clarification) น้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัด ส่งเข้าถังกรองเพื่อแยกน้ำและของแข็งออก จากนั้นนำเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดอีกครั้งและไล่น้ำออกเพื่อทำให้แห้ง ส่งเข้าถังเก็บน้ำมันสำหรับรอการกลั่น

2.8 Response Surface Methodology (RSM)

เทคนิค RSM เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักทางสถิติ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.8.1 ความหมายและคำจำกัดความของ RSM

RSM คือ การรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและหาจุดที่เหมาะสมในกระบวนการ ซึ่ง RSM ประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยจะใช้เพื่อการเสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดย RSM ประกอบขึ้นมาจากผลของตัวแปรอิสระซึ่งอาจมีตัวเดียวหรือหลายตัว การวิเคราะห์ของตัวแปรอิสระที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของผลตอบสนองในรูปแบบของพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่ได้กับข้อมูลดิบแสดงดังสมการที่ 2.1

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n) + \varepsilon \qquad (2.1)$$

เมื่อ y คือ ผลตอบสนอง (response) ที่เกิดขึ้น

f คือ ฟังก์ชันการทำงานที่ตัวแปรที่ยังไม่ทราบต่อผลตอบสนอง

$x_1, x_2, \ldots, x_n$ คือ ตัวแปรอิสระซึ่งจะถูกเรียกว่า ตัวแปรธรรมชาติ

n คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดมาจากแหล่งต่างๆ ซึ่งไม่สามารถถูกรวบรวมเอาไว้ใน f ได้ ซึ่งแหล่งที่ว่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาดโดยที่จะถูกคาดคะเนด้วยค่า ε ซึ่งมีการกระจายตัวด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าความแปรปรวน

2.8.2 การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM

การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM มีขั้นตอน ดังนี้

1. การกำหนดตัวแปรที่ทำการศึกษา ประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ในกระบวนการทางเคมีและทางชีวเคมี ได้รับผลกระทบจากกระบวนการต่างๆ มากมาย เพราะเป็นไปไม่ได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความจำเป็นในการเลือกตัวแปรบางตัวที่สร้างผลกระทบได้โดยตรงออกมา การคัดเลือกการทดลองนั้นมีความสำคัญในการระบุตัวแปรอิสระ หลังจากทำการระบุตัวแปรสำคัญต่างๆ แล้วสามารถระบุทิศทางในการพัฒนารูปแบบ ซึ่งสามารถระบุระดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ได้ การระบุตัวแปรนั้นมีความสำคัญ เนื่องจากการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการนั้นเกี่ยวข้องกันโดยตรง

2. กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบสภาวะที่ใช้ในการทดลองโดย Central Composite Design (CCD) และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded Variables) โดยใช้สมการที่ 2.2 ซึ่งการดำเนินจะต้องกำหนดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระที่สนใจ

$$x = \left[\frac{z - \frac{z_{max} + z_{min}}{2}}{\frac{z_{max} + z_{min}}{2}} \right] \qquad (2.2)$$

เมื่อ x = coded variables

z = ตัวแปรอิสระ

z_{max} = ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ

z_{min} = ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3. ทำการทดลองตามสภาวะการออกแบบ รวมทั้งแปลงรหัส (Decode) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของแต่ละการทดลอง

4. แสดงผลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในรูปผลตอบสนอง จากนั้นทำการหาแบบจำลองในรูปของกราฟพื้นผิว (Surface Plot) โดยโปรแกรม Regression Analysis แบบจำลองที่ได้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นโค้ง (Quadratic Equation) ดังสมการที่ 2.3

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \left[\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^{k} \beta_{ij} x_i x_j \right]_{i<j} \qquad (2.3)$$

เมื่อ β_0, β_i, β_{ii} และ β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน

2.8.3 ประโยชน์ของ RSM

ประโยชน์ของเทคนิค RSM มีมากมายเมื่อทำการเปรียบเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิม สิ่งสำคัญ คือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดย RSM ที่มีจำนวนน้อยกว่า เนื่องจาก RSM จะนำเสนอข้อมูลจำนวนมากจากการทดลองไม่กี่ครั้ง ซึ่งแตกต่างกับการทดลองในแบบเดิมที่ต้องใช้การทดลองในจำนวนที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ สมการแบบจำลองอย่างง่ายของ RSM จะช่วยเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ เมื่อสังเกตผ่านการทดลองต่างๆ พบว่าข้อมูลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้กับผลตอบสนองนั้นมีความสอดคล้องกัน ดังนั้น RSM เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับการหาจุดเหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การเตรียมโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

รัตนา (2004) ศึกษาการเตรียมโฟมแป้งโดยวิธีการอบจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิแลคติกแอซิด และพอลิคาโปรแลคโตน ทำการศึกษาโดยใช้กล้องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope) พบว่าขอบบนและขอบล่างของโฟมมีความหนาแน่นสูงเซลล์ของโฟมมีขนาดเล็กและส่วนกลางมีความหนาแน่นต่ำเซลล์ของโฟมมีขนาดใหญ่เป็นเซลล์เปิด (Open Cell) การวัดความหนาแน่นของโฟม พบว่าโฟมแป้งมันสำปะหลังมีความหนาแน่น 0.138 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โฟมที่มีส่วนผสมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 30% พอลิแลคติกแอซิด 30% และพอลิคาโปรแลคโตน 30% ค่าความหนาแน่นเป็น 0.225, 0.2170 และ 0.2042 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าโฟมจากแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนั้นศึกษาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์กับระยะเวลาในการเก็บโฟมพบว่าค่าการทนต่อแรงดึงและค่าการทนต่อแรงดัดโค้งงอจะให้ค่าสูงสุดที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 42% และระยะเวลาในการเก็บชิ้นงาน 2 วัน การเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์สามารถช่วยปรับปรุงค่าทนต่อแรงดึง ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งงอ และค่าการยืดตัวของโฟมได้ จากการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำพบว่า การเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์สามารถช่วยลดค่าการดูดซับน้ำของโฟมได้

Preechawong และคณะ (2004) ทำการศึกษาลักษณะของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิคาโปรแลคโตน (PCL) ทำการขึ้นรูปในแม่แบบร้อนที่อุณหภูมิ 220°C เป็นเวลานาน

2 min เพื่อศึกษาอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ระยะเวลาในการจัดเก็บ ปริมาณของ PCL และชนิดของพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล ยูเรีย และ แอมโมเนียมคลอไรด์) ที่เติมลงไป ต่อค่าการดูดซึมน้ำ ความชื้น คุณสมบัติเชิงกล และการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อกำหนดให้ระยะเวลาในการเก็บโฟมแป้งเป็นระยะเวลา 7 วัน ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ 42% และภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 42% การเก็บที่ระยะเวลา 2 วัน การเติม PCL เป็นการปรับปรุงค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ค่าความต้านทานการดูดซึมน้ำของโฟมแป้ง สำหรับการย่อยสลายด้วยเอนไซม์พบว่าสามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (α-amylase) การเติม PCL ช่วยปรับปรุงการย่อยสลายของโฟมแป้ง

Shey และคณะ (2006) ทำการศึกษาโฟมแป้งผสมน้ำยางธรรมชาติ แป้งที่ใช้ประกอบด้วย แป้งข้าวสาลี (Wheat Starch) แป้งมันฝรั่ง (Potato Starch) และแป้งข้าวโพดชนิดข้าวเหนียว (Waxy Corn Starch) ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอบที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 1 min พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ช่วยปรับปรุงความยืดหยุ่นของโฟม และให้ค่าความต้านทานความชื้นที่ดี สำหรับการเติมสารรักษาสภาพของน้ำยางจะช่วยให้โฟมที่ได้มีผิวเรียบมากขึ้น น้ำยางธรรมชาติช่วยลดความชื้นโดยโฟมดูดความชื้นได้น้อยลง

2.9.2 การเตรียมโฟมจากแป้งโดยใช้วัสดุชนิดต่างๆในการเสริมแรง

Glenn และคณะ (2001) ศึกษาโฟมแป้งผสมเส้นใยและผงแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เพื่อช่วยในการปรับปรุงความแข็งแรงของโฟมด้วยกระบวนการอบขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 3 min โดยใช้แป้งชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง จากผลการศึกษาพบว่าโฟมที่ได้มีสมบัติอยู่ในช่วงเดียวกับโฟมพอลิสไตรีนและเปเปอร์บอร์ด (Paperboard) โดยมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดคราก (Elongation to Break) ต่ำกว่าโฟมพอลิสไตรีนและเปเปอร์บอร์ด แต่ค่าความยืดหยุ่นและการย่อยสลายทางชีวภาพมีค่าสูงกว่า ส่วน $CaCO_3$ ช่วยเพิ่มความหนาแน่นของโฟมแต่ไม่ได้ช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของโฟมแป้ง

Shogren และคณะ (2002) ทำการศึกษาโฟมแป้งดัดแปร คือ แป้งมันฝรั่ง (Potato Amylopectin) แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว (Waxy Corn Starch) และแป้งข้าวโพด (Corn Starch) รวมทั้งการเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ทำการอบขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 200-250°C เป็นเวลา 80-140 sec โฟมแป้งดัดแปรจะใช้เวลาในการอบสั้นกว่า น้ำหนักเบากว่า และค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูงกว่าโฟมแป้งไม่ดัดแปร ที่ค่าความชื้นต่ำโฟมแป้งดัดแปรกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) จะให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูงกว่าโฟมแป้งไม่ดัดแปรกับ PVA การเติมเส้นใยทำให้โฟมแป้งมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทั้งที่ค่าความชื้นสูงและต่ำ การเติมโมโนสเตียริลซิเตรท (Monostearyl Citrate) ช่วยปรับปรุงความ

ต้านทานน้ำที่ดี สำหรับโฟมแป้งที่ได้จากแป้งมันฝรั่ง PVA เส้นใย และโมโนสเตียริลซิเตรท จะให้ค่าความยืดหยุ่นและค่าความต้านทานน้ำที่เหมาะสม

Soykeabkaew และคณะ (2004) ทำการเตรียมและศึกษาลักษณะของโฟมแป้งสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปอกระเจาและเส้นใยป่าน ทำการขึ้นรูปโฟมแป้งด้วยแม่แบบร้อนที่อุณหภูมิ 220°C เป็นเวลา 150 sec พบว่าเมื่อทำการเติมเส้นใยร้อยละ 5-10 ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดัดโค้ง ค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของโฟมแป้งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเส้นใยปอกระเจาจะมีค่าความต้านทานแรงดัดโค้งที่สูงกว่าเส้นใยป่าน ค่าความชื้นที่มีค่าอยู่ระหว่าง 8-10% จะทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดัดโค้ง และค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งสูงสุด

Chiellini และคณะ (2006) ทำการศึกษาโฟมที่ใช้แทนโฟมพอลิสไตรีน โดยมีวัตถุดิบหลัก คือ แป้งมันฝรั่ง PVA และเส้นใยข้าวโพด ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอบขึ้นรูปร้อนในแม่แบบที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 120-180 sec ศึกษาผลของการเติมเส้นใยข้าวโพดที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและความชื้นของโฟม พบว่าเมื่อเติมเส้นใยข้าวโพดลงไปต้องใช้เวลาในการอบนานขึ้นและส่วนผสมที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ผลต่อสมบัติเชิงกลมีค่าลดลงเมื่อเส้นใยเพิ่มขึ้น การเติม PVA ทำให้ความต้านทานน้ำ ความยืดหยุ่น และความแข็งแรงของโฟมเพิ่มขึ้น โฟมที่มีการเติม PVA และเส้นใยข้าวโพดมีค่าความต้านทานน้ำที่ดีกว่าโฟมแป้งอย่างเดียวที่ไม่มีการเติม แต่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเท่ากับโฟมแป้งอย่างเดียว

บำรุงและคณะ (2007) ศึกษาการเตรียมโฟมแป้งจากแป้งมันสำปะหลัง ฟิลเลอร์น้ำยางธรรมชาติ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ และกลีเซอรอล ทำการขึ้นรูปโดยการอัดร้อนด้วยแม่พิมพ์ ฟิลเลอร์ที่เติมแบ่งออกเป็น เส้นใยไม้ (ผงขี้เลื่อยไม้ยางพาราและผงขี้เลื่อยไม้สน) และโปรตีน (โปรตีนจากข้าวโพดและโปรตีนเข้มข้นสกัดจากถั่วเหลือง) จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มผงขี้เลื่อยทั้ง 2 ชนิดสามารถเพิ่มสมบัติทางกลของโฟมแป้ง การเติมเซอินร้อยละ 0-20 ลงในโฟมทำให้ค่าทนต่อแรงดึงและแรงดัดมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าการยืดตัว ณ จุดแรงดึงสูงสุดและค่าการยืดตัว ณ จุดแรงดัดสูงสุดมีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มเซอินร้อยละ 25 ทำให้สมบัติทางกลต่ำลง ส่วนการเติมโปรตีนเข้มข้นสกัดจากถั่วเหลืองและน้ำยางพาราทำให้ทั้งสมบัติการรับแรงดึงและการรับแรงดัดสูงสุดด้อยลง การเติมฟิลเลอร์ทั้งหมดและน้ำยางพาราสามารถปรับปรุงให้โฟมทนน้ำได้มากขึ้น ขณะที่การเติมกลีเซอรอลทำให้โฟมแป้งดูดซับน้ำมากขึ้น ส่วนการเพิ่มฟิลเลอร์และน้ำยางพาราทำให้การย่อยสลายได้ลดลง

Kunanopparat และคณะ (2008) ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของโปรตีนจากข้าวสาลีโดยใช้เส้นใยธรรมชาติในการเสริมแรง เส้นใยที่ใช้ ได้แก่ เส้นใยป่าน และเส้นใยไม้ โดยเส้นใยทั้งสองมีปริมาณลิกนิน (Lignin) ประมาณ 3% และ 24% ตามลำดับ ทำการขึ้นรูป

ด้วยกระบวนการอัดความดันที่อุณหภูมิ 130°C ความดัน 9.3 MPa เป็นเวลา 15 min ซึ่งในการทดลองจะใช้อัตราส่วนโปรตีนจากข้าวสาลีต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 70:30 และปริมาณเส้นใย 0-20 (wt%) เพื่อทำการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล ผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยสูงขึ้นส่งผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเส้นใยจะเข้าไปเสริมแรงทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เป็นผลให้วัสดุมีความไวต่อน้ำต่ำ และทำให้อุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) เพิ่มขึ้น

Salgado และคณะ (2008) ศึกษาคุณสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลัง ใช้โปรตีนดอกทานตะวันเป็นสารเติมแต่งและเสริมแรงด้วยเส้นใยยูคาลิปตัส ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพทางเคมี และสมบัติเชิงกลของโฟมแป้ง จากการศึกษาค่าความหนาของโฟมอยู่ระหว่าง 1.55-1.76 mm และค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.46-0.59 g/cm^3 การเติมปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นจาก 10% เป็น 20% จะช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและลดความชื้นของโฟมได้เล็กน้อย แต่ค่าการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มโปรตีนดอกทานตะวันจนถึงค่า 20% จะช่วยลดค่าความชื้นและค่าการดูดซับน้ำของโฟมอย่างมีนัยสำคัญ สภาวะที่ดีที่สุดประกอบด้วยเส้นใย 20% โปรตีนดอกทานตะวัน 10% จะให้ค่าความต้านทานน้ำที่ดีที่สุดและสามารถลดการดูดซับน้ำได้ 38%

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อผลิตโฟมย่อยสลายได้ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป ทำการศึกษาคุณสมบัติของชิ้นงานที่ผลิตได้ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล และการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ โดยมีรายละเอียดของสารเคมี อุปกรณ์ เละเครื่องมือสำหรับการผลิตโฟมย่อยสลายได้ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน ดังนี้

3.1 สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลัง ผลิตโดยห้างหุ้นส่วนจำกัดเกรียงไกร (ค้าแป้ง) ก่อนใช้ในการผลิตโฟมย่อยสลายได้ นำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน
2. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA) ผลิตโดย Ajax Finechem Pty., Ltd.
3. กลีเซอรอล (Glycerol) ความเข้มข้น 99.5% ผลิตโดย Ajax Finechem Pty., Ltd.
4. น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water, DI)
5. เส้นใยปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Fiber) ผลิตโดย บริษัทตรังน้ำมันปาล์ม จำกัด
6. พาราฟินแว็กซ์ (Parafin Wax) ผลิตโดย Ajax Finechem Pty., Ltd.

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องกวน (Stirrer) พร้อมแท่งแม่เหล็กกวน (Magnetic Bar)
2. กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 100 ml
3. บีกเกอร์ (Beaker)
4. เครื่องผสมอาหาร รุ่น EMS-51 ผลิตโดย บริษัท Sharp

5. แม่พิมพ์สำหรับกระบวนการอัดขึ้นรูปทำด้วยสแตนเลสรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 127 mm ความยาว 127 mm และความหนา 1.9 mm
6. เครื่องวัดความหนา (Vernier Caliper) ความละเอียด 0.01 mm รุ่น Mitutoyo ผลิตโดยประเทศญี่ปุ่น
7. เครื่องชั่งความละเอียด 3 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Sartorius รุ่น BS 323 S
8. โถดูดความชื้น (Desiccators)
9. ตะแกรงร่อนขนาด mesh number 30
10. เครื่องปั่น รุ่น BE-120 ผลิตโดยบริษัท Otto Kingglass Co., Ltd.
11. แผ่นไมลาร์ (Milar Sheet) ป้องกันชิ้นงานติดแม่พิมพ์
12. ตู้อบความร้อน (Oven) ผลิตโดย EYELA รุ่น NDO-600N
13. เครื่องอัดความดัน (Compression Molding Machine) ผลิตโดยบริษัท Tang-Master (Thailand) Co., Ltd. (12 กิโลวัตต์)
14. เครื่องทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง รุ่น LR30K ผลิตโดยบริษัท LLOYD Instrument
15. เครื่องร่อนตะแกรง รุ่น EFL 2000 ผลิตโดยบริษัท CSC Scientific Co., Inc.

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองการผลิตโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. การเตรียมเส้นใยปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เสริมแรงในการผลิตผลิตภัณฑ์โฟมย่อยสลายได้
2. การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการทดลองการผลิตผลิตภัณฑ์โฟมย่อยสลายได้
3. ดำเนินการเตรียมวัตถุดิบและขึ้นรูปชิ้นงานผลิตภัณฑ์โฟมย่อยสลายได้โดยกระบวนการอัดขึ้นรูป
4. ออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตโฟมย่อยสลายได้โดยใช้เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) และทำการทดลองผลิตโฟมย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
5. วิเคราะห์คุณสมบัติของโฟมย่อยสลายได้ซึ่งประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกล และการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟม

6. หาสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และกราฟพื้นผิว (Surface Plot) ของโฟมย่อยสลายได้ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ทำการเคลือบชิ้นงานด้วยพาราฟินที่สภาวะที่เหมาะสมและทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งและการดูดซับน้ำ
7. วิเคราะห์ต้นทุนการผลิต (Economic analysis) ชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้จากสภาวะที่เหมาะสม

3.3.1 การเตรียมเส้นใยปาล์มน้ำมัน

เส้นใยปาล์มน้ำมันที่นำมาทำการศึกษาเป็นส่วนที่ได้จากเปลือกนอกของผลปาล์มน้ำมัน (Fruit Mesocarp) ดังภาพประกอบที่ 3.1 โดยการนำผลปาล์มน้ำมันมาผ่านกระบวนการหีบน้ำมันออก ส่วนของเส้นใยปาล์มจะถูกแยกออกจากกะลาปาล์มจะได้เส้นใยปาล์มน้ำมันสำหรับเป็นวัตถุดิบเสริมแรงในการผลิตโฟมย่อยสลายได้ ก่อนการนำเส้นใยปาล์มน้ำมันไปใช้จะต้องผ่านขั้นตอนการเตรียมเส้นใย ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. นำเส้นใยปาล์มน้ำมันจากเปลือกนอกของผลปาล์มน้ำมันมาผ่านขจัดสิ่งสกปรกได้แก่ เศษดิน เศษเปลือกผลปาล์ม และเชื้อรา ด้วยการล้างด้วยน้ำหลายๆ ครั้งจนกระทั่งสิ่งสกปรกหลุดออกจากเส้นใยปาล์มน้ำมัน โดยลักษณะทางกายภาพของเส้นใยจะเป็นเส้นยาวที่มีเปลือกผลปาล์มผสมอยู่ต้องทำการแยกในขั้นตอนต่อไป

ภาพประกอบที่ 3.1 เส้นใยปาล์มน้ำมันที่ได้จากเปลือกนอกของผลปาล์มน้ำมัน

2. นำเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ผ่านการล้างมาอบในตู้อบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 hr เพื่อไล่ความชื้น เส้นใยปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการอบแสดงดังภาพประกอบที่ 3.2 ซึ่งลักษณะเส้นใยที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นใยที่สะอาดปราศจากเชื้อราและความชื้น

ภาพประกอบที่ 3.2 เส้นใยปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการล้างและอบ

3. นำเส้นใยปาล์มน้ำมันบดในเครื่องปั่น เพื่อให้เส้นใยปาล์มน้ำมันมีขนาดสั้นลง เครื่องสำหรับปั่นเส้นใยปาล์มน้ำมันแสดงดังภาพประกอบที่ 3.3

ภาพประกอบที่ 3.3 เครื่องปั่นสำหรับบดเส้นใยปาล์มน้ำมัน

4. นำเส้นใยปาล์มน้ำมันไปร่อนผ่านเครื่องร่อนตะแกรงขนาด mesh number 30 เพื่อแยกสิ่งเจือปนออกจากเส้นใยและเพื่อคัดขนาดของเส้นใย โดยนำส่วนที่ผ่านตะแกรงร่อน mesh

number 30 ทั้งหมดมาใช้ เส้นใยปาล์มน้ำมันจะมีขนาดความยาวอยู่ในช่วง 1 mm ถึง 2 cm แสดงดังภาพประกอบที่ 3.4 จะทำให้ได้เส้นใยปาล์มน้ำมันสำหรับใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในการผลิตโฟมย่อยสลายได้

