



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงสมบัติและการย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมชีวภาพ
จากแป้งมันสำปะหลังด้วยน้ำยางพารา

Improvement in properties and biodegradability
of cassava starch biofoam using natural rubber latex

รองศาสตราจารย์ ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริเดช บุญแสง

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินทุนอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๑

มหาวิทยาลัยบูรพา

สัญญาเลขที่ ๑๙๐/๒๕๖๑

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงสมบัติและการย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมชีวภาพ
จากแป้งมันสำปะหลังด้วยน้ำยางพารา

Improvement in properties and biodegradability
of cassava starch biofoam using natural rubber latex

รองศาสตราจารย์ ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริเดช บุญแสง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง

พฤศจิกายน ๒๕๖๑

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๑ มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ

เลขที่สัญญา ๑๙๐/๒๕๖๑

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้รายงานผลของปริมาณน้ำยางพาราต่อสัณฐานวิทยา สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และพฤติกรรมการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์โฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่ขึ้นรูปโดยวิธีเทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง โดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบอัด สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟมแป้งที่คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 220 °C ความดัน 1000 atm และเวลา 4.30 นาที ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 3.19×10^{-3} – 4.27×10^{-3} g/cm³ และมีความหนาอยู่ระหว่าง 3.25–3.45 mm โดยโฟมที่มีปริมาณน้ำยางพารามากกว่าจะมีความหนาแน่นสูงกว่า และความหนาน้อยกว่าโฟมที่ใส่น้ำยางพาราน้อยกว่า การศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าสาส์เป็นสารเสริมแรงที่มีการกระจายตัวในเนื้อโฟมอย่างสม่ำเสมอ และโฟมมีรูพรุนขนาดเล็กที่ขอบและรูพรุนขนาดใหญ่ภายใน การเติมน้ำยางพาราทำให้สัดส่วนของรูพรุนขนาดเล็กมีน้อยลง แต่รูพรุนขนาดใหญ่มีสัดส่วนมากขึ้น และขนาดรูพรุนเล็กลงและมีผนังหนาขึ้นเมื่อเติมน้ำยางพาราในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยสารเติมแต่งที่เติมในสูตรไม่ทำปฏิกิริยาเคมีต่อกัน การเพิ่มปริมาณน้ำยางพาราทำให้การบวมน้ำและการดูดซับความชื้นของโฟมลดน้อยลง จึงนับว่าน้ำยางพารามีผลช่วยให้โฟมคงรูปร่างได้ดีขึ้น การเติมสาส์มีผลให้ค่าโมดูลัสแรงดัดของโฟมเพิ่มขึ้น และการเติมน้ำยางพาราปริมาณเล็กน้อยทำให้ค่าโมดูลัสแรงดัดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเติมน้ำยางพาราในปริมาณมากขึ้น (มากกว่า 2.5 mL) ค่าโมดูลัสแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของน้ำยางพาราที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางของโมเลกุลเป็นร่างแหโดยปฏิกิริยาคอวาลีนเซชันของน้ำยางพาราเกิดมากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับความเครียด ณ จุดขาด ของโฟมที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อมีการเติมน้ำยางพาราเล็กน้อย แต่กลับพบว่าม็ค่าลดลงอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางพารามากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ายางธรรมชาติช่วยปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำของโฟมแป้ง ทำให้การย่อยสลายของแป้งโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสเกิดได้ช้าลงเมื่อเทียบกับโฟมแป้งที่ไม่เติมน้ำยางธรรมชาติ

Abstarct

This study reported the effects of natural rubber latex (NRL) content on morphologies, chemical, physical and mechanical properties as well as biodegradation behavior of cassava starch biofoam. The processing was performed by thermal reforming technique using conventional compression molding machine. The optimum processing conditions were 220°C, 1000 atm, and 4.30-min processing time. The foam's density and the foam's thickness are in the range $3.19 \times 10^{-3} - 4.27 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, and 3.25–3.45 mm, respectively. The higher the NRL content, the higher the foam's density and the lower the foam's thickness is. The morphological study revealed that cotton fibers, the reinforcing agent, homogeneously dispersed in the starch matrix. The foam exhibited small, dense closed cells at the exterior and large, expanded open cells in the interior. With the addition of NRL, the fraction of small closed cells decreased, while that of the large open cells increased. Moreover, as the NRL content increased, the size of the small closed cells reduced with enlarged thickness of their cell walls. The chemical structure analysis confirmed that no chemical reactions took place among all the additives used. It was also found that the improved dimensional stability of the foam was obtained by the addition of natural rubber latex. As the content of NRL increased, both the water and moisture adsorption lessened. The bending modulus of the foam was developed by the addition of cotton fiber. However, by adding a small content of NRL, the bending modulus significantly dropped. Besides, further increase in bending modulus was achieved progressively with increasing NRL content, owing to the molecular crosslinking of rubber molecules via vulcanization. The elongation at break of the foam increased significantly with the addition of NRL. However, it was found to reduce significantly when NRL content increased. Furthermore, NRL improved the hydrophobicity of the foam, thus the biodegradation of the foam via hydrolysis process was delayed by the addition of NRL.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.3 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แป้ง	4
2.2 แป้งมันสำปะหลัง	7
2.3 สารเติมแต่ง	8
2.4 เครื่องมือ	12
2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 การทดลอง	18
3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์	18
3.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟม	19
3.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของโฟม	22
3.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา	23
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี	23
3.6 การศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	24
4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟม	25
4.2 การยืนยันโครงสร้างด้วยเทคนิค FT-IR	29
4.3 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นโฟม	30
4.4 ศึกษาคุณสมบัติของของเหลวบนผิวโฟม	37
4.5 สมบัติเชิงกลของโฟม	37
4.6 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	41
เอกสารอ้างอิง	43
ผลผลิต	49
รายงานสรุปการเงิน	50
ประวัตินักวิจัยและคณะ	51

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความแตกต่างของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน	5
2.2 มุมสัมผัสและปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง	15
3.1 ชื่อตัวอย่างโพลีเมอร์และปริมาณของส่วนผสม	21
3.2 ปริมาณของส่วนผสมในการขึ้นรูปโพลีเมอร์	21

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของอะไมโลส	4
2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน	5
2.3 การเกิดเจลลาตินไนซ์	6
2.4 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน	7
2.5 ตัวอย่างภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยฝ้าย	11
2.6 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FT-IR Spectroscopy	12
2.7 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	13
2.8 ลักษณะการทดสอบการตัดงอแบบ 3 จุด	14
2.9 เครื่องอัดแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดขึ้นงานทรงแบน	14
2.10 ความแตกต่างของของเหลวบนพื้นผิว S	15
3.1 การขึ้นรูปโฟม	20
3.2 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน	24
3.3 การวางขึ้นงานเพื่อการทดสอบ	24
4.1 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลแสดงลักษณะของโฟมที่ไม่เต็มยางพาราที่ขึ้นรูปแล้วด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด	25
4.2 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของโฟมที่กำลังขยาย 1000 และภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 17 เท่า	26
4.3 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลแสดงลักษณะของโฟมสูตรเต็มยางพาราที่ขึ้นรูปแล้วด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด	27
4.4 การกระจายตัวของสำลีและน้ำยางพาราในภาคตัดขวางของเนื้อโฟม	27
4.5 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของโฟม	29
4.7 ความหนาของโฟมสูตรต่างๆ	30
4.8 ความหนาแน่นของโฟมสูตรต่างๆ	31
4.9 การบวมและดูดซับน้ำของตัวอย่างโฟมในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง	33
4.10 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100%	34
4.11 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมชนิดเดียวกันที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100%	36
4.12 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ และหยดน้ำมันของตัวอย่างโฟม	37
4.13 ค่ามอดูลัสแรงดัด และระยะยืด ณ จุดขาด ของตัวอย่างโฟม	38
4.14 การย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมที่มีส่วนประกอบคือ Cs-C6-7.5L	40

บทที่ 1

บทนำ

ปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากขยะโฟมพอลิสไตรีนซึ่งเป็นพลาสติกที่ไม่ย่อยสลาย จัดเป็นปัญหาใหญ่ในโลกปัจจุบัน (Franz and Welle, 2003) การใช้โฟมจากวัสดุที่ย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ เช่น กระดาษชานอ้อย และแป้ง จึงได้รับความสนใจจากรัฐบาลไทยที่จะนำมาใช้แทนโฟมพอลิสไตรีน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรุงเทพมหานคร และเทศบาลเมืองแสนสุข จ. ชลบุรี ซึ่งถือเป็นหน่วยงานที่มีการรณรงค์ให้พลเมืองเลิกใช้โฟมพอลิสไตรีนเป็นลำดับต้นๆ ของประเทศ ในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศที่ปลูกมันสำปะหลังมากเป็นลำดับต้นๆ ของโลก จึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มพยายามพัฒนาผลิตภัณฑ์โฟมชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง เช่น การเพิ่มความแข็งแรง การเพิ่มความยืดหยุ่น และการลดการดูดซับน้ำ (Kraisangsri et al., 2012; Kraisangsri et al., 2009; Niwaspragit et al., 2016; Jaotatid et al., 2016; Soykeabkaew et al., 2004; Soykeabkaew et al., 2015) อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่านักวิจัยเหล่านี้จะประสบความสำเร็จในการเสริมความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์โฟมชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังได้ แต่ยังพบว่าผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้ยังดูดซับน้ำและความชื้นในปริมาณที่ค่อนข้างสูง และมีความยืดหยุ่นน้อยเมื่อเทียบกับโฟมพอลิสไตรีน และโฟมจากปิโตรเลียมชนิดอื่น

ในปัจจุบันประเทศไทยกำลังประสบปัญหาราคายางพาราตกต่ำ โดยข้อมูลจากการยางแห่งประเทศไทย (Rubber Authority of Thailand) เมื่อวันที่ 7 กันยายน 2559 ระบุราคาน้ำยางพารา (ณ หน้าโรงงาน) อยู่ที่ 48.50 บาท/กก. ลดลงจากราคาน้ำยางพารา (ณ หน้าโรงงาน) เมื่อเดือนมีนาคม 2555 (110.64 บาท/กก.) ถึงร้อยละ 56 (การยางแห่งประเทศไทย, 2559) สร้างความสูญเสียทางเศรษฐกิจให้กับประเทศไทยซึ่งเป็นผู้ส่งออกยางพาราอันดับต้นๆ ของโลก ส่งผลให้เกษตรกรประสบภาวะขาดทุนและกลายเป็นภาระให้กับรัฐบาล การนำน้ำยางพารามาประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์อื่น เช่น หมอนยางพารา หรือการนำยางพาราผสมในคอนกรีตเพื่อปูลาดถนน จึงเป็นวิธีแก้ปัญหายางพาราตกต่ำได้เป็นอย่างดี

ด้วยสมบัติที่โดดเด่นของยางพารา คือความยืดหยุ่นสูง และยังสามารถย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพได้ จึงมีความน่าสนใจอย่างยิ่งที่จะนำยางพารามาเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในผลิตภัณฑ์โฟมจากแป้งมันสำปะหลัง ประกอบกับจากการสืบค้นของทีมนักวิจัยนี้พบว่ายังไม่มีนักวิจัยกลุ่มใดในประเทศไทยเสนอผลงานเกี่ยวกับผลของน้ำยางพาราท่อสมบัติด้านความยืดหยุ่น และการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพของโฟมจากแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการปรับปรุงสมบัติการดูดซับความชื้น และความยืดหยุ่นของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังด้วยน้ำยางพารา

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ศึกษาผลของปริมาณน้ำยางพาราต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และพฤติกรรมการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์โฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่ขึ้นรูปโดยวิธีเทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง โดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบอัด

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขึ้นรูปลาดโฟมจากแป้งมันสำปะหลังโดยวิธีเทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง โดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบอัด มีน้ำเป็นตัวกลางและสารก่อโฟม ยืนยันโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟลูออไรด์อินฟราเรด (FTIR) ศึกษาผลของปริมาณน้ำยางพาราต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น มุมสัมผัสของน้ำและน้ำมัน การดูดซับน้ำและความชื้น เป็นต้น สมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal tensile tester และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) และสุดท้ายจะได้ศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังโดยวิธีการฝังดิน

1.3 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นโฟมแป้งได้ดีและโฟมแป้งที่พัฒนาได้ยังสามารถนำมาใช้งานได้จริงถึงแม้จะมีข้อจำกัดอยู่มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูดซับน้ำและความชื้นที่มากเกินไป และความยืดหยุ่นที่น้อยเกินไป ในปี พ.ศ. 2556 คณะผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการทดลองขึ้นรูปโฟมแป้งด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบเทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง (Niwaspragit et al., 2016; Jaotatid et al., 2016; กมลเนตร, 2556; ชไมพร, 2556; ฐิติพร 2556; ศิริรักษา, 2556) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำได้ง่าย โดยใช้เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบอัด ซึ่งเป็นเครื่องขึ้นรูปที่ใช้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียม โดยวิธีนี้ หลังจากได้รับความร้อนเม็ดแป้งที่ดูดซับน้ำเข้าไปเต็มที่จะพองตัวและเกิดเจลลาตินในเซชัน ในขณะที่น้ำซึ่งเป็นสารทำให้เกิดฟองระเหยออกจากเนื้อแป้ง จึงได้ผลิตภัณฑ์เป็นโฟมแป้งที่มีรูพรุนอยู่ด้านใน

การเพิ่มความแข็งแรงให้กับโฟมแป้งทำได้โดยการเติมสารตัวเติม เช่น เส้นใยฝ้ายและเส้นใยพอลิพรอพิลีน (Jaotatid et al., 2016) เส้นใยเซลลูโลส (Salgado et al., 2008) เส้นใยคราฟท์ (Kaisangsri et al., 2012) เส้นใยข้าวโพด (Cinelli et al., 2006) และดินเหนียว (Matsuda et al., 2013) เป็นต้น ส่วนการปรับปรุงความยืดหยุ่นนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่เลือกใช้กลีเซอรอล (Lourdin et al., 1997a; Lourdin et al., 1997b) แต่เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซอร์นั้นยังมีข้อจำกัดเรื่องปริมาณการใช้เนื่องจากหากใช้ในปริมาณที่มากเกินไป (เกินร้อยละ 12) (Lourdin et al., 1997b) จะมีผลทำให้ค่าความยืดหยุ่นของโฟมแป้งลดลงสำหรับสารตัวเติมอื่นที่มี

รายงานการใส่เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับโฟมแข็ง ได้แก่ ซอร์บิทอล (Lourdin et al., 1997b) และ กรดอะมิโน เป็นต้น

จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีนักวิจัยกลุ่มใดเสนอรายงานเกี่ยวกับผลของน้ำยางพาราต่อสมบัติด้านความยืดหยุ่น และการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพของโฟมจากแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการปรับปรุงสมบัติการดูดซับความชื้น และความยืดหยุ่นของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังด้วยน้ำยางพารา และเปรียบเทียบพฤติกรรมการย่อยสลายของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่เติมและไม่เติมน้ำยางพารา คณะวิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยที่ได้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่มีคุณภาพดี ใช้งานได้จริง และอาจมีศักยภาพมากพอที่จะผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ นอกจากนี้จะได้ศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมจากแป้งด้วยวิธีฝังดินซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการประเมินระยะเวลาในการย่อยสลายของโฟมหลังจากการใช้งานได้ ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังให้ดียิ่งขึ้น เหมาะกับการใช้งานมากขึ้น และใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น และอาจมีศักยภาพมากพอที่จะผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ โดยการผสมกับน้ำยางพาราซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มช่องทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางพาราได้อีกทางหนึ่งด้วย

การศึกษาจะเริ่มจากการขึ้นรูปโฟมแข็งด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบเทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง ศึกษาผลของปริมาณน้ำยางพาราต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสุดท้ายจะได้เปรียบเทียบพฤติกรรมการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์โฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่เติมและไม่เติมน้ำยางพารา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ด้านวิชาการ ผลิตผลงานวิจัย องค์ความรู้ นวัตกรรม และเทคโนโลยีจากงานวิจัยในรูปแบบสหวิทยาการ การตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารระดับชาติหรือนานาชาติ อย่างน้อย 1 เรื่อง

ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ ผลที่ได้จากการวิจัยนี้มีศักยภาพนำไปต่อยอดการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าเกษตร (มันสำปะหลังและยางพารา) ช่วยให้เกษตรกรมีช่องทางการจำหน่ายสินค้าเพิ่มขึ้น

ด้านสังคมและชุมชน การใช้โฟมจากแป้งจะช่วยลดปัญหามลภาวะเนื่องจากขยะพลาสติกได้

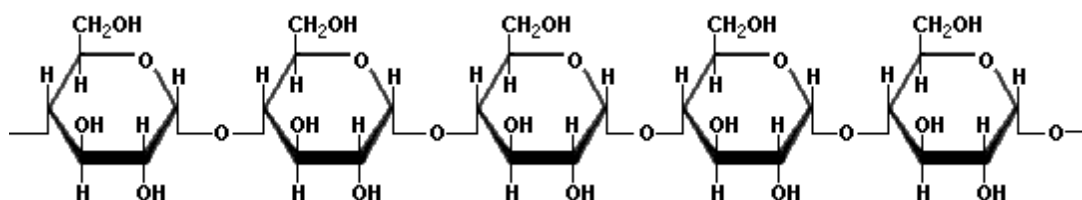
บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้ง

แป้ง (Starch) คือพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่พบในพืช เช่น เมล็ดธัญพืช และพืชหัว (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2543) มีน้ำตาลกลูโคส (Glucose) เป็นมอนอเมอร์ เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่ตำแหน่งแอลฟา-1,4 ได้เป็นโครงสร้างแบบอะไมโลส (Amylose) ส่วนที่เชื่อมต่อกันกันที่ตำแหน่ง แอลฟา-1,4 และ แอลฟา-1,6 ได้เป็นอะไมโลเพกทิน (Amylopectin) โดยเม็ดแป้ง (Starch granule) ของพืชแต่ละชนิดจะมีอะไมโลส และอะไมโลเพกทินอัดแน่นอยู่ และมีสัดส่วนที่แตกต่างกัน ทำให้มีสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน

อะไมโลส (Amylose) เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทโฮมโพลิแซ็กคาไรด์ (Homopolysaccharide) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในโมเลกุลของแป้ง (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2553) โดยแป้งจากพืชต่างชนิดกันจะมีปริมาณอะไมโลสต่างกัน โครงสร้างของอะไมโลสแสดงดังรูปที่ 2.1

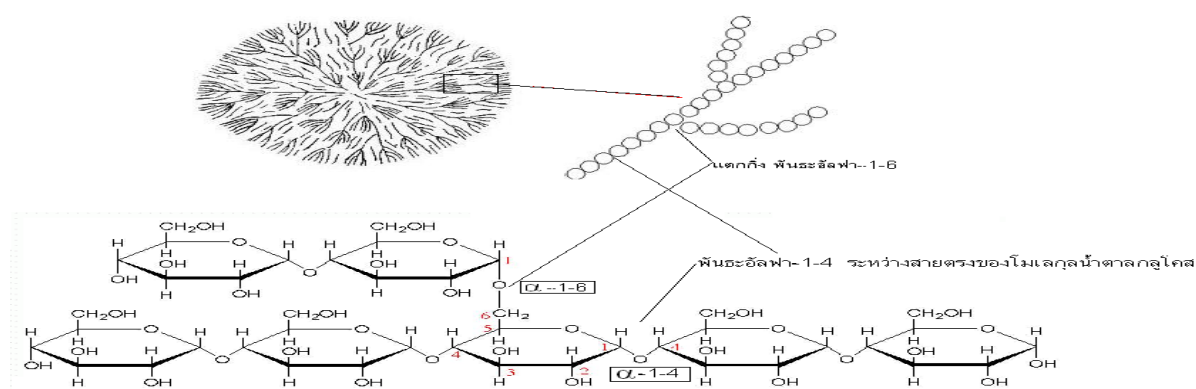


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2553)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงของน้ำตาลดี-กลูโคส (D-glucose) ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ ชนิดแอลฟา-1,4 ประมาณ 200–2,000 หน่วย มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 150,000–1,000,000 g/mol โดยขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลส ขึ้นกับระดับการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of Polymerization, DP) ของอะไมโลสที่แตกต่างกัน อะไมโลสในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000–6,000 จึงมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในแป้งข้าวโพดและข้าวสาลี ที่มี DP ของอะไมโลสอยู่

ในช่วง 200–1,200 แ่งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มของการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ต่ำลง

อะไมโลเพกทิน จัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ประเภทโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2553) ที่จัดเรียงตัวเป็นสายตรงและสายแขนงด้วยพันธะไกลโคไซด์สองแบบ คือส่วนที่เป็นพันธะสายตรงเป็นพันธะแอลฟา-1,4 เหมือนกับอะไมโลส และส่วนที่เป็นสายแขนงจะเชื่อมต่อด้วยพันธะแอลฟา-1,6



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2553)

ความแตกต่างระหว่างโมเลกุลของแป้งชนิดอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน แสดงดังตารางที่ 2.1

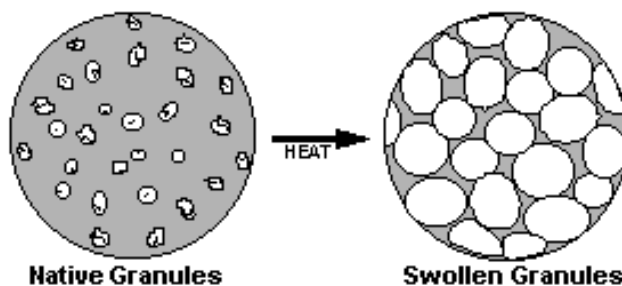
ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2553)

อะไมโลส	อะไมโลเพกทิน
กลูโคสต่อกันเป็นสายตรง	กลูโคสต่อกันเป็นสายตรง และแขนง
พันธะไกลโคไซด์แบบแอลฟา-1,4 อย่างเดียว	พันธะไกลโคไซด์แบบแอลฟา-1,4 และแอลฟา-1,6
ทำปฏิกิริยากับไอโอดีนให้สีน้ำเงิน	ทำปฏิกิริยากับไอโอดีนให้สีม่วงแดง
เมื่อต้มสุกมีลักษณะขาวขุ่น เป็นเจลที่แข็งแรง เกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ได้ง่าย	เมื่อต้มสุกมีลักษณะใสเหนียว เจลอ่อน เกิดรีโทรเกรเดชันได้ยาก
แป้งที่มีอะไมโลสสูง ได้แก่ ข้าวเจ้า ข้าวโพด	แป้งที่มีอะไมโลเพกทินสูง ได้แก่ ข้าวเหนียว ข้าวโพด

สมบัติสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานของแป้งมีดังนี้ (ดุขฎิ, 2558)

2.1.1 การพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility)

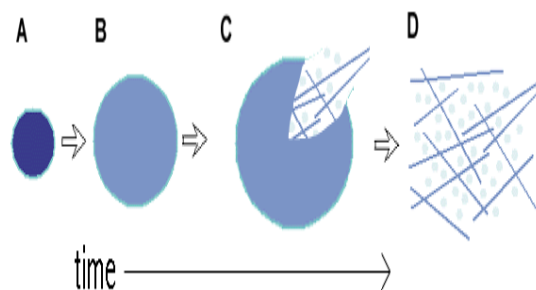
แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% ของน้ำหนักแป้ง และพองตัวน้อยมาก เนื่องจากภายในเม็ดแป้งมีส่วนที่เป็นผลึก (Crystallite) ซึ่งโมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ โมเลกุลของน้ำจึงแทรกตัวเข้ามาได้ยาก ทำให้แป้งไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนภายในเม็ดแป้งในส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งเป็นส่วนที่โมเลกุลของแป้งอยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก จึงเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 °C ขึ้นไป ส่วนอสัณฐานจับกับน้ำได้มากขึ้น และการจับกันของโมเลกุลในส่วนผลึกเริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลของน้ำจึงสามารถจับกับโมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันได้ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.3) โมเลกุลในส่วนอสัณฐานที่เหลืออยู่เกิดสภาพร่างแหไมเซล (Micelle network) ทำให้โมเลกุลของแป้งยังยึดเหนี่ยวกันไว้ได้ จึงยังคงสภาพเป็นเม็ดแป้งอยู่ได้ อย่างไรก็ตามในสภาวะนี้ อาจมีโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระสามารถกระจายตัวออกจากเม็ดแป้งได้ และเมื่อทำให้อุณหภูมิของน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วนอสัณฐานที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารถละลายมากขึ้น



รูปที่ 2.3 การพองตัวของเม็ดแป้ง (Carbohydrate technology, 2557)

2.1.2 การเกิดเจลาตินไนซ์ (Gelatinization)

ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1 ว่าในน้ำเย็น เม็ดแป้งสามารถดูดซึมน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัว หรือพองตัวได้น้อยมากและสังเกตได้ยาก ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) เมื่อนำแป้งที่เปียกน้ำเย็นไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนที่เป็นผลึกจับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75°C หรือใช้สารเคมี ทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วนอสัณฐานลดลง เกิดการดูดซึมน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งอย่างมากจนไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) ทำให้สารถละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น และกระบวนการนี้เรียกว่าการเกิดเจลาตินไนซ์เช่น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน (Carbohydrate technology, 2557)

2.1.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

รีโทรเกรเดชันในแป้งคือการรวมกัน (Reassociation) หรือการจับตัวกันเป็นผลึก (Recrystallization) อีกครั้งของโมเลกุลแป้ง หลังจากที่แป้งเกิดเจลลิตไนซ์แล้ว การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นกลไกที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์จากแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากผลึกแข็งที่เกิดจากการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบของอะไมโลส รวมทั้งมีความกรอบมากขึ้นในผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากแป้ง (Kong and Singh, 2016) การเกิดรีโทรเกรเดชันในอะไมโลสเกิดได้ง่ายกว่าในอะไมโลเพกทิน เนื่องจากอะไมโลสเป็นโมเลกุลสายตรงขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับอะไมโลเพกทิน ดังนั้นเม็ดแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสน้อยจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อยเช่นกัน

2.2 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีการผลิตมากที่สุดในประเทศไทย มีทั้งที่ผลิตเพื่อใช้ภายในประเทศและเพื่อการส่งออก แป้งมันสำปะหลังได้จากหัวมันสำปะหลัง มีสีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน (จรรยา, 2542) เมื่อทำให้อสุกด้วยการกวนกับน้ำไฟอ่อนปานกลาง แป้งจะละลายง่าย สุกง่าย เนื้อแป้งใส เหนียวติดภาชนะ และมีความหนืดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ไม่มีการรวมตัวเป็นก้อนขณะร้อน เมื่อเย็นตัวลงจะติดกันเป็นก้อนเหนียว ติดภาชนะ เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน

การผลิตแป้งมันสำปะหลังมีกระบวนการผลิตตามขั้นตอนดังนี้ (รื่นรมย์, 2553) หัวมันสำปะหลังที่ผ่านการล้างเพื่อทำความสะอาดจะถูกสับและขูดเปลือกเพื่อให้หัวมันมีขนาดเล็กกลง และแยกเอาเปลือกออกก่อน ชี้นมันสำปะหลังที่สับแล้วขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว จะตกเข้าสู่เครื่องขูดหรือบดหัวมันสำปะหลังให้ละเอียดยิ่งขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดแป้ง หลังจากนั้นจะเติมน้ำและนำเข้าสู่เครื่องสกัดแป้ง (Extractor) เพื่อสกัดแยกแป้งออกจากเซลลูโลส โดยทั่วไปจะเป็นการสกัดแบบหลายครั้ง (โรงงานส่วนใหญ่จะใช้ชุดสกัด 3 ชุด แต่โรงงานขนาดใหญ่อาจใช้ชุดสกัดถึง 4 ชุดต่อเนื่องกัน) โดยชุดแรกซึ่งเป็นการสกัดหยาบจะใช้ตะแกรงขนาด 60-80 mesh และชุด

สุดท้ายจะเป็นการสกัดละเอียดโดยใช้ผ้ากรองขนาด 90 mesh ในขั้นตอนนี้ โรงงานมีการเติมน้ำกำมะถัน เพื่อยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ซึ่งจะเปลี่ยนโมเลกุลของแป้งเป็นกรดแลคติก กากมันสำปะหลังจากขั้นตอนการสกัดแป้งจะมีน้ำอยู่ในปริมาณมาก และมีปริมาณแป้งเหลือน้อยในกากมันสำปะหลัง กากมันสำปะหลังจะถูกแยกออกจากน้ำแป้งเพื่อนำเข้าสู่เครื่องอัดกากและนำไปตากแดดเพื่อนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์หรือนำไปผสมกับมันเส้นเพื่อทำมันอัดเม็ดต่อไป ส่วนน้ำแป้งที่ถูกแยกออกจากกากมันสำปะหลังจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องแยก (Separators) ซึ่งอาจเป็นเครื่องแยกชนิดหมุนเหวี่ยง (Centrifugal separators) หรือ ไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclone) โดยโรงงานส่วนใหญ่จะใช้เครื่องแยกชนิดหมุนเหวี่ยง 2 ชุดเพื่อแยกกากมันสำปะหลังออกให้หมดและทำให้น้ำแป้งเข้มข้น น้ำที่ใช้ในการล้างแป้งที่เติมในเครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงนี้อาจจะเป็นน้ำหรือน้ำกำมะถันก็ได้ แป้งที่ถูกแยกเอาน้ำออกแล้วจะถูกพ่นเข้าสู่ท่อไอร้อนซึ่งมีลมร้อนประมาณ 200 °C จากเตาเผา เป่าเข้ามาด้วยความดันสูง ความแรงของลมจะพัดเอาแป้งขึ้นไปตามปล่องสูง แล้วตกมาสู่ไซโคลอน (Cyclone) ระยะเวลาที่ใช้ในการทำแป้งแห้งเป็นช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อป้องกันการรวมตัวของแป้งเป็นเม็ดและเพื่อป้องกันการสลายตัวของแป้ง แป้งมันสำปะหลังที่ได้จากไซโคลอนจะเป็นแป้งที่แห้งและละเอียด แต่ยังร้อนอยู่ ซึ่งจะต้องทำให้เย็นโดยทันที ด้วยการใส่ไซโคลอนเย็น ก่อนจะถูกปล่อยลงสู่เครื่องร่อนแป้ง เพื่อให้อนุภาคของแป้งมีความสม่ำเสมอ

2.3 สารเติมแต่ง

2.3.1 กัวร์กัม (Guar gum)

กัวร์กัมเป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่สกัดได้จากเนื้อในเมล็ด (Endosperm) ของเมล็ดกัวร์ (Cyamopsis tetragonolobus) ซึ่งมีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและปากีสถาน (พิมเพ็ญ และนิธิยา, 2553) กัวร์กัมเป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของกาแล็กโทแมนแนน (Galactomannan) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลแมนโนส (Mannose) ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ ที่ตำแหน่ง บีตา-1,4 และมีกิ่งแขนงของน้ำตาลกาแล็กโทส (Galactose) ซึ่งต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่งแอลฟา-1,6 โดยทั่วไปกัวร์กัมใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร ใช้เป็นสารที่ทำให้มีอิมัลชันคงตัว (Emulsifier) ทำให้อาหารข้นหนืด (Thickening agent)

2.3.2 ไช้ผึ้ง (Beeswax)

ไช้ผึ้งผลิตโดยต่อมผลิตไช้ผึ้ง 4 คู่ ซึ่งอยู่ที่ส่วนท้องของลำตัวผึ้งงานที่มีอายุ 2 สัปดาห์ขึ้นไป (อุตม และสุทธิชัย, 2558) ไช้ที่ผึ้งงานผลิตนี้จะมีสีขาว แต่อาจเป็นอมกษรและยางไม้ทำให้มีสีเหลือง ไช้ผึ้งไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์ที่เย็น และจะละลายได้ดีในน้ำมันที่ระเหยและไม่ระเหย คลอโรฟอร์ม อีเทอร์ เบนซิน (อุณหภูมิ 359 °C) และคาร์บอนไดซัลไฟด์ (ที่อุณหภูมิ 359 °C) ไช้ผึ้งส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โดยใช้ในสูตรผสมของครีม โลชั่น (Ointment) น้ำมันแต่งผม ลิปสติก และรุธทาแก้ม อุตสาหกรรมที่ใช้ไช้ผึ้งรองลงมาคือ อุตสาหกรรมเทียน-ไข อุตสาหกรรมอย่างที่สามที่ใช้ไช้ผึ้งมาก คืออุตสาหกรรมน้ำผึ้ง โดยใช้ในการผลิตแผ่นรังเทียม นอกจากนี้ไช้ผึ้งยังใช้ประโยชน์ในงานหล่อแบบซึ่งใช้ในส่วนประกอบของวัสดุกันน้ำ ยาขัดน้ำมันพื้นเพอร์นิเจอร์ เครื่องหนัง และเลนส์กล้องส่องทางไกล เป็นต้น

2.3.3 แมกนีเซียม สเตริยเรท (Magnesium stearate)

แมกนีเซียม สเตริยเรท หรือเกลือแมกนีเซียม (Magnesium salt) เป็นเกลือของกรดสเตียริก (Stearic acid) กับแมกนีเซียม (Mg^{2+}) มีลักษณะเป็นผงสีขาวที่อุณหภูมิห้อง (พิมเพ็ญ และนิธิยา, 2553) มีสูตรทางเคมีคือ $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ มีจุดหลอมเหลวที่ 120 °C ไม่ละลายในน้ำ ปลอดภัยสำหรับมนุษย์เมื่อปริมาณการบริโภคไม่เกิน 2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน

2.3.4 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอริน (Glycerin) หรือ กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มของโพลีไฮดริค แอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohols) ใช้เป็นสารตั้งต้นสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่ การผลิตยา การผลิตเครื่องสำอาง เป็นต้น (พิมเพ็ญ และนิธิยา, 2553) ที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวานเล็กน้อย (ความหวานสัมพัทธ์ 60) โมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 3 หมู่ จึงละลายในน้ำได้ดี มีสมบัติในการจับน้ำได้ดี (Hydroscopic) กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบหลักในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งได้จากการรวมตัวของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน (Fatty acid) 3 โมเลกุล กลีเซอรอลใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นสารเก็บความชื้น (Humectant) ป้องกันไม่ให้อาหารแห้ง และเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ช่วยให้อิมัลชันมีความคงตัว

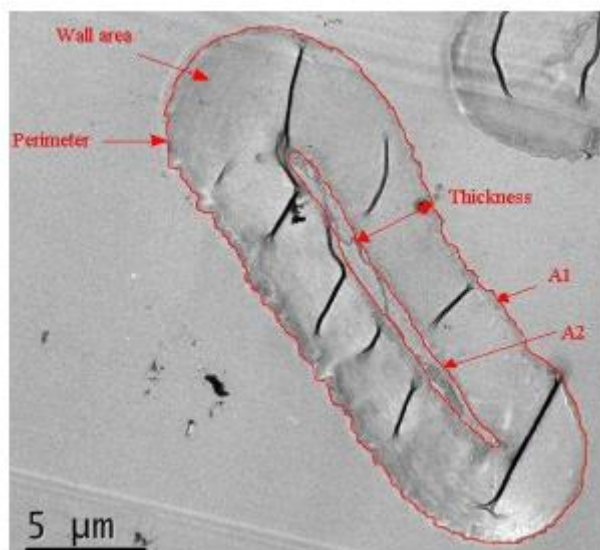
2.3.5 เกาลิน

กาลินหรือดินขาว มีลักษณะเป็นแผ่นบางรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน หรือเป็นรูปหกเหลี่ยมขนาดเล็ก มักเกิดเป็นก้อนคล้ายดิน (ปรีดา, 2547) มีทั้งชนิดที่เนื้อแน่น และชนิดเนื้อร่วน (Friable) มีค่าความแข็ง 2–2.5 ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.6–2.63 ด้านคล้ายดิน ผลึกชนิดแผ่นจะวาวแบบมุก สีขาว หรืออาจพบสีอื่นได้ขึ้นกับสิ่งเจือปน มีสูตรเคมีคือ $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$ ประกอบด้วย Al_2O_3 39.5%, SiO_2 46.5% และ H_2O 14.0% ไม่หลอมตัว ไม่ละลายในกรด ใช้ทำอิฐ กระจกเบื้องผนังหลังคา ท่อ ดินโคลนชนิดที่มีคุณภาพดี (High-grade clay) ซึ่งเรียกว่าไชนาเคลย์ (China clay) หรือดินกาลิน ใช้ทำเครื่องปั้นดินเผาทุกชนิด ทำอิฐก่อสร้างภาชนะกระเบื้องเคลือบต่างๆ นอกจากนี้ใช้ทำอิฐทนไฟสำหรับเตาถลุงโลหะ

