



อิทธิพลของเส้นใยธรรมชาติและการเคลือบผิวโฟมแป้งด้วยไขขี้ผึ้งที่มีผล
ต่อสมบัติของโฟมแป้ง

**Effect of Natural Fibers and Beeswax Coating on the Properties
of Starch-Based Foam**

ซุการี ชายเร๊ะ
Sukaree Chaireh

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology
Prince of Songkla University**

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



อิทธิพลของเส้นใยธรรมชาติและการเคลือบผิวโฟมแป้งด้วยไขผึ้งที่มีผล
ต่อสมบัติของโฟมแป้ง

**Effect of Natural Fibers and Beeswax Coating on the Properties
of Starch-Based Foam**

ซุการี ชายเร๊ะ

Sukaree Chaireh

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology
Prince of Songkla University**

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของเส้นใยธรรมชาติและการเคลือบผิวโฟมแข็งด้วยไขขี้ผึ้งที่มีผล
ต่อสมบัติของโฟมแข็ง

ผู้เขียน นายชุกारी ชายเรีะ

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แก้วตา แก้วตาทิพย์) (รองศาสตราจารย์ ดร.สอาด ริยะจันทร์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แก้วตา แก้วตาทิพย์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราภรณ์ ไชยบัญญัติษฐ์)

.....กรรมการ
(ดร.ต่อศักดิ์ กิตติกรณ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟาร์รุ่งสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แก้วตา แก้วตาทิพย์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายชุกการี ชายเรี๊ะ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายชุกการี ชายเรื่อ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของเส้นใยธรรมชาติและการเคลือบผิวโฟมแข็งด้วยไซซีผึ้งที่มีผล
ต่อสมบัติของโฟมแข็ง

ผู้เขียน นายชุกการี ชายระ

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

แข็งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถเตรียมเป็นโฟมที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามพบว่าโฟมแข็งมีข้อจำกัดในการใช้งานคือ มีสมบัติเชิงกลต่ำ และมีความไวต่อความชื้น ดังนั้นงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งโดยใช้เส้นใยธรรมชาติ 2 ชนิด คือ เส้นใยเปลือกกล้วยพาราและเส้นใยผักตบชวาเปรียบเทียบกับเซลล์ลูโลสทางการค้าและเคลือบผิวโฟมแข็งด้วยไซซีผึ้ง พบว่าเส้นใยทั้ง 2 ชนิด สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล การดูดซับความชื้น และสมบัติทางความร้อนของโฟมแข็งได้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าโฟมแข็งผสมเส้นเซลล์ลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง สามารถปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการผสมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด นอกจากนี้เมื่อนำเปลือกกล้วยพาราและเส้นใยผักตบชวาไปบดด้วยเทคนิคบดบดที่มีความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที ก่อนนำไปผสมในโฟมแข็ง พบว่าเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบดมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งได้ดีกว่าเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบด แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดสามารถปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งได้ดีกว่าเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบด และเมื่อศึกษาการเคลือบผิวโฟมแข็งด้วยไซซีผึ้ง พบว่าการเคลือบผิวโฟมแข็งด้วยไซซีผึ้งสามารถปรับปรุงสมบัติการดูดซับน้ำของโฟมแข็งได้ดี เพราะไซซีผึ้งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ใดก็ตามการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของโฟมแข็งลดลง เนื่องจากการยึดเกาะกันได้ไม่มีระหว่างผิวหน้ายื่นยื่นได้จากผลลักษณะทางสัณฐานวิทยา

คำสำคัญ: โฟมแข็ง, เส้นใยเปลือกกล้วยพารา, เส้นใยผักตบชวา, ไซซีผึ้ง, บอลมิล

Thesis Title Effects of Natural Fibers and Beeswax Coating on the Properties of Starch-Based Foam

Author Mr. Sukaree Chaireh

Major Program Polymer Science and Technology

Academic Year 2018

ABSTRACT

Starch is a natural polymer that can be used to make eco-friendly foam. However, neat starch foam has poor mechanical properties and is sensitive to moisture. In the first part of this study, properties of starch foam were proved using fibers from rubber seed shell (RSS) and water hyacinth (WH) and the improvements obtained were compared to improvements obtained with commercial cellulose (CL) fillers. RSS and WH fiber fillers improved the moisture sensitivity and mechanical and thermal properties of neat starch foam but, starch foam with 10%wt CL had the best mechanical properties and lowest moisture sensitivity. Also, RSS and WH fibers were modified by reducing the size of the fiber particles by planetary ball milling at 600 rpm for 40 min. The addition of modified RSS improved the properties of starch foam composites more than the addition of unmodified RSS. However, unmodified WH showed better results than modified WH. In the second part of the study, starch foam was coated with beeswax and the effects of the coating on the properties of the starch foam were investigated. The beeswax coating on the surface of starch foam composites reduced the water absorption of all the starch foams due to the presence of a hydrophobic phase. However, starch foam composites coated with beeswax showed poor mechanical properties because the difference of polarity between beeswax and starch foam composites impaired interfacial interaction. This behavior was confirmed by SEM microscopy.

Keywords: Starch foam, Rubber seed shell fiber, Water hyacinth fiber, Beeswax, Ball mill

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความช่วยเหลือ และสนับสนุนจากหน่วยงานรวมทั้งความเสียสละของบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ผู้จัดทำขอขอบพระคุณในความกรุณาของทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แก้วตา แก้วตาทิพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้การสนับสนุนและหยิบยื่นโอกาสต่างๆ ให้ได้เรียนรู้และเพิ่มพูนประสบการณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้ และยังได้สละเวลาในการตรวจแก้งานและชี้แนะแนวทางจนกระทั่งงานวิจัยนี้บรรลุผลสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์.ดร.สอาด ริยะจันทร์ ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราภรณ์ ไชยบัญญัติษฐ์ และดร.ต่อศักดิ์ กิตติกรรม ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะข้อบกพร่องและแก้ไขข้อผิดพลาดในการเขียนวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนผู้ช่วยวิจัย (Research assistantship: RA) ประจำปีการศึกษา 2560 ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2561 ทุนสนับสนุนไปเสนอผลงานวิชาการในการเข้าร่วมงานประชุมในระดับนานาชาติเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยระดับนานาชาติ และทุนวิจัยเพื่อไปทำวิจัย ณ University of Novi Sad ประเทศเซอร์เบีย

ขอขอบพระคุณ Professor Katalin Mészáros Szécsényi ที่คอยให้คำแนะนำและคอยให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยที่ประเทศเซอร์เบีย และขอบพระคุณ University of Novi Sad ประเทศเซอร์เบีย ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยและเรียนรู้ประสบการณ์ในต่างประเทศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรทุกท่านในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โพลีเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำวิจัย ทำให้การทำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอบขอบคุณบริษัท Siam Modified Starch Co., Ltd. ที่อนุเคราะห์แป้งมันสำปะหลังดิบในการทำวิจัยในครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณพ่อ แม่และทุกคนในครอบครัว รวมถึงพี่ๆน้องๆและเพื่อนๆที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนมาตลอด จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ชูการ์รี่ ชายเรี๊ะ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(13)
สารบัญรูป	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 โฟมพลาสติก	4
2.1.1 ความหมายและคำจำกัดความของโฟม	4
2.1.2 การจำแนกประเภทของโฟม	4
2.1.2.1 จำแนกตามลักษณะของเซลล์โฟม	4
2.1.2.2 จำแนกตามลักษณะกายภาพ	5
2.1.2.3 จำแนกตามประเภทของพลาสติก	6
2.1.3 กระบวนการเกิดโฟม	6
2.1.4 ผลกระทบของโฟมพลาสติกต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม	6
2.2 พลาสติกชีวภาพจากแป้ง	7
2.2.1 แป้ง	7
2.2.2 องค์ประกอบของแป้ง	9
2.2.2.1 อะไมโลส	9
2.2.2.2 อะไมโลแพกทิน	9
2.2.2.3 ส่วนประกอบอื่นๆของแป้ง	11
2.2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง	12

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.2.4 สมบัติของแป้ง	14
2.2.4.1 การเกิดเจลลาติในเซชัน	14
2.2.4.2 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	14
2.3 การเตรียมพลาสติกชีวภาพจากแป้ง	15
2.3.1 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	15
2.3.2 โฟมแป้ง	17
2.3.3 การปรับปรุงสมบัติของโฟมแป้ง	19
2.3.4 เส้นใยธรรมชาติ	19
2.3.5 เซลลูโลส	20
2.3.6 เฮมิเซลลูโลส	20
2.3.7 ลิกนิน	21
2.4 เปลือกกลูคานพารา	22
2.5 ผักตบชวา	22
2.6 เทคนิคบอลมิล	23
2.7 ไชซี่ฝิ่ง	24
2.8 การตรวจสอบเอกสาร	24
2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโฟมแป้ง	24
2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเปลือกกลูคานพารา	26
2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผักตบชวา	27
2.8.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคบอลมิล	28
2.8.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไชซี่ฝิ่ง	29
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการทดลอง	30
3.1 สารเคมี	30
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	30
3.2.1 อุปกรณ์และวัสดุ	30
3.2.2 เครื่องมือ	31
3.3 วิธีการทดลอง	31
3.3.1 การเตรียมเส้นใยเปลือกกลูคานพารา	31
3.3.2 การเตรียมเส้นใยผักตบชวา	32

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.3.3 การลดขนาดเส้นใยด้วยวิธีการบอลลมิล	32
3.3.4 การเตรียมโฟมแข็ง	33
3.3.5 การเคลือบผิวโฟมแข็ง	34
3.4 วิธีการทดสอบ	36
3.4.1 การทดสอบความหนาแน่น	36
3.4.2 การทดสอบการต้านทานต่อการหักงอ	36
3.4.3 การทดสอบการดูดซับความชื้น	36
3.4.4 การทดสอบการดูดซับน้ำ	37
3.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	37
3.4.6 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา	37
3.4.7 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี	37
3.4.8 การศึกษาอนุภาคของเส้นใย	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	38
4.1 การศึกษาสมบัติของสารตัวเติม	38
4.1.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและการเตรียมเส้นใย	38
4.1.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของสารตัวเติม	40
4.1.3 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวเติม	42
4.1.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารตัวเติม	43
4.2 การศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง	44
4.2.1 อิทธิพลของเซลล์ูโลสทางการค้าที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง	44
4.2.1.1 สมบัติเชิงกล	44
4.2.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	45
4.2.1.3 สมบัติการดูดซับความชื้น	46
4.2.1.4 สมบัติทางความร้อน	47
4.2.1.5 ความหนาแน่น	48
4.2.2 อิทธิพลของเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง	49
4.2.2.1 สมบัติเชิงกล	49
4.2.2.2 สมบัติทางความร้อน	50

เรื่อง	สารบัญญ (ต่อ)	หน้า
	4.2.2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	52
	4.2.2.4 สมบัติการดูดซับความชื้น	53
	4.2.2.5 ค่าความหนาแน่น	54
	4.2.3 อิทธิพลของเส้นใยผักตบชวาที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง	55
	4.2.3.1 สมบัติเชิงกล	55
	4.2.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	57
	4.2.3.3 สมบัติการดูดซับความชื้น	58
	4.2.3.4 สมบัติทางความร้อน	59
	4.2.3.5 ความหนาแน่น	61
	4.3 การศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบผิวที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง	61
	4.3.1 อิทธิพลของไขขี้ผึ้งที่มีผลต่อโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้า	61
	4.3.1.1 ค่าการดูดซับน้ำ	61
	4.3.1.2 สมบัติเชิงกล	62
	4.3.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	63
	4.3.1.4 ค่าความหนาแน่น	65
	4.3.1.5 สมบัติทางความร้อน	65
	4.3.2 อิทธิพลของไขขี้ผึ้งที่มีผลต่อโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วย ยางพารา	66
	4.3.2.1 ค่าการดูดซับน้ำ	66
	4.3.2.2 สมบัติเชิงกล	67
	4.3.2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	69
	4.3.2.4 ค่าความหนาแน่น	70
	4.3.2.5 สมบัติทางความร้อน	71
	4.3.3 อิทธิพลของไขขี้ผึ้งที่มีผลต่อโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวา	72
	4.3.3.1 ค่าการดูดซับน้ำ	72
	4.3.3.2 สมบัติเชิงกล	73
	4.3.3.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	74
	4.3.3.4 ค่าความหนาแน่น	76
	4.3.3.5 สมบัติทางความร้อน	77

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	79
ข้อเสนอแนะ	80
บรรณานุกรม	81
ภาคผนวก	88
ประวัติผู้เขียน	108

สารบัญญัตราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง	9
2.2	เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอะไมโลสและอะไมโลแพคติน	10
2.3	สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลแพคตินของแป้งต่างชนิดกัน	11
2.4	องค์ประกอบของแป้งชนิดต่าง ๆ	11
2.5	ชนิดของผลึกและปริมาณผลึกของแป้งที่ต่างชนิดกัน	13
2.6	ผลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	17
2.7	การปรับปรุงสมบัติของโพลีแป้ง	19
3.1	ส่วนประกอบที่ใช้ในการขึ้นรูปโพลีแป้งมันสำปะหลัง	33
4.1	อิทธิพลของความเร็วรอบและเวลาในการบดต่อการลดขนาดอนุภาคของเส้นใยเปลือกกล้วยพารา (RSS) ด้วยเทคนิคบอลลมิล	39
4.2	ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติโพลีแป้ง	40
4.3	อุณหภูมิการสลายตัวของสารตัวเติม	44
4.4	อุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุดของโพลีแป้งและโพลีแป้งผสมเซลลูโลสทางการค้าปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง	48
4.5	อุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุดของโพลีแป้งและโพลีแป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลลมิล	52
4.6	อุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุดของโพลีแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลลมิล	60

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะโครงสร้างของเซลล์โพลีเมอร์ (a) เซลล์เปิด (b) เซลล์ปิด	5
2.2	สัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งจากเผือก (a), แป้งจากเกาลัด (b), แป้งจากขิง (c), แป้งมันสำปะหลัง (d), แป้งข้าวโพด (e), แป้งจากกล้วยแก่ (f), แป้งข้าวสาลี (g) และแป้งมันฝรั่ง (h)	8
2.3	โครงสร้างอะไมโลส	9
2.4	โครงสร้างอะไมโลแพกติน	10
2.5	ลักษณะโครงสร้างผลึกในเม็ดแป้ง	12
2.6	X-ray diffractogram ของเม็ดแป้งแต่ละรูปแบบ	13
2.7	กลไกการเกิดเจลลาติในเซชันของแป้ง	14
2.8	กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง	15
2.9	กลไกการเกิดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	16
2.10	โพลีเมอร์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดฉีด (a) การกดอัดทางความร้อน (b) การขึ้นรูปด้วยเทคนิคไมโครเวฟ (c และ d) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (e) และ การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย (f)	18
2.11	ไดอะแกรมการขึ้นรูปโพลีเมอร์แป้งด้วยกระบวนการกดอัด	18
2.12	โครงสร้างเซลลูโลส	20
2.13	โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส	20
2.14	โครงสร้างทางเคมีของ trans-coniferyl alcohol (a), trans-p-sinapyl alcohol (b) และ tran-p-coumaryl alcohol (c) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของลิกนิน	21
2.15	เปลือกกลูคานพารา	22
2.16	ผักตบชวา	23
2.17	ลักษณะการทำงานของเครื่องบอลมิล	23
2.18	ไซซีฟิ่ง	24
3.1	เครื่องตัดเส้นใยไฟฟ้า (a) และเครื่องคัดแยกเส้นใย (b)	32
3.2	เครื่องตีแป้ง (a) ต้มกวนรูปตะกร้อ (b) และต้มกวนรูปตัวเค (c)	33
3.3	แม่แบบ (a) และเครื่องกดอัดทางความร้อน (b)	34
3.4	การละลายไซซีฟิ่งในอ่างน้ำร้อน (a) และไซซีฟิ่งที่ละลายสมบูรณ์ (b)	35

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.5	การเคลือบผิวโฟมแข็งด้วยไซซีผึ้ง	35
4.1	การเตรียมเส้นใยเปลือกกล้วยพารา (a) และเส้นใยผักตบชวา (b)	38
4.2	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลลูโลสทางการค้า (CL) (a), เส้นใยเปลือกกล้วยพารา (RSS) (b), เส้นใยผักตบชวา (WH) (c), เส้นใยเปลือกกล้วยพาราบด (RSS_Mo) (d) และเส้นใยผักตบชวาบด (WH_Mo) (e)	41
4.3	FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติม	42
4.4	DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติม	43
4.5	การต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานต่อการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้า	45
4.6	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็ง (a) และโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็งที่กำลังขยาย 20 เท่า (b) และกำลังขยาย 750 เท่า (c)	46
4.7	ค่าการดูดซับความชื้นของโฟมแข็งผสมเส้นใยเซลลูโลสทางการค้า	47
4.8	TGA เทอร์โมแกรมของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	47
4.9	ค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้า	48
4.10	การต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานต่อการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่าน (RSS) และผ่านการบดด้วยเทคนิคบดมิล (RSS_Mo)	50
4.11	TGA เทอร์โมแกรมของโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง และเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง	51
4.12	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็ง (a) และโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง; เส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบด (b) และเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบด (c)	53

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.13	การดูดซับความชื้นของโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคบอลมิล	54
4.14	ความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคบอลมิล	55
4.15	การต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานต่อการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดและไม่ผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคบอลมิล	57
4.16	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีน (a), โพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของโพลีเอทิลีน (b) และโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของโพลีเอทิลีน (c) ที่กำลังขยาย 20 เท่า	58
4.17	ค่าการดูดซับความชื้นของโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคบอลมิล	59
4.18	TGA เทอร์โมแกรมของโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของโพลีเอทิลีน และเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของโพลีเอทิลีน	60
4.19	ค่าความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนที่ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคบอลมิล	61
4.20	ค่าการดูดซับน้ำของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนที่ผสมเซลลูโลสทางการค้าที่ผ่านการเคลือบผิวและไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง	62
4.21	การต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโพลีเอทิลีน (Blank) และโพลีเอทิลีนที่ผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของโพลีเอทิลีน ที่ผ่านการเคลือบและไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง	63
4.22	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีนที่กำลังขยาย 20 เท่า (a) และที่กำลังขยาย 150 เท่า (b) และโพลีเอทิลีนที่ผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของโพลีเอทิลีน ที่กำลังขยาย 18 เท่า (c) และ 150 เท่า (d)	64

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.23	ค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้า ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง	65
4.24	DTG เทอร์โมแกรมของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่ไม่ผ่านการเคลือบและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง	66
4.25	ค่าการดูดซับน้ำของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วย ยางพาราทั้ง 2 ชนิด ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง	67
4.26	การต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติมและโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพารา ทั้ง 2 ชนิด ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง	68
4.27	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งที่กำลังขยาย 20 เท่า (a) และที่กำลังขยาย 150 เท่า (b) โฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพาราไม่บดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่กำลังขยาย 20 เท่า (c) และ 150 เท่า (d) และโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพาราผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่กำลังขยาย 19 เท่า (e) และ 160 เท่า (f)	69
4.28	ค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วย ยางพาราที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดร้อยละ 7 และ 5 โดย น้ำหนักของแข็ง ตามลำดับ ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง	71
4.29	DTG เทอร์โมแกรมของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วย ยางพาราที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดร้อยละ 7 และ 5 โดย น้ำหนักของแข็ง ตามลำดับ ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง	72
4.30	ค่าการดูดซับน้ำของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง	73

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.31	การต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติมและโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวา ทั้ง 2 ชนิด ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง	74
4.32	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งที่กำลังขยาย 20 เท่า (a) และที่กำลังขยาย 150 เท่า (b) โฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาไม่บดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็งที่กำลังขยาย 19 เท่า (c) และ 150 เท่า (d) และโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็งที่กำลังขยาย 25 เท่า (e) และ 150 เท่า (f)	75
4.33	ค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดร้อยละ 5 และ 7 โดยน้ำหนักของแข็งตามลำดับ ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง	77
4.34	DTG เทอร์โมแกรมของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดร้อยละ 5 และ 7 โดยน้ำหนักของแข็งตามลำดับ ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากการกระทำของมนุษย์ที่ใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลืองก่อให้เกิดปัญหาตามมามากมาย ทั้งปัญหาโลกร้อน ปัญหาด้านมลภาวะต่างๆ รวมไปถึงปัญหาที่สำคัญที่ทุกประเทศกำลังหาแนวทางแก้ไข คือ ปัญหาขยะ โดยประเทศไทยถูกจัดเป็นอันดับที่ 6 ของโลกที่เป็นต้นเหตุของปัญหาขยะในมหาสมุทร พบว่ามีปริมาณขยะในทะเลจากประเทศไทยประมาณมากถึง 150,000-410,000 เมตริกตันต่อปี ซึ่งในปี พ.ศ.2559 มีการรายงานสถิติปริมาณขยะมูลฝอยทั่วประเทศมีปริมาณถึง 29 ล้านตัน ส่วนใหญ่เป็นขยะพลาสติกที่มาจากบรรจุภัณฑ์ (สุจิตรา, 2559) เช่น ถุงพลาสติก กล่องพลาสติก ฟิล์มพลาสติก รวมไปถึงโฟมพลาสติก ซึ่งบรรจุภัณฑ์เหล่านี้เป็นวัสดุที่ใช้แล้วทิ้ง (กรรณิการ์, 2548) เนื่องจากวัสดุมีราคาถูก หาได้ง่าย น้ำหนักเบาและสะดวกต่อการใช้งาน (สุภิญญา, 2556) แต่อย่างไรก็ตามพลาสติกเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ จึงส่งผลให้เกิดปัญหาขยะในปัจจุบัน

โฟมพลาสติกเป็นหนึ่งในบรรจุภัณฑ์ที่นิยมนำมาใช้งานในการบรรจุอาหาร ซึ่งโฟมพลาสติกส่วนใหญ่ผลิตมาจากพลาสติกสังเคราะห์ (Synthesis Plastic) คือ พอลิสไตรีน (Polystyrene: PS) เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ง่ายต่อการขึ้นรูป ราคาถูก มีความแข็งแรงที่เหมาะสม และต้านทานน้ำสูง (Soykeabkaew et al., 2004 ; Mello et al., 2014 ; Kaisangsri et al., 2014) แต่โฟมพลาสติกยังมีข้อด้อยคือ มีการปลดปล่อยสารก่อมะเร็งที่เป็นผลกระทบต่อสุขภาพ อีกทั้งยังเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและมีกระบวนการรีไซเคิลที่ยุ่งยาก ด้วยเหตุนี้หน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมได้รณรงค์ให้เลิกใช้โฟมพลาสติกและเลือกใช้ภาชนะอื่นแทน (สุภิญญา, 2556) ดังนั้นพอลิเมอร์ธรรมชาติถือเป็นทางเลือกสำคัญที่สามารถทดแทนพลาสติกสังเคราะห์และช่วยลดปัญหาขยะได้ โดยพอลิเมอร์ธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากพืช เช่น มันสำปะหลัง ข้าว มันฝรั่งและข้าวโพด เป็นต้น

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้งานด้านพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) เนื่องจากแป้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ ราคาถูกและไม่เป็นพิษ จึงมีงานวิจัยมากมายสนใจเตรียมพลาสติกชีวภาพจากแป้ง เช่น ฟิล์มแป้ง โฟมแป้ง รวมไปถึงการนำแป้งไปผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดอื่นๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย (Vilpoux and Averous , 2004)

งานวิจัยนี้สนใจเตรียมโพลีเมอร์เพื่อเป็นแนวทางทดแทนโพลีเมอร์จากพลาสติกสังเคราะห์และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร แต่อย่างไรก็ตามโพลีเมอร์ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานคือ สมบัติเชิงกลต่ำ และไวต่อความชื้น (Kaisangsri et al., 2014) จึงมีหลายงานวิจัยสนใจปรับปรุงสมบัติของโพลีเมอร์โดยผสมเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมัน (Oil palm fiber) (อังศุมา, 2554) ฟางข้าวบาร์เลย์ (Barley straw fiber) คาร์ดูน (Cardoo wastes) เส้นใยองุ่น (Grape wastes) (Lopez-Gil et al., 2015) เส้นใยปอกระเจา (Jute) เส้นใยป่าน (Flax) (Soykeabkaew et al., 2004) เส้นใยคราฟท์ (Kraft) ชังข้าวโพด (Corn husk fiber) (Polat et al., 2013) และชานอ้อย (Sugarcane bagasse) (Vercelheze et al., 2012) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าโพลีเมอร์ผสมเส้นใยธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลสูง สมบัติทางความร้อนสูง น้ำหนักเบา ราคาถูก และสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ แต่โพลีเมอร์ผสมเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้ยังมีค่าการดูดซับน้ำสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ผสมสารตัวเติมชนิดอื่น

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติโพลีเมอร์โดยผสมเส้นใยธรรมชาติ 2 ชนิดคือ เส้นใยจากเปลือกลูกยางพารา (Rubber Seed Shell) และเส้นใยผักตบชวา (Water Hyacinth) และดัดแปรเส้นใยโดยการลดขนาดเส้นใยธรรมชาติทั้ง 2 ชนิดโดยเทคนิคบอลลมิล (Ball Mill) และเปรียบเทียบอิทธิพลของเส้นใยทั้ง 2 ชนิดกับเส้นใยเซลลูโลสทางการค้า นอกจากนี้ศึกษาอิทธิพลของไขขี้ผึ้ง (Beeswax) ที่ใช้เป็นสารเคลือบผิวที่มีผลต่อค่าการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เตรียมโพลีเมอร์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้เส้นใยจากเปลือกลูกยางพาราและผักตบชวาเป็นสารตัวเติมและเปรียบเทียบกับเส้นใยเซลลูโลสทางการค้า
2. ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยรอบและเวลาในการบดที่มีผลต่อการดัดแปรเส้นใยจากเปลือกลูกยางพาราและผักตบชวากับเทคนิคบอลลมิล
3. เตรียมโพลีเมอร์จากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้เส้นใยจากเปลือกลูกยางพาราและผักตบชวาที่ผ่านการดัดแปรด้วยเทคนิคบอลลมิลเป็นสารตัวเติม
4. เปรียบเทียบสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้เส้นใยจากเปลือกลูกยางพาราและผักตบชวาที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยเทคนิคบอลลมิลเป็นสารตัวเติม
5. ศึกษาอิทธิพลของไขขี้ผึ้งที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์ที่ใช้เส้นใยจากเปลือกลูกยางพาราและผักตบชวาที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรด้วยเทคนิคบอลลมิลเป็นสารตัวเติม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาการตัดแปรโดยการลดขนาดของเส้นใยธรรมชาติ 2 ชนิด คือ เส้นใยจากเปลือกลูกยางพารา และเส้นใยผักตบชวาด้วยเทคนิคบอลมิลที่มีความเร็วรอบ 300 และ 600 รอบต่อนาทีที่เวลา 20, 40 และ 60 นาที
2. ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา องค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวของเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการตัดแปรโดยเทคนิคบอลมิล
3. ศึกษาอิทธิพลเส้นใยธรรมชาติ 2 ชนิด คือ เส้นใยจากเปลือกลูกยางพารา และเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรโดยการลดขนาดที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง โดยเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยเซลลูโลสทางการค้า แปรปริมาณเส้นใยเท่ากับ 3, 5, 7 และ 10 ร้อยละโดยน้ำหนักของแข็ง
4. ศึกษาลักษณะเฉพาะและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของโฟมแข็งที่เตรียมได้ คือ สมบัติเชิงกล การดูดซับน้ำ ความหนาแน่น เสถียรภาพทางความร้อน และลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา
5. ศึกษาลักษณะเฉพาะและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของโฟมแข็งที่เคลือบด้วยไขผึ้ง คือ สมบัติเชิงกล การดูดซับน้ำ ความหนาแน่น เสถียรภาพทางความร้อน และลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา
6. ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของโฟมแข็งผสมเส้นใยธรรมชาติที่เคลือบผิวและไม่เคลือบผิวด้วยไขผึ้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางให้การลดปัญหาขยะที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดภาวะโลกร้อน
2. เป็นแนวทางให้การเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุเหลือทิ้งในธรรมชาติ
3. เป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมแข็งโดยการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นสารตัวเติมและปรับปรุงสมบัติการดูดซับน้ำโดยการใช้ไขผึ้งเป็นสารเคลือบผิว
4. เป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โฟมพลาสติก (Plastic Foam)

2.1.1 ความหมายและคำจำกัดความของโฟม

โฟมพลาสติก (Plastic foam) หรือเรียกสั้น ๆ ว่าโฟมนอกจากนี้ยังมีชื่ออื่น ๆ ที่สามารถใช้เรียกชื่อโฟมได้อีก เช่น เซลลูลาร์พอลิเมอร์ (Cellular polymer) และเอกซ์แพนเด็ดพลาสติก (Expanded plastic) หมายถึง พลาสติกที่มีโพรงแก๊สขนาดเล็กแทรกอยู่จำนวนมาก และกระจายทั่วเนื้อพลาสติก (ชาญวิทย์, 2551) ทำให้โฟมมีความหนาแน่นน้อย เป็นฉนวนความร้อน มีน้ำหนักเบา และสามารถขึ้นรูปต่างๆ ได้ (สุภิญญา, 2556)

2.1.2 การจำแนกประเภทของโฟม (ชาญวิทย์, 2551)

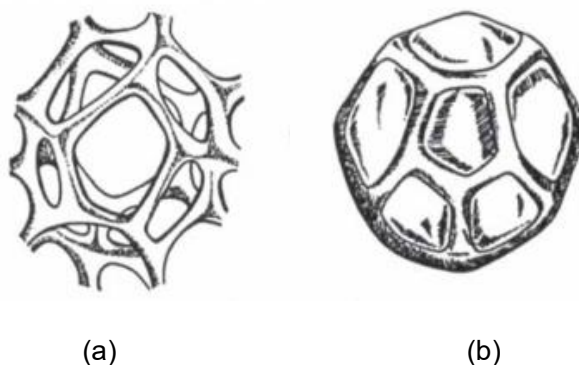
2.1.2.1 จำแนกตามลักษณะของเซลล์ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. โฟมเซลล์เปิด (Open-Cell Foam)

เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ ซึ่งแก๊สสามารถผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่น ๆ ได้ ภายใต้การกระทำของแรงขับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a) โดยทั่วไปโฟมเซลล์เปิดเตรียมจากเทคนิคความดันต่ำ (Low-pressure technique) ภายใต้สภาวะบรรยากาศ โฟมที่มีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแบบนี้จะมีสมบัติยืดหยุ่น ทำให้เหมาะในการใช้ทำเบาะนั่งในรถยนต์ บรรจุก๊าซ ที่นอน และวัสดุกันกระแทก เป็นต้น

โฟมเซลล์ปิด (Closed-Cell Foam)

สัณฐานวิทยาของเซลล์โฟมประกอบด้วยเยื่อบาง ๆ เรียกว่า หน้าต่างเซลล์ ทำให้แก๊สไม่สามารถผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้ แต่การเคลื่อนที่ของแก๊สกระทำโดยการแพร่ผ่านผนังเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (b) โดยปกติโฟมเซลล์ปิดเตรียมโดยใช้เทคนิคความดันสูง (High-pressure technique) และโฟมมีสมบัติที่แข็ง เหมาะในการนำไปใช้เป็นฉนวนความร้อน ทุ่นลอย หรือใช้เป็นเสื้อชูชีพ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์โฟม (a) เซลล์เปิด และ (b) เซลล์ปิด

(Klempner et al., 1991)

2.1.2.2 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. โฟมยืดหยุ่น (Flexible Foam)

พอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer matrix) ของโฟมชนิดนี้มีอุณหภูมิสภาพคล้ายแก้ว (Glass transition temperature: T_g) ต่ำ มีลักษณะนุ่มยืดหยุ่น และคืนตัวได้ง่ายเมื่อถูกกด เช่น โฟมยาง (Elastic foam) โฟมไวนิลคลอไรด์ชนิดมีสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticized Polyvinyl Chloride: PPVC) และ โฟมพอลิยูรีเทนยืดหยุ่น (Polyurethane Elastomer) เป็นต้น

2. โฟมชนิดแข็ง (Rigid Foam)

พอลิเมอร์เมทริกซ์ของโฟมชนิดนี้มีสถานะผลึก (Crystalline state) แต่ถ้าเป็นสัณฐาน (Amorphous state) มีอุณหภูมิสภาพคล้ายแก้วที่สูง มีลักษณะแข็ง และไม่คืนตัวเมื่อถูกกดหรือบีบ

3. โฟมชนิดกึ่งแข็ง (Semi-Rigid Foam)

โฟมชนิดนี้มีลักษณะอยู่ระหว่างโฟมชนิดแข็งและยืดหยุ่น กล่าวคือ โฟมชนิดนี้มีมอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) สูงกว่าโฟมชนิดยืดหยุ่น แต่พฤติกรรมทางความเค้นความเครียด (Stress-strain behavior) คล้ายกับโฟมชนิดยืดหยุ่นมากกว่าโฟมชนิดแข็ง

2.1.2.3 จำแนกตามประเภทของพลาสติก สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. โฟมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Foam)

โฟมชนิดนี้เตรียมได้จากพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก สามารถนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิลได้ แต่ไม่นิยมนำโฟมพลาสติกมารีไซเคิล เนื่องจากมีการใช้กระบวนการที่ซับซ้อน ต้นทุนสูงและไม่คุ้มทุน โฟมเทอร์โมพลาสติกที่พบมากในปัจจุบัน เช่น โฟมพอลิสไตรีน โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ และโฟมพอลิเอทิลีน เป็นต้น

2. โฟมเทอร์โมเซต (Thermoset Foam)

โฟมชนิดนี้เตรียมได้จากพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต จึงนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิลได้ยากกว่าโฟมเทอร์โมพลาสติก แต่ไม่นิยมที่จะรีไซเคิลโฟมพลาสติก ตัวอย่างโฟมที่พบในปัจจุบัน เช่น โฟมพอลิยูรีเทน โฟมอีพอกซี และโฟมฟีนอลิก เป็นต้น

2.1.3 กระบวนการเกิดโฟม (Foam Formation)

การเกิดโฟมเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดฟองอากาศหรือฟองแก๊สในพอลิเมอร์เหลวซึ่งกระบวนการเกิดฟองเรียกว่า การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) มี 2 แบบ ดังนี้

1. การเกิดนิวเคลียสในตัวเอง (Self-Nucleation) เป็นกระบวนการที่ฟองก๊าซเกิดขึ้นในขณะที่ของเหลวหรือพอลิเมอร์เริ่มเป็นเนื้อเดียวกัน
2. กระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation –Process) เป็นกระบวนการที่ใช้สารทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) ทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว (Liquid-solid interphase) ของพอลิเมอร์

เมื่อเกิดนิวเคลียสในพอลิเมอร์เหลวฟองแก๊สจะเริ่มขยายตัวและกระจายทั่วเนื้อของพอลิเมอร์ทำให้ขนาดของโฟมเพิ่มขึ้นจนได้ฟองแก๊สที่มีรูปทรงเรียกว่า เซลล์โฟม (Cell Foam) กระจายทั่วเนื้อพอลิเมอร์ (ชาญวิทย์, 2551)

2.1.4 ผลกระทบของโฟมพลาสติกต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

โฟมพลาสติกที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่ผลิตมาจากพอลิสไตรีน ซึ่งเป็นพลาสติกสังเคราะห์ที่มีสารที่เป็นพิษอยู่ 2 ชนิด คือ สไตรีน และ เบนซีน