ภาพประกอบที่ 3.4 เส้นใยปาล์มน้ำมันที่ผ่านกระบวนการปั่นและแยกขนาดเส้นใย

3.3.2 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์โฟมย่อยสลายได้

1. อบแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 hr เพื่อไล่ความชื้น เก็บไว้ในโถดูดความชื้น ดังภาพประกอบที่ 3.5

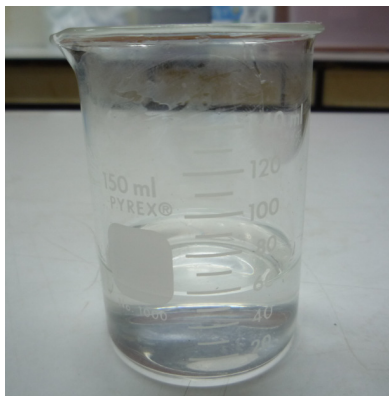
ภาพประกอบที่ 3.5 แป้งมันสำปะหลังสำหรับการนำไปใช้งาน

2. ชั่งส่วนผสมต่างๆ ประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล พอลิไวนิล-แอลกอฮอล์ (PVA) และเส้นใย (กรณีเสริมแรง) ตามอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

3. นำ PVA ที่ได้จากการชั่งนำหนักมาละลายในน้ำปราศจากไอออน ทำการกวนด้วยเครื่องกวนดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.6 จนได้สารละลาย PVA ที่มีความเข้มข้นตามตารางการทดลอง

ภาพประกอบที่ 3.6 สารละลาย PVA

4. ผสมกลีเซอรอลและสารละลาย PVA กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที ในบีกเกอร์แสดงดังภาพประกอบที่ 3.7



ภาพประกอบที่ 3.7 ของผสมระหว่างกลีเซอรอลและสารละลาย PVA

5. ผสมแป้งมันสำปะหลังและเส้นใยปาล์มน้ำมัน (กรณีที่เติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน) เข้าด้วยกันในเครื่องช่วยผสม จนกระทั่งมีการกระจายตัวเข้ากันอย่างดีเป็นเวลา 2 นาที

6. นำส่วนผสมในข้อ 4 และข้อ 5 ผสมเข้าด้วยกันในเครื่องช่วยผสม กวนผสมจนของผสมเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 10 นาที แสดงดังภาพประกอบที่ 3.8 (ก) จนได้ของผสมสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.8 (ข)

(ก)

(ข)

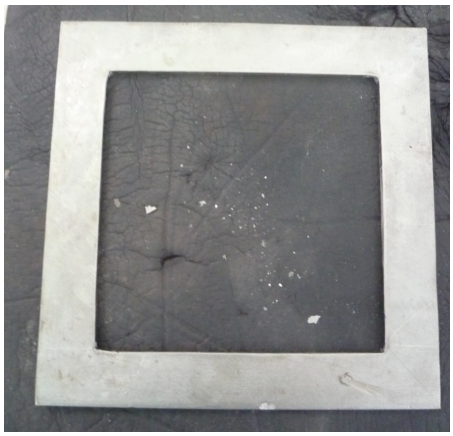
ภาพประกอบที่ 3.8 การกวนวัตถุดิบต่างๆ ด้วยเครื่องช่วยผสม (ก) ของผสมสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป (ข)

3.3.3 การเตรียมและการขึ้นรูปชิ้นงานโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding)

1. ชั่งของผสมแป้งมันสำปะหลังและเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ได้จากการกวนผสมปริมาณ 60 กรัม แสดงดังภาพประกอบที่ 3.9

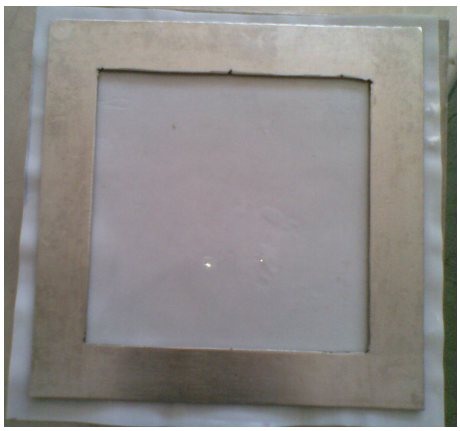
ภาพประกอบที่ 3.9 ของผสมที่มีการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันสำหรับใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเพื่อผลิตวัสดุโฟมย่อยสลายได้

2. เตรียมแม่พิมพ์ (Mold) ที่ประกอบด้วย ชุดสแตนเลสรูปสี่เหลี่ยมประกบบนและล่าง จำนวน 2 แผ่น แสดงดังภาพประกอบที่ 3.10 (ก) แม่พิมพ์ขนาด 127 mm x 127 mm x 1.9 mm จำนวน 1 แผ่นสำหรับเป็นเบ้าพิมพ์แสดงดังภาพประกอบที่ 3.10 (ข) และแผ่นไมลาร์ป้องกันการเกาะติดของแม่พิมพ์ขนาด 127 mm x 127 mm

(ก)

(ข)

ภาพประกอบที่ 3.10 ชุดแม่พิมพ์สแตนเลสรูปสี่เหลี่ยม (ก) ชุดแม่พิมพ์ (ข)

3. เทของผสมใส่ในแม่พิมพ์สแตนเลสโดยใช้แผ่นไมลาร์รองแม่พิมพ์บนและล่าง แสดงดังภาพประกอบที่ 3.11 เพื่อป้องกันการเกาะติดของแม่พิมพ์กับชิ้นงาน


(ก)

(ข)

ภาพประกอบที่ 3.11 ชุดแม่พิมพ์สแตนเลสรูปสี่เหลี่ยมรองด้วยแผ่นไมลาร์ (ก) การใส่ของผสมวัตถุดิบลงในแม่พิมพ์ (ข)

4. เตรียมเครื่องอัดขึ้นรูปโดยทำการควบคุมอุณหภูมิและความดันของเครื่องที่ 170°C และ 2,000 psig ตามลำดับ ก่อนทำการอัดขึ้นรูป ซึ่งเครื่องอัดความดันมีแผ่นให้ความร้อน 2 แผ่น (Heated Platen) โดยแม่พิมพ์จะอยู่ระหว่างแผ่นให้ความร้อนทั้งสองแผ่น

5. เมื่ออุณหภูมิและความดันของเครื่องอัดขึ้นรูปมีค่าตามที่กำหนด ทำการขึ้นรูปด้วยโดยการประกบชุดแม่พิมพ์ในเครื่องอัดความดันเป็นเวลา 5 นาที แสดงดังภาพประกอบที่ 3.12 (ก) และ (ข) จากนั้นทำการลดความดันของเครื่องด้วยการเปิดชุดอัดเป็นเวลา 20 วินาที นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องอัดความดัน

(ก)

(ข)

ภาพประกอบที่ 3.12 การใส่แม่พิมพ์ในเครื่องอัดความดัน (ก) แม่พิมพ์ถูกดำเนินการในเครื่องอัดความดัน (ข)

6. วางแม่พิมพ์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ชิ้นงานเย็นตัวเป็นเวลา 10 นาที ดังภาพประกอบที่ 3.13

ภาพประกอบที่ 3.13 แม่พิมพ์หลังจากออกจากเครื่องอัดความดันวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

7. นำชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ออกจากแม่พิมพ์ เก็บในโถดูดความชื้นก่อนนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ ชิ้นงานโฟมย่อยสลายแสดงดังภาพประกอบที่ 3.14

ภาพประกอบที่ 3.14 ชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ผสมเส้นใยปาล์มน้ำมัน

3.3.4 การออกแบบการทดลองของการเตรียมโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน

การออกแบบการทดลองของการเตรียมโฟมย่อยสลายได้เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันใช้เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) ซึ่งใช้หลักการทางสถิติในการ

ออกแบบการทดลองและหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดด้วยโปรแกรม ANOVA ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน กลีเซอรอล และ PVA โดยแสดงรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดตัวแปรและช่วงการดำเนินการของตัวแปร ประกอบด้วย

- ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวแปร คือ ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 0-20 ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 0-15 และปริมาณ PVA ร้อยละ 0-7.5 การกำหนดตัวแปรอิสระ ระดับขอบเขต และสัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

- ตัวแปรตอบสนอง (Response) ประกอบด้วย 2 ตัวแปร คือ ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งเพื่อทราบความแข็งแรงและการยืดตัวของชิ้นงาน และค่าการดูดซับน้ำเพื่อหาความสามารถในการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ในแต่ละการทดลอง กำหนด x แทนตัวแปรอิสระและกำหนด y เป็นตัวแปรตาม

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรอิสระ ระดับขอบเขต และสัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลอง

ตัวแปรอิสระ	ระดับต่ำสุด	ระดับสูงสุด	สัญลักษณ์
เส้นใยปาล์มน้ำมัน	0	20	x_1
กลีเซอรอล	0	15	x_2
PVA	0	7.5	x_3

2. กำหนดรหัส (Code) ของช่วงการดำเนินการออกแบบการทดลองของตัวแปรอิสระที่กำหนด โดยการใช้ Design of Experimental (DOE) ด้วยเทคนิคของ Central Composite Design (CCD) และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded Variables) โดยใช้สมการที่ 3.1 ผลการออกแบบการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

$$x = \left[\frac{z - \frac{z_{max} + z_{min}}{2}}{\frac{z_{max} + z_{min}}{2}} \right] \qquad (3.1)$$

เมื่อ x = coded variables

z = ตัวแปรอิสระ

z_{max} = ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ

z_{min} = ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3. แปลงรหัส (Decode) จากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design, CCD) ในตารางที่ 3.2 ทำการแปลงค่าตัวแปรให้เป็นค่าการดำเนินการของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามในแต่ละตัวในการดำเนินการทดลอง เพื่อหาค่าตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ โดยการแปลงค่าตัวแปรแสดงดังตารางที่ 3.3 ซึ่งมีทดลองจำนวนหนึ่งการทดลองที่มีการทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 3 ซ้ำ ทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18 และ 19 เพื่อทำการศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระ เนื่องจากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM จะให้ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระตัวละ 3 ค่า ซึ่งข้อมูลยังไม่เพียงพอในการแสดงค่ากราฟ 2 มิติ จึงมีการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมให้ได้ผลของค่าตัวแปรอิสระตัวละ 4 ค่า จึงได้ค่าแนวโน้มของแต่ละตัวแปรนั้นสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3.2 ผลการแสดงรหัสตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค RSM ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 2 ตัวแปร

การทดลองที่	x_1	x_2	x_3	**Response**
1	0.59	-0.59	-0.59	
2	0	-1	0	
3	0.59	0.59	0.59	
4	-0.59	0.59	-0.59	
5	-0.59	-0.59	0.59	
6	0.59	0.59	-0.59	
7	0	0	0	
8	0.59	-0.59	0.59	
9	1	0	0	y_1,y_2
10	0	1	0	
11	0	0	0	
12	-0.59	0.59	0.59	
13	0	0	-1	
14	-0.59	-0.59	-0.59	
15	-1	0	0	
16	0	0	0	
17	0	0	1	

ตารางที่ 3.3 ผลการแปลงรหัสตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปรและตัวแปรตาม 2 ตัวแปร

การทดลองที่	ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน (%)	ปริมาณกลีเซอรอล (%)	ปริมาณ PVA (%)	ผลตอบสนอง
1	15.9	3.1	1.5	ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งและ ค่าการดูดซับน้ำ
2	10	0	3.8	
3	15.9	11.9	6	
4	4.1	11.9	1.5	
5	4.1	3.1	6	
6	15.9	11.9	1.5	
7	10	7.5	3.8	
8	15.9	3.1	6	
9	20	7.5	3.8	
10	10	15	3.8	
11	10	7.5	3.8	
12	4.1	11.9	6	
13	10	7.5	0	
14	4.1	3.1	1.5	
15	0	7.5	3.8	
16	10	7.5	3.8	
17	10	7.5	7.5	
18	7.5	4	3.8	
19	7.5	5	3.8	

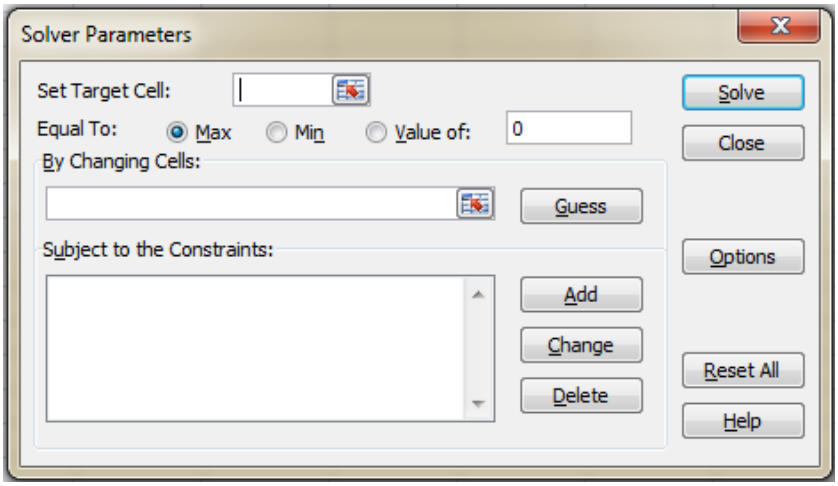
4. ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัวแปรกับตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ตัวแปร โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองใช้การวิเคราะห์ Multiple Regression

Analysis ด้วยโปรแกรม ANOVA แบบจำลองที่ได้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นโค้ง (Quadratic Equation) ดังสมการที่ 3.2

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \left[\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^{k} \beta_{ij} x_i x_j \right]_{i<j} \qquad (3.2)$$

เมื่อ β_0, β_i, β_{ii} และ β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน

5. หากราฟพื้นผิว (Surface Plot) ของการทดลองเพื่อแสดงผลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งและการดูดซับน้ำของโฟมแป้งย่อยสลายได้ กราฟพื้นผิวได้จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง โดยการเอาผลความสัมพันธ์ของผลตอบสนองกับตัวแปรที่ทำการศึกษานำมาพล็อตเป็นกราฟพื้นผิวเพื่อนำไปหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Solver แสดงหน้าโปรแกรม Solver ดังภาพประกอบที่ 3.15

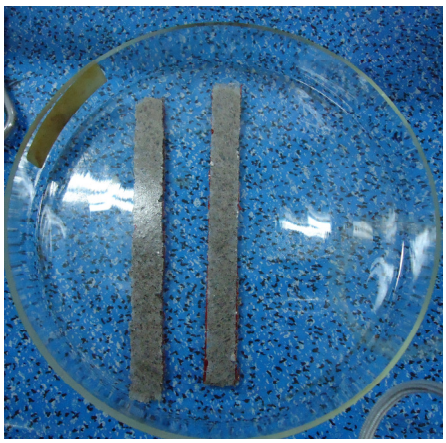
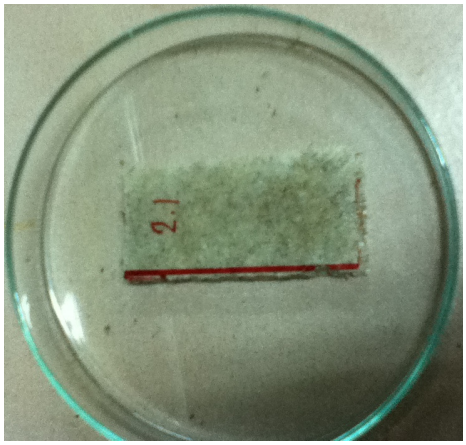


ภาพประกอบที่ 3.15 แสดงหน้าโปรแกรม Solver เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

3.3.5 การเคลือบชิ้นงานด้วยพาราฟิน แว๊กซ์ (Paraffin Wax)

จากสภาวะการผลิตโฟมย่อยสลายได้ที่เหมาะสมจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิค RSM นำโฟมย่อยสลายได้ที่ผลิตได้จากสภาวะดังกล่าวมาทำการเคลือบด้วยพาราฟิน แว๊กซ์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งและค่าการดูดซับน้ำ โดยมีขั้นตอนในการเคลือบชิ้นงาน ดังนี้

1. ตัดชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมขนาด 1.27 cm x 12.7 cm และ 2.5 cm x 2.5 cm ความหนาเท่ากับชิ้นงาน เพื่อวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งและการดูดซับน้ำ ตามลำดับ นำไปทำการเคลือบพาราฟิน แว๊กซ์และการนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.16


(ก)

(ข)

ภาพประกอบที่ 3.16 ชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้สำหรับการเคลือบชิ้นงานด้วยพาราฟินที่มีรูปแบบการวิเคราะห์ (ก) ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง และ (ข) การวิเคราะห์การดูดซับน้ำ

2. หลอมละลายพาราฟิน แว๊กซ์ในหม้อสแตนเลส ที่อุณหภูมิ 100°C สำหรับการเคลือบชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.17

(ก)

(ข)

ภาพประกอบที่ 3.17 พาราฟิน แว๊กซ์ (ก) ก่อนหลอมละลาย (ข) พาราฟินแว๊กซ์ที่หลอมละลายแล้ว

3. นำชิ้นงานที่เตรียมไว้มาจุ่มในสารละลายพาราฟิน แว๊กซ์เป็นเวลา 30 วินาที โดยทำซ้ำ 2-3 ครั้ง จากนั้นทิ้งให้แห้งและเก็บชิ้นงานในตู้ดูดความชื้นเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปแสดงดังภาพประกอบที่ 3.18

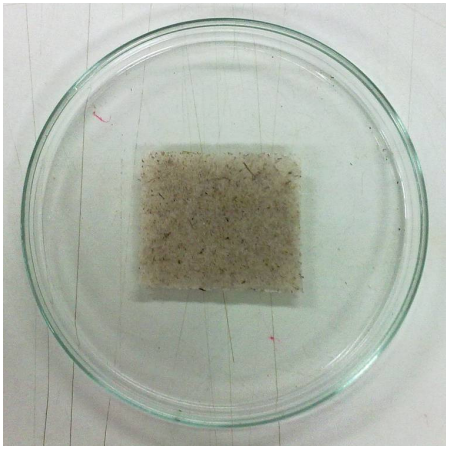
ภาพประกอบที่ 3.18 การเคลือบชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ด้วยพาราฟิน แว๊กซ์

3.3.6 การวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงาน (Thickness)

ความหนา คือ ระยะตั้งฉากระหว่างผิวหน้าของชิ้นงานมีหน่วยเป็นไมโครเมตร หรือมิลลิเมตร ชิ้นงานโฟมแป้งถูกตรวจวัดความหนาด้วย Vernier Caliper ความละเอียด 0.05 mm วัดความหนาตัวอย่างละ 5 ตำแหน่ง บันทึกค่าหาความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานโฟมแป้ง

3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ความชื้นเป็นปริมาณน้ำที่มีอยู่ในชิ้นงานโฟม ค่าความชื้นถูกบอกค่าเป็นร้อยละของอัตราส่วนน้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในโฟมกับน้ำหนักโฟม การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของชิ้นงานทดสอบทำได้โดยนำชิ้นงานไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 h ชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังการอบ บันทึกค่าน้ำหนักคำนวณค่าความชื้นเป็นร้อยละของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปต่อน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM D644-94, 1994 ชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์ค่าความชื้นแสดงดังภาพประกอบที่ 3.19



ภาพประกอบที่ 3.19 ชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

3.3.8 การวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density)

การทดสอบหาความหนาแน่นของโฟมแป้งเป็นการวัดมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เตรียมชิ้นงานขนาดความกว้าง 1.27 cm ความยาว 12.7 cm ความหนาเท่าชิ้นงาน ชั่งน้ำหนักโฟมแป้งด้วยเครื่องชั่ง รายงานความหนาแน่นคำนวณค่าดังสมการ 3.3

$$D = m/v \qquad (3.3)$$

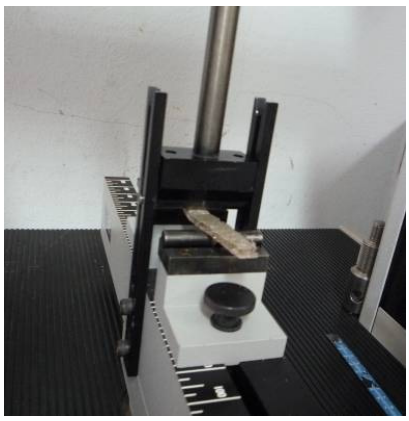
เมื่อ D = ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น g/cm^3

m = น้ำหนักของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น g

v = ปริมาตรของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น cm^3

3.3.9 การวิเคราะห์สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural Properties Testing)

เตรียมชิ้นงานทดสอบขนาดความกว้าง 1.27 cm ความยาว 12.7 cm ความหนาเท่ากับชิ้นงาน ทำการวัดค่าความเค้นแรงดัดโค้งสูงสุด (Flexural stress at maximum load) และค่าความเครียดสูงสุดแรงดัดโค้งสูงสุด (Flexural stain at maximum load) ทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยเครื่อง LLOYD แสดงดังภาพประกอบที่ 3.20 แรงในการทดสอบ 100 N ความเร็วในการทดสอบ 2.5 mm/min ระยะวางตัวอย่าง 80 mm



ภาพประกอบที่ 3.20 การทดสอบการดัดโค้งของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้

3.3.10 การวิเคราะห์สมบัติการดูดซับน้ำ (Water Absorption)

เตรียมชิ้นงานทดสอบขนาดความกว้าง 2.5 cm ความยาว 5 cm ความหนาเท่ากับชิ้นงาน ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ นำชิ้นงานแช่ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 60 s จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานหลังการทดสอบ บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นทดสอบคำนวณหาค่าร้อยละการดูดซับน้ำตามมาตรฐาน ABNT NBR NM ISO 535, 1999 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์สมบัติการดูดซับน้ำดังภาพประกอบที่ 3.21

ภาพประกอบที่ 3.21 การทดสอบการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การดำเนินการทดลองการผลิตโฟมย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน สามารถอธิบายรายละเอียดของผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง โดยมีหัวข้อสำคัญในการศึกษาดังนี้ สภาวะการอัดขึ้นรูปโฟมที่เหมาะสม ผลของเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยาและความหนาแน่นของโฟมย่อยสลายได้ ผลของปริมาณ PVA และกลีเซอรอลที่มีผลต่อปริมาณความชื้นและค่าการยืดตัว ณ แรงดัดสูงสุด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโฟมย่อยสลายได้ คุณสมบัติของโฟมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยพาราฟิน แว๊กซ์ และการวิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตผลิตภัณฑ์โฟม ซึ่งมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 สภาวะการอัดขึ้นรูปโฟมที่เหมาะสม