2.3.6 เส้นใยฝ้าย

เส้นใยหมายถึงวัสดุหรือสารใดๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น ที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 100 (Horrocks and Anand, 2000) เส้นใย แบ่งออกเป็น 1) เส้นใยจากพืช เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลสซึ่งได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ไยสับปะรด ไยมะพร้าว ฝ้าย นุ่น ทรนารายณ์ เป็นต้น เซลลูโลส เป็น โพลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา 2) เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ (Wool) ไหม (Silk) ผม (Hair) เล็บ เขา ไยไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติ คือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลง 3) เส้นใยจากสินแร่ เช่น แร่ใยหิน (Asbestos) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และทนไฟ

เส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ ใยฝ้ายจัดเป็นเส้นใยสั้นเป็นหลอดแบนและขั้วกัน เป็นเกลียว (จารุวรรณ, 2555) ภาคตัดขวางของเส้นใยฝ้ายที่มีอายุมากจะมีลักษณะคล้ายรูปถั่ว (รูปที่ 2.5) ผนังชั้นแรก (Primary wall) มีความหนาเพิ่มขึ้นขยายจากผิวเข้าสู่ส่วนกลางมีการเติบโตเป็นชั้นๆ ทำให้ช่องส่งน้ำ (Lumen) มีขนาดเล็กลง เปลือกที่หนาเพิ่มขึ้นนี้รวมกันเป็นผนังชั้นสอง (Secondary wall) ผนังแต่ละชั้นนี้ประกอบด้วยเส้นใยละเอียดที่เกิดจากการต่อกันเป็นสายยาวของโมเลกุลเซลลูโลส ซึ่งในบางครั้งมีการเติบโตของสายในทิศที่สวนทางกัน ทำให้เกิดเกลียวฝ้ายขึ้นตามความยาวของเส้นใยฝ้ายหรือเกิดการบิดตัวคล้ายริบบิ้น



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยฝ้าย (Kljun et al., 2013)

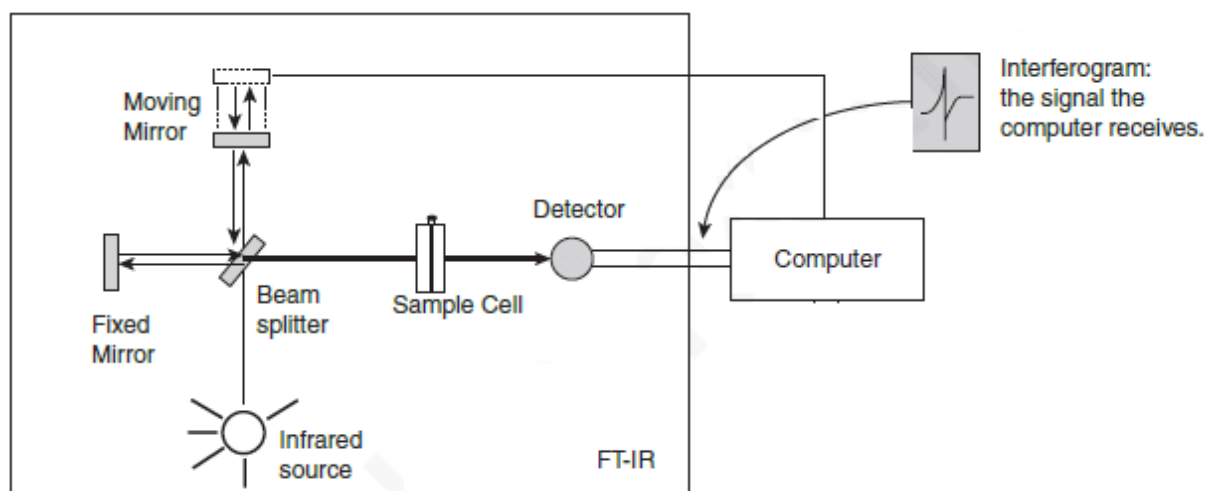
2.3.7 น้ำยางพารา (Latex)

น้ำยาง เป็นของเหลวสีขาวถึงขาวปนเหลือง ชุ่มชื้น อยู่ในท่อน้ำยางซึ่งเรียงตัวกันอยู่ในส่วนเปลือกของต้นยางพารา (พรพิณ, 2552) ในน้ำยางจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง และส่วนที่ไม่ใช่ยาง ตามปกติในน้ำยางจะมีเนื้อยางประมาณ 25–45% โดยน้ำหนัก น้ำยางมีความหนาแน่น 0.98 g/cm^3 มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 6.8 ในน้ำยางมีอนุภาคขนาดต่างกันแขวนลอยอยู่ในของเหลว อนุภาคเหล่านี้จะมีประจุเป็นลบและผลักกันอยู่ตลอดเวลา ทำให้อนุภาคแขวนลอยและคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้จนกว่าจะมีสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ มารบกวน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำให้ น้ำยางเสียเสถียรภาพ และจับตัวกันเป็นก้อน

2.4 เครื่องมือ

2.4.1. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) (ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2556) มีหลักการทำงาน ดังนี้ เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีหลายความถี่จากแหล่งคลื่นรังสีอินฟราเรด ผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โฟโรมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ด้วยตัวแยกแสง (Beam splitter) ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อลำแสงสะท้อนกลับมาที่ตัวแยกแสง จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือการแทรกสอดแบบหักล้างของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกัน กับช่วงสแกนของกระจก โดยที่อัตราการสุมวัดสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่ เรียกสัญญาณอ้างอิงจากตัววัดสัญญาณที่เกิดจากหลอดเลเซอร์ที่ทำจากก๊าซฮีเลียมและก๊าซนีออน (He-Ne Laser) ว่าเลเซอร์อ้างอิงภายใน (Internal Reference Laser) สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณอ่านได้จะอยู่ในรูปอินเทอร์โฟแกรม ดังรูปที่ 2.6

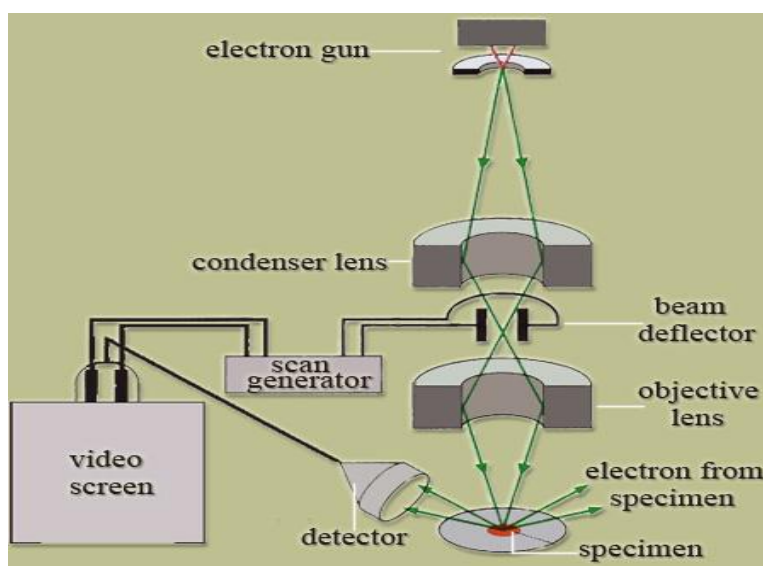


รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FT-IR Spectroscopy (Jalvandi, 2016)

2.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) (นิวัฒน์ และภิญโญ, 2558) ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ (รูปที่ 2.7) โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำ

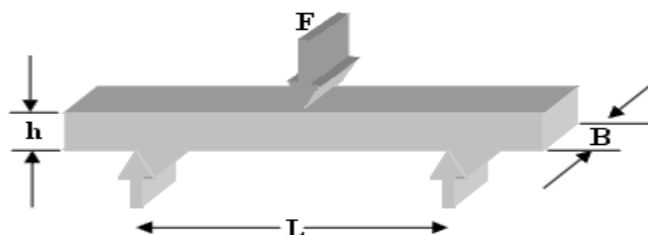
อิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา และกราดลงบนชิ้นงานในบริเวณที่ต้องการทดสอบ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพต่อไป



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (นิวัฒน์ และภิญโญ, 2558)

2.4.3 เครื่องทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด

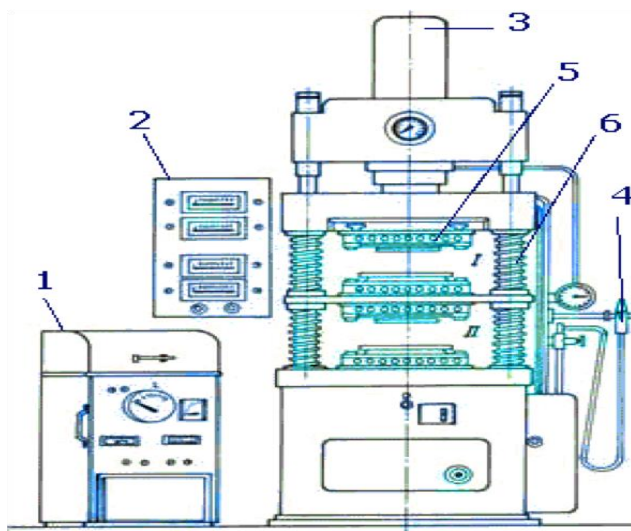
การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบ และจุดรับรองในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน ดังรูปที่ 2.8 เหมาะสำหรับการทดสอบพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ต่ำ (จินตมัย, 2547) หัวกดที่ใช้ให้แรงกระทำและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน หรือเพลาลโลหะแข็งก็ได้ รัศมีของหัวกดและชุดให้แรงกระทำต้องมีรัศมีอย่างต่ำ 3.2 มิลลิเมตร และมีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบสำหรับหัวกด และ 1.5 เท่าของความหนาชิ้นทดสอบสำหรับชุดรองรับ การที่ชุดกดและชุดรองรับต้องมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่จุดสัมผัสดังกล่าวเพื่อ เป็นการลดความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัสดังกล่าว และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณจุดสัมผัสนั้น นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นทดสอบโดยมีค่าได้ระหว่าง 16:1 ถึง 60:1



รูปที่ 2.8 ลักษณะการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด โดย F คือแรงที่กดลงบนตัวอย่าง L คือระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสอง h และ B คือความหนาและความกว้างของชิ้นงานตามลำดับ (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ , 2558)

2.4.4 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression moulding)

การขึ้นรูปแบบอัด คือการขึ้นรูปพลาสติกโดยเติมพลาสติกลงในแม่พิมพ์ แล้วใช้ความดันอัดปิดแม่พิมพ์ พร้อมทั้งให้ความร้อนให้พลาสติกไหลเข้าไปแทนที่ช่องว่างรูปทรงของชิ้นงาน งานอัดฉีด (Transfer moulding) ต่างกับงานอัดคือจะไม่เติมพลาสติกลงในแม่พิมพ์เปิด แต่จะใช้ลูกสูบอัดพลาสติกให้เข้าไปในแม่พิมพ์ปิด (เรียนรู้งานพลาสติก, 2551) พลาสติกที่จะนำเข้ากระบวนการอัดเพื่อผลิตเป็นชิ้นงาน จะอยู่ในรูปผง เม็ด หรือเหลวเป็นแป้งเปียก ซึ่งสามารถนำเข้ากระบวนการผลิตโดยการอัดและอัดฉีดได้ดี แต่ถ้าต้องการผสมสารปรับปรุงคุณภาพ จะต้องเข้ากระบวนการเตรียมวัสดุก่อน ส่วนประกอบของเครื่องขึ้นรูปแบบอัดแสดงในรูปที่ 2.9



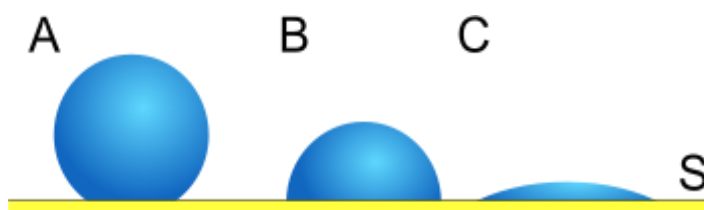
รูปที่ 2.9 เครื่องอัดแบบอัตโนมัติที่ใช้ในการอัดชิ้นงานทรงแบน 1. เครื่องให้ความร้อนพลาสติก 2. เครื่องมือวัดและควบคุมอุณหภูมิ 3. บั๊มไฮดรอลิก 4. หัวเป่าลมอัดเพื่อทำความสะอาดแม่พิมพ์ 5.ฮีตเตอร์ และ 6.สปริง (เรียนรู้งานพลาสติก, 2551)

2.4.5 เครื่องวัดมุมสัมผัส

ภาวะการเปียก (Wetting) คือความสามารถของของเหลวในการรักษาหน้าสัมผัสกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลจากแรงระหว่างโมเลกุล (Sharfrin, 1960) ระดับขั้นของภาวะการเปียกขึ้นกับความสมดุลระหว่างแรงแอดฮีชัน (Adhesion force) และแรงโคฮีชัน (Cohesion force) ภาวะการเปียกมีความสำคัญในการยึดติดกันของวัสดุสองชิ้น โดยแรงแอดฮีชันระหว่างของเหลวและของแข็ง จะทำให้ของเหลวกระจายตัวไปทั่วพื้นผิว ส่วนแรงโคฮีชันภายในของเหลวเองจะทำให้ของเหลวเกาะกันเป็นทรงกลมและไม่สัมผัสกับพื้นผิวของของแข็ง ค่ามุมสัมผัสมีความสัมพันธ์กับระดับการเปียกของพื้นผิวดังแสดงในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.2 มุมสัมผัสและปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง (Eustathopoulos, 1999)

ค่ามุมสัมผัส	ระดับของการเปียก	ความแข็งแรง	
		แข็ง	อ่อน
$\theta = 0$	เปียกสมบูรณ์	แข็ง	อ่อน
$0 < \theta < 90^\circ$	สามารถเปียกได้สูง	แข็ง	แข็ง
		อ่อน	อ่อน
$90^\circ \leq \theta < 180^\circ$	สามารถเปียกได้ต่ำ	อ่อน	แข็ง
$\theta = 180^\circ$	ไม่เปียกอย่างสมบูรณ์	อ่อน	แข็ง



รูปที่ 2.10 ความแตกต่างของของเหลวบนพื้นผิว S โดย A คือการเปียกเล็กน้อย และ C คือการเปียกมากกว่า โดย A มีค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ที่มาก และ C มีมุมสัมผัสที่น้อยที่สุด (Eustathopoulos, 1999)

มุมสัมผัสเป็นค่าที่บอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นผิวของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว มุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90° หมายถึงภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า 90° หมายถึงภาวะการเปียกของพื้นผิวไม่ดี และของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อย และจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง หากของเหลวคือน้ำ พื้นผิวที่มีการกระจายตัวของน้ำได้ดีจัดเป็นพื้นผิวชอบน้ำ (Hydrophilic) และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวของน้ำไม่ดีจัดเป็นพื้นผิวไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ส่วนพื้นผิวที่มีการกระจายตัวของน้ำไม่ดี

อย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic) มีมุมสัมผัสของหยดน้ำมากกว่า 150° เรียกว่าปรากฏการณ์ใบบัว (Lotus effect)

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

วีรเดช (2543) สังเคราะห์ยางธรรมชาติผสม โดยผสมน้ำยางธรรมชาติกับแป้งเปียกมันสำปะหลังเข้มข้น (18 % น้ำหนักต่อปริมาตร) แล้วแยกเป็น 2 ส่วนเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตเป็นแผ่นยางผสมแป้งอบแห้ง และกระบวนการผลิตโฟม เมื่อศึกษาผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติกายภาพของยางธรรมชาติผสม พบว่า ปริมาณแป้งมันสำปะหลังมีผลต่อสมบัติกายภาพของยางที่ได้จากทั้งสองกระบวนการ โดยกระบวนการผลิตแผ่นยางผสมแป้งอบแห้งมีค่าดัชนีความอ่อนตัว ความเหนียว เวลาคงรูป ความหนาแน่น ความแข็งและระยะยืด ๓ จุดขาด สูงขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความทนแรงดึงและความทนแรงฉีกลดลง ส่วนกระบวนการผลิตแผ่นยางผสมแป้งแบบผ่านการเกิดโฟม พบว่า เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น เวลาคงรูป ความหนาแน่นก่อนและหลังการคงรูป และความทนแรงกด เพิ่มขึ้น ส่วนระยะยืด ๓ จุดขาดและความทนแรงดึง มีค่าสูงขึ้นในช่วงปริมาณแป้งร้อยละ 20-30 เท่านั้น

วรัญญู (2557) สังเคราะห์โฟมกันกระแทก โดยกระบวนการกวดอัดด้วยความร้อน จากการทดลองพบว่า โฟมแป้งที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอัตราส่วน 60:40 จะให้ค่าความต้านทานแรงกดและค่าความต้านทานแรงที่มทะเลสูงสุด การเติมน้ำยางชั้นลงในโฟมแป้งจะลดสมบัติด้านความแข็งแรงของโฟมแป้งที่ผลิตขึ้น โดยค่าความต้านทานแรงกดและค่าความต้านทานแรงที่มทะเลของโฟมแป้งมันจะมีค่าลดลงเมื่อโฟมแป้งมีปริมาณน้ำยางชั้นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมน้ำยางชั้นลงในแป้งโดก่อนทำการขึ้นรูปด้วยความร้อน จะช่วยลดการดูดซับน้ำของโฟมแป้งผสมน้ำยางลงได้ การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงในโฟมแป้งที่มีน้ำยางชั้นเป็นองค์ประกอบในปริมาณ 10% ของน้ำหนักน้ำยาง จะช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานน้ำให้กับโฟมแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมซีลี้อยลงในโฟมแป้งมันสำปะหลังที่มีส่วนประกอบของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ น้ำยางและแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้โฟมแป้งมีความแข็งแรงลดลง การเติมน้ำยางชั้นในปริมาณ 20% ของน้ำหนักซีลี้อยจะให้คุณภาพของซีลี้อยขึ้นรูปเหมาะสมที่สุด ซีลี้อยขึ้นรูปที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยน้ำยางดัดแปร ซึ่งจะมีสมบัติในการป้องกันแรงกระแทกที่ดีที่สุด