- **สไตรีน (Styrene)** เป็นสารก่อมะเร็งในกลุ่ม 2B ตามมาตรฐานของ International Agency for Research on Cancer (IARC) ที่สามารถดูดซึมผ่านกระแสเลือด ผิวหนังและระบบทางเดินหายใจ เพราะสไตรีนสามารถละลายในไขมันได้ดี ถ้าหากร่างกายได้รับสารสไตรีนเป็นเวลานานอย่างต่อเนื่องจะส่งผลให้เกิดมะเร็งได้
- **เบนซีน (Benzene)** เป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษสูงและเป็นสารก่อมะเร็งในกลุ่ม 1 ตามมาตรฐาน International Agency for Research on Cancer (IARC) ที่สามารถก่อมะเร็งในมนุษย์ได้ หากได้รับเบนซีนเป็นเวลานานส่งผลให้เป็นมะเร็งเม็ดเลือดหรือเป็นโรคโลหิตจางได้ เพราะเบนซีนสามารถทำลายไขกระดูกส่งผลให้จำนวนเม็ดเลือดลดลงและทำลายระบบภูมิคุ้มกันในร่างกายได้ (สุภิญญา, 2556)

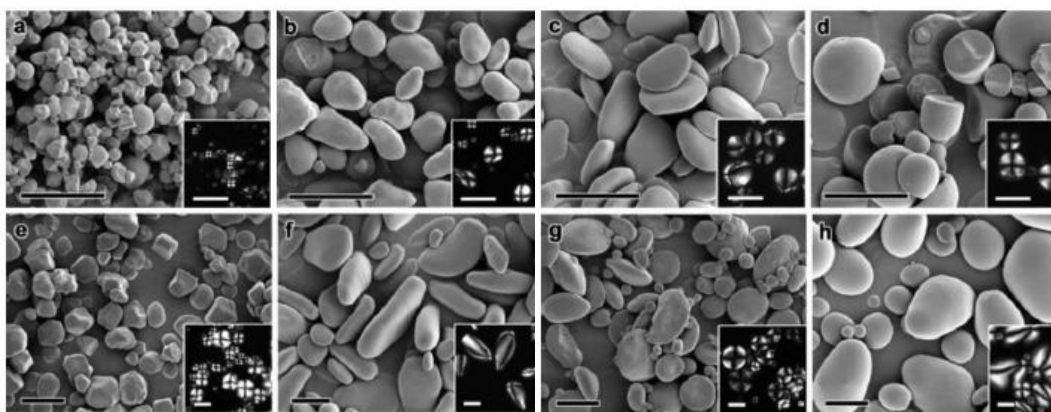
โฟมพอลิสไตรีนมีผลกระทบต่อร่างกายแล้วยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และนิยมนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้งซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ และไม่นิยมนำโฟมพอลิสไตรีนมารีไซเคิลเนื่องจากมีกระบวนการที่ซับซ้อนและไม่คุ้มทุนในการรีไซเคิลโฟม (ชาญวิทย์, 2551) จึงทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายด้านและปัญหาที่ทั่วโลกให้ความสำคัญคือ ปัญหาขยะ ซึ่งประเทศไทยจัดเป็นอันดับ 6 ของโลกที่มีปริมาณขยะในมหาสมุทรมากถึง 150,000-410,000 เมตริกตันต่อปี (สุจิตรา, 2559) จากรายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2559 กรมควบคุมมลพิษ พบว่าขยะมูลฝอยในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี และพบว่ามีปริมาณขยะมูลฝอยทั่วประเทศถึง 27.06 ล้านตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) ส่วนใหญ่เป็นขยะพลาสติกที่มาจากบรรจุภัณฑ์ เช่น ถุงพลาสติก กล่องพลาสติก ฟิล์มพลาสติก รวมไปถึงโฟมพลาสติก ด้วยเหตุนี้ทำให้ทั่วโลกตระหนักถึงการจัดการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติกที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมโลก และทำให้มีนักวิจัยสนใจพัฒนาพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติมากขึ้นในปัจจุบัน เพื่อสามารถทดแทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

2.2 พลาสติกชีวภาพจากแป้ง

2.2.1 แป้ง (Starch)

แป้ง เป็นแป้งจัดเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดหนึ่งในกลุ่มของคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) พบในพืชชั้นสูง มีหน่วยย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคส ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ทำให้ได้สายโซ่พอลิเมอร์ที่มี 2 ลักษณะ คือ พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็น

เส้นตรง เรียกว่า อะไมโลส (Amylose) และพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน เรียกว่า อะไมโล-แพกติน (Amylopectin) ซึ่งแป้งสามารถสกัดได้จากพวกธัญพืช เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ ข้าวเหนียว ข้าวโอ๊ต เป็นต้น และได้จากส่วนของรากหรือหัว เช่น มันสำปะหลัง มันฝรั่ง ผือก เป็นต้น (Soykeabkeaw et al., 2015) ส่วนใหญ่มีคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ สำคัญนอกจากนี้ยังมี โปรตีน ไขมันและเกลือแร่ เป็นองค์ประกอบอื่นเล็กน้อย แป้งที่ไม่มีการกำจัดองค์ประกอบอื่นๆ เรียกว่า “ฟลาวร์ (Flour)” ส่วนแป้งที่มีการกำจัดองค์ประกอบอื่นจนได้แป้งที่บริสุทธิ์เรียกว่า “แป้งสตาร์ช (Starch)” หรือ “แป้งดิบ (Native-starch)” (กล้าณรงค์, 2543) แป้งมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (Granule) ที่มีขนาดเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากรูปเห็นได้ว่าแป้งที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบต่างกันจะมีรูปแบบลักษณะของเม็ดแป้งที่ต่างกัน นอกจากนี้แล้วแป้งที่ต่างชนิดกันยังมีขนาดของเม็ดแป้งที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งเป็นผลจากองค์ประกอบภายในของเม็ดแป้งที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 สัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งจากเผือก (a), แป้งจากเกาลัด (b), แป้งจากขิง (c), แป้งมันสำปะหลัง (d), แป้งข้าวโพด (e), แป้งจากกล้วยแก่ (f), แป้งข้าวสาลี (g) และแป้งมันฝรั่ง (h) (Perez et al., 2010)

ตารางที่ 2.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง (Thomas et al., 1999)

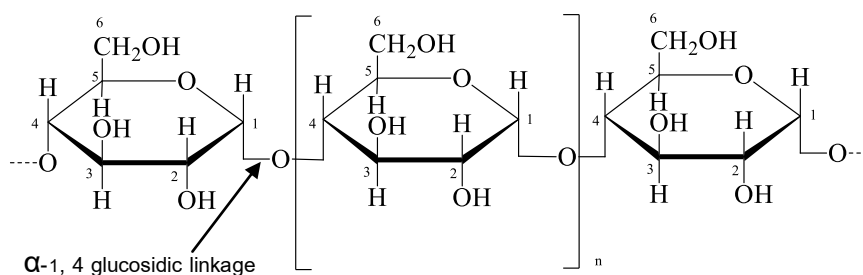
ชนิดของแป้ง	ขนาดเม็ดแป้ง (μm)	รูปร่าง
แป้งข้าวโพด	5-25	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม รูปร่างคล้ายแท่ง
แป้งข้าวสาลี	2-35	กลมค่อนข้างรี
แป้งข้าว	10-50	กลม ค่อนข้างรี
แป้งมันฝรั่ง	15-121	กลม รูปไข่มีวงคล้ายเปลือกหอย
แป้งมันสำปะหลัง	5-35	กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด
แป้งข้าวเจ้า	3-5	แบนมีหลายเหลี่ยม
แป้งข้าวบาร์เลย์	2-35	กลม คล้ายโซ่

2.2.2 องค์ประกอบของแป้ง

แป้งมีองค์ประกอบสำคัญ 2 องค์ประกอบ ดังนี้

2.2.2.1 อะไมโลส (Amylose)

เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1, 4 แอลฟาไกลูโคซิดิก (α -1, 4 glucosidic linkage) ได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.3

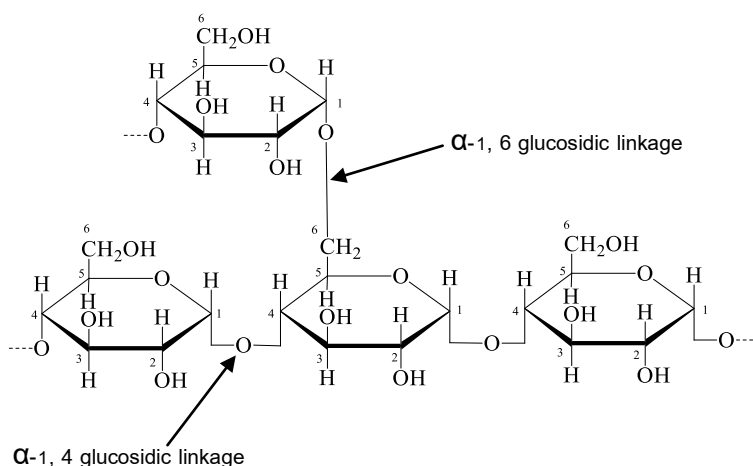


รูปที่ 2.3 โครงสร้างอะไมโลส (Bemiller et al., 2009)

2.2.2.2 อะไมโลแพกทิน (Amylopectin)

เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง โดยสายโซ่จะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ 1, 4 แอลฟาไกลูโคซิดิก (α -1, 4 glucosidic linkage) ให้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ส่วนสายโซ่ที่เชื่อมด้วยพันธะ 1, 6 แอลฟาไกลูโคซิดิก (α -1, 6

glucosidic linkage) ให้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และสมบัติของอะไมโลสและอะไมโลแพกตินจะมีความแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2 แปรจากแหล่งวัตถุดิบที่ต่างชนิดกันมีสัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลแพกตินที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.3 จากตารางพบว่าแป้งส่วนใหญ่มีปริมาณอะไมโล-แพกตินสูงกว่าอะไมโลส



ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอะไมโลสและอะไมโลแพกติน (กล้าณรงค์, 2543; Thomas et al., 1999)

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลแพกติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบน้ำตาลกลูโคสเกาะเป็นเส้นตรง	สารประกอบน้ำตาลกลูโคสเกาะเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α -1,4	α -1,4 และ α -1,6
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	หลังให้ความร้อนทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง
ลักษณะฟิล์ม	แข็งแรงมากกว่า	แข็งแรงน้อยกว่า

ตารางที่ 2.3 สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลแพคตินของแป้งต่างชนิดกัน (Thomas et al., 1999)

ชนิดแป้ง	ปริมาณอะไมโลส (%)	ปริมาณอะไมโลแพคติน (%)
แป้งข้าวโพดหัวนุ่ม	25	75
แป้งข้าวโพดเหนียว	<1	>99
แป้งมันสำปะหลัง	17	83
แป้งมันสำปะหลัง	20	80
แป้งข้าวโพดอะไมโลสสูง	55-77 (หรือมากกว่า)	45-30 (หรือน้อยกว่า)
โปรตีนข้าวสาลี	25	75
แป้งข้าว	19	81

2.2.2.3 ส่วนประกอบอื่นๆของแป้ง

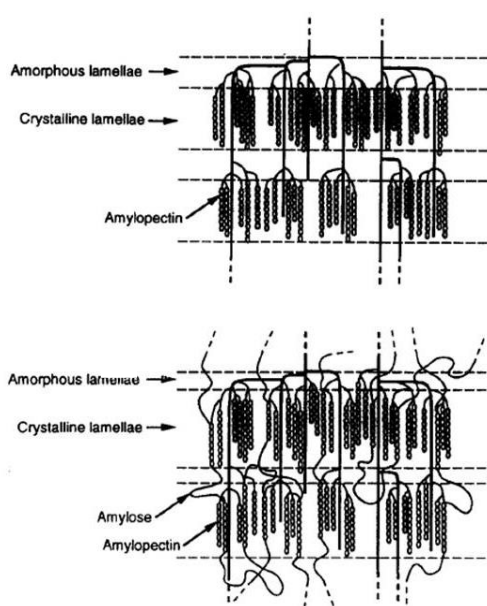
นอกจากองค์ประกอบหลักของแป้งแล้วยังมีองค์ประกอบอื่นที่เป็นส่วนประกอบในแป้งแต่มีสัดส่วนเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอะไมโลสและอะไมโลแพคติน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของแป้งชนิดต่างๆ (กล้านรงค์, 2543)

ชนิดแป้ง	% ไชมัน	% โปรตีน	% เถ้า	% ฟอสฟอรัส
แป้งข้าวโพด	0.6	0.35	0.1	0.015
แป้งมันฝรั่ง	0.05	0.06	0.4	0.08
แป้งสาลี	0.8	0.4	0.15	0.06
แป้งมันสำปะหลัง	0.1	0.1	0.2	0.01
แป้งข้าวโพดเหนียว	0.2	0.25	0.07	0.007
แป้งข้างฟาง	0.7	0.3	0.08	-
แป้งข้าวเจ้า	0.8	0.45	0.5	0.1
แป้งสาकु	0.1	0.1	0.2	0.02
แป้งข้าวโพดอะไมโลเมส	0.4	-	0.2	0.07
แป้งมันเทศ	-	-	0.1	-

2.2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง

แป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) คือมีทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และอสัณฐาน (Amorphous) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยส่วนที่มีความเป็นผลึกเกิดจากการจัดเรียงตัวกันของอะไมโลแพคตินที่มีลักษณะเป็นเกลียว (Helix) เชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และเกิดการรวมตัวกันทำให้มีลักษณะเป็นพวงหรือช่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งการจัดเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบนี้ทำให้เม็ดแป้งมีความเป็นผลึกสูง ปริมาณผลึกและชนิดของแป้งขึ้นอยู่กับแหล่งวัตถุดิบ



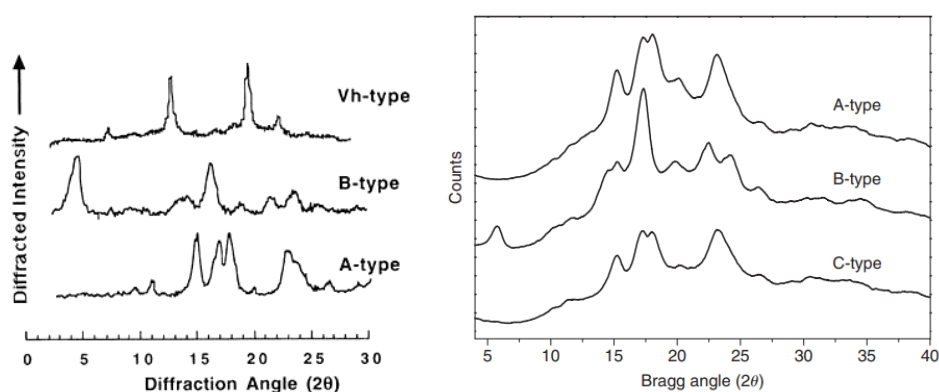
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างผลึกในเม็ดแป้ง (Jenkins and Donald, 1995)

จากการศึกษาลักษณะผลึกของเมล็ดแป้งด้วยเทคนิค X-ray diffraction พบว่าผลึกของแป้งมีด้วยกัน 4 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ดังนี้

1. **ผลึกแบบ A-type** เป็นผลึกที่พบในแป้งที่ได้จากธัญพืชต่างๆ เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ เป็นต้น
2. **ผลึกแบบ B-type** เป็นผลึกที่พบในแป้งที่ได้จากส่วนรากหรือหัวของพืช เช่น มันฝรั่ง เผือก เป็นต้น
3. **ผลึกแบบ C-type** เป็นผลึกที่พบในแป้งที่มีผลึกทั้งในรูปแบบ A-type และ B-type ผสมกัน เช่น มันสำปะหลัง และแป้งจากถั่วต่างๆ

4. **ผลึกแบบ V-type** เป็นผลึกที่เกิดจากการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallizes) หลังเกิดเจล (Gelatinization) ของแป้ง (Thomas et al., 1999)

ผลึกของแป้งแต่ละแบบสามารถเห็นความแตกต่างได้แสดงผลจากการทดสอบด้วยเทคนิค X-ray diffraction ที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และพบว่าแป้งชนิดต่างก็มีร้อยละปริมาณผลึกที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.6 X-ray diffractogram ของเม็ดแป้งแต่ละรูปแบบ (Belgacem and Gandini., 2008)

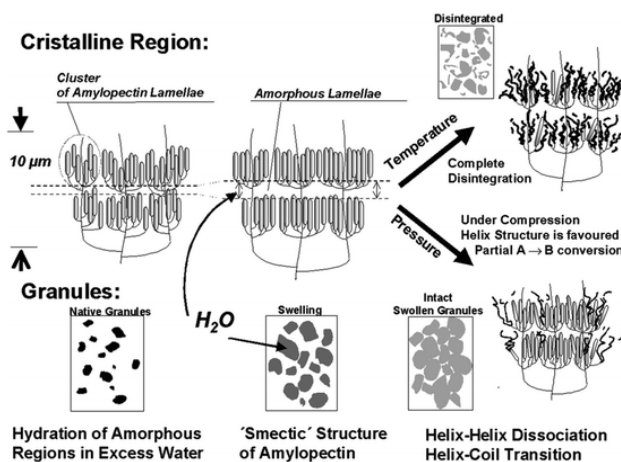
ตารางที่ 2.5 ชนิดของผลึกและปริมาณผลึกของแป้งที่ต่างชนิดกัน (Srichuwong et al., 2005)

ชนิดแป้ง	ชนิดผลึก	ปริมาณผลึก (%)
ข้าวสาลี	A	33
ข้าว	A	37.1
ข้าวโพด	A	31
มันฝรั่ง	B	29.8
มันสำปะหลัง	C	35.8
ข้าวเหนียว	A	36
สาเก	A	32.9

2.2.4 สมบัติของแป้ง

2.2.4.1 การเกิดเจลาตินไนเซชัน (Gelatinization)

เมื่อนำแป้งผสมกับน้ำที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะสามารถดูดซึมน้ำได้ดี เนื่องจากในโมเลกุลของแป้งมีหมู่ปลายเป็นไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) ที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ได้ดีกับน้ำ ทำให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เม็ดแป้งไม่สามารถละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลแพกตินมีการจัดเรียงตัวเป็นร่างแหที่มีระเบียบสูงมาก จึงทำให้เม็ดแป้งสามารถพองตัวได้เล็กน้อย หากเพิ่มอุณหภูมิในการละลายมากกว่า 65 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) จะทำให้พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen-bond) ในเม็ดแป้งถูกทำลายเม็ดแป้งจึงสามารถบวมพองได้มากขึ้นและไม่สามารถคืนตัวได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 กระบวนการนี้เรียกว่าการเกิดเจลของแป้ง หรือเจลาตินไนเซชัน (Gelatinization) ได้ของเหลวลักษณะเป็นเจล (Gel) ไสและหนืดขึ้น

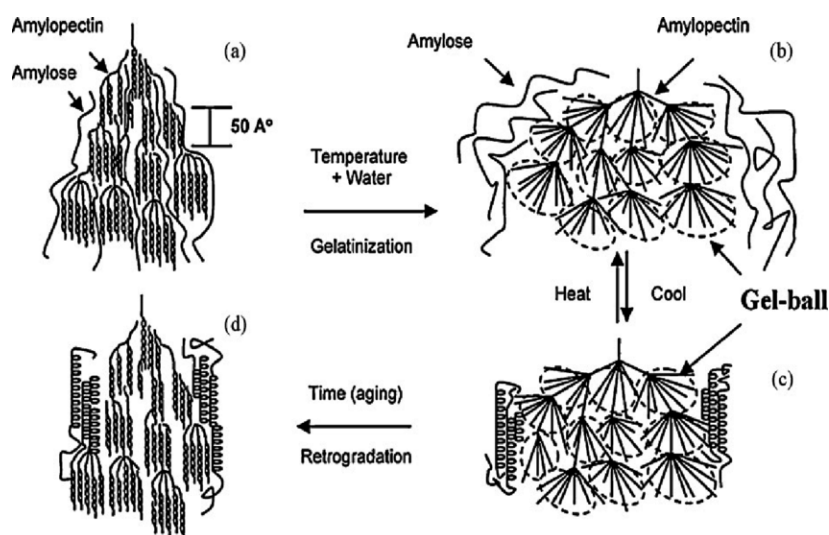


รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดเจลาตินไนเซชันของแป้ง (Pei-Ling et al., 2010)

2.2.4.2 การเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation)

การเกิดรีโทรเกรดชัน เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากที่แป้งเกิดเจลาตินไนเซชัน เมื่อเวลาผ่านไปเจลแป้งเย็นตัวลงโมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่ใกล้กัน จะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่โดยการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลจนเกิดเป็นผลึกใหม่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ทำให้น้ำที่อยู่ภายในโมเลกุลถูกบีบออกเจลที่

ได้จึงมีความหนืดสูงขึ้นหรืออาจเกิดเป็นฟิล์ม (Film) และเจลที่ได้จะมีลักษณะขุ่น กระบวนการนี้จะเรียกว่า การคืนตัวของแป้งสุก หรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)



รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง (นราธิป, 2556)

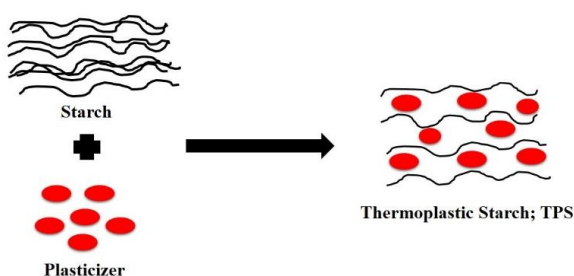
2.3 การเตรียมพลาสติกชีวภาพจากแป้ง

แป้งถูกนำมาใช้ในการผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพในช่วงทศวรรษที่ 1970 เนื่องจากแป้งเป็นวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติที่มีราคาถูก สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ ซึ่งพลาสติกที่เตรียมได้จากแป้งจะมีความสามารถในการย่อยสลายได้สูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันแป้งสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น ฟิล์มแป้ง โฟมแป้ง เทอร์โมพลาสติก-สตาร์ช (Thermoplastic starch) และยังมี การนำแป้งไปใช้เป็นสารตัวเติม (Fillers) ในพลาสติกสังเคราะห์เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายและลดต้นทุนในการผลิต หรือการใช้แป้งในการเตรียมเป็นวัสดุผสม (Composites) โดยส่วนใหญ่แป้งถูกนำมาใช้ในอัตราส่วนที่สูงในการเตรียมเป็นพลาสติกชีวภาพ (Olivier et al., 2004)

2.3.1 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch; TPS)

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดหนึ่ง ซึ่งในความเป็นจริงแป้งไม่มีสมบัติความเป็นพลาสติก แต่สามารถเตรียมแป้งให้มีสมบัติคล้ายพลาสติกได้โดยการใช้พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ได้แก่ น้ำ กลีเซอรอล (Glycerol) ซอบิทอล (Sorbitol) เป็นต้น ผสมกับแป้ง

แล้วให้ความร้อนและแรงเฉือนเพื่อให้แป้งผสมกับพลาสติกไซเซออร์จนเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อนำไปขึ้นรูปได้พลาสติกจากแป้งที่มีสมบัติคล้ายกับพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch; TPS) การเติมพลาสติกไซเซออร์ในการเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพื่อให้โมเลกุลของพลาสติกไซเซออร์เกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งแล้วทำให้สายไซโมเลกุลของแป้งเกิดการขยายตัวได้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งพลาสติกไซเซออร์ที่เติมเข้าไปทำให้สายไซโมเลกุลของแป้งสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายและช่วยลดอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) จึงทำให้แป้งที่เตรียมได้มีสมบัติที่ยืดหยุ่นคล้ายพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (ดัดแปลงจาก Nuanmano et al., 2015)

ปริมาณพลาสติกไซเซออร์มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ในตารางที่ 2.6 แสดงผลของพลาสติกไซเซออร์ต่อค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) และสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) เพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) และค่าโมดูลัส (Modulus) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลง หมายความว่าเมื่อปริมาณพลาสติกไซเซออร์เพิ่มมากขึ้นทำให้สายไซโมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นและสามารถยืดได้ง่ายขึ้นซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายกับพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก

ตารางที่ 2.6 ผลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของเทอร์โม-พลาสติกสตาร์ช (ดัดแปลงจาก Olivier et al., 2004)

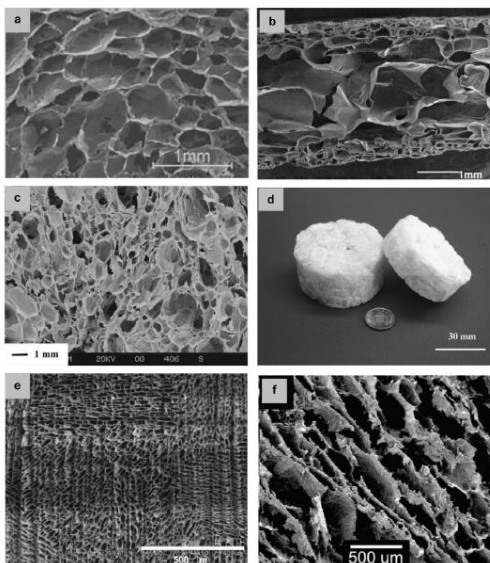
แป้ง (%)	กลีเซอรอล (%)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	อุณหภูมิคล้ายแก้ว (T _g) (°C)	โมดูลัส (MPa)
74	26	1.39	43	997
70	30	1.37	8	52
67	33	1.35	-7	26
65	35	1.34	-20	2

2.3.2 โฟมแป้ง (Starch Foam) (Soykeabkaew et al., 2015)

การเตรียมโฟมแป้งสามารถเตรียมได้โดยการนำแป้งมาผสมกับพลาสติกไซเซอร์และสารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) เพื่อให้ได้พลาสติกที่โปร่งอากาศภายใน ซึ่งโฟมแป้งสามารถเตรียมได้ด้วยกระบวนการขึ้นรูปหลายวิธีด้วยกัน เช่น

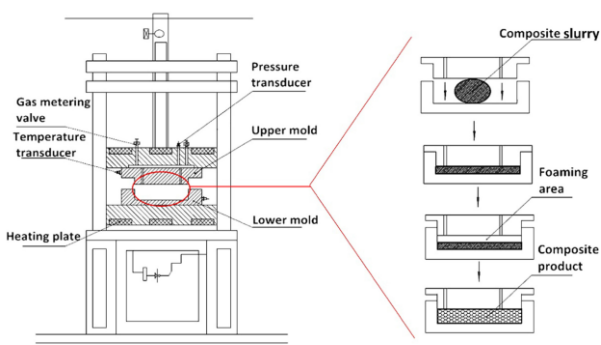
1. การอัดรีด (Extrusion)
2. การกดอัดทางความร้อน (Compression molding or Hot-mold baking)
3. การขึ้นรูปด้วยเทคนิคไมโครเวฟ (Microwave heating)
4. การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying)
5. การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย (Solvent exchange)

แต่ละเทคนิคของการเตรียมโฟมแป้งให้ลักษณะของเซลล์โฟม และขนาดเซลล์โฟมของโฟมแป้งมีลักษณะที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.10 ความแตกต่างของเซลล์โฟมส่งผลกระทบต่อสมบัติของโฟมแป้งที่เตรียมได้



รูปที่ 2.10 โฟมแข็งที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดฉีด (a) การกดอัดทางความร้อน (b) การขึ้นรูปด้วยเทคนิคไมโครเวฟ (c และ d) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (e) และ การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย (f) (Soykeabkaew et al., 2015)

จากรูปพบว่าโฟมแข็งที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดทางความร้อน ให้ลักษณะเซลล์โฟมที่สม่ำเสมอกว่าโฟมที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่น ซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่นิยมในการนำมาทำการขึ้นรูปโฟมแข็ง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่ายและมีราคาถูก รูปที่ 2.11 แสดงไดอะแกรมการขึ้นรูปโฟมแข็งด้วยกระบวนการกดอัด โฟมเกิดขึ้น โดยรูปร่างของโฟมแข็งขึ้นอยู่กับรูปร่างของแม่แบบ ดังนั้นรูปร่างและความหนาของโฟมแข็งสามารถควบคุมได้จากขนาดและรูปร่างของแม่แบบ



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมการขึ้นรูปโฟมแข็งด้วยกระบวนการกดอัด (Zhang et al., 2017)

2.3.3 การปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็ง

เนื่องจากโฟมที่เตรียมได้จากแข็งมีข้อด้อยที่สำคัญ คือ มีค่าสมบัติเชิงกลที่ต่ำ และไวต่อความชื้น จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็ง ดังนั้น มีหลายงานวิจัยสนใจปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งโดยการเตรียมโฟมแข็งผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น พอลิแลกติกแอซิด ยางธรรมชาติ และไคโตซาน เป็นต้น พบว่ายางธรรมชาติสามารถลดการดูดซับน้ำของโฟมแข็งได้ แต่ส่งผลให้โฟมแข็งมีค่าความหนาแน่นสูงขึ้น นอกจากนี้ พอลิแลกติกแอซิด และไคโตซานแม้สามารถปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งแต่ส่งผลให้โฟมแข็งที่เตรียมได้มีราคาแพงขึ้น นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งโดยผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ เช่น เส้นใยธรรมชาติ แคลเซียมคาร์บอเนต ไข่ไก่ และเคลย์ เป็นต้น ตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.7 แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยธรรมชาติมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็ง เนื่องจากมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกันกับแข็งทำให้กระจายและยึดเกาะกับแข็งได้ดี อีกทั้งยังมีราคาถูก และสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

ตารางที่ 2.7 การปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็ง (ดัดแปลงจาก Soykeabkaew et al., 2015)

แข็ง	สารตัวเติม	พอลิเมอร์	เทคนิคการขึ้นรูป
แข็งข้าวโพด	-	พอลิแลกติกแอซิด	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่
แข็งมันสำปะหลัง	เส้นใยคราฟท์	-	กดอัดทางความร้อน
แข็งมันสำปะหลัง	ถั่วไม่ยางพารา	แข็งคลอสลิงค์	การกดอัดทางความร้อน
แข็งมันสำปะหลัง	-	ไคโตซาน	การกดอัดทางความร้อน
แข็งมันฝรั่ง	-	ยางธรรมชาติ	การกดอัดทางความร้อน
แข็งมันสำปะหลัง	-	โปรตีนจากถั่วเหลือง	การกดอัดทางความร้อน
แข็งมันฝรั่ง	เส้นใยกัญชง	-	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่
แข็งมันสำปะหลัง	ฟางข้าว	-	การกดอัดทางความร้อน
แข็งมันสำปะหลัง	เส้นใยปอกระเจา	-	การกดอัดทางความร้อน

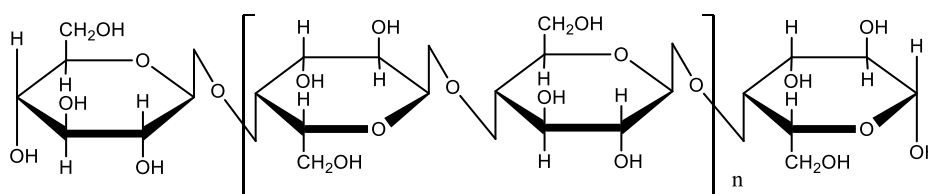
2.3.4 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber)

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่หาได้ง่ายในธรรมชาติ ส่วนใหญ่ได้จากพืช สัตว์ หรือธาตุ ซึ่งมีปริมาณมากในธรรมชาติที่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ ทั้งนี้เส้นใยธรรมชาติเป็น

วัสดุที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ โดยเส้นใยธรรมชาติจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีหน่วยย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคส ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) องค์ประกอบเหล่านี้มีปริมาณที่ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย ปัจจุบันเส้นใยธรรมชาตินิยมนำมาใช้เพื่อลดต้นทุนและปรับปรุงสมบัติในการผลิตพอลิเมอร์ผสม (Polymer Composites) เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีความเป็นผลึกสูงทำให้มีความแข็งแรงที่สูง โดยส่วนใหญ่จะใช้เส้นใยเป็นตัวเสริมแรงในเฟสกระจาย (Dispersed phase) ทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพและความแข็งแรงของพอลิเมอร์

2.3.5 เซลลูโลส (Cellulose)

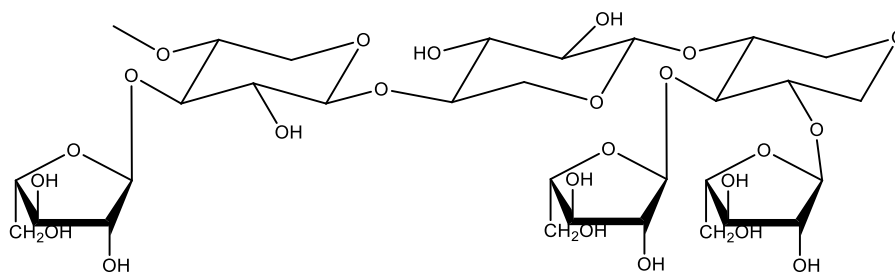
เป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใยธรรมชาติที่อยู่บริเวณผนังเซลล์พืช โดยมีปริมาณมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบอื่นๆ และพืชต่างชนิดกันมีปริมาณของเซลลูโลสที่ต่างกัน ซึ่งเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีความเป็นผลึกสูง และมีโครงสร้างทางเคมีที่มีหน่วยย่อยเป็น น้ำตาลกลูโคส ที่จับกันด้วยพันธะ 1,4-ไกลโคซิดิก ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างเซลลูโลส (Belgacem and Gandini., 2008)

2.3.6 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

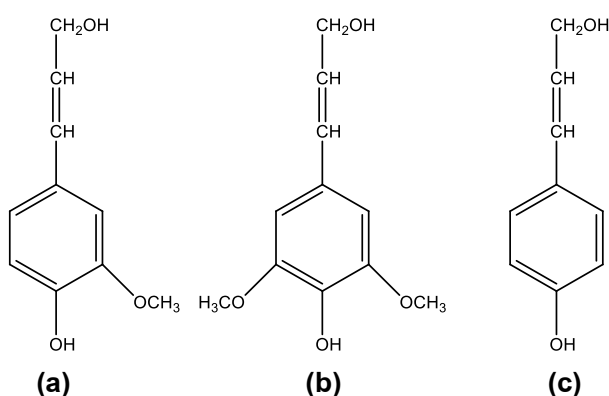
เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ซึ่งคล้ายกับเซลลูโลสแต่มีลักษณะเป็นร่างแหที่เชื่อมกับน้ำตาลโมเลกุล 5-6 คาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 พบในเนื้อเยื่อของพืชโดยรวมอยู่กับสารประกอบอื่นๆ เช่น ลิกนินและเซลลูโลส ซึ่งเฮมิเซลลูโลสจะมีโครงสร้างแบบรอสส์ฐาน จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าเซลลูโลสและถูกไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้ง่าย (Belgacem and Gandini., 2008)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส (Belgacem and Gandini., 2008)

2.3.7 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นองค์ประกอบสำคัญของเส้นใยธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่างแหของหมู่ฟีนอลิก (Phenolic) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีลักษณะเป็นอสัณฐาน ลิกนินมีองค์ประกอบหลักๆ 3 ชนิด คือ *trans-p-coumaryl alcohol*, *trans-coniferyl alcohol* และ *trans-p-sinapyl alcohol* ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.14 นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างอะโรมาติกอื่นๆที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของลิกนินเช่นกัน โดยลักษณะโครงสร้างของลิกนินมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของพืช นอกจากนี้พบว่าลิกนินมีความเป็นขั้วน้อยกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (Mohanty et al., 2005)



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของ *trans-coniferyl alcohol* (a), *trans-p-sinapyl alcohol* (b) และ *trans-p-coumaryl alcohol* (c) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของลิกนิน (Belgacem and Gandini., 2008)

2.4 เปลือกลูกยางพารา (Rubber seed shell)