การดำเนินการทดลองการผลิตโฟมย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression Molding) โดยกรรมวิธีในการขึ้นรูปโฟมที่มีแป้งเป็นวัตถุดิบหลักและมีน้ำเป็นส่วนประกอบจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบภายในแม่แบบที่ร้อนเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลแป้งหลายขั้นตอน

จากการศึกษางานวิจัยของ Shogren *et al*. (1998) อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของแป้งและวัตถุดิบในแม่แบบได้ว่าเริ่มจากเมื่อใส่แป้งที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบลงไปในแม่แบบที่ร้อน อุณหภูมิในแม่แบบสูงขึ้นทำให้น้ำที่ผสมอยู่กับแป้งจะเริ่มระเหยกลายเป็นไอ แป้งจะเกิดเป็นเจลโดยกระบวนการเจลาติไนซ์เซชั่น (Gelatinization) และมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความดันภายในแม่แบบจะสูงขึ้น จากนั้นอุณหภูมิภายในสูงขึ้นจนน้ำในแม่แบบระเหยออกกลายเป็นไอบริเวณขอบของแม่แบบ ความดันของไอน้ำที่อยู่ภายในแม่แบบเกิดการขยายตัวทำให้แป้งกลายเป็นโพรงอากาศ (Bubble) เนื้อแป้งที่อยู่ภายในจะเกิดการกระจายตัวจนเต็มแม่แบบและแป้งที่เป็นส่วนเกินจะระบายตัวออกมาทางช่องขอบของแม่แบบ จากนั้นน้ำจะระเหยออกจนหมด โพรงอากาศจะเริ่มแห้ง และเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้าย คือ ความดันภายในแม่แบบและอุณหภูมิที่สูงจะทำให้โฟมแป้งเกิดการแห้งตัว สุดท้ายนำชิ้นงานออกจากแม่แบบ

การหาสภาวะการอัดขึ้นรูปในการผลิตโฟมย่อยสลายได้มีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสภาวะการอัดขึ้นรูปเบื้องต้นของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ ระยะเวลา ความดันของการอัดขึ้นรูป และปริมาณน้ำในของผสมต่อการผลิตชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปจะศึกษาอยู่ในช่วง 120-170°C ระยะเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปจะศึกษาอยู่ในช่วง 3-7 min และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปจะศึกษาอยู่ในช่วง 500-2,000 psig

4.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการอัดขึ้นรูปของโฟมย่อยสลายได้ ซึ่งอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญในการทำให้น้ำระเหยออกจากภายในแม่พิมพ์กลายเป็นไอ ความดันของไอน้ำจะทำให้เกิดการขยายของแป้งเกิดเป็นโพรงขึ้น โดยทำการทดลองที่เวลา 5 minเท่ากันทุกอุณหภูมิ พบว่าในกรณีที่ใช้อุณหภูมิสูงในการทดลองน้ำจะระเหยเป็นไออย่างรวดเร็วส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศในชิ้นงานสูงและทำให้ผิวหน้าของโฟมเกิดรอยแตกและเปราะง่าย มีผลต่อความแข็งแรงและลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำที่ 120°C และ 150°C แป้งสามารถเกิดเป็นเจลได้ทั้งแผ่นแต่เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำทำให้น้ำระเหยเป็นไอได้อย่างช้าๆ ส่งผลให้ไอน้ำบางส่วนของชิ้นงานยังไม่เกิดการระเหยชิ้นงานแห้งไม่ทั่วทั้งแผ่นที่เวลา 5 min อุณหภูมิจึงมีผลต่อการอัดขึ้นรูปของชิ้นงาน ดังนั้นอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการอัดขึ้นรูปคือ 170°C ซึ่งไอน้ำในชิ้นงานสามารถระเหยได้ทั่วทั้งแผ่นและสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ทุกการทดลอง ชิ้นงานมีผิวเรียบไม่เกิดรอยแตกบนพื้นผิว

4.1.2 อิทธิพลของระยะเวลาการขึ้นรูปที่มีผลต่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้

ระยะเวลาในกระบวนการอัดขึ้นรูปมีผลต่อการเกิดเจลของโมเลกุลแป้งที่อุณหภูมิสูง เมื่อแป้งเกิดเป็นเจลแล้วน้ำระเหยออกหมดแป้งจะเริ่มแห้งเป็นโฟมซึ่งต้องอาศัยเวลาที่เหมาะสมในขั้นตอนการอัด จากการศึกษาเมื่อใช้เวลาในการอัดที่สูงเกินไปที่ 7 min จะทำให้โฟมที่ได้มีสีน้ำตาลเข้มขึ้น เนื่องจากชิ้นงานถูกอัดด้วยความร้อนเป็นระยะเวลานาน และการอัดที่เวลา 7 min เป็นการสิ้นเปลืองเวลาในการผลิต การใช้เวลาในการอัดน้อยเกินไปที่ 3 min น้ำที่ผสมอยู่ในของผสมยังระเหยได้ไม่หมดจึงทำให้แป้งที่เป็นเจลยังแห้งไม่หมด ชิ้นงานที่ได้จึงมีลักษณะนิ่มและมีความชื้นสูง แสดงว่าเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานต้องมีค่าที่เหมาะสมและสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ 170°C ซึ่งเวลาที่เลือกใช้ คือ 5 min ลักษณะชิ้นงานมีความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น

4.1.3 อิทธิพลของความดันในการอัดขึ้นรูปที่มีผลต่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้

ในกระบวนการอัดขึ้นรูปความดันที่ใช้ในการอัดแม่พิมพ์มีผลต่อการกระจายตัวของของผสมให้เกิดการกระจายตัวอย่างสมบูรณ์เต็มแม่พิมพ์ และของผสมที่เป็นส่วนเกินจะระบาย

ตัวออกมาทางช่องขอบของแม่พิมพ์ หากค่าความดันในการอัดขึ้นรูปสูงมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื้องาน เนื่องจากของผสมในแม่พิมพ์เกิดการดันตัวจากแรงดันในการขึ้นรูป จึงทำให้ของผสมไหลออกจากแม่พิมพ์ จากการทดลองพบว่าการใช้ค่าความดันที่ 500 และ 1,000 psig ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้จะส่งผลต่อพื้นผิวของชิ้นงานโดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะโค้งงอเล็กน้อยและผิวหน้ามีลักษณะไม่เรียบ จะมีลักษณะเป็นหลุมเล็กๆ กระจายตัวอยู่ในแผ่นชิ้นงาน เนื่องจากแรงดันไอน้ำในชิ้นงานเกิดการระเหยที่ผิวบนในแม่พิมพ์ เมื่อแรงดันในการอัดขึ้นรูปน้อยเกินไปส่งผลให้เกิดช่องว่างที่ผิวหน้าของชิ้นงาน ความดันที่เหมาะสมสำหรับอุณหภูมิที่ 170°C ที่เวลา 5 min คือ 2,000 psig เนื่องจากชิ้นงานที่ได้จะมีผิวเรียบ ความหนาที่สม่ำเสมอเท่ากันทั้งแผ่นแสดงดังภาพประกอบที่ 4.1

ภาพประกอบที่ 4.1 โฟมย่อยสลายได้ขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170°C ความดัน 2,000 psig เป็นเวลา 5 min

4.1.4 อิทธิพลของปริมาณน้ำในของผสมต่อการผลิตชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้

การเตรียมของผสมในการผลิตชิ้นงานด้วยวัตถุดิบจากธรรมชาติ ประกอบด้วยแป้งเป็นวัตถุดิบหลัก กลีเซอรอล และ PVA ในการผสมวัตถุดิบต่างๆ น้ำมีบทบาทสำคัญในการช่วยละลายส่วนผสมเข้าด้วยกัน อีกทั้งเมื่อน้ำได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการระเหย และแรงดันจากไอน้ำนี้จะไปทำให้เกิดช่องว่างภายในชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ชิ้นงานสามารถเกิดเป็นโฟมขึ้น ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้ต้องมีความเหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน หากในของผสมมีน้ำผสมอยู่ในปริมาณมากเกินไปของผสมมีลักษณะเหลวเกินไป ทำให้ของผสมเกินการไหลออกจากแม่พิมพ์และส่งผลต่อเวลาในการอัดขึ้นรูปที่นานขึ้น สำหรับปริมาณน้ำน้อยการเข้ากันของส่วนผสม จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งไม่เหมาะสมในการขึ้นรูป ดังนั้นปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับการผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกันในแต่ละการทดลองจะใช้สัดส่วนเป็น 1:1 ของปริมาณแป้งต่อน้ำ

4.2 ผลของการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้

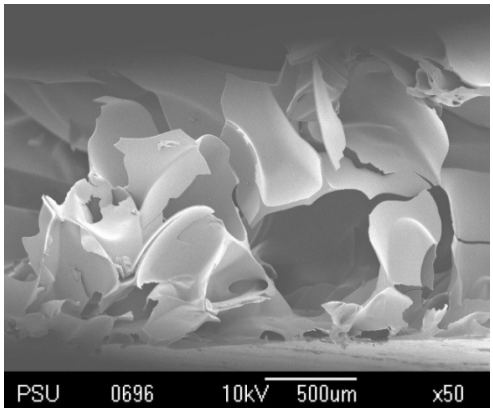
โฟมที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบหลักยังมีความแข็งแรงที่ต่ำ เปราะ แตกหักง่าย และต้านทานต่อการดูดซับน้ำต่ำ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของโฟมจากแป้ง งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมแป้งโดยการนำเส้นใยจากธรรมชาติชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันมาช่วยในการเสริมแรงให้กับโฟม ซึ่งเส้นใยที่นำมาใช้เป็นของเสียหลักจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม โดยเส้นใยปาล์มน้ำมันมีส่วนประกอบของเซลลูโลส 65% ลิกนิน 19% และเฮมิเซลลูโลส 16% (Sreekala *et al*, 2002) ซึ่งเฮมิเซลลูโลสและลิกนินเป็นส่วนอสัณฐานมีหน้าที่หลักในการเสริมความแข็งแรงให้กับเส้นใยเซลลูโลส (Wikberg *et al*, 2004) ซึ่งเซลลูโลสจะมีหน้าที่สร้างความแข็งแรงให้กับเส้นใยไม้ จากหลายงานวิจัยได้มีการนำเอาเส้นใยเซลลูโลสมาเป็นวัสดุเสริมแรง เช่น เส้นใยปอกระเจา เส้นใยป่าน ผงขี้เลื่อยไม้ยางพารา เป็นต้น โดยสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมจากแป้งได้ โดยมีผลต่อความแข็งแรงของโฟมจากแป้ง การยึดเกาะตัวของเส้นใยเซลลูโลสกับโมเลกุลแป้ง งานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเส้นใยปาล์มน้ำมันมาใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมจากแป้งมันสำปะหลัง อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเส้นใยอีกทางหนึ่งด้วย

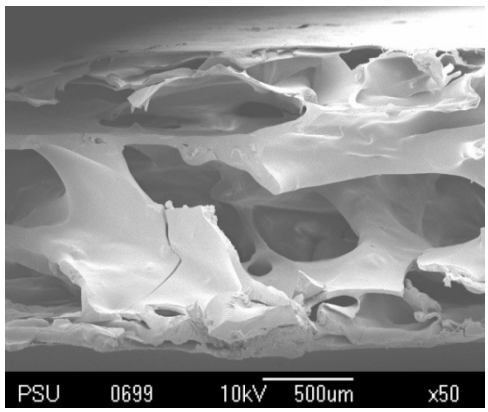
4.2.1 ผลของการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยาของโฟมย่อยสลายได้

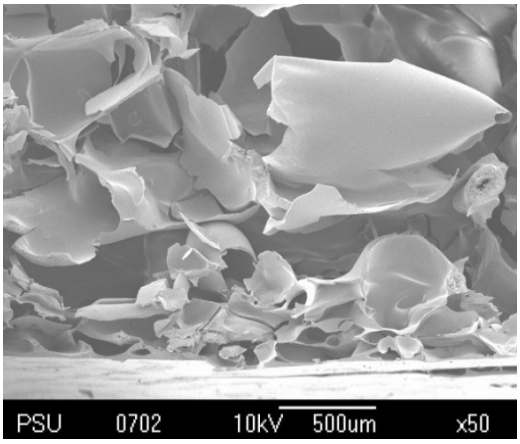
การศึกษาผลของเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยา (Morphological Structure) ของโฟมย่อยสลายได้โดยปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ใช้เติมในโฟมย่อยสลายได้ คือ ร้อยละ 0, 7.5, 11.3 และ 15.0 กำหนดค่าคงที่ของปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และ PVA ร้อยละ 3.8 ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน ผลิตภัณฑ์โฟมย่อยสลายได้จะเก็บไว้ที่ระยะเวลาในการเก็บ 2 วัน เพื่อให้คุณสมบัติของชิ้นงานมีความคงตัว สามารถทำการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของโฟมย่อยสลายได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ระดับกำลังขยาย 50 เท่า

ภาพตัดขวางของโฟมย่อยสลายได้ที่มีการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 7.5 และ 15.0 แสดงดังภาพประกอบที่ 4.2 (ก) 4.2 (ข) และ 4.2 (ค) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาโครงสร้างเซลล์ของโฟมย่อยสลายได้พบว่ามีลักษณะโครงสร้างเป็นเซลล์เปิด (Open Cell) ซึ่งเป็นโครงสร้างเซลล์ที่ติดต่อกันด้วยผนังเซลล์ที่แตกหรือเจาะต่อกันระหว่างเซลล์สองจุดหรือมากกว่า (บำรุง, 2550) เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันมากขึ้นเซลล์จะมีขนาดเล็กลงเนื่องจากเส้นใยปาล์มน้ำมันจะเข้าไปยึดเกาะตัวกับโมเลกุลของแป้ง ส่งผลให้เซลล์ภายในชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้มีขนาดเล็กลง

ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็นร้อยละ 15.0 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ บำรุง (2550) ที่ได้รายงานการศึกษาการเตรียมโฟมแป้งจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ฟิลเลอร์ (Filler) จากน้ำยางธรรมชาติ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl Peroxide) และกลีเซอรอล ทำการขึ้นรูปโดยการอัดร้อนด้วยแม่พิมพ์ ฟิลเลอร์ที่เติมแบ่งออกเป็นเส้นใยไม้ (ผงขี้เลื่อยไม้ยางพาราและผงขี้เลื่อยไม้สน) และโปรตีน (โปรตีนจากข้าวโพดและโปรตีนเข้มข้นสกัดจากถั่วเหลือง) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ยางพารามากขึ้นขนาดเซลล์ของโฟมจากแป้งจะมีขนาดเล็กลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ยางพาราตั้งแต่ 10% ขึ้นไป



(ก)


(ข)


(ค)

ภาพประกอบที่ 4.2 ภาพตัดขวางของโฟมย่อยสลายได้ที่เติมเส้นใยปาล์มน้ำมันจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ระดับกำลังขยาย 50 เท่า (ก) เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 0 (ข) เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 (ค) เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 15.0

ลักษณะพื้นผิว สี และเนื้อของโฟมย่อยสลายได้ที่ผลิตได้ ที่มีการเติมปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันจากร้อยละ 0, 7.5 และ 15.0 แสดงดังภาพประกอบที่ 4.3 จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติมปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นสีของโฟมย่อยสลายได้จะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น เนื่องจากในเนื้อของชิ้นงานมีเส้นใยที่ไปสะสมมากขึ้นสีจึงเข้มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าโฟมที่ไม่มีการเติมเส้นใยจะมีลักษณะเป็นสีขาวแต่เมื่อมีการเติมเส้นใยลักษณะบนพื้นผิวของโฟมย่อยสลายได้จะเห็นเส้นใยที่กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวได้อย่างชัดเจน

(ก)

(ข)

(ค)

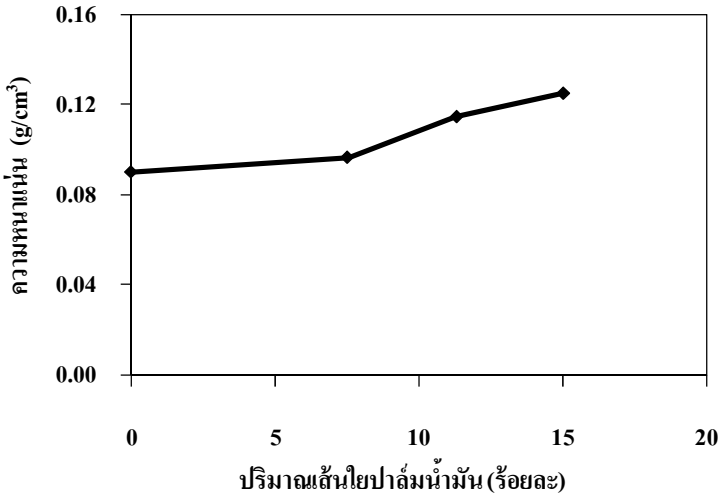
ภาพประกอบที่ 4.3 พื้นผิวของโฟมย่อยสลายได้ที่เติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน (ก) เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 0 (ข) เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 (ค) เส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 15.0

4.2.2 ผลการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อความหนาแน่นของโฟมย่อยสลายได้

ผลของปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันกับความหนาแน่นของโฟมย่อยสลายได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4.4 โดยปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ศึกษาประกอบด้วยร้อยละ 0, 7.5, 11.3 และ 15.0 ค่าความหนาแน่นมีค่าเป็น 0.09, 0.10, 0.11 และ 0.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

พบว่าความหนาแน่นของโฟมแป้งมันสำปะหลังที่เติมเส้นใยปาล์มน้ำมันจะมีค่าเพิ่มขึ้นและการเติมปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 15.0 จะมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด คือ 0.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งค่าความหนาแน่นของโฟมย่อยสลายได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงค่าความหนาแน่นของโฟมโพลีสไตรีนชนิดแผ่นคือ 0.05-0.19 g/cm^3

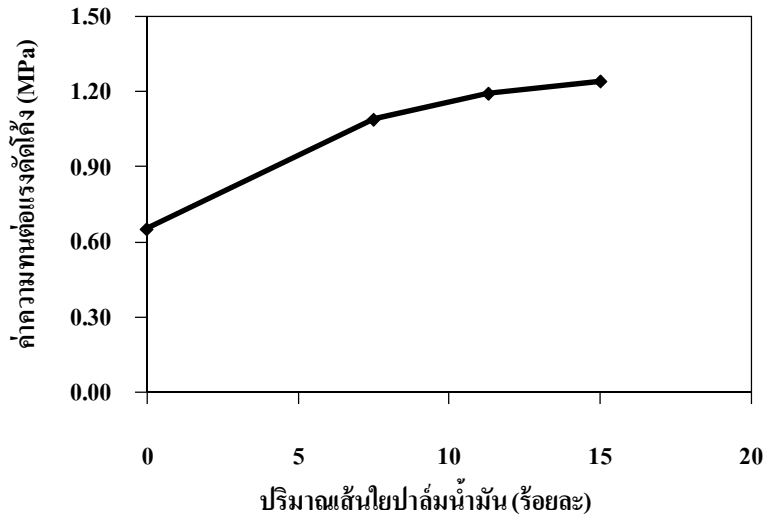
สอดคล้องกับโครงสร้างสัณฐานวิทยาของโฟมย่อยสลายได้จากภาพประกอบที่ 4.1 พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นลักษณะรูพรุนของโฟมจะมีขนาดเล็กลงดังนั้นความหนาแน่นจึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโฟมย่อยสลายได้ที่ไม่มีการเติมเส้นใย เนื่องจากเส้นใยปาล์มน้ำมันจะสะสมอยู่ในชิ้นงานมากขึ้นจึงมีผลต่อความหนาแน่นและโครงสร้างสัณฐานวิทยาของโฟมย่อยสลายได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของบำรุง (2550) ที่ทำการศึกษาผลของขี้เลื่อยไม้ยางพาราต่อความหนาแน่นของโฟมจากแป้ง พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของโฟมมีค่าสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นของโฟมจากแป้งจะอยู่ในช่วง 0.14-0.26 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยจะมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดเมื่อปริมาณขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็น 25% โดยน้ำหนักของแป้ง และงานวิจัยของ Carr *et al*. (2006) รายงายว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมันสำปะหลังและเส้นใยข้าวสาลีทำให้ค่าความหนาแน่นของโฟมจากแป้งมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการสะสมของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันในช่วงร้อยละ 0 ถึง 15.0 กับความหนาแน่นของโฟมย่อยสลายได้เมื่อปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และ PVA ร้อยละ 3.8

4.2.3 ผลการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าความทนแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

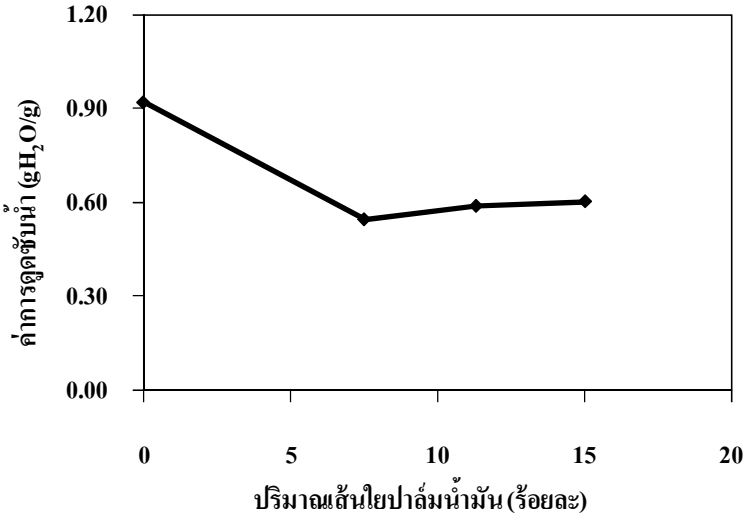
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันกับค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4.5 พบว่าการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 0, 7.5, 11.3 และ 15.0 จะได้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้มีค่าเป็น 0.654, 1.090, 1.194 และ 1.243 MPa ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความทนต่อแรงดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 15.0 จะให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งสูงสุดเท่ากับ 1.243 MPa การเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 7.5, 11.3 และ 15.0 ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งมีค่าไม่แตกต่างกันมาก แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ในกรณีที่ไม่มีการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันกับกรณีที่มีการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน พบว่า มีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเส้นใยปาล์มน้ำมันสามารถยึดเกาะตัวได้ดีกับโมเลกุลแป้ง เนื่องจากเส้นใยปาล์มน้ำมันและโมเลกุลแป้งมีโครงสร้างของเซลลูโลสที่เหมือนกัน เส้นใยจึงทำหน้าที่ในการเสริมแรงให้กับโฟมย่อยสลายได้ โฟมที่ได้จึงมีความแข็งแรงขึ้นสามารถรับแรงดัดได้มากขึ้น ดังนั้นการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันในโฟมย่อยสลายได้จึงมีผลทำให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้มีค่าสูงขึ้น ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ มีค่าใกล้เคียงกับโฟม Expanded Polystyrene (EPS) ซึ่งมีค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง 1.3 MPa ดังนั้นชิ้นงานที่ผลิตได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้แทนโฟม EPS ได้