Prachayawarakorn and Pomdage (2014) ศึกษาผลของการาจีแนนต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่มีแป้งมันสำปะหลังและโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นองค์ประกอบหลัก และมีเส้นใยฝ้ายเป็นสารเสริมแรง ขึ้นรูปโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด ผลการศึกษาพบว่าเทอร์โมพลาสติกที่มีการเติมการาจีแนน และเส้นใยฝ้าย (TPCS/LDPE/CG/CF) มีความเหนียวมากกว่าพลาสติกที่มีการเติมการาจีแนน (TPCS/LDPE/CG) เพียงอย่างเดียว และพบว่าเทอร์โมพลาสติกที่มีโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีการเติมการาจีแนน และเส้นใยฝ้าย มีค่าความเค้น ๓ จุดขาด ค่าโมดูลัส และค่าความแข็ง เพิ่มขึ้นคิดเป็น 27.5% 320% และ

31.0% ตามลำดับ ส่วนค่าความเครียด ณ จุดขาดมีค่าลดลง นอกจากนี้การเติมคาร์บอนและเส้นใยฝ้ายไม่มีผลต่อการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกที่มีโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

Shey et al. (2006) ศึกษาสมบัติของโฟมแบ่งที่เติมแต่งด้วยน้ำยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของโฟมที่ทำจากแบ่งหลายชนิด ได้แก่ แบ่งสาลี แบ่งมันฝรั่ง และแบ่งข้าวโพด ผลการศึกษาพบว่า การเติมน้ำยางช่วยให้ความหนาแน่น และความยืดหยุ่นของโฟมเพิ่มขึ้น และการปรับปรุงน้ำยางพาราโดยการเติมสารเติมแต่งที่ไม่มีขี้ช่วยให้อิมโมเลกุลของยางจัดเรียงตัวสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติความทนต่อแรงดัดของโฟมพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับโฟมทางการค้า และสมบัติความทนต่อแรงดัดของโฟมนี้อาจปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำยางให้เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำยางช่วยลดการดูดซับความชื้นของโฟมได้ จึงเป็นการช่วยลดผลของความชื้นต่อสมบัติของโฟมด้วย

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการเติมน้ำยางพาราทำให้โฟมแบ่งมีการดูดซับความชื้นที่ลดลง มีความหนาแน่น และความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และการเติมเส้นใยและน้ำยางพาราทำให้สมบัติเชิงกลของโฟมแบ่งดีขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการปรับปรุงสมบัติการดูดซับความชื้น และความยืดหยุ่นของโฟมจากแบ่งมันสำปะหลังด้วยน้ำยางพารา และเส้นใยฝ้าย และเปรียบเทียบพฤติกรรมการย่อยสลายของโฟมจากแบ่งมันสำปะหลังที่เติมและไม่เติมน้ำยางพารา คณะวิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยที่ได้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟมจากแบ่งมันสำปะหลังที่มีคุณภาพดี ใช้งานได้จริง และอาจมีศักยภาพมากพอที่จะผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ นอกจากนี้จะได้ศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมจากแบ่งด้วยวิธีฝังดินซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการประเมินระยะเวลาในการย่อยสลายของโฟมหลังจากการใช้งานได้ ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของโฟมจากแบ่งมันสำปะหลังให้ดียิ่งขึ้น เหมาะกับการใช้งานมากขึ้น และใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น และอาจมีศักยภาพมากพอที่จะผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ โดยการผสมกับน้ำยางพาราซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มช่องทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางพาราได้อีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

- 3.1.1.1 แป้งมันสำปะหลังสำหรับแป้ง ตรา ไบหยก บริษัทบางกอกอินเตอร์ฟูด จำกัด
- 3.1.1.2 สำลี ตรา รถพยาบาล บริษัท บางพลี คอตตอน อินดัสตรี จำกัด ตัดให้มีความยาว 1 mm
- 3.1.1.3 น้ำยาล้างจานแบบ ตรา มาสเท็กซ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัด พี.เค ศูนย์เครื่องเขียน
- 3.1.1.4 ไข่ฝิ่ง เกรดอาหาร บริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
- 3.1.1.5 กัวยักษ์ เกรดอาหารและเครื่องสำอาง บริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
- 3.1.1.6 แมกนีเซียมสเตริลเกรด เกรดอาหาร บริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
- 3.1.1.7 กลีเซอรอล (99.5%, $C_3H_8O_3$, 92.10 g/mol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Qrec
- 3.1.1.8 เกล็ดหรือดินขาว ($Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$, 258.16 g/mol) บริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
- 3.1.1.9 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl, 58.44 g/mol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
- 3.1.1.10 ดินสำหรับการฝังตัวอย่าง ทรายดินนึ่งดา ซึ่งมีอัตราส่วนของส่วนประกอบดังนี้ หนาดิน 1.5
ซีเมนต์ 0.1 แกลบดิน 0.2 ขุยมะพร้าว 0.2 เปลือกสับ 0.1 มูลสัตว์ต่างๆ 0.5
- 3.1.1.11 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
- 3.1.1.12 ซิลิกาเจล (Silica gel)

3.1.2 เครื่องมือ

- 3.1.2.1 เครื่องชั่ง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) บริษัทไซแอนทิฟิคโพรโมชัน จำกัด รุ่น BSA 2245-CW
- 3.1.2.2 เครื่องชั่ง (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง) บริษัท Shanghai Yousheng Weighing Apparatus รุ่น BS3000L
- 3.1.2.3 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression Machine) บริษัท Chreon Tut รุ่น PRID W300L300 HD
- 3.1.2.4 ตู้อบลมร้อน (Oven) บริษัท Binder รุ่น FED 240
- 3.1.2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) บริษัท LEO รุ่น 1450 VP

3.1.2.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์หมอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR) บริษัท Perkin Elmer รุ่น System 2000

3.1.2.6 pH meter โมเดล pHep tester บริษัท HANNA instrument, Inc

3.1.2.7 เครื่องผสมอาหาร SONAR รุ่น FM-106

3.1.2.8 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle goniometer) บริษัท Beijing United Test Co. , Ltd

3.1.2.9 เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal tensile tester) บริษัท Testometric รุ่น Micro

350

3.1.3 อุปกรณ์

3.1.3.1 เวอร์เนียคาลิเปอร์ระบบดิจิทัล (Digital Vernier caliper) ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.1.3.2 โถดูดความชื้น (Desicator)

3.1.3.3 แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์

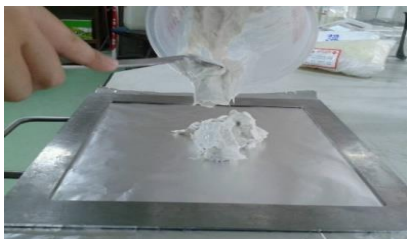
3.1.3.4 นาฬิกาจับเวลา (Stop watch)

3.1.3.5 แก้วพลาสติกขนาด 300 ml

3.2 การหาสถานะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟม

อบแป้งมันสำปะหลังในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากแป้ง และทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการอบ 100 g ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง จากนั้นเพิ่มส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 ผสมส่วนผสมทั้งหมดในโถผสม แล้วปั่นจนให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่องผสมเป็นเวลา 2 นาที แล้วนำไปขึ้นรูปทันที

การขึ้นรูปโฟมด้วยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่งเริ่มจากเปิดเครื่องขึ้นรูปจนได้อุณหภูมิเท่ากับ 220°C จากนั้นรองแผ่นแบบด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ทั้งสองแผ่นเพื่อป้องกันการติดแม่พิมพ์ เทของผสมเนื้อเดียวกันลงบนแม่พิมพ์ ขนาด 24 cm x 24 cm x 3 mm ที่วางอยู่บนแผ่นรองแบบ ประกบแผ่นรองแบบเข้าด้วยกัน ยกเข้าเครื่องขึ้นรูปให้ความดันที่ 1000 atm เป็นเวลา 4.30 นาที เมื่อครบเวลานำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องขึ้นรูป และทิ้งให้เย็นเป็นเวลา 5 นาที จึงแกะผลิตภัณฑ์โฟมออกจากแม่พิมพ์ ขั้นตอนการขึ้นรูปแสดงไว้ในรูปที่ 3.1



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

รูปที่ 3.1 การขึ้นรูปโฟม (ก) เทของผสมลงบนแม่พิมพ์ (ข) เกลี่ยของผสมให้เต็มแม่พิมพ์ (ค) ปิดของผสมบนแม่พิมพ์ด้วยอลูมิเนียมฟอยด์ (ง) ประกบแผ่นรองแบบด้านบนเข้าด้วยกัน (จ) ยกแม่พิมพ์เข้าสู่เครื่องขึ้นรูป (ฉ) ขึ้นรูปโฟมเป็นเวลา 4.30 นาที (ช) ตั้งแม่พิมพ์ทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 5 นาที (ซ) นำแผ่นรองแบบออก ได้ผลิตภัณฑ์โฟมจากแป้ง

การศึกษากระจายตัวของสำลีและขนาดของรูพรุน (เซลล์) ในโครงสร้างของโฟมตัวอย่างทั้งหมดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ผลการทดลองแสดงในบทที่ 4) พบว่าโฟมที่มีปริมาณสำลี 6 g มีการกระจายตัว และขนาดของเซลล์ที่ค่อนข้างเล็กกว่าสูตรอื่น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าโฟมสูตรนี้อาจมีความแข็งแรงมากที่สุด และเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาขึ้นรูปและเติมสารเติมแต่งอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่อไป โดยในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

จะมีการเติมน้ำยาราด และศึกษาผลของปริมาณน้ำยาราดต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของโฟม ชื่อ ตัวอย่างโฟม ปริมาณของน้ำยาราด และส่วนประกอบอื่น ดังแสดงตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ชื่อตัวอย่างโฟมและปริมาณของส่วนผสม

ชื่อ ตัวอย่าง	น้ำหนักส่วนผสม (g)							
	แป้ง	น้ำ (mL)	กัวร์กัม	แมกนีเซียม สเตียเรท	เกาลิน	ไซฟิ่ง	กลีเซอรอล	สำลี
Cs-C2	100	115	1	2	15	20	4	2
Cs-C4	100	115	1	2	15	20	4	4
Cs-C6	100	115	1	2	15	20	4	6
Cs-C8	100	115	1	2	15	20	4	8

ตารางที่ 3.2 ปริมาณของส่วนผสมในการขึ้นรูปโฟม

ชื่อตัวอย่าง	น้ำหนักส่วนผสม (g)								
	แป้ง	น้ำ (mL)	กัวร์กัม	แมกนีเซียม สเตียเรท	เกาลิน	ไซฟิ่ง	กลีเซอรอล	สำลี	น้ำยาราด (mL)
Cs-C6-L2.5	100	115	1	2	15	20	4	6	2.5
Cs-C6-L5	100	115	1	2	15	20	4	6	5
Cs-C6-L-7.5	100	115	1	2	15	20	4	6	7.5
Cs-C6-L10	100	115	1	2	15	20	4	6	10

3.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของโฟม

3.3.1 ความหนาและความหนาแน่นของแผ่นโฟม

วัดความหนาของแผ่นโฟมที่ขึ้นรูปแล้วขนาด 2.5 cm x 2.5 cm โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ระบบดิจิตอลวัดความหนา ทั้งหมด 9 ตำแหน่งในหนึ่งตัวอย่าง คำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การหาความหนาแน่นของแผ่นโฟมมีขั้นตอนดังนี้ ชั่งน้ำหนักโฟมขนาด 2.5 cm x 2.5 cm x 3 mm ที่วัดความหนาแล้ว ตัวอย่างละ 5 แผ่น ด้วยเครื่องชั่งละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง จากนั้นคำนวณความหนาแน่นของตัวอย่างโฟมจากความสัมพันธ์ของน้ำหนักและปริมาตร โดยที่ปริมาตรของตัวอย่างโฟมคำนวณจากความกว้าง ความยาว และความสูงของตัวอย่าง

3.3.2 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption capacity)

วางโฟมตัวอย่างขนาด 2.5 cm x 2.5 cm ตัวอย่างละ 1 แผ่น ลงในจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ที่มีน้ำปราศจากไอออนอยู่ 40 ml จับเวลาและถ่ายรูปโฟมตัวอย่างในช่วงเวลา 0 1 2 3 4 5 10 30 นาที 1 2 3 4 5 6 12 และ 24 ชั่วโมง

3.3.3 ความสามารถในการดูดซับความชื้น (Water absorption isotherm)

ใส่ตัวอย่างโฟมขนาด 2.5 cm x 2.5 cm x 3 mm ตัวอย่างละ 5 แผ่น ในโถดูดความชื้นที่มีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์อิ่มตัว (50 %RH) เป็นเวลา 14 วัน เมื่อครบ 14 วัน นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกเป็นค่าน้ำหนักเริ่มต้น (W_0) และนำตัวอย่างแต่ละประเภทจำนวน 5 ชิ้น แยกใส่โถดูดความชื้นที่ 0 %RH (ซิลิกาเจล) 50 %RH (สารละลายแคลเซียมคลอไรด์อิ่มตัว) 75 %RH (สารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว) และ 100 %RH (น้ำกลั่น) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2654 จากนั้นนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักทุกหนึ่งชั่วโมงจนครบ 12 ชั่วโมง บันทึกค่าน้ำหนักที่เวลานั้นๆ (W_t) คำนวณหาค่าปริมาณความชื้น (Moisture Content) จากสูตร

$$\text{Moisture Content} = \frac{w_t - w_0}{w_0} \times 100 \quad (1)$$

3.3.4 มุมสัมผัสของของเหลวบนพื้นผิวตัวอย่างโฟม (contact angle, °)

ตัดตัวอย่างโฟมขนาด 2.5 cm x 2.5 cm x 3 mm ตัวอย่างละ 1 แผ่น เพื่อทดสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำ DI และหยดน้ำมันบนพื้นผิวตัวอย่าง โดยหยดของเหลวดังกล่าวปริมาตรประมาณ 1 μ L ลงบนผิวตัวอย่าง แล้วนำไปวางไว้บนแท่นวางตัวอย่างของเครื่องวัดมุมสัมผัส ถ่ายภาพด้านข้างของหยดน้ำและหยดน้ำมันที่หยดอยู่บนแผ่นโฟมตัวอย่าง บันทึกค่ามุมสัมผัสที่ได้ วัด 5 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง คำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา

ศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มซีเอ็มซีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น 1450 VP บริษัท LEO ความต่างศักย์เร่งเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ ถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มที่กำลังขยาย 500 และ 5,000 เท่า โดยการเตรียมตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาดที่เหมาะสม และเคลือบด้วยทองคำก่อนทำการวิเคราะห์

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนส์ฟอรัมอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี โดยเริ่มจากอบแผ่นโพลีเมอร์ตัวอย่างในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นในแผ่นโพลีเมอร์และทำให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นที่ 0 %RH จากนั้นเตรียมตัวอย่างโดยวิธีเตรียมตัวอย่างแบบอัดเป็นแผ่นโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) โดยนำตัวอย่างโพลีเมอร์ประมาณ 2-3 mg ผสมกับผง KBr ปริมาณ 80-100 mg แล้วบดผสมให้เข้ากัน ก่อนใส่ลงในแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ด (Hydrylic press) ภายใต้ความดัน 10^{-4} กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นาน 5 นาที ศึกษาหมู่ฟังก์ชันในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$

3.6 การศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

3.6.1 การเตรียมแผ่นตัวอย่าง

ตัดตัวอย่างโพลีเมอร์ Cs-C6-7.5L เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ อบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น และทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นที่ 0 %RH

3.6.2 การวัดความเป็นกรด-ด่างของดิน

ชั่งดินหนัก 1.00 กรัมด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ใส่น้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 5 mL คนให้เข้ากัน กรองเอาเศษดินออกให้หมด และวัดค่า pH ของดินด้วย pH meter

3.6.3 การทดสอบการย่อยสลาย

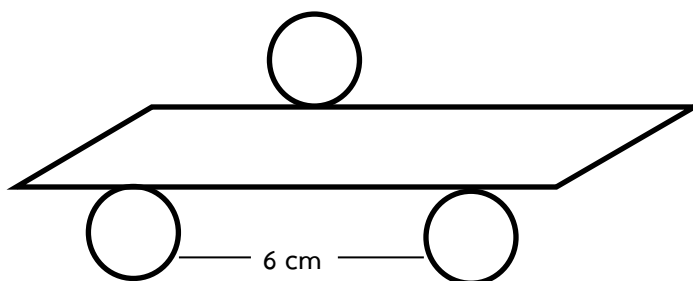
ถ่ายรูปตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ จากนั้นบรรจุดินหนา 3 cm ลงในแก้วพลาสติกขนาด 300 ml ใส่ตัวอย่างโพลีเมอร์ลงไป และกลบด้วยดินหนา 8 cm รดน้ำเพื่อให้ดินมีความชื้นอยู่ในช่วง 40-50% แล้วปิดฝาแก้วพลาสติกด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์โดยเว้นช่องระบายอากาศ เติมน้ำทุกๆ 2 วัน เพื่อให้ความชื้นในดินคงอยู่ในช่วง 40-50% วัดอุณหภูมิดิน (ดังรูปที่ 3.2) วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยการถ่ายภาพเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 4 สัปดาห์