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยและมีการปลูกมากในภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งมีแนวโน้มการปลูกเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยร้อยละ 5.05 ต่อปี ต้นยางพารานอกจากจะใช้ผลผลิตจากน้ำยางธรรมชาติและไม้ยางพาราแล้วยังมีผลพลอยได้อีกอย่างหนึ่งก็คือ ลูกยางพารา ประเทศไทยมีปริมาณลูกยางพาราสูงถึงประมาณ 173 ล้านกิโลกรัม แต่มีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมาก (ดารณี, 2554) เปลือกลูกยางพารา (Rubber seed shell) ดังรูปที่ 2.15 เป็นส่วนที่หุ้มเมล็ดของลูกยางพารา ในส่วนของเปลือกมีลักษณะที่แข็งและมีปริมาณเส้นใยอยู่เยอะกว่าส่วนอื่นๆ ของลูกยางพารา การใช้เส้นใยจากเปลือกลูกยางพาราเป็นสารตัวเติมถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าเปลือกลูกยางมาใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกลูกยางพารา ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมเส้นใยจากเปลือกลูกยางพาราโดยการนำมาบดให้มีลักษณะเป็นผงละเอียด และมีการนำไปร่อนเพื่อให้ได้อนุภาคที่ต้องการสำหรับการนำไปใช้เป็นสารตัวเติม



รูปที่ 2.15 เปลือกลูกยางพารา (Rubber seed shell)

2.5 ผักตบชวา (Water hyacinth)

ผักตบชวาเป็นต่างถิ่นที่เข้ามาแพร่ระบาดรุกรานในแหล่งน้ำและมีการขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆที่เป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการคมนาคม เช่น การเกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย การกีดขวางการสัญจรทางน้ำ (โองการ, 2558) ทำให้ปัจจุบันมีการหาแนวทางในการกำจัดผักตบชวาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตามผักตบชวาสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่างๆมากมาย เนื่องจากผักตบชวามีองค์ประกอบของเซลลูโลสที่สูงจึงทำให้เส้นใยผักตบชวามีความแข็งแรง ทำให้มีนักวิจัยสนใจใช้ผักตบชวาเป็นเส้นใยในการเตรียมพลาสติกชีวภาพ



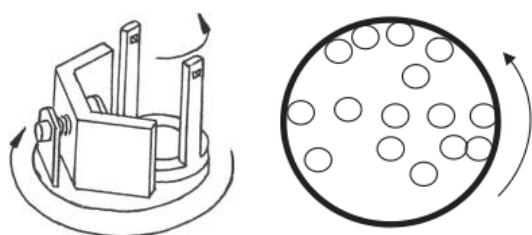
รูปที่ 2.16 ผักตบชวา (Water hyacinth)

2.6 เทคนิคบอลลมิล (Ball milling)

บอลลมิลเป็นเครื่องบดสารชนิดหนึ่ง ที่มีหม้อบดและข้างในบรรจุลูกบอลที่มีขนาดและชนิดของวัตถุที่แตกต่างกัน ซึ่งหม้อจะเกิดการหมุนแล้วลูกบอลที่อยู่ภายในจะเกิดการกระทบและการเหวี่ยงไปมาตลอดเวลาทั้งนี้ยังเกิดการเสียดสีกับผนังของหม้อบด ทำให้เกิดการบดและได้สารที่มีขนาดที่เล็กลง (อรอุษา, 2542) ซึ่งประสิทธิภาพในการบดของบอลลมิล ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนี้

1. อัตราการหมุนของหม้อบด
2. ขนาด ปริมาณและธรรมชาติของลูกบอลที่ใช้บด
3. ปริมาณของวัสดุที่ใช้บด
4. ระยะเวลาที่ใช้ในการบด

ในปัจจุบันเทคนิคบอลลมิลถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมสี เซรามิก การเตรียมสารเคมีสำหรับผสมในน้ำยาฆ่าเชื้อ และการเตรียมเส้นใยที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.17 ลักษณะการทำงานของเครื่องบอลลมิล (Baker et al., 2010)

2.7 ไช้ผึ้ง (Beeswax)

ไช้ผึ้งเป็นไข (Wax) ที่ได้จากรังผึ้งในธรรมชาติ ซึ่งมีลักษณะที่นุ่มและมีสีเหลือง มีจุดหลอมเหลวต่ำ อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 62-64 องศาเซลเซียส โดยไช้ผึ้งประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด เช่น เอสเทอร์ (Ester) ร้อยละ 67, ไฮโดรคาร์บอนด์ (hydrocarbon) ร้อยละ 14, กรดไขมันอิ่มตัว (Fatty acid) ร้อยละ 12, แอลกอฮอล์ (Alcohol) ร้อยละ 1 และอื่นๆ ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก (Reis et al., 2018) ไช้ผึ้งมีสมบัติในการต้านการซึมผ่านของน้ำ เนื่องจากมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ต้านเชื้อแบคทีเรีย (Zhang et al., 2018) ด้วยเหตุนี้จึงนิยมนำไช้ผึ้งมาใช้ประโยชน์ในด้านการถนอมอาหารและด้านการแพทย์อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน



รูปที่ 2.18 ไช้ผึ้ง (Beeswax) (Khan et al., 2016)

2.8 การตรวจสอบเอกสาร

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโฟมแข็ง

Bergel และคณะ (2017) ศึกษาอิทธิพลการเคลือบผิวของโฟมแข็งด้วยไคโตซาน โดยเตรียมโฟมแข็งจากแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด จากการศึกษาพบว่าโฟมที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดมีค่าความหนา ค่าความหนาแน่นและค่าการต้านทานต่อแรงดึงที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแข็งที่เตรียมจากแป้งชนิดอื่น และพบว่าการเคลือบผิวของโฟมแข็งด้วยไคโตซานจะช่วยลดค่าการดูดซับน้ำและเพิ่มค่าการต้านทานต่อแรงดึงของโฟมแข็ง

Machado และคณะ (2017) ศึกษาการเตรียมโฟมแข็งจากมันสำปะหลังผสมกับกากงา (Sesame cake) ที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันงาด้วยวิธีการกวดอัดทางความร้อน โดยแปรปริมาณอัตราส่วนของแป้งกับกากงาที่ 90/10, 80/20, 70/30

และ 60/40 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าโฟมแข็งที่ผสมจากงาสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล ค่าความหนาแน่นและสมบัติการดูดซับความชื้นของโฟมแข็งได้ดี โดยการเติมจากงาในอัตราส่วนร้อยละ 20 พบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมแข็งได้สูงที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับโฟมพอลิสไตรีนที่ได้จากพลาสติกสังเคราะห์

Chiarathanakit และคณะ (2018) ศึกษาการเตรียมโฟมแข็งจากมันสำปะหลังผสมเกล็ดปลาที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมงให้ปริมาณของแคลเซียมสูงที่สุด จึงนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในโฟมแข็งในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าโฟมแข็งที่ผสมเกล็ดปลาที่ผ่านการดัดแปรสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์โฟมและเสถียรภาพทางความร้อนของโฟมแข็งได้ดีกว่าโฟมแข็งที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมเกล็ดปลาที่ไม่ผ่านการดัดแปร

Ghanbari และคณะ (2018) ศึกษาอิทธิพลของसानโซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของโฟมแข็ง โดยแปรปริมาณเส้นใยนาโนเซลลูโลสร้อยละ 0, 0.5, 1 และ 1.5 โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดฉีด จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น สามารถปรับปรุงสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของโฟมแข็งได้ และพบว่าที่ปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของเส้นใยสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของโฟมแข็งได้ดีที่สุด

Bergel และคณะ (2018) ศึกษาสมบัติของโฟมแข็งจากมันฝรั่งที่เคลือบผิวด้วยพอลิแลกติกแอซิด โดยแปรปริมาณสารเคลือบในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยปริมาตรของคลอโรฟอร์ม จากการศึกษาพบว่าโฟมแข็งที่เคลือบผิวด้วยพอลิแลกติกแอซิดสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับน้ำและความชื้นของโฟมแข็งได้ดีกว่าโฟมแข็งที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว และพบว่าที่ปริมาณร้อยละ 6 โดยปริมาตรของสารเคลือบสามารถปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามพบว่าที่บริเวณผิวหน้าของโฟมแข็งมีความยึดเกาะกันได้ไม่ดีระหว่างโฟมแข็งและพอลิแลกติกแอซิด เนื่องจากสภาพขรุขระของทั้ง 2 เฟสต่างกัน

Keawtatip และคณะ (2018) ศึกษาการเตรียมโฟมแข็งผสมเปลือกไข่และเปลือกกุ้งเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า โดยแปรปริมาณสารตัวเติมที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของแข็ง จากการศึกษาพบว่าเปลือกไข่และเปลือกกุ้งสามารถปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งได้โดยสามารถปรับปรุงลักษณะเซลล์โฟมให้มีขนาดเล็กและแน่นขึ้น และพบว่าเปลือกไข่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของโฟมแข็งได้ดีกว่าเปลือกกุ้งและแคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า และ

พบว่าที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของเปลือกไข่สามารถปรับปรุงสมบัติของโพลีเอทิลีนได้ดีที่สุด

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเปลือกกล้วยพารา

Ekebafé และคณะ (2010) ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่มีการดัดแปรด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิต่างกันคือ 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าค่าพีเอช (pH) สภาพการนำไฟฟ้าและพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาการเกิดการเชื่อมขวางของยางคอมพาวด์พบว่าเวลาที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางเวลาที่ยางเริ่มสุก และค่าทอร์กของยางคอมพาวด์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยเปลือกกล้วยพาราเพิ่มขึ้น ยางคอมพาวด์ที่ใช้เส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่มีการดัดแปรด้วยวิธีการเผาในช่วงอุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส สามารถปรับปรุงสมบัติของยางคอมพาวด์ได้ดีที่สุด

Xu และคณะ (2016) ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) กับเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่มีการดัดแปรโดยการกราฟท์กับไกลซีดีล เมทาไครเลท (GMA) จากการศึกษาพบว่าการดัดแปรเส้นใยเปลือกกล้วยพาราด้วยการกราฟท์กับ GMA สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล อัตราการดูดซับน้ำและเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม และพบว่าค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ดัดแปรกับเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ดัดแปร แสดงให้เห็นว่าเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ทำการดัดแปรมีค่าเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงกว่าเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ดัดแปร

Xu และคณะ (2016) ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่มีการดัดแปรโดยการเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 220 องศาเซลเซียส และทำการแปรปริมาณขนาดอนุภาคของเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ 60-80, 80-100 และ 100-120 เมช จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ทำการดัดแปรด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ขนาดอนุภาค 100-120 เมช สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน อัตราการดูดซับน้ำได้ดีที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเส้นใยเปลือกกล้วยพาราสูตรอื่นๆ

2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผักตบชวา

Supri และคณะ (2009) ศึกษาปริมาณของเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านตัดแปรรและไม่ผ่านการตัดแปรรที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตผสมเส้นใยผักตบชวาที่มีการแปรปริมาณร้อยละ 0, 5, 15 และ 25 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าเส้นใยผักตบชวาสามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตให้สูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น และพบว่าเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการตัดแปรรสามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ดีกว่าเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการตัดแปรร

Abraal และคณะ (2014) ศึกษาอิทธิพลของเส้นใยผักตบชวาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเอสเทอร์คอมโพสิตก่อนและหลังแช่น้ำ โดยใช้เส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการตัดแปรรด้วยไซเคียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ และเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยมีการแปรปริมาณเส้นใยผักตบชวาร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าการตัดแปรรเส้นใยสามารถลดการดูดซับความชื้นได้ และพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผ่านการแช่น้ำมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่แช่น้ำ อย่างไรก็ตามการใช้เส้นใยผักตบชวาเป็นสารตัวเติมในพอลิเอสเทอร์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้

Padmanabhan และคณะ (2016) ศึกษาผลของการใช้เส้นใยผักตบชวาและผงอลูมิเนียมที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเอสเทอร์คอมโพสิต โดยแปรปริมาณเส้นใยผักตบชวาร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และมีการใช้ผงอลูมิเนียมร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าที่ปริมาณสัดส่วนของเส้นใยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่ผสมผงอลูมิเนียมคือสัดส่วนที่ดีที่สุด สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเอสเทอร์คอมโพสิตได้ดีที่สุด

Asrofi และคณะ (2018) ศึกษาอิทธิพลของการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคในการเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังผสมเส้นใยผักตบชวาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และทำการสั่นที่ความถี่ 450 กิโลเฮิร์ต, 250 วัตต์ ที่เวลาต่างกันคือ 0, 15, 30 และ 60 นาที จากการศึกษาพบว่าเมื่อเวลาการสั่นเพิ่มขึ้น ความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาลดลงและที่เวลาในการสั่น 30 และ 60 นาที สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งได้ นอกจากนี้พบว่าการเตรียมฟิล์มแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาด้วยวิธีการสั่นสามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนได้เช่นกัน

2.8.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการบดลึง (Ball mill)

He และคณะ (2014) ศึกษาการอิทธิพลของเทคนิคบดลึงต่อสมบัติของแป้งข้าวโพดด้วยวิธีการหล่อเย็น โดยใช้ลูกบด 2 ชนิด คือ สแตนเลสและเซรามิก ทำการบดที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 5-10 องศาเซลเซียสจากการศึกษาพบว่าผลของชนิดลูกบดที่ใช้ในการบดไม่มีนัยสำคัญต่อสมบัติของเม็ดแป้ง และพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเม็ดแป้งเพิ่มขึ้น ความเป็นผลึกของแป้งลดลง ความโปร่งแสงเมื่อละลายในน้ำเย็นเพิ่มขึ้น และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งมีความขรุขระขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดแป้งที่ไม่ผ่านการบด

Phanthong และคณะ (2016) ศึกษาอิทธิพลของเทคนิคบดลึงต่อการเตรียมนาโนเซลลูโลสตัดแปรด้วยกรดซัลฟิวริก โดยใช้เส้นใยเซลลูโลส 2 ชนิด คือ เซลลูโลสจากเยื่อกระดาษและผงเซลลูโลส ทำการบดด้วยเทคนิคบดลึงที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาทีและแปรปริมาณเวลาในการบดคือ 0.5, 1, 2 และ 3 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าเมื่อเวลาการบดเพิ่มขึ้นทำให้ความเป็นผลึกและขนาดผลึกของเซลลูโลสลดลง แต่เซลลูโลสที่ตัดแปรด้วยกรดมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกำจัดส่วนที่เป็นอสังฐาน และพบว่าสมบัติทางความร้อนของเส้นใยที่ผ่านการบดมีค่าต่ำกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการบด อย่างไรก็ตามการเตรียมเส้นใยนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิคบดลึงให้ร้อยละผลผลิตที่สูง

Mattonai และคณะ (2018) ศึกษาอิทธิพลของเทคนิคบดลึงที่มีผลต่อการเตรียมเส้นใยเซลลูโลส โดยทำการบดเส้นใยเซลลูโลสที่เวลา 30, 60 และ 120 นาที จากการศึกษาพบว่าความเป็นผลึกของเซลลูโลสลดลง และเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยที่ผ่านการบดต่ำกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการบด นอกจากนี้พบว่าค่าดัชนีการเกิดพอลิเมอร์ไซซันและพลังงานกระตุ้นในการไพโรไลซิสลดลง 20 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Sundam และคณะ (2018) ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซผสมถั่วลันเตาที่ผ่านการบดด้วยเทคนิคบดลึงที่ความเร็วรอบ 400 และ 600 รอบต่อนาที ที่เวลา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าที่ความเร็วในการบด 400 รอบต่อนาทีเวลา 1 ชั่วโมงสามารถลดขนาดอนุภาคของถั่วลันเตาได้ถึง 13.17 ไมโครเมตร และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าถั่วลันเตาที่ผ่านการบดสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซคอมโพสิต และพบว่าสามารถระยะเวลาในการย่อยสลายให้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมถั่วลันเตาที่ไม่ผ่านการบด

2.8.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไซซีผึ้ง

Ren และคณะ (2016) ศึกษาอิทธิพลของไซซีผึ้งตัดแปรที่มีผลต่อผิวหน้าของไม้ โดยตัดแปรไซซีผึ้งผสมไทเทเนียมออกไซด์และโคโตน และทำการฉีดพ่นลงบนพื้นผิวของไม้เป็นเวลา 3 นาที จากการศึกษาพบว่า การเคลือบผิวหน้าด้วยไซซีผึ้งตัดแปรสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล สี และสมบัติทางกายภาพของไม้ได้ และพบว่าไม้เคลือบผิวด้วยไซซีผึ้งตัดแปรเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเฟอร์นิเจอร์และใช้งานในสภาวะอากาศที่แห้ง

Zhang และคณะ (2018) ศึกษาอิทธิพลของไซซีผึ้งและไซคาร์บอนาร์ต่อสมบัติของฟิล์มเจลาติน โดยแปรปริมาณของไซทั้ง 2 ชนิดที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของไซเพิ่มขึ้นส่งผลให้สีของฟิล์มเข้มขึ้น และพบว่าที่ปริมาณร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนักของไซทั้ง 2 ชนิด สามารถปรับปรุงสมบัติการละลายน้ำ และซึมผ่านของแสงกับความชื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยไซซีผึ้งสามารถปรับปรุงสมบัติของฟิล์มได้ดีกว่าไซคาร์บอนาร์ อย่างไรก็ตามพบว่าการผสมไซทั้ง 2 ชนิด ทำให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มลดลงเนื่องจากความแข็งแรงของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น แต่ฟิล์มที่เตรียมสามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ถนอมอาหาร

Reis และคณะ (2018) ศึกษาการเตรียมถาดบรรจุภัณฑ์จากเทอร์โมพลาสติก-สตาร์ชผสมพอลิแลกติกแอซิดที่เคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง โดยแปรปริมาณสารละลายของไซซีผึ้งร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เคลือบผิวด้วยวิธีการฉีดพ่นลงบนถาดบรรจุภัณฑ์เป็นเวลา 3 วินาที จากการศึกษาพบว่า การเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้งสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการซึมผ่านของน้ำ และความสามารถในการละลายน้ำลดลง เมื่อปริมาณของไซซีผึ้งเพิ่มขึ้น และพบว่าถาดบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมได้เหมาะแก่การบรรจุผลไม้ผักและอาหารที่มีลักษณะแห้ง

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลังชนิดแป้งดิบ (Native cassava starch; PD 10369) (Siam Modified Starch Co.,Ltd.)
2. กลีเซอรอล (Glycerol) (Ajax FinechemPty.,Ltd.)
3. แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate) (Sigma-Aldrich,Inc.)
4. กัวร์กัม (Guar gum) (Sigma-Aldrich,Inc.)
5. น้ำกลั่น (Distilled Water)
6. เส้นใยจากเปลือกลูกยางพารา (Rubber Seed Shell; RSS)
7. เซลลูโลสทางการค้า (Commercial Cellulose; CL) (Sigma-Aldrich,Inc.)
ขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร
8. เส้นใยผักตบชวา (Water Hyacinth; WH)
9. ซิลิโคนอิมัลชัน (Silicone emulsion)
10. ไขขี้ผึ้ง (Bee wax)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 อุปกรณ์และวัสดุ

1. ช้อนพลาสติก
2. ถ้วยพลาสติก
3. แก้วน้ำพลาสติก
4. มีดคัตเตอร์
5. กรรไกร
6. ไม้บรรทัด
7. ปากกาเคมี
8. ถุงซิปล
9. เบ้าอะลูมิเนียม
10. อะลูมิเนียมฟลอยด์
11. ถาดอะลูมิเนียม
12. เกียงเหล็ก
13. ไม้พายพลาสติก

14. ถุงมือผ้า

3.2.2 เครื่องมือ

1. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
3. ตู้อบ
4. เวอร์เนียร์ดิจิตอล
5. เครื่องกดอัดทางความร้อน (Compression molding)
6. ตะแกรงร่อนขนาด 60 เมช หรือ 250 ไมโครเมตร
7. เครื่องแยกขนาดอนุภาค (ELE INTERNATIONAL รุ่น EL79-0010)
8. นาฬิกาจับเวลา
9. เครื่องบดไฟฟ้า (Mortar grinder pulverisette) (Polymix PX-MFC 90)
10. เครื่องตีแป้ง รุ่น KHH326WH (บริษัทเคนวู้ด จำกัด)
11. โถดูดความชื้น
12. บีกเกอร์
13. แท่งแก้วคน
14. เตาให้ความร้อน
15. อ่างน้ำร้อน
16. เทอร์โมมิเตอร์
17. เครื่องบอลมิล (Ball mill) (Retsch Co., Germany; Model No.: PM 100)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใยเปลือกลูกยางพารา

1. นำเปลือกลูกยางพารามาล้างน้ำให้สะอาดแล้วตากแดดให้แห้ง
2. ทบเปลือกลูกยางพาราให้แตกและมีขนาดเล็กลงบดด้วยเครื่องบดไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a) จนได้เปลือกลูกยางพาราที่มีลักษณะเป็นผง
3. นำเปลือกลูกยางพาราที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช ด้วยเครื่องร่อนดังแสดงในรูปที่ 3.1 (b)
4. นำเส้นใยที่ผ่านการร่อนแล้วไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำเส้นใยบรรจุในถุงซิปล็อค 2 ชั้น แล้วเก็บในโถดูดความชื้นจนกว่าจะนำไปใช้งาน



(a)



(b)

รูปที่ 3.1 เครื่องตัดเส้นใยไฟฟ้า (a) และเครื่องคัดแยกเส้นใย (b)

3.3.2 การเตรียมเส้นใยผักตบชวา

1. นำลำต้นของผักตบชวามาล้างน้ำให้สะอาดตัดให้มีขนาดเล็กแล้วตากแดดให้แห้ง
2. นำผักตบชวาที่ตากแห้งแล้วมาบดด้วยเครื่องบดไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a) จนได้เส้นใยผักตบชวาที่มีลักษณะเป็นผง
3. นำเส้นใยผักตบชวาที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช ด้วยเครื่องร่อนดังแสดงในรูปที่ 3.1 (b)
4. นำเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการร่อนแล้วไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำเส้นใยบรรจุในถุงซิปล็อค 2 ชั้น แล้วเก็บในโถดูดความชื้นจนกว่าจะนำไปใช้งาน

3.3.3 การลดขนาดของเส้นใยด้วยเทคนิคบอลลมิล (Ball Mill)

1. เตรียมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราและเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช จำนวน 10 กรัม
2. นำเส้นใยที่ได้ไปปรับลดขนาดด้วยวิธีการบอลลมิล ที่ความเร็วรอบ 300 และ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20, 40 และ 60 นาที เพื่อศึกษาสภาวะที่ได้เส้นใยขนาดเล็กที่สุด
3. นำเส้นใยที่ได้มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำเส้นใยบรรจุในถุงซิปล็อค 2 ชั้น แล้วเก็บในโถดูดความชื้นจนกว่าจะนำไปใช้งาน

3.3.4 การเตรียมโฟมแข็ง

- นำแข็งไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บรรจุในถุงซิปล็อค 2 ชั้นแล้วเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นจนกว่าจะนำไปใช้งาน
- เตรียมแข็งและส่วนผสมต่างๆ ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมแข็งมันสำปะหลัง

ส่วนผสม	น้ำหนัก (กรัม)
แข็งมันสำปะหลัง ชนิดแข็งดิบ	200
เส้นใยเซลลูโลสทางการค้า, เปลือกกล้วยพารา และผักตบชวา	6, 10, 14, 20
กัวร์กัม	2
แมกนีเซียมสเตียเรท	4
กลีเซอรอล	10
น้ำกลั่น	200

- จากนั้นผสมแข็งและส่วนผสมต่างๆ ที่เป็นของแข็งและสารตัวเติม (เซลลูโลสทางการค้า, เส้นใยจากเปลือกกล้วยพารา และเส้นใยผักตบชวา) ด้วยเครื่องตีแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (a) ใช้ความเร็วเบอร์ 3 และใช้ตำกวนรูปตะกร้อ ดังรูปที่ 3.2 (b) กวนของผสมเป็นเวลา 10 นาที จนของผสมทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.2 เครื่องตีแข็ง (a) ตำกวนรูปตะกร้อ (b) และตำกวนรูปตัวเค (c)

4. ผสมน้ำและกลีเซอรอลให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันแล้วแบ่งออกเป็น 2 ส่วนก่อนเติมลงไปเครื่องตีแป้งที่ละส่วน กวนของผสมด้วยตัวกวนรูปตัวเค ดังรูปที่ 3.2 (c) จนของผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้ความเร็วเบอร์ 3
5. นำของผสมที่ผสมเสร็จแล้วใส่ลงในแม่แบบที่ร้อน ดังรูปที่ 3.3 (a) และนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดทางความร้อน ดังรูปที่ 3.3 (b) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที



(a)



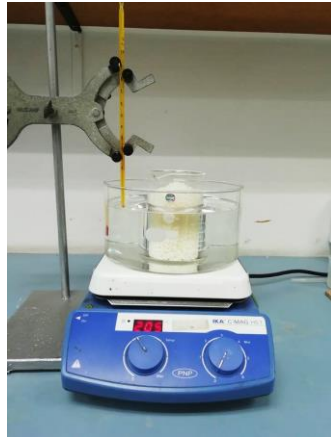
(b)

รูปที่ 3.3 แม่แบบ (a) และเครื่องกดอัดทางความร้อน (b)

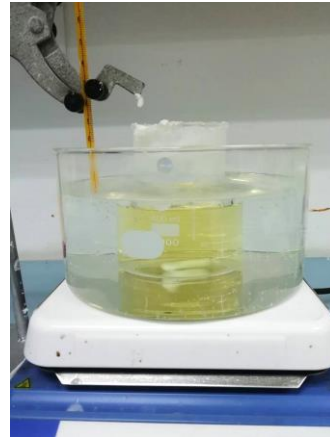
6. นำแม่แบบออกจากเครื่องกดอัดทางความร้อน วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาทีเพื่อให้เย็นตัวลง หลังจากนั้นนำโฟมแข็งที่ได้ออกจากแม่แบบ
7. เก็บชิ้นงานที่ได้ไว้ในสภาวะที่อุณหภูมิห้องความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 RH เป็นเวลา 7 วัน ก่อนทำการทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.5 การเคลือบผิวโฟมแข็ง

1. ละลายไซซีฟิ่งในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (a) โดยใช้แท่งแม่เหล็กช่วยในการละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน จนได้ไซซีฟิ่งที่ละลายเป็นของเหลวสีเหลือง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (b)



a



b

รูปที่ 3.4 การละลายไซซีผึ้งในอ่างน้ำร้อน (a) และไซซีผึ้งที่ละลายสมบูรณ์ (b)

2. นำไซซีผึ้งที่ละลายประมาณ 15 มิลลิลิตร มาเคลือบลงบนผิวของโฟมแข็งโดยใช้แท่งแก้วช่วยในการกระจายสารเคลือบผิวให้ทั่วบนแผ่นโฟมแข็งทั้งด้านหน้าและด้านหลังดังแสดงในรูปที่ 3.5 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้สารเคลือบแห้ง
3. นำโฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวไปเก็บในสภาวะที่อุณหภูมิห้องที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 RH เป็นเวลา 7 วัน ก่อนทำการทดสอบสมบัติต่างๆ



รูปที่ 3.5 การเคลือบผิวโฟมแข็งด้วยไซซีผึ้ง

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การทดสอบหาความหนาแน่น (Density)

เตรียมชิ้นทดสอบให้มีความกว้าง×ยาว เท่ากับ 12.7 × 63.5 มิลลิเมตร ตัวอย่างหนึ่ง
สูตรใช้ชิ้นตัวอย่างทดสอบ 10 ชิ้น วัดขนาดของชิ้นทดสอบ และชั่งน้ำหนัก โดยความ-
หนาแน่นคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\text{Density} = \frac{m}{v} \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ m คือ น้ำหนักของตัวอย่าง มีหน่วยเป็น กรัม

v คือ ปริมาตรของตัวอย่าง มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.4.2 การทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการหักงอ (Flexural testing)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยเตรียมชิ้นทดสอบให้มีความกว้าง
30 มิลลิเมตร ความยาว 130 มิลลิเมตร จำนวน 10 ชิ้น ทดสอบโดยใช้เครื่อง Universal
testing machine Instron 3365 ระยะทดสอบ (Support span) 80 มิลลิเมตร ใช้แรงขนาด
100 นิวตัน และอัตราการให้แรงเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที

3.4.3 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture Content)

เตรียมชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด 30×30 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้น ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง
ก่อนทำการทดสอบ จากนั้นอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา
24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังทำการทดสอบ นำน้ำหนักที่ได้มาทำการ
คำนวณหาค่า Moisture Content (%) ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$\text{Moisture Content (\%)} = [W_1 - W_2] / W_2 \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของโฟมแข็งก่อนอบ มีหน่วยเป็น กรัม

W_2 คือ น้ำหนักของโฟมแข็งหลังอบ มีหน่วยเป็น กรัม

3.4.4 การศึกษาการดูดซับน้ำ (Water absorption)

เตรียมชิ้นตัวอย่างที่มีขนาด 40×20 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้น ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ หลังจากนั้นทำการทดสอบโดยแช่ตัวอย่างในน้ำกลั่นเป็นเวลา 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที เก็บตัวอย่างทุกครั้งเมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำมาชั่งน้ำหนักด้วยกระดาษหิซชูเป็นเวลา 3 นาที ทำชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังทำการทดสอบ จากนั้นทำการทดสอบซ้ำจนครบกำหนดเวลา 30 นาที นำน้ำหนักที่ได้มาทำการคำนวณหาร้อยละการดูดซับน้ำ (Water absorption %) ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$\text{Water absorption (\%)} = [S_2 - S_1] / S_2 \times 100 \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ S_1 คือ น้ำหนักของโพลีเมอร์แห้งก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น กรัม
 S_2 คือ น้ำหนักของโพลีเมอร์แห้งหลังทดสอบ มีหน่วยเป็น กรัม

3.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) โดยศึกษาที่อุณหภูมิที่ 50 -700 องศาเซลเซียส และอัตราให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน

3.4.6 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

เตรียมตัวอย่างโดยตัดชิ้นตัวอย่าง 2 ชิ้น ติดบน stub และเคลือบตัวอย่างด้วยทอง โดยศึกษาตัวอย่างที่กำลังขยายต่างๆ ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM-Quantum 400)

3.4.7 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

เตรียมตัวอย่างโดยการบดผสมกับ KBr แล้วอัดให้เป็นแผ่น นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในช่วง 400-4000 cm^{-1} สแกนในช่วง 512 ครั้ง

3.4.8 การศึกษาอนุภาคของเส้นใย

เตรียมเส้นใยที่มีลักษณะผงไปศึกษาขนาดอนุภาคของเส้นใยโดยใช้เทคนิค LPSA (Laser Particle Size Analyzer) รุ่น LS 230, COULTER

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์จากแป้งมันสำปะหลังในงานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และผสมสารตัวเติมธรรมชาติคือ เซลลูโลสทางการค้า (CL) เส้นใยเปลือกกล้วยพารา (RSS) และเส้นใยผักตบชวา (WH) เพื่อปรับปรุงสมบัติของโพลีเมอร์โดยผลการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ศึกษาสมบัติของสารตัวเติมที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของโพลีเมอร์ ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมเปรียบเทียบกับระหว่างสารตัวเติมที่ผ่านและไม่ผ่านการลดขนาดที่มีผลต่อสมบัติของโพลีเมอร์ และศึกษาอิทธิพลของการเคลือบผิวโพลีเมอร์ด้วยไซซีฟิ่งที่มีผลต่อสมบัติการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์

4.1 การศึกษาสมบัติของสารตัวเติม

4.1.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและการเตรียมเส้นใย

ขั้นตอนการเตรียมเส้นใยธรรมชาติเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในการเตรียมโพลีเมอร์แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเตรียมเส้นใยเปลือกกล้วยพารา (a) และเส้นใยผักตบชวา (b)

โดยเตรียมเส้นใยให้มีขนาดเล็กด้วยเทคนิคบอลมิลเพื่อลดขนาดเส้นใย และศึกษาอิทธิพลของความเร็รรอบและเวลาที่ใช้ในการบด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อความเร็รรอบเพิ่มขึ้นขนาดของเส้นใยเปลือกถั่วอย่างพารา (RSS) มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากความเร็รรอบทำให้เกิดแรงเฉือนมากขึ้นส่งผลให้เส้นใยเกิดการแตกและฉีกขาดจึงทำให้มีขนาดเล็กลง (Baker et al., 2010) อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาในการบดเพิ่มขึ้นพบว่าเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็กมากส่งผลให้เส้นใยเกิดการเกาะกลุ่มกันเองจึงทำให้ขนาดอนุภาคของเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาในการบดเพิ่มขึ้น (Sundum et al., 2018) จากผลการศึกษาสภาวะของการลดขนาดเส้นใยเปลือกถั่วอย่างพาราพบว่าที่ความเร็รรอบ 600 รอบต่อนาที ที่เวลา 40 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดขนาดเส้นใยเปลือกถั่วอย่างพารา ซึ่งสามารถลดได้ถึง 51.57 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.1 อิทธิพลของความเร็รรอบและเวลาในการบดต่อการลดขนาดอนุภาคของเส้นใยเปลือกถั่วอย่างพารา (RSS) ด้วยเทคนิคบอลมิล

เวลาในการบด (นาที)	ความเร็รรอบในการบด (รอบ/นาที)	
	300	600
20	181.60 μm	74.37 μm
40	123.30 μm	51.57 μm
60	92.97 μm	54.13 μm

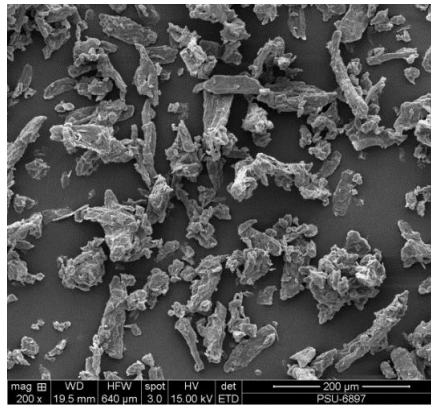
เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมจึงได้บดเส้นใยผักตบชวา (WH) ที่สภาวะเดียวกันพบว่าเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดมีขนาดอนุภาคลดลงจาก 246.70 ไมโครเมตร เป็น 41.81 ไมโครเมตร และพบว่าเส้นใยผักตบชวา มีขนาดเล็กกว่าเส้นใยเปลือกถั่วอย่างพารา เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเปลือกถั่วอย่างพารามีลักษณะที่แข็งและมีเนื้อของเส้นใยที่แน่นกว่าผักตบชวา (ส่วนของลำต้น) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเป็นโพรงคล้ายฟองอากาศ (จิรัชยา, 2559; อิศเฮาะ, 2556) จึงส่งผลให้ขนาดของเส้นใยที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการบดลดขนาดด้วยเทคนิคบอลมิลของเส้นใยผักตบชวามีขนาดเล็กกว่าเส้นใยจากเปลือกถั่วอย่างพารา เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคในตารางที่ 4.2 พบว่าการลดขนาดเส้นใยธรรมชาติด้วยเทคนิคบอลมิล ที่ความเร็รรอบ 600 รอบต่อนาที ที่เวลา 40 นาที สามารถลดขนาดอนุภาคของเส้นใยได้ถึงประมาณ 5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นใยที่ไม่ผ่านการบด

ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติโฟมแข็ง

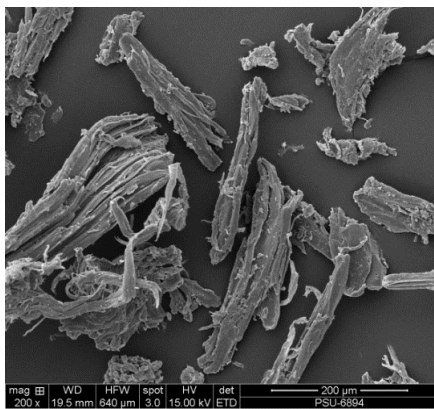
สารตัวเติม	ขนาดอนุภาค (μm)
เส้นใยเปลือกลูกยางพารา (RSS)	237.90
เส้นใยเปลือกลูกยางพาราลดขนาด (RSS_Mo)	51.57
เส้นใยผักตบชวา (WH)	246.70
เส้นใยผักตบชวาลดขนาด (WH_Mo)	41.81

4.1.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของสารตัวเติม

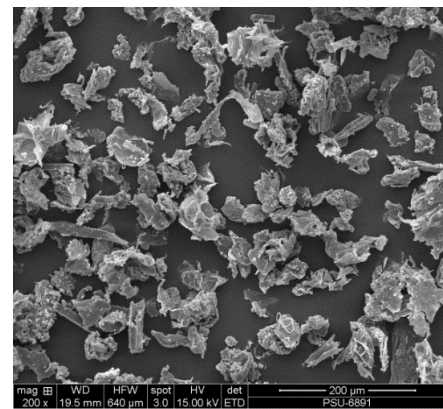
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็ง พบว่าเซลลูโลสทางการค้าและเส้นใยเปลือกลูกยางพารา มีลักษณะเป็นแท่งยาว (Rod like) และรวมกันเป็นมัดๆ (Mohamad et al., 2014) ดังแสดงในรูป 4.2 (a) และ (b) และเมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยผักตบชวาในรูปที่ 4.2 (c) พบว่ามีลักษณะเป็นแผ่นแบน (Plate like) เมื่อนำเส้นใยไปผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลลมิล พบว่าเส้นใยเปลือกลูกยางพาราและเส้นใยผักตบชวามีขนาดเล็กและมีลักษณะเป็นแผ่นเล็กๆ แสดงในรูป 4.2 (d) และ (e) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลขนาดอนุภาคของเส้นใยดังแสดงในตารางที่ 4.2



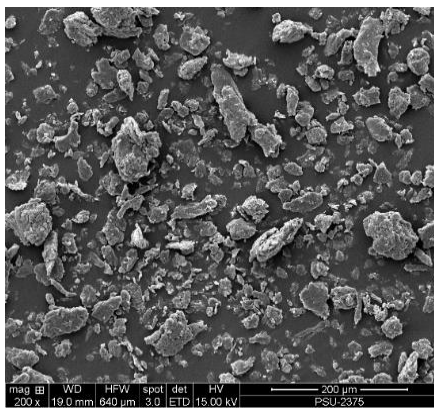
(a)



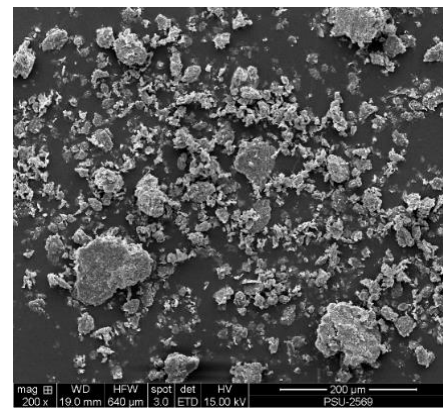
(b)



(c)



(d)

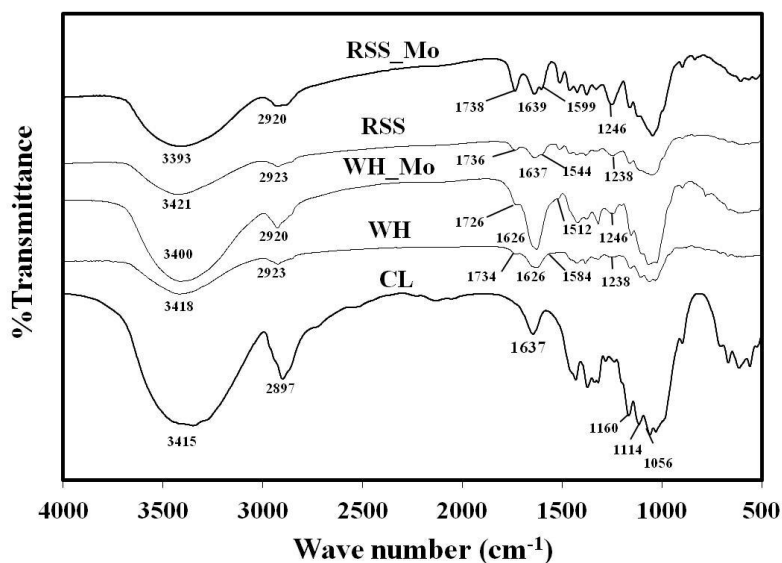


(e)

รูปที่ 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลลูโลสทางการค้า (CL) (a), เส้นใยเปลือกถั่ว-
 ยางพารา (RSS) (b), เส้นใยผักตบชวา (WH) (c), เส้นใยเปลือกถั่วยางพาราบด
 (RSS_Mo) (d) และเส้นใยผักตบชวาบด (WH_Mo) (e)

4.1.3 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวเติม

รูปที่ 4.3 แสดง FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยเปลือกกล้วยพาราและเส้นใยผักตบชวาก่อนและหลังการบำบัดด้วยเทคนิคบอลมิล โดยเปรียบเทียบกับเซลลูโลสทางการค้า



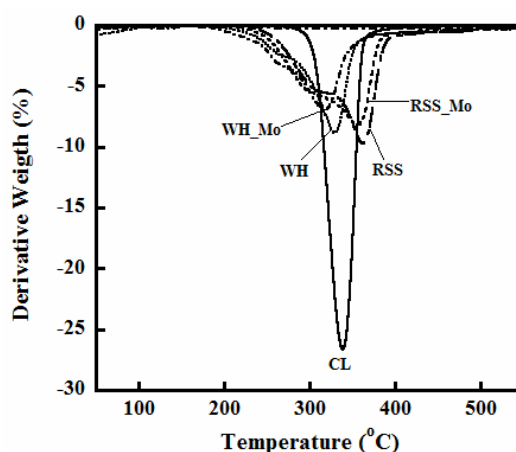
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของเส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติม

พบว่าสเปกตรัมที่แสดงในรูปมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันเนื่องจากเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส พบว่าสเปกตรัมตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $3100-3600\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบเซลลูโลสและพันธะไฮโดรเจนในหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $2800-2950\text{ cm}^{-1}$ แสดงการยืดของ C-H ในหมู่ CH และ CH_2 ของโครงสร้างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (Kilinc et al., 2018) นอกจากนี้พบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $1626-1639\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงโครงสร้างเฮมิเซลลูโลสและองค์ประกอบของน้ำในเส้นใย (Maache et al., 2017, Istirokhatun et al., 2015) เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของเซลลูโลสทางการค้าเปรียบเทียบกับเส้นใยธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด พบว่าในเซลลูโลสทางการค้าไม่ปรากฏสเปกตรัมที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $1726-1738\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในโครงสร้าง และตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $1500-1599\text{ cm}^{-1}$ เป็นตำแหน่งของคาร์บอนที่จับกันด้วยพันธะคู่ (C=C) ในโครงสร้างของลิกนิน นอกจากนี้ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1238 และ 1246 cm^{-1} อธิบายถึงการยืดของ C-O ในหมู่อะเซทิล (acetyl group) ในโครงสร้าง

ของลิกนิน (Maache et al., 2017) เนื่องจากเซลลูโลสทางการค้าได้ผ่านกระบวนการกำจัดองค์ประกอบของลิกนิน

4.1.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารตัวเติม

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติมด้วยเทคนิค-TGA ดังแสดงใน TGA เทอร์โมแกรม (รูปที่ 4.4) และอุณหภูมิการสลายตัวดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 DTG เทอร์โมแกรมของเส้นใยที่ใช้เป็นสารตัวเติม

พบว่าเซลลูโลสทางการค้ามีการสลายตัวทางความร้อนเพียง 1 ตำแหน่ง คือ 339 องศาเซลเซียส แต่เส้นใยเปลือกกล้วยพาราและเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบดมีอุณหภูมิการสลายตัว 2 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่ 1 ช่วง 250-300 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและพันธะแอลฟาไกลูโคซิดิก (α -glucosidic linkage) ภายในโครงสร้างเซลลูโลสของเส้นใย (Maache et al., 2017) และอุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของเซลลูโลสที่อยู่ภายในองค์ประกอบ เมื่อพิจารณาเส้นใยทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการบด (RSS_Mo และ WH_Mo) พบว่าพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยมีลักษณะที่คล้ายกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการบด แต่เส้นใยที่ผ่านการบดมีอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนต่ำกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการบด ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เนื่องจากเส้นใยที่ผ่านการบดด้วยเทคนิคบดมิลมีความเป็นอสัณฐานมากกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่าน

การบดเพราะผลึกของเส้นใยถูกทำลายจากแรงที่เกิดจากการบด จนได้ขนาดอนุภาคที่เล็กลง ส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยที่ผ่านการบดมีค่าต่ำกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการบดสอดคล้องกับงานวิจัยของ He และคณะ (2014)

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของสารตัวเติม

สารตัวเติม	อุณหภูมิการสลายตัวช่วง 1 (°C)	อุณหภูมิการสลายตัวช่วง 2 (°C)
เซลลูโลสทางการค้า	-	339
เส้นใยเปลือกกล้วยพารา	305	362
เส้นใยเปลือกกล้วยพาราลดขนาด	299	357
เส้นใยผักตบชวา	268	330
เส้นใยผักตบชวาลดขนาด	267	318

4.2 ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง

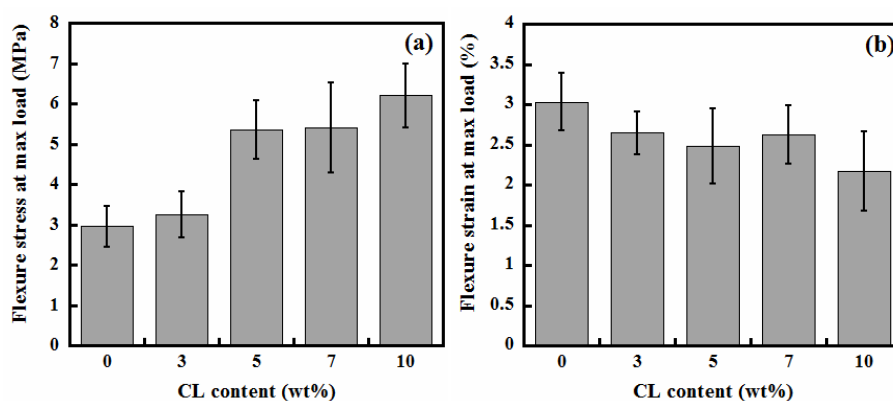
ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง โดยการแปรปริมาณสารตัวเติมร้อยละ 3, 5, 7 และ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ตามชนิดของสารตัวเติมดังนี้

4.2.1 อิทธิพลของเซลลูโลสทางการค้าที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง

4.2.1.1 สมบัติเชิงกล

รูปที่ 4.5 แสดงค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้า (CL) โดยแปรปริมาณเซลลูโลสทางการค้าดังนี้คือ ร้อยละ 3, 5, 7 และ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง และเปรียบเทียบกับโฟมแข็งที่ไม่ผสมสารตัวเติม พบว่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (รูปที่ 4.5 (a)) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสทางการค้าเพิ่มขึ้นและพบว่าที่ปริมาณของเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง มีค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักสูงที่สุดเท่ากับ 6.20 เมกะปาสคาล โดยมีค่ามากกว่าโฟมแข็งไม่ผสมเส้นใยประมาณ 2 เท่า เนื่องจากเซลลูโลสทางการค้าและแข็งมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน คือต่างก็เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ส่งผลให้เซลลูโลสทางการค้ายึดเกาะกับเนื้อพื้นของแข็งได้ดี (Soykeabkaew et al., 2015) ทำให้เส้นใยสามารถถ่ายโอนแรงจากเนื้อพื้นของแข็งได้ดี

จึงส่งผลให้ค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักมีค่าสูงขึ้น (Kaisangsri et al., 2015) เมื่อพิจารณาค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักในรูปที่ 4.5 (b) พบว่าเมื่อปริมาณเซลลูโลสทางการค้าเพิ่มขึ้นมีค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักลดลง เนื่องจากเซลลูโลสทางการค้ามีผลทำให้โฟมแข็งมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพราะเซลลูโลสทางการค้ามีความสามารถในการก่อผลึก (Lopez-Gil et al., 2015) จึงทำให้ความสามารถในการยืดของโฟมแข็งลดลง ส่งผลให้โฟมแข็งมีค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักลดลง (Bergel et al., 2017; Chiarathanakrit et al., 2019; Soykeabkaew et al., 2004)

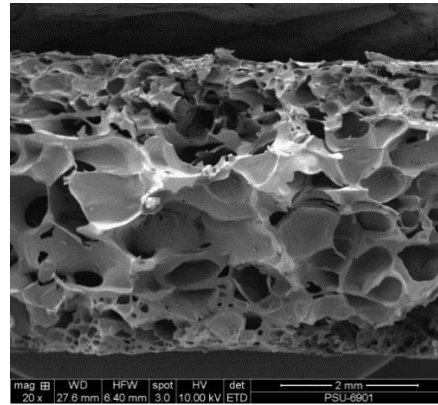


รูปที่ 4.5 การต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานต่อการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้า

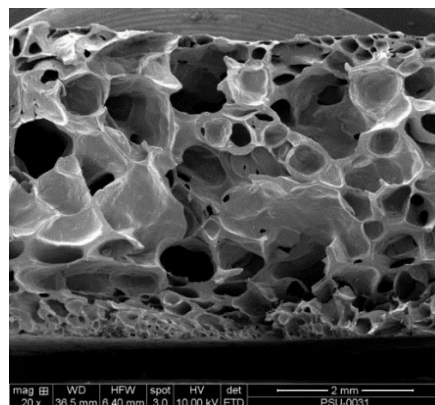
4.2.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งโดยใช้เทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติม (รูปที่ 4.6 (a)) มีลักษณะโครงสร้างที่ผิดปกติ (Irregular shape) แต่โฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้าในรูปที่ 4.6 (b) มีลักษณะเซลล์โฟม (Cell foam) ที่แน่นขึ้น และขนาดเซลล์โฟมมีความสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแข็งที่ไม่ผสมเซลลูโลสทางการค้า เนื่องจากเซลลูโลสทางการค้าเป็นสารก่อผลึกที่สามารถทำให้เกิดเซลล์โฟมได้ง่ายจึงส่งผลให้โฟมที่ผสมสารตัวเติมมีลักษณะเซลล์โฟมที่สม่ำเสมอและขนาดใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.6 (a) และพบว่าเซลลูโลสทางการค้าทำให้ความหนืดของแข็งสูงขึ้นจึงทำให้การระเหยของน้ำที่เป็นสารในการเกิดฟองเกิดยากขึ้นส่งผลให้ได้ลักษณะของเซลล์โฟมที่มีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอ (Chiarathanakrit et al., 2019) ในรูปที่ 4.6 (c) แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่ผิวหน้าของเส้นใยเซลลูโลสกับเนื้อพื้นของแข็ง พบว่าเซลลูโลสทางการค้าสามารถเข้า

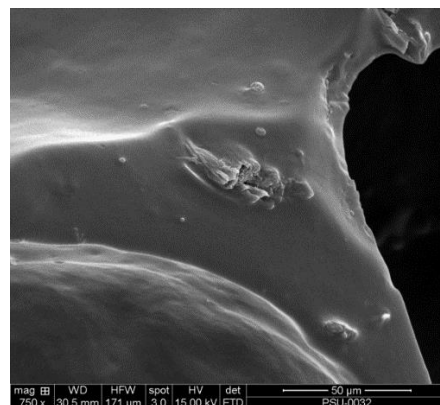
กันได้ดีกับเนื้อพื้นของแป้ง เนื่องจากเซลลูโลสมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับแป้ง และมีหมู่ไฮดรอกซิล ที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเซลลูโลสทางการค้ากับเนื้อพื้นของแป้งได้ดี (Soykeabkaew et al., 2004)



(a)



(b)



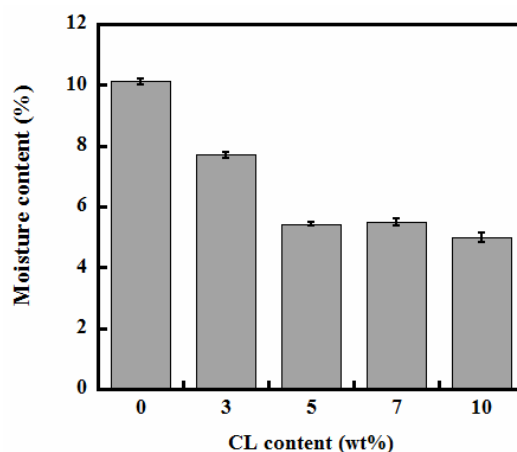
(c)

รูปที่ 4.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแป้ง (a) และโฟมแป้งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้งที่กำลังขยาย 20 เท่า (b) และกำลังขยาย 750 เท่า (c)

4.2.1.3 สมบัติการดูดซับความชื้น

ผลการศึกษาการดูดซับความชื้นของโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมเซลลูโลสทางการค้าที่ปริมาณต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อปริมาณเซลลูโลสทางการค้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้นของโฟมแป้งมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาโฟมแป้งที่ผสมเซลลูโลสทางการค้าปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าการดูดซับความชื้นลดลงมากที่สุด เนื่องจากความเข้ากันได้ของเซลลูโลสกับเนื้อพื้นของ

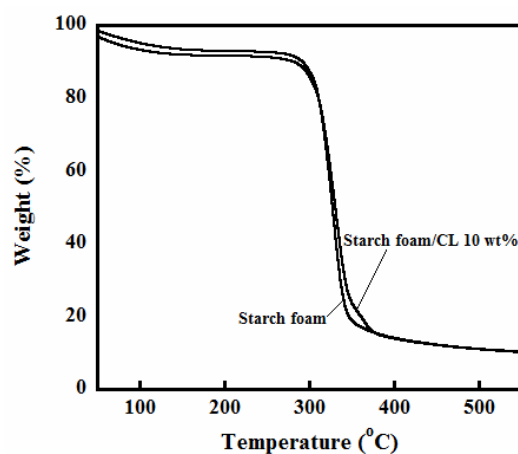
แป้งสอติดล้องกับผลลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้มากขึ้นจึงส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกตัวได้ยากส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้นมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น (Soykeabkaew et al., 2015)



รูปที่ 4.7 ค่าการดูดซับความชื้นของโฟมแป้งผสมเส้นใยเซลลูโลสทางการค้า

4.2.1.4 สมบัติการทางความร้อน

ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของโฟมแป้งผสมเซลลูโลสทางการค้าด้วยเทคนิค TGA แสดงในรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.8 TGA เทอร์โมแกรมของโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

พบว่าเซลลูโลสทางการค้าสามารถปรับปรุงการสลายตัวทางความร้อนของโฟมแป้ง โดยอุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุด (T_{max}) ของโฟมแป้งผสมเซลลูโลส

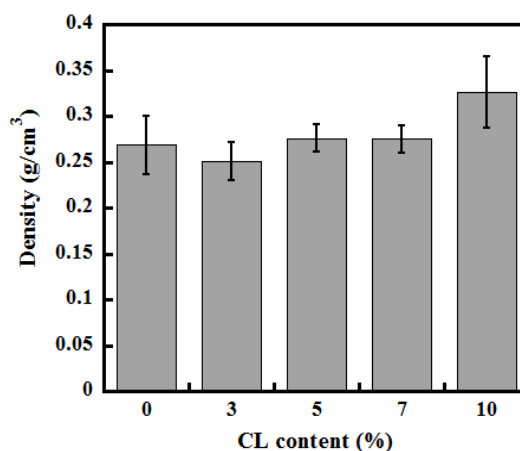
ทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้งมีค่าเท่ากับ 335 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่า โฟมแป้งไม่ผสมสารตัวเติม 10 องศาเซลเซียส จากผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลของความเข้ากันได้ระหว่างเซลลูโลสทางการค้าและเนื้อพื้นของแป้ง

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุดของโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมเซลลูโลสทางการค้าปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง

ตัวอย่าง	อุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุด (°C)
โฟมแป้งไม่ผสมสารตัวเติม (Starch foam)	325
โฟมแป้งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง (Starch foam/ CL 10 wt%)	335

4.2.1.5 ความหนาแน่น

รูปที่ 4.9 แสดงค่าความหนาแน่นของโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมเซลลูโลสทางการค้าที่ปริมาณต่าง ๆ โดยโฟมแป้งไม่ผสมสารตัวเติมมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.2683 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และพบว่าปริมาณเซลลูโลสทางการค้ามีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของโฟมแป้งเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยค่าความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมเซลลูโลสทางการค้ามีค่าใกล้เคียงกับโฟมแป้งผสมเปลือกข้าวโพด (Corn husk fibre) เคโอลิน (Kaolin) และไขผึ้ง (Beeswax) (Polat et al., 2013)



รูปที่ 4.9 ค่าความหนาแน่นของโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมเซลลูโลสทางการค้า

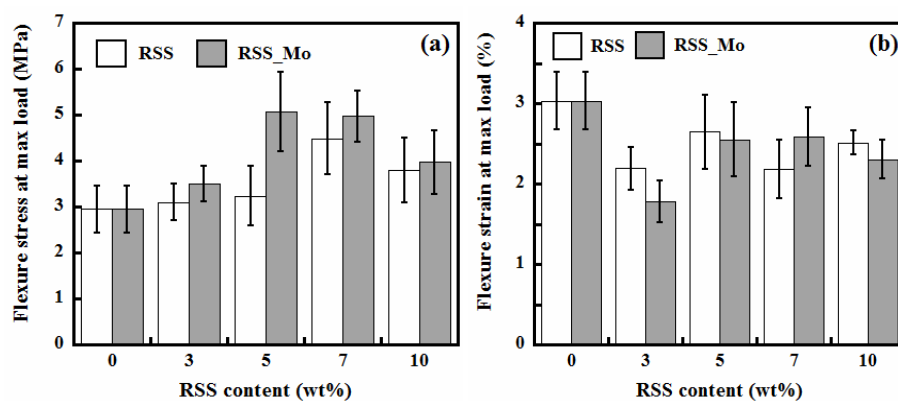
4.2.2 อิทธิพลของเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง

ศึกษาอิทธิพลของเส้นใยเปลือกกล้วยพาราต่อสมบัติของโฟมแข็ง งานวิจัยนี้ใช้เส้นใยเปลือกกล้วยพารา 2 ชนิด คือ เส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลลิล

4.2.2.1 สมบัติเชิงกล

สมบัติการต้านทานต่อการหักงอของโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด แสดงในรูปที่ 4.10 จากรูปที่ 4.10 (a) พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบด (RSS) เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 4.50 เมกะปาสคาล เมื่อมีปริมาณเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบดเท่ากับร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง และพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเปลือกกล้วยพารามากกว่าร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง ค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักของโฟมแข็งมีแนวโน้มลดลง อาจเกิดจากเส้นใยเปลือกกล้วยพารากระจายตัวได้ไม่ดีในเนื้อพื้นของแข็ง จึงส่งผลให้มีค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักของโฟมแข็งลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยเปลือกกล้วยพาราสูงขึ้น (Kaewtatip et al., 2018) เมื่อพิจารณาโฟมแข็งที่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบด (RSS_Mo) พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบด แต่พบว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง มีค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักสูงที่สุด คือ 5.07 เมกะปาสคาล เมื่อเปรียบเทียบผลความต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักของโฟมแข็งที่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 แบบ พบว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบดมีค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักสูงกว่าโฟมแข็งที่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบด เนื่องจากขนาดอนุภาคของเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบดมีขนาดเล็กกว่า ซึ่งมีผลทำให้การกระจายตัวของเส้นใยในเนื้อพื้นของแข็งได้ดีกว่า นอกจากนี้อนุภาคของเส้นใยที่เล็กมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่า อาจส่งผลให้มีความสามารถในการเกิดอันตรกิริยากับเนื้อพื้นของโฟมแข็งได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการบด (Sundam et al., 2018) เมื่อพิจารณาการต้านทานต่อการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักในรูปที่ 4.10 (b) พบว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันคือเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักมีค่าลดลง เนื่องจากเส้นใยที่ผสมในโฟมแข็งทำให้โฟมแข็งมีสมบัติความแข็งแรง

ขึ้นจึงส่งผลให้มีค่าความเครียด ณ จุดแตกหักที่ลดลง (Bergel et al., 2017; Chiarathanakrit et al., 2019; Soykeabkaew et al., 2004)

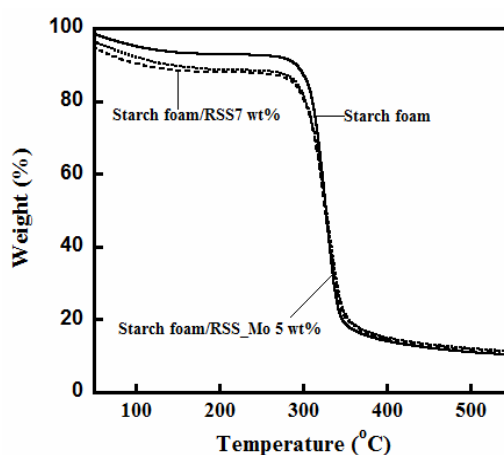


รูปที่ 4.10 การต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานต่อการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโพลีโพรพิลีนผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่าน (RSS) และผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคบอลมิล (RSS_Mo)

4.2.2.2 สมบัติทางความร้อน

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีโพรพิลีนไม่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราและโพลีโพรพิลีนไม่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด ด้วยเทคนิค TGA ดังแสดงใน TGA เทอร์โมแกรมในรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.5 โดยเลือกตัวอย่างทดสอบจากโพลีโพรพิลีนไม่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิดที่มีค่าสมบัติเชิงกลสูงที่สุด คือ โพลีโพรพิลีนไม่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านบดที่ปริมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแป้ง และโพลีโพรพิลีนไม่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านบดที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง พบว่าลักษณะ TGA เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของโพลีโพรพิลีนไม่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพารามีลักษณะที่คล้ายกันกับโพลีโพรพิลีนไม่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านและผ่านการบำบัดด้วยเทคนิคบอลมิล พบว่าโพลีโพรพิลีนทั้ง 3 ชนิดมีการสลายตัวทางความร้อน 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่ 1 ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 50-250 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำและกลีเซอรอล และตำแหน่งที่ 2 ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 250-350 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของแป้งในโพลีโพรพิลีน และโครงสร้างในเส้นใยเปลือกกล้วยพารา ได้แก่ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส (Xu et al., 2016; Maache et al., 2017) และเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุด

พบว่าเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด สามารถปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของ โฟมแข็ง โดยค่าอุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุดของโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติมมีค่าเท่ากับ 325 องศาเซลเซียส และค่าอุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุดของโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านบดที่ปริมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง และโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านบดที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง มีค่าเท่ากับ 329 องศาเซลเซียส และ 330 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chiarathanakrit et al., 2019; Cruz-Tirado et al., 2017; และ Ghanbari et al., 2018 คือเมื่อผสมเส้นใยสำหรับใยมะกรูด (*Halimida macroloba*), เปลือกหน่อไม้ฝรั่ง (*asparagus peel*), ซานอ้อย (*sugarcane bagasse*) และนาโนเซลลูโลส (*nanocellulose*) พบว่าโฟมแข็งมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น



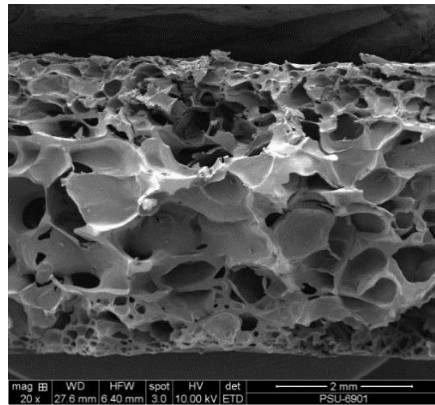
รูปที่ 4.11 TGA เทอร์โมแกรมของโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง และเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุดของโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลมิล

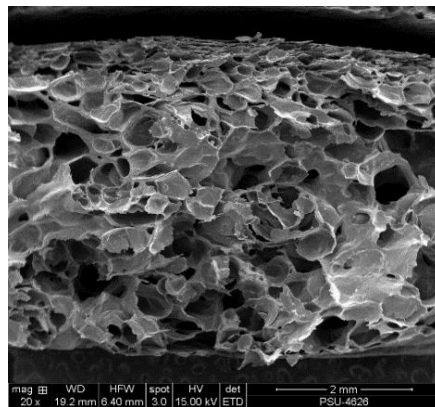
ตัวอย่าง	อุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุด (°C)
โฟมแป้ง (Starch foam)	325
โฟมแป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบด (Starch foam/RSS 7 wt%)	329
โฟมแป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราผ่านการบด (Starch foam/RSS_Mo 5 wt%)	330

4.2.2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

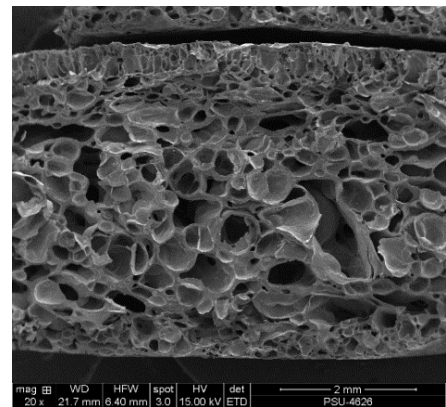
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแป้งไม่ผสมและผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด ที่ปริมาตรร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแป้ง แสดงในรูปที่ 4.12 รูปที่ 4.12 (a) แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแป้งไม่ผสมสารตัวเติมที่แสดงลักษณะโครงสร้างที่ผิดปกติ ผนังเซลล์บางและมีขนาดเซลล์ที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแป้งไม่ผสมสารตัวเติมกับโฟมแป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบด (รูปที่ 4.12 (b)) และโฟมแป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบด (รูปที่ 4.12 (c)) พบว่าโฟมแป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะเซลล์โฟมขนาดเล็ก ผนังเซลล์หนาและมีขนาดเซลล์ที่สม่ำเสมอกว่าโฟมแป้งที่ไม่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพารา เนื่องจากเมื่อผสมเส้นใยทำให้ความหนืดของแป้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดฟองขณะขึ้นรูปเกิดยากขึ้น จึงทำให้เซลล์โฟมมีขนาดเล็ก (Chiarathanakrit et al., 2019)



(a)



(b)



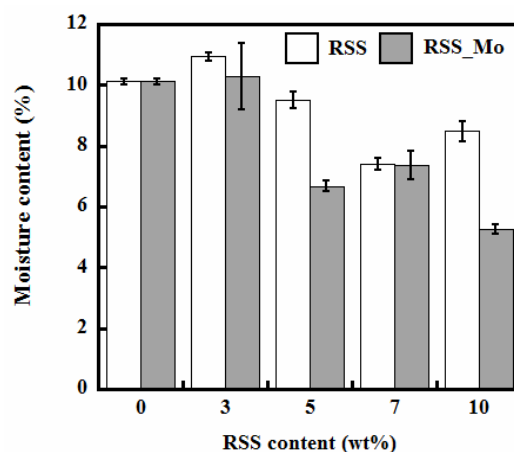
(c)

รูปที่ 4.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็ง (a) และโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพาราร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง; เส้นใยเปลือกกล้วยยางพาราที่ไม่ผ่านการบด (b) และเส้นใยเปลือกกล้วยยางพาราที่ผ่านการบด (c)

4.2.2.4 สมบัติการดูดซับความชื้น

ค่าการดูดซับน้ำของโฟมแข็งไม่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพาราและโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพาราที่ไม่ผ่านและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลมิลแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าโฟมแข็งที่ไม่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพารามีค่าการดูดซับความชื้นเท่ากับ 10.11 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพารา พบว่าโฟมแข็งมีค่าการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและมีแนวโน้มลดลง และพบว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพาราที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง และโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพาราที่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง มีค่าการดูดซับน้ำที่ต่ำที่สุด คือ 7.40 เปอร์เซ็นต์ และ 7.26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจาก

ความเข้ากันได้และการกระจายตัวได้ดีของเส้นใยเปลือกกล้วยพาราในเนื้อพื้นของแป้ง จึงทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกซึมเข้าไปได้ยากส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้นของโพลีเมอร์แป้งลดลง (Kansangsri et al., 2014) อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้นของโพลีเมอร์แป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้นอาจส่งผลต่อการกระจายตัวได้ไม่ดีในเนื้อพื้นของแป้ง จึงส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับเนื้อพื้นของแป้งได้ไม่ดีทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ของทั้งเส้นใยและแป้งได้ง่ายทำให้โพลีเมอร์แป้งมีค่าการดูดซับน้ำที่เพิ่มขึ้น (Kansangsri et al., 2015; Soykeabkaew et al., 2004) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบดกับโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบด พบว่าค่าการดูดซับความชื้นของโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มคล้ายกัน และพบว่าโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบดมีค่าการดูดซับความชื้นที่ต่ำกว่าโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบด เนื่องจากขนาดอนุภาคของเส้นใยที่เล็กกว่าจึงทำให้สามารถกระจายตัวในเนื้อพื้นของแป้งได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการบด (Sundam et al., 2018)

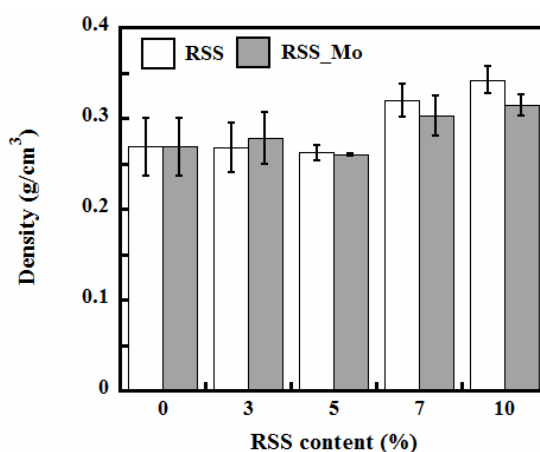


รูปที่ 4.13 การดูดซับความชื้นของโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลมิล

4.2.2.5 ค่าความหนาแน่น

ความหนาแน่นของโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลมิล ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าค่าความหนาแน่นของโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเมื่อปริมาณ

เส้นใยเปลือกกล้วยพาราหามีค่าน้อยคือ ร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง การผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของโฟมแป้ง แต่เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 7 และ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง มีผลทำให้ความหนาแน่นของโฟมแป้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaisangsri et al., 2015 และ Soykeabkaew et al., 2004 รายงานการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของโฟมแป้งเมื่อผสมเส้นใยป่าน (Flax) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณของเส้นใยที่สูงขึ้นมีผลต่อค่าความหนืดของแป้งทำให้เกิดการขยายตัวได้ยากในขณะการขึ้นรูปทำให้เกิดลักษณะเซลล์โฟมที่แน่นขึ้น โดยสามารถยืนยันได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์โฟม



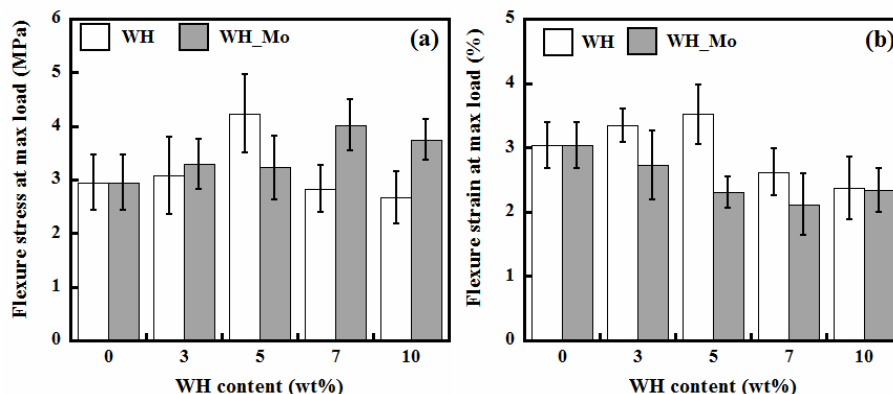
รูปที่ 4.14 ความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลมิล

4.2.3 อิทธิพลของเส้นใยผักตบชวาที่มีผลต่อสมบัติโฟมแป้ง

4.2.3.1 สมบัติเชิงกล

ค่าความต้านทานต่อการหักงอของโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านและไม่ผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลมิลแสดงในรูปที่ 4.15 จากรูปที่ 4.15 (a) แสดงค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก พบว่าโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดมีค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.23 เมกะปาสคาล ที่ปริมาณเส้นใยเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Abrial และคณะ (2014) ได้อธิบายการลดลงของสมบัติเชิงกลเมื่อปริมาณ

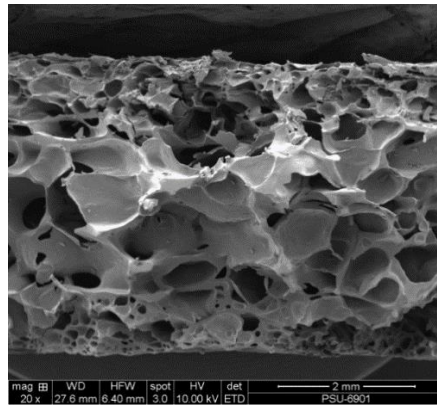
เส้นใยผักตบชวามีปริมาณมากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง เนื่องจากการกระจายตัวได้ไม่ดีของเส้นใยในเนื้อพื้นของแป้ง และเมื่อพิจารณาค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักของโพลีแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดพบว่ามีค่าต่ำกว่าโพลีแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบด เนื่องจากเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดมีขนาดเล็กลงคือ 41 ไมโครเมตร ซึ่งเล็กกว่าเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบด ทำให้เส้นใยเกิดการรวมกลุ่มกันเองส่งผลให้ค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักของโพลีแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดมีค่าต่ำกว่าโพลีแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบด สอดคล้องกับการรายงานของ Sundam และคณะ (2018) แต่อย่างไรก็ตามโพลีแป้งที่ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดมีค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักสูงกว่าโพลีแป้งที่ไม่ผสมสารตัวเติม และพบว่าที่ปริมาณเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแป้ง มีค่าที่สูงที่สุด คือ 4.02 เมกะปาสคาล เมื่อพิจารณาค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักในรูปที่ 4.15 (b) พบว่าโพลีแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดมีค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักที่สูงกว่าโพลีแป้งที่ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบด เมื่อพิจารณาโพลีแป้งที่ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง เนื่องจากเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดมีความยาวของเส้นใยที่มากกว่าเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบด ซึ่งส่งผลให้โพลีแป้งมีสมบัติที่แข็งและเหนียวขึ้น จึงสามารถถ่ายโอนแรงได้ดีกว่าเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abral และคณะ (2014) และ Boudria และคณะ (2018) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเส้นใยผักตบชวามีปริมาณมากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง แนวโน้มของค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักลดลง อาจเกิดจากการกระจายตัวได้ไม่ดีของเส้นใยในเนื้อพื้นของแป้ง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับโพลีแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดพบว่า มีค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักที่ลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดทำให้โพลีแป้งมีความแข็งมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดขาดมีค่าลดลง (Bergel et al., 2017; Chiarathanakrit et al., 2019; Soykeabkaew et al., 2004)



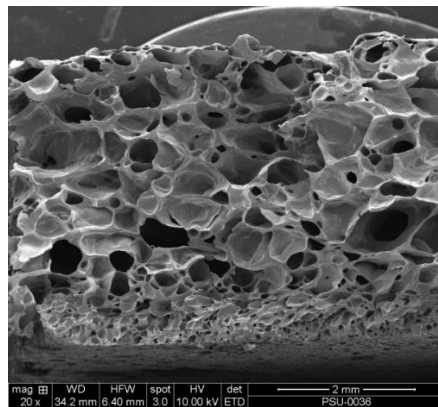
รูปที่ 4.15 การต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานต่อการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโพลีเมอริกที่ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดและไม่ผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลมิล

4.2.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

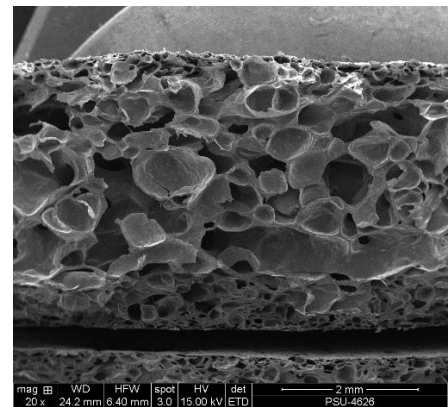
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเมอริกและโพลีเมอริกผสมเส้นใยผักตบชวา 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าโพลีเมอริกที่ไม่ผสมเส้นใยผักตบชวามีลักษณะเซลล์โพลีเมอริกที่ผิดปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (a) เมื่อพิจารณาโพลีเมอริกที่ผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด คือโพลีเมอริกผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง (รูปที่ 4.16 (b)) และโพลีเมอริกผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแป้ง (รูปที่ 4.16 (c)) ตามลำดับ พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์โพลีเมอริกของโพลีเมอริกมีขนาดเซลล์โพลีเมอริกที่เล็ก ผ่องเซลล์หนาและมีขนาดเซลล์โพลีเมอริกที่สม่ำเสมอกว่าโพลีเมอริกที่ไม่ผสมสารตัวเติม เนื่องจากเส้นใยผักตบชวามีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับแป้งจึงทำให้เกิดความเข้ากันได้ดีกับเนื้อพื้นของแป้ง (Kaisangsri et al., 2015; Soykeabkaew et al., 2004) ด้วยเหตุนี้ทำให้ความหนืดของแป้งเพิ่มขึ้นและเกิดเซลล์โพลีเมอริกในขณะการขึ้นรูปได้ยากขึ้น จึงทำให้เซลล์โพลีเมอริกมีขนาดเล็ก (Chiarathanakrit et al., 2018)



(a)



(b)



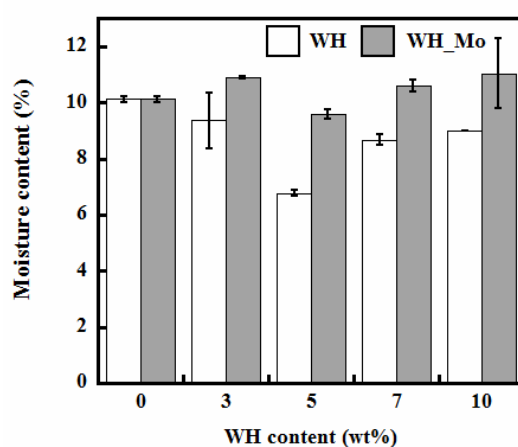
(c)

รูปที่ 4.16 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็ง (a), โฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง (b) และโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง (c) ที่กำลังขยาย 20 เท่า

4.2.3.3 สมบัติการดูดซับความชื้น

ค่าการดูดซับความชื้นของโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบด และโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบด ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดมีค่าการดูดซับความชื้นต่ำกว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบด เนื่องจากความเข้ากันได้ของเส้นใยและการกระจายตัวได้ดีในเนื้อพื้นของแข็ง และพบว่าที่ปริมาณเส้นใยผักตบชวาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง ให้ค่าการดูดซับความชื้นที่ต่ำที่สุด คือ 6.77 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับความชื้นของโฟมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยและการกระจายตัวที่ไม่ดีในเนื้อพื้นของแข็ง (Kaisangsri et al.,

2015; Polat et al., 2013; Soykeabkaew et al., 2004) เมื่อพิจารณาโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบด พบว่าเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดไม่มีผลต่อการปรับปรุงการดูดซับความชื้นของโฟมแข็งและมีค่าสูงกว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบด เนื่องจากเส้นใยมีขนาดอนุภาคที่เล็กจึงทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันและกระจายตัวได้ไม่ดีในเนื้อพื้นของแข็ง ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ของทั้งเส้นใยและแข็งได้ง่ายทำให้โฟมแข็งมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้เพิ่มมากขึ้น (Kaisangsri et al., 2015; Soykeabkaew et al., 2004)

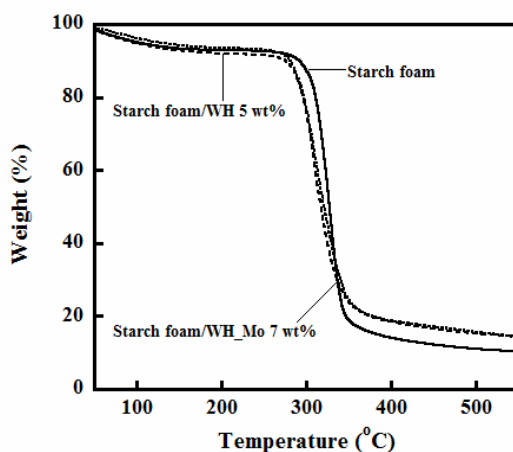


รูปที่ 4.17 ค่าการดูดซับความชื้นของโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลลมิล

4.2.3.4 สมบัติทางความร้อน

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด ด้วยเทคนิค TGA ดังแสดงใน TGA เทอร์โมแกรมรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.6 โดยเลือกตัวอย่างทดสอบจากโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิดที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด คือ เส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง และเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดปริมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง พบว่า TGA เทอร์โมแกรมการสลายตัวทางความร้อนของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยมีช่วงของการสลายตัว 2 ช่วง คือ ที่อุณหภูมิในช่วง 50-250 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำ ก๊าซไฮดรอล และสารโมเลกุลเล็กในองค์ประกอบของโฟมแข็ง (Xu et al., 2016) และในช่วงอุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของเนื้อพื้นของแข็งและองค์ประกอบของเส้นใยได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (Xu et al., 2016);

Maache et al., 2017) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุด พบว่าโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโฟมแป้งที่ไม่ผสมสารตัวเติม ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากโครงสร้างของเส้นใยผักตบชวาประกอบด้วยเอมิเซลลูโลส ซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ



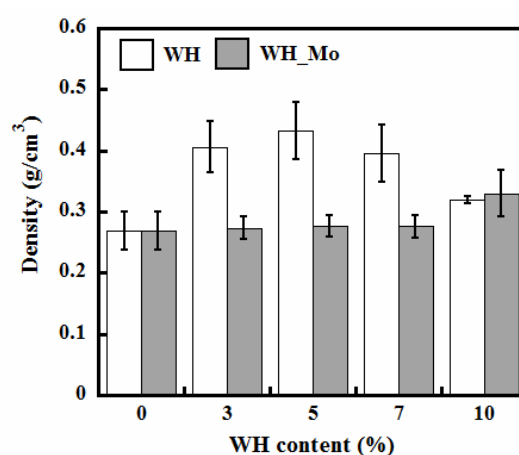
รูปที่ 4.18 TGA เทอร์โมแกรมของโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง และเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแป้ง

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุดของโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลลมิล

ตัวอย่าง	อุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุด (°C)
โฟมแป้ง (Starch foam)	325
โฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาไม่ผ่านการบด (Starch foam/WH 5 wt%)	309
โฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาผ่านการบด (Starch foam/WH_Mo 7 wt%)	311

4.2.3.5 ค่าความหนาแน่น

รูปที่ 4.19 แสดงค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลลมิล พบว่าเมื่อผสมเส้นใยในโฟมแข็งมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยที่ใช้ทำให้ความหนืดของแข็งเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดเซลล์โฟมได้ยากจึงมีลักษณะเซลล์โฟมที่มีขนาดเล็กและแน่นขึ้น (Chiarathanakrit et al., 2019; Polat et al., 2013) สอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็ง



รูปที่ 4.19 ค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลลมิล

4.3 การศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบผิวที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง

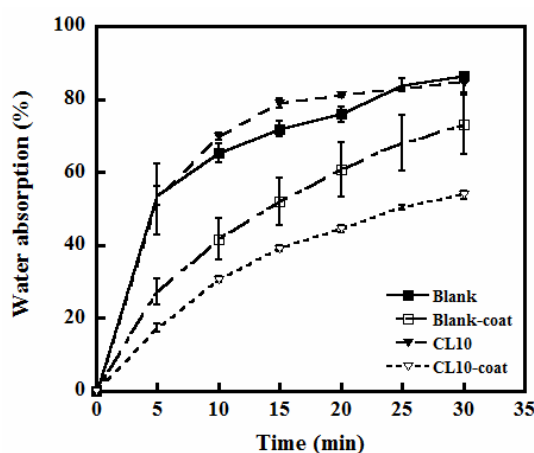
งานวิจัยนี้เลือกใช้ไซซีฟิ่งเคลือบผิวโฟมแข็ง โดยเลือกใช้โฟมแข็งผสมเส้นใยที่สภาวะที่ดีที่สุดมาทำการศึกษา ดังนี้

4.3.1 อิทธิพลของไซซีฟิ่งที่มีต่อโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้า

4.3.1.1 ค่าการดูดซับน้ำ

ค่าการดูดซับน้ำของโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าโฟมแข็งที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งมีค่าการดูดซับน้ำที่สูงกว่าโฟมแข็งที่เคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง เนื่องจากแข็งมีสมบัติที่ชอบน้ำ (Begel et al., 2017; Reis et al., 2018; Zhang et al., 2018) จึงส่งผลให้มีค่าการดูดซับน้ำที่สูง และเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแข็งที่เคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งพบว่าค่าการดูดซับน้ำลดลงอย่างมี

นัยสำคัญ เนื่องจากการเคลือบผิวของโพลีเมอร์ด้วยไซซีฟีนสามารถลดพื้นที่ผิวสัมผัสที่ผิวหน้าของโพลีเมอร์กับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งไซซีฟีนมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ จึงส่งผลให้โพลีเมอร์ที่เคลือบผิวด้วยไซซีฟีนมีค่าการดูดซับน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมอร์ (Blank_coat) และโพลีเมอร์ผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของโพลีเมอร์ (CL10_coat) ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟีน พบว่าโพลีเมอร์ที่ผสมเซลลูโลสทางการค้ามีค่าการดูดซับน้ำที่ต่ำกว่าโพลีเมอร์ที่ไม่ผสมเส้นใย เนื่องจากความเข้ากันได้ดีของเซลลูโลสทางการค้ากับเนื้อพื้นของโพลีเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดซับความชื้นของโพลีเมอร์

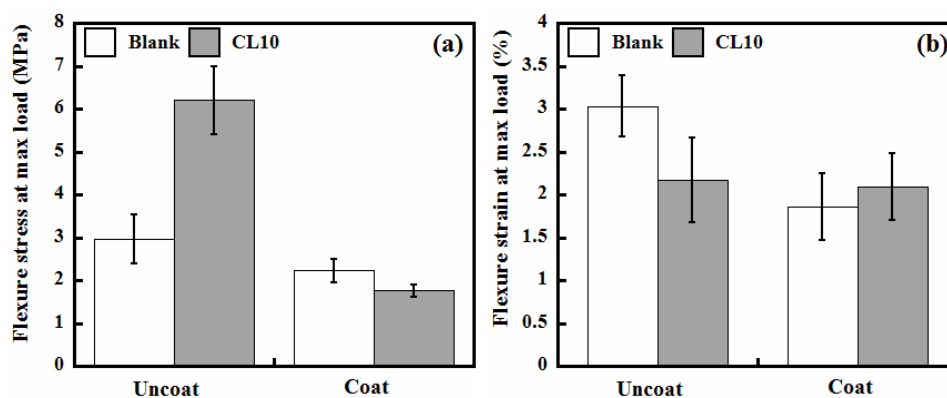


รูปที่ 4.20 ค่าการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมเซลลูโลสทางการค้าที่ผ่านการเคลือบผิวและไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟีน

4.3.1.2 สมบัติเชิงกล

ค่าการต้านทานต่อการหักงอของโพลีเมอร์ไม่ผสมสารตัวเติม (Blank) และโพลีเมอร์ผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของโพลีเมอร์ (CL10) ที่ผ่านการเคลือบและไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟีน แสดงในรูปที่ 4.21 จากรูป 4.21 (a) แสดงค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักของโพลีเมอร์ พบว่าโพลีเมอร์ไม่ผสมสารตัวเติมมีค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักลดลงจาก 2.95 เมกะปาสคาล เป็น 2.22 เมกะปาสคาล เมื่อเคลือบผิวด้วยไซซีฟีน และค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักของโพลีเมอร์ผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของโพลีเมอร์ลดลงจาก 6.20 เมกะปาสคาล เป็น 1.75 เมกะปาสคาล เมื่อเคลือบผิวด้วยไซซีฟีน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ความเครียด ณ จุดแตกหักในรูป 4.21 (b)

พบว่าโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติมมีค่าความเครียด ณ จุดแตกหักลดลงจาก 3.03 เปอร์เซ็นต์ เป็น 1.85 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง และพบว่า การเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก ของโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chiumareli และ Hubinger (2014), Saurabh และคณะ (2016), Rise และคณะ (2018) และ Zhang และคณะ (2018) รายงานถึงอิทธิพลของไซซีฟิ่งที่มีผลต่อการลดลงของสมบัติเชิงกล เนื่องจากความการเข้ากันได้ไม่ดีและความสามารถในการยึดเกาะที่ผิวหน้าระหว่างโฟมแข็งและไซซีฟิ่ง เพราะไซซีฟิ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำแต่โฟมแข็งมีสมบัติที่ชอบน้ำส่งผลให้เกิดการแยกกันที่ผิวหน้าทำให้ความสามารถในการถ่ายโอนแรงได้ไม่ดี จึงทำให้โฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งมีค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดขาดที่ต่ำ นอกจากนี้ไซซีฟิ่งสามารถซึมเข้าไปในผิวหน้าที่ถูกเคลือบของโฟมแข็งทำให้สมบัติความแข็งของโฟมแข็งลดลง (Chiumareli and Hubinger., 2014; Zhang et al., 2018) ซึ่งสามารถยืนยันได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็ง

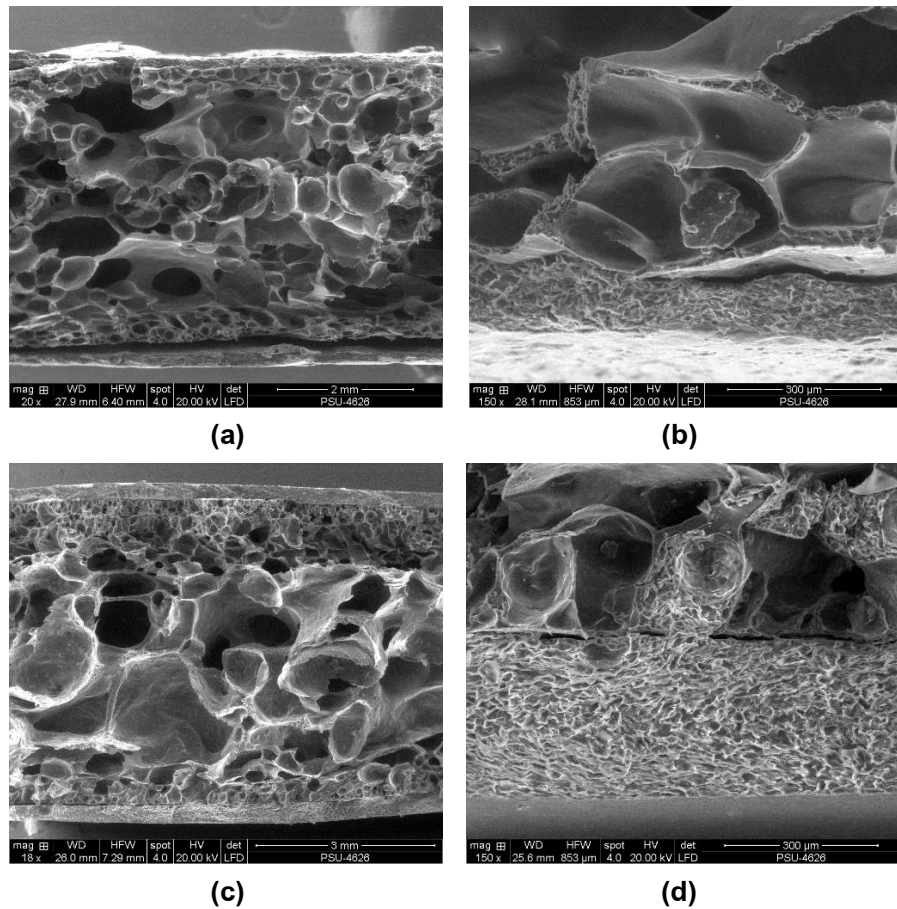


รูปที่ 4.21 การต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโฟมแข็ง (Blank) และโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่ผ่านการเคลือบและไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง

4.3.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติมและและโฟมแข็งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่ผ่านการเคลือบผิว

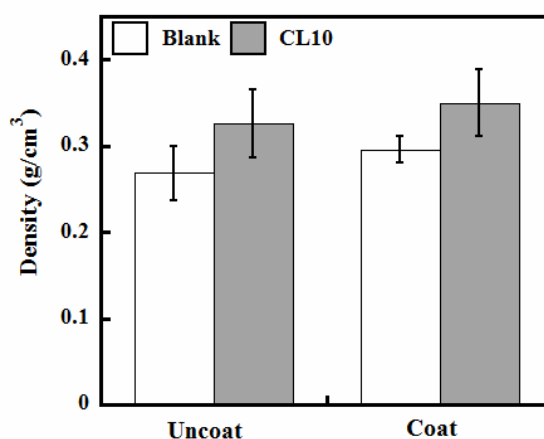
ด้วยไซซีผึ้ง แสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าไซซีผึ้งมีการยึดเกาะที่ผิวหน้าของโฟมแข็งได้ไม่ดี ยืนยันจากรูปที่ 4.22 (a และ c) เนื่องจากสภาพความเป็นขรุขระของไซซีผึ้งและโฟมแข็งต่างกันจึงส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ไม่ดี (Reis et al., 2018) และพบว่าการเคลือบผิวโฟมแข็งด้วยไซซีผึ้งไม่ส่งผลต่อการเสีรูปร่างของเซลล์โฟม แต่มีไซซีผึ้งบางส่วนที่สามารถซึมผ่านเข้าไปยังเซลล์โฟมที่บริเวณผิวหน้า ซึ่งสามารถสังเกตได้ในรูปที่ 4.22 (b และ d) ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ความแข็งแรงของโฟมแข็งลดลง



รูปที่ 4.22 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งที่กำลังขยาย 20 เท่า (a) และที่กำลังขยาย 150 เท่า (b) และโฟมแข็งผสมเซลล์ลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็งที่กำลังขยาย 18 เท่า (c) และ 150 เท่า (d)

4.3.1.4 ค่าความหนาแน่น

ความหนาแน่นของโพลีเมอร์ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าโพลีเมอร์ที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Reis และคณะ (2018) อธิบายการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นเพียงเล็กน้อยของพลาสติกชีวภาพที่เคลือบด้วยไซซีฟิ่ง เนื่องจากเมื่อไซซีฟิ่งเย็นตัวมีสถานะเป็นของแข็งเนื้อแน่น จึงส่งผลต่อน้ำหนักของโพลีเมอร์ที่เคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของโพลีเมอร์ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งมีค่าสูงกว่าโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง

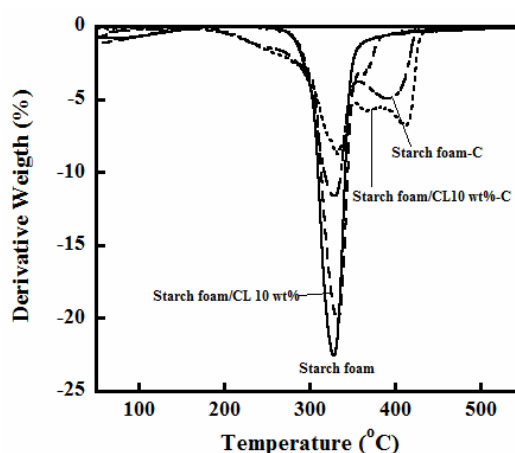


รูปที่ 4.23 ค่าความหนาแน่นของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมเซลลูโลสทางการค้า ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง

4.3.1.5 สมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมเซลลูโลสทางการค้า ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง ที่ไม่ผ่านการเคลือบและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง ดังแสดงใน DTG เทอร์โมแกรมในรูปที่ 4.24 พบว่าโพลีเมอร์ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวมีตำแหน่งการสลายตัว 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่ 1 ช่วงอุณหภูมิประมาณ 50-250 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำ กลีเซอรอลและสารโมเลกุลเล็ก (Xu et al., 2016; Zhang et al., 2018) และตำแหน่งที่ 2 ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 250-350 องศา

เซลเซียส เป็นการสลายตัวของเนื้อพื้นของแป้งและเซลลูโลสทางการค้า แต่พบว่าการสลายตัวในตำแหน่งที่ 3 ของโพลีเมอร์ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 286-316 องศาเซลเซียส แสดงถึงการสลายตัวของไซซีฟิ่งในโพลีเมอร์ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง สอดคล้องกับการรายงานของ Zhang และคณะ (2018) และ Ren และคณะ (2016)



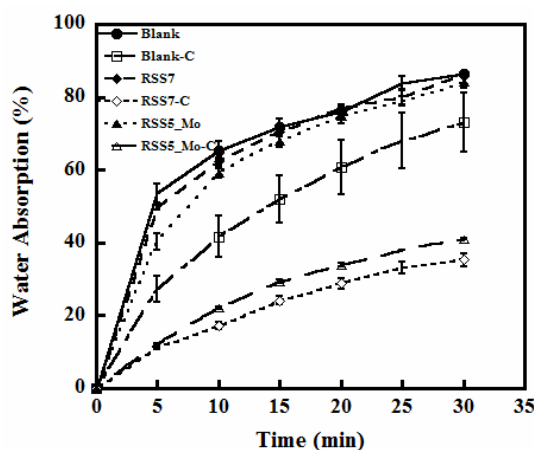
รูปที่ 4.24 DTG เทอร์โมแกรมของโพลีเมอร์แป้งและโพลีเมอร์แป้งผสมเซลลูโลสทางการค้าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง ที่ไม่ผ่านการเคลือบและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง

4.3.2 อิทธิพลของไซซีฟิ่งที่มีผลต่อโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยเปลือกกลูกยางพารา

4.3.2.1 ค่าการดูดซับน้ำ

ค่าการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์แป้งและโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยเปลือกกลูกยางพาราทั้ง 2 ชนิดที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง แสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าค่าการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์แป้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และพบว่าค่าการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์แป้งที่ไม่ผสมสารตัวเติมมีค่าใกล้เคียงกับโพลีเมอร์แป้งผสมเส้นใยเปลือกกลูกยางพาราที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดร้อยละ 7 และ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ เนื่องจากธรรมชาติของแป้งมีสมบัติที่ชอบน้ำจึงส่งผลให้โพลีเมอร์แป้งที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งมีค่าการดูดซับน้ำที่สูง และเมื่อพิจารณาโพลีเมอร์แป้งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง พบว่ามีค่าการดูดซับน้ำที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากไซซีฟิ่งที่เคลือบบริเวณผิวหน้าของโพลีเมอร์แป้งมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ จึงทำให้โพลีเมอร์แป้งเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำลดลง ส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์แป้งมีค่าลดลง (Begel

et al., 2017; Reis et al., 2018; Zhang et al., 2018) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมอร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและโพลีเมอร์ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด พบว่าโพลีเมอร์ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด มีค่าการดูดซับน้ำที่ต่ำกว่าโพลีเมอร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม เนื่องจากความสามารถในการกระจายตัวได้ดีในเนื้อพื้นของแป้ง และขนาดอนุภาคของเส้นใยที่เล็กซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะในการเกิดอันตรกิริยากับเนื้อพื้นของแป้งได้ดี จึงส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ของทั้งเส้นใยและเนื้อพื้นของแป้งได้ยาก ทำให้ค่าการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิดมีค่าต่ำ (Kaisangsri et al., 2015; Soykeabkaew et al., 2004; Sundam et al., 2018)

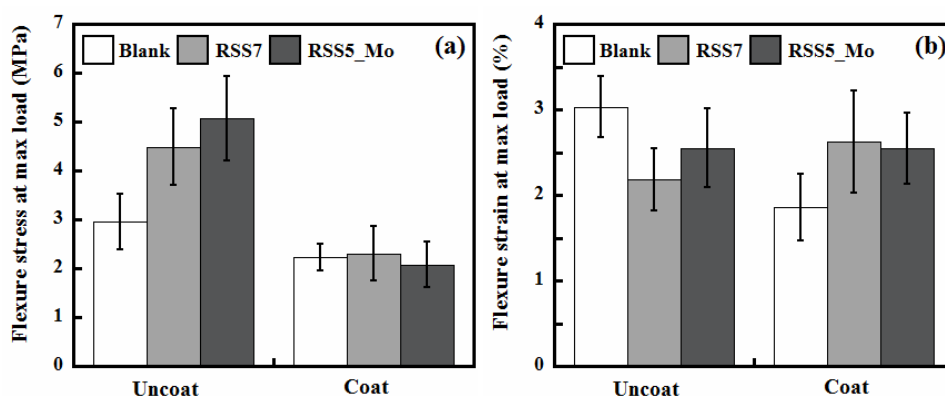


รูปที่ 4.25 ค่าการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง

4.3.2.2 สมบัติเชิงกล

ค่าการต้านทานการหักงอของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง แสดงในรูปที่ 4.26 จากรูปที่ 4.26 (a) แสดงค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก พบว่าการเคลือบผิวโพลีเมอร์ด้วยไซซีผึ้งมีผลทำให้ค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักของโพลีเมอร์ไม่ผสมสารตัวเติมลดลงจาก 2.95 เมกกะปาสคาล เป็น 2.22 เมกกะปาสคาล และโพลีเมอร์ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้งมีค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คือ ลดลงจาก 4.50 และ 5.10 เมกกะปาสคาล เป็น 2.80 และ 2.30 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ

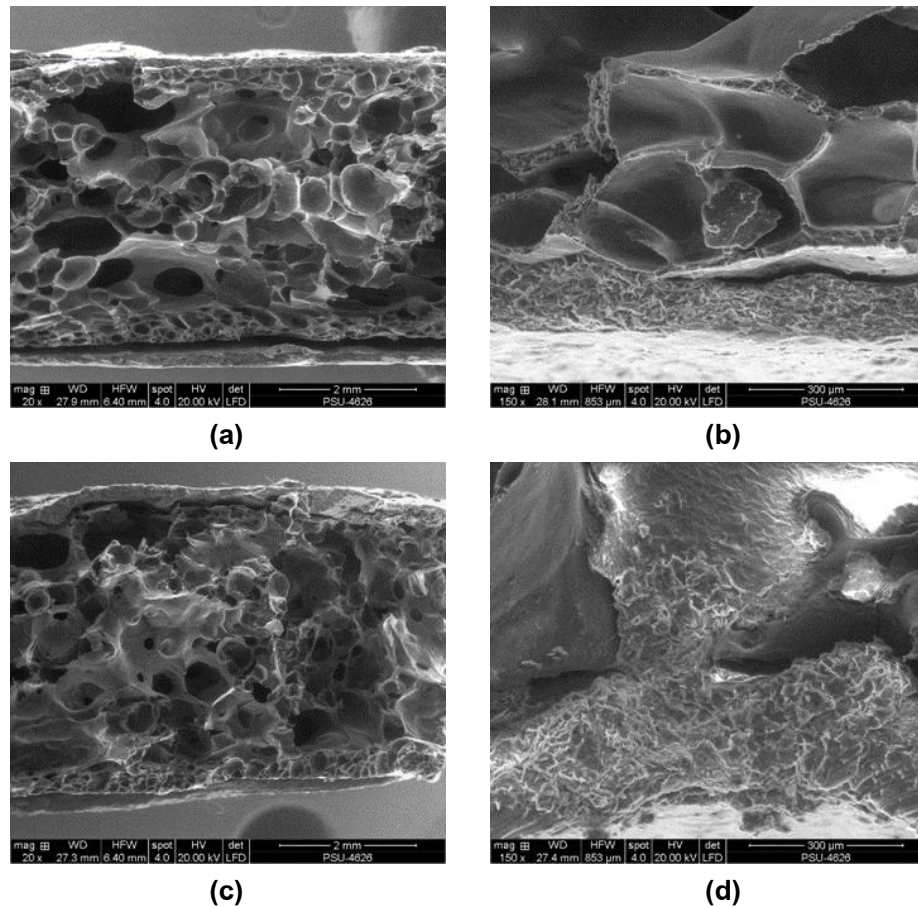
ของโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง และโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง เมื่อพิจารณาค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก ในรูปที่ 4.26 (b) พบว่าโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติมมีค่าลดลงจาก 3.03 เปอร์เซ็นต์ เป็น 1.85 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักของโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง พบว่าการเคลือบไซซีผึ้งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักของโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chiumareli และ Hubinger (2014), Saurabh และคณะ (2016), Rise และคณะ (2018) และ Zhang และคณะ (2018) รายงานถึงอิทธิพลของไซซีผึ้งที่มีผลต่อการลดลงของสมบัติเชิงกล เนื่องจากการเข้ากันได้ไม่ดีและความสามารถในการยึดเกาะที่ผิวหน้าระหว่างโฟมแข็งและไซซีผึ้ง เพราะไซซีผึ้งมีสมบัติไม่ชอบน้ำแต่โฟมแข็งมีสมบัติที่ชอบน้ำส่งผลให้เกิดการแยกกันที่ผิวหน้าทำให้ความสามารถในการถ่ายโอนแรงได้ไม่ดี จึงทำให้โฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้งมีค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดขาดที่ต่ำ นอกจากนี้ไซซีผึ้งสามารถซึมเข้าไปในผิวหน้าที่ถูกเคลือบของโฟมแข็งทำให้สมบัติความแข็งของโฟมแข็งลดลง (Chiumareli and Hubinger., 2014; Zhang et al., 2018) ซึ่งสามารถยืนยันได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็ง



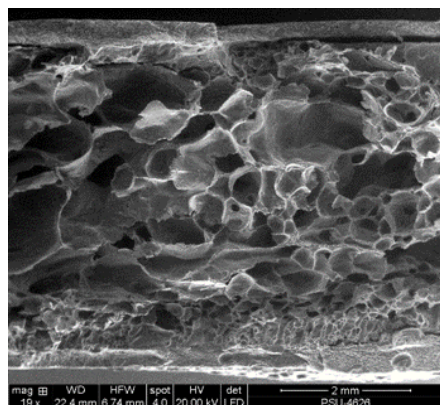
รูปที่ 4.26 การต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติมและโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพารา ทั้ง 2 ชนิด ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง

4.3.2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

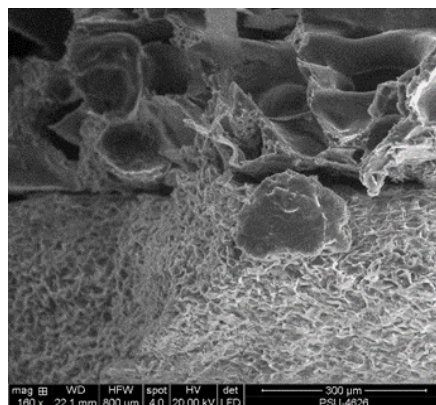
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติมและโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกลูกยางพาราที่ไม่บดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง และเส้นใยเปลือกลูกยางพาราที่บดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟี่ง แสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งที่กำลังขยาย 20 เท่า (a) และที่กำลังขยาย 150 เท่า (b) โฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกลูกยางพาราไม่บดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่กำลังขยาย 20 เท่า (c) และ 150 เท่า (d) และโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกลูกยางพาราผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่กำลังขยาย 19 เท่า (e) และ 160 เท่า (f)



(e)



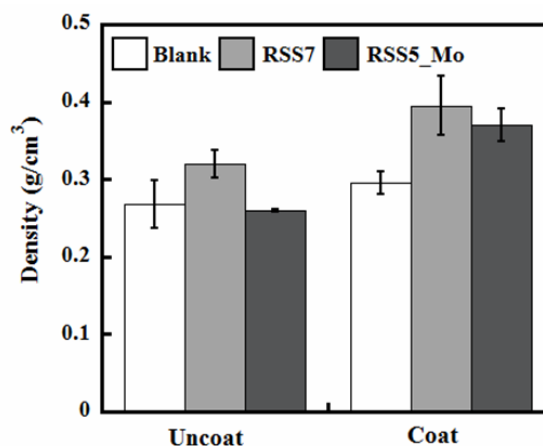
(f)

รูปที่ 4.27 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งที่กำลังขยาย 20 เท่า (a) และที่กำลังขยาย 150 เท่า (b) โฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราไมบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่กำลังขยาย 20 เท่า (c) และ 150 เท่า (d) และโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่กำลังขยาย 19 เท่า (e) และ 160 เท่า (f)

พบว่าไซซีฟิ่งมีการยึดเกาะที่ผิวหน้าของโฟมแข็งได้ไม่ดี ยืนยันจากรูปที่ 4.27 (a, c และ e) เนื่องจากสภาพความเป็นขั้วของไซซีฟิ่งและโฟมแข็งต่างกันจึงส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ไม่ดี (Reis et al., 2018) และพบว่าการเคลือบผิวโฟมแข็งด้วยไซซีฟิ่งไม่ส่งผลต่อการเสีรูปร่างของเซลล์โฟม แต่มีไซซีฟิ่งบางส่วนที่สามารถซึมผ่านเข้าไปยังเซลล์โฟมที่บริเวณผิวหน้า ซึ่งสามารถสังเกตได้ในรูปที่ 4.27 (b, d และ f) ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ความแข็งแรงของโฟมแข็งลดลง

4.3.2.4 ค่าความหนาแน่น

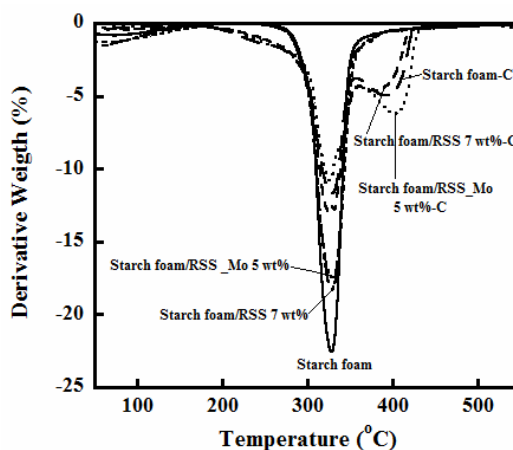
ความหนาแน่นของโฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าโฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแข็งที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Reis และคณะ (2018) อธิบายการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นเพียงเล็กน้อยของถาดพลาสติกชีวภาพเคลือบด้วยไซซีฟิ่ง เนื่องจากเมื่อไซซีฟิ่งเย็นตัวมีสถานะเป็นของแข็งเนื้อแน่น จึงส่งผลต่อน้ำหนักของโฟมแข็งที่เคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งมีค่าสูงกว่าโฟมแข็งที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง



รูปที่ 4.28 ค่าความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดร้อยละ 7 และ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง

4.3.2.5 สมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิดที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง ดังแสดงใน DTG เทอร์โมแกรมในรูปที่ 4.29 พบว่าโพลีเอทิลีนที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวมีตำแหน่งการสลายตัว 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่ 1 ช่วงอุณหภูมิประมาณ 50-250 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำ กลีเซอรอลและสารโมเลกุลเล็ก (Xu et al., 2016; Zhang et al., 2018) และตำแหน่งที่ 2 ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 250-350 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของเนื้อพื้ของแป้งและองค์ประกอบของเส้นใยเปลือกกล้วยพารา ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน (Xu et al., 2016; Maache et al., 2017) แต่พบว่ามี การสลายตัวในตำแหน่งที่ 3 ของโพลีเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 286-316 องศาเซลเซียส แสดงถึงการสลายตัวของไซซีผึ้งในโพลีเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง สอดคล้องกับการรายงานของ Zhang และคณะ (2018) และ Ren และคณะ (2016)



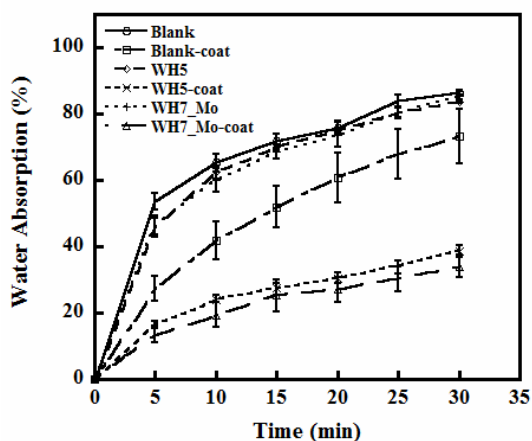
รูปที่ 4.29 DTG เทอร์โมแกรมของโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดร้อยละ 7 และ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง

4.3.3 อิทธิพลของไซซีผึ้งที่มีผลต่อโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวา

4.3.3.1 ค่าการดูดซับน้ำ

ค่าการดูดซับน้ำของโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านและผ่านการบดแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าโฟมแป้งที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้งมีแนวโน้มของค่าการดูดซับน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำของทั้งเส้นใยผักตบชวาและเนื้อพื้นของแป้ง จึงส่งผลให้โฟมแป้งที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้งมีค่าการดูดซับน้ำที่สูง เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับน้ำของโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง พบว่ามีค่าการดูดซับน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Begel et al., 2017; Reis et al., 2018; Zhang et al., 2018) เนื่องจากไซซีผึ้งที่เคลือบบริเวณผิวหน้าของโฟมแป้ง สามารถขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาของน้ำที่จะเกิดกับหมู่ไฮดรอกซิลของโฟมแป้ง เพราะไซซีผึ้งมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำจึงส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำของโฟมแป้งที่เคลือบผิวด้วยไซซีผึ้งมีค่าลดลงต่ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ต่างชนิดกัน พบว่าโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่บดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแป้ง มีค่าการดูดซับน้ำที่ต่ำกว่าโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากขนาดอนุภาคของเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบด ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะของเส้นใยมากขึ้น จึงสามารถเกิดอันตรกิริยาได้ดีกว่า และขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถกระจายตัวได้ดีในเนื้อพื้นของแป้ง จากเหตุผลดังกล่าว

ทำให้โพลีเมอร์ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดมีค่าการดูดซับน้ำที่ต่ำกว่าโพลีเมอร์ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบด Kaisangsri et al., 2015; Soykeabkaew et al., 2004; Sundam et al., 2018)

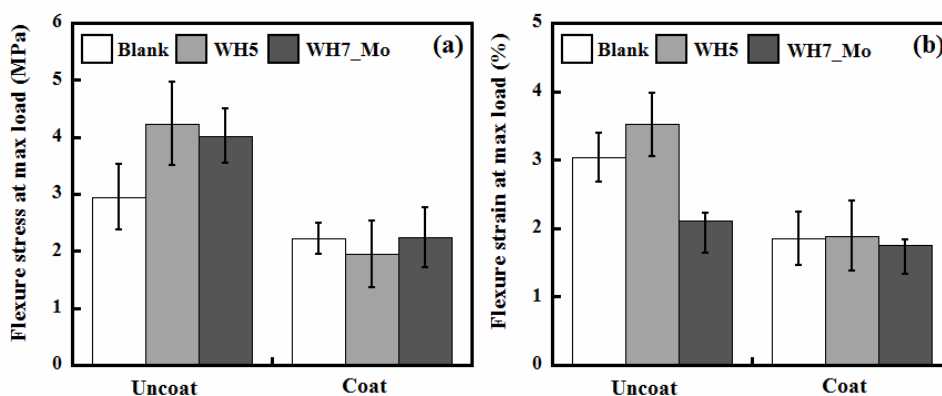


รูปที่ 4.30 ค่าการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง

4.3.3.2 สมบัติเชิงกล

สมบัติการต้านทานต่อการหักงอของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง แสดงในรูปที่ 4.31 จากรูปที่ 4.31 (a) แสดงค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก พบว่าการเคลือบผิวโพลีเมอร์ด้วยไซซีผึ้งมีผลทำให้ค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหักของโพลีเมอร์ไม่ผสมสารตัวเติมลดลงจาก 2.95 เมกกะปาสคาล เป็น 2.22 เมกกะปาสคาล และโพลีเมอร์ผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้งมีค่าการต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คือ โพลีเมอร์ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง และโพลีเมอร์ผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแป้ง มีค่าลดลงจาก 4.23 เป็น 1.95 และ 4.02 เมกกะปาสคาล เป็น 2.24 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก ในรูปที่ 4.31 (b) พบว่าการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้งมีผลทำให้ค่าการต้านทานต่อการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหักของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คือ โพลีเมอร์ไม่ผสมสารตัวเติมมีค่าลดลงจาก 3.03 เปอร์เซนต์

เป็น 1.85 เปอร์เซ็นต์ และโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิด ลดลงจาก 3.52 และ 2.12 เปอร์เซ็นต์ เป็น 1.89 และ 1.75 เปอร์เซ็นต์ ของโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่บดร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่บดร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากความการเข้ากันได้ไม่ดีและความสามารถในการยึดเกาะที่ผิวหน้าระหว่างโฟมแข็งและไซซีฟิ่ง เพราะไซซีฟิ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำแต่โฟมแข็งมีสมบัติที่ชอบน้ำส่งผลให้เกิดการแยกกันที่ผิวหน้าทำให้ความสามารถในการถ่ายโอนแรงได้ไม่ดี จึงทำให้โฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งมีค่าการต้านทานการหักงอที่ต่ำ นอกจากนี้ไซซีฟิ่งสามารถซึมเข้าไปในผิวหน้าที่ถูกเคลือบของโฟมแข็งทำให้สมบัติความแข็งของโฟมแข็งลดลง (Chiumareli and Hubinger., 2014; Zhang et al., 2018) ซึ่งสามารถยืนยันได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็ง

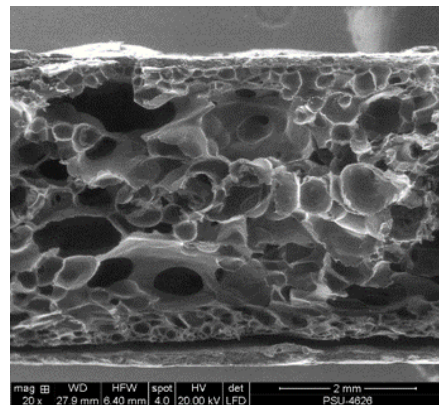


รูปที่ 4.31 การต้านทานการหักงอที่ความเค้น ณ จุดแตกหัก (a) และการต้านทานการหักงอที่ความเครียด ณ จุดแตกหัก (b) ของโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติมและโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวา ทั้ง 2 ชนิด ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง

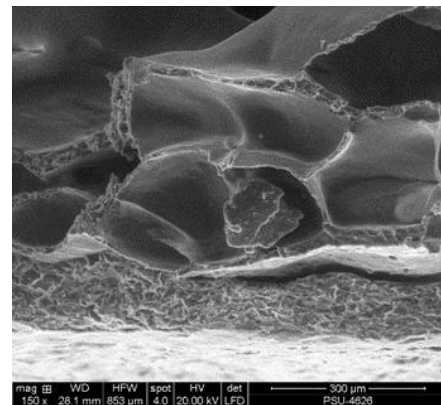
4.3.3.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งไม่ผสมสารตัวเติมและโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่บดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง และเส้นใยผักตบชวาที่บดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง แสดงในรูปที่ 4.32 พบว่าไซซีฟิ่งมีการยึดเกาะที่ผิวหน้าของโฟมแข็งได้ไม่ดี ยืนยันจากรูปที่ 4.32 (a, c และ e) เนื่องจากสภาพความเป็นขั้วของไซซีฟิ่งและโฟมแข็งต่างกันจึงส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ไม่ดี (Chiumarelli et al., 2014; Reis et al., 2018) และพบว่าการเคลือบผิวโฟมแข็งด้วยไซซีฟิ่งไม่ส่งผลต่อการเสีรูปร่างของเซลล์โฟม แต่มีไซซีฟิ่งบางส่วน

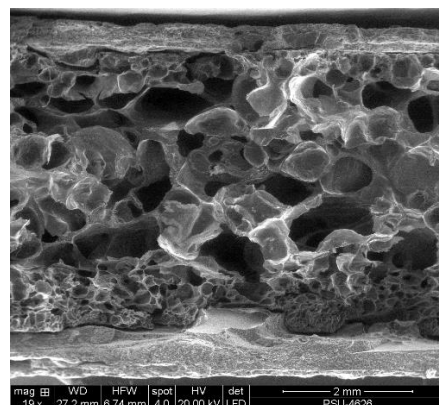
ที่สามารถซึมผ่านเข้าไปยังเซลล์โฟมที่บริเวณผิวหน้า ซึ่งสามารถสังเกตได้ในรูปที่ 4.32 (b, d และ f) ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ความแข็งแรงของโฟมแข็งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกล



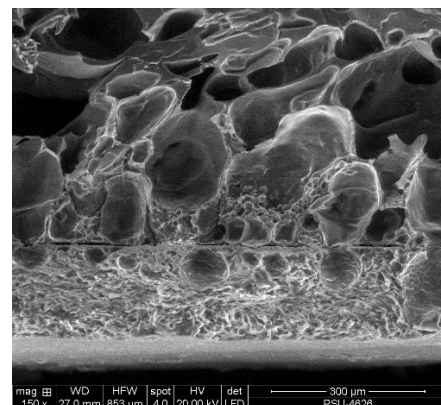
(a)



(b)

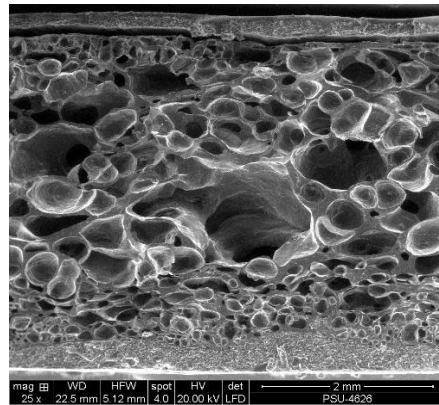


(c)

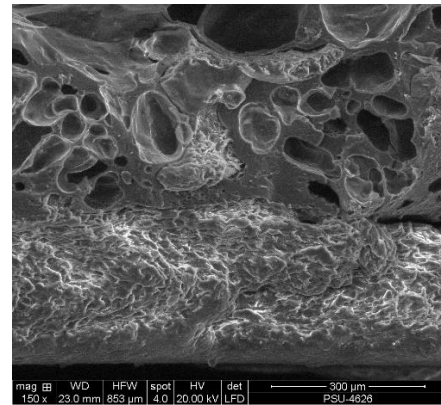


(d)

รูปที่ 4.32 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งที่กำลังขยาย 20 เท่า (a) และที่กำลังขยาย 150 เท่า (b) โฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาไม่บดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่กำลังขยาย 19 เท่า (c) และ 150 เท่า (d) และโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่กำลังขยาย 25 เท่า (e) และ 150 เท่า (f)



(e)

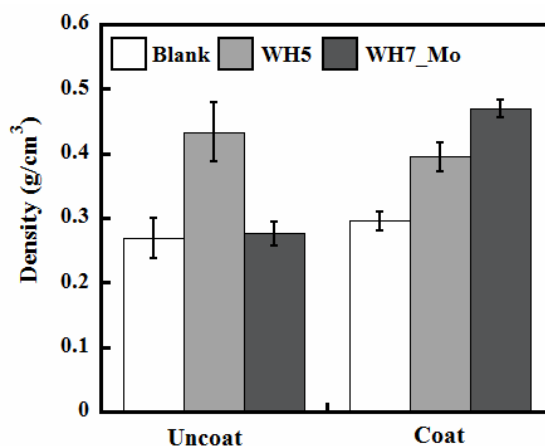


(f)

รูปที่ 4.32 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งที่กำลังขยาย 20 เท่า (a) และที่กำลังขยาย 150 เท่า (b) โฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาไม่บดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่กำลังขยาย 19 เท่า (c) และ 150 เท่า (d) และโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง ที่กำลังขยาย 25 เท่า (e) และ 150 เท่า (f)

4.3.3.4 ค่าความหนาแน่น

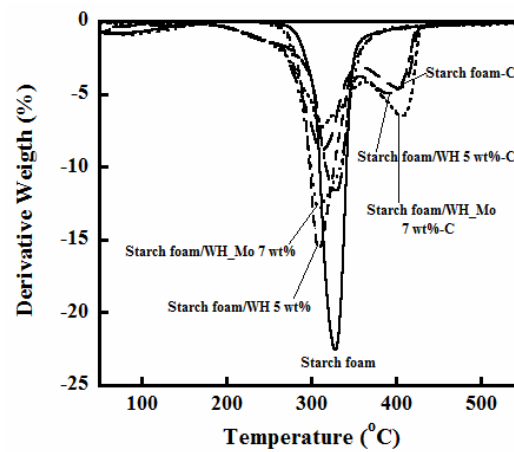
ความหนาแน่นของโฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่าโฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแข็งที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง เนื่องจากเมื่อไซซีฟิ่งเย็นตัวมีสถานะเป็นของแข็งเนื้อแน่น จึงส่งผลต่อน้ำหนักของโฟมแข็งที่เคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งเพิ่มขึ้น (Reis et al., 2018) และพบว่าค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบด ที่เคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งมีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบด อาจเกิดจากความหนาแน่นของเซลล์โฟมที่เกิดได้ยากในขณะการขึ้นรูป ซึ่งยืนยันได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาในการศึกษาอิทธิพลของเส้นใยด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่งมีค่าสูงกว่าโฟมแข็งที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีฟิ่ง



รูปที่ 4.33 ค่าความหนาแน่นของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดร้อยละ 5 และ 7 โดยน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง

4.3.3.5 สมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีเอทิลีนและโพลีเอทิลีนผสมเส้นใยผักตบชวาทั้ง 2 ชนิดที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง ดังแสดงใน DTG เทอร์โมแกรมในรูปที่ 4.34 พบว่าโพลีเอทิลีนที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวมีตำแหน่งการสลายตัว 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งที่ 1 ช่วงอุณหภูมิประมาณ 50-250 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำ กลิเซอรอลและสารโมเลกุลเล็ก (Xu et al., 2016; Zhang et al., 2018) และตำแหน่งที่ 2 ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 250-350 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของเนื้อพื้นของแป้งและองค์ประกอบของเส้นใยผักตบชวา ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน (Xu et al., 2016; Maache et al., 2017) เมื่อพิจารณาตัวอย่างของโพลีเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง พบว่ามีตำแหน่งการสลายตัวที่เพิ่มมา คือ ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 286-316 องศาเซลเซียส แสดงถึงการสลายตัวของไซซีผึ้งในโพลีเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง สอดคล้องกับการรายงานของ Zhang และคณะ (2018) และ Ren และคณะ (2016)



รูปที่ 4.34 DTG เทอร์โมแกรมของโฟมแป้งและโฟมแป้งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดร้อยละ 5 และ 7 โดยน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยไซซีผึ้ง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ศึกษาสมบัติของโฟมแข็งมันสำปะหลังโดยใช้เส้นใยจากเปลือกกล้วยพารา และผักตบชวาเป็นสารตัวเติมและเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยเซลลูโลสทางการค้า

พบว่าเมื่อผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราและผักตบชวา สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล การไวต่อความชื้นและสมบัติทางความร้อนของของโฟมแข็งได้ และนอกจากนี้พบว่าเส้นใยจากเปลือกกล้วยพาราและผักตบชวามีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยเซลลูโลสทางการค้าที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแข็ง มีค่าการต้านทานต่อการหักงอ และค่าเสถียรภาพทางความร้อนสูงที่สุด และมีค่าการดูดซับน้ำน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแข็งผสมเส้นใยจากเปลือกกล้วยพาราและผักตบชวา

5.2 ศึกษาอิทธิพลของความเร็รรอบและเวลาที่มีผลต่อการลดขนาดของเส้นใยจากเปลือกกล้วยพาราและผักตบชวาด้วยเทคนิคบอลมิล

พบว่าสภาวะที่ดีที่สุด คือ เวลา 40 นาที และความเร็รรอบ 600 รอบต่อนาที ทำให้ขนาดเส้นใยจากเปลือกกล้วยพาราลดลงจาก 237.90 เป็น 51.57 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดลดลงถึง 5 เท่า เมื่อเทียบกับเส้นใยเปลือกกล้วยพาราที่ไม่ผ่านการบด

5.3 เปรียบเทียบสมบัติของโฟมแข็งมันสำปะหลังที่ใช้เส้นใยจากเปลือกกล้วยพาราและผักตบชวาที่ผ่านและไม่ผ่านการลดขนาดด้วยเทคนิคบอลมิลเป็นสารตัวเติม

จากการศึกษาการเตรียมโฟมแข็งมันสำปะหลังผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราและเส้นใยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลมิล พบว่าที่สัดส่วนของเส้นใยเปลือกกล้วยพาราไม่ผ่านการบดร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของแข็ง และเส้นใยเปลือกกล้วยพาราผ่านการบดที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแข็ง เป็นสัดส่วนที่สามารถปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งได้ดีที่สุด และพบว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยเปลือกกล้วยพาราทั้ง 2 ชนิด สามารถปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งมันสำปะหลังได้ดีกว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านและไม่ผ่านการลดขนาดด้วยเทคนิคบอลมิล นอกจากนี้พบว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยที่ผ่านการบดสามารถปรับปรุงสมบัติของโฟมแข็งได้ดีกว่า

เส้นใยที่ไม่ผ่านการบด ซึ่งสามารถยืนยันได้จากค่าการต้านทานต่อการหักงอ ค่าการดูดซับความชื้นและสมบัติทางความร้อนของโฟมแข็ง และพบว่าเส้นใยจากเปลือกกล้วยยางพาราและผักตบชวามีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของโฟมแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

5.4 ศึกษาอิทธิพลของไซซ์ฟุ้งที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของโฟมแข็งที่ใช้เส้นใยจากเปลือกกล้วยยางพาราและผักตบชวาที่ผ่านและไม่ผ่านการการตัดแปรด้วยเทคนิคบอลลมเป็นสารตัวเติม

จากการศึกษาผลของการเคลือบผิวโฟมแข็งผสมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด คือ เส้นใยเปลือกกล้วยยางพารา เส้นใยผักตบชวา และเซลลูโลสทางการค้า ด้วยไซซ์ฟุ้ง พบว่าโฟมแข็งที่ผ่านการเคลือบผิวมีแนวโน้มของค่าการดูดซับน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าโฟมแข็งที่ผสมเส้นใยเปลือกกล้วยยางพาราและเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบดด้วยเทคนิคบอลลมให้ค่าการดูดซับน้ำที่ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมแข็งผสมเส้นใยที่ไม่ผ่านการบด นอกจากนี้พบว่า การเคลือบผิวด้วยไซซ์ฟุ้งทำให้โฟมแข็งมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีสมบัติเชิงกลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ยืนยันได้จากผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็ง

5.5 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาการเคลือบผิวด้วยไซซ์ฟุ้งเพื่อปรับปรุงวิธีการเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของโฟมแข็งและไซซ์ฟุ้งให้ดีขึ้น

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. 2559. สถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทย ปี พ.ศ.2559. ส่วนขยะมูลฝอยและสิ่งปฏิกูล สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. ปี 2560
- กรรณิการ์ บุตรเอก และทรงพล รติศพงศ์. 2548. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. ปีที่ 53. ฉบับที่ 169. 26-29
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ
- จิรัชยา บุญญฤทธิ., วุฒินันท์ คงทัด., สุธีรา วิทยากาญจน์., ชนาพร งามโรจน์., รังสิมา ชลคุป. 2559. สมบัติกายภาพของเส้นใยผักตบชวาสำหรับการปั่นเส้นด้าย O.E. ผสมเส้นใยผักตบชวาและฝ้าย. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2-5 กุมภาพันธ์ 2559. หน้า 994-1003
- ชาญวิทย์ พูนศรีไชยสิทธิ์. 2551. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ ปีที่ 14. ฉบับที่ 51. 74-77
- ดารณี เจริญสุข. 2554. วารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมยางไทย. ปีที่ 5. ฉบับที่ 3. 24
- นราธิป ปุณเกษม. 2556. ผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสเตลิงในขนมปัง. วารสารเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. ปีที่ 8. ฉบับที่ 1. 12-20
- สุจิตรา วาสนาดำรงดี. 2560. วิกฤตขยะบกลุ่มแพขยะในทะเล: จะแก้อย่างไร?. ปีที่ 21. ฉบับที่ 4. 54-58
- สุภิญญา บุญช่วย และวัชรภรณ์ คำนา. 2556. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. ปีที่ 61. ฉบับที่ 191. 4-7
- อรอุษา สรวารี. 2542. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). พิมพ์ครั้งที่ 1 ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.: กรุงเทพฯ
- อังศุมา บุญไชยสุริยา. 2554. การผลิตโฟมย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา

- อิสเฮาะ ยูโซะ และ ดนุพล ตันนโยภาส. 2556. สมบัติของเปลือกกล้วยพาราที่เคลือบใช้เป็นมวลรวมสีเขียวและน้ำปูนชั้นผสมซีโอไลต์ดัดแปร. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา: วัสดุก่อสร้างสีเขียว. ปีที่ 8. ฉบับที่ 2. 160-172
- โองการ วณิชชาชีวะ. 2558. วารสารกรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 23. ฉบับที่ 3. 485-487
- Abral A., Kadriadi D., Rodianus A., Mastariyanto P., Ilhamdi., Arief S., Sapuan S.M., Ishak M.R. 2014. Mechanical properties of water hyacinth fibers-polyester composites before and after immersion in water. *Materials and Design* 58: 125-129
- Abral H., Kadriadi D., Rodianus A., Mastariyanto P., Ilhamdi., Arief A., Sapuan S.M., Ishak M.R. 2014. Mechanical properties of water hyacinth fibers-polyester composites before and after immersion in water. *Materials and Design* 58: 125-129
- Asrofi A., Abral H., Putra Y.K., Kim H.Y. 2018. Effect of duration of sonication during gelatinization on properties of tapioca starch water hyacinth fiber biocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules* 108: 167-176
- Baker M.L., Chen Y., Lague C., Landry H., Peng Q., Zhong W., Wang J. 2010. Hemp fibre decortications using a planetary ball mill. *Canadian Biosystems Engineering* 52: 7-15
- Belgacem M.N., and Gandini A. 2008. *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*. Oxford.: UK
- BeMiller J., and Whistler R. 2009. *Starch Chemistry and Technology*. Department of Oxford.: UK
- Bergel B.F., Luz L.M.D., Santana R.M.C. 2017. Comparative study of the influence of chitosan as coating of thermoplastic starch foam from potato, cassava and corn starch. *Progress in Organic Coating* 2017: 27-32

- Boudria A., Hammoui Y., Adjeroud N., Djerrada N., Madani. 2018. Effect of filler load and high-energy ball milling process on properties of plasticized wheat gluten/olive pomace biocomposite. *Advanced Powder Technology* 29: 1230-1238
- Chiarathanakrit C., Mayakun J., Prathep A., Kaewtatip K. 2019. Comparison of the effects of calcified green macroalga (*Halimeda macroloba* Decaisne) and commercial CaCO₃ on the properties of composites starch foam trays. *International Journal of Biological Macromolecules* 121: 71-76
- Chiarathanakrit C., Riyajan S., Kaewtatip K. 2018. Transforming fish scale waste into an efficient filler for starch foam. *Carbohydrate Polymers* 188: 48-53
- Chiumarelli M., Hubinger M.D. 2014. Evaluation of edible films and coating formulated with cassava starch, glycerol, carnauba wax and stearic acid. *Food Hydrocolloids* 38: 20-27
- Cruz-Tirado J.P., Siche R., Cabanillas A., Diaz-Sanchez L., Vejarano R., Tapia-Blacido D.R. 2017. Properties of baked foams from oca (*Oxalis tuberosa*) starch reinforced with sugarcane bagasse and asparagus peel fiber. *Procedia Engineering* 200: 178-185
- Ekebafé L.O., Imanah J.E., Okieimen F.E. 2010. Physico-mechanical properties of rubber seed shell carbon-filled natural rubber compounds. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* 16: 149-156
- Ghangari A., Tabarsa T., Ashori A., Shaakeri A., Mashkour M. 2018. Thermoplastic starch foamed composites reinforced with cellulose nanofibers: Thermal and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers* 197: 305-311
- He S., Qin Y., Walid E., Li L., Cui J., Ma Y. 2014. Effect of ball-milling on the physicochemical properties of maize starch. *Biotechnology Reports* 3: 54-59
- Istirokhan Tun T., Rokhati N., Rachmawaty R., Meriyani M., Priyanto S., Susanto H. 2015. Cellulose Isolation from Tropical Water Hyacinth for Membrane Preparation. *Procedia Environmental Sciences* 23: 274-281

- Jenkins P.J., Donald A.M. 1995. The influence of amylose on starch granule structure. *International Journal of Biological Macromolecules* 17: 315-321
- Kaisangsri N., Kerdchoechuen O., Laohakunjit N. 2014. Characterization of cassava starch based foam blended with plant proteins, Kraft fiber, and palm oil. *Carbohydrate Polymers*.110: 70-77
- Keawtatip K., Chiarathanakrit C., Riyajan S. 2018. The effects of egg shell and shrimp shell on the properties of baked starch foam. *Powder Technology* 335: 354-359
- Khan M.S., Lari Q.H., Khan M.A. 2016. Therapeutic Uses of Mom Zard (Beeswax) in Unani System of Medicine- A Review. *Journal of Analytical & Pharmaceutical Research* 3: 1-4
- Kilinc A.C., Koktas S., Seki Y., Atagur M., Dalmis R. 2018. Extraction and investigation of lightweight and porous natural fiber from *Conium maculatum* as a potential reinforcement for composite materials in transportation. *Composites Part B* 140: 1-8
- Klempnwe D., and Frisch K.C. 1991. *Handbook of polymer foam and foam technology*. Munich.: Hanser
- Lopez-Gil A., Silva-Bellucci F., Velasco D., Ardanuy M., Rodriguez-Perez M.A. 2015. Cellular structure and mechanical properties of starch-based foamed blocks reinforced with naturalfibers and produced by microwave heating. *Industrial Crops and Products* 66: 194-205
- Maache M., Bezazi A., Amroune S., Scarpa F., Dufresne A. 2017. Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Juncus effuses* L. *Carbohydrate Polymers* 171: 163-172
- Machado A.M., Benelli P., Tessaro I.C. 2017. Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use. *Industrial Crops and Products* 102: 115-121
- Mattonai M., Pawcenis D., Seppia D.S., Lojewaka J., Ribechini E. 2018. Effect of ball-milling on crystallinity index, degree of polymerization and thermal stability of cellulose. *Bioresource Technology* 191: 198-204

- Mello, L.R.P.F., Mali, S. 2014. Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. *Industrial crops and products*. 55, 187-193.
- Mohamad D.S., Suhaimi M., Ismail H. 2014. Properties of Rubber Seed Shell Flour-Filled Polypropylene Composites: The Effect of Poly (ethylene co-Acrylic Acid). *BioResources* 9: 7311-7325
- Mohanty A.K., Misra M., and Drzal L.T. 2005. *NATURAL FIBERS, BIOPOLYMERS, AND BIOCOSCOMPOSITES*. Oxford.: UK
- Nuanmano S., Prodpran T., Benjakul S. 2015. Potential use of gelatin hydrolysate as plasticizer in fish myofibrillar protein film. *Food Hydrocolloids* 47: 61-68
- Padmanabhan R.G., Arun N., Reddy S.K.B.S. 2016. Investigation of Mechanical Behavior of Water Hyacinth Fiber/Polyester with Aluminium Powder Composites. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)* 5: 56-62
- Perez S., Bertoft E. 2010. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. *Starch/ Starke* 62: 389-420
- Phanthong P., Guan G., Ma Y., Hao X., Abudulu A. 2016. Effect of ball milling on the production of nanocellulose using mild acid hydrolysis method. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 60: 617-622
- Pie-Ling L., xiao-song H., Qun S. 2010. Effect of high hydrostatic pressure on starch: A review. *Starch*.60: 615-628
- Polat S., Uslu M.K., Aygun A., Certel M. 2013. The effects of the addition of corn husk fiber, kaolin and beeswax on cross-linked corn starch foam. *Journal of Food Engineering*.116: 267-276
- Rein M.O., Olivato J.B., Bilck A.P., Zanela J. 2018. Biodegradable tray of thermoplastic starch/poly (lactic acid) coated with beeswax. *Industrial Crops & Products* 112: 481-487

- Ren L., Cai Y., Ren L., Yang H. 2016. Preparation of Modified Beeswax and Its Influence on the Surface Properties of Compressed Poplar Wood. *Materials* 9: 1-11
- Saurabh C.K., Gupta S., Variya P.S., Sharma A. 2016. Effect of addition of nanoclay, beeswax, tween-80 and glycerol on physicochemical properties of guar gum films. *Industrial Crops & Products* 89: 109-118
- Soykeabkaew, N., Supaphol, P., Rujiravanit, R. 2004. Preparation and characterization of jute-and flax-reinforced starch-based composite foams. *Carbohydrate polymer*. 58, 53-63.
- Soykeabkeaw N., Thanomsilp C., Suwantong O. 2015. A review: Starch-based composite foams. *Composites: Part A* 78: 246-263
- Srichuwong S., Sunarti T.C., Mishima T., Isono N., Hisamatsu M. 2005. Starches from different botanical sources I: Contribution of amylopectin fine structure to thermal properties and enzyme digestibility. *Carbohydrate Polymers* 60: 529-538
- Sundum T., Szecsenyi M.K., Keawtatip K. 2018. Preparation and characterization of thermoplastic starch composites with fly ash modified by planetary ball milling. *Carbohydrate Polymers* 191: 198-204
- Supri A.G., Lim B.Y. 2009. Effect of Treated and Untreated filler loading on the Mechanical, Morphological, and Water Absorption Properties of Water Hyacinth Fibers-Low Density Polyethylene Composites. *Journal of Physical Science* 20: 85-96
- Thomas D.J., and Atwell W.A. 1999. Eagan Press Handbook Series: Starches. Minnesota.: USA
- Vercelheze A.E.S., Fakhouri F.M., Antonia L.H.D., Urbano A., Youssef E.Y., Yamashita F., Mali S. 2012. Properties of baked foams based on cassava starch, sugarcane bagasse fibers and montmorillonite. *Carbohydrate Polymer* 87: 1302-1310

- Vilpoux O., Averous I. 2004. Starch-based plastic in technology, use and potentialities of American starchy tubers. In: Cereda MP, Vilpoux O, editors. Collection Latin American Starchy tubers. Sao Paolo, Brazil: NGO Raizes and Cargill Foundation. Book no. 3, Chater 18.P.521-553
- Xu K., Tu D., Chen T., Zhong T., Lu J. 2016. Eeffects of environmental-friendly modified rubber seed shell on the comprehensive properties of high density polyethylene/rubber seed shell composites. *Industrial crops and products* 91: 132-144
- Xu K., Tu D., Chen T., Zhong T., Lu J. 2016. Effects of environmental-friendly modified rubber seed shell on the comprehensive properties of high density polyethylene/rubber seed shell composites. *Industrial Crops and Products* 91: 132-141
- Xu K., Zheng Z., Huang S., Chen T., Tang Z. 2016. Influence of Glycidyl Methylate Grafting on the Mechanical, Water Absorption, and thermal properties of Recycled High-Density Polyethylene/Rubber Seed Shell particle Composites. *BioResources* 11: 2617-2628
- Zhang C.W., Li F.Y., Li J.F., Wang L.M. Xie Q., Xu J., Chen S. 2017. A new biodegradable composite with open cell by combining modified starch and plant fibers. *Material and Design* 120: 222-229
- Zhang K., Wang F., Liang W., Wang Z., Duan Z., Yang B. 2018. Thermal and Mechanical Properties of Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Polymers* 10: 1-18
- Zhang Y., Simpson B.K., Dumont M.J. 2018. Effect of beeswax and carnauba wax on properties of gelatin films: A comparative study. *Food Bioscience* 26: 88-95

ภาคผนวก

2018 CBEES-BBS TOKYO, JAPAN CONFERENCE

2018 CBEES-BBS TOKYO, JAPAN CONFERENCE ABSTRACT

2018 4th International Conference on Environment and
Bio-Engineering (ICEBE 2018)

January 18-20, 2018

Global Front, Surugadai Campus, Meiji University, Tokyo,
Japan



Sponsored by



Published and Indexed by



<http://www.icebe.org/>

2018 CBEES-BBS TOKYO, JAPAN CONFERENCE

	<p>methods to systematically further our investigation in structures around two other regions. In animals, but not in plants, we discovered a universal trend of increased mRNA stability near the 5'cap in mRNAs regulated by miRNA. GC content of 5'UTR, 5'UTR length and number of miRNA target sites may influence local structure near the 5'cap, which is likely selected to facilitate miRNA-mediated translation regulation. Another consistent pattern--decreased structure just before the stop codon followed by a strong signal of increased stability--was found near the translation termination site in many species, except in yeast and worms. This pattern is selected for efficient bounding of termination release factors and prevents erroneous stop codon readthrough. However, among simple organisms readthrough heterogeneity may enhance phenotypic diversity and facilitate their adaptation to changing environments.</p>
<p>T1001 Presentation 3 (14:00~14:15)</p>	<p>Effect of Water Hyacinth on the Mechanical, Morphological and Physical Properties of Baked Starch Foams</p> <p>Sukaree Chaireh and Kaewta Kaewtatip</p> <p>Prince of Songkla University, Thailand</p> <p><i>Abstract</i>—The objective of this work was to study the effects of water hyacinth (WH) on the properties of baked starch foam and compare them with the effects of commercial cellulose (CC). The effect of the both fillers on the properties of baked starch foams including density, morphology and impact strength was investigated. FTIR analysis revealed the structure of WH to be composed of cellulose, hemicelluloses and lignin, whereas CC contains only cellulose. It was found that the impact strength of starch/WH composite foam was greater than the impact strength of both starch/CC composite foam and starch foam without filler by about 58% and 43%, respectively. This increase may be the result of a more efficient transfer of stress from the starch matrix to the filler due to the strong interaction between the hydroxyl groups in the structure of the three-dimensional network of lignin in WH and starch. Moreover, the starch/WH composite foam showed the best morphology of small and uniform cell size, probably because the WH can increase the steam bubbles in the starch batter. It can be concluded that water hyacinth is a novel filler that plays an active role in improving the properties of baked starch foam.</p>
<p>B0021 Presentation 4 (14:15~14:30)</p>	<p>Enumerating Chemical Mono-Block 3-Augmented Trees with Two Junctions</p> <p>Yuui Tamura, Aleksandar Shurbevski, Hiroshi Nagamochi and Tatsuya Akutsu</p> <p>Kyoto University, Department of Applied Mathematics and Physics, Japan</p> <p><i>Abstract</i>—Enumerating chemical graphs with given constraints on their</p>



บทความฉบับสมบูรณ์ในรายงานการประชุมวิชาการ

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 2
(2nd National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition)

“งานวิจัยและนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาเพื่อความยั่งยืนทางเศรษฐกิจและสังคม”

วันที่ 17 – 18 พฤษภาคม 2561

ณ ห้องเชียงใหม่ ชั้น 2 ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเพรส

โรงแรมดิเอ็มเพรสเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

Copyright © 2018

จัดทำโดย : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

เชียงใหม่ ประเทศไทย || พฤษภาคม 2561



การประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ
ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2561
ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติเอ็มเทรส โรงแรมดิเอ็มเทรส เชียงใหม่



NGRC02010140

**อิทธิพลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล
และสมบัติทางกายภาพของโฟมแป้ง**

Effect of cellulose fiber on the thermal, mechanical and physical properties of starch foam

ซุการี ชายระะ และ แก้วตา แก้วตาทิพย์

Sukaree Chaireh and Kaewta Kaewtatip

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา ประเทศไทย 90110

Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand 90110

*Corresponding author, e-mail: kaewta.k@psu.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอิทธิพลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของโฟมแป้งที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอบ โดยแปรปริมาณเส้นใยเซลลูโลสในช่วงระหว่าง 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับความชื้นของโฟมแป้งมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าโฟมแป้งที่ผสมเส้นใยเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้ง สามารถปรับปรุงค่าการต้านทานต่อการหักงอของโฟมแป้งเพิ่มขึ้นเป็น 6.20 เมกะปาสคาล จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่าโฟมแป้งผสมเส้นใยเซลลูโลสมีขนาดเซลล์ที่ใกล้เคียงกันและมีผนังเซลล์ที่หนากว่าโฟมแป้งที่ไม่ผสมเส้นใยเซลลูโลส นอกจากนี้พบว่าเส้นใยเซลลูโลสสามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของโฟมแป้ง จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยเซลลูโลสมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติของโฟมแป้ง เนื่องจากการยึดเกาะกันที่แข็งแรงระหว่างเส้นใยเซลลูโลสและเนื้อพื้นของแป้ง

คำสำคัญ: โฟมแป้ง เส้นใยเซลลูโลส สมบัติเชิงกล

Abstract

The aim of this research is to investigate the effect of cellulose fiber (CL) on the thermal, mechanical and physical properties of starch foams prepared by a baking process. The cellulose fiber contents of the starch foams ranged from 0 wt.% to 10 wt.%. The starch foams adsorbed significantly less water after the addition of the cellulose fiber. The flexure stress at maximum load increased to 6.20 MPa at the highest cellulose fiber content (10 wt%). The morphology of the starch/CL foam composite, revealed by scanning electron microscopy, presented a more ordered distribution of cell sizes with thicker cell walls than the pure starch foam presented. Moreover, cellulose fiber improved the thermal stability of the starch foam. These effects could be related to the strong adhesion between the cellulose fiber and starch matrix.

Keyword: Starch foam, Cellulose fiber, Mechanical properties

บทนำ

ปัจจุบันบรรพบุรุษจากพลาสติกสังเคราะห์มีการใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามพลาสติกสังเคราะห์เหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ จึงก่อให้เกิดปัญหาขยะที่เป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมากในปัจจุบัน (สุภิญญา, 2556;



การประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ
ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2561
ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเทรส โรงแรมดิเอ็มเทรส เชียงใหม่



กรรมจักร, 2548) โฟมจากพลาสติกสังเคราะห์เป็นหนึ่งในบรรจุภัณฑ์ที่นิยมนำมาใช้งานในงานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร โดย โฟมพลาสติกสังเคราะห์ส่วนใหญ่ผลิตมาจากพอลิสไตรีน (Polystyrene: PS) เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ง่ายต่อการขึ้นรูป ราคาถูก มีความแข็งแรงที่เหมาะสม และด้านทานน้ำสูง (Kaisangsri et al., 2014; Mello et al., 2014; Soykeabkaew et al., 2004) แต่โฟมพลาสติกสังเคราะห์มีข้อเสีย เช่น มีการปลดปล่อยสารก่อมะเร็งที่เป็นผลกระทบต่อสุขภาพ อีกทั้งยังเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและกระบวนการรีไซเคิล (Recycle) ทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้หน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมได้รณรงค์ให้เลิกใช้โฟมจากพอลิสไตรีน (สุภิญญา, 2556) จากปัญหาดังกล่าวพอลิเมอร์ธรรมชาติจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจอย่างมากในปัจจุบันเพื่อทดแทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์ โดยพอลิเมอร์ธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากพืช เช่น มันสำปะหลัง ข้าว มันฝรั่งและข้าวโพด เป็นต้น แป้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถเตรียมเป็นพลาสติกชีวภาพได้ ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นพิษและสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ดังนั้นแป้งถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนโฟมจากพลาสติกสังเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตามแป้งยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ทนความร้อนต่ำ และไวต่อความชื้น (Kaisangsri et al., 2014) โดยมีงานวิจัยมากมายสนใจปรับปรุงสมบัติของแป้งโดยผสมสารตัวเติม (Filler) หลายชนิด เช่น แป้งตัดแปรชนิดแป้งครอสลิงค์ (Cross-linked starch) (Pornsuksomboon et al., 2014) กลูเตนข้าวสาลี (Gluten) เส้นใยทะเลลายปาล์มมัน (Oil palm fiber) (อังคณา, 2554) ฟางข้าวบาร์เลย์ (Barley straw fiber) เส้นใยองุ่น (Grape wastes) (Lopez-Gil et al., 2015) เส้นใยปอกระเจา (Jute) เส้นใยป่าน (Flax) (Soykeabkaew et al., 2004) โคโตซาน (Chitosan) (Kaisangsri et al., 2014) กากงา (Sesame cake) (Machado et al., 2017) เคโอลิน (Kaolin) ชังข้าวโพด (Corn husk fiber) (Palat et al., 2013) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) (ชลิภา, 2559) ชานอ้อย (Sugarcane bagasse) และมอนทอร์มิลโลไนท์ (Montmorillonite) (Vercelheze et al., 2012) เป็นต้น

โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) แต่อย่างไรก็ตามผิวของเส้นใยธรรมชาติมักถูกปกคลุมด้วย แวกซ์ (Wax) เพกติน (Pectins) และน้ำมันธรรมชาติ (Natural oils) (Saetun et al., 2017) ซึ่งมีผลทำให้เส้นใยธรรมชาติไม่สามารถเข้ากันได้กับเนื้อพื้นของแป้ง จึงมีหลายงานวิจัยนี้สนใจเตรียมแป้งผสมเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) ที่ผ่านกระบวนการกำจัดองค์ประกอบอื่นๆ เพื่อให้ได้เส้นใยเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูง เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้กับเนื้อพื้นของแป้ง แม้ว่า Salgado และคณะ (2008) รายงานว่าเส้นใยเซลลูโลสสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแป้ง แต่เส้นใยเซลลูโลสไม่มีประสิทธิภาพในการลดการไวต่อความชื้นของแป้งที่เตรียมได้ และจากการสืบค้นงานวิจัยยังไม่มีการศึกษาอิทธิพลของเส้นใยเซลลูโลสต่อสมบัติทางความร้อนของแป้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้สนใจศึกษาอิทธิพลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล การไวต่อความชื้น และสมบัติทางกายภาพของแป้ง

อุปกรณ์และวิธีการ / วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมแป้งแป้ง

อบแป้งมันสำปะหลังชนิดแป้งดิบและเส้นใยเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในกล่องสุญญากาศขึ้นจนกว่าจะนำไปใช้งาน ผสมแป้งมันสำปะหลัง กัวร์กัม (2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้ง) แมกนีเซียม สเตียเรท (4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้ง) และแปรปริมาณเส้นใยเซลลูโลส (ขนาด 50 ไมโครเมตร) เท่ากับ 0, 3, 5, 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้ง ตามลำดับ โดยผสมส่วนผสมทั้งหมดในเครื่องผสมอนุกรมประสมตั้งเป็นเนื้อเดียวกัน ต่อมาผสมน้ำ (100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้ง) และกลีเซอรอล (10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแป้ง) ในเครื่องผสมอนุกรมประสมตั้งจนได้ส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน นำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัดทางความร้อน (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เก็บตัวอย่างไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 (%RH) เป็นเวลา 7 วันก่อนนำศึกษาสมบัติต่างๆ



การประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ
ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2561
ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติเอ็มเทรส โรงแรมเอ็มเทรส เชียงใหม่



การศึกษสมบัติของโฟมแข็ง

1. การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical property)

สมบัติเชิงกลทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยเตรียมชิ้นทดสอบให้มีความกว้าง 30 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร จำนวน 6 ชิ้น ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine Instron 3365 ระยะทดสอบ (Support span) 80 มิลลิเมตร ใช้แรงขนาด 100 นิวตัน และอัตราการให้แรงที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที

2. การทดสอบความหนาแน่น

เตรียมชิ้นทดสอบให้มีความกว้าง×ยาว เท่ากับ 12.7 × 63.5 มิลลิเมตร ตัวอย่างหนึ่งสูตรจะใช้ชิ้นตัวอย่างทดสอบ 10 ชิ้น วัดขนาดของชิ้นทดสอบ และชั่งน้ำหนัก โดยความหนาแน่นคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\text{Density} = \frac{m}{v} \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ m คือ น้ำหนักของตัวอย่าง มีหน่วยเป็น g

v คือ ปริมาตรของตัวอย่าง มีหน่วยเป็น cm³

3. การทดสอบการดูดซับน้ำ

เก็บตัวอย่างไว้เป็นเวลา 10 วัน ที่อุณหภูมิห้องที่ %RH = 65% ตัดชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด 30×30 มิลลิเมตร ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำน้ำหนักที่ได้มาทำการคำนวณหาค่า Water adsorption (%) ตามสมการที่ (2)

$$\text{Water adsorption (\%)} = [W_1 - W_2] / W_2 \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักของโฟมแข็งก่อนอบ มีหน่วยเป็น g

W2 คือ น้ำหนักของโฟมแข็งหลังอบ มีหน่วยเป็น g

4. การทดสอบสมบัติทางความร้อน

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของโฟมแข็งด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) โดยอัตราความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และอุณหภูมิ 50 -700 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน

5. การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ศึกษารอยแตกหักที่บริเวณผิวหน้า (Surface fracture) ของโฟมแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (Quanta 400, FEI) โดยตัดชิ้นตัวอย่างบน stub และเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำก่อนนำไปทดสอบที่กำลังขยายต่างๆ

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

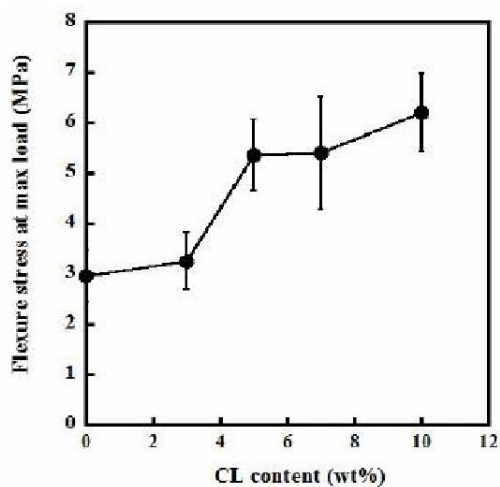
ภาพที่ 1 แสดงอิทธิพลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อการหักงอของโฟมแข็ง พบว่าโฟมแข็งไม่ผสมเส้นใยเซลลูโลสมีค่าการต้านทานต่อการหักงอเท่ากับ 2.95 เมกกะปาสคาล และเมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการต้านทานต่อการหักงอเพิ่มขึ้น โดยพบว่าที่ปริมาณเส้นใยเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ส่งผลให้ค่าการต้านทานต่อการหักงอของโฟมแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 6.20 เมกกะปาสคาล เนื่องจากการยึดเกาะกันที่ตีระหว่างเนื้อพื้นของแข็งและเส้นใยเซลลูโลสส่งผลให้การถ่ายโอนแรงจากเนื้อพื้นของแข็งไปยังเส้นใยเซลลูโลสเกิดได้ดี (Kaisangsri et al., 2014) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการดูดซับน้ำของโฟมแข็งดังแสดงในภาพที่ 2 เห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้นค่าการดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าเส้นใยเซลลูโลสที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งมีค่าการดูดซับน้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเส้นใยเซลลูโลสสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อพื้นของแข็งทำให้สามารถ



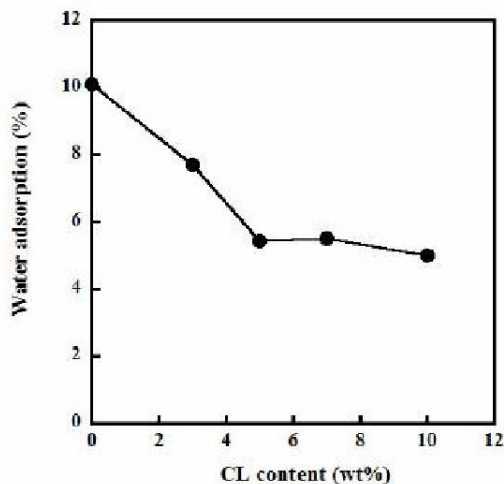
การประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ
ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2561
ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติเอ็มเทรส โรงแรมเอ็มเทรส เชียงใหม่



ขีดขวางการซึมผ่านของน้ำเข้ามายังโฟมแข็งได้ โดยการยึดเกาะกันที่ตีระหว่างเนื้อฟองของแข็งและเส้นใยเซลลูโลสอินทรีย์จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แสดงในภาพที่ 3 ที่แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมทั้ง 2 มีความเข้ากันได้ดี เนื่องจากแข็งและเส้นใยเซลลูโลสมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน (Soykeabkaew et al., 2015) ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลสสามารถเกิดอันตรกิริยาได้ดีกับหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของแข็ง



ภาพที่ 1 อิทธิพลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อการหักงอของโฟมแข็ง



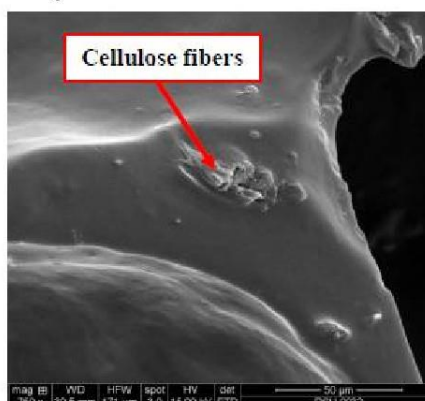
ภาพที่ 2 อิทธิพลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อค่าการดูดซับน้ำของโฟมแข็ง



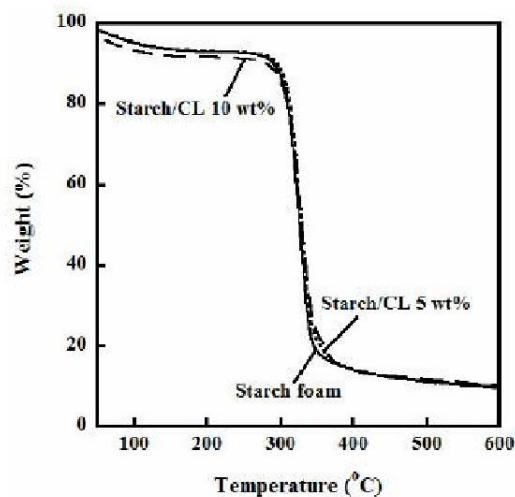
การประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ
ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2561
ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเทรส โรงแรมดิเอ็มเทรส เชียงใหม่



นอกจากนี้พบว่าเส้นใยเซลลูโลสสามารถปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของโฟมแข็ง โดยผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 100-250 องศาเซลเซียสของทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นผลจากการสลายตัวขององค์ประกอบของน้ำและกลีเซอรอลที่อยู่ในโฟมแข็ง (Chiarathanakrit et al., 2018) และพบว่าโฟมแข็งผสมเส้นใยเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งมีค่าอุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปมากที่สุดเท่ากับ 335 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าโฟมแข็งไม่ผสมเส้นใยเซลลูโลส 10 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งผสมเส้นใยเซลลูโลส



ภาพที่ 4 กราฟ TGA ของโฟมแข็งไม่ผสมเส้นใยเซลลูโลสและโฟมแข็งผสมเส้นใยเซลลูโลสที่ปริมาณ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง

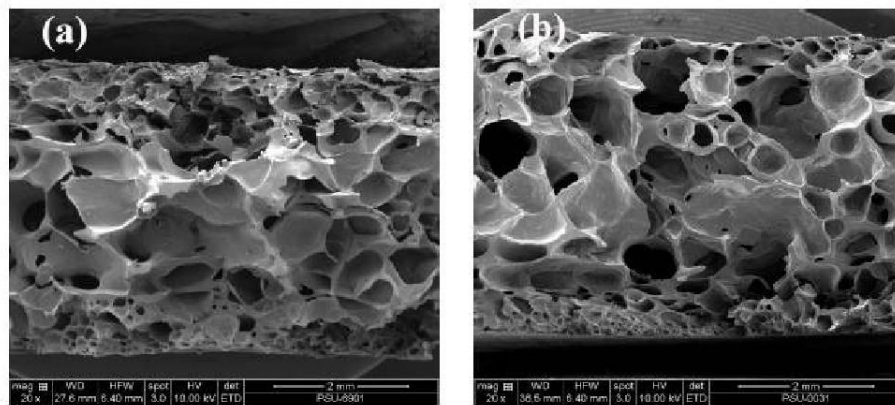
ภาพที่ 5 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็งไม่ผสมเส้นใยเซลลูโลส (a) และโฟมแข็งผสมเส้นใยเซลลูโลสปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง (b) พบว่าโฟมแข็งไม่ผสมเส้นใยเซลลูโลสมีขนาดเซลล์โฟมที่แตกต่างกันและผนังเซลล์



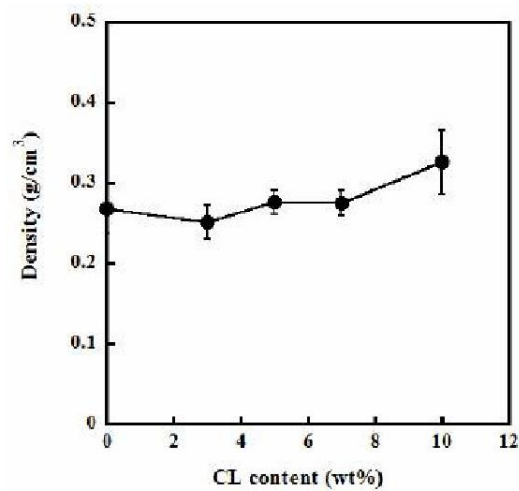
การประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ
ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2561
ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติเอ็มเทรส โรงแรมเอ็มเทรส เชียงใหม่



โฟมบาง แต่โฟมแข็งผสมเส้นใยเซลลูโลสมีขนาดเซลล์โฟมสม่ำเสมอ และผนังเซลล์หนากว่าโฟมแข็งไม่ผสมเส้นใยเซลลูโลส เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสอาจแสดงสมบัติเป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ที่ส่งผลให้เกิดเซลล์โฟมและการขยายตัวของเซลล์โฟมเกิดได้ง่าย (Lopez-Gil et al., 2015) ภาพที่ 6 แสดงอิทธิพลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของโฟมแข็ง พบว่าโฟมแข็งไม่ผสมเส้นใยเซลลูโลสมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.2683 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และโฟมแข็งมีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเส้นใยเซลลูโลสมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมแข็ง (a) และโฟมแข็งผสมเส้นใยเซลลูโลสปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (b)



ภาพที่ 6 อิทธิพลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของโฟมแข็ง



การประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ
ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2561
ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเทรส โรงแรมดิเอ็มเทรส เชียงใหม่



สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่าเมื่อผสมเส้นใยเซลลูโลสที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง สามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อการหักงอของโฟมแข็งได้ดีที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 6.20 เมกกะปาสคาล เนื่องจากเกิดการถ่ายโอนแรงจากเนื้อพื้นของแข็งไปยังเส้นใยได้ดี และค่าการดูดซับน้ำของโฟมแข็งมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้พบว่าเส้นใยเซลลูโลสสามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของโฟมแข็งได้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เส้นใยเซลลูโลสแสดงสมบัติเป็นสารก่อผลึกที่ส่งผลให้เกิดเซลล์โฟมและการขยายตัวของเซลล์โฟมเกิดได้ง่าย ดังนั้นการเตรียมโฟมแข็งผสมเส้นใยเซลลูโลสจากงานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาโฟมย่อยสลายได้เพื่อใช้ทดแทนโฟมที่ผลิตจากพลาสติกสังเคราะห์ ซึ่งต้องใช้เวลาในการย่อยสลายหลายร้อยปี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย (Research Assistantship: RA) จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ และขอขอบคุณบริษัท Saim Modified Starch Co., Ltd. ที่ให้ความอนุเคราะห์แป้งมันสำปะหลัง

เอกสารอ้างอิง

- กรณีการ์ บุตรเอก และทรงพล รติศพงษ์. 2548. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 53(169): 26-29.
- ชลิกา เขี้ยวรุ่ง. 2560. อิทธิพลของสารตัวเติมชีวภาพที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุกัญญา บุญช่วย และวัชรารัตน์ ค้านา. 2556. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 61(191): 4-7.
- อังศุมา บุญไชยสุริยา. 2554. การผลิตโฟมย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Albano C., Karam A, Dominguez N, Sanchez Y, Gonzalez J, Aguirre O, and Catano L. 2005. Thermal, mechanical, morphological, thermogravimetric, rheological and toxicological behavior of HDPE/seaweed residues composites. *Composite Structure*. 71: 282-288.
- Bergel B.F., Machado L, and Santana R.M.C . 2017. Comparative study of influence of chitosan as coating of thermoplastic starch foam from potato, cassava and corn starch. *Progress in Organic coating*. 106: 27-32.
- Chiarathanakrit C., Riyajan S.A, and Koewtatip K. 2018. Transforming fish scale waste into an efficient filler for starch foam. *Carbohydrate Polymers*. 188: 48-53.
- Kaisangsri N., Kerdchoechuen O, and Laohakunjit N. 2012. Biodegradable foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan. *Industrial Crops and Products*. 37: 542-546.
- Kaisangsri N., Kerdchoechuen O, and Laohakunjit N. 2014. Characterization of cassava starch based foam blended with plant proteins, Kraft fiber, and palm oil. *Carbohydrate Polymers*. 110: 70-77.
- Lopez-Gil A., Silva-Bellucci F, Velasco D, Ardanuy M, and Rodriguez-Perez M.A. 2015. Cellular structure and mechanical properties of starch-based foamed blocks reinforced with natural fibers and produced by microwave heating. *Industrial Crops and Products*. 66: 194-205.



การประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ
ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2561
ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเทรส โรงแรมดิเอ็มเทรส เชียงใหม่

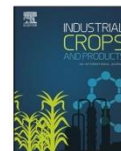


- Machado C.M., Benelli P, and Tessaro I.C. 2017. Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use. *Industrial Crops and Products*. 102: 115–121.
- Mello L.R.P.F., and Mali S. 2014. Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. *Industrial crops and products*. 55: 187–193.
- Polat S., Uslu M.K, Aygun A, and Certel M. 2013. The effects of the addition of corn husk fiber, kaolin and beeswax on cross-linked corn starch foam. *Journal of Food Engineering*. 116: 267–276.
- Salgoda P.R., Schmodt V.C., Ortiz S.E.M., Mauri A.N., Laurindo J.B. 2008. Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process. *Journal of Food Engineering*. 85: 435–443.
- Seatan W., Chiachun C., Riyajan S., Kaewtatip K. 2017. Green Composites Base on Thermoplastic Starch and Rubber Wood Sawdust. *Polymer Composites*. 38: 1063–1069.
- Soykeabkaew N., Supaphal P, and Rujiravanit R. 2004. Preparation and characterization of jute–and flax–reinforced starch–based composite foams. *Carbohydrate Polymer*. 58: 53–63.
- Soykeabkaew N., Thanomsilp C, and Suwanton O. 2015. A review: Starch–based composite foams. *Composites: Part A*. 78: 246–263.
- Vercelheze A.E.S., Fakhouri F.M, Antonia L.H.D, Urbano A, Youssef E.Y, Yamashita F, and Mali S. 2012. Properties of baked foams based on cassava starch, sugarcane bagasse fibers and montmorillonite. *Carbohydrate Polymer*. 87: 1302–1310.



Contents lists available at ScienceDirect

Industrial Crops & Products

journal homepage: www.elsevier.com/locate/indcrop

Preparation of rubber seed shell powder by planetary ball milling and its influence on the properties of starch foam

Sukaree Chaireh^a, Katalin Mészáros Szécsényi^b, Phetdaphat Boonsuk^a, Kaewta Kaewtatip^{a,*}^a Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112, Thailand^b Department of Chemistry, Biochemistry and Environmental Protection, University of Novi Sad, Novi Sad, 21000, Serbia

ARTICLE INFO

Keywords:
Starch foam
Rubber seed shell
Particle size
Density
Color parameters

ABSTRACT

Starch foam composites containing rubber seed shell particles of different sizes were prepared and characterized. The first objective was to prepare small particles of rubber seed shell using a planetary ball mill at different rotational speeds (300 and 600 rpm) and milling times (20, 40 and 60 min) to optimize the milling condition to achieve the smallest possible particle size. The second objective was to study the influence of the size of the rubber seed shell particles on the properties of the starch foam. Laser particle size analysis and morphological observation by scanning electron microscope (SEM) revealed the optimal milling condition to be 600 rpm for 40 min. The smallest average particle size obtained at this condition was 51.57 μm. Starch foam containing the smallest particles (GRS) exhibited greater flexural stress at maximum load and narrower cell size distribution and had a lower density than starch foam composite with crude rubber seed shell (CRS) at the same filler content. The small size and high surface area of GRS enabled a better dispersion of filler particles and the establishment of stronger interactions within the starch matrix. The change in the color parameters and whiteness values of the rubber seed shell particles can be attributed to exposure to the heat generated by ball milling and the reduction of the average particle size. The effect of the addition of GRS and CRS on the thermal properties of the composites was determined by simultaneous thermogravimetry – differential scanning calorimetry.

1. Introduction

Recent interest in starch foams for packaging applications has been based on their properties of non-toxicity, biodegradability, and the possibility of low-cost production from agricultural sources (Abinader et al., 2018; Bruno et al., 2018). Moreover, the production process for starch foams is simple, as they can be baked using water as a blowing agent (Pornsuksomboon et al., 2016). Along with the numerous benefits of starch foams, there are some drawbacks. Mechanical properties can be poor, significant changes to properties can occur during aging and starch foams are water sensitive (Pablo et al., 2008; Abbas et al., 2018). In the literature, the preparation of composites of starch and lignocellulosic material has been a frequent research topic due to the many advantages of lignocellulosics (Suleyman et al., 2013; Lea, and Suzana, 2014; Nattapon et al., 2014; Machado et al., 2017; Sanhawong et al., 2017). As well as having low density and high specific strength, lignocellulosics are environmentally friendly, abundant, and enable low-cost production with low energy consumption. Lignocellulosic materials such as kraft fiber, corn husk, cotton, sesame cake and malt

bagasse can improve the flexural strength and the flexural modulus of elasticity of starch foams, as well as their water resistance. These improvements were due to the strong adhesion between the lignocellulosic material and the starch matrix, which occur because both materials are polysaccharide-based (Suleyman et al., 2013; Lea, and Suzana, 2014; Nattapon et al., 2014; Machado et al., 2017; Sanhawong et al., 2017). However, most of the reported composites of starch and lignocellulosics suffered from poor dispersion and poor adhesion between the filler and starch matrix at elevated filler contents (Laura et al., 2006; Saetun et al., 2017). Natural fibers of smaller particles have a significantly higher specific surface area compared to fibers of bigger particles. Therefore, they increased adhesion between the polymer matrix and the filler (Genzhong et al., 2009).

Planetary milling is simple, efficient, operates at low-cost and is often used in laboratories and industry to produce materials of small particle size (Ming-Guo et al., 2010; Chunxiao et al., 2016; Sundum et al., 2018). Some recent studies have investigated the properties of materials such as egg shell, fly ash, lithium fluoride nanopowders and chitosan that were modified by planetary milling (Yoshinobu et al.,

* Corresponding author.

E-mail address: kaewta.k@psu.ac.th (K. Kaewtatip).<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.035>Received 1 December 2018; Received in revised form 13 April 2019; Accepted 16 April 2019
0926-6690/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1998; Clemens et al., 2014; Matej, 2018; Sundum et al., 2018). We reported previously that milling speed and grinding time affected the particle size, surface area and morphology of fly ash (Sundum et al., 2018). Clemens et al. (2014) observed that the agglomeration of lithium fluoride nanoparticles depended on the size of the milling balls as well as on the ball-to-powder ratio.

Rubber seed shell is a lignocellulosic agricultural waste from the rubber tree. Natural rubber is one of Thailand's main agricultural products but, although rubber seed shells have been effectively used in the preparation of activated carbon, in capacitor electrodes, as an aggregate in concrete, and in the synthesis of polymers, (Kang and Jian, 2010; Mohamad et al., 2014; Muthusamy et al., 2014; Pagketanang et al., 2015; Kaimeng et al., 2016), the utilization of rubber seed shell in Thailand is low. The cassava root is also an economically important crop in Thailand. Generally, cassava is processed as animal feed or fermented to produce alcoholic beverages. The production of starch foam using cassava starch will not only support the long-term market price of the cassava root but also help to produce new materials to replace petroleum-derived plastics. In this way the accumulation of plastics polluting the environment will be reduced.

The objective of this work was to study the influence of the loading content of small rubber seed shell particles on the properties of composite starch foams and to compare these properties with the properties of composite starch foams containing larger, crude rubber seed shell particles. The small rubber seed shell particles were prepared using a planetary ball mill. The milling conditions were optimized by milling the rubber seed shell at different rotational speeds and milling times in order to achieve the smallest average particle size.

2. Experimental

2.1. Materials

Native cassava starch was kindly supplied by Siam Modified Starch Co., Ltd. It was dried at 105 °C for 24 h in an oven and kept in a desiccator until used. Waste rubber seed shell was obtained from a local rubber plantation. The composition of the rubber seed shell is presented in Table 1. The percentages of acid-insoluble lignin, holocellulose content and cellulose content were determined in accordance with TAPPI standard T 222 om-11, the method of Wise et al. (1946) and the method of Updegraff (1969), respectively. Holocellulose is the total carbohydrate fraction (cellulose and hemicellulose). Glycerol was from Ajax Finechem. Guar gum and magnesium stearate were purchased from Sigma-Aldrich, Inc.

2.2. Preparation of rubber seed shell powder

The rubber seed shell was washed with tap water to remove impurities, dried in air at 70 °C for 24 h, and cut using a Polymix® PX-MFC 90 D (Switzerland). After cutting, the rubber seed shell was sieved using a 250 µm sieve, dried in a hot air oven (105 °C) until constant weight was achieved, denoted crude rubber seed shell (CRS), and then kept in a desiccator prior to use. To obtain ground rubber seed shell filler, ten grams of CRS were placed in the grinding jar of the planetary ball mill (model PM 100, Retsch Co., Germany) with 10 grinding balls and milled under the following operational modes: rotational speeds of 300

and 600 rpm, and grinding times of 20, 40 and 60 min. The smallest particles were dried in a hot air oven denoted ground rubber seed shell (GRS) and kept in a desiccator until application. The steps in the preparation of the rubber seed shell fillers are presented in Fig. 1.

2.3. Preparation of starch foam

Native cassava starch was mixed (Kenwood, KM 262) at room temperature for 10 min with guar gum (1 wt%), magnesium stearate (2 wt%) and either CRS or GRS filler at loadings of 0, 3, 5, 7 and 10 wt% on dry starch basis. Glycerol (5 wt%) and distilled water (100 wt%) were added to the mixture. The batter was mixed for 10 min, then 100 g of the batter were poured into a rectangular mold (15 cm × 10 cm × 4 mm). The foams were produced using a compression molding machine (model KI-7014, Kao Tieh Ltd., Taiwan) operating at 200 °C for 5 min. The neat starch foam and the composites did not show significant differences in appearance (Fig. S1 in Supporting Information).

2.4. Characterization

The density of the obtained foams was determined from the weight-volume relationship of sample pieces measuring 12.7 mm × 63.5 mm × 4 mm. Ten specimens of each sample were tested.

The morphology of the samples was studied by scanning electron microscope (SEM-Quanta 400) operating at acceleration voltages of 10 and 15 kV. All specimens were mounted on stubs with double-sided sticky tape and coated with a thin layer of evaporated gold.

The particle size of the samples was determined using a Laser Particle Size Analyzer (LS 230, COULTER).

Flexural tests were performed in accordance with ASTM D790, using a universal testing machine (model 3365, Instron) operating at a crosshead speed of 2.5 mm/min with a 100 N load cell. The dimensions of the specimens were 130 × 30 × 4 mm and the span length was fixed at 80 mm. The testing was performed at 25 ± 3 °C and 55 ± 2% RH. At least six specimens of each sample were tested and the average and standard deviation were calculated.

Surface area was determined with a surface area and porosity analyzer (Micromeritics/ASAP2060, ASAP2460, USA) using a static volumetric N₂ gas adsorption method. Prior to measurement, all samples were outgassed at 70 °C for 15 h.

The color of each sample was determined using a color spectrophotometer (HunterLab-001 UltraScanpro, HunterLab, USA) in reflectance mode. The color parameters ranged from L* = 0 (black) to L* = 100 (white), -a* (green) to +a* (red) and -b* (blue) to +b* (yellow). The reported values are averages of three repeated measurements.

The simultaneous TG/DSC measurements were carried out using TA Instruments Q600 thermal analyzer in an air atmosphere using an alumina sample pan and the corresponding empty pan for reference. Sample mass: ~3 mg; heating rate: 20 °C/min. The thermal stability of the samples was determined by SWI (Stepwise Isothermal) mode. TA curves of selected samples were also produced in a nitrogen atmosphere.

3. Results and discussion

3.1. Characterization of CRS and GRS

The size of the rubber seed shell particles that passed through a 250 µm sieve was about 238 µm and they were labeled crude rubber seed shell (CRS). Table 2 shows the sizes of the particles after milling at 300 rpm and 600 rpm for 20, 40 and 60 min. The particle size was much smaller at the higher rotation speed. At the lower rotation speed, the particle size decreased with increased milling time. Conversely, at the higher rotation speed, the reduction in average particle size was significant only at the milling time of 40 min. Raja et al. (2013) reported

Table 1
Composition of rubber seed shell (dry basis).

Composition	Percentage (%)
Cellulose	43.04
Hemicellulose	25.02
Holocellulose	68.06
Acid-insoluble lignin	18.35

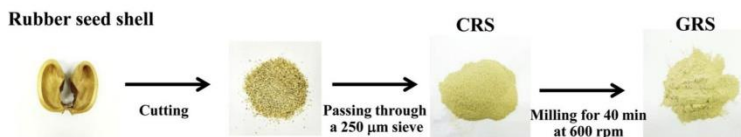


Fig. 1. The steps of preparation of the rubber seed shell powder.

Table 2

The particle size of rubber seed shell after milling at 300 rpm and 600 rpm for 20, 40 and 60 min.

Milling time (min)	Rotational speed (rpm)	
	300	600
20	181.60 μm	74.37 μm
40	123.30 μm	51.57 μm
60	92.97 μm	54.13 μm

that the degree of particle size reduction during planetary ball milling correlates with the frictional and impact forces, which release dynamic energies. These forces depended on the difference in speed between the balls and the grinding jars. Ming-Guo et al. (2010) reported that agglomerations were detrimental to the production of small size materials because the particles could not be ground to a finer size. In the case of rubber seed shell, particle aggregation due to high surface energy started when the particles were smaller than 50 μm . This size was

achieved after 40 min of milling time. Therefore, the best milling condition was 600 rpm for 40 min because this condition produced the smallest average particle size of about 52 μm before agglomeration occurred.

SEM micrographs, show that small rubber seed shell particles were successfully prepared using the planetary ball mill. The CRS contained rod-like fibrils (Fig. 2(a)). Significant morphological differences can be seen in the SEM images of GRS obtained by milling at 600 rpm for 40 min. The GRS particles are flatter and smaller (Fig. 2(b)). In the particle size distribution curves (Fig. 2(c) and (d)), both CRS and GRS present only one peak but the particle size distribution curve of CRS is extremely broad, whereas the particle size distribution curve of GRS is narrow and shifted to the left (towards smaller particle size).

Many articles reported the effect of rotational speed, ball diameter, ball to powder ratio and process time on the morphology, particle size and crystalline structure of materials subjected to planetary ball milling (Genzhong et al., 2009; Raja et al., 2013; Clemens et al., 2014; Matej, 2018; Sundum et al., 2018). However, to our knowledge few data are available that establish the dependence of color parameters and

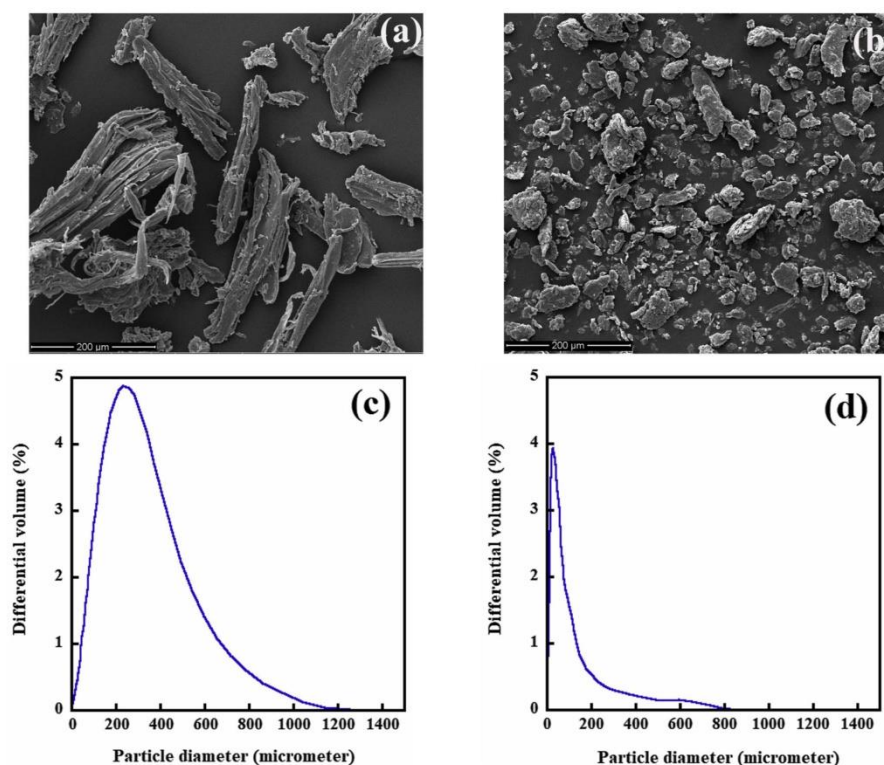


Fig. 2. SEM micrographs of crude rubber seed shell (CRS) (a) and rubber seed shell after milling at 600 rpm for 40 min (GRS) (b) and the particle size distribution curves of CRS (c) and GRS (d).

Table 3
The color parameters, whiteness values and BET surface areas of CRS and GRS.

Samples	Color parameters			Whiteness	BET surface area (m ² /g)
	L*	a*	b*		
CRS	74.14 ± 0.33	2.36 ± 0.12	17.27 ± 0.36	68.81	0.87 ± 0.004
GRS	70.70 ± 0.05	3.32 ± 0.02	19.27 ± 0.00	64.77	1.14 ± 0.005

The color of each sample was determined using a color spectrophotometer (HunterLab-001 UltraScanpro, HunterLab, USA) in reflectance mode. The color parameters ranged from L* = 0 (black) to L* = 100 (white), -a* (green) to +a* (red) and -b* (blue) to +b* (yellow). The reported values are averages of three repeated measurements.

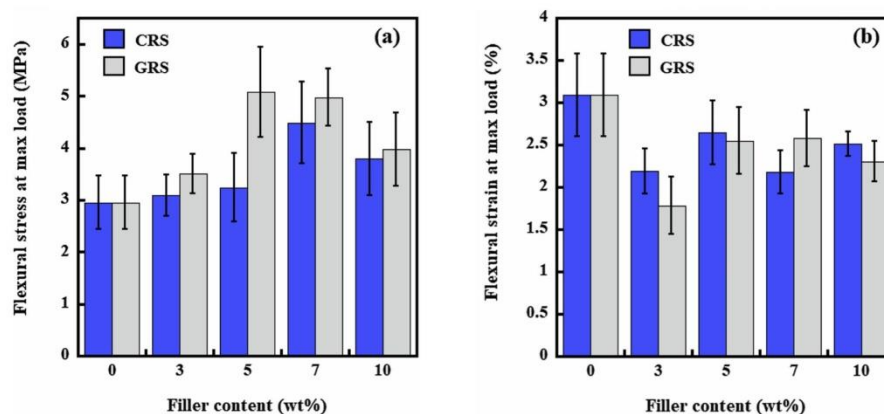


Fig. 3. Flexural stress at maximum load (a) and flexural strain (extension) at maximum load (b) of neat starch foam and starch foam composites with CRS and GRS.

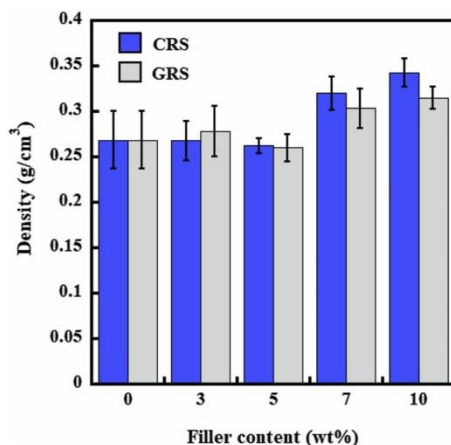


Fig. 4. Density of neat starch foam and starch foam composites with CRS and GRS.

whiteness values on the particle size of materials. The color parameters, whiteness values and BET surface areas of the rubber seed shell were obtained before (CRS) and after milling at 600 rpm for 40 min (GRS). Measurements were made three times and are presented in Table 3. The a* value (redness) and b* value (yellowness) of crude rubber seed shell increased, whereas L* (lightness) and whiteness of the rubber seed shell decreased with decreasing particle size. This indicates that the darkness, redness and yellowness of the crude rubber seed shell particles

increased after the milling process. These color parameters and whiteness values were in agreement with Ramachandraiah and Chin (2016), who investigated the effect of ball milling time on the physico-chemical properties of persimmon seeds. Variations in color values of smaller particles could be due to the increased release of colored pigments after exposure to heat during ball milling. Tepić et al. (2010) and Gueli et al. (2016) found that changes in particle size after grinding influenced color values. Therefore, the changes in the color parameters and whiteness values of the rubber seed shell particles could be attributed to exposure to heat during ball milling and the reduction in the average size of the rubber seed shell particles.

3.2. Effect of CRS and GRS content on the properties of starch foam

The flexural stress at maximum load of the neat starch foam was 2.95 MPa (Fig. 3(a)). For starch foam composites with 3 and 5 wt% of CRS, the flexural stress at maximum load was 3.10 and 3.24 MPa, respectively. At 7 wt% of CRS, the flexural stress at maximum load significantly increased to 4.48 MPa. However, at 10 wt% of CRS filler, the flexural stress decreased to 3.80 MPa. In contrast, the starch foam composite with GRS filler showed the highest flexural stress at a loading of 5 wt% (5.07 MPa). Above 5 wt% of GRS filler, the flexural stress slightly decreased but was still higher than for any of the starch foam composites containing CRS filler. The inclusion of 3–7 wt% of both fillers reinforced the starch matrix and increased the flexural strength of the starch foam. At loadings of filler content over 7 wt%, the flexural strength of the foams decreased because agglomerations of filler particles in the starch matrix hindered the transfer of stress. The difference in flexural stress at maximum load between the GRS- and CRS-filled composites at the same loadings was due to the smaller particle size and consequent greater surface area of GRS (Table 3). The results are consistent with those of Genzhong et al. (2009), who reported that a large

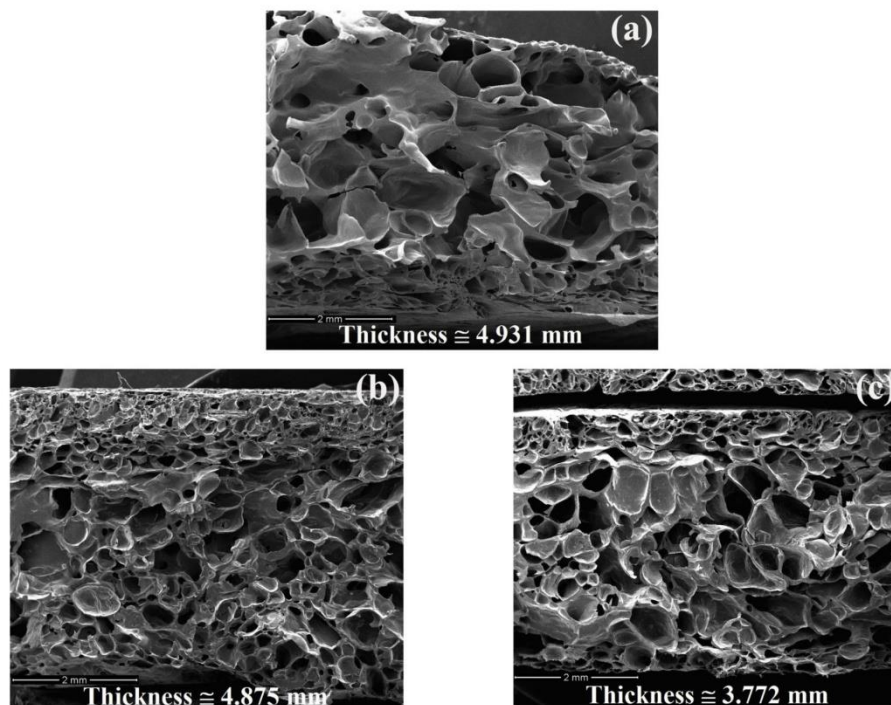


Fig. 5. SEM micrographs of neat starch foam (a) and starch foam composites with 10 wt% of CRS (b) and GRS (c).

Table 4

The color parameters and whiteness values of neat starch foam and starch foam with the addition of CRS and GRS.

Samples	Color parameters			Whiteness
	L*	a*	b*	
Starch foam (Control sample)	82.90 ± 1.58	1.30 ± 0.12	9.56 ± 0.58	80.37
Starch foam with CRS (wt%)				
5	71.56 ± 0.74	1.74 ± 0.14	12.42 ± 0.79	68.92
10	72.36 ± 1.75	2.09 ± 0.25	15.18 ± 1.09	68.04
Starch foam with GRS (wt%)				
5	72.00 ± 3.60	2.35 ± 0.23	18.19 ± 1.55	66.53
10	68.72 ± 0.97	2.75 ± 0.29	18.32 ± 1.77	63.65

The color of each sample was determined using a color spectrophotometer (HunterLab-001 UltraScanpro, HunterLab, USA) in reflectance mode. The color parameters ranged from L* = 0 (black) to L* = 100 (white), -a* (green) to +a* (red) and -b* (blue) to +b* (yellow). The reported values are averages of three repeated measurements.

BET value improves the interaction between the filler particles and the polymer matrix. Jeevan, and Jong-Whan, (2014) and Kaimeng et al. (2016) reported that smaller filler particles reinforced polymers more effectively than larger filler particles. The starch foam composite with 5 wt% GRS filler showed higher flexural stress at maximum load than starch foam composites with corn husk, soy protein and palm oil fillers (Nattapon, Orapin, & Natta, 2014; Chiarathanakrit et al., 2018a, 2018b). Moreover, the flexural properties of starch foam composite

with both GRS and CRS fillers were better than commercial clamshell-type containers made of expanded polystyrene (EPS) (Glenn et al., 2001).

The flexural strain (extension) at maximum load of the starch foam significantly decreased with the addition of both CRS and GRS (Fig. 3(b)). The reduction in the flexibility of the starch foam composites was due to the restricted mobility of the starch chains caused by the increased stiffness of the starch foam composites. This behavior has been observed in many composites (Anne and Jean, 2011; Bruno et al., 2018; Chiarathanakrit et al., 2018a, 2018b).

The density of starch foams is an important property that affects their applicability. The density of the present neat starch foam was 0.2683 g/cm³. Generally, the addition of fillers (e.g. kaolin, cocopeat and kraft fibers) increases the density of starch foams, since fillers reduce the swelling and expansion of the starch batter (Kaewta et al., 2013; Nattapon, Orapin, & Natta, 2014; Titi et al., 2015). For example, the density of starch foam increased from 0.214 g/cm³ to 0.295 g/cm³ after the addition of 5 wt% of flax fibers (Soykeabkaew et al., 2004). The density of the present starch foam composites was also dependent on the content of CRS and GRS filler (Fig. 4) but, interestingly, no changes were observed in the density of the starch foams with the addition of 3 and 5 wt% of either CRS or GRS. On the other hand, the density of the starch foams significantly increased when the filler contents were higher than 7 wt%; which is in agreement with results reported by other authors (Soykeabkaew et al., 2004; Pablo et al., 2008; Nattapon, Orapin, & Natta, 2014).

The increase in density at higher filler contents is illustrated by the SEM micrographs presented in Fig. 5, and can be explained by the fact that the starch batter was more viscous at higher fiber loadings (Fig. S2 in Supporting Information). The greater viscosity prevented expansion

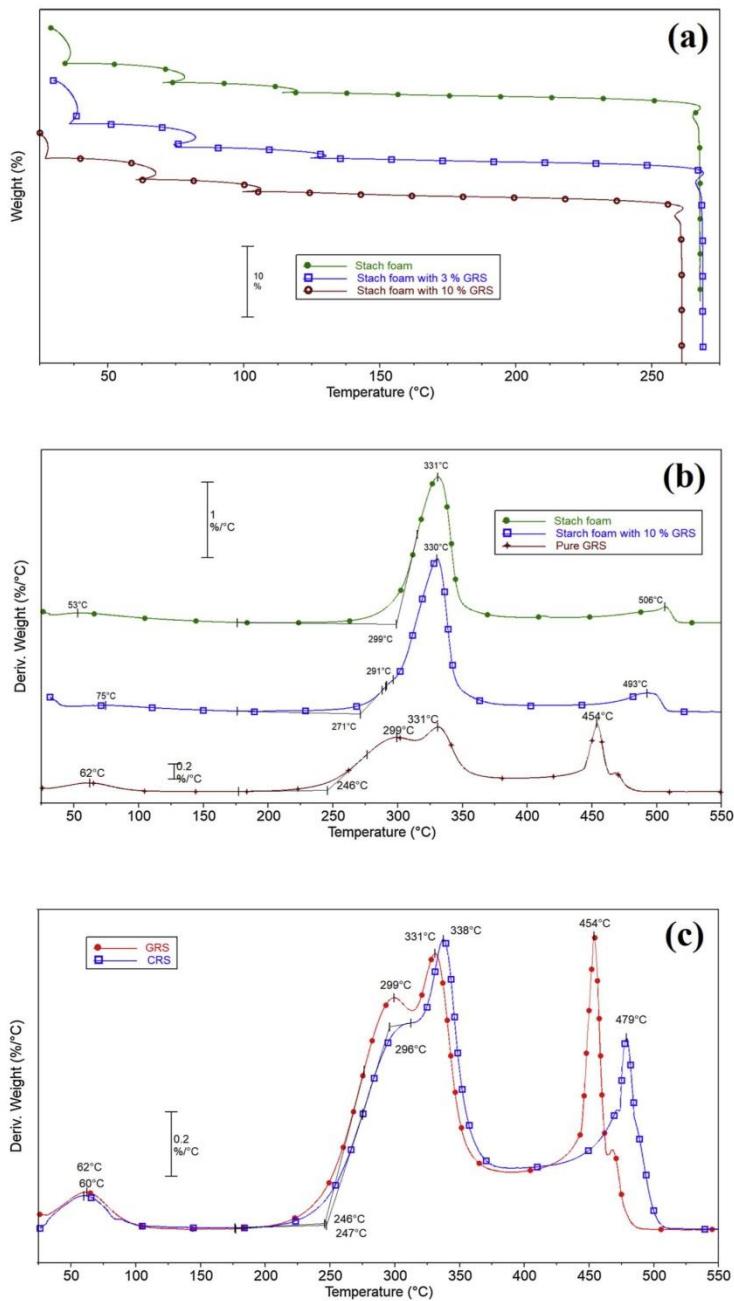


Fig. 6. SWI curves of the starch foam (Control sample) (●) and starch foam composites with 3 wt% (□) and 10 wt% of GRS (○) (a), DTG curves of starch foam (Control sample) (●), pure GRS (+) and starch foam composites with 10 wt% of GRS (□) (b) and DTG curves of the crude rubber seed (CRS) (□) and the smallest size of rubber seed shell particle (GRS) (●) (c).

of the foam.

The morphological features of starch foam and starch foam composites with 10 wt% of CRS and GRS were observed using SEM. The expanded starch structure and the varied sizes of the cells of the neat starch foam can be seen in Fig. 5(a). The incorporation of both CRS and GRS had a substantial effect on the morphology of the starch foam. As seen in Fig. 5(b), the starch foam composite filled with 10 wt% of CRS exhibited a denser structure and smaller cell size than the starch foam composite filled with GRS at 10 wt% (Fig. 5(c)). These results are in accordance with the density values of the starch foam and the composites (Fig. 4). Additionally, the cells of the starch foam composites with 10 wt% of GRS had a narrower size distribution and thicker walls compared to the starch composites containing CRS at 10 wt%. The greater viscosity of the starch batter with CRS could inhibit expansion of the starch during foam formation and the bubble size of starch foams after baking also depended on the viscosity of the starch batter (Marco et al., 2015).

The color parameters and whiteness values of the neat starch foam and starch foam composites with 5 and 10 wt% of CRS and GRS are presented in Table 4. Neat starch foam was lightest ($L^* = 82.90$) and whitest (80.37), whereas the redness value ($a^* = 1.30$) and yellowness value ($b^* = 9.56$) were the lowest of all the samples. The addition of both CRS and GRS significantly decreased lightness and whiteness but increased the redness and yellowness of the starch foam, more so in composites with GRS filler. The differences in the color parameters and whiteness values between the starch foam and the starch foam with CRS and GRS may be due to the characteristics of the fillers, such as particle size and natural color, that might affect light reflectance of the starch foam (Ana et al., 2013; Lea, and Suzana, 2014; Chiarathanakrit et al., 2018a,b).

The applicability of new materials strongly depends on their thermal stability. In addition, the decomposition mechanism offers valuable data from the point of view of environmental protection. The thermal stability of starch composites usually depends on the type of starch used (Kaehta et al., 2014) and the amount of filler added (Sundum et al., 2018). The SWI curves of the neat starch foam and composites with 3 wt% and 10 wt% of GRS (Fig. 6 a) show that thermal stability slightly decreased (from 269 °C in starch foam to 261 °C in composite with 10% of GRS) with increasing filler content. The similar water content (ca. 10%) and the similar course of the curves show that the mechanism of water evaporation did not depend on composition. This behavior indicates a similar porosity of the samples, too.

The high similarity of the decomposition patterns of neat starch foam and the composites, and consequently their structural similarity, is well presented by the DTG curves of neat starch foam, GRS, and the composite containing 10% of GRS (Fig. 6(b)). A slight difference is observed at the beginning of decomposition, as the GRS starts to decompose in two overlapped steps, whereas the decomposition of starch started practically with one broad step in the same temperature range (about 250 °C–350 °C). In the composite, the presence of the filler can be seen in the form of a shoulder at 291 °C in the DTG curve.

The impact of filler size on the thermal decomposition of the rubber seed can also be ignored as shown in Fig. 6(c). As a consequence, the thermal properties of the composites are practically independent of the particle size of the filler. The thermal decomposition of all the samples in air was accomplished at about 550 °C without residue. The thermal stability of the samples is not affected by the atmosphere. At temperatures higher than 400 °C, the exothermic decomposition was less intense in nitrogen.

4. Conclusions

This work is an initial insight into the preparation, using planetary ball milling, of a filler from rubber seed shell particles of a small size. The milling condition that produced the smallest average particle size (51.57 μm) was a milling speed of 600 rpm and a milling time of

40 min. The milling process significantly affected the BET surface area and light reflectance of the crude rubber seed shell filler. Analysis of the starch foam composites containing CRS and GRS fillers demonstrated that GRS improved mechanical properties of the starch foam more effectively than CRS. When using a filler of GRS in the starch foam composite, the maximum flexural stress at maximum load (5.07 MPa) was obtained at a loading of 5 wt%, whereas the starch foam composites with CRS showed maximum flexural stress at maximum load (4.48 MPa) when the CRS content was 7 wt%. Finally, the starch foam composites filled with GRS had a lower density and exhibited a narrower cell size distribution than the starch foam composites filled with CRS. Due to the similarity of the structural characteristics of the starch matrix and the rubber seed shell particles, the thermal stability of the materials was practically independent of the composition.

Acknowledgments

The authors would like to thank Faculty of Science (Research Assistantship; 1-2560-02-006) and Prince of Songkla University for their financial support. We thank Siam Modified Starch Co., Ltd. for the native cassava starch. Thanks also to Mr. Thomas Duncan Coyne for assistance with the English text.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary material related to this article can be found, in the online version, at doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.035>.

References

- Abbas, G., Taghi, T., Alireza, A., Alireza, S., Mahdi, M., 2018. Thermoplastic starch foamed composites reinforced with cellulose nanofibers; thermal and mechanical properties. *Carbohydr. Polym.* 197, 305–311.
- Abinader, G., Catherine, L., Erre, D., 2018. Effect of formulation and process on the extrudability of starch-based foam cushions. *Ind. Crop. Prod.* 115, 306–314.
- Ana, E.S.V., Andre, L.M.O., Maria, I.R., Carmen, M.O.M., Fabio, Y., Suzana, M., 2013. Physical properties, photo- and bio-degradation of baked foams based on cassava starch, sugarcane bagasse fibers and montmorillonite. *J. Polym. Environ.* 21, 266–274.
- Anne, B., Jean, C.B., 2011. Natural fibre-reinforced biofoams. *Int. J. Polym. Sci.* 1–14.
- Bruno, F.B., Luana, M.D.L., Ruth, M.C.S., 2018. Effect of poly(lactic acid) coating on mechanical and physical properties of thermoplastic starch foams from potato starch. *Prog. Org. Coat.* 118, 91–96.
- Chiarathanakrit, C., Mayakun, J., Prathep, A., Kaehtatip, K., 2018a. Comparison of the effects of calcified green macroalgae (*Halimeda macroloba* Decaisne) and commercial CaCO₃ on the properties of composite starch foam trays. *Int. J. Biol. Macromol.* 121, 71–76.
- Chiarathanakrit, C., Riyajan, S., Kaehtatip, K., 2018b. Transforming fish scale waste into an efficient filler for starch foam. *Carbohydr. Polym.* 188, 48–53.
- Chunxiao, G., Jing, H., Chen, F., Guanghui, W., Lope, T., Decheng, W., 2016. Effects and mechanism of ball milling on Torre fraction of pine sawdust. *Bioresour. Technol.* 214, 242–247.
- Clemens, W., Alexander, P., Michael, K., Horst, H., Maximilian, F., 2014. Production of nanocrystalline lithium fluoride by planetary ball-milling. *Powder Technol.* 264, 409–417.
- Genzhong, J., Hongqi, Z., Chenze, Q., Minfeng, Z., 2009. Mechanism of interactions of eggshell microparticles with epoxy resins. *Polym. Eng. Sci.* 49, 1383–1388.
- Glenn, M., Orts, T., Nobes, R., 2001. Starch, fiber and CaCO₃ effects on the physical properties of foams made by a baking process. *Ind. Crop. Prod.* 14, 201–212.
- Guelli, A., Bonfiglio, G., Pasquale, S., Troja, S., 2016. Effect of particle size on pigments colour. *Color Res. Appl.* 42, 236–243.
- Jeevan, P.R., Jong-Whan, R., 2014. Characterization of bionanocomposite films prepared with agar and paper-mulberry pulp nanocellulose. *Carbohydr. Polym.* 110, 480–488.
- Kaehta, K., Varaporn, T., Wilaiwan, P., 2013. Preparation and characterization of kaolin/starch foam. *Appl. Clay Sci.* 80–81, 413–416.
- Kaehta, K., Pongroj, M., Hollo, B., Szecsenyi, M., 2014. Effects of starch types on the properties of baked starch foams. *J. Therm. Anal. Calorim.* 115, 833–840.
- Kaimeng, X., Dengyun, T., Taian, C., Tuhua, Z., Jie, L., 2016. Effects of environmental-friendly modified rubber seed shell on the comprehensive properties of high density polyethylene/rubber seed shell composites. *Ind. Crop. Prod.* 91, 132–141.
- Kang, S., Jian, C.J., 2010. Preparation and characterization of activated carbon from rubber-seed shell by physical activation with steam. *Biomass Bioenergy* 34, 539–544.
- Laura, G.C., Duclerc, F.P., Patricia, P., Ademar, B.L., Pedro, M.B., 2006. Influence of fibers on the mechanical properties of cassava starch foams. *J. Polym. Environ.* 14, 179–183.
- Lea, R.P.F.M., Suzana, M., 2014. Use of malt bagasse to produce biodegradable baked

- foams made from cassava starch. *Ind. Crop. Prod.* 55, 187–193.
- Machado, M., Benelli, P., Tessaro, C., 2017. Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use. *Ind. Crop. Prod.* 102, 115–121.
- Marco, B., Rebecca, G., Annika, K., Mats, S., 2015. Effect of viscoelasticity on foam development in zein starch dough. *LWT - Food Sci. Technol.* 63, 1229–1235.
- Matej, B., 2018. Ball milling of eggshell waste as a green and sustainable approach: a review. *Adv. Colloid Interface Sci.* 256, 256–275.
- Ming-Guo, L., Chang-Jung, S., Sue-Huai, G., Chia-Jung, C., 2010. Effects of wet ball milling on lead stabilization and particle size variation in municipal solid waste incinerator fly ash. *J. Hazard. Mater.* 174, 586–591.
- Mohamad, D.S., Mohd, S., Hanafi, I., 2014. Properties of rubber seed shell flour-filled polypropylene composites: the effect of poly (ethylene-co-Acrylic Acid). *Bioresources* 9, 7311–7325.
- Muthusamy, K., Nordin, N., Vesuvapateran, G., Ali, M., Mohd Annual, N.A., Harun, H., Ullap, H., 2014. Exploratory study of rubber seed shell as partial coarse aggregate replacement in concrete. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* 7, 1013–1016.
- Nattapon, K., Orapin, K., Natta, L., 2014. Characterization of cassava starch based foam blended with plant proteins, kraft fiber, and palm oil. *Carbohydr. Polym.* 110, 70–77.
- Pablo, R.S., Vivian, C.S., Sara, E.M.O., Adriana, N.M., Joao, B.L., 2008. Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process. *J. Food Eng.* 85, 435–443.
- Pagketanang, T., Artnaseaw, A., Wongwicha, P., Thabuot, M., 2015. Microporous activated carbon from KOH-activation of rubber seed-shells for application in capacitor electrode. *Energy Procedia* 79, 651–656.
- Pornsukomboon, K., Holló, B., Szécsényi, K., Kaewtatip, K., 2016. Properties of baked foams from citric acid modified cassava starch and native cassava starch blends. *Carbohydr. Polym.* 136, 107–112.
- Raja, S.R., Manisekar, K., Manikandan, V., 2013. Effect of fly ash filler size on mechanical properties of polymer matrix composites. *Int. J. Mining. Metal. Mech. Eng.* 1, 34–37.
- Ramachandriah, K., Chin, K., 2016. Evaluation of ball-milling time on the physico-chemical and antioxidant properties of persimmon by-products powder. *Inno. Food. Sci. Emerg.* 37, 115–124.
- Saetun, V., Chiachun, C., Riyajan, S., Kaewtatip, K., 2017. Green composites based on thermoplastic starch and rubber wood sawdust. *Polym. Compos.* 38, 1063–1069.
- Sanhawong, W., Banhalee, P., Boonsang, S., Kaewpirom, S., 2017. Effect of concentrated natural rubber latex on the properties and degradation behavior of cotton-fiber-reinforced cassava starch biofoam. *Ind. Crop. Prod.* 108, 756–766.
- Soykeabkaew, N., Supaphol, P., Rujiravanit, R., 2004. Preparation and characterization of jute- and flax-reinforced starch-based composite foams. *Carbohydr. Polym.* 58, 53–63.
- Suleyman, P., Mustafa-Kemal, U., Ahmet, A., Muharrem, C., 2013. The effects of the addition of corn husk fibre, kaolin and beeswax on cross-linked corn starch foam. *J. Food Eng.* 116, 267–276.
- Sundum, T., Szécsényi, K., Kaewtatip, K., 2018. Preparation and characterization of thermoplastic starch composites with fly ash modified by planetary ball milling. *Carbohydr. Polym.* 191, 198–204.
- Tepić, A., Šumić, Z., Vukan, M., 2010. Influence of particle diameter on the colour of ground papper (*Capsicum annum L.*). *Acta. Period Technol.* 41, 87–93.
- Titi, C.S., Hemas, I., Khaswar, S., 2015. Effect of cocopeat addition to some properties of cassava starch-based foam. *Macromol. Symp.* 353, 133–138.
- Updegraff, D.M., 1969. Semimicro determination of cellulose in biological materials. *Anal. Biochem.* 32, 420–424.
- Wise, L.E., Murphy, M., D'Adieco, A., 1946. Chlorite holocellulose, its fractionation and beating on summative wood analysis and on studies on the hemicellulose. *Paper Trade J.* 122, 35–43.
- Yoshinobu, F., Hiroshi, T., Kaori, J., Masahito, M., Hiroyuki, T., Hideki, I., Lawrence, H.B., 1998. Dry grinding of chitosan powder by a planetary ball mill. *Adv. Powder Technol.* 9, 281–292.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายชุกारी ชายเร๊ะ

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5910220101

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2558

ทุนการศึกษา

- ทุนอุดหนุนการศึกษา เป็นผู้ช่วยวิจัย (Research Assistant) ปีการศึกษา 2560 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ 1-2560-02-006
- ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายเพื่อไปเสนอผลงานวิชาการ ประจำปีงบประมาณ 2561
- ทุนอุดหนุนการวิจัยวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2560 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ชุกारी ชายเร๊ะ, แก้วตา แก้วตาทิพย์. (2561). อิทธิพลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของโฟมแป้ง. การประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 2. ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2561, ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเพรส โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่. เมืองเชียงใหม่, เชียงใหม่, ประเทศไทย. หน้า 552-559.

Sukaree Chaireh, Kaewta Kaewtatip. (2018). **Effect of water hyacinth on the mechanical, morphological and physical properties of baked starch foams.** International Conference on Environment and Bio-Engineering 4th (ICEBE 2018). January 18th-20th 2018, Meiji University, Tokyo, Japan. P.44.

Sukaree Chaireh, Katalin Mészáros Szécsényi, Phetdaphat Boonsuk, Kaewta Kaewtatip. (2019). **Preparation of rubber seed shell powder by planetary ball mill and their influence on the properties of starch foam.** *Industrial Crops & Products*, 135, 130-137.