ภาพประกอบที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันในช่วงร้อยละ 0 ถึง 15 กับค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้เมื่อปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และ PVA ร้อยละ 3.8

4.2.4 ผลการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันกับค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4.6 พบว่าการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 0, 7.5, 11.3 และ 15.0 จะให้ค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้มีค่าเป็น 0.92, 0.55, 0.59 และ 0.60 กรัมน้ำต่อกรัมตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 7.5, 11.3 และ 15.0 ค่าการดูดซับน้ำจะมีค่าใกล้เคียงกันมากแสดงว่าการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 7.5 เหมาะสมต่อค่าการผลิตชิ้นงานในการทดลองนี้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมย่อยสลายได้ที่ไม่มีการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน พบว่า ค่าการดูดซับน้ำจะมีค่าสูงกว่าโฟมที่มีการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันในโฟมย่อยสลายได้นั้นส่งผลทำให้ความหนาแน่นของโฟมมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากเส้นใยปาล์มน้ำมันจะสะสมอยู่ในโฟมมากขึ้น โครงสร้างภายในของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้จะอยู่ชิดกันมากขึ้นดังภาพโครงสร้างสัณฐานของโฟมในภาพประกอบที่ 4.2 ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนไหวเข้าไปในโครงสร้างภายในของชิ้นงานได้น้อยลง ส่งผลให้การเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันช่วยลดค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานได้



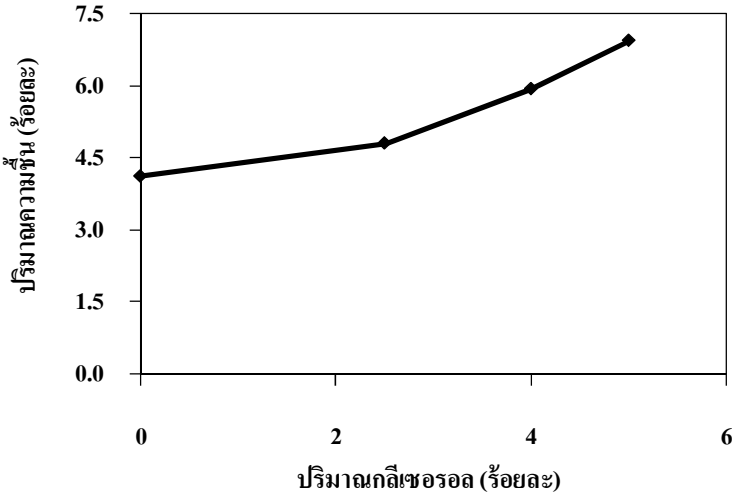
ภาพประกอบที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันในช่วงร้อยละ 0 ถึง 15.0 กับค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ เมื่อปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และ PVA ร้อยละ 3.8

4.3 ผลของการเติมกลีเซอรอลต่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้

สารพลาสติกไซเซอร์เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการอ่อนตัวและเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิเมอร์ เช่น โพรไพลีนไกคอล (Propylene Glycol) ซอร์บิทอล (Sorbitol) และกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นต้น งานวิจัยนี้สนใจนำกลีเซอรอลมาเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ในกระบวนการผลิตโฟมย่อยสลายได้ เนื่องจากชิ้นงานโฟมที่มีแป้งเป็นวัตถุดิบหลักมีความเปราะง่าย จึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติของโฟมย่อยสลายได้ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยกลีเซอรอลมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นที่ดีให้กับพอลิเมอร์ เป็นที่นิยม หาซื้อง่าย และราคามีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ปริมาณกลีเซอรอลที่ทำการศึกษาได้แก่ ร้อยละ 0, 2.5, 4.0 และ5.0 ที่ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และปริมาณ PVA ร้อยละ 3.8 โดยทำการศึกษาผลของการเติมกลีเซอรอลกับคุณสมบัติของโฟมย่อยสลายได้ซึ่งประกอบไปด้วย ความชื้น ค่ายืดตัว ณ จุดขาด ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง และค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงาน

4.3.1 ผลของการเติมกลีเซอรอลต่อปริมาณความชื้นของโฟมย่อยสลายได้

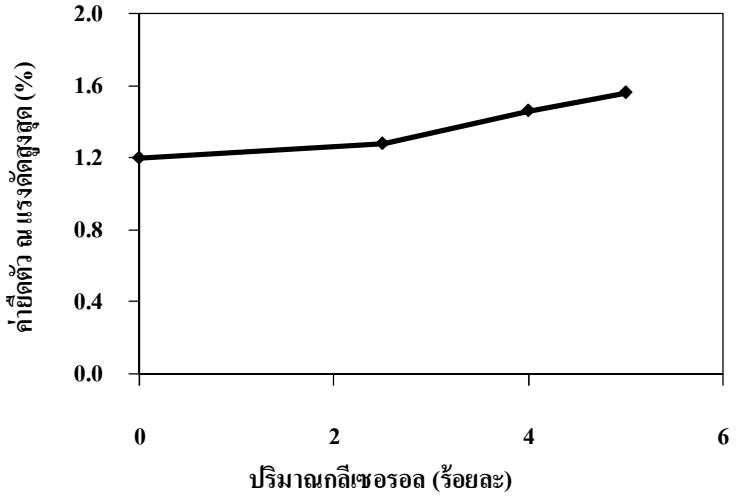
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลีเซอรอลกับปริมาณความชื้นของโฟมย่อยสลายได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4.7 จากผลการทดลองพบว่าโฟมย่อยสลายได้ที่มีการเติมกลีเซอรอลร้อยละ 0, 2.5, 4.0 และ 5.0 มีค่าความชื้นเป็นร้อยละ 4.12, 4.80, 5.93 และ 6.93 ตามลำดับ โดยค่าความชื้นมีค่าสูงสุด คือ ร้อยละ 6.93 ที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 5 แสดงได้ว่าเมื่อปริมาณของกลีเซอรอลซึ่งเป็นตัวพลาสติกไซเซอร์เพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณความชื้นในแผ่นโฟมย่อยสลายได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Preechawong *et al*, (2004) ได้รายงานว่าปริมาณของพลาสติกไซเซอร์มีผลต่อความชื้นของโฟมจากแป้ง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์ไม่ว่าจะเป็นกลีเซอรอล ยูเรีย หรือแอมโมเนียมคลอไรด์ทำให้ปริมาณความชื้นในโฟมมากขึ้นด้วย เนื่องจากสารพลาสติกไซเซอร์ที่เติมลงไปจะไปทำลายแรงยึดเกาะกันของพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลแป้ง ทำให้โมเลกุลแป้งจับตัวกันอย่างหลวมมากขึ้น ความชื้นที่มีอยู่ในอากาศจึงเข้าไปแทรกตัวได้มากขึ้น



ภาพประกอบที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมกลีเซอรอลในช่วงร้อยละ 0 ถึง 5.0 กับปริมาณความชื้นของโฟมย่อยสลายได้ เมื่อปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และ PVA ร้อยละ 3.8

4.3.2 ผลของการเติมกลีเซอรอลต่อค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดของโฟมย่อยสลายได้

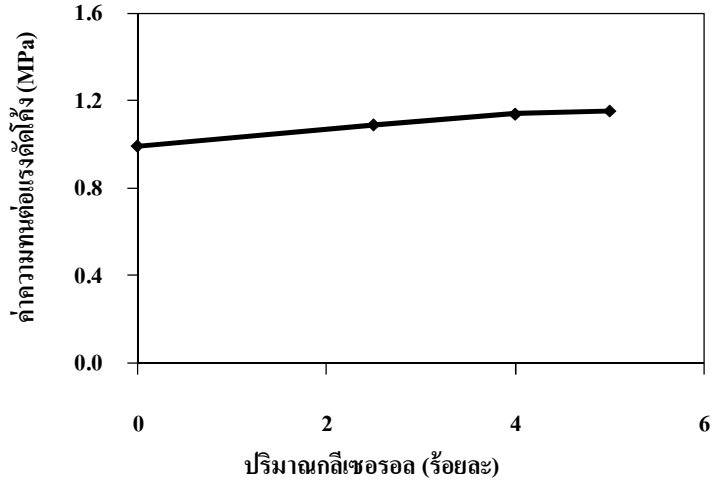
ค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดหรือมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) เป็นค่าบอกระดับความแข็งเกร็ง ความสามารถคงรูป (Stiffness) ของวัสดุก่อนวัสดุเกิดการเสียรูป ภาพประกอบที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลีเซอรอลกับค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดของโฟมย่อยสลายได้ จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 0, 2.5, 4.0 และ 5.0 จะได้ค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดของโฟมย่อยสลายได้เป็นร้อยละ 1.2, 1.28, 1.46 และ 1.56 ตามลำดับ โฟมย่อยสลายได้มีค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 2.5 และค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2.5 ถึง 5.0 ซึ่งที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 5 จะให้ค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดเป็น 1.56% เนื่องจากกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารพลาสติกไซเซอร์มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้โฟมย่อยสลายได้ สารพลาสติกไซเซอร์จะเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลแป้งและทำลายพันธะไฮโดรเจนที่ยึดเกาะกันของโมเลกุลแป้งทำให้แรงในการยึดเกาะกันลดลง สายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่าย ส่งผลให้โฟมย่อยสลายได้ที่มีการเติมกลีเซอรอลสามารถยืดตัวได้มากกว่าโฟมย่อยสลายได้ที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล ดังการเติมกลีเซอรอลจึงมีผลต่อการเพิ่มค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดของโฟมย่อยสลายได้



ภาพประกอบที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลีเซอรอลในช่วงร้อยละ 0 ถึง 5 กับค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดของโฟมย่อยสลายได้ เมื่อปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และ PVA ร้อยละ 3.8

4.3.3 ผลของการเติมกลีเซอรอลต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมกลีเซอรอลกับค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4.9 จากผลการทดลองพบว่าการเติมกลีเซอรอลร้อยละ 0, 2.5, 4.0, และ 5.0 จะให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของชิ้นงานเป็น 0.993, 1.090, 1.140, และ1.154 ตามลำดับ ซึ่งค่าความทนต่อแรงดัดโค้งที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าการเติมปริมาณกลีเซอรอลที่ร้อยละ 5.0 ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งมีค่าสูงสุด จากการศึกษางานวิจัยของรัตนา (2547) พบว่าค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของคอมโพสิทโฟมมีค่าสูงที่สุดเมื่อมีการเติม กลีเซอรอลที่ร้อยละ 5.0 แต่เมื่อทำการเติมปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของคอมโพสิทโฟมมีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องมาจากกลีเซอรอลที่เติมเพื่อเป็นสารพลาสติกไซเซอร์นั้นจะเข้าไปแทรกตัวทำลายพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลเม็ดแป้งทำให้การยึดเกาะของโมเลกุลแป้งลดลงความแข็งแรงของชิ้นงานจึงมีค่าลดลงด้วย



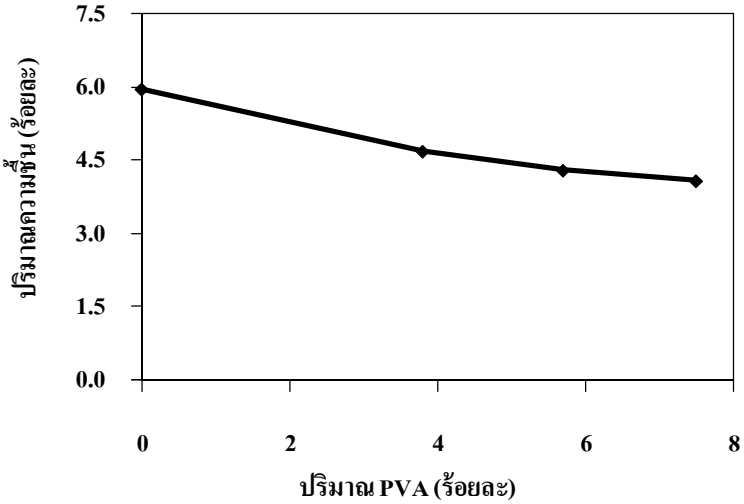
ภาพประกอบที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกลีเซอรอลในช่วงร้อยละ 0 ถึง 5 กับค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ เมื่อปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และ PVA ร้อยละ 3.8

4.4 ผลของการเติม PVA ต่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) และสามารถเข้ากันได้ดีกับน้ำ ดังนั้นโฟมที่มีแป้งเป็นวัตถุดิบหลักจึงมีความไวต่อน้ำและความชื้นทำให้โฟมจากแป้งมีข้อจำกัดในการใช้งาน เมื่อปริมาณความชื้นมากขึ้นโฟมจากแป้งอาจเกิดการเสียรูปทรงได้ง่าย ความชื้นสัมพันธ์ในอากาศที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้นของโฟมจากแป้งสูงขึ้นด้วย (Soykeabkaew *et al*, 2004) จากงานวิจัยของ Shogren *et al*, (2002) พบว่า PVA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูงและไม่ละลายตัวในน้ำเย็น การเติม PVA ลงในโฟมจากแป้งจะทำให้ค่าการดูดซับน้ำของโฟมจากแป้งมีค่าลดลง งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของการเติม PVA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้เป็นสารปรับปรุงคุณสมบัติของโฟมย่อยสลายได้ ปริมาณ PVA ที่ทำการศึกษาได้แก่ ร้อยละ 0, 3.8, 5.7 และ 7.5 ที่ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 โดยทำการศึกษาผลของการเติม PVA กับคุณสมบัติของโฟมย่อยสลายได้ซึ่งประกอบไปด้วย ความชื้น ค่ายืดตัว ณ จุดขาด ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง และค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงาน

4.4.1 ผลของการเติม PVA ต่อปริมาณความชื้นของโฟมย่อยสลายได้

ภาพประกอบที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PVA ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 7.5 กับปริมาณความชื้นของโฟมย่อยสลายได้ เก็บชิ้นงานเป็นเวลา 2 วัน จากผลการทดลองพบว่าโฟมย่อยสลายได้ที่มีการเติมปริมาณ PVA ร้อยละ 0, 3.8, 5.7 และ 7.5 มีค่าความชื้นเป็นร้อยละ 5.94, 4.68, 4.29 และ 4.08 โดยที่ PVA ร้อยละ 7.5 มีค่าปริมาณความชื้นต่ำสุดเป็นร้อยละ 4.08 ซึ่งปริมาณความชื้นในโฟมย่อยสลายได้จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ PVA มากขึ้นเนื่องจาก PVA เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่ละลายน้ำในอุณหภูมิปกติ ชิ้นงานจึงดูดความชื้นได้น้อยลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ ฉัตติฐพล (2552) ที่พบว่าเมื่อปริมาณ PVA จากร้อยละ 0 ถึง 15.0 ทำให้ค่าความชื้นของโฟมจากแป้งมีค่าลดลงจากร้อยละ 9.66 เป็น 5.77 ดังนั้นปริมาณ PVA ที่ทำให้ความแตกต่างระหว่างปริมาณความชื้นที่เวลาการเก็บ 2 วันกับความชื้นเริ่มต้นน้อยที่สุดคือ ร้อยละ 7.5

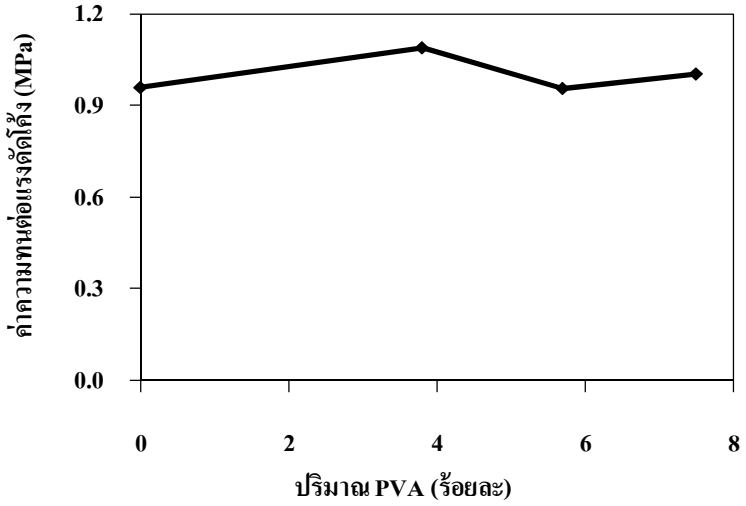


ภาพประกอบที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PVA ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 7.5 กับปริมาณความชื้นของโฟมย่อยสลายได้ เมื่อปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และกลีเซอรอลร้อยละ 2.5

4.4.2 ผลของการเติม PVA ต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

ภาพประกอบที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้กับปริมาณการเติม PVA พบว่าการเติม PVA ที่ร้อยละ 0, 3.8, 5.7 และ 7.5 จะให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของชิ้นงานมีค่าไม่แตกต่างกัน คือ 0.958, 1.090, 0.955, และ 1.003 MPa ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากช่วงของ PVA ที่ใช้เติมในการผลิตโฟมย่อยสลายได้นั้นมีค่าไม่แตกต่างกันมากที่จะส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง ซึ่งจากงานวิจัยของรัตนา (2007) พบว่าการเติม

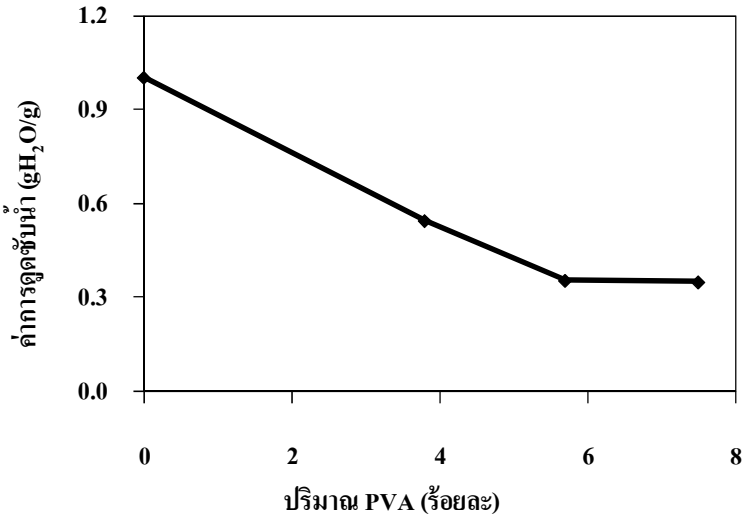
PVA ในช่วงร้อยละ 0-10.0 จะได้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งที่ไม่แตกต่างกันมากแต่เมื่อทำการพิจารณาการเติม PVA ที่ช่วงร้อยละ 10.0-30.0 พบว่าค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของคอมโพสิทโฟมจะมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจนและสามารถอธิบายได้ว่าการเติม PVA จะส่งผลทำให้คอมโพสิทโฟมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ PVA มีค่าสูงๆ



ภาพประกอบที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PVA ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 7.5 กับค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ เมื่อปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และกลีเซอรอลร้อยละ 2.5

4.4.3 ผลของการเติม PVA ต่อค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้กับปริมาณ PVA แสดงดังภาพประกอบที่ 4.12 พบว่าการเติม PVA ที่ร้อยละ 0, 3.8, 5.7 และ 7.5 จะให้ค่าการดูดซับน้ำเป็น 1.00, 0.55, 0.36, และ0.35 กรัมน้ำต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าการดูดซับน้ำมีค่าลดลงเมื่อมีการเติม PVA มากขึ้น ผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shogren *et al,* (2002) ซึ่งรายงานว่า PVA เป็น พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูงและไม่ละลายตัวในน้ำเย็นจึงทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณการเติม PVA ค่าการดูดซับน้ำของโฟมจากแป้งจึงมีค่าลดลง และงานวิจัยของรัตนา (2007) ที่ให้ผลที่คล้ายคลึงกันคือการเติม PVA ในปริมาณร้อยละ 0-30.0 ในคอมโพสิทโฟมค่าการดูดซับน้ำที่ได้จะมีค่าลดลง



ภาพประกอบที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ PVA ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 7.5 กับค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ เมื่อปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และกลีเซอรอลร้อยละ 2.5

4.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตโฟมย่อยสลายได้

เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและหาจุดที่เหมาะสมในกระบวนการ ซึ่ง RSM ประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยจะใช้เพื่อการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) เป็นการออกแบบการทดลองทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจาก Center ของ Design เท่ากันและทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 5 ระดับ ($-\alpha$, -1, 0, 1,α) งานวิจัยนี้จึงนำเทคนิค RSM แบบ CCD มาใช้ในการศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองการผลิตโฟมย่อยสลายได้

4.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

จากการศึกษาสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้โดยใช้หลักการทางสถิติด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD มาช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งทำให้ได้จำนวนการ

ทดลองที่ประกอบไปด้วย 19 การทดลอง ค่าความทนแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ที่ได้จากการทดลองในแต่ละการทดลองแสดงผลดังตารางที่ 4.1 เมื่อนำผลการทดลองทำการวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (x) ที่ทำการศึกษาซึ่งประกอบไปด้วย ปริมาณเส้นใย ปริมาณกลีเซอรอล และปริมาณ PVA ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม (y) คือ ค่าความทนแรงดัดโค้งโดยใช้ Essential Regression ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จะได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ของความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้แสดงดังสมการที่ 4.1 โดย R^2 มีค่าเท่ากับ 0.935 มีรูปแบบสมการแบบ Quadratic model

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้จากออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