รูปที่ 3.2 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

3.7 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟม

การทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมด้วยวิธีทดสอบความแข็งแรงการดัดงอแบบรับแรงสามจุด ทำโดยตัดแผ่นโฟมตัวอย่างขนาด $12.5 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm} \times 3 \text{ mm}$ ตัวอย่างละ 10 แผ่น จากนั้นนำแผ่นโฟมตัวอย่างทั้งหมดใส่ในโถดูดความชื้นที่มีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์อิ่มตัว (50 %RH) เป็นเวลา 14 วัน เมื่อครบ 14 วัน นำแผ่นโฟมตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการทนต่อแรงดัด อุณหภูมิขณะทำการทดสอบอยู่ในช่วง $27\text{-}30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยจัดวางชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.3 กำหนดอัตราเร็วในการกด 1 mm/min ส่วนวัดแรง 50 N กดด้วยความเร็วคงที่จนชิ้นงานหัก และเลือกพารามิเตอร์ที่จะศึกษาทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ โมดูลัสการดัด แรงเค้น ณ จุดขาด ความเครียด ณ จุดขาด แรงเค้นสูงสุด และความเครียดสูงสุด บันทึกผลการทดลอง คำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



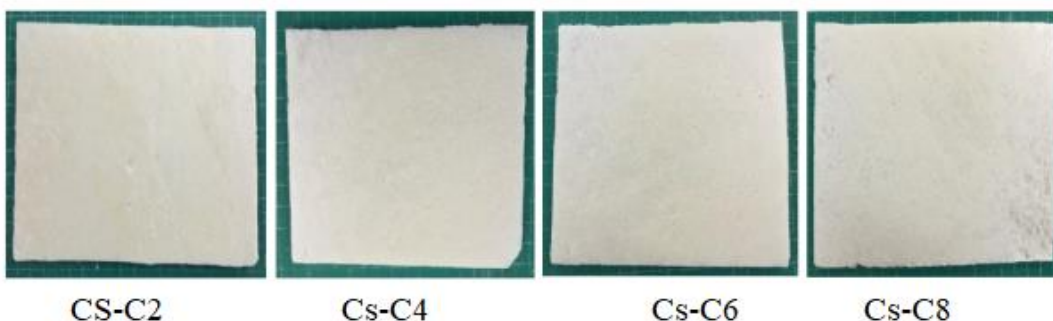
รูปที่ 3.3 การวางชิ้นงานเพื่อการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 สภาพที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟม

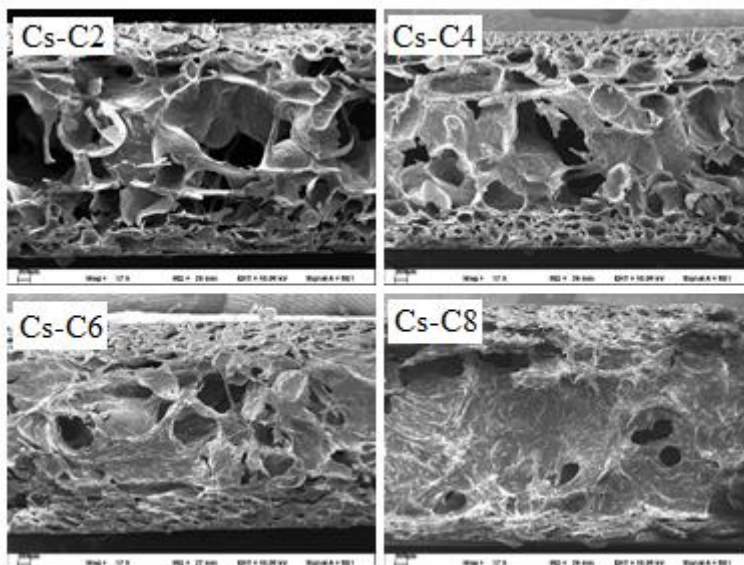
การขึ้นรูปโฟมที่ทำจากแป้งมันสำปะหลัง ที่มีการเติมสำลีปริมาณ 2 4 6 และ 8 g พบว่าปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป คือ ปริมาณสำลี 6 g ที่อุณหภูมิ 220°C ความดัน 1000 atm เป็นเวลา 4.30 นาที ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้แสดงดังในรูปที่ 4.1 โฟมที่เติมสำลี 2 g มีสีขาว พื้นผิวค่อนข้างเรียบเนียน ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสำลีโมเลกุลของแป้ง (Sanhawong et al., 2017) และเมื่อเพิ่มปริมาณของสำลีพบว่าพื้นผิวมีความเรียบเนียนมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของสำลีเป็น 8 g สังเกตพบการแยกเฟสระหว่างสำลีและแป้ง และพื้นผิวมีความขรุขระ เนื่องจากการเติมสำลีปริมาณมากเกินไปเป็นผลให้สำลีเกาะกลุ่มกันเอง และแยกเฟสออกจากแป้ง



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลแสดงลักษณะของโฟมที่ไม่เติมยางพาราที่ขึ้นรูปแล้วด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด

การศึกษาภาคตัดขวางของโฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 17 เท่า (รูปที่ 4.2) พบว่าสำลีมีการกระจายตัวในเนื้อโฟมอย่างสม่ำเสมอและโฟมมีรูพรุนขนาดเล็กที่ขอบและมีรูพรุนขนาดใหญ่ตรงกลาง ส่วนโฟม Cs-C4 และ Cs-C6 พบว่ารูพรุนมีขนาดเล็กลง และมีสัดส่วนของรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ส่วนโฟม Cs-C8 พบว่ามีรูพรุนน้อยมากจึงไม่เหมาะสมที่จะเลือกเป็นโฟม เนื่องจากไม่มีสมบัติเป็นโฟมและอาจมีความ

หนาแน่นสูงเกินไป ดังนั้นจึงเลือกโฟม Cs-C6 ซึ่งมีการกระจายตัวของลำลีสม่ำเสมอ และขนาดของรูพรุนที่เหมาะสม ในการทดลองต่อไป



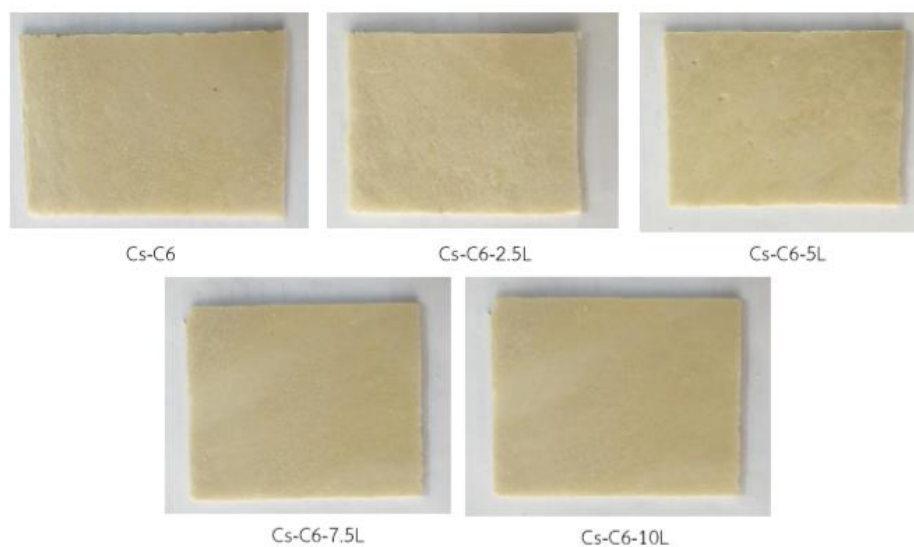
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของโฟมที่กำลังขยาย 1000 และภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 17 เท่า

การขึ้นรูปโฟมที่ทำจากแป้งมันสำปะหลัง และเติมสารเติมแต่งที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมีการเติมน้ำยาฟาราในปริมาณที่แตกต่างกัน 2.5 5 7.5 และ 10 mL ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 220°C ความดัน 1000 atm เป็นเวลา 4.30 นาที พบว่าโฟม Cs-C6 และโฟมที่มีการเติมน้ำยาฟารามีลักษณะไม่แตกต่างกัน โดยมีความเรียบเนียนของพื้นผิวใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยาฟารา พบว่าพื้นผิวของโฟมมีความเรียบเนียนมากขึ้น ดังรูปที่ 4.3

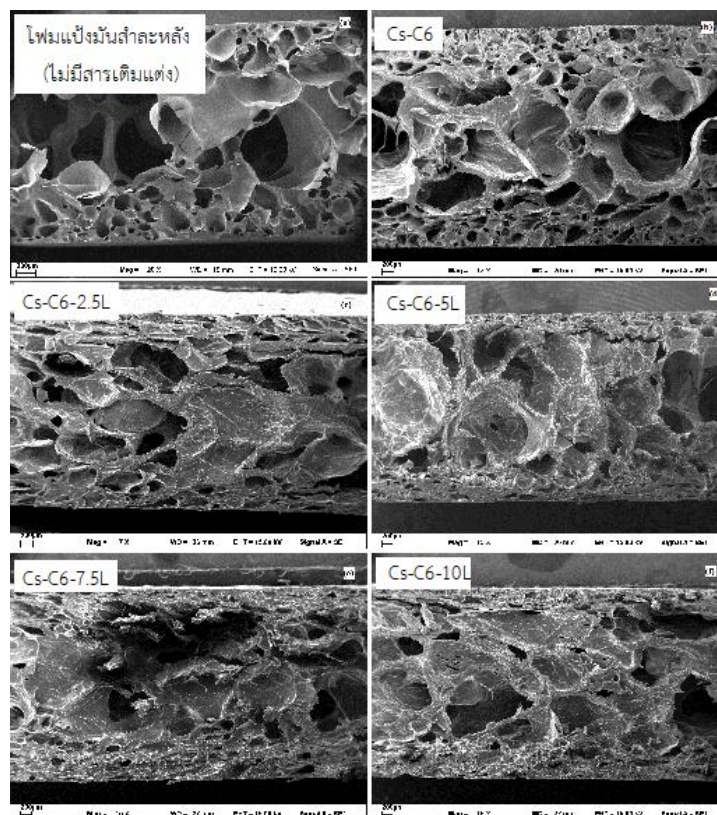
เมื่อศึกษารูปถ่ายภาคตัดขวางของโฟมตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 17 เท่า (ดังรูปที่ 4.4) พบว่าลำลีในตัวอย่างโฟมทุกสูตรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และบริเวณภาคตัดขวางของโฟม Cs-C6 พบว่ามี (เซลล์) รูพรุนขนาดเล็กค่อนข้างสม่ำเสมอบริเวณขอบ และยังมีรูพรุนขนาดใหญ่ตรงกลาง เมื่อเติมปริมาณน้ำยาฟาราในโฟม Cs-C6-2.5L และ Cs-C6-5L พบว่าสัดส่วนของรูพรุนขนาดเล็กมีน้อยลง ส่วนขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น แต่เมื่อเติมน้ำยาฟาราเพิ่มขึ้นพบว่าโฟม Cs-C-7.5L และ Cs-C-10L มีขนาดรูพรุนที่เล็กลงและมีผนังหนาขึ้น แต่มีความสม่ำเสมอของรูพรุนมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลของความหนาแน่น ซึ่งพบว่าโฟมที่มีน้ำยาฟารามากขึ้นจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

เมื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100 1000 และ 3000 เท่า (ดังรูปที่ 4) พบว่าผิวของโฟม Cs-C6 มีลักษณะเรียบเนียน เมื่อเติมน้ำยาฟาราผิวของโฟมยังเรียบเนียน และพบว่าผิวของโฟมที่เติมน้ำยาฟารามีความเรียบเนียนมากกว่าโฟม Cs-C6 อย่างไรก็ตามเมื่อ

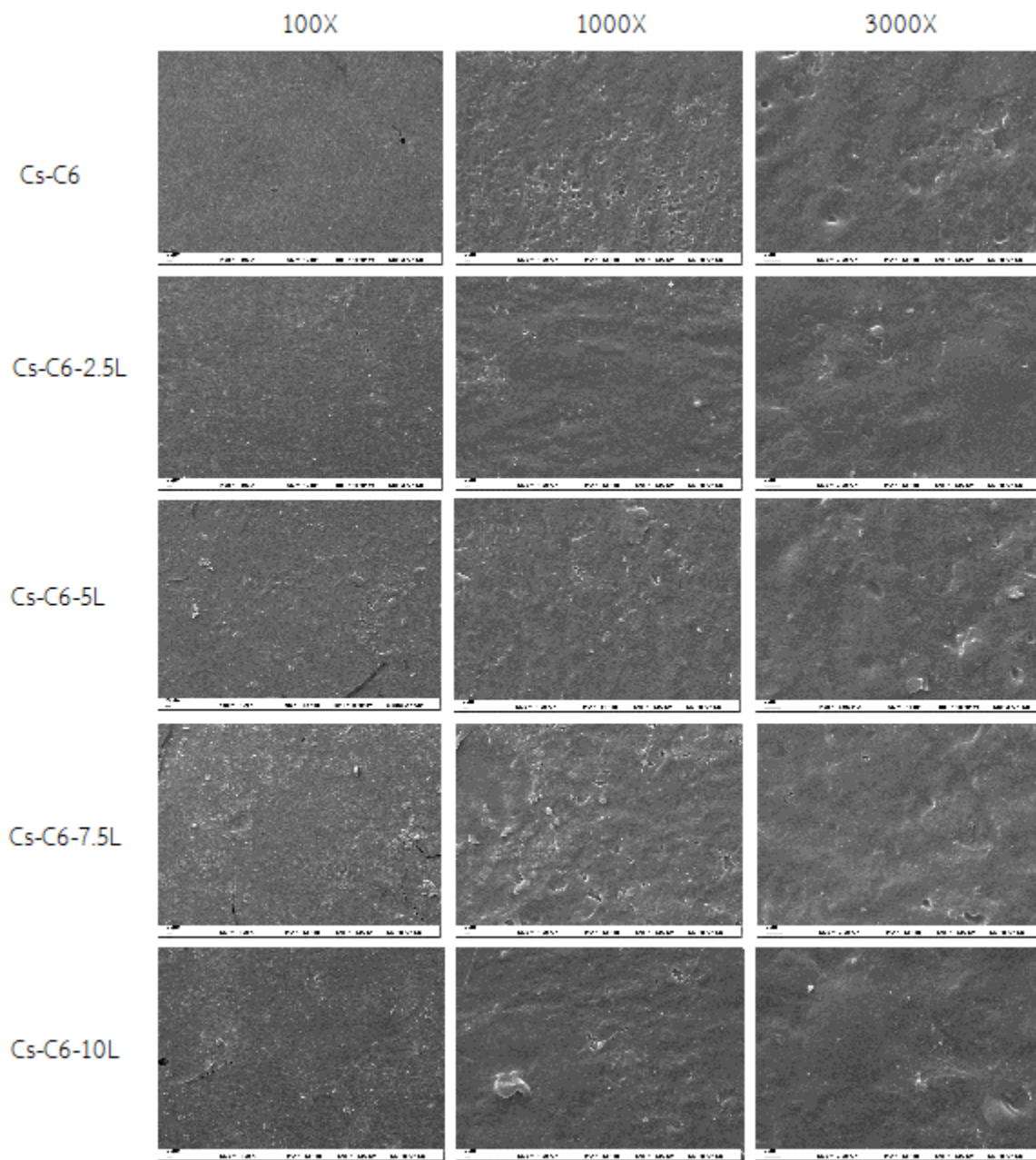
ปริมาณของน้ำยางพารามากขึ้นตั้งแต่ 5 ml ขึ้นไป พบว่าผิวโฟมมีความขรุขระเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นการกระจายตัวของเฟสน้ำยางพาราแยกตัวออกจากเฟสของแข็ง



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลแสดงลักษณะของโฟมสูตรเติมยางพาราที่ขึ้นรูปแล้วด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด



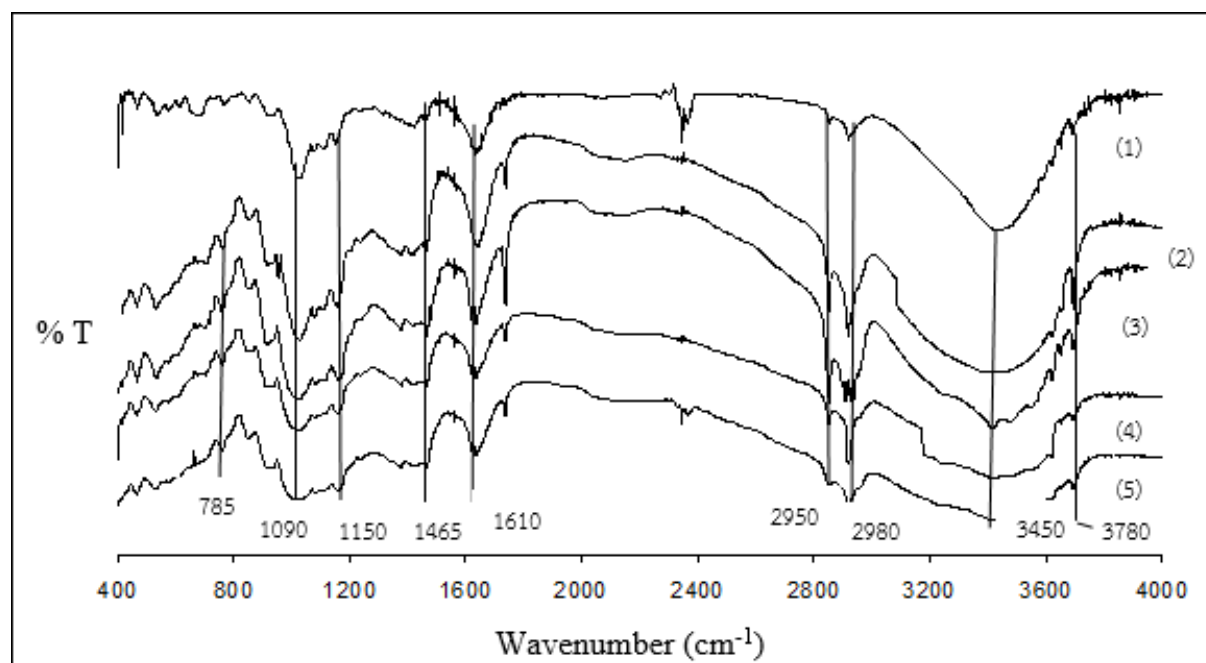
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของสำลีและน้ำยางพาราในภาคตัดขวางของเนื้อโฟม



รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโพนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100 1000 และ 3000 เท่า

4.2. การยืนยันโครงสร้างด้วยเทคนิค FT-IR

อินฟราเรดสเปกตรัมของโคมตัวอย่าง (1) CS-C6 (2) Cs-C6-2.5L (3) Cs-C6-5L (4) Cs-C6-7.5L และ (5) Cs-C6-10L ทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ที่ช่วงคลื่น $400-4000\text{ cm}^{-1}$ แสดงดังรูปที่ 4.6 โคมตัวอย่างแสดงพิกการสั่นของ OH-Stretching ของน้ำที่ 3450 cm^{-1} และ พิกการสั่น O-H Stretching ที่ 3780 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของสำลื่กับหมู่ฟังก์ชันในแป้ง (Vercelheze et al., 2012) พิกการสั่นของ C-H Stretching ที่ 2980 cm^{-1} เป็นพิกของหมู่ CH_2 ของสายโซ่หมู่แอลคิลที่พบในเส้นใย (Chung et al., 2004) พิกการสั่นของ C=H Stretching ที่ 2950 cm^{-1} เป็นพิกของโครงสร้างของกลูโคสในแป้ง (Lain et al., 2014, ฐิติรักษ์, 2555) นอกจากนี้ พิกการสั่นของ C=C Stretching ที่ 1610 cm^{-1} เป็นพิกของยางธรรมชาติเหลว นอกจากนี้ยังพบพิกของสารเติมแต่งตัวอื่นๆ ได้แก่ พิกการสั่นของ C=O ที่ 1465 cm^{-1} ของแมกนีเซียม สเตริยเรท (Javadzadeh et al, 2012) พิกการสั่นของ C=O ที่ 1150 cm^{-1} ของไซผึ้ง (Muscat et al., 2014) และพิกการสั่นของ C-O-C Stretching ที่ 1090 cm^{-1} ของกำร้กัม (Shahid et al., 2013) และพิกการสั่นของ C-H wagging ที่ 785 cm^{-1} เป็นพิกของหน่วยไอโซพรีนของน้ำยางธรรมชาติเหลว

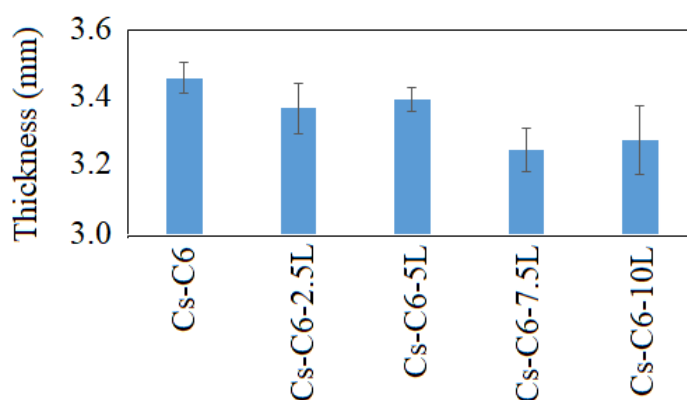


รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของโคม (1) CS-C6 (2) Cs-C6-2.5L (3) Cs-C6-5L (4) Cs-C6-7.5L (5) Cs-C6-10L

4.3 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นโพลีเมอร์

4.3.3 ความหนา

จากการทดลองใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ระบบดิจิตอลในการวัดความหนาของโพลีเมอร์ตัวอย่างที่มีการเติมสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน ได้ผลดังรูปที่ 4.7 พบว่า โพลีเมอร์ Cs-C6 มีความหนามากที่สุดเนื่องจากแปงเกิดการพองตัวเป็นรูโพรงมากที่สุด ส่วนโพลีเมอร์ที่เติมสารเติมแต่งที่มีน้ำยาฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้น พบว่ามีแนวโน้มของความหนาลดลงเนื่องจากทั้งสารและน้ำยาฆ่าเชื้อเป็นสารเพิ่มความหนืดให้กับของผสม ทำให้เกิดแรงกดทับในขณะขึ้นรูปแปงจึงพองตัวได้น้อยลง (ศิริินภา, 2556) ความหนาของตัวอย่างเมื่อแกะออกจากแปงจึงน้อยลงด้วย

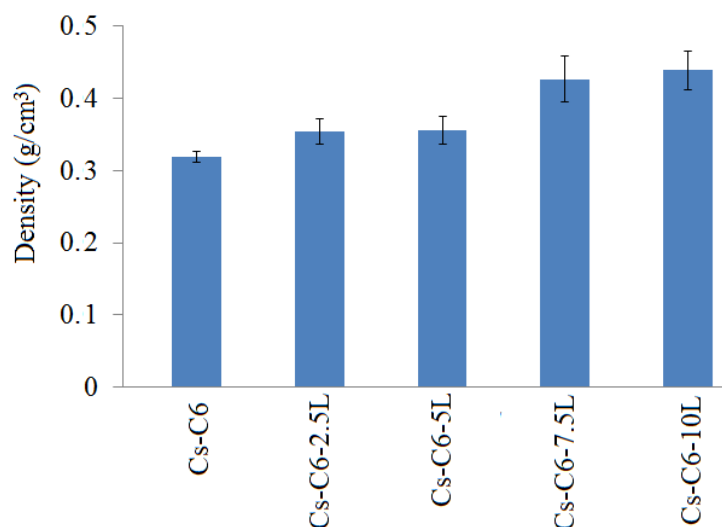


รูปที่ 4.7 ความหนาของโพลีเมอร์สูตรต่างๆ

4.3.2 ความหนาแน่น

คำนวณความหนาแน่นของโพลีเมอร์ตัวอย่างจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของแผ่นโพลีเมอร์ โดยการชั่งน้ำหนักแผ่นโพลีเมอร์ด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง และคำนวณหาปริมาตรของแผ่นโพลีเมอร์จากความกว้าง x ความยาว x ความหนา ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและสัดส่วนของน้ำยาฆ่าเชื้อในสูตรการขึ้นรูปโพลีเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.8 ข้อมูลจากรูปพบว่าโพลีเมอร์ Cs-C6 มีความหนาแน่นเท่ากับ $3.19 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^{-3}$ ซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับโพลีเมอร์สูตรอื่น เนื่องจากโพลีเมอร์แปงที่ไม่มีน้ำยาฆ่าเชื้อมีความหนืดของน้ำแปงผสมน้อยกว่าน้ำแปงที่ไม่มีน้ำยาฆ่าเชื้อ จึงเกิดการพองตัวได้ดีที่สุด และมีรูโพรงขนาดใหญ่ทำให้มีความหนาแน่นต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นของโพลีเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำยาฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำยาฆ่าเชื้อช่วยเพิ่มความหนืดให้กับน้ำแปงผสม ทำให้เกิดน้ำหนักกดทับในขณะขึ้นรูป โพลีเมอร์จึงพองตัวได้น้อยลงและมีรูพรุนน้อยตามไปด้วย (รายละเอียดดังแสดงใน

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา) ความหนาแน่นของโพนจึงเพิ่มขึ้น และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสอดคล้องกับปริมาณน้ำยางพาราที่เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของโพนสูตรต่างๆ

4.3.3 ความสามารถในการดูดซับน้ำ

การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption capacity) ของโพนตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำยางพาราต่างกัน ได้ผลดังรูปถ่ายดิจิทัลแสดงในรูปที่ 4.9 ข้อมูลจากรูปถ่ายพบว่าโพนทุกชนิดดูดซับน้ำค่อนข้างเร็ว และเกิดการขยายตัวขึ้นหลังจากน้ำถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้าง โดยโพน Cs-C6 เป็นโพนที่มีการเต็มสำลีเพียงอย่างเดียว มีการพองตัวและดูดซับน้ำอย่างเห็นได้ชัดหลังการสัมผัสน้ำ และเมื่อทิ้งไว้ในน้ำเป็นเวลา 30 นาที พบว่าโพนมีการพองตัวขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมงพบว่าโพนมีการบวมตัวและบิดเบี้ยวเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง พบว่าโพนไม่มีการบวมตัวเพิ่ม แสดงให้เห็นว่าการบวมตัวโดยการดูดซับน้ำของตัวอย่างโพนอาจเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว

เมื่อเติมน้ำยางพารา พบว่าโพน Cs-C6-2.5L มีการบวมและดูดซับน้ำมากขึ้นหลังจากแช่ในน้ำเป็นเวลา 30 นาที นอกจากนี้ยังพบว่า การบวมตัวเกิดที่ขอบของตัวอย่างมากกว่าตรงกลางของแผ่นโพน เนื่องจากที่ขอบสี่ส่วนของเซลล์ซึ่งมีรูพรุนสัมผัสน้ำโดยตรง ส่วนบริเวณกลางแผ่น พื้นผิวของโพนเรียบเนียนและมัน จึงดูดซับน้ำ และน้ำ

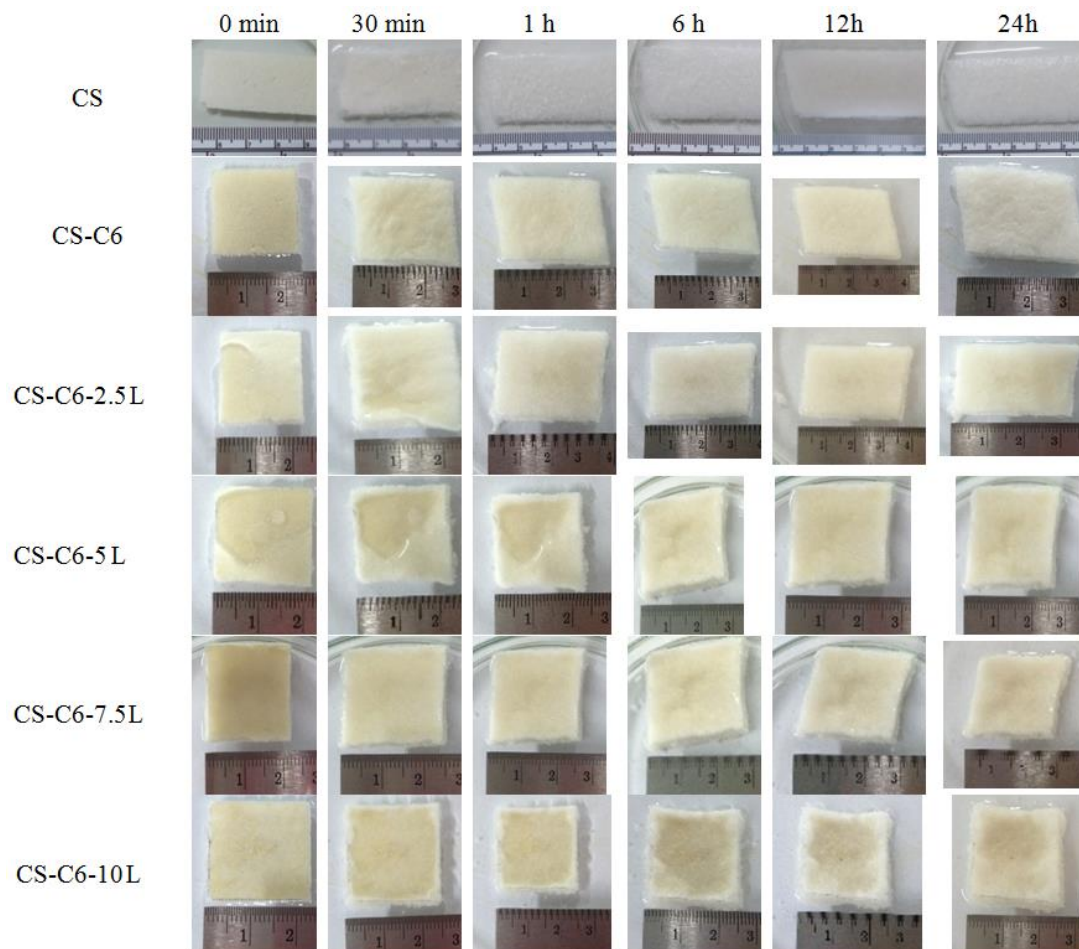
แพร่กระจายเข้ามาได้ยากกว่า เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมงพบว่าโพนมีการบวมตัวมากขึ้น แต่การบวมไม่เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางพาราพบว่าโพนมีความทนต่อน้ำเพิ่มขึ้น และลักษณะการบวมตัวเกิดที่ขอบมากกว่าตรงกลางของแผ่น โพน Cs-C6-5L มีการบวมตัวและดูดซับน้ำมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง บิดเบี้ยวเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง การบวมเท่าเดิมเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ส่วนโพน Cs-C6-7.5L มีการบวมตัวและดูดซับน้ำมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง พบว่าโพนบวมตัวและเกิดการบิดเบี้ยวเมื่อเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมง การบวมเท่าเดิมเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ส่วนโพนที่มีการบวมตัวและดูดซับน้ำน้อยที่สุดคือ โพน Cs-C6-10L เป็นโพนที่มีการเติมสำลีและน้ำยางพารา 10 mL เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำในสำลีเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งดึงดูดกับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้น้อยลง และน้ำยางพารามีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำทำให้น้ำไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่แผ่นโพนได้ การเติมน้ำยางพาราในปริมาณมากขึ้นจึงเป็นการเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้แก่โพน จึงเกิดการดูดซับน้ำได้น้อยลง

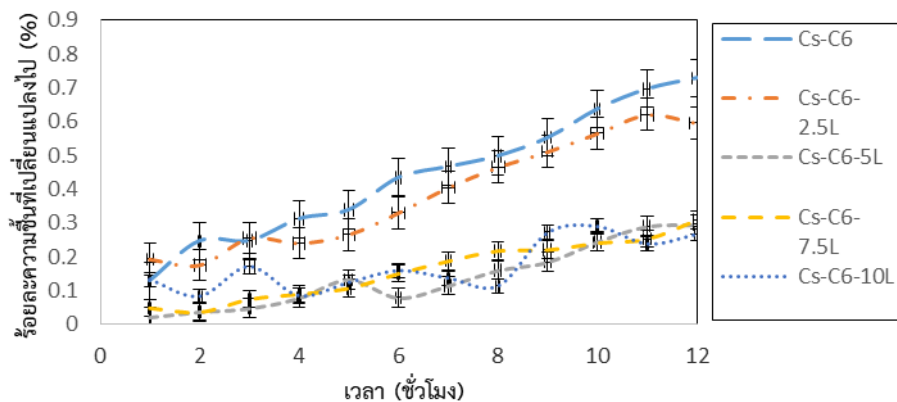
4.3.4 ความสามารถในการดูดซับความชื้น

การทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้น (Moisture adsorption) ของแผ่นโพนตัวอย่าง ทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100 % เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยวิธีชั่งน้ำหนักได้ผลแสดงในรูปที่ 4.10 (1)-(4) เมื่อเปรียบเทียบที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งหมด พบว่าที่โพนทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นไม่มากในหนึ่งชั่วโมงแรก จากนั้นจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง ซึ่งสังเกตได้จากกราฟว่ามีการดูดซับเพิ่มมากขึ้นทุกระดับความชื้นสัมพัทธ์ และที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ 100 % โพนสามารถดูดความชื้นได้น้อยที่สุดและมากที่สุดตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (สุรพงษ์, 2557)

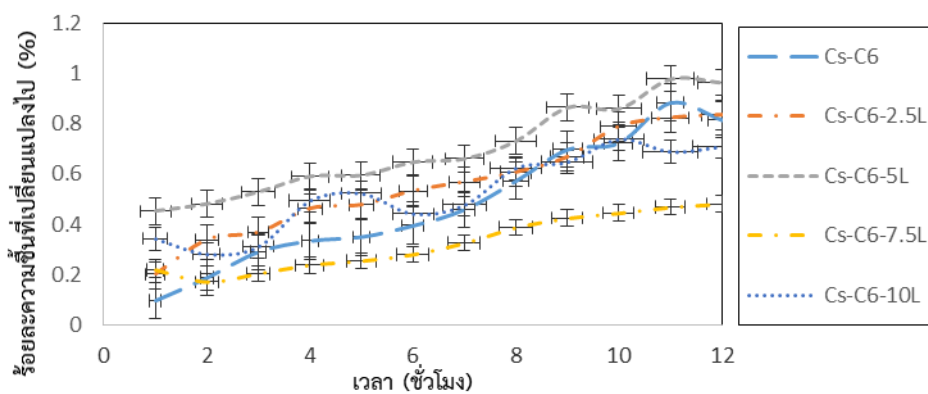
กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับความชื้นของแต่ละตัวอย่างโพนที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100 % แสดงในรูปที่ 4.11 (1)-(5) พบว่าโพน Cs-C6 มีความสามารถในการดูดซับน้ำมากที่สุด เพราะในแป้งมีองค์ประกอบของหมู่ไฮดรอกซิลในอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่ชอบน้ำอยู่ จึงดูดซับน้ำได้ดี และเมื่อมีการเติมน้ำยางพารา พบว่ามีแนวโน้มในการดูดซับน้ำลดลง อาจเป็นเพราะน้ำยางพารามีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ จึงไม่รวมตัวกับน้ำ ทำให้การดูดซับน้ำลดลง (Shey et al., 2006) อย่างไรก็ตามที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 75% มีการดูดซับความชื้นที่ไม่ได้เป็นไปตามแนวโน้ม เนื่องจากอาจมีปัจจัยอื่นๆ นอกเหนือการควบคุมของผู้ทดลอง



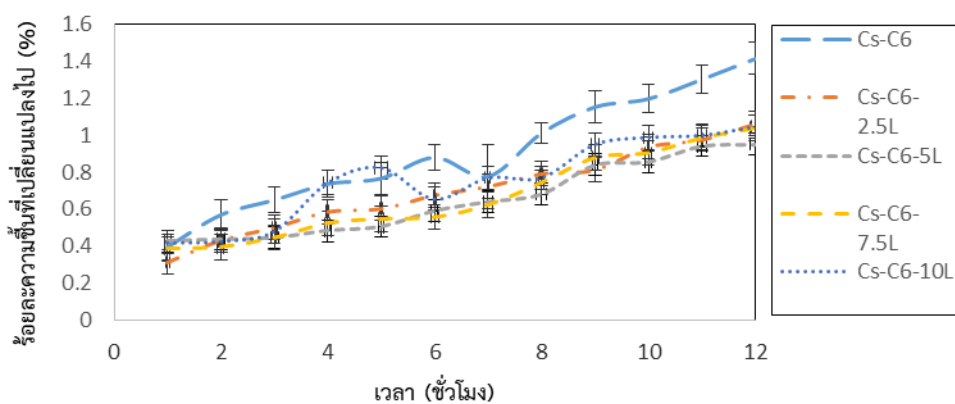
รูปที่ 4.9 การบวมและดูดซับน้ำของตัวอย่างโพลีเมอร์ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง



(1) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 %

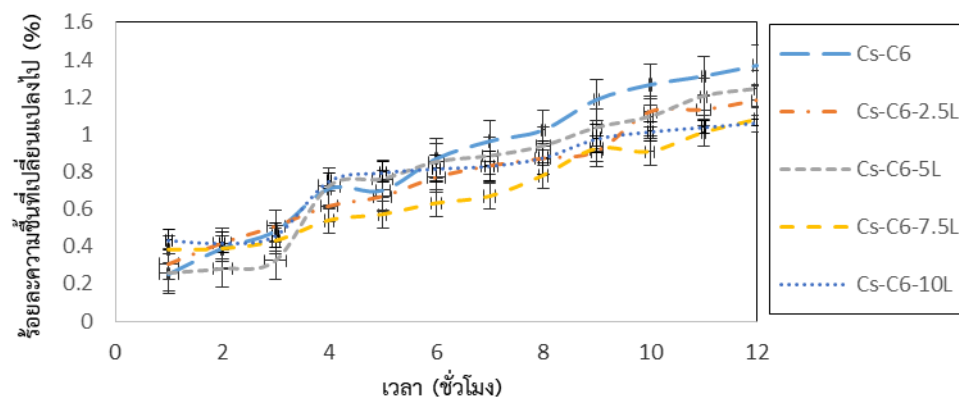


(2) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50 %



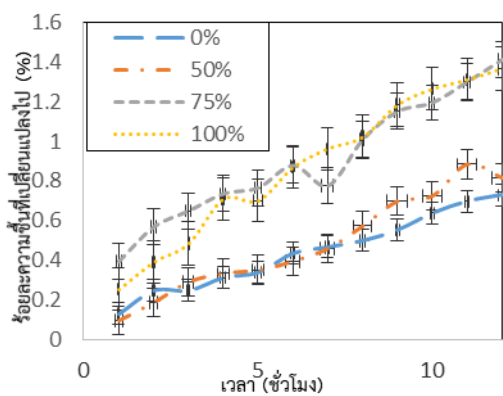
(3) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 75 %

รูปที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100%

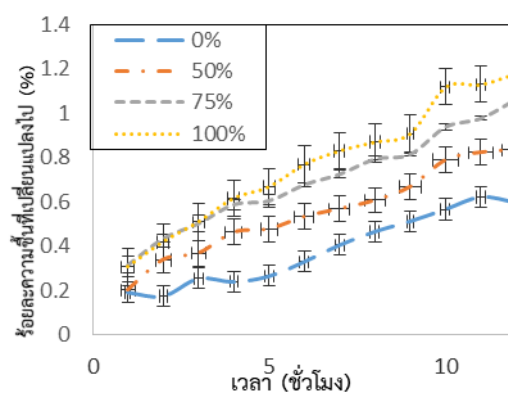


(4) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโพลีเมอร์ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 100 %

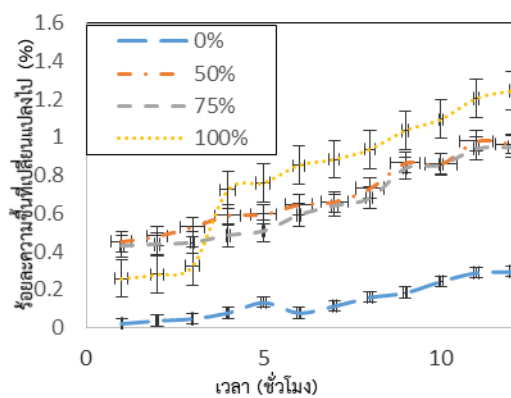
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโพลีเมอร์ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100% (ต่อ)



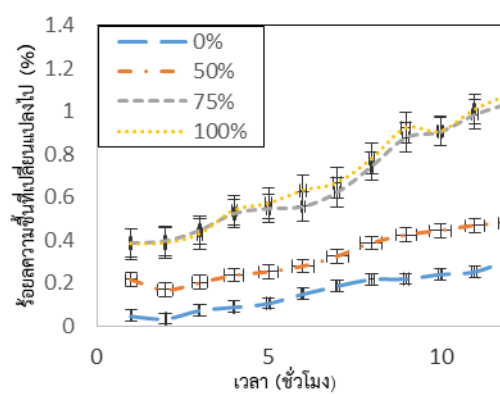
(1) Cs-C6



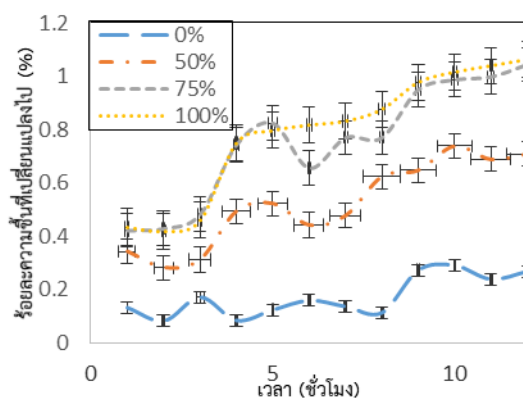
(2) Cs-C6-2.5L



(3) Cs-C6-5L



(4) Cs-C6-7.5L

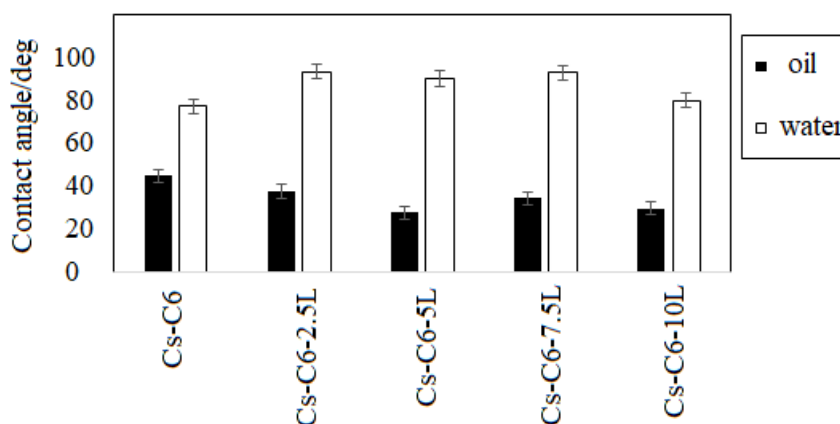


(5) Cs-C6-10L

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับความชื้นของโพนชนิดเดียวกันที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100%

4.4 ศึกษาคุณสมบัติของของเหลวบนผิวโพลีเมอร์

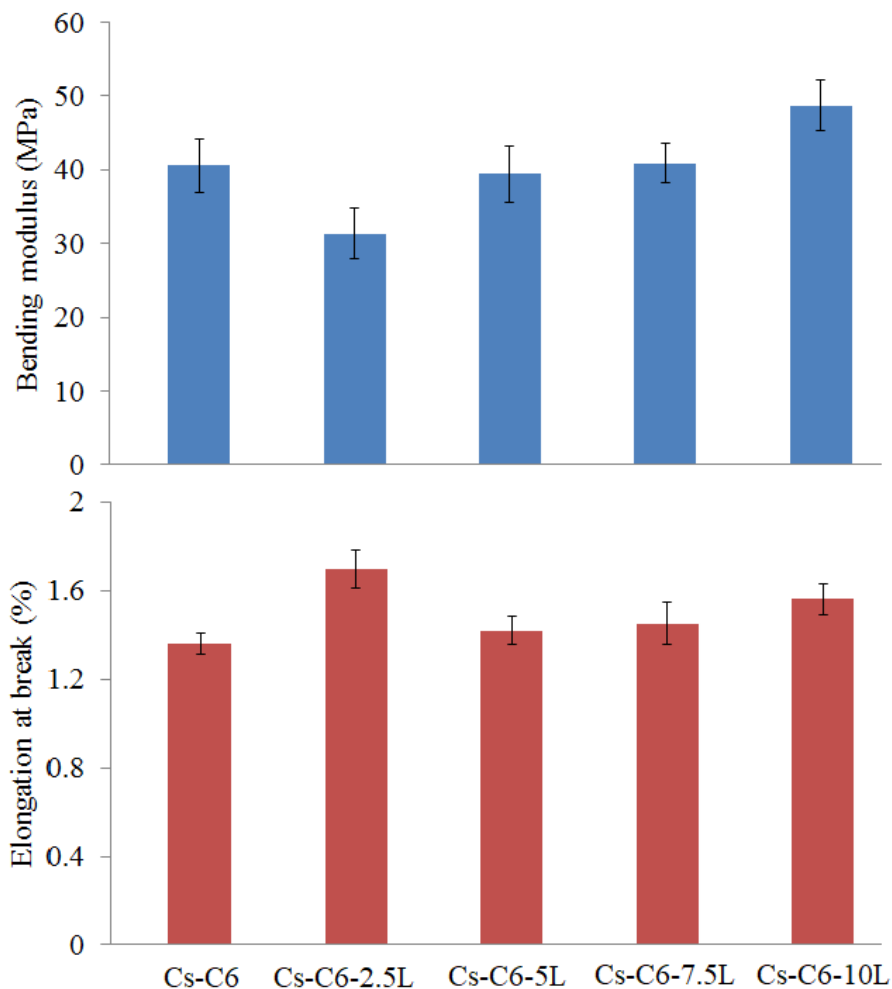
การทดสอบคุณสมบัติของของเหลวบนผิวแผ่นโพลีเมอร์ตัวอย่าง ได้ผลแสดงในรูปที่ 4.12 จากรูปพบว่าโพลีเมอร์ชนิดมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวใกล้เคียงกัน ยกเว้นโพลีเมอร์ Cs-C6 ซึ่งมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำกว่าโพลีเมอร์ชนิดอื่นๆ แต่มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันสูงกว่าโพลีเมอร์ชนิดอื่น แสดงให้เห็นว่าโพลีเมอร์ Cs-C6 มีการเปียกของน้ำได้มาก หรือมีสมบัติชอบน้ำมากกว่าโพลีเมอร์ชนิดอื่น แต่มีการเปียกน้ำมันได้น้อยกว่าชนิดอื่น นั่นคือมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากกว่าโพลีเมอร์ชนิดอื่นนั่นเอง เมื่อเติมน้ำอย่างพารา พบว่าการเปียกน้ำของพื้นผิวโพลีเมอร์น้อยลง เห็นได้จากค่ามุมสัมผัสของน้ำที่สูงขึ้น โพลีเมอร์จึงมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำอย่างพาราซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำทำให้ผิวของโพลีเมอร์มีความมันและลื่นขึ้น หยดน้ำซึมลงสู่ผิวของโพลีเมอร์ได้ยากขึ้น ส่วนมุมสัมผัสของน้ำมัน พบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมน้ำอย่างพารา ซึ่งอาจเป็นเพราะโพลีเมอร์มีผิวที่มีความมันมากขึ้น ประกอบกับไม่มีขี้ผึ้งเพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดความเข้ากันได้ของผิวโพลีเมอร์และหยดน้ำมันมีมากขึ้น



รูปที่ 4.12 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ และหยดน้ำมันของตัวอย่างโพลีเมอร์

4.5 สมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์

จากการทดสอบความทนต่อแรงดัดของโพลีเมอร์ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 15 ชิ้น โดยใช้วิธีทดสอบความแข็งแรงแบบรับแรงสามจุด โดยกำหนดระยะระหว่างฐานที่รับแรง (Span) 60 mm อัตราเร็วในการกด 1 mm/sec ส่วนวัดแรง (Load cell) 50 N กดด้วยอัตราเร็วคงที่จนกระทั่งชิ้นงานหัก วัดค่าโมดูลัสของยัง ความเครียด ณ จุดขาด ความเค้น ณ จุดขาด ความเครียดสูงสุด และความเค้นสูงสุด ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ค่ามอดูลัสแรงดัด และระยะยืด ณ จุดขาด ของตัวอย่างโฟม

ค่ามอดูลัสแรงดัด (Bending modulus) ของตัวอย่างโฟมแสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าโฟม Cs-C6 มีค่ามอดูลัสแรงดัดเท่ากับ 40 ± 10 MPa เนื่องจากโฟมสูตรนี้มีการเติมสำลีเป็นสารเสริมแรง ทำให้โฟมมีความเหนียวและความแข็งแรงมากขึ้น (Prachayawarakorn and Pomdage, 2014) เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสำลีและแป้ง และเมื่อเติมน้ำยารพพบว่า ค่ามอดูลัสแรงดัดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญในโฟม Cs-C6-2.5L เนื่องจากโครงสร้างของยางพารามีความยืดหยุ่นมากกว่าแป้ง อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำยารพ พบว่าค่ามอดูลัสแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเพิ่มตามปริมาณของน้ำยารพ ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมขวางของโมเลกุลเป็นร่างแหของน้ำยารพเกิดมากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำยารพเพิ่มขึ้น โครงสร้างแบบร่างแหสามมิติของโมเลกุลยางพาราที่เกิดขึ้นจึงเพิ่มความแข็งแรงให้โฟม ทำให้มีความสามารถทนต่อแรงดัดได้ดี (Shey et al., 2006)

ความเครียด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของตัวอย่างโพลีเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากรูปพบว่าโพลีเมอร์ Cs-C6 มีความเครียด ณ จุดขาดต่ำที่สุด แต่เมื่อมีการเติมน้ำอย่างพารา 2.5 มล. ค่าความเครียด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอย่างพารามีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ง่าย จึงช่วยลดความแข็งแรงของโพลีเมอร์ ทำให้มีค่าความเครียดของความสัมพันธ์ความต้านทานแรงกดมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มพาราปริมาณมากขึ้นกลับพบว่าโพลีเมอร์มีค่าความเครียด ณ จุดขาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอย่างพาราเกิดการเชื่อมขวางโดยปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเพิ่มขึ้นจึงมีความยืดหยุ่นลดลง

4.6 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

ในการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพ คณะผู้วิจัยได้เลือกติดตามการย่อยสลายทางชีวภาพของโพลีเมอร์ Cs-C6-7.5L ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่มีลักษณะทางกายภาพ และสัณฐานวิทยาที่ดี มีความสามารถในการทนต่อการซึมผ่านของของเหลวบนผิวโพลีเมอร์ได้ดี และมีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่าโพลีเมอร์ชนิดอื่น ดินก่อนทดสอบมีค่า pH เท่ากับ 4.6 อุณหภูมิของห้องในช่วงการติดตามการย่อยสลายอยู่ระหว่าง 23-29 °C และอุณหภูมิของดินในช่วงเวลาการติดตามการย่อยสลายอยู่ระหว่าง 22-28 °C การบันทึกผลศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพทำโดยการติดตามลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลเพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นโพลีเมอร์ในเวลาต่างๆ เนื่องจากโพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นดูดซับน้ำในดินปริมาณมาก ทำให้ไม่สามารถแยกเอาดินหรือชีวมวลในดินออกจากโพลีเมอร์ได้หมด อนึ่งเนื่องจากเมื่อย่อยสลายไประยะหนึ่งเศษของโพลีเมอร์ที่แตกออกจะปนไปกับดินและแยกด้วยตาเปล่าได้ยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถวิเคราะห์การย่อยสลายของโพลีเมอร์โดยวิธีชั่งน้ำหนักที่หายไปได้ ผลการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของโพลีเมอร์ตัวอย่าง Cs-C6-7.5L แสดงดังรูปที่ 4.14

จากการสังเกตพบว่า ก่อนฝังดินโพลีเมอร์ตัวอย่างมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบสีขาวปนเหลืองเล็กน้อย เมื่อฝังดินเป็นเวลา 1 วัน พบว่าโพลีเมอร์เริ่มเกิดการดูดซับความชื้นในดิน แต่ยังคงมีความเสถียรทางรูปร่าง อย่างไรก็ตามพบว่ามีเศษดินติดอยู่บนโพลีเมอร์เล็กน้อย แต่ยังสามารถมองเห็นเนื้อโพลีเมอร์สีขาวได้ เมื่อฝังดินครบ 1 สัปดาห์พบว่าโพลีเมอร์ดูดซับน้ำเข้าไปมาก จนเกิดการขยายตัวและเสียรูปร่าง โพลีเมอร์บิดเบี้ยวแต่ยังคงมีลักษณะเป็นแผ่น และเมื่อฝังดินครบ 4 สัปดาห์ โพลีเมอร์บวมตัวขึ้นมาก มีการปริแตกและหลุดเป็นชิ้นเล็กๆ บริเวณขอบของตัวอย่าง และเหลือส่วนที่เป็นแผ่นใหญ่ตรงกลาง จากนั้นจะสังเกตเห็นการปริแตกและหลุดเป็นชิ้นเล็กๆ บริเวณขอบของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงสัปดาห์ที่ 7 แสดงให้เห็นว่าวิธีการหมักช่วยปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำของโพลีเมอร์ ทำให้การย่อยสลายของโพลีเมอร์โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสเกิดได้ช้าลงเมื่อเทียบกับโพลีเมอร์ที่ไม่เติมน้ำอย่างพารา ซึ่งรายงานโดยกมลเนตร (2556) ว่าโพลีเมอร์จากแป้งมันสำปะหลังมีการย่อยสลายในดินได้ดีมาก โพลีเมอร์แตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ จนไม่สามารถแยกออกจากสารชีวมวลในดินได้ และรวมเป็นเนื้อเดียวกับดินได้ภายในเวลา 4 สัปดาห์



0 วัน



1 วัน



2 วัน



3 วัน



4 วัน



5 วัน



6 วัน



7 วัน



2 สัปดาห์



3 สัปดาห์



4 สัปดาห์



5 สัปดาห์



6 สัปดาห์



7 สัปดาห์

รูปที่ 4.14 การย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมที่มีส่วนประกอบคือ Cs-C6-7.5L