การทดลองที่	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ)	ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)	ปริมาณ PVA (ร้อยละ)	ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง (MPa)
1	15.9	12.0	6.0	1.772
2	20.0	7.5	3.8	2.095
3	4.1	12.0	6.0	0.767
4	15.9	3.0	6.0	1.373
5	0.0	7.5	3.8	0.612
6	10.0	7.5	3.8	1.146
7	10.0	7.5	7.5	1.152
8	10.0	7.5	3.8	1.110
9	4.1	12.0	1.5	0.683
10	10.0	7.5	0.0	0.950
11	15.9	3.0	1.5	1.250
12	10.0	15.0	3.8	1.018
13	10.0	7.5	3.8	1.144
14	10.0	0.0	3.8	0.990
15	15.9	12.0	1.5	1.408
16	4.1	3.0	1.5	0.755
17	4.1	3.0	6.0	0.791
18	7.5	4.0	3.8	1.140
19	7.5	5.0	3.8	1.154

$$y = 0.745 + 0.00184x_1^2 - 0.00304x_2^2 + 0.00354x_1x_2 + 0.00400x_2x_3 \quad (4.1)$$

โดย

$$0 \le x_1 \le 20, 0 \le x_2 \le 15, 0 \le x_3 \le 7.5$$

เมื่อ y = ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง (MPa)

x_1 = ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน (%)

x_2 = ปริมาณกลีเซอรอล (%)

x_3 = ปริมาณ PVA (%)

จากสมการที่ (4.1) แสดงผลของตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน ปริมาณกลีเซอรอล และปริมาณ PVA สามารถวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการที่ (4.1) ได้ด้วยวิธี ANOVA ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของการทดลองมีรูปแบบสมการเป็น Quadratic model

ANOVA						
Source	**SS**	**SS%**	**MS**	**F**	**F Signif**	**df**
Regression	2.257	93	0.564	50.18	3.78E-08	4
Residual	0.157	7	0.01125			14
Total	2.415	100				18

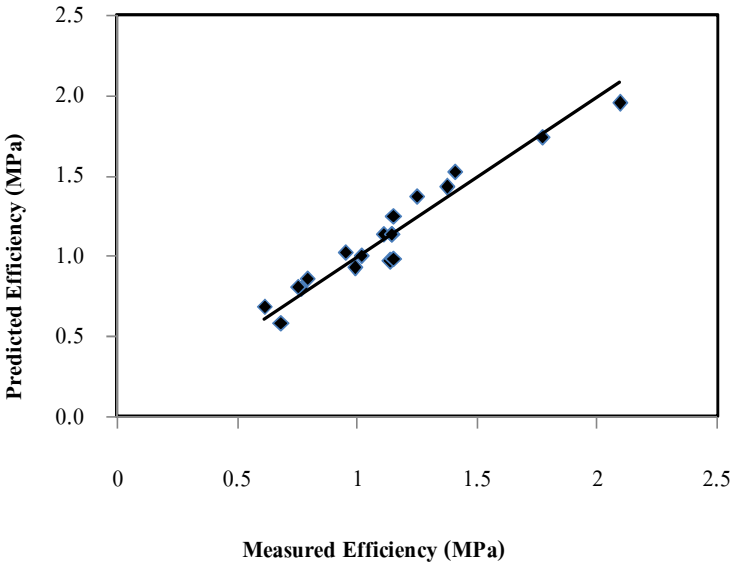
จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของการทดลอง พบว่าค่า F Significant ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 3.78E-08 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่ทำการศึกษามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง ส่วนค่า P value ในแต่ละเทอมของแบบจำลองมีค่าต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าเทอมนั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง ซึ่งยิ่งเป็นเทอมที่มีค่า P value ต่ำกว่า 0.05 มากๆ แสดงว่ายิ่งมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งมากด้วย เทอมที่มีค่า P value มากกว่า 0.05 จะทำการตัดทิ้ง จากตารางที่ 4.3 ค่า P value ที่ได้ในแต่ละเทอมมี

ค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญมากต่อความทนต่อแรงดัดโค้ง ซึ่งรายละเอียดในแต่ละเทอมของค่า P value แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

Coefficient		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	0.745	5.45762E-10	0.04991	0.638	0.852	14.92	
b1	0.00184	0.000936	0.000440	0.000893	0.00278	4.174	3.763
b2	-0.00304	0.00243	0.000824	-0.00480	-0.00127	-3.688	4.289
b3	0.00354	0.00622	0.00110	0.00118	0.00590	3.216	6.779
b4	0.00400	0.01966	0.00152	0.000743	0.00727	2.633	1.779

ค่า R^2 เป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการการประมาณการและยังเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ ค่า R^2 ที่มีค่ามากกว่า 0.75 เป็นค่าที่ยอมรับได้ โดยค่า R^2 ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1 จากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้มีค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.935 ที่ค่าความเชื่อมั่น 95% ส่วนค่า R^2_{adj} มีค่าเท่ากับ 0.916 โดยค่า R^2_{adj} และค่า R^2 ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่าค่า R^2_{adj} จะมีค่าต่ำกว่าค่า R^2 เนื่องจากค่า R^2_{adj} ได้จากการปรับค่าผลการทดลองและค่าจากแบบทดลองให้มีความสัมพันธ์กันมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเทอมในแต่ละเทอมของแบบจำลองจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของการทดลอง กล่าวคือเทอมในแต่ละเทอมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ย่อมมีผลอย่างมีนัยสำคัญและมีความน่าเชื่อถือต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ กราฟแสดงค่าความทนต่อแรงดัดโค้งที่ได้จากผลการทดลองและค่าจากการทำนายผลของแบบจำลองแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4.13



ภาพประกอบที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความทนต่อแรงดัดโค้งระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายของแบบจำลอง

ภาพประกอบที่ 4.13 แสดงถึงความสัมพันธ์ของความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายโดยใช้สมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4.1) ซึ่งข้อมูลที่ได้มีค่าการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน ข้อมูลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษากับค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

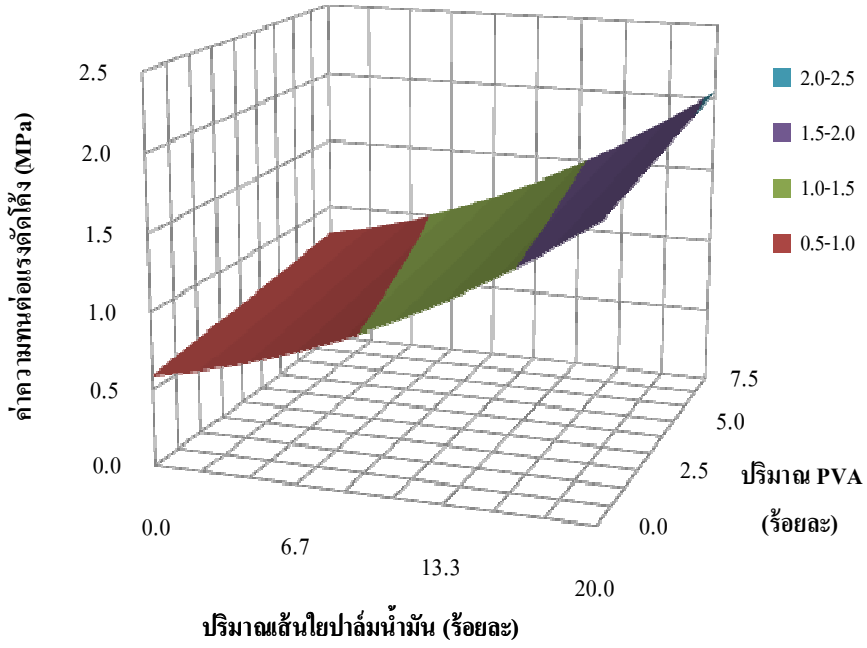
4.5.2 พื้นผิวตอบสนองผลของตัวแปรต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อนำผลมาแสดงความสัมพันธ์ของค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ในรูปของกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) สามารถพิจารณาสร้างกราฟพื้นผิวที่แสดงผลของตัวแปรอิสระครั้งละ 2 ตัวแปร คือ ปริมาณของเส้นใยปาล์มน้ำมันและ PVA และ ปริมาณ PVA และกลีเซอรอล ต่อตัวแปรตามซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.5.2.1 ผลของปริมาณของเส้นใยปาล์มน้ำมันและ PVA ต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

ผลของปริมาณของเส้นใยปาล์มน้ำมันและ PVA ต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้เมื่อนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปของกราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงผลการ

ทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 4.14 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PVA ในโฟมย่อยสลายได้จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร x_1x_3 ในสมการ 4.1 ซึ่งมีค่าเป็นบวก คือ 0.00335 เนื่อง PVA เป็นสารเติมแต่งที่เติมลงไปในโฟมย่อยสลายเพื่อปรับปรุงการยึดเกาะกันของโมเลกุลแป้ง โดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงส่งผลให้โฟมย่อยสลายได้มีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shogren *et al,* (2002) รายงานว่าการเติม PVA ส่งผลต่อการปรับปรุงความแข็งแรงของโฟมจากแป้งให้มีค่าสูงขึ้น



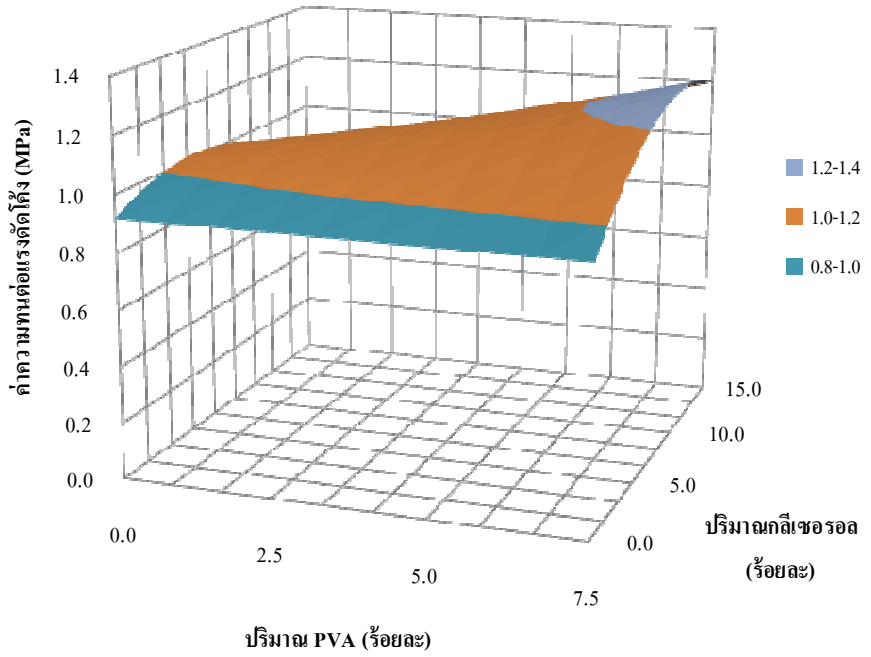
ภาพประกอบที่ 4.14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเส้นใยปาล์มน้ำมันและ PVA ที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

การเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันในปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร x_1 ในทุกเทอมของสมการที่ 4.1 ซึ่งมีค่าเป็นบวก เนื่องจากเส้นใยปาล์มน้ำมันสามารถยึดเกาะตัวได้ดีกับแป้งเส้นใยจึงทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรงและเป็นตัวเชื่อมโยงให้กับแป้งในโฟมย่อยสลายได้ ดังนั้นโฟมย่อยสลายได้ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นจึงสามารถรับแรงดัดโค้งได้เพิ่มขึ้น ผลที่ได้พบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lawton *et al,* (2004) ซึ่งได้รายงานว่าเมื่อเติมเส้นใยแอสเพน (Aspen) ลงในโฟมจากแป้งข้าวโพด พบว่า ค่าความแข็งแรงของโฟมจากแป้งมี

ค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย แต่เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มสูงกว่า 30% พบว่าค่าความแข็งแรงของโฟมจากแป้งมีค่าลดลงเนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่มีรูปแบบจึงทำให้เส้นใยไม่สามารถช่วยในการเสริมแรงได้ความแข็งแรงของโฟมจากแป้งจึงมีค่าลดลง และงานวิจัยของ บำรุง (2550) ได้รายงานว่าการเติมผงขี้เลื่อยไม้ยางพาราในช่วงร้อยละ 0-25 พบว่าค่าการทนต่อแรงดัดสูงสุดของโฟมแป้งมีค่าสูงขึ้น

4.4.2.2 ผลของปริมาณของ PVA และกลีเซอรอลต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

ผลความสัมพันธ์ของปริมาณของ PVA และกลีเซอรอลต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้ เมื่อนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปแบบของกราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงผลการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 4.15 พบว่าเมื่อปริมาณ PVA เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้มีค่าสูงขึ้น สอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร x_1x_3 ในสมการ 4.1 ซึ่งมีค่าเป็นบวก เนื่องจาก PVA เป็นสารเติมแต่งที่เติมลงไปในโฟมย่อยสลายเพื่อปรับปรุงการยึดเกาะกันของโมเลกุลแป้ง โดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงส่งผลให้โฟมย่อยสลายได้มีค่าความทนต่อแรงดัดโค้งสูงขึ้น ผลที่ได้จึงสอดคล้องกับงานวิจัยของ รัตนา (2547) ซึ่งได้รายงานว่าการเติมพอลิเมอร์สังเคราะห์ลงไปในโฟมจากแป้งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน และงานวิจัยของ Shogren *et al*, (2002) รายงานว่าการเติม PVA ส่งผลต่อการปรับปรุงความแข็งแรงของโฟมจากแป้งให้มีค่าสูงขึ้น ส่วนเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 0-5 จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณกลีเซอรอลมากกว่าร้อยละ 5 ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมลงไปเพื่อเป็นตัวพลาสติกไซเซอร์จะแทรกเข้าไปในเนื้อแป้งและเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลแป้งทำให้ความแข็งแรงของโฟมลดลง ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ รัตนา (2547) ได้รายงานว่า เมื่อปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 5 จะทำให้ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งงอของโฟมจากแป้งมีค่าสูงสุด แต่เมื่อปริมาณกลีเซอรอลมากกว่าร้อยละ 5 ค่าการทนต่อแรงดัดโค้งงอของโฟมจากแป้งจะมีค่าลดลง



ภาพประกอบที่ 4.15 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของปริมาณ PVA และกลีเซอรอล ที่มีผลต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้

4.5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้

จากการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้โดยใช้หลักทางสถิติด้วยเทคนิค RSM (แบบ CCD) มาช่วยในการออกแบบการทดลอง ค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ที่ได้จากการทดลองแสดงผลดังตารางที่ 4.4 เมื่อผลการทดลองทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (x) ที่ทำการศึกษาซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณเส้นใย ปริมาณกลีเซอรอล และปริมาณ PVA ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม (y) คือ ค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ โดยใช้โปรแกรม Essential regression ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้แสดงดังสมการที่ (4.2) โดยค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.826 มีรูปแบบสมการแบบ Quadratic model

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ซึ่งออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

การทดลองที่	ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ)	ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)	ปริมาณ PVA (ร้อยละ)	ค่าการดูดซับน้ำ (gH_2O/g)
1	15.9	12.0	6.0	0.52
2	20.0	7.5	3.8	0.73
3	4.1	12.0	6.0	0.44
4	15.9	3.0	6.0	0.46
5	0.0	7.5	3.8	0.72
6	10.0	7.5	3.8	0.46
7	10.0	7.5	7.5	0.35
8	10.0	7.5	3.8	0.48
9	4.1	12.0	1.5	0.48
10	10.0	7.5	0.0	0.74
11	15.9	3.0	1.5	0.94
12	10.0	15.0	3.8	0.57
13	10.0	7.5	3.8	0.49
14	10.0	0.0	3.8	0.92
15	15.9	12.0	1.5	0.59
16	4.1	3.0	1.5	0.76
17	4.1	3.0	6.0	0.43
18	7.5	4.0	3.8	0.38
19	7.5	5.0	3.8	0.42

$$y = 1.400 - 0.03817x_1 - 0.110x_2 - 0.119x_3 + 0.00223x_1^2 + 0.00405x_2^2 + 0.00885x_2x_3 \quad (4.2)$$

โดย

$$0 \leq x_1 \leq 20, 0 \leq x_2 \leq 15, 0 \leq x_3 \leq 7.5$$

เมื่อ y = ค่าความทนแรงดัดโค้ง (MPa)

x_1 = ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน (%)

x_2 = ปริมาณกลีเซอรอล (%)

x_3 = ปริมาณ PVA (%)

จากสมการที่ (4.2) แสดงผลของตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการที่ (4.2) ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของการทดลองมีรูปแบบสมการเป็น Quadratic model

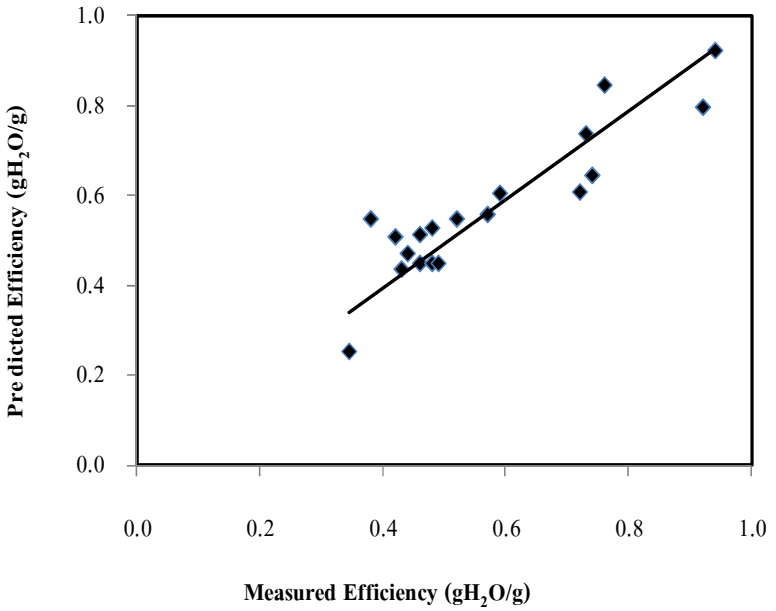
ANOVA						
Source	**SS**	**SS%**	**MS**	**F**	**F Signif**	**df**
Regression	0.469	83	0.07813	9.465	0.000571	6
Residual	0.09905	17	0.00825			12
Total	0.568	100				18

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของการทดลองพบว่าค่า F Significant ของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 0.000571 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่ทำการศึกษามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับน้ำ ค่า P value ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่า 0.05 และเมื่อพิจารณาแต่ละเทอมพบว่าค่า P value มีค่าต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าแต่ละเทอมนั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ ซึ่งรายละเอียดของค่า P value ในแต่ละเทอม แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลทางสถิติการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้

Coefficient		P value	Std Error	-95%	95%	t Stat	VIF
b0	1.400	4.65829E-07	0.143	1.087	1.712	9.759	
b1	-0.03817	0.02484	0.01489	-0.07061	-0.00573	-2.564	13.27
b2	-0.110	0.000532	0.02347	-0.161	-0.05872	-4.681	19.23
b3	-0.119	0.000785	0.02662	-0.177	-0.06061	-4.455	5.830
b4	0.00223	0.00837	0.000708	0.000688	0.00378	3.150	13.30
b5	0.00405	0.00808	0.00128	0.00127	0.00684	3.169	14.08
b6	0.00885	0.01793	0.00323	0.00181	0.01589	2.740	10.94

ผลจากแบบจำลองจะได้ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.826 และค่า R^2_{adj} มีค่าเท่ากับ 0.738 โดยจะเห็นได้ว่าค่า R^2 และค่า R^2_{adj} ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือเทอมในแต่ละเทอมของการแบบจำลองย่อมมีผลอย่างมีนัยสำคัญและมีความน่าเชื่อถือต่อค่าประสิทธิภาพของค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ ค่าแนวโน้มของแบบจำลองแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4.16



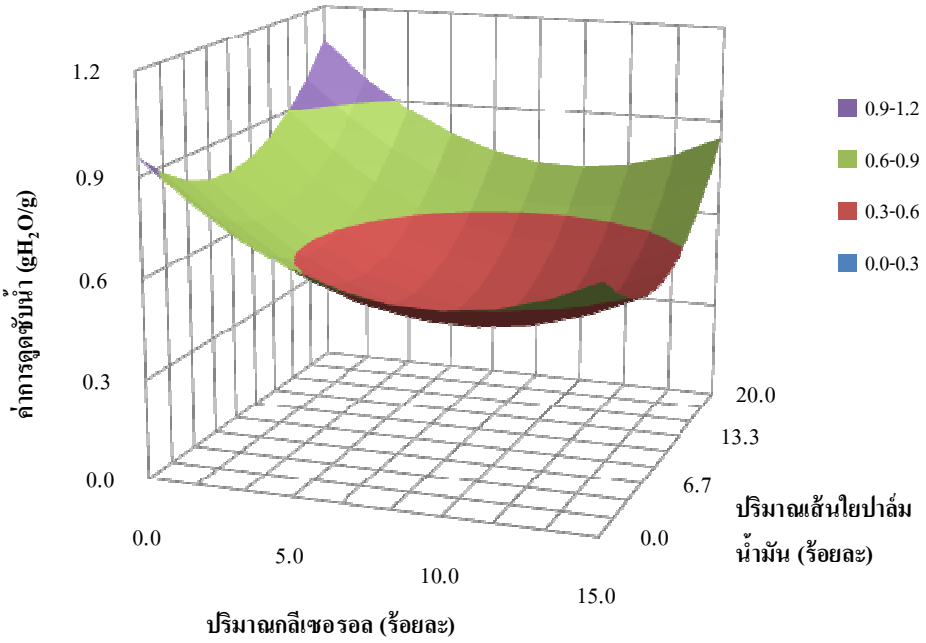
ภาพประกอบที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายของแบบจำลอง

ภาพประกอบที่ 4.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ของการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้โดยค่าได้จากการทดลองและจากการทำนายโดยใช้สมการที่ได้จากแบบจำลองในสมการที่ 4.2 ซึ่งข้อมูลที่ได้มีค่าการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของความการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้กับค่าตัวแปรต่างๆที่ทำการศึกษาสามารถแสดงได้ด้วยกราฟพื้นผิวตอบสนอง

4.5.4 พื้นผิวตอบสนองผลของตัวแปรต่อค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้

4.5.4.1 ผลของปริมาณกลีเซอรอลและปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้

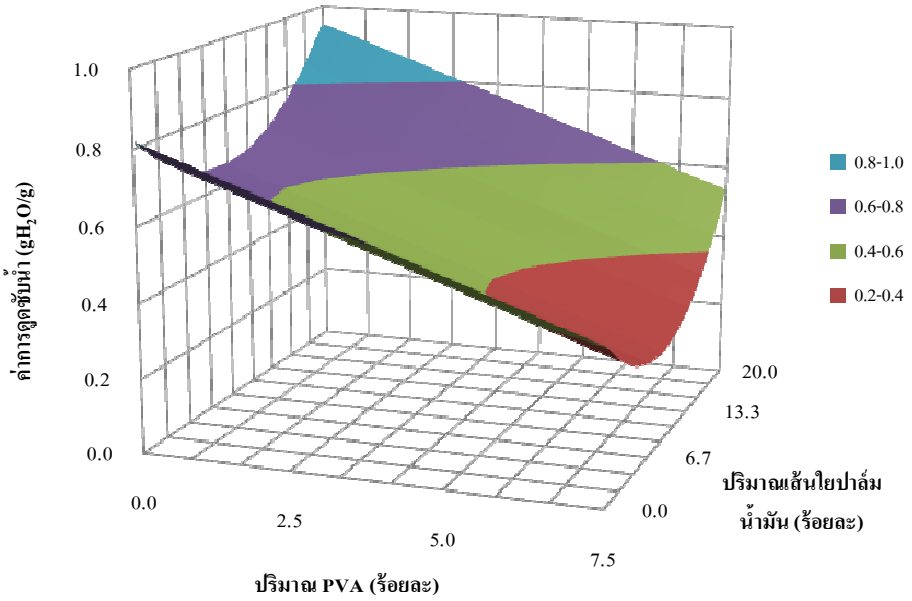
ผลความสัมพันธ์ของปริมาณกลีเซอรอลและปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ เมื่อนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปแบบของกราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงผลการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 4.17 โดยแสดงผลของตัวแปรในการดำเนินการ คือ ปริมาณกลีเซอรอลและเส้นใยปาล์มน้ำมัน เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลในช่วงร้อยละ 0-5.0 จะให้ค่าการดูดซับน้ำที่ลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลมากกว่าร้อยละ 5 ค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมลงไปเพื่อเป็นตัวพลาสติกไซเซอร์จะแทรกเข้าไปในเนื้อแป้งและเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลแป้งทำให้โมเลกุลแป้งเกิดการเคลื่อนตัวอย่างอิสระ น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างโมเลกุลได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันในช่วงร้อยละ 0-10.0 ค่าการดูดซับน้ำจะลดลงเนื่องจากโครงสร้างของโฟมย่อยสลายได้ที่มีความหนาแน่นมากขึ้นทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปในโมเลกุลแป้งได้ยากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 ค่าการดูดซับน้ำจะสูงขึ้นเนื่องจากโครงสร้างการกระจายตัวของเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำของโฟมสูงขึ้น



ภาพประกอบที่ 4.17 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของปริมาณกลีเซอรอลและเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีผลต่อค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้

4.5.4.2 ผลของปริมาณ PVA และปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้

ผลของปริมาณ PVA และปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปของกราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงผลการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 4.18 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติมปริมาณ PVA ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 7.5 จะส่งผลต่อค่าการดูดซับน้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shogren *et al*, (2002) ที่ได้รายงานว่าการเติม PVA ในโฟมจากแป้งในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่าการดูดซับน้ำของโฟมจากแป้งมีค่าลดลง เนื่องจาก PVA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์มีความเป็นผลึกสูงและไม่ละลายในน้ำเย็นจึงทำให้โฟมจากแป้งมีค่าการดูดซับน้ำที่ลดลง สำหรับผลของปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันพบว่า ค่าการดูดซับน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0-8



ภาพประกอบที่ 4.18 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของปริมาณ PVA และเส้นใยปาล์มน้ำมันที่มีผลต่อค่าการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้

4.5.5 การหาค่าสภาวะดำเนินการที่เหมาะสมและสภาวะที่เหมาะสม (Optimum Condition) ของโฟมย่อยสลายได้

การหาค่าสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมของตัวแปรดำเนินการต่างๆ สำหรับการผลิตโฟมย่อยสลายได้ เพื่อให้ได้สภาวะที่ชิ้นงานสามารถรับค่าความทนต่อแรงดัดโค้งสูงสุดได้ ทำได้โดยกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) คือ ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งสูงสุดของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ และอสมการข้อจำกัด (Constrains) ประกอบด้วย ซึ่งกำหนดขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละตัวแปรปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน กลีเซอรอล และ PVA ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยโปรแกรม Solver จะทำการวิเคราะห์ผลค่าความทนต่อแรงดัดโค้งสูงสุดของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ตามขอบเขตของตัวแปรที่มีผลต่อฟังก์ชันเป้าหมาย ได้สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสมปริมาณเส้นใยร้อยละ 20 กลีเซอรอลร้อยละ 15 และ PVA ร้อยละ 7.5

ตารางที่ 4.7 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) และขอบเขต (Boundary Limit) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้

Objective function	$Max\ f(x) = x_0/x_4$
Subject to	$x_0 = 0.745 + 0.00184x_1^2 - 0.00304x_2^2 + 0.00354x_1x_2 + 0.00400x_1x_3$ $x_4 = 1.400 - 0.03817x_1 - 0.110x_2 - 0.119x_3 + 0.00223x_1^2 + 0.00405x_2^2 + 0.00885x_2x_3$
	Boundary limit
	$0 \leq x_1 \leq 20$
	$0 \leq x_2 \leq 15$
	$0 \leq x_3 \leq 7.5$

โดย x_0 = ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง (MPa)

x_1 = ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน (%)

x_2 = ปริมาณกลีเซอรอล (%)

x_3 = ปริมาณ PVA (%)

x_4 = ค่าการดูดซับน้ำ (gH_2O/g)

4.5.6 การทดสอบสภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อทำการผลิตโฟมย่อยสลายได้ และเพื่อต้องการยืนยันว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองนั้นสามารถใช้ทำนายค่าความทนต่อแรงดัดโค้งและค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ด้วยโปรแกรม Solver แสดงการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมดัง ภาคผนวก ค. ค่าสภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.8 สภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 11.2 กลีเซอรอลร้อยละ 6.1 และ PVA ร้อยละ 7.5 จากนั้นทำการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อยืนยันผลที่ได้จากแบบจำลอง

ตารางที่ 4.8 สภาวะดำเนินการที่เหมาะสมของโฟมย่อยสลายได้ต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งจากโปรแกรม Solver และจากการทดลอง

ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ)	ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)	ปริมาณ PVA (ร้อยละ)	ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง (MPa)		ค่าการดูดซับน้ำ (gH_2O/g)	
			จากโปรแกรม	จากการทดลอง	จากโปรแกรม	จากการทดลอง
11.20	6.10	7.50	1.29	1.23	0.25	0.26

จากสภาวะที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อผลการทดลองและผลจากการทำนายด้วยโปรแกรม Solver ไปคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อน 4.3% ดังนั้นสมการแบบจำลองที่แสดงด้วยสมการ (4.1 และ 4.2) มีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ทำนายผลความสัมพันธ์ของคุณสมบัติค่าความทนต่อแรงดัดโค้งและค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายในการการผลิตวัสดุย่อยสลายได้

4.6 การเคลือบชิ้นงานด้วยพาราฟิน แว๊กซ์

ชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ยังมีความไวต่อน้ำและความชื้น เนื่องจากแป้งมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงดูดซับน้ำได้ดี ทำให้เกิดการเสียรูปทรงของชิ้นงาน จึงมีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้พาราฟิน แว๊กซ์ เคลือบชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้เพื่อลดการดูดซับน้ำของชิ้นงาน โดยนำสภาวะที่เหมาะสมของโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 11.2 กลีเซอรอลร้อยละ 6.1 และ PVA ร้อยละ 7.5 มาทำการศึกษาการเคลือบพาราฟิน แว๊กซ์ เพื่อทำการศึกษาค่าความทนต่อแรงดัดโค้งและค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ ผลการเปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดัดโค้งและค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยพาราฟิน แว๊กซ์ แสดงดังตารางที่ 4.9

(ก)

(ข)

ภาพประกอบที่ 4.19 แสดงชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ (ก) ไม่เคลือบพาราฟิน แว๊กซ์ (ข) ชิ้นงานที่เคลือบด้วยพาราฟิน แว๊กซ์

ตารางที่ 4.9 สภาวะดำเนินการที่เหมาะสมของการเคลือบชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ด้วยพาราฟิน แว๊กซ์

ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง (MPa)		**ค่าการดูดซับน้ำ (กรัมน้ำต่อกรัม)**	
ไม่เคลือบ	**เคลือบ**	**ไม่เคลือบ**	**เคลือบ**
1.234	1.256	0.260	0.018

จากตารางที่ 4.9 แสดงการทดลองที่สภาวะดำเนินการที่เหมาะสมของชิ้นงานที่เคลือบด้วยพาราฟิน แว๊กซ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.19 โดยทำการศึกษาผลของค่าความทนต่อแรงดัดโค้งและค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงาน พบว่า ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าการต้านทานน้ำของชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงานที่เคลือบด้วยพาราฟิน แว๊กซ์มีความสามารถในการต้านทานน้ำได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดัดโค้งกับค่าการดูดซับน้ำ พบว่าพาราฟิน แว๊กซ์ มีผลต่อค่าการดูดซับน้ำมากกว่าค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง โดยชิ้นงานสามารถลดการดูดซับน้ำได้ถึง 93% โดยพาราฟิน แว๊กซ์จะไม่ละลายน้ำจึงมีความสามารถในการป้องกันน้ำเข้าสู่ชิ้นงานได้โดยตรง แสดงว่าพาราฟิน แว๊กซ์มีคุณสมบัติช่วยลดการดูดซับน้ำของโฟมย่อยสลายได้ดี

4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต (Economic analysis)

1. การประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟมย่อยสลายได้

การประมาณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในกระบวนผลิตโฟมย่อยสลายได้ ทำโดยการประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการ ประกอบด้วย เครื่องผสมอาหารและเครื่องอัดความดัน แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้ ตามตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟมย่อยสลายได้

อุปกรณ์ไฟฟ้า	**กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)**	**ระยะเวลาการใช้งาน (ชั่วโมง)**	**หน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)**
เครื่องผสมอาหาร	0.21	0.2	0.042
เครื่องอัดความดัน	12.5	1.78	22.22
อัตราการใช้ไฟฟ้า	22.264 (หน่วย)		

หมายเหตุ การคำนวณค่าไฟฟ้าเป็นการคำนวณต่อการผลิตชิ้นงาน 20 ชิ้น

ตารางที่ 4.11 อัตราค่าไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็ก ซึ่งมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยในเวลา 15 minสูงสุดต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2548)

อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)
150 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0 - 150)	1.80
250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 151 - 400)	2.78
เกิน 400 หน่วยขึ้นไป (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป)	2.98

$$\text{Cost} = W \times C \qquad (4.3)$$

เมื่อ C = ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

W = หน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

จากตารางที่ 4.10 ค่าการคำนวณอัตราการใช้ไฟฟ้าในการผลิตโฟมย่อยสลายได้ พบว่าในการผลิตโฟมย่อยสลายได้ 1 ชิ้นใช้อัตราการใช้ไฟฟ้าเป็น 1.13 หน่วย ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราค่าไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็กแสดงดังตารางที่ 4.11 พบว่าค่าพลังงานไฟฟ้า 150 หน่วยแรก มีค่าเป็น 1.8 บาทต่อหน่วย และเมื่อทำการคำนวณค่าไฟฟ้าดังสูตรที่ 4.3 จะได้ 22.264 x 1.8 = 2.00 บาท

2. การประมาณค่าวัตถุดิบทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟมย่อยสลายได้

วัตถุดิบทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตโฟมย่อยสลายได้ประกอบไปด้วย แป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล PVA และเส้นใยปาล์มน้ำมัน ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลของการคำนวณค่าวัตถุดิบทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตโฟมย่อยสลายได้ต่อ 1 ชิ้น

วัตถุดิบ	**ราคา (บาท/กิโลกรัม)**	**ปริมาณที่ใช้ (กรัม)**	**จำนวนเงิน (บาท)**
แป้งมันสำปะหลัง	16.7	25.75	0.430
กลีเซอรอล	3.2	2.09	0.007
PVA	55.3	2.57	0.142
เส้นใยปาล์มน้ำมัน	0.29	3.84	0.001
ราคารวม	0.58 บาท/ชิ้น		

จากผลการคำนวณค่าวัตถุดิบจะได้ราคาต้นทุนของผลิตภัณฑ์ราคา 0.58 บาท ต่อชิ้น โดยชิ้นงานมีปริมาตร 12.7cm x 12.7cm น้ำหนักเฉลี่ย 4.7 กรัม ทำการพิจารณาเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบต่อกรัมของชิ้นงาน คือ 0.12 บาทต่อกรัม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการผลิตโฟมย่อยสลายได้จากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 0-20.0 กลีเซอรอลร้อยละ 0-15.0 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ร้อยละ 0-7.5 โดยใช้แป้งมันสำปะหลังที่มีการผลิตมากในประเทศไทยเป็นวัตถุดิบหลัก ใช้กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ใช้ PVA เป็นสารเติมแต่ง ใช้เส้นใยปาล์มน้ำมันขนาดเล็กกว่า 0.595 mm ในการเสริมแรง และน้ำซึ่งเป็นตัวช่วยในการผสมส่วนประกอบทั้งหมดเข้าด้วยกัน อีกทั้งเมื่อน้ำได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการระเหย และแรงดันจากไอน้ำนี้จะไปทำให้เกิดช่องว่างภายในชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ชิ้นงานสามารถเกิดเป็นโฟมขึ้นมาได้ โดยมีขั้นตอนการเตรียมของผสมเริ่มจากการผสมวัตถุดิบข้างต้นเข้าด้วยกันในเครื่องผสม กวนจนเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 10 min จากนั้นชั่งของผสมที่ได้ 60 g ทำการอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์สแตนเลสรูปสี่เหลี่ยมขนาด 127 mm x 127 mm x 1.9 mm โดยจะใช้แผ่นไมลาร์รองแม่พิมพ์เพื่อป้องกันการเกาะติดของแม่พิมพ์กับชิ้นงาน อัดขึ้นรูปชิ้นงานโฟมที่อุณหภูมิ 170°C ความดัน 2,000 psig เป็นเวลา 5 min ทำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD เพื่อหาแบบจำลองการผลิตโฟมย่อยสลายได้และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติเชิงกลที่ประกอบด้วย ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง ค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุด และค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานได้ นำผลการทดลองที่ได้ไปทำ Regression Analysis จะทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่ศึกษาอันส่งผลต่อค่าตอบสนองของความทนแรงดัดโค้งและค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA เพื่อหาค่าความแปรปรวนของการทดลอง พบว่าตัวแปรอิสระที่ทำศึกษามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของชิ้นงานที่ความเชื่อมั่น 95% และหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้โดยการกำหนดฟังก์ชั่นเป้าหมาย (Objective function) และควบคุมตัวแปรดำเนินการตามขอบเขตสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละตัวแปรโดยใช้โปรแกรม Solver สำหรับการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตโฟมย่อยสลายได้ พบว่า ค่าสภาวะที่เหมาะสมของการ

ผลิตโฟมย่อยสลายได้ คือ ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 11.2 กลีเซอรอลร้อยละ 6.1 และ PVA ร้อยละ 7.5 ซึ่งให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งคือ 1.290 MPa และค่าการดูดซับน้ำคือ 0.250 gH_2O/g ผลจากการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมจะได้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งเท่ากับ 1.234 MPa ค่าการดูดซับน้ำ 0.260 gH_2O/g และค่าความหนาแน่น 0.14 g/cm^3 สีของโฟมมีสีน้ำตาลเข้ม การเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันช่วยในการเสริมแรงให้กับโฟมย่อยสลายได้และลดการดูดซับน้ำของชิ้นงาน โดยค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงค่าความหนาแน่นของโฟมพื้นฐานปิโตรเลียม จากการนำสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโฟมย่อยสลายได้ไปศึกษาการเคลือบด้วยพาราฟิน แว๊กซ์เพื่อลดการดูดซับน้ำของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานที่เคลือบด้วยพาราฟิน แว๊กซ์จะให้ค่าความทนต่อแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและให้ค่าการดูดซับน้ำที่ลดลง 93% ชิ้นงานที่ผลิตได้สามารถย่อยสลายได้และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทดแทนวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น ถาดโฟมบรรจุอาหารแห้ง แผ่นโฟม รองของที่ระลึก เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบการทดลองการผลิตโฟมย่อยสลายได้ด้วยโปรแกรม RSM ควรจะมีการปรับเปลี่ยนช่วงของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองให้กว้างขึ้น เช่น จากปริมาณเส้นใยร้อยละ 0-20 เพิ่มเป็น 0-30 เพื่อดูแนวโน้มคุณสมบัติที่ดีขึ้นของชิ้นงานที่ได้

2. เนื่องจากชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ได้จากการทดลองยังมีข้อจำกัดทางด้านการใช้งานกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นความชื้นในปริมาณมาก จึงควรมีการศึกษาสารเติมแต่งที่มีคุณสมบัติในการทนต่อน้ำเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายยิ่งขึ้น

3. ค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานยังมีค่าค่อนข้างสูง ควรมีการพัฒนาการออกแบบชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมต่อการอัดขึ้นรูปและควรมีการใช้เครื่องอัดขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน

4. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำชิ้นงานไปใช้ประโยชน์หลังการใช้งานผลิตภัณฑ์โฟมย่อยสลายได้ เช่น การนำไปทำปุ๋ยบำรุงดิน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่ผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

เกศินี โกศลเมธี. 2552. การเตรียมและสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิทเตรียมจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมเส้นใยปอกระเจา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ขวัญชนก นิธิโชติเดชากร. 2550. การพัฒนาฟิลม์ละลายน้ำได้จากสตาร์ชมันสำปะหลังหรือสตาร์ชมันสำปะหลังดัดแปรผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อการบรรจุสารเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัติฐพล ไข่แสงศรี. 2552. การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากไคโตแซนร่วมกับพอลิเมอร์ธรรมชาติสำหรับทดแทนโฟม. สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธีระพงศ์ จันทรนิยม. 2551. กระบวนการไร้ของเสียในอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม. วารสารหาดใหญ่วิชาการ. ปีที่ 6. ฉบับที่ 2. 159 – 164.

บำรุง เลิศลอยกุลชัย. 2550. การศึกษาผลของน้ำยางธรรมชาติและสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ปรีชา พหลเทพ. 2530. โพลิเมอร์ (แบบศึกษาด้วยตนเอง). พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท ประชาชนจำกัด. กรุงเทพฯ. 2-6.

พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, วิทยาเขตปัตตานี.

มยุรา ปรารถนาเปลี่ยน. 2547. Biobased food packaging. วารสารสถาบันอาหาร. ปีที่ 6. ฉบับที่ 34. 11-15.

วรรณภา ชูเมฆา. 2552. การเตรียมและสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลังผสมน้ำยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. สำนักพิมพ์บุคเน็ท. กรุงเทพฯ.

Carr, L.G.; Parra, D.F.; Ponce, P.; Lugao, A.B.; and Buchler, P.M. Influence of Fibers on the Mechanical Properties of Cassava Starch Foams. Polym. Environ. 2006, 14, 179-183.

Cinell, P.; Chiellini, E.; Lawton, J.W.; and S.H., Imam. Foamed Articles Based on Potato Starch, Corn Fibers and Poly (vinyl alcohol). Polym. Degrad. Stab. 2006, 91, 1147-1155.

Deng, R.; Chen, Y.; Chen, P.; Zhang, L.; and Liao, B. Properties and Biodegradability of Water-Resistant Soy Protein/Poly (Ɛ-caprolactone)/Toluene-2, 4-diisocyante composites. Polym. Degrad. Stab. 2006, 91, 2189-2197.

Glenn, G.M.; Orts, W.J.; and Nobes, G.A.R. Starch, Fiber and CaCO3 Effects on the Physical Properties of Foams Made by a Baking Process. Ind. Crops Prod. 2001, 14, 201–212.

Jacob, T.; Varughese, K.T. Mechanical Properties of Sisal/Oil Palm Hybrid Fiber Reinforced Natural Rubber Composites. Compos. Sci. Technol. 2004, 64, 955-965.

Kunanopparat, T.; Menut, P.; More, M.-H.; and Guilbert. Reinforcement of Plasticized Wheat Gluten with Natural Fiber: From Mechanical Improvement to Deplasticizing Effect. Compos. 2008, 39, 777-785.

Lawton, J.W.; Shogren, R.L.; and K.F. Tiefenbacher. Aspen Fiber Addition Improves the Mechanical Properties of Baked Cornstarch Foams. Ind. Crops Prod. 2004, 19, 41-48.

Leach, H.W. Gelatinization of Starch. In Starch: Chemistry and Technology, Aczdemic 1965 Preaa. New York. 159-189.

Modi, T.W. Polyvinyl alcohol. In Handbook of Water-Soluble Gums and Resins. McGraw-Hill Book Company. Newyork. 1980.

Peesan, M.; Supapho P.; and Rujiravanit, R. Characterization of Starch/Poly (ε-caprolactone) Hybrid foams. Polym. Test. 2004, 23, 651–657.

Preechawong, D.; Rujiravanit, R.; Peesan, M.; and Supapho, P. Preparation and Properties of Starch/Poly (vinyl alcohol) Composite Foams. Macromol. Symp. 2004, 216, 217-227.

Salgado, R.; Schmidt, C.; Molina Ortiz, E.; Mauri, N.; and Laurindo, B. Biodegradable Foams Based on Cassava Starch, Sunflower Proteins and Cellulose Fibers Obtained by a Baking Process. Food Eng. 2008, 85, 435-443.

Shey, J.; Imam, S.H.; Glenn, G.M.; and Orts, W.J. Properties of Baked Starch Foam with Natural Rubber Latex. Ind. Crops Prod. 2005, 24, 34-40.

Shogren, R. L.; Lawton, J.W.; Doane, W. M.; and Tiefenbacher, K. F. Structure and Morphology of Baked Starch Foams. Polym. 1998, 39, 6649-6655.

Shogren, R.L.; Lawton, J.W.; and Tiefenbancher, K.F. Baked Starch Foams: Starch Modifications and Additives Improve Process Parameters, Structure and Properties. Ind. Crops Prod. 2002, 16, 69-79.

Siracusa, V.; Rocculi, P.; Romani, S.; and Rosa, M.D. Biodegradable Polymer for Food Packaging. A review. J. Food Sci. Technol. 2008, 19, 634-643.

Soykeabkaew, N.; Supaphol, P.; and Rujiravanit, R. Preparation and Characterization of Jute- and Flax-Reinforced Starch-Based Composite Foams. Carbohydr. Polym. 2004, 58, 53–63.

Sreekala, M.S.; Kumaran, M.G.; and Thomas, S. Water Sorption in Fiber Reinforced Phenol Formaldehyde Composites. Compos. 2002, 33, 763-777.

Swinkles, J.J.M. Composition and Properties of Commercial Native Starches. Starch/Staerke 1985, 37, 1-5.

Wikberg, H.; Maunu, S.L. Characterization of Thermally Modified Hard-and Softwoods by ^{13} CCPMAS NMR. Carbohydr. Polym. 2004, 58, 461-466.

กระบวนการอัดขึ้นรูปพลาสติก. http://www.luckyinter.com/press-mac.html. (สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2553).

โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์. Available online: http://th.wikipedia.org/wiki/ (สืบค้นเมื่อวันที่ 9 มีนาคม 2554).

โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล. Available online: http://isite.lps.org/sputnam/Biology/U2Biochemistry/lipid_lab.htm. (สืบค้นเมื่อวันที่ 19 ธันวาคม 2554).

โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส. Available online:
http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/cellulose
(สืบค้นเมื่อ 9 เมษายน 2554).

โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส. Available online: www.agri.cmu.ac.th/hort/course/359331
(สืบค้นเมื่อ 9 เมษายน 2554).

โฟมพลาสติกชนิดพอลิยูรีเทนและพอลิสไตรีน. Available online:
http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/file//bla_4_2550_foams.pdf
(สืบค้นเมื่อ 26 มกราคม 2554).

ลิกนิน . Available online: http://www.tistr.or.th (สืบค้นเมื่อ11 มีนาคม 2554).

ศูนย์ประสานงานโครงการส่งเสริมเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ. Available online:
http://kru53.blogspot.com/ (สืบค้นเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม 2553)

สารเติมแต่งพอลิเมอร์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้. Available online:
http://www.science.mju.ac.th/ (สืบค้นเมื่อ 14 มกราคม 2554).

เส้นใย. Available online: http://www.2.mtec.or.th (สืบค้นเมื่อวันที่ 12 มีนาคม 2554)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลของปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าความหนาของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และปริมาณ PVA ร้อยละ 3.8

การทดลองที่	ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ)	ความหนา (mm)					ค่าเฉลี่ย (mm)
		1	2	3	4	5	
1	0.0	3.25	3.30	3.20	3.50	3.00	3.25
2	7.5	3.65	3.80	3.75	3.75	3.60	3.71
3	11.3	3.95	3.80	3.75	3.95	3.90	3.87
4	15	4.10	3.95	4.20	4.00	4.15	4.08

ตารางที่ ก.2 ผลของปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าความหนาแน่นของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และปริมาณ PVA ร้อยละ 3.8

การทดลองที่	ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ)	ความหนาแน่น (g/cm^3)					ค่าเฉลี่ย (g/cm^3)
		1	2	3	4	5	
1	0.0	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09
2	7.5	0.10	0.09	0.09	0.10	0.11	0.10
3	11.3	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11
4	15	0.12	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13

ตารางที่ ก.3 ผลของปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าความทนต่อแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ ที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และปริมาณ PVA ร้อยละ 3.8

การทดลองที่	ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ)	ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)
		1	2	3	4	5	
1	0.0	0.667	0.566	0.723	0.678	0.634	0.654
2	7.5	1.085	1.044	1.115	1.117	1.091	1.090
3	11.3	1.309	1.167	1.088	1.117	1.29	1.194
4	15	1.41	1.209	1.212	1.176	1.208	1.243

ตารางที่ ก.4 ผลของปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ ที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และปริมาณ PVA ร้อยละ 3.8

การทดลองที่	ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ)	ค่าการดูดซับน้ำ (gH_2O/g)					ค่าเฉลี่ย (gH_2O/g)
		1	2	3	4	5	
1	0.0	1.12	0.97	0.89	0.78	0.85	0.92
2	7.5	0.40	0.75	0.51	0.49	0.58	0.55
3	11.3	0.63	0.52	0.62	0.57	0.60	0.59
4	15	0.55	0.62	0.53	0.58	0.74	0.60

ตารางที่ ก.5 ผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อค่าความชื้นของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และปริมาณ PVA ร้อยละ 3.8

การทดลองที่	ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)	ปริมาณความชื้น (%)					
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย (%)
1	0	4.23	4.16	4.31	3.87	4.01	4.12
2	2.5	4.58	4.97	4.55	5.04	4.87	4.80
3	4	6.46	5.04	6.15	5.97	6.03	5.93
4	5	7.35	7.02	5.77	7.81	6.69	6.93

ตารางที่ ก.6 ผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และปริมาณ PVA ร้อยละ 3.8

การทดลองที่	ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)	ค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุด (%)					ค่าเฉลี่ย (%)
		1	2	3	4	5	
1	0	1.2	1.3	1.1	1.3	1.1	1.2
2	2.5	0.8	1.3	1.4	1.4	1.5	1.28
3	4	1.3	1.3	1.6	1.6	1.5	1.46
4	5	1.9	1.4	1.5	1.6	1.4	1.56

ตารางที่ ก.7 ผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และปริมาณ PVA ร้อยละ 3.8

การทดลองที่	ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)	ค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)
		1	2	3	4	5	
1	0	0.885	1.192	0.888	1.098	0.901	0.993
2	2.5	1.085	1.044	1.115	1.117	1.091	1.090
3	4	0.982	1.145	1.098	1.177	1.297	1.140
4	5	1.149	0.972	1.156	1.197	1.296	1.154

ตารางที่ ก.8 ผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5 และปริมาณ PVA ร้อยละ 3.8

การทดลองที่	ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)	ค่าการดูดซับน้ำ (gH_2O/g)					ค่าเฉลี่ย (gH_2O/g)
		1	2	3	4	5	
1	0	0.65	1.36	1.23	1.12	1.02	1.08
2	2.5	0.40	0.75	0.51	0.49	0.58	0.55
3	4	0.38	0.31	0.46	0.41	0.33	0.38
4	5	0.42	0.55	0.28	0.51	0.33	0.42

ตารางที่ ก.9 ผลของการเติม PVA ต่อค่าความชื้นของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5

การทดลองที่	ปริมาณ PVA (ร้อยละ)	ปริมาณความชื้น (%)					
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย (%)
1	0	5.77	4.59	6.89	5.98	6.45	5.94
2	3.8	4.58	4.97	4.55	4.32	4.96	4.68
3	5.7	4.21	4.02	4.22	4.51	4.39	4.27
4	7.5	4.01	3.66	4.05	4.15	4.00	3.98

ตารางที่ ก.10 ผลของการเติม PVA ต่อค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุดของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5

การทดลองที่	ปริมาณ PVA (ร้อยละ)	ค่ายืดตัว ณ แรงดัดสูงสุด (%)					ค่าเฉลี่ย (%)
		1	2	3	4	5	
1	0	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1	0.82
2	3.8	0.8	1.3	1.4	1.4	1.5	1.28
3	5.7	1.1	1.2	1.6	1.4	1.5	1.36
4	7.5	1.4	1.4	1.4	1.6	1.4	1.44

ตารางที่ ก.11 ผลของการเติม PVA ต่อค่าความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5

การทดลองที่	ปริมาณ PVA (ร้อยละ)	ค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)
		1	2	3	4	5	
1	0	0.865	1.098	0.891	0.971	0.965	0.958
2	3.8	1.085	1.044	1.115	1.117	1.091	1.090
3	5.7	0.848	0.984	0.976	0.932	1.034	0.955
4	7.5	0.955	0.927	0.955	1.028	1.151	1.003

ตารางที่ ก.12 ผลของการเติม PVA ต่อค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ที่ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 2.5 และปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมันร้อยละ 7.5

การทดลองที่	ปริมาณ PVA (ร้อยละ)	ค่าการดูดซับน้ำ (gH_2O/g)					ค่าเฉลี่ย (gH_2O/g)
		1	2	3	4	5	
1	0	0.82	1.06	1.24	0.91	0.98	1.00
2	3.8	0.40	0.75	0.51	0.49	0.58	0.55
3	5.7	0.32	0.35	0.41	0.39	0.30	0.36
4	7.5	0.46	0.26	0.44	0.31	0.28	0.35

ตารางที่ ก.13 ผลของปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน กลีเซอรอล และ PVA ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดัดโค้งของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ โดยเทคนิค RSM

ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ)	ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)	ปริมาณ PVA (ร้อยละ)	ค่าความต้านทานต่อแรงดัดโค้ง (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)
			1	2	3	4	5	
15.9	12.0	6.0	1.756	1.78	2	1.894	1.673	1.772
20.0	7.5	3.8	2.285	2.05	2.01	1.976	2.154	2.095
4.1	12.0	6.0	0.843	0.82	0.75	0.721	0.703	0.767
15.9	3.0	6.0	1.359	1.398	1.371	1.392	1.344	1.373
0.0	7.5	3.8	0.622	0.601	0.617	0.609	0.612	0.612
10.0	7.5	3.8	1.072	0.984	1.256	1.267	1.152	1.146
10.0	7.5	7.5	1.145	1.123	1.204	1.185	1.102	1.152
10.0	7.5	3.8	1.045	1.177	1.121	1.119	1.089	1.110
4.1	12.0	1.5	0.656	0.698	0.682	0.635	0.742	0.683
10.0	7.5	0.0	0.966	0.966	0.934	0.954	0.932	0.950
15.9	3.0	1.5	1.22	1.185	1.271	1.285	1.291	1.250
10.0	15.0	3.8	0.986	1.021	1.022	1.075	0.987	1.018
10.0	7.5	3.8	1.125	1.197	1.169	1.129	1.099	1.144
10.0	0.0	3.8	0.965	0.981	1.011	0.971	1.021	0.990
15.9	12.0	1.5	1.578	1.209	1.433	1.365	1.453	1.408
4.1	3.0	1.5	0.698	0.762	0.761	0.787	0.765	0.755
4.1	3.0	6.0	0.781	0.796	0.764	0.799	0.815	0.791
7.5	4.0	3.8	0.982	1.145	1.098	1.177	1.297	1.140
7.5	5.0	3.8	1.149	0.972	1.156	1.197	1.296	1.154

ตารางที่ ก.14 ผลของปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน กลีเซอรอล และ PVA ต่อค่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานโฟมย่อยสลายได้ โดยเทคนิค RSM

ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ)	ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)	ปริมาณ PVA (ร้อยละ)	ค่าการดูดซับน้ำ (gH_2O/g)					ค่าเฉลี่ย (gH_2O/g)
			1	2	3	4	5	
15.9	12.0	6.0	0.49	0.57	0.44	0.56	0.53	0.52
20.0	7.5	3.8	0.7	0.76	0.66	0.75	0.8	0.73
4.1	12.0	6.0	0.4	0.4	0.46	0.47	0.48	0.44
15.9	3.0	6.0	0.44	0.47	0.49	0.44	0.46	0.46
0.0	7.5	3.8	0.75	0.72	0.73	0.7	0.72	0.72
10.0	7.5	3.8	0.62	0.41	0.44	0.39	0.42	0.46
10.0	7.5	7.5	0.29	0.33	0.37	0.39	0.36	0.35
10.0	7.5	3.8	0.56	0.44	0.51	0.53	0.37	0.48
4.1	12.0	1.5	0.52	0.57	0.41	0.44	0.47	0.48
10.0	7.5	0.0	0.74	0.77	0.78	0.74	0.69	0.74
15.9	3.0	1.5	0.87	0.97	0.89	0.97	0.99	0.94
10.0	15.0	3.8	0.61	0.52	0.62	0.57	0.55	0.57
10.0	7.5	3.8	0.54	0.51	0.47	0.48	0.47	0.49
10.0	0.0	3.8	1.12	0.97	0.89	0.78	0.85	0.92
15.9	12.0	1.5	0.57	0.59	0.58	0.59	0.6	0.59
4.1	3.0	1.5	0.81	0.76	0.74	0.79	0.69	0.76
4.1	3.0	6.0	0.43	0.48	0.39	0.45	0.42	0.43
7.5	4.0	3.8	0.38	0.31	0.46	0.41	0.33	0.38
7.5	5.0	3.8	0.42	0.55	0.28	0.51	0.33	0.42

ภาคผนวก ข

ข้อมูลสารเคมี

ข.1 ข้อมูลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

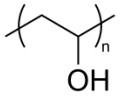
สารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัย คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) ซึ่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสารพิษ ไม่มีกลิ่น และละลายน้ำได้ โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีคุณสมบัติการก่อฟิล์มและการยึดติดที่ดี อีกทั้งยังทนทานการกัดกร่อนของน้ำมัน น้ำมันหล่อลื่นชนิดหนา และตัวทำละลายได้ดี พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถย่อยสลายได้หมดอย่างรวดเร็ว

ลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏ (Physical state and appearance) : ของแข็ง

สูตรโมเลกุล (Molecular formular) : $(CH_2CHOH)_n$

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) : $(44.05)_n$ g/mole

สูตรโครงสร้าง (Structure formular) :



ชื่อทางเคมี (Chemical name) : Polyvinyl alcohol

จุดหลอมเหลว (Melting point) : 228°C

จุดวาบไฟ (Flash point) : 79.44°C

ความหนาแน่น (Density) : 1.19 – 1.31 g/cm^3

จุดเดือด (Boiling point) : 230°C

การละลาย (Soluability) : ละลายได้ในน้ำเย็นและน้ำร้อน ไม่ละลายในไดเอทิลอีเทอร์ อะซิโตน เอสเทอร์ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และตัวทำละลายปิโตรเลียม

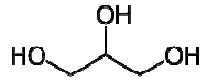
ข.2 ข้อมูลกลีเซอรอล

สารพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ กลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งกลีเซอรอลเป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งมีลักษณะข้นและใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เป็นผลพลอยได้จากกระบวนทำสบู่ สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์และในน้ำ

ลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏ (Physical state and appearance): ของเหลว

สูตรโมเลกุล (Molecular formular) : $C_3H_5(OH)_3$

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) : 92.09 g/mole

สูตรโครงสร้าง (Structure formular) : 

ชื่อทางเคมี (Chemical name) : Glycerin

จุดหลอมเหลว (Melting point) : 19°C

จุดวาบไฟ (Flash point) : 160°C

ความหนาแน่น (Density) : 1.2636 g/cm^3

จุดเดือด (Boiling point) : 290°C

ความหนาแน่นไอ (Vapor Density) : 3.17 g/cm^3

ความหนืด (Viscosity) : 1183 centistokes

ข.3 ข้อมูลพาราฟิน

พาราฟินเป็นไขมันที่ได้จากการกลั่นจากปิโตรเลียม ซึ่งจะได้สารเคมีในกลุ่ม Alkane Hydrocarbon มีลักษณะใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสชาติคล้ายขี้ผึ้งจุดหลอมเหลวที่ 47 – 64 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ใน Ether, Benzene และ Ester บางชนิด

การนำมาใช้ประโยชน์

1. พาราฟินบริสุทธิ์จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีโดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าถึง 10^{17} โอมห์
2. มีการนำพาราฟินไปใช้เป็นวัตถุเจือปนในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้เคลือบลูกกวาดและเมล็ดธัญพืชเพื่อให้เป็นมันวาว และคงสภาพที่อุณหภูมิห้อง ใช้เคลือบผิวผัก ผลไม้ เพื่อให้คงความสดไว้นานเนื่องจากช่วยลดการสูญเสีย

ความชื้น แต่โดยปกติจะไม่นำพาราฟินมาใช้สัมผัสอาหารเนื่องจากอาจเกิดความเป็นพิษต่อร่างกายได้

3. การนำพาราฟินไปใช้ในการเคลือบภาชนะบรรจุหลายชนิด
4. การผลิตเทียนไข
5. อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง แช่น ครีมอาบน้ำ โฟมล้างหน้า

คุณสมบัติทางเคมีของพาราฟิน แว็กซ์

ลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏ (Physical state and appearance): ของแข็ง สีขาว

สูตรโมเลกุล (Molecular formular)	: C_nH_{2n+2}
จุดหลอมเหลว (Melting point)	: 48-68°C
จุดเริ่มกลับแข็งตัว (วุ้น)	: 66-69°C
ค่าพีเฮช ความเป็นกรด/ด่าง	: 5.8-6.3
ปริมาณน้ำมันในแว็กซ์	: 0.1%-5% (%ของน้ำหนักแว็กซ์)
จุดวาบไฟ (Flash point)	: 204-271°C
ความหนาแน่น (Density)	: 0.82-0.92 g/cm^3
จุดเดือด (Boiling point)	: 350-430°C
จุดเริ่มติดไฟ	: 238-263°C
ความหนืดที่ 100°C (Viscosity)	: 3.1-7.1 centistokes

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม Solver

ตารางที่ ค.1 แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานแรงดัดโค้งของโฟมย่อยสลายได้และขอบเขตในการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อการผลิตโฟมย่อยสลายได้

Mathematic model	$Max\ f(x) = x_0/x_4$
Subject to	$x_0 = 0.745 + 0.00184x_1^2 - 0.00304x_2^2 + 0.00354x_1x_2 + 0.00400x_1x_3$ $x_4 = 1.400 - 0.03817x_1 - 0.110x_2 - 0.119x_3 + 0.00223x_1^2 + 0.00405x_2^2 + 0.00885x_2x_3$
	Boundary limit
	$0 \leq x_1 \leq 20$
	$0 \leq x_2 \leq 15$
	$0 \leq x_3 \leq 7.5$

โดยกำหนดให้ x_0 = ค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (MPa)

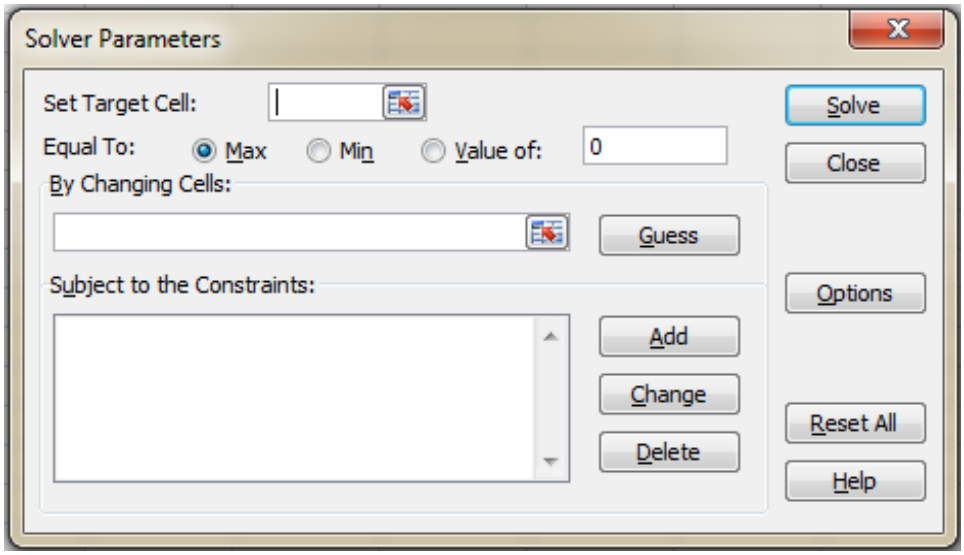
x_1 = ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ)

x_2 = ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)

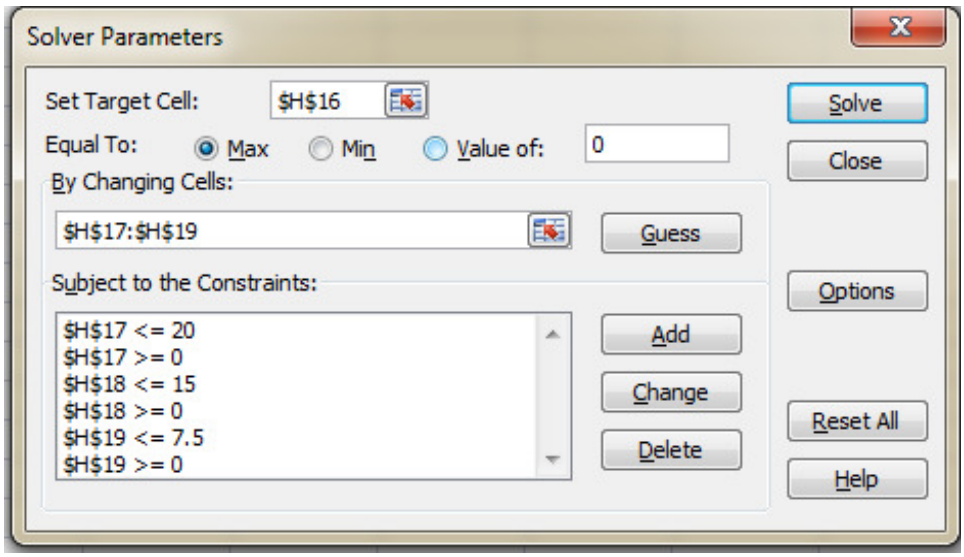
x_3 = ปริมาณ PVA (ร้อยละ)

x_4 = ค่าการดูดซับน้ำ (gH_2O/g)

สภาวะที่เหมาะสมในการการผลิตโฟมย่อยสลายได้



ภาพประกอบที่ ค.1 แสดงหน้าโปรแกรม Solver เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม



ภาพประกอบที่ ค.2 แสดงหน้าโปรแกรม Solver ที่ใส่ค่าดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.2 ค่าที่ได้จากการรันโปรแกรม

x_0	1.29
x_1	11.20
x_2	6.10
x_3	7.50
x_4	0.25

โดยกำหนดให้ x_0 = ค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (MPa)

x_1 = ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ)

x_2 = ปริมาณกลีเซอรอล (ร้อยละ)

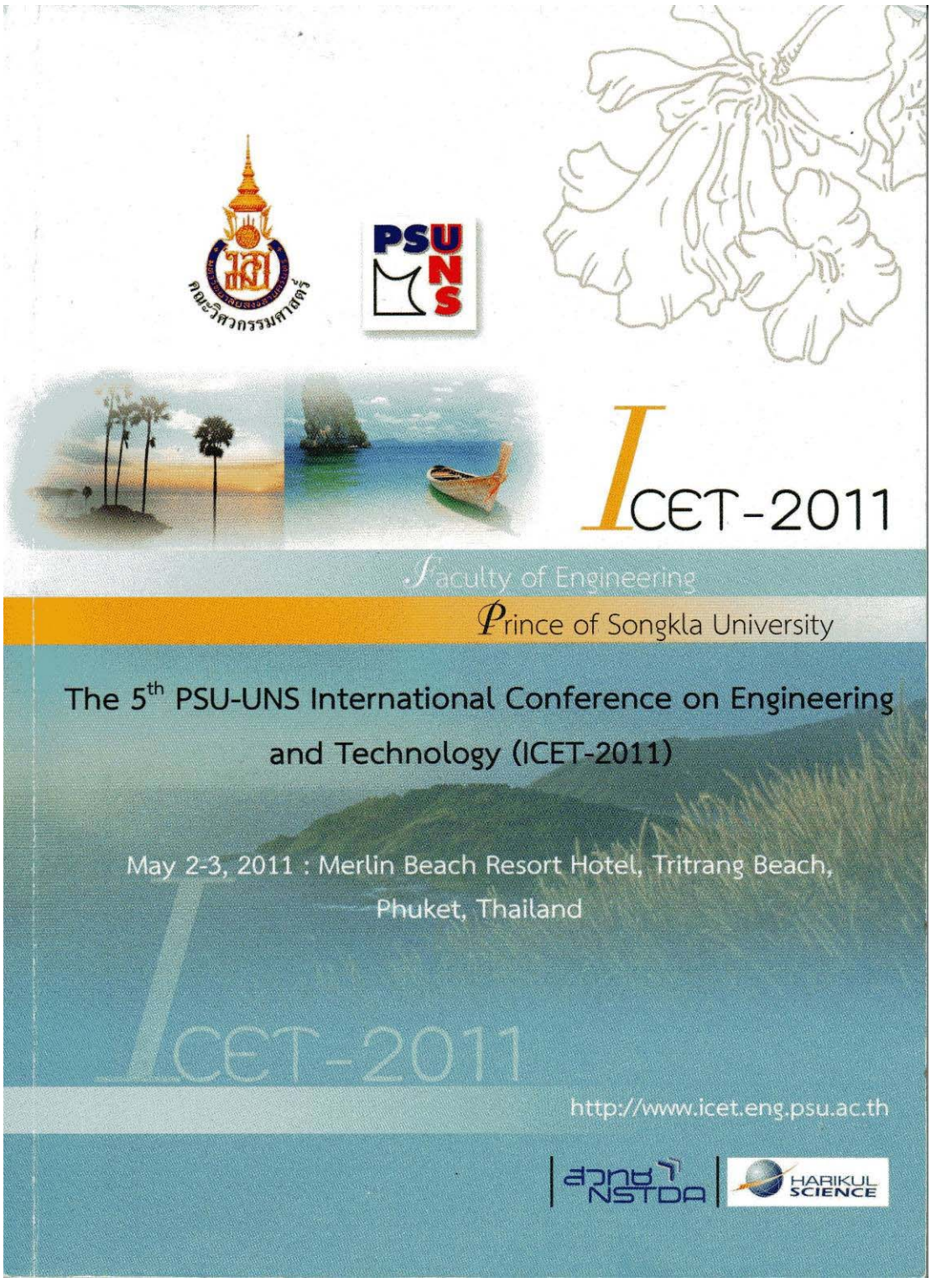
x_3 = ปริมาณ PVA (ร้อยละ)

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการรันโปรแกรมคือ ปริมาณเส้นใยปาล์มน้ำมัน ร้อยละ 11.2 ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 6.1 และปริมาณ PVA ร้อยละ 7.5 ซึ่งได้ค่าความต้านทานแรงดัดโค้งจากโปรแกรม 1.29 MPa

ภาคผนวก ง

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

BIODEGRADABLE FOAMS BASED ON CASSAVA STARCH BY COMPRESSION PROCESS


PSU
UNS
ICET-2011
Faculty of Engineering
Prince of Songkla University
The 5th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011)
May 2-3, 2011 : Merlin Beach Resort Hotel, Tritrang Beach, Phuket, Thailand
ICET-2011
http://www.icet.eng.psu.ac.th
NSTDA
HARIKUL SCIENCE

BIODEGRADABLE FOAMS BASED ON CASSAVA STARCH BY COMPRESSION PROCESS

Aungsuma Boonchaisuriya[1], Juntima Chungsiriporn[1]*

[1]Prince of Songkla University, Faculty of Engineering, Thailand

*Email: juntima.c@psu.ac.th

Abstract: Biodegradable foams made from cassava starch (CS) and oil palm fibers (OPF) were obtained by compression process. The addition of natural polymers was investigated to improve the cassava starch-based biodegradable foams for the mechanical and physical properties. The physical and mechanical strength, and water absorption of composite materials was measured. The objectives of this work were to evaluate the effect of varying the proportion of 0-5% glycerol, 0-15% OPF, and 0-7.5% polyvinly alcohol (PVA) on the physical and mechanical properties of biodegradable foams. The results showed that glycerol gave the foam more flexibility and improved the brittle. The addition of OPF in high proportions improving foam properties. PVA content effectively decreased water absorption of the foams. The product may be used as alternative shockproof packaging.

Key Words: Plastics/ Biodegradable Foams/ Cassava Starch/ Polyvinyl Alcohol/ Oil Palm Fiber

1. INTRODUCTION

In the recent years, petroleum and fossil energy demands are increased and their reserves are limited affecting to petrochemical products cost increasing. The world production of plastic is estimated to be more than 150 millions tones per year. The using of petrochemical products causes problems associated with waste and gas emissions. Petroleum-based plastics may require many years to degrade or none degrade. One of the plastic waste management problems is through recycling wasted plastics. The recycling of wasted plastic is limited and cannot be recycled forever, so eventually to be burnt or buried in landfills that effect to environmental. Many countries were realizing shortage of fossil energy problems and environmental pollution. A biodegradable composite is obtained from renewable resources appears as an excellent alternative

for the production of biodegradable polymers replacement of polymer from petroleum. Biodegradable polymers have their importance based on the control or reduction of gas emissions. But the biodegradable polymers have a short service life product owing to it's obtained from natural resources [1].

Starch is a special interest bio-based polymer in producing biodegradable such as corn starch, wheat gluten, pea starch, potato starch, and cassava starch (CS). The crystallinity of the starch granules is attributed mainly to the amylopectin and not to amylase, which although linear, presents a conformation that hinders its regular association with other chains [2]. Cassava is largely grown in tropical countries such as Thailand that is important producer cassava starch of the world. CS is a biodegradable agro-polymer, high purity, low cost, renewable, and environmentally friendly [2].

Some previous works have shown biodegradable polymers are being employed in packaging application material. Generally bio-base polymer production can be produced by traditional processing techniques commonly used in the plastics industry such as, extrusion, and compression process. The process known as compression molding for biodegradable includes starch gelatinization, water evaporation, forming foam, and foam dried up to final moisture content of 2-4% [3].

Bio-based polymers can be reinforced with natural fiber (such as coir, coconut, sisal, bagasse, jute, hemp), which are standard technology. Natural fibers are derived from renewable resources; degrade faster than synthetic fibers and minimizing environmental pollution [4]. Natural fibers have many desirable properties for reinforcement, lightweight, renewable, and biodegradability. Composites reinforced with such natural fibers have been the subject of extensive study for many applications to the synthetic fiber reinforced composites [5]. Oil palm (Elaeis guineensis Jacq) is the highest yielding edible oil crops in the world. Oil palm fiber (OPF), lignocelluloses fibers from oil palm tree, can be extracted from empty fruit bunch, trunk, frond, and fruit mesocarp [6]. Fibers from fruit mesocarp are currently used as boiler fuel in palm plant. Many studies were conducted in the recent past to develop OPF.

In a previous work the water resistance and strength of the starch-based foams could be improved by adding PVA to foams [3]. PVA is particularly well-suited synthetic polymer for

the formulation of blends with natural polymers. The PVA is highly polar and can be manipulated in water, depending upon its grade and functional organic solvents as well [8]. Plasticizer such as glycerol, water, and sorbitol, has been used for reduction of the final material brittleness. The optimum plasticizer content is a compromise between the process requirements and the desired material stiffness.

The goal of this work was to investigate composite biodegradable foam preparing based on cassava starch using a compression process. It was also aimed to assess the effect of varying the content of OPF, PVA, and glycerol on the physical, mechanical properties and water absorption of the biodegradable foams. Properties of the composite materials were characterized by tensile testing, percentage of elongation, and water absorption.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Materials

Cassava starch (CS) was the unmodified grade purchased from Kriangkrai Ltd. (Nakornphathom, Thailand). Oil palm fiber (OPF) was provided by regional oil palm producers (Trang Palm Oil Co. Ltd., Thailand). Polyvinyl alcohol (PVA) was purchased from Ajax Chemicals (New South Wales, Australia) and glycerol (99.5% purity) was purchased from Qualigens fine chemicals (India). The glycerol was used as plasticizer.

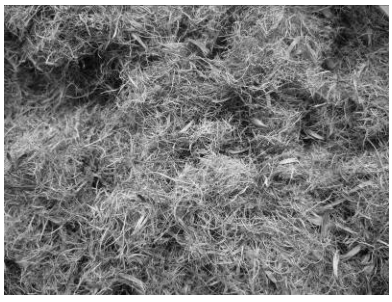


Fig.1. *Oil palm fibers obtained from fruit mesocarp.*

2.2 Methodology

2.2.1 Preparation of oil palm fibers

Oil palm fibers were extracted from fruit mesocarp which obtained after the subtraction of oil seeds from fruit bunch for oil extraction. Fibers were washed several times with water until the dirt was vanished then dried in oven at 105°C overnight to vaporize the water. The fibers were mashed to a small size using a blender then were sieved by using a sieving machine (Endecott EFL 2000, England). The average length of the fibers was about 2 mm before making the composites.

2.2.2 Preparation of starch-based foams

The experiments of starch-based foam preparation were set to study for the effects of OPF content, PVA content, and glycerol content on mechanical properties and water absorption of the foams. The controlled ranges selected for each component were 0-15% for OPF, 0-7.5% for PVA, and 0-5% for glycerol. Unmodified cassava starch and OPF were first mixed in the dry state using a Kitchen Aid mixer (SHARP, EMS-51). PVA, glycerol, and deionized water (DI) were then added to the mixture and mixed until the mixture was homogeneous, as shown in Fig. 2A. The formulation was varied with 100 g total weight of the mixture as summarized in Table 1.

Table 1. *Identification and composition of OPF reinforced starch-based foams*

.

Formulation	CS g	OPF g	Glycerol g	PVA g
1	93.7	0	2.5	3.8
2	86.2	7.5	2.5	3.8
3	82.4	11.3	2.5	3.8
4	78.7	15	2.5	3.8
5	88.7	7.5	0	3.8
6	84.7	7.5	4	3.8
7	83.7	7.5	5	3.8
8	90	7.5	2.5	0
9	84.3	7.5	2.5	5.7
10	82.5	7.5	2.5	7.5

2.2.3 Foams production by compression.

Sixty gram of the composites was applied to a mold having a squared cavity. The size of the mold cavity was 127 mm x 127 mm and 1.9 mm in depth. Starch-based composites foams were prepared using a lab model compression press (Tang- master (Thailand) Co. Ltd.,). Each molding was placed between the platens; the temperature was fixed at 170ºC. Millar sheets were used to cover the molding on both sides to facilitate mold release. Evaporation of water in the composites began shortly after the closing of the mold and venting of the water vapor occurred around the edge of the mold. The mold was closed for 5 min and finally, foams were removed from the press, cooled for 10 min at room temperature and unmolded, as shown in Fig. 2B.

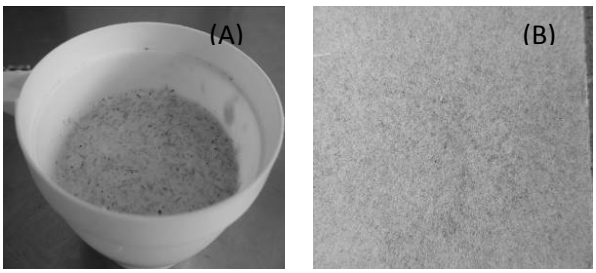


Fig. 2. *The starch-based composites (A) and products sample (B).*

2.3 Physical and mechanical properties analysis

The starch-based foam specimens were used to investigate the effects of moisture content, thickness and density. The moisture content of samples was determined after drying at 105°C for 24 h. The samples were weighted before and after drying. The values of moisture content were calculated as the percentage of weight loss based on the original weight. The thickness of starch-based foam was measured by vernier caliper (Digimatic, Mitutoyo, Japan). The value was reported the average foam every five tested samples for each formulation. Density was calculated from the ratio between weight and volume. Reported values were the mean of five measurements for each formulation. Tensile strength and percentage of elongation for starch-based foam specimens were undertaken using a mechanical testing machine (Model LR30K, LLORD Instrument Ltd., Hampshire, England) as per ASTM D882-91 Standard Method (ASTM, 1993b).The samples were cut into rectangular 2.54 cm x 12 cm. The testing conditions used were: initial grip separation of 70 mm, cross speed of 50 mm/min and load cell of 2.5 kN. For each composition, five samples were tested.

2.4 Water absorption analysis

Samples were weighted and soaked in distilled water for 60 s [1]. After removing the water excess using tissue paper, the samples were weighted again. The adsorbed water was calculated as the weight difference and expressed as mass of absorbed water per mass of original sample.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The process of starch-based foam a compression press can be divided into several steps. The first step is starch gelatinization. The temperature is equal or above the gelatinization temperature of starch and the viscosity of starch is increased. At high temperature for the mixture, water is rapidly evaporated and vented out around the edge of the mold. Samples in the plate are expanded and formed to foam product. In the last step, the foam was dried to a final moisture content of 2-4% [7]. Thickness, density, and moisture content of the foams were measured as shown in Table 2. The average thickness and densities values of all starch-based foams were 3.37-4.25 mm, and 0.1-0.3 g/cm^3, respectively.

Table 2. *Thickness, density, and moisture content of starch-based foams*.

Formulation	Thickness (mm)	Density (g/cm^{-3})	Moisture content (%)
1	4.10	0.10	9.03
2	3.75	0.11	8.55
3	4.02	0.11	8.62
4	3.40	0.12	8.63
5	3.53	0.11	9.01
6	4.25	0.11	8.08
7	3.68	0.12	7.62
8	3.63	0.30	10.70
9	3.37	0.12	9.42
10	3.81	0.11	9.30

3.1 Effects of compression temperature and time

The compression temperature and time at 165ºC and 5 min, respectively, was suitable for the starch gelatinization, water evaporation, and foam expanding [1]. At the time less than 5 min,

uncompleted foams was obtained. As the longer compression time, the foams were brittle and dark color**.**

3.2 Effect of fiber content

Fig. 3A-C presents the surface images of starch-based foams at before and after addition of fibers. A free OPF starch based foams (Fig. 3A) show the white color surface. After increasing OPF from 7.5-15% (Fig. 3B-C), the color surface was darker. The tensile strength of starch-based foams is shown in Fig. 4. The addition of fiber improved mechanical properties of the foams and the fibers well adhere to the starch matrix [7]. The samples of starch-based foams were presented in Fig.3. At the fiber content of 7.5% gives highest tensile strength (687 kPa).

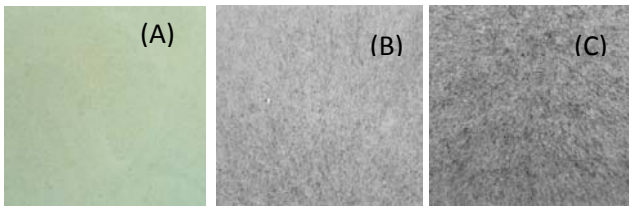


Fig.3. *The sample of the foams 0% of fiber content (A), 7.5% of fiber content and 15% of fiber content (C).*

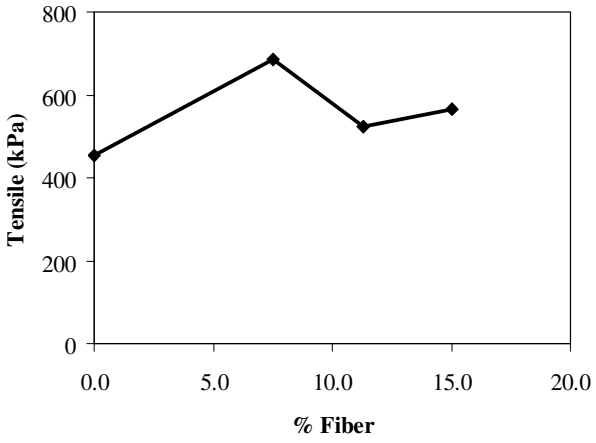


Fig.4. Effect *of the fiber content on the tensile strength of starch-based foams.*

3.3 Effect of glycerol content

The addition of glycerol plasticizer in starch-based foam is shown in Fig 5. The percentage of elongation was increased with increasing amount of added plasticizer. The glycerol in the foams preparation acts as plasticizer could improve the brittle and effect on flexibility of the foams.

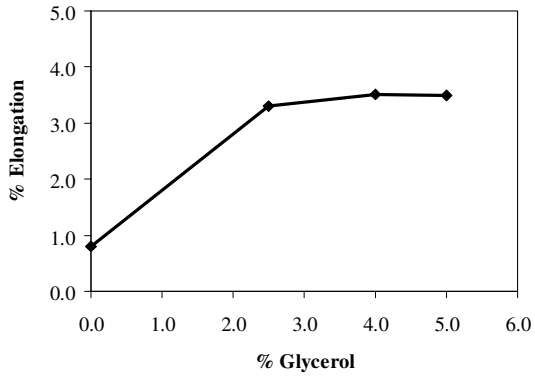


Fig.5. *Effect of glycerol content on the percentage of elongation of starch-based foams.*

3.4 Effect of PVA content

The PVA was used as additives in the biodegradable foam preparation. Adding of PVA to the mixture could improve water resistance and foam strength [7]. The effects of the PVA addition on water absorption of starch-based foams are shown in Fig. 6. The water absorption of the foams was decreased steadily with increasing %PVA from 0-4 highly crystalline and insoluble in water and after that was less significant.

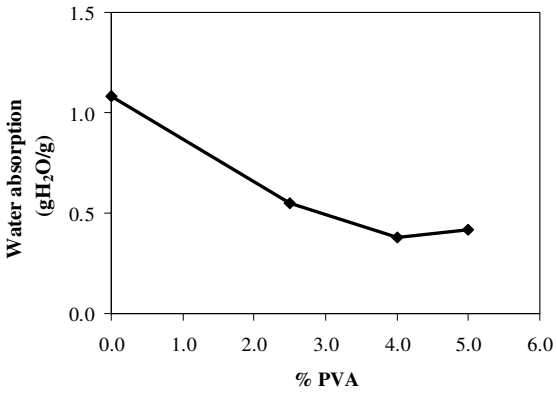


Fig. 6. *Effect of PVA content on water absorption capacity of strach-based foams*.

4. CONCLUSIONS

In this study, cassava starch based biodegradable foams can effectively be produced by compression process. The average thickness and densities values of all the foams were 3.37-4.25 mm, and 0.1-0.3 g/cm^3, respectively. At the fiber content of 7.5% gave highest tensile strength (687 kPa). An increase in the amount of added glycerol was responsible in an increase the percentage of elongation of the foams. The addition of PVA to starch-based foams made of starch and fibers led to reduction in water absorption of foams.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Discipline of Excellence (DOE) and National Research Counil of Thailand in providing financial assistance for this research. The authors also wish to thank the Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University for their kind supports, budget year 2009.

6. REFERENCES

[1] R. Salgado, C. Schmidt, E. Molina Ortiz, N. Mauri, and B. Laurindo, “Biodegradable Foams Based on Cassava Starch, Sunflower Proteins and Cellulose Fibers Obtained by a Baking Process”, Food Engineering., 2008, Vol. 85, pp.435-443.

[2] K.G. Satyanaranaya, G.G.C. Arizaga, and F. Wypych, “Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview”, Progress in Polymer Science., 2009, Vol.34, pp.982-1021.

[3] R. L. Shogren, J. W. Lawton, W. M. Doane, and K. F. Tiefenbacher, “Structure and morphology of baked starch foams”, Polymer., 1998, Vol. 39, pp. 6649-6655.

[4] F.Bateni, F. Ahmad, A.S. Yahya, and M. Azmi, “Performance of oil palm empty fruit bunch fibres coated with acrylonitrile butadiene styrene”, Construction and Building Materials., 2011, Vol. 25, pp. 1824-1829.

[5] A. Kalam, B.B. Sahari, Y.A. Khalid, and S.V. Wong, “Fatigue behaviour of oil palm fruit bunch fibre/epoxy and carbon fibre/epoxy composites”, Composite Structures., 2005, Vol. 71, pp.34-44.

[6] S. Shinoj, R. Visvanathan, S. Panigrahi, and M. Kochubabu, “Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review”, Industrial Crops and Products., 2011, Vol. 33, pp. 7-22.

[7] R.L. Shogren a, J.W. Lawton, K.F. Tiefenbacher, “Baked Starch Foams: Starch Modifications and Additives Improve Process Parameters, Structure and Properties”, Industrial Crops and Products., 2002,
Vol. 16, pp. 69-79.

[8] S. Mali, F. Debiagi, M.V.E. Grossmann, and F. Yamashita, “Starch, sugarcane bagasse fibre, and polyvinyl alcohol effects on extruded foam properties: A mixture design approach”, Industrial Crops and Products., 2010, Vol. 32, pp. 353-359.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวอังศุมา บุญไชยสุริยา

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5210120109

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ สาขาการผลิต)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ทุนสาขาความเป็นเลิศ (DOE) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Aungsuma Boonchaisuriya, Juntima Chungsiriporn. 2011. Biodegradable Foams Based on Cassava Starch by Compression Process. Proceedings of the 5th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011). Phuket, Thailand, May 2-3 2011, 128.