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณน้ำยางพาราต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และพฤติกรรมการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพของ ผลิตภัณฑ์โฟมจากแป้งมันสำปะหลังที่ขึ้นรูปโดยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่ง โดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบอัด คณะผู้วิจัยได้ทำการขึ้นรูปแผ่นโฟมจากแป้งมันสำปะหลังโดยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่ง โดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบอัด มีน้ำเป็นตัวกลาง และสารก่อโฟม ยืนยันโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนส์ฟอรัม (FTIR) ศึกษาผลของปริมาณน้ำยางพาราต่อสมบัติทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น มุมสัมผัสของน้ำและน้ำมัน การดูดซับน้ำและความชื้น เป็นต้น สมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal tensile tester และสุดท้ายได้ศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังโดยวิธีการฝังดิน ได้ข้อสรุปดังนี้

สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟมแป้งที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังและมีการเติมสารเติมแต่ง โดยมีปริมาณสำลีและยางพาราที่ส่วนประกอบแตกต่างกันโดยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่ง คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 220 °C ความดัน 1000 atm และเวลา 4.30 นาที ผลิตภัณฑ์โฟมที่ได้มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง $3.19 \times 10^{-3} - 4.27 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ และมีความหนาอยู่ระหว่าง 3.25–3.45 mm โดยโฟมที่มีปริมาณน้ำยางพารามากกว่าจะมีความหนาแน่นสูงกว่า และความหนาน้อยกว่า โฟมที่ใส่ยางพาราน้อยกว่า และส่วนผสมทั้งหมดที่ใส่เพื่อปรับปรุงคุณภาพของแป้งนั้น ไม่ทำปฏิกิริยากันเอง เพียงแต่มีอันตรกิริยาต่อกันเท่านั้น การศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าสำลีมีการกระจายตัวในเนื้อโฟมอย่างสม่ำเสมอ และโฟมมีรูพรุนขนาดเล็กที่ขอบและรูพรุนขนาดใหญ่ตรงกลาง การเติมน้ำยางพาราทำให้สัดส่วนของรูพรุนขนาดเล็กมีน้อยลง ส่วนขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และขนาดรูพรุนเล็กลงและมีผนังหนาขึ้นเมื่อเติมน้ำยางพาราในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

เมื่อแช่น้ำโฟมทุกชนิดเกิดการบวมตัวและดูดซับน้ำแปรผันตามเวลา และการเพิ่มปริมาณน้ำยางพาราทำให้การบวมตัวและดูดซับน้ำของโฟมลดน้อยลง จึงนับว่าน้ำยางพารามีผลช่วยให้โฟมคงรูปร่างได้ดีขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซับความชื้นของตัวอย่างโฟม ซึ่งพบว่าการเติมน้ำยางพารามีผลให้โฟมมีการดูดซับความชื้นลดลงเช่นกัน ผลการศึกษามุมสัมผัสของของเหลวบนผิวโฟม พบว่าโฟมทุกชนิดมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำลงบนผิว

โพน์ใกล้เคียงกัน และเมื่อเติมน้ำยางพารา พบว่าโพน์มีค่ามอดูลัสของน้ำที่สูงขึ้น แต่มีค่ามอดูลัสของน้ำมันค่าลดลง

การเติมสารีมีผลให้ค่าโมดูลัสแรงดัด (Bending modulus) ของโพน์เพิ่มขึ้น และการเติมน้ำยางพาราปริมาณเล็กน้อยทำให้ค่าโมดูลัสแรงดัดจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเติมน้ำยางพาราในปริมาณมากขึ้น (มากกว่า 2.5 mL) ค่ามอดูลัสแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของน้ำยางพาราที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางของโมเลกุลเป็นร่างแหของน้ำยางพาราเกิดมากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของโพน์เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อมีการเติมน้ำยางพารา อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มยางพาราปริมาณมากขึ้นกลับพบว่าโพน์มีค่าความเครียด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากโมเลกุลของยางพาราเกิดการเชื่อมขวางโดยปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเพิ่มขึ้น

ยางธรรมชาติช่วยปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำของโพน์แข็ง ทำให้การย่อยสลายของแข็งโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสเกิดได้ช้าลงเมื่อเทียบกับโพน์แข็งที่ไม่เติมน้ำยางธรรมชาติ โพน์แข็งมีการย่อยสลายในดินผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสหลังจากการดูดซับน้ำจนเกิดการขยายตัวและเสียรูปร่าง จนเกิดการปริแตกและหลุดเป็นชิ้นเล็กๆ ภายในระยะเวลา 3 สัปดาห์ การปริแตกและหลุดออกของเนื้อโพน์บริเวณขอบของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาในการฝังดินยาวนานขึ้น สุดท้ายโพน์จะแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ และรวมเป็นเนื้อเดียวกับดินจนไม่สามารถแยกออกจากสารชีวมวลในดินได้

เอกสารอ้างอิง

การยางแห่งประเทศไทย. 2559. http://www.rubber.co.th/rubber2012/rubberprice_yr.php (สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 7 กันยายน 2559)

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กมลเนตร สังข์บัวแก้ว. 2556. โครงสร้างและสมบัติของโพลีแป้งที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นองค์ประกอบหลัก. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

จารุวรรณ อัมพฤกษ์. 2555. การวิเคราะห์เส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์ในงานทางนิติวิทยาศาสตร์. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยศิลปากร.

จันทมัย สุวรรณประทีป. (2547). การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี

จรรยา สุบรรณณ์. ตำรับอาหาร ชุดพิเศษ. กทม. ศรีสยามการพิมพ์. 2542.

ชไมพร สำเร็จศิลป์. 2556. โครงสร้างและสมบัติของโพลีแป้งที่มีแป้งข้าวโพดเป็นองค์ประกอบหลัก. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

ฐิติพร หลักดี. 2556. โครงสร้างและสมบัติของโพลีแป้งที่มีแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวเป็นองค์ประกอบหลัก. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

ฐิติรักษ์ วรรณพัฒน์ และคณะ. (2555). คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเทคนิคการใช้ต่างในแอลกอฮอล์. หลักสูตรเภสัชศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเภสัชภัณฑ์, คณะเภสัชศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

นิวัฒน์ ศรีสวัสดิ์ ภิญญา พาณิชภัณฑ์ และพินทิพ รื่นวงษา. (2558). ก่อตั้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. สื่อบทเรียนอิเล็กทรอนิกส์มหัศจรรย์นาโนเทคโนโลยี, สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล

ดุขฎี อุตภาพ. (2558). บทที่ 2 เคมีและสมบัติของแป้ง. คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, สาขาวิชาเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2547). เซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 5 (ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 526 หน้า

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. (2553). ศูนย์ข้อมูลเครือข่ายอาหารครบวงจร วันที่ค้นข้อมูล 22 กันยายน 2561. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki>

พรพิณ บุญพรหม. (2552). น้ํายางพารา เป็นสิ่งมหัศจรรย์. บทความจาก Gotoknow.org (ชุมชนออนไลน์เพื่อการจัดการความรู้)

วรัญญู ศรีเดช. (2557). สังเคราะห์วัสดุกันกระแทกที่ผลิตจากซีลี้อย น้ํายางและแป้งมันสำปะหลัง. วันที่ค้นข้อมูล 11 พฤศจิกายน 2558, เข้าถึงได้ http://elibrary.trf.or.th/project_content.asp?PJID=RDG5150069

วีระเดช ศิลป์สัมฤทธิ์. (2543). สังเคราะห์ยางธรรมชาติผสมจากน้ํายางธรรมชาติกับแป้งเปียกมันสำปะหลัง เข้มข้น. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์ (ปิโตรเลียมและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บัณฑิตวิทยาลัย.

ธีรธรรมย์ เลิศลัทธกรณ, กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง. 2553. วันที่ค้นข้อมูล 20 สิงหาคม 2561 เข้าถึงได้ <http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/4/3/>

เรียนรุ่งานพลาสติก. (2551). เครื่องขึ้นรูปแบบอัด. วันที่ค้นข้อมูล 11 พฤศจิกายน 2558, เข้าถึงได้ http://mold.net46.net/index.php?option=com_content&task=view&id=10&Itemid=9

ศิริรญา นิवासประกฤติ. 2556. โครงสร้างและสมบัติของโฟมแป้งที่มีแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเหนียวเป็นองค์ประกอบหลัก. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2558). เส้นใย. วันที่ค้นข้อมูล 30 ตุลาคม 2558, เข้าถึงได้ http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.html

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2558). พลาสติกย่อยสลายได้. วันที่ค้นข้อมูล 30 ตุลาคม 2558, เข้าถึงได้ http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html

ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เพื่อมาตรฐานและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. (2556). Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). วันที่ค้นข้อมูล 30 ตุลาคม 2558, เข้าถึงได้ <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/chemistry/23-2013-09-04-02-40-21>

สุรพงษ์ มีชัย. (2557). สมบัติและการย่อยสลายโดยวิธีชีวภาพของโฟมที่มีแป้งข้าวโพดเป็นองค์ประกอบหลัก. ภาคนิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

อุดม จิระเศวตกุล และสุทธิชัย สุทธิวาริรักษ์. (2558). ไข่มิ่ง. กลุ่มงานอนุรักษ์และขยายพันธุ์ผึ้งกึ่งกึ่งป้องกันและกำจัดศัตรูพืช, กรมส่งเสริมการเกษตร

Carbohydrate technology. (2557). บทที่ 2 เคมีและสมบัติของแป้ง. วันที่ค้นข้อมูล 30 ตุลาคม 2258, เข้าถึงได้จาก http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_4.html

Chung, C., Lee, M., Choe, E. K., (2004). Characterization of cotton fabric scouring by FT-IR ATR spectroscopy, Carbohydrate Polymers, 58(4), 417-420.

Cinelli, P., Chiellini, E., Lawton, J.W., and Imam, S.H. (2006). Foamed articles based on potato starch, corn fibers and poly(vinyl alcohol). Polymer Degradation and Stability, 91, 1147-1155.

Eustathopoulos, N.; Nicholas, M.G. and Drevet B. (1999). Wettability at high temperatures. Oxford, UK: Pergamon.

Franz, R. and Welle, F. (2003). Recycling packaging materials, R. Ahvenainen (Ed.), Novel food packaging techniques, E-Publishing Inc., Cambridge, pp. 497-515.

Horrocks, A.R., and Anand, S.C., (2000) "Handbook of Technical Textiles", The Textile Institute, Woodhead Publishing Limited.

Jalvandi, J. (2016). Novel chemical and physical approaches for sustainable drug release from biodegradable electrospun nanofibres, Ph.D. Thesis, School of Fashion and Textiles, College of Design and Social Context, RMIT University.

Jaotatid, S., Sanhawong, W., and Kaewpirom, S. (2016). Effect of PP/cotton fiber ratio on degradation behavior of cassava starch foam. presented at Pure and Applied Chemistry International Conference 2016 (PACCON 2016), pp. 1192-1196, 9-11 February 2016, Bangkok International Trade and Exhibition Centre (BITEC) Bangkok, Thailand.

Javadzadeh, Y., Adibkia, K., Bozorgmehr, Z., and Dastmalchi, S. (2005). Evaluating retardation and physicochemical properties of CO-ground Mixture of Na-diclofence with magnesium stearate. Powder technology, 218, 51-56.

Kaisangsri, N., Kerdchoechuen, O., and Laohakunjit, N. (2012). Biodegradation foam tray from cassava starch blended with natural fiber and chitosan. *Industrial Crops and Products*, 37, 542-546.

Kaisangsri, N., Kerdchoechuen, O., Laohakunjit, N., and Pratheepthinthong, S. (2009). Development of Cassava Starch Based Foam by Adding the Agent. *Journal of Agricultural Science*, 40, 113-116.

Kljun, A., El-Dessouky, H.M., Benians, T.A. S., Goubet, F., Meulewaeter, F., Knox, J.P., and Blackburn, R.S. (2014). Analysis of the physical properties of developing cotton fibres. *European Polymer Journal*, 51; 57-68.

Kong, F., and Singh, R.P. (2016). Chemical Deterioration and Physical Instability of Foods and Beverages in *The Stability and Shelf Life of Food* (2nd Ed), P. Subramaniam (Ed.), Pp43-76.

Lian, X., Wang, C., Zhang, K., and Li, L. (2014). The retrogradation properties of glutinous rice and buckwheat starches as observed with FT-IR, ¹³C NMR and DSC. *International Journal of Biological Macromolecules*, 64, 288-293.

Lourdin, D., Bizot, H., and Colonna, P. (1997a). Antiplasticization in starch-glycerol film. *Journal of Applied Polymer Science*, 64, 1047-1053.

Lourdin, D., Coignard, L., Bizot, H., and Colonna, P. (1997b). Influence of equilibrium relative humidity and plasticizer concentration on the water content and glass transition of starch materials. *Polymers*, 38, 5401-5406.

Matsuda, D.K.M., Vercelheze, A.E.S., Carvalho, G.M., Yamashita, F., and Mali S. (2013). Baked foams of cassava starch and organically modified nanoclays. *Industrial Crops and Products*, 44, 705-711.

Muscat, D., Tobin, J. M., Gao Q., and Adhikari, B. (2014). Understanding the distribution of natural wax in starch-wax film using synchrotron-base FTIR (S-FTIR). *Carbohydrate Polymer*, 102, 125-135.

Niwaspragit, S., Rattanasak, U., and Kaewpirom, S. (2016). Effects of Kaolin Content on Properties of Biofoam Based on Corn Starch/Glutinous Rice Flour Blend. *Journal of Industrial Technology*, 12, 35-44. (In Thai).

Prachayawarakorn, J., and Pomdage, W. (2014). Effect of carrageenan on properties of biodegradable thermoplastic cassava starch/low-density polyethylene composites. *Materials & Design*, 61, 264-269.

Salgado, P.R., Schmidt, V.C., Molina Ortiz, S.E., 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.

Sanhawong, W., Banhalee, P., Boonsang, S., and Kaewpirom, S. (2017). Effect of concentrated natural rubber latex on the properties and degradation behavior of cotton-fiber-reinforced cassava starch biofoam. *Industrial Crops & Products*, 108, 756-766.

Shahid, M., Bukhari, S.A., Gul, Y., Munir, H., Anjum, F., Zuber, M., Jamil, T., and Zia, K.M. (2013). Graft polymerization of guar gum with acryl amide irradiated by microwave for colonic drug delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 62, 172-179.

Sharfrin, E.; Zisman, and William A. (1960). "Constitutive relations in the wetting of low energy surfaces and the theory of the retraction method of preparing monolayers". *The Journal of Physical Chemistry* 64 (5): 519–524.

Shey, J., Imam, S.H., Glenn, G.M., and Orts, W.J. (2006). Properties of baked starch foam with natural rubber latex. *Industrial Crops & Products*, 24, 34–40.

Soykeabkaew, N., Thanomsilp, C., and Suwantong, O. (2015). A review: Starch-based composite foams. *Composite part A* 78, 246-263.

Soykeabkaew, N., Supaphol, P., and Rujiravanit, R., (2004). Research article Full text access Preparation and characterization of jute- and flax-reinforced starch-based composite foams *Carbohydrate polymers*, 58:53-63.

Vercelheze, A. E. S., Fakhouri, F. M., Dall'Antônia, L. H., Urbano, A., Youssef, E. Y., Yamashita, F., and Mali, S. (2012). Properties of baked foams based on cassava starch, sugarcanebagasse fibers and montmorillonite. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1302-1310.

ผลผลิต (Output)

ผลงานเชิงประจักษ์ในรูปแบบของบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ และรายงานเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ดังรายการต่อไปนี้

1. Sanhawong, W., Banhalee, P., Boonsang, S., and Kaewpirom, S. (2017). Effect of concentrated natural rubber latex on the properties and degradation behavior of cotton-fiber-reinforced cassava starch biofoam. *Industrial Crops & Products*, 108, 756-766.
2. Meechai, S., Sae-Lee, N., Kaewpirom, S. (2018). Effects of beeswax on properties and biodegradation of baked corn starch foam, presented at the 3rd International Conference on Agriculture and Agro-industry 2018 (ICAAI2018), 15-17 November 2018, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand.
3. Kaewpirom, S., Sungbuakaew, S. (2018). Processing, properties, and biodegradation of cassava-starch cushion foam: effects of kaolin content. Submitted to *Songklanakarin Journal of Science and Technology*.

รายงานสรุปการเงิน

สัญญาเลขที่ ๑๙๐/๒๕๖๑

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๑

มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ การปรับปรุงสมบัติและการย่อยสลายทางชีวภาพของโพลีชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังด้วยน้ำ
ยางพารา

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย รองศาสตราจารย์. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

รายงานในช่วง ตั้งแต่วันที่ ๑ ตุลาคม ๒๕๖๐ ถึงวันที่ ๓๐ กันยายน ๒๕๖๑

ระยะเวลาดำเนินการ ๑ ปี

รายรับ

งวดที่ ๑ (ร้อยละ ๕๐)	๑๕๙,๐๐๐.๐๐ บาท เมื่อวันที่ ๑๔ ธันวาคม ๒๕๖๐
งวดที่ ๒ (ร้อยละ ๔๐)	๑๒๗,๒๐๐.๐๐ บาท เมื่อวันที่ ๓ พฤษภาคม ๒๕๖๑
งวดที่ ๓ (ร้อยละ ๑๐)	๓๑,๘๐๐ บาท เมื่อวันที่ หลังจากส่งรายงานฉบับสมบูรณ์
รวม	๓๑๘,๐๐๐ บาท

รายจ่าย

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน
1. ค่าตอบแทน	๓๑,๐๐๐	๓๑,๐๐๐	๐.๐๐
2. ค่าจ้าง	๗๒,๐๐๐	๗๒,๐๐๐	๐.๐๐
3. ค่าวัสดุ	๑๐๓,๒๐๐	๑๐๓,๒๐๐	๐.๐๐
4. ค่าใช้สอย	๘๐,๐๐๐	๘๐,๐๐๐	๐.๐๐
5. ค่าธรรมเนียม อุดหนุนสถาบัน	๓๑,๘๐๐	๓๑,๘๐๐	๐.๐๐
รวม	๓๑๘,๐๐๐	๓๑๘,๐๐๐	๐.๐๐

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน