



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียม สมบัติ และการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ
ของโฟมชีวภาพจากแป้งข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด

Preparation, characterization and biodegradation
of biofoam from glutinous rice, cassava, and corn starch

ผศ. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

ผศ. ดร. ศิริเดช บุญแสง

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินทุนอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๘

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2558A10802011

สัญญาเลขที่ 39/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียม สมบัติ และการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ
ของโฟมชีวภาพจากแป้งข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด

Preparation, characterization and biodegradation
of biofoam from glutinous rice, cassava, and corn starch

ผศ. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ผศ. ดร. ศิริเดช บุญแสง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง

มกราคม ๒๕๕๘

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ

เลขที่สัญญา 39/2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้รายงานการเตรียม สมบัติ และการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของโพลิเอทิลีนจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียว และพบว่าโพลิเอทิลีนจากแป้งมันสำปะหลังเตรียมโดยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่ง มีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป คือ อุณหภูมิ 220 °C ความดัน 1000 atm และเวลา 4.50 นาที วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของโพลิเอทิลีนโดยเทคนิคฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ศึกษาสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งผิวของโพลิเอทิลีนมีลักษณะเรียบและเนียนขึ้นและเมื่อเติมเกลือลงไปผิวของโพลิเอทิลีนมีลักษณะขรุขระเพิ่มมากขึ้น การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงดึงพบว่าค่าร้อยละการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง ค่าโมดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่าแรงเค้นสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับความชื้นและความสามารถในการต้านทานน้ำดีขึ้น การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโพลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 149 เป็น 150 °C เมื่อเติมเกลือ 15 g ทั้งนี้เนื่องจากเกลือเป็นสารก่อผลึกจึงช่วยให้โพลิเอทิลีนมีความสามารถทนความร้อนและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในการศึกษาพบว่าโพลิเอทิลีนที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับน้ำ สารเติมแต่ง และเกลือไม่เผา 15 g มีสมบัติที่ดีที่สุด และเมื่อศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินพบว่าโพลิเอทิลีนดังกล่าวมีการย่อยสลายในดินดีมาก และสามารถรวมกันเป็นเนื้อเดียวกับดินได้ภายในเวลา 4 สัปดาห์

สำหรับโพลิเอทิลีนจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียวเตรียมโดยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่ง มีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป คือ อุณหภูมิ 220 °C ความดัน 1000 atm เป็นเวลา 4:15 นาที โครงสร้างทางเคมีของโพลิเอทิลีนตรวจสอบโดยใช้เทคนิคฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ศึกษาสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งพื้นผิวของโพลิเอทิลีนมีลักษณะขรุขระ และเมื่อเติมเกลือพื้นผิวของโพลิเอทิลีนมีลักษณะหยาบและขรุขระเพิ่มมากขึ้น การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงดึงพบว่าเมื่อเติมเกลือค่าร้อยละการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง ค่าโมดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าแรงเค้น ณ จุดขาดและค่าแรงเค้นสูงสุดมีแนวโน้มลดลง แต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50 75 และ 100% ดีขึ้น เนื่องจากเกลือมีสมบัติชอบน้ำ ในการทดสอบการต้านทานน้ำพบว่าเกลือช่วยให้โพลิเอทิลีนยังคงรูปร่างเดิมได้หลังจากแช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าเมื่อเติมเกลือทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของโพลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 142 เป็น 156 °C เนื่องจากเกลือเป็นสารก่อผลึกในโพลิเอทิลีนจึงช่วยให้โพลิเอทิลีนมีความสามารถทนความร้อนและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในการศึกษาพบว่าโพลิเอทิลีนที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียวผสมกับน้ำ สารเติมแต่ง และเกลือไม่เผา 15 กรัม มีสมบัติดีที่สุด และเมื่อศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินพบว่าโพลิเอทิลีนดังกล่าวมีการย่อยสลายในดินดีมาก และรวมกันเป็นเนื้อเดียวกับดินได้ภายใน 4 สัปดาห์

Abstarct

This study reported preparation, characterization and biodegradation of biofoams based on cassava starch and corn starch blended with glutinous rice starch. The experimental results revealed that the optimum conditions for cassava starch biofoam processing by thermal reforming process were a temperature of 220 °C, a pressure of 1000 atm and 4.50 min processing time. Chemical structure of the foam was investigated using Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). Scanning electron microscopy (SEM) revealed that with the addition of additives, the foam showed a smooth surface. When kaolin was added, the foam surface was rough and the surface roughness increased with increase in kaolin content. Tensile testing showed that percent elongation of the foam tended to decrease while the modulus was increased with increase in kaolin content. All the biofoams prepared in this study exhibited similar values of stress at break. Moreover, it was found that the moisture absorption capacity and water resistance increased with increase in kaolin content. DSC results showed that melting temperature of the foam increased from 149 to 150 °C after kaolin addition. This was because kaolin is a nucleating agent, thus, it helped to initiate the crystallization of starch. Biofoam prepared from cassava starch, water, additives and 15 g of kaolin showed the best properties among other synthesized foams. Biodegradation in soil of such the foam revealed that the foam was totally degraded within four weeks.

Biofoam prepared from corn starch blended with glutinous rice starch by thermal reforming showed the optimums at the temperature of 220 °C, 1000 atm pressure, and 4:15 min processing time. Chemical structure of the foam was investigated using Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). Scanning electron microscopy (SEM) revealed that with the addition of additives, the foam showed rough surface. When kaolin was added, the foam surface roughness increased as kaolin content increased. Tensile testing showed that, with the additive of kaolin, percent elongation of the foam tended to decrease while the modulus was increased. Stress at break and stress at peak were also decreased. However, these properties were increased with increase in kaolin content. Moreover, it was found that the moisture absorption capacity of the foam at 50, 75 and 100 %RH increased with increase in kaolin content. This was because of kaolin's hydrophilicity. Water resistance test confirmed that kaolin caused the foam to remain in shape after soaking in water for 12 hrs. DSC results showed that

the melting temperature of the foam increased from 142 to 156 °C after kaolin addition. This was because kaolin is a nucleating agent, thus, it helped to increase the crystallization of starch. Biofoam prepared from corn starch mixed with glutinous rice flour, water, additives and 15 g of kaolin showed the best properties among other synthesized foams. Biodegradation in soil of such the foam revealed that the foam can be totally degraded within four weeks.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.3 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	2
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 การทดลอง	10
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี	10
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	11
3.2.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟม	11
3.2.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของโฟม	12
3.2.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟม	14
3.2.4 การวิเคราะห์การกระจายตัวและสัณฐานวิทยาของโฟม	14
3.2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	14
3.2.6 การยืนยันโครงสร้างทางเคมี	15
3.2.7 การศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ	15
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	17
4.1 โฟมชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง	17
4.1.1 การขึ้นรูปโฟมจากแป้งมันสำปะหลัง	17
4.1.2 ความสามารถในการดูดซับน้ำ	17
4.1.3 ความสามารถในการดูดซับความชื้น	22
4.1.4 สมบัติเชิงกล	24
4.1.5 สัณฐานวิทยา	26
4.1.6 สมบัติทางความร้อน	27
4.1.7 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี	28
4.1.8 การศึกษาความสามารถในการย่อยสลาย	29
4.2 โฟมชีวภาพจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียว	31
4.2.1 สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูป	31
4.2.2 ความหนา	32
4.2.3 ความหนาแน่น	33
4.2.4 ความสามารถในการดูดซับน้ำ	33
4.2.5 ความสามารถในการดูดซับความชื้น	37
4.2.6 สมบัติเชิงกล	40

	หน้า
4.2.7 การกระจายตัวของเกล็ดหินและสัณฐานวิทยา	43
4.2.8 สมบัติทางความร้อน	48
4.2.9 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี	49
4.2.10 ความสามารถในการย่อยสลาย	50
บทที่ 5 สรุปผล	52
บรรณานุกรม	54
ผลผลิต	59
รายงานสรุปการเงิน	60
ประวัตินักวิจัยและคณะ	62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ชื่อตัวอย่าง และองค์ประกอบเพื่อขึ้นรูปโฟมแข็งจากแป้งมันสำปะหลัง	11
3.2 ชื่อตัวอย่าง และองค์ประกอบ เพื่อขึ้นรูปโฟมแข็งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียว	12
4.1 ภาพถ่าย SEM แสดงพื้นผิวภายในรูโพรงของโฟม ที่กำลังขยาย 20 200 และ 1000 เท่าและการกระจายตัวของเกล็ด	26
4.2 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของโฟม ที่กำลังขยาย 200 1000 และ 3000 เท่าและการกระจายตัวของเกล็ด	44
4.3 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวภายในรูโพรงของโฟม ที่กำลังขยาย 20 200 และ 1000 เท่าและการกระจายตัวของเกล็ด	46

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 การอบแป้งมันสำปะหลังในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C (ซ้าย) และการผสมส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมมือ (ขวา)	11
3.2 ขั้นตอนการผลิตโพน	13
3.3 การทดสอบแรงดึงของตัวอย่างโพน	14
3.4 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน	15
3.5 ตำแหน่งการฝังดิน; (ก) ขุดดินให้ลึก 10 cm (ข) ใส่ตัวอย่างลงในหลุมดิน (ค) รดน้ำตัวอย่าง	16
4.1 แผ่นโพนตัวอย่างที่ทำมาจากอัตราส่วนต่างกัน (ก) CS (ข) CSA (ค) CSA-5K (ง) CSA-10K (จ) CSA-15K (ฉ) CSA-5MK (ช) CSA-10MK (ซ) CSA-15MK	17
4.2 การบวมน้ำของโพน	18
4.3 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโพนที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100%	23
4.4 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของโพนตัวอย่าง	25
4.5 ค่าโมดูลัสของยังของโพนตัวอย่าง	25
4.6 DSC เทอร์โมแกรมของโพน (ก) CS (ข) CSA (ค) CSA-15K	28
4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของโพน (ก) CS (ข) CSA (ค) CSA-15K (ง) CSA-15MK	29
4.8 การย่อยสลายทางชีวภาพของโพน CSA-15K	30
4.9 แผ่นโพนตัวอย่าง	31
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับชนิดของแผ่นโพน	32
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับชนิดของแผ่นโพน	32
4.12 การบวมน้ำของโพน	33
4.13 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโพน	38
4.14 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโพนที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100%	39
4.15 ผลของตัวอย่างโพนต่อค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของโพน	41
4.16 ผลของตัวอย่างโพนต่อค่าโมดูลัสของยังของโพน	42
4.17 ผลของตัวอย่างโพนต่อแรงเค้น ณ จุดขาดของโพน	42
4.18 ผลของตัวอย่างโพนต่อแรงเค้นสูงสุดของโพนชนิดต่างกัน	43
4.19 DSC เทอร์โมแกรมของโพน (1) CoS (2) CoSA (3) CoSA – 15K	48
4.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของ 1) Glutinous riceflour 2) Corn starch 3) CoS 4) CoSA 5) CoSA-15K 6) CoSA-15MK 7) Kaolin 8) Metakaolin	49
4.21 พฤติกรรมการย่อยสลายทางชีวภาพของโพน CoSA – 15K	51

ผลผลิต (Output)

ผลงานเชิงประจักษ์ในรูปแบบของบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ และอยู่ในกลุ่ม TCI 1 ดังนี้ ศิริินภา นิवासประภฤติ อุบลลัษณั รัตนศัักดี ศิริิเดซ บุญแสง และ สุปรานี แก้วภริิรมย์. (๒๕๕๙). ผลของ เภลลินต่อสมบัตติของโพนชีวภาพที่มีแบ้งข้าวโพดผสมแบ้งข้าวเหนียวเป็นองค์ประกอบหลัก. ส่งพิจารณาตีพิมพ์ใน วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เมื่อวันที่ ๑๓ พฤศจิกายน ๒๕๕๘ (อยู่ระหว่างการพิจารณาของผู้ทรงคุณวุฒิ)

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย 2558A10802011 สัญญาเลขที่ 39/2558

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินทุนอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๘

มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ การเตรียม สมบัติ และการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมชีวภาพจากแป้งข้าวเหนียว แป้ง
มันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย ผศ. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

รายงานในช่วง ตั้งแต่วันที่ ๑ ตุลาคม ๒๕๕๗ ถึงวันที่ ๓๑ มกราคม ๒๕๕๘

ระยะเวลาดำเนินการ ๑ ปี ๔ เดือน

รายรับ

งวดที่ ๑ (ร้อยละ ๕๐)	๑๗๕,๐๐๐ บาท เมื่อวันที่ ๑๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๗
งวดที่ ๒ (ร้อยละ ๔๐)	๑๔๐,๐๐๐ บาท เมื่อวันที่ ๒๐ พฤษภาคม ๒๕๕๘
งวดที่ ๓ (ร้อยละ ๑๐)	๓๕,๐๐๐ บาท เมื่อวันที่ หลังจากส่งรายงานฉบับสมบูรณ์
รวม	๓๕๐,๐๐๐ บาท

รายจ่าย

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน
1. ค่าตอบแทน	๗๒,๐๐๐	๗๒,๐๐๐	๐.๐๐
2. ค่าจ้าง	๑๐๔,๔๐๐	๑๐๔,๔๐๐	๐.๐๐
3. ค่าวัสดุ	๗๘,๕๐๐	๗๘,๕๐๐	๐.๐๐
4. ค่าใช้สอย	๖๐,๑๐๐	๖๐,๑๐๐	๐.๐๐
5. ค่าธรรมเนียม อุดหนุนสถาบัน	๓๕,๐๐๐	๓๕,๐๐๐	๐.๐๐
รวม	๓๕๐,๐๐๐	๓๕๐,๐๐๐	๐.๐๐

(ผศ. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ข้าพเจ้า ผศ. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์ ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยเรื่องการเตรียม สมบัติ และการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมชีวภาพจากแป้งข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด (Preparation, characterization and biodegradation of biofoam from glutinous rice, cassava, and corn starch) รหัสโครงการ2558A10802011 / สัญญาเลขที่ 39/2558 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 350,000 บาท (สามแสนห้าหมื่นบาทถ้วน)

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี 4 เดือน (ระหว่าง 1 ตุลาคม 2557 ถึง 31 มกราคม 2559)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้รายงานการเตรียม สมบัติ และการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียว และพบว่าโฟมจากแป้งมันสำปะหลังเตรียมโดยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่ง มีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป คือ อุณหภูมิ 220 °C ความดัน 1000 atm และเวลา 4.50 นาที วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของโฟมโดยเทคนิคฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งผิวของโฟมมีลักษณะเรียบและเนียนขึ้นและเมื่อเติมเกลือลงไปผิวของโฟมมีลักษณะขรุขระเพิ่มมากขึ้น การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงดึงพบว่าค่าร้อยละการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง ค่าโมดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น ค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และค่าแรงเค้นสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับความชื้นและความสามารถในการต้านทานน้ำดีขึ้น การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโฟมเพิ่มขึ้นจาก 149 เป็น 150 °C เมื่อเติมเกลือ 15 g ทั้งนี้เนื่องจากเกลือเป็นสารก่อผลึกจึงช่วยให้โฟมมีความสามารถทนความร้อนและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในการศึกษาพบว่าโฟมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับน้ำ สารเติมแต่ง และเกลือไม่เผา 15 g มีสมบัติที่ดีที่สุด และเมื่อศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินพบว่าโฟมดังกล่าวมีการย่อยสลายในดินดีมาก และสามารถรวมกันเป็นเนื้อเดียวกับดินได้ภายในเวลา 4 สัปดาห์

สำหรับโฟมจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียวเตรียมโดยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่ง มีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป คือ อุณหภูมิ 220 °C ความดัน 1000 atm เป็นเวลา 4:15 นาที โครงสร้างทางเคมีของโฟมถูกตรวจสอบโดยใช้เทคนิคฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งพื้นผิวของโฟมมีลักษณะขรุขระ และเมื่อเติมเกาลินพื้นผิวของโฟมมีลักษณะหยาบและขรุขระเพิ่มมากขึ้น การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงดึงพบว่าเมื่อเติมเกาลินค่าร้อยละการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง ค่าโมดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าแรงเค้น ณ จุดขาดและค่าแรงเค้นสูงสุดมีแนวโน้มลดลง แต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกาลินที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีปริมาณเกาลินเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50 75 และ 100% ดีขึ้น เนื่องจากเกาลินมีสมบัติชอบน้ำ ในการทดสอบการต้านทานน้ำพบว่าเกาลินช่วยให้โฟมยังคงรูปร่างเดิมได้หลังจากแช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าเมื่อเติมเกาลินทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของโฟมเพิ่มขึ้นจาก 142 เป็น 156 °C เนื่องจากเกาลินเป็นสารก่อผลึกในโฟมจึงช่วยให้โฟมมีความสามารถทนความร้อนและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในการศึกษาพบว่าโฟมที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียวผสมกับน้ำ สารเติมแต่ง และเกาลินไม่เผา 15 กรัม มีสมบัติที่ดีที่สุด และเมื่อศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินพบว่าโฟมดังกล่าวมีการย่อยสลายในดินดีมาก และรวมกันเป็นเนื้อเดียวกับดินได้ภายใน 4 สัปดาห์

Abstract

This study reported preparation, characterization and biodegradation of biofoams based on cassava starch and corn starch blended with glutinous rice starch. The experimental results revealed that the optimum conditions for cassava starch biofoam processing by thermal reforming process were a temperature of 220 °C, a pressure of 1000 atm and 4.50 min processing time. Chemical structure of the foam was investigated using Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). Scanning electron microscopy (SEM) revealed that with the addition of additives, the foam showed a smooth surface. When kaolin was added, the foam surface was rough and the surface roughness increased with increase in kaolin content. Tensile testing showed that percent elongation of the foam tended to decrease while the modulus was increased with increase in kaolin content. All the biofoams prepared in this study exhibited similar values of stress at break. Moreover, it was found that the moisture absorption capacity and water resistance increased with increase in kaolin content. DSC results showed that melting temperature of the foam increased from 149 to 150 °C after kaolin addition. This was because kaolin is a nucleating agent, thus, it helped to initiate the crystallization of starch. Biofoam prepared from cassava starch, water, additives and 15 g of kaolin showed the best properties among other synthesized foams. Biodegradation in soil of such the foam revealed that the foam was totally degraded within four weeks.

Biofoam prepared from corn starch blended with glutinous rice starch by thermal reforming showed the optimums at the temperature of 220 °C, 1000 atm pressure, and 4:15 min processing time. Chemical structure of the foam was investigated using Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). Scanning electron microscopy (SEM) revealed that with the addition of additives, the foam showed rough surface. When kaolin was added, the foam surface roughness increased as kaolin content increased. Tensile testing showed that, with the additive of kaolin, percent elongation of the foam tended to decrease while the modulus was increased. Stress at break and stress at peak were also decreased. However, these properties were increased with increase in kaolin content. Moreover, it was found that the moisture absorption capacity of the foam at 50, 75 and 100 %RH increased with increase in kaolin content. This was because of kaolin's hydrophilicity. Water resistance test confirmed that kaolin caused the foam to remain in shape after soaking in water for 12 hrs. DSC results showed that the melting temperature of the foam increased from 142 to 156 °C after kaolin addition. This was because kaolin is a nucleating agent, thus, it helped to increase the crystallization of starch. Biofoam prepared from corn starch mixed with glutinous rice flour, water, additives and 15 g of kaolin showed the best properties among other synthesized foams. Biodegradation in soil of such the foam revealed that the foam can be totally degraded within four weeks.

Output / Outcome

ด้านวิชาการ ผลที่ได้จากการวิจัยนี้ มีประโยชน์มากในการเรียนการสอนวิชาพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต และการเสื่อมสลายและความเสถียรของพอลิเมอร์ สำหรับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา และวิชาเลือกสำหรับนิสิตระดับปริญญาตรี

ด้านนโยบาย ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ ผลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดในงานวิจัยเพื่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้

ด้านสังคมและชุมชน การใช้โฟมจากแป้งจะช่วยลดปัญหามลภาวะเนื่องจากขยะพลาสติกได้

นอกจากนี้ยังมีผลงานเชิงประจักษ์ในรูปแบบของบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ และอยู่ในกลุ่ม TCI 1 ดังนี้ ศิริรักษา นิवासประภฤติ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ ศิริเดช บุญแสง และ สุปราณี แก้วภิรมย์. (๒๕๕๙). ผลของเกล็ดดินต่อสมบัติของโฟมชีวภาพที่มีแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียวเป็นองค์ประกอบหลัก. ส่งพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เมื่อวันที่ ๑๓ พฤศจิกายน ๒๕๕๘ (อยู่ระหว่างการพิจารณาของผู้ทรงคุณวุฒิ)

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการใช้ถาดโฟมจากพอลิสไตรีนแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง เป็นที่นิยมทั่วไปทั้งในห้างสรรพสินค้า และ ตลาดสด เนื่องจากมีราคาถูก สะดวก และทำให้การจัดวางสินค้าสวยงามยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการย่อยสลายถาดโฟมพอลิสไตรีนใช้เวลานานหลายร้อยปี การใช้ซ้ำ (Reuse) หรือการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เป็นสิ่งที่ยุ่งยากและใช้ต้นทุนสูงเช่นกัน (Uslu และ Polat , 2012) การใช้ถาดโฟมจากวัสดุที่ย่อยสลายได้โดยธรรมชาติจึงได้รับความสนใจที่จะนำมาพัฒนาเพื่อลดปัญหาขยะโฟมดังกล่าว

แป้งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีอยู่มากมายชนิดหนึ่ง ย่อยสลายได้ ราคาถูก และยังเป็นวัสดุที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ (Renewable source) (El-Tahlawy และคณะ, 2007) แป้งเกิดจากโมเลกุลของน้ำตาลต่อกันเป็นสายยาว มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) ประกอบด้วยโครงสร้างแบบกิ่ง (Amylopectin) และโครงสร้างแบบเส้นตรง (Amylose) สามารถย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ จึงได้รับความสนใจเป็นพิเศษในการนำมาใช้ทดแทนโฟมพอลิสไตรีน การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำแป้งมาใช้ผลิตโฟมมีมาตั้งแต่ต้นยุค 1970 (Shogren และคณะ, 1998) โดยวิธีการอัดผ่านเกลียว หรือการอัดพอง (Extrusion) ซึ่งเป็นเทคนิค ที่ใช้ผลิตอาหารเช้า (Cereal) และขนมขบเคี้ยว โดยใช้อุปกรณ์เรียกว่าเอ็กทรูเดอร์ (extruder) แต่วิธีนี้ไม่เหมาะกับการผลิตถาดโฟม เนื่องจากต้องใช้ความร้อนในการหลอมแป้งและอัดเป็นรูปงาน แป้งจึงสูญเสียความชื้นจำนวนมากและมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่สูงเกินไป ดังนั้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มได้พัฒนาการขึ้นรูปถาดโฟมด้วยเทคนิคที่แตกต่างกันมากมาย เช่น การอัดพอง (Cha และคณะ, 2001; Ganiyal และคณะ, 2007; Manoi และ Rizvi, 2001) เทคนิคการเปลี่ยนถ่ายตัวทำละลาย (Solvent exchange technique) (El-Tahlawy และคณะ, 2007) ความร้อนจากไมโครเวฟ (Microwave-assisted molding) (Zhou และคณะ, 2006; Zhou และคณะ, 2007) และวิธีอบในแม่พิมพ์ (Baking) (Uslu และ Polat , 2012; Shogren และคณะ, 1998; Shogren และคณะ, 2002; Soykeabkaew และคณะ, 2004; Salgado และคณะ, 2008; Kaisangsri และคณะ, 2012; Vercelheze และคณะ, 2012; Polat และคณะ, 2013) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากในการผลิต โฟมจากแป้ง โดยวิธีนี้ใช้หลักการอบแป้งที่ผสมน้ำในแม่พิมพ์ที่ร้อน โดยเม็ดแป้งจะพองตัวหลังจากดูดซับน้ำเข้าไปเต็มที่ และเกิดเจลลิตีโนเซชัน จากนั้นจะพองตัวขึ้นเป็นเนื้อโฟมเมื่อน้ำระเหยไป

อย่างไรก็ตามงานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าโฟมจากแป้งที่ผลิตขึ้นยังมีข้อด้อยมากมาย เช่น ไม่แข็งแรง เปราะ ไม่ยืดหยุ่น ดูดซับน้ำและความชื้นได้ดีจึงอาจไม่เหมาะแก่การใช้งาน ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารตัวเติมต่างๆ ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของโฟมจากแป้งให้ดีขึ้นและเหมาะกับการใช้งาน ในงานวิจัยนี้จึงต้องการผลิตถาดโฟมจากแป้งสามชนิด ได้แก่ แป้งข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด มีการเติมสารตัวเติม ได้แก่ ไขมัน กลิเซอรอล และดินขาวหรือดินเกาลิน ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของ

ภาคโพน ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและสัณฐานวิทยาของโพนด้วย นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมสลายทางชีวภาพของโพนจากแป้งด้วยวิธีฝังดิน (Soil burial test) เพื่อประเมินระยะเวลาในการเสื่อมสลายหลังจากการใช้งาน

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

(1) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมภาคโพนจากแป้ง 3 ชนิด แป้งข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด โดยวิธีอบในแม่พิมพ์ร้อน

(2) ศึกษาสมบัติของโพนจากแป้ง

(3) เตรียมโพนคอมโพสิตจากแป้ง โดยมีการเติมสารตัวเติม ได้แก่ ไขผึ้ง กลีเซอรอล และดินขาวหรือดินเกาลิน ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

(4) ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของภาคโพนที่เตรียมขึ้น

(5) ศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมสลายทางชีวภาพของโพนจากแป้งด้วยวิธีการฝังดิน

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ผลิตโพนจากแป้งสามชนิด ได้แก่ แป้งข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด มีการเติมสารตัวเติม ได้แก่ ไขผึ้ง กลีเซอรอล และดินขาวหรือดินเกาลิน ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของภาคโพน ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและสัณฐานวิทยาของโพน นอกจากนี้ จะศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมสลายทางชีวภาพของโพนจากแป้งด้วยวิธีการฝังดิน (Soil burial test) เพื่อประเมินระยะเวลาในการเสื่อมสลายหลังจากการใช้งาน

1.3 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากขยะโพน ทำให้เกิดการพัฒนาโพนที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ จากแป้งมาใช้ทดแทน แต่เนื่องจากโพนจากแป้งที่ผลิตขึ้นยังมีข้อด้อยมากมาย เช่น ไม่แข็งแรง เปราะ ไม่ยืดหยุ่น ดูดซับน้ำ และความชื้นได้ดีจึงอาจไม่เหมาะแก่การใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามปรับปรุงสมบัติของโพนจากแป้งเหล่านี้ เพื่อให้มีสมบัติดีขึ้นและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และช่วยลดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม การผสมวัสดุที่มีราคาถูกลง ได้จากธรรมชาติ และมีสมบัติเชิงกลที่ดี กับโพนแป้งจึงเป็นทางเลือกในการทำโพนได้วัสดุใหม่ที่มีสมบัติบางประเภทดีขึ้น และเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานมากขึ้น

สำหรับประเทศไทย เป็นที่รู้จักกันดีว่ามีการปลูกและส่งออกมันสำปะหลัง ข้าว และข้าวโพดเป็นอันดับต้นๆ ของโลก ดังนั้นจึงมีศักยภาพในการผลิตบรรจุภัณฑ์จากโพลีเมอร์ที่ตัวเองในประเทศ และเพื่อการส่งออก คณะวิจัยจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากโพลีเมอร์โดยใช้วิธีการขึ้นรูปที่ง่าย และไม่ต้องใช้การลงทุนที่สูงมาก อีกทั้งจะได้ปรับปรุงข้อเสียของโพลีเมอร์จากแป้ง เช่น ไม่แข็งแรง เปราะ ไม่ยืดหยุ่น ดูดซับน้ำและความชื้นได้ดีซึ่งไม่เหมาะแก่การใช้งาน โดยการเติมสารตัวเติมต่างๆ ที่ได้จากธรรมชาติลงไป เพื่อปรับปรุงสมบัติของโพลีเมอร์จากแป้งให้ดีขึ้นและเหมาะกับการใช้งาน ในงานวิจัยนี้จึงต้องการผลิตโพลีเมอร์จากแป้งสามชนิด ได้แก่ แป้งข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด มีการเติมสารตัวเติม ได้แก่ ใยฝ้าย กลีเซอรอล และดินขาวหรือดินเกาลิน ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วย นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมและการเสื่อมสภาพทางชีวภาพของโพลีเมอร์จากแป้งด้วยวิธีฝังดิน เพื่อประเมินระยะเวลาในการเสื่อมสภาพหลังจากการใช้งาน

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำแป้งมาใช้ผลิตโพลิเมอร์มีมาตั้งแต่ต้นยุค 1970 (Shogren และคณะ, 1998) โดยวิธีการอัดผ่านเกลียว หรือการอัดพอง (Extrusion) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ผลิตอาหารเช้า (Cereal) และขนมขบเคี้ยว โดยใช้อุปกรณ์เรียกว่าเอ็กทรูดเดอร์ (extruder) แต่วิธีนี้ไม่เหมาะกับการผลิตถาดโพลิเมอร์เนื่องจากต้องใช้ความร้อนในการหลอมแป้งและอัดเป็นรูปจาน แป้งจึงสูญเสียความชื้นจำนวนมากและมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วที่สูงเกินไป ดังนั้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มได้พัฒนาการขึ้นรูปถาดโพลิเมอร์ด้วยเทคนิคที่แตกต่างกันมากมาย เช่น การอัดพอง (Cha และคณะ, 2001; Ganiyal และคณะ, 2007; Manoi และ Rizvi, 2001) เทคนิคการเปลี่ยนถ่ายตัวทำละลาย (Solvent exchange technique) (El-Tahlawy และคณะ, 2007) ความร้อนจากไมโครเวฟ (Microwave-assisted molding) (Zhou และคณะ, 2006; Zhou และคณะ, 2007) และวิธีอบในแม่พิมพ์ร้อน (Baking) (Uslu และ Polat, 2012; Shogren และคณะ, 2002; Soykeabkaew และคณะ, 2004; Salgado และคณะ, 2008; Kaisangsri และคณะ, 2012; Vercelheze และคณะ, 2012; Polat และคณะ, 2013) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากในการผลิต โพลิเมอร์จากแป้ง โดยวิธีนี้ใช้หลักการอบแป้งที่ผสมน้ำในแม่พิมพ์ที่ร้อน โดยเม็ดแป้งจะพองตัวหลังจากดูดซับน้ำเข้าไปเต็มที่ และเกิดเจลลิตินเซชัน จากนั้นจะพองตัวขึ้นเป็นเนื้อโพลิเมอร์เมื่อน้ำระเหยไป Uslu และ Polat (2012) เตรียมถาดและจานโพลิเมอร์จากแป้งข้าวโพดทั้งชนิดที่มีและไม่มี การเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของแป้ง และได้ศึกษาผลของการเชื่อมขวางต่อความหนาแน่น สี การดูดซับน้ำ ความทนต่อแรงดึงยืด และแรงดัดงอ และสัณฐานวิทยาของโพลิเมอร์แป้งที่เตรียมขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของแป้งช่วยลดระยะเวลาในการอบ ความหนาแน่น และการดูดซับน้ำของโพลิเมอร์แป้งได้ และถาดโพลิเมอร์ที่ให้สมบัติที่ดีที่สุดคือถาดโพลิเมอร์ที่มีการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของแป้งเท่ากับ 0.126 และ 0.269 g glyoxal/Kg ต่อมา Shogren และคณะ (1998) ศึกษาโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของโพลิเมอร์แป้งที่ขึ้นรูปโดยการอบในแม่พิมพ์ร้อน พบว่าโพลิเมอร์ที่ทำจากแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่งเกิดการเจลลิตินเซชันได้ไม่หมด และความหนาแน่นและความแข็งแรงของโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อมีส่วนของแป้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความยืดหยุ่นลดลง โพลิเมอร์ที่ทำจากแป้งมันฝรั่งมีความหนาแน่นน้อยกว่า และความยืดหยุ่นมากกว่าโพลิเมอร์ที่ทำจากแป้งข้าวโพด ดังนั้นโพลิเมอร์แป้งจึงมีประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่ใช้แล้วทิ้ง ต่อมาอีก 5 ปี Shogren และคณะ (2002) ปรับปรุงสมบัติของโพลิเมอร์แป้งโดยการปรับโครงสร้างทางเคมีของแป้งก่อนที่จะนำมาขึ้นรูป พบว่าแป้งที่ดัดแปรโครงสร้างใช้เวลาในการอบขึ้นรูปน้อยกว่า มีน้ำหนักเบากว่า และมีการดึงยืดที่ดีกว่าแป้งที่ไม่ดัดแปร นอกจากนี้ยังมีการทดลองเติมสารเติมแต่ง เช่น เส้นใยของไม้เนื้ออ่อน และ โมโนสตีริล ซิเตรด (monostearyl citrate) เพื่อปรับปรุงสมบัติของโพลิเมอร์ให้ดีขึ้นด้วย Soykeabkaew และคณะ (2004) ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์แป้งมันสำปะหลังด้วยเส้นใยปอกระเจาและปอปาน พบว่าการเติมเส้นใยปริมาณ 5-10 % โดยน้ำหนักทำให้โพลิเมอร์แข็งแรงขึ้น และปอกระเจาเสริมแรงได้ดีกว่าปอปาน นอกจากนี้ยังพบว่าการจัดเรียงตัวของเส้นใยมีผลต่อสมบัติ

เชิงกลของโพลีเมอร์ด้วย Salgado และคณะ (2008) ศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์จากมันสำปะหลังด้วยการอบในแม่พิมพ์ร้อน พบว่าอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลัง โปรตีนจากดอกทานตะวัน และเส้นใยเซลลูโลส มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของถาดโพลีเมอร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วยการเสริมแรงด้วยเส้นใยทำให้สมบัติเชิงกลและความชื้นของถาดโพลีเมอร์ลดลงเล็กน้อย แต่การดูดซับน้ำของถาดโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น ส่วนโปรตีนจากดอกทานตะวันจะช่วยลดทั้งความชื้น การดูดซับน้ำ และการเสีรูปร่างของถาดโพลีเมอร์ Kaisansri และคณะ (2012) เสนอว่าโพลีเมอร์จากแป้งมันสำปะหลังที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์ฟ (Kraft fiber) และโคโตซาน มีสมบัติคล้ายกับโพลีเมอร์ที่ผลิตจากพอลิไสตรีน ถึงแม้จะมีความหนาแน่น ค่าความแข็งแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่ดีน้อยกว่า Vercelheze และคณะ (2012) ศึกษาสมบัติของถาดโพลีเมอร์ที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง เส้นใยชานอ้อย และดินเหนียวชนิด montmorillonite (MMT) ซึ่งมีขนาดอนุภาคระดับนาโนโดยการอบในแม่พิมพ์ พบว่าเส้นใยชานอ้อยและ MMT ทำให้ถาดโพลีเมอร์มีความหนาแน่นและความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น และถาดโพลีเมอร์ที่ผลิตขึ้นนี้จะเป็ทางเลือกใหม่ในการผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารสำหรับอาหารที่มีน้ำในปริมาณต่ำได้ Polat และคณะ (2013) ต้องการปรับปรุงสมบัติของโพลีเมอร์ให้ดีขึ้นโดยการเติมสารตัวเติมต่างๆ และปรับปรุงสมบัติระดับโมเลกุลของแป้ง จึงศึกษาผลของเส้นใยจากชงข้าวโพด ดินเหนียว และไขผึ้ง ต่อสมบัติของโพลีเมอร์แป้งข้าวโพดที่มีการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของแป้ง พบว่าการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลมีผลให้ระยะเวลาในการอบขึ้นรูปสั้นลง โพลีเมอร์มีความหนาแน่นและการดูดซับน้ำลดลง และมีความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้น การผสมเส้นใยจากชงข้าวโพด ดินเหนียว และไขผึ้งทำให้ความต้านทานต่อน้ำของโพลีเมอร์ดีขึ้น และมีความแข็งแรงเชิงกลดีกว่าการใช้แป้งที่มีการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลเพียงอย่างเดียว

รายละเอียดของงานวิจัยที่กล่าวถึงข้างต้น และงานวิจัยเกี่ยวข้องเพิ่มเติมอื่นๆ มีดังนี้

Imam และคณะ (2006) ได้ศึกษาการย่อยสลายของโพลีเมอร์ที่ทำมาจากแป้งมันสำปะหลัง เส้นใยข้าวโพด และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยการทำการผสมแป้งมันสำปะหลัง น้ำ เส้นใยข้าวโพดและ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงในแม่พิมพ์และทำการอบ พบว่าเส้นใยข้าวโพดสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความต้านทานความชื้นของโพลีเมอร์ได้ดี นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังจะช่วยทำให้สมบัติเชิงกลของถาดโพลีเมอร์ลดลง การเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความต้านทานต่อน้ำ และการเพิ่มเวลาในการขึ้นรูปจะทำให้ถาดโพลีเมอร์มีสมบัติที่ดีขึ้น

Mauri และคณะ (2008) ศึกษาการย่อยสลายของถาดโพลีเมอร์ใส่อาหารที่ผลิตมาจากแป้งมันสำปะหลัง โปรตีนจากดอกทานตะวัน และเส้นใยเซลลูโลส จากนั้นขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการอบ (Baking) และทำการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแป้งมันสำปะหลัง โปรตีนจากดอกทานตะวัน และเส้นใยเซลลูโลส วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ ทางเคมี สมบัติเชิงกลและลักษณะสัณฐานวิทยาของถาดโพลีเมอร์ ผลการศึกษาพบว่าถาดโพลีเมอร์มีความหนาอยู่ระหว่าง 1.55-1.76 mm และมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.46-0.59 g/cm³ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเส้นใยจาก 10% ไปจนถึง 20% พบว่าสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ดีขึ้นและขึ้นงานหลังการขึ้นรูปดูความชื้นลดลง แต่เพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 15% โปรตีนจากดอกทานตะวันที่เติมลงไป 20% จะช่วยทำให้ขึ้นงานหลังการขึ้นรูปดูความชื้นลดลง การเติมแมกนีเซียม สเตียเรท ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ชอบน้ำช่วยทำให้

เนื้อโพลีไมด์แม่พิมพ์ กั้วร์กัม ช่วยเพิ่มความเหนียวและทำให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และกลีเซอรอล ช่วยทำให้เนื้อโพลีไมด์เหนียวและยืดหยุ่น จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณเส้นใย 20% และโปรตีน 10% เป็นปริมาณที่ทำให้โพลีไมด์มีสมบัติที่ดีที่สุด มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดของ 6.57 MPa และลดความสามารถในการดูดซึมน้ำ ได้ถึง 38%

Kaisangsri และคณะ (2009) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของโพลีไมด์จากแป้งมันสำปะหลังโดยการเติมสารเติมแต่ง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง การยืดหยุ่น และต้านทานน้ำ สารเติมแต่งที่ใช้ คือ น้ำมันพืช 0 10 20 และ 30% และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) 0 5 10 และ 15% ของน้ำหนักแป้ง ผสมลงในสารละลายเจลแป้งที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง 80 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และผสมเยื่อกราฟท์ 20% ของน้ำหนักแป้ง (หรือ 16 g) จากนั้นขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการอบในแม่พิมพ์ความร้อน (Baking in hot mold) ด้วยเครื่องอบ (Baking machine) ที่อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลา 3 นาที วิเคราะห์สมบัติทางกลของโพลีไมด์แป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ แรงต้านทานการดึงขาด (Tensile strength: TS) การยืดตัว (Elongation: E) การดูดซึมน้ำ (Water absorption index: WAI) และการละลายน้ำ (Water solubility index: WSI) ผลการศึกษาพบว่า การเติมน้ำมันไม่มีผลต่อ TS และ E แต่การเติมน้ำมัน โดยเฉพาะน้ำมัน 20 และ 10% ส่งผลให้ค่า WAI และ WSI ต่ำสุด เท่ากับ 5.50 และ 5.47 ตามลำดับ สำหรับการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าไม่มีผลต่อค่า E แต่ทำให้ค่าค่า TS เพิ่มขึ้น และค่า WAI และ WSI ลดลง โดยการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 10% มีผลให้โพลีไมด์มีค่า WAI และ WSI ต่ำที่สุด แต่ยังมีค่ามากกว่าการเติมสารเติมแต่งที่เป็นน้ำมันพืช

Bergeret และ Benezet (2011) ได้พัฒนาโพลีไมด์ที่มีการผสมเส้นใยธรรมชาติ (ป่าน เซลลูโลส สำลี ฝ้าย อ้อย มะพร้าว) และอัดขึ้นรูปโดยใช้น้ำเป็นสารฟู (Blowing agent) ทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และคุณสมบัติต่างๆ ผ่านกระบวนการและตัวแปร พบว่าความหนาแน่นของแป้งโพลีไมด์ลดลง 33% การดูดซึมน้ำลดลง แต่สมบัติเชิงกลดีขึ้นตามปริมาณเส้นใยธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น โพลีพลาสติกพอลิแลคติก แอซิด (Polylactic acid, PLA) ที่มีกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูดและมีการใช้สารช่วยฟูนั้นจะมีการเสื่อมสลายโดยความร้อนที่จุดหลอมเหลวของ PLA และโพลีพลาสติก PLA มีน้ำหนักของเนื้อโพลีไมด์ลดลงถึง 48% ส่วนโพลีพลาสติก PLA ที่มีการเติมเส้นใยเซลลูโลสน้ำหนักของเนื้อโพลีไมด์ลดลงเพียง 25%

Kaisangsri และคณะ (2012) พัฒนาโพลีไมด์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งผลิตมาจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับเส้นใยธรรมชาติและโคโคซาน โดยใช้อัตราส่วนของเส้นใยกราฟท์ 0 10 20 30 และ 40% (ของน้ำหนักแป้ง) ผสมกับสารละลายแป้งมันสำปะหลังและใช้อัตราส่วนโคโคซาน 0 2 4 และ 6% (ของน้ำหนักโคโคซาน) จากนั้นขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการอบในแม่พิมพ์ความร้อนด้วยเครื่องอบที่อุณหภูมิ 250 °C เป็นเวลา 5 นาที วิเคราะห์สมบัติของโพลีไมด์แป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ สี ความหนาแน่น ค่าปริมาณความชื้นและสมบัติเชิงกลของโพลีไมด์แป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ แรงต้านทานการดึงขาด การยืดตัว การดูดซึมน้ำและการละลายน้ำ (Water solubility index: WSI) ผลการศึกษาพบว่าโพลีไมด์ที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังที่มีเส้นใยกราฟท์ 30% และมีโคโคซาน 4% มีสมบัติคล้ายกับโพลีไมด์ที่ผลิตจากพอลิสไตรีนซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.14 g/cm³ แรงต้านทานการดึงขาดเท่ากับ 944.40 kPa และมีการยืดตัวของโพลีไมด์แป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 2.43% แต่ค่าการดูดซึมน้ำและค่าการละลายน้ำ มีค่ามากกว่าโพลีไมด์ที่ผลิตจากพอลิสไตรีน

Wattanakornsiri และคณะ (2012) ได้ศึกษาการย่อยสลายของคอมโพสิตซึ่งสังเคราะห์จากแป้งข้าวเหนียวที่มีกลีเซอรอล 30% โดยน้ำหนักของกลีเซอรอลต่อแป้ง เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสจากกระดาษหนังสือพิมพ์รีไซเคิลตั้งแต่ 0-8% และศึกษาสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตโดยการทดสอบแรงดึงทางกล ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพโดยเครื่องวิเคราะห์ความร้อนโดยดิฟเฟอเรนเชียล แสแกนนิ่งแคลอริเมทรี เทอร์โมแกรวิเมทริก และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (6.69 ± 0.29 MPa) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูงสุด (137.40 ± 3.84 MPa) จะเพิ่มขึ้นถึง 305% และ 546% ตามลำดับ และผลการทดสอบการฝังดินพบว่า เส้นใยเซลลูโลสจากหนังสือพิมพ์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตได้ โดยคอมโพสิตทนต่อการช้ำน้ำและสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์หลังจาก 8 สัปดาห์

มณิศรา และคณะ (2552) ศึกษาสมบัติของคอมโพสิตโพลีเอทิลีนกับแป้งมันสำปะหลังและเบต้าไคตินที่มีการเติมน้ำยารักษา โดยใช้วิธีการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือที่อุณหภูมิ 180°C ด้วยความดัน $80-110$ kgf/cm² เป็นเวลา 2 นาที พบว่าการเติมน้ำยารักษา 5% ไม่ทำให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตโพลีเอทิลีนเปลี่ยนแปลง แต่สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มแย่ลงเมื่อปริมาณน้ำยารักษาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นคอมโพสิตโพลีเอทิลีนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและสามารถทนน้ำได้ดียิ่งขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีเอทิลีนพบว่าประสิทธิภาพการทนน้ำยังต่ำกว่าเล็กน้อย ผลจากการศึกษาการย่อยสลายคอมโพสิตโพลีเอทิลีนด้วยเอนไซม์อะไมเลสพบว่าการย่อยสลายเกิดได้ช้าลงเมื่อมีการเติมน้ำยารักษา และการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าการเติมน้ำยารักษาไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตโพลีเอทิลีน

อรทัย และคณะ (2552) ศึกษาการผสมพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอล เพื่อใช้เป็นพลาสติกย่อยสลายได้แล้วนำไปประยุกต์ใช้ในงานสิ่งทอ โดยมีส่วนผสมของแป้งข้าวเหนียว 10 20 30 และ 40% โดยน้ำหนักของแป้งข้าวเหนียว และปริมาณ กลีเซอรอล 5 10 และ 15% โดยน้ำหนักของกลีเซอรอล ผสมลงในเครื่องอัดรีดเกลียวหอนเดี่ยว โดยการศึกษาเน้นไปที่ส่วนผสม ขบวนการขึ้นรูป สมบัติเชิงกล โครงสร้าง และสมบัติการย่อยสลายทางธรรมชาติ พบว่าปริมาณของแป้งข้าวเหนียวมีผลทำให้ความต้านทานแรงดึง และการยึดตัวที่จุดขาด การบวมตัวของพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของแป้งข้าวเหนียวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มปริมาณแป้งจะยิ่งทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างส่วนของแป้งกับพอลิเอทิลีนลดลงมากทำให้พอลิเมอร์ผสมได้รับแรงจึงยึดตัวได้น้อย และค่ามอดูลัสจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแป้งข้าวเหนียวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแป้งเป็นสารที่มีความเป็นผลึกสูงการเพิ่มปริมาณแป้งจะยิ่งทำให้ค่ามอดูลัสของวัสดุผสมมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณกลีเซอรอล พบว่าความต้านทานแรงดึง และมอดูลัส ของพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารลดความเป็นผลึก (Plasticizer) ทำให้แป้งมีความเป็นผลึกลดลงส่งผลให้ค่ามอดูลัสต่ำลงและค่าการยึดตัวที่จุดขาด และค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารลดความเป็นผลึก ทำให้แป้งเกิดสถานะเหนียวหนืด (Gelatin) ส่งผลให้สมบัติการยึดของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณแป้งมากขึ้น และจากการศึกษาการย่อยสลายทางธรรมชาติ พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวเหนียวมากจะมีเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักร่อยสลายที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้งข้าวเหนียวผสมอยู่น้อย เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยพบว่ายังไม่แข็งแรงจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารช่วยผสม เพื่อให้แป้งกับพอลิเอทิลีนเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น

ยูพาพร และวิมลลักษณ์ (2554) ศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานครนารายณ์ที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อน และการตัดแปรทางเคมี โดยการเติมยาง EPDM และยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิต วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกเตรียมด้วยเครื่องบดผสมภายในและขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีด ขึ้นทดสอบที่ได้จะถูกนำมาศึกษาผลของประเภทของการตัดแปรเส้นใยชนิดของยางและปริมาณยางต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ ซึ่งผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปานครนารายณ์ที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนและการตัดแปรทางเคมี มีค่าความทนต่อแรงดึง ค่าความเค้น ณ จุดคราก และค่ามอดูลัสของยังมากกว่าพอลิโพรพิลีน ในทางตรงข้ามค่าความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหักและค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตจะมีค่าน้อยกว่าพอลิโพรพิลีน อย่างไรก็ตามพบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ผ่านการตัดแปรทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถชี้ได้ว่าการปรับปรุงเส้นใยด้วยกระบวนการทางความร้อนนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีเท่ากับการปรับปรุงด้วยกระบวนการทางเคมี แต่มีประสิทธิผลมากกว่าในแง่ของระยะเวลาและขั้นตอนการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากและไม่เปลืองสารเคมี พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการเติมยางจะมีค่าความทนต่อแรงดึง ค่าความเค้น ณ จุดคราก และมอดูลัสของยังลดลง ส่วนค่าความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหัก และค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้น พอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่มีการเติมยางทั้งกรณีที่มีการตัดแปรด้วยความร้อนและทางเคมี พบว่ามีค่าสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง EPDM และยางธรรมชาติ พบว่าพอลิโพรพิลีนคอมโพสิตที่มีการเติมยาง EPDM จะมีค่าความทนต่อแรงดึง ค่าความเค้น ณ จุดคราก และมอดูลัสของยังสูงกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหัก และค่าความทนต่อแรงกระแทกของการเติมยางธรรมชาติจะมีค่ามากกว่าการเติมยาง EPDM

สุรพงศ์ (2557) ได้สังเคราะห์ผลิตภัณฑ์โฟมที่ทำมาจากแป้งข้าวโพด โดยใช้น้ำเป็นสารทำให้เกิดรูพรุนและมีการเติมสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่างๆ โครงสร้างทางเคมีของโฟมถูกตรวจสอบโดยใช้เทคนิคฟูรีเออร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโคปี การศึกษาสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งพื้นผิวของโฟมมีลักษณะเรียบเนียน และเมื่อเติมไขมันพื้นผิวของโฟมมีลักษณะขรุขระเพิ่มมากขึ้น การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบความแข็ง พบว่าโฟมมีความยืดหยุ่นน้อยลงตามปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเติมกลีเซอรอลในปริมาณที่มากขึ้นโฟมมีความยืดหยุ่นมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีปริมาณไขมันเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100% ลดลง และเมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับความชื้นมากขึ้น ในการทดสอบการต้านทานน้ำพบว่าไขมันช่วยให้โฟมยังคงรูปร่างเดิมได้หลังจากแช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในการศึกษาพบว่าโฟมที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดผสมกับสารเติมแต่งโดยมีไขมัน 20 phr มีสมบัติที่ดีที่สุด เมื่อศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินพบว่าโฟมดังกล่าวมีการย่อยสลายในดินได้

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การสังเคราะห์โฟมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีวัตถุประสงค์หลักคือ โฟมที่สังเคราะห์นั้นต้องสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และมีสมบัติใกล้เคียงกับโฟมจากพอลิสไตรีน โดยจะเห็นว่าการพัฒนาการสังเคราะห์โฟมส่วนใหญ่จะเน้นสังเคราะห์โฟมจากธรรมชาติ เช่น การเลือกใช้แป้ง เส้นใย น้ำยางพารา และการเติมสารเติมแต่งอื่นๆ (ที่ได้จากธรรมชาติ) มาเป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้โฟมที่มีสมบัติความต้านทานน้ำที่ดี แข็งแรง ยืดหยุ่น มีการย่อยสลายที่สามารถยอมรับได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้

ได้จริงในชีวิตประจำวัน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การสังเคราะห์โพลีเมอร์จากแป้งมันสำปะหลังผสมกับสารเติมแต่งต่างๆ จะทำให้ได้โพลีเมอร์ที่มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับโพลีเมอร์จากพอลิस्टาโรน แต่ยังมีข้อด้อยในเรื่องความยืดหยุ่น และความแข็งแรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการปรับปรุงความแข็งแรง โดยการเติมเกลือและเมทาเกลือ ปรับปรุงความยืดหยุ่นโดยการเติมกลีเซอรอล ปรับปรุงการต้านทานน้ำโดยการเติมไขมัน ของทั้งโพลีเมอร์จากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดผสมกับแป้งข้าวเหนียว นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอัตราการย่อยสลายของโพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยการทดสอบด้วยวิธีฝังดินอีกด้วย

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- (1) เครื่องชั่ง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) บริษัท Mettler โมเดล AE 200S และบริษัทไซแอนติฟิก โพรโมชั่น จำกัด Model BSA 2245-CW
- (2) เครื่องชั่ง (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง) บริษัท Shanghai Yousheng Weighing Apparatus โมเดล BS3000L
- (3) ตู้อบลมร้อน (Oven) บริษัท Binder โมเดล FED 240
- (4) เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression machine) บริษัท CHAREON TUT โมเดล PR1D-W300L300 HD
- (5) เครื่องทดสอบแรงดึง บริษัท Testometric โมเดล Micro 350
- (6) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริษัท LEO โมเดล 1450 VP
- (7) FT-IR บริษัท Perkin Elmer System 2000
- (8) pH meter โมเดล pHep tester บริษัท HANNA instrument, Inc
- (9) เครื่องผสมมือ Philips รุ่น Mixer HR 1456
- (10) เวอร์เนียคาลิปเปอร์ระบบดิจิทัล (Digital vernier caliper)
- (11) โถดูดความชื้น (Desiccator)

3.1.2 สารเคมี

- (1) แป้งมันสำปะหลัง ตราใบหยก บริษัท บางกอกอินเตอร์ฟูด จำกัด
- (2) แป้งข้าวโพด ตรา
- (3) แป้งข้าวเหนียว ตรา
- (4) ไขผึ้ง (Beewax) เกรดอาหาร บริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
- (5) กัวร์กัม (Guar gum) เกรดอาหารและเครื่องสำอาง บริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
- (6) แมกนีเซียม สเตียเรท (Magnesium stearate) เกรดอาหาร บริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
- (7) กลีเซอรอล (Glycerol 99.9%, $C_3H_8O_3$, 92.09 g/mol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Ajax Finechem
- (8) เกลือหรือดินขาว บริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
- (9) แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride anhydrous, $CaCl_2$, 110.98 g/mol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
- (10) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium hydroxide, NaCl, 58.44 g/mol) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck
- (11) ดินปลูกต้นไม้ ตราดินน่องดา ประกอบด้วย หน้าดิน 1.5 kg ขี้เถ้า 0.1 kg แกลบดิน 0.2 kg ขุยมะพร้าว 0.2 kg เปลือกสับ 0.1 kg มูลสัตว์ต่างๆ 0.5 kg

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟม

ก่อนทำการทดลองต้องอบแป้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นจากแป้งและทิ้งไว้ในให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นที่บรรจุซิลิกาเจล



รูปที่ 3.1 การอบแป้งมันสำปะหลังในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C (ซ้าย) และการผสมส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมมือ (ขวา)

ซึ่งแป้งที่ผ่านการอบ 100 g ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง จากนั้นเพิ่มส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.1-3.2 เทส่วนผสมทั้งหมดลงในบีกเกอร์ ขนาด 600 ml ผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เครื่องผสมมือ Philips รุ่น Mixer HR 1456 ความเร็ว 1150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที

ตารางที่ 3.1 ชื่อตัวอย่าง และองค์ประกอบเพื่อขึ้นรูปโฟมแป้งจากแป้งมันสำปะหลัง

ชื่อตัวอย่าง	ส่วนประกอบ (g)							
	แป้ง	น้ำ (ml)	ไข่ฝิ่ง	กัวร์กัม	กลีเซอรอล	แมกนีเซียม สเตียเรท	เกาลิน ไม่เผา	เกาลิน เผา
CS	100	90	-	-	-	-	-	-
CSA	100	100	5	1	4	2	-	-
CSA-5K	100	105	5	1	4	2	5	-
CSA-10K	100	110	5	1	4	2	10	-
CSA-15K	100	115	5	1	4	2	15	-
CSA-5MK	100	105	5	1	4	2	-	5
CSA-10MK	100	110	5	1	4	2	-	10
CSA-15MK	100	115	5	1	4	2	-	15

ตารางที่ 3.2 ชื่อตัวอย่าง และองค์ประกอบ เพื่อขึ้นรูปโฟมแข็งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียว

ชื่อตัวอย่าง	แป้ง (g)		น้ำ กลั่น (ml)	แมกนีเซียม สเตียเรท (g)	ไซฟิ่ง (g)	กัวร์กัม (g)	กลีเซอรอล (g)	ดินเกาลิน (g)	
	ข้าวโพด	ข้าว เหนียว						เผา	ไม่เผา
CoS	50	50	95	-	-	-	-	-	-
CoSA	50	50	100	2	5	1	8	-	-
CoSA-5K	50	50	105	2	5	1	8	-	5
CoSA-10K	50	50	110	2	5	1	8	-	10
CoSA-15K	50	50	115	2	5	1	8	-	15
CoSA-5MK	50	50	105	2	5	1	8	5	-
CoSA-10MK	50	50	110	2	5	1	8	10	-
CoSA-15MK	50	50	115	2	5	1	8	15	-

การขึ้นรูปโฟมทำโดยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่ง ตามขั้นตอนดังนี้ เปิดเครื่องขึ้นรูปจนมีอุณหภูมิ เท่ากับ 220°C นำแผ่นรองแบบที่จะขึ้นรูปรองด้วยแผ่นฟอยล์อลูมิเนียมทั้งสองแผ่น เทของผสมเนื้อเดียวกันลงบนแม่พิมพ์ ที่วางอยู่บนแผ่นรองแบบ ประกบแผ่นรองแบบด้านบนเข้าด้วยกัน แล้วยกเข้าเครื่องขึ้นรูป ให้ความดันที่ 1000 atm เป็นเวลา 4.50 นาที เมื่อครบเวลา 4.50 นาทีแล้ว นำแม่พิมพ์ออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นแกะโฟม ออกจากแม่พิมพ์และลอกแผ่นฟอยล์อลูมิเนียมออก ก็จะได้ผลิตภัณฑ์โฟมจากแป้ง ขั้นตอนการขึ้นรูปแสดงไว้ในรูปที่ 3.2

3.2.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของโฟม

ทดสอบความหนาของแผ่นโฟม โดยวัดความหนาของแผ่นโฟมที่ขึ้นรูปแล้ว ขนาด $24\text{ cm} \times 24\text{ cm}$ โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ระบบดิจิตอล ทั้งหมด 8 ตำแหน่งต่อหนึ่งตัวอย่าง คำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การทดสอบความหนาแน่นของแผ่นโฟม ทำโดยตัดแผ่นโฟมให้ได้ขนาด $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ จำนวนตัวอย่างละ 5 แผ่น นำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง หาค่าเฉลี่ยและแทนค่าในสูตร

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่ง}}{\text{ปริมาตรของโฟม}} \quad (3.1)$$

โดยค่าปริมาตรของแผ่นโฟมคำนวณได้จาก ความกว้าง \times ความยาว \times ความหนา

การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption capacity) ทำโดยตัดแผ่นโฟมตัวอย่างให้ได้ขนาด 2.5 cm x 5.0 cm ตัวอย่างละ 5 แผ่น จากนั้นเติมน้ำปริมาตร 100 ml ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml และนำตัวอย่างแช่ลงในน้ำ จับเวลาและถ่ายรูปตัวอย่างในช่วงเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาที และ 24 ชั่วโมง

การทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้น (Water sorption isotherm) ทำโดยตัดแผ่นโฟมตัวอย่างขนาด 2.5 cm x 2.5 cm x 0.35 cm ตัวอย่างละ 20 แผ่น จากนั้น นำตัวอย่างทั้งหมดใส่ในโถดูดความชื้นที่มีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลา 14 วัน เมื่อครบ 14 วัน นำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกเป็นค่าน้ำหนักเริ่มต้น (W_0) และนำตัวอย่างแต่ละประเภทจำนวน 5 ชิ้น แยกใส่โถดูดความชื้นที่ 0% (ซิลิกาเจล) 50% (สารละลายแคลเซียมคลอไรด์อิ่มตัว) 75% (สารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว) และ 100% (น้ำกลั่น) ชั่งน้ำหนัก ทุกหนึ่งชั่วโมงจนครบ 12 ชั่วโมง คำนวณหาค่าปริมาณความชื้น (Moisture Content)

$$\text{จากสูตร Moisture Content} = \frac{(W_t - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.2)$$

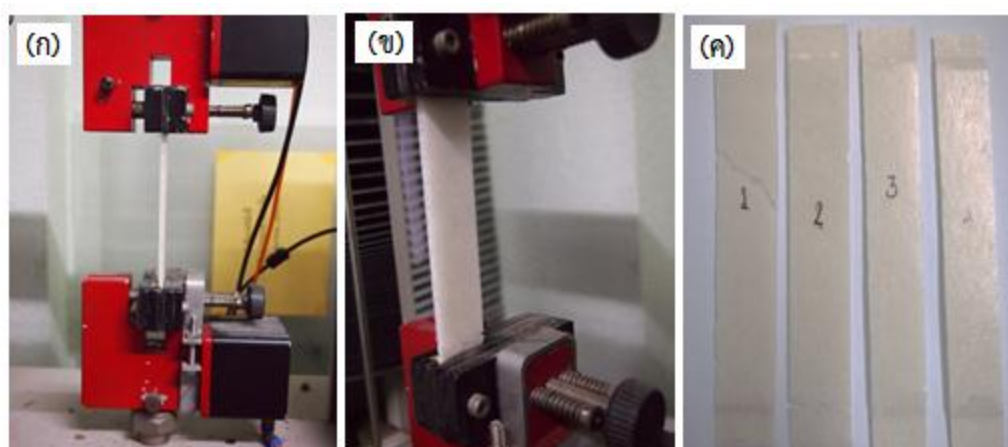
โดย W_t คือ น้ำหนักทุกหนึ่งชั่วโมง มีหน่วยเป็น g
 W_0 คือ น้ำหนักเริ่มต้น มีหน่วยเป็น g



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตโฟม; (ก) เทของผสมลงบนแม่พิมพ์ (ข) ปิดของผสมบนแม่พิมพ์ด้วยแผ่นพอลิเอทิลีน (ค) ประกบแผ่นรองแบบด้านบนเข้าด้วยกัน (ง) ยกแม่พิมพ์เข้าสู่เครื่องขึ้นรูป (จ) ขึ้นรูปโฟมเป็นเวลา 4.50 นาที (ฉ) ตั้งแม่พิมพ์ทิ้งไว้ให้เย็นลงเป็นเวลา 5 นาที (ช) ผลิตภัณฑ์โฟมจากแป้ง

3.2.3. การศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์

ทดสอบความทนแรงดึงของโพลีเมอร์ตัวอย่าง โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Testometric, Micro 350) ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 29 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ลักษณะของแผ่นโพลีเมอร์ที่ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาด 2.5 cm x 12.5 cm x 0.35 cm เมื่อทำการทดสอบนำแผ่นโพลีเมอร์เข้าหนีบกับตัวจับ (Grip) ของเครื่องทดสอบแรงดึง โดยกำหนดความยาวพิคัด (Gauge length) 10 mm อัตราเร็วในการดึง 2 mm/sec ส่วนวัดแรง (Load cell) 500 N ดึงด้วยอัตราเร็วคงที่จนกระทั่งชิ้นงานขาด วัดร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break) โมดูลัสของยัง (Young's modulus) ความเค้น (Stress at break) ความเค้นสูงสุด (Stress at peak) แต่ละตัวอย่างทำการทดสอบซ้ำ 15 ครั้ง



รูปที่ 3.3 การทดสอบการดึงตัวอย่างโพลีเมอร์; (ก) หนีบแผ่นโพลีเมอร์กับตัวจับ (Grip) ของเครื่องทดสอบแรงดึง (ข) ดึงชิ้นงานด้วยอัตราเร็วคงที่จนชิ้นงานขาด (ค) ชิ้นงานที่ผ่านการดึงจนขาด

3.2.4. วิเคราะห์การกระจายตัวและสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์ด้วยเทคนิค SEM-EDX

วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของเกล็ดในแผ่นโพลีเมอร์ตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยถ่ายภาพ 2 ตำแหน่ง คือตำแหน่งที่พื้นผิวของโพลีเมอร์ที่กำลังขยาย 200, 1000, 3000 เท่า และตำแหน่งภายในรูโพรงของโพลีเมอร์ที่กำลังขยาย 20, 200, 1000 เท่า ก่อนทำการวิเคราะห์จะต้องตัดตัวอย่างโพลีเมอร์ให้เป็นชิ้นที่มีขนาดเหมาะสม เก็บในโถดูดความชื้นและเคลือบด้วยทองคำ พื้นผิวของตัวอย่างจะต้องเรียบปราศจากรอยขีดข่วนที่อาจบดบังโครงสร้างที่แท้จริง เนื่องจากพื้นที่ผิวที่ขรุขระจะกระเจิงสัญญาณเอกซเรย์ไปตกกระทบนอกขอบเขตของตัวตรวจจับ ทำให้หน่วยประมวลผลคำนวณปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้แตกต่างไปจากปริมาณจริง

3.2.5. วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

ขึ้นรูปแผ่นโพลีเมอร์ตัวอย่างที่ส่วนผสมต่างกัน คือ CS, CSA, และ CSA-15K จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นในอากาศและทำให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50% (CaCl₂) นำโพลีเมอร์ที่ได้ไปวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิ

หลอมเหลว (T_m) โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 5-200 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ในบรรยากาศของไนโตรเจน

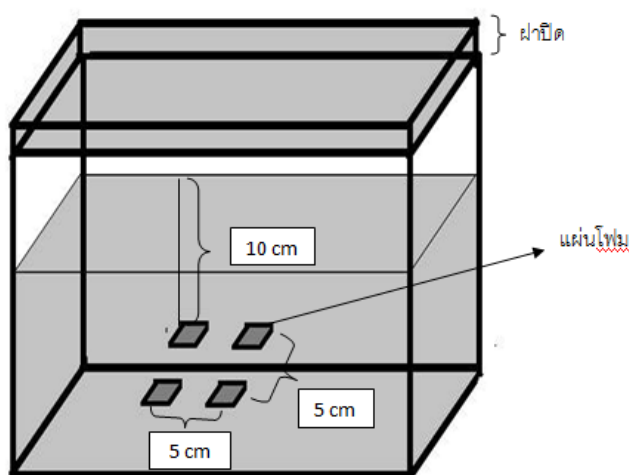
3.2.6. การยืนยันโครงสร้างด้วยเทคนิค FT-IR

ขึ้นรูปแผ่นโพลิเมอร์ตัวอย่างที่ส่วนผสมต่างกัน เช่น CS, CSA, CSA-15K และ CSA-15MK จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นในอากาศ และทำให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 0% นำโพลิเมอร์ที่ได้ไปทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ที่ช่วงเลขคลื่น 4000-400 cm^{-1}

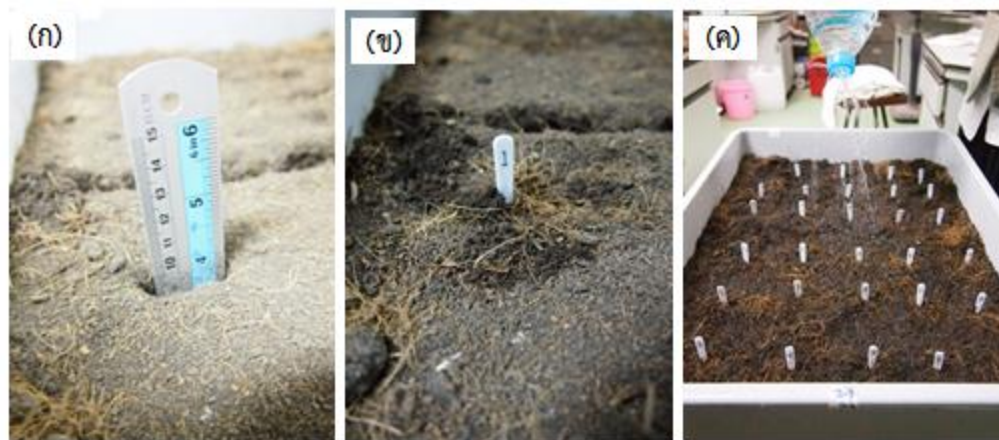
3.2.7. การศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ

ก่อนทำการทดสอบต้องนำแผ่นโพลิเมอร์ตัวอย่าง CSA-15K ไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น และทำให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 0% จากนั้นตัดตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาด 3 cm x 3 cm x 0.35 cm วัดความเป็นกรด-ด่างของดินที่ใช้ในการทดลอง (ดินปลูกต้นไม้ตราดินน้องดา) โดยชั่งดินหนัก 1.000 g ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ใส่น้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 5 ml คนให้เข้ากันและวัด pH ในดินด้วย pH meter จากนั้นชั่งดินด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง ใส่กล่องพลาสติกที่มีขนาด 45 cm x 40 cm x 21 cm ให้ดินมีความสูง 14 cm จากก้นกล่อง คำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องรด เพื่อให้ค่าความชื้นของดินอยู่ในช่วง 40-50 %

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน เริ่มต้นด้วยการถ่ายรูปตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ จากนั้นก็ขุดดินให้ลึก 10 cm แล้วใส่ตัวอย่างลงในหลุมดินและรดน้ำปริมาตร 2 L ต่อดิน 12 kg และจะรดน้ำ 2 L ทุกๆ 2 วัน วัดอุณหภูมิดินและอุณหภูมิห้อง ปิดฝากล่อง และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยการถ่ายภาพทุกวันเป็นเวลา 1 สัปดาห์และหลังจากนั้นทุกสัปดาห์ เป็นเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ 3.4 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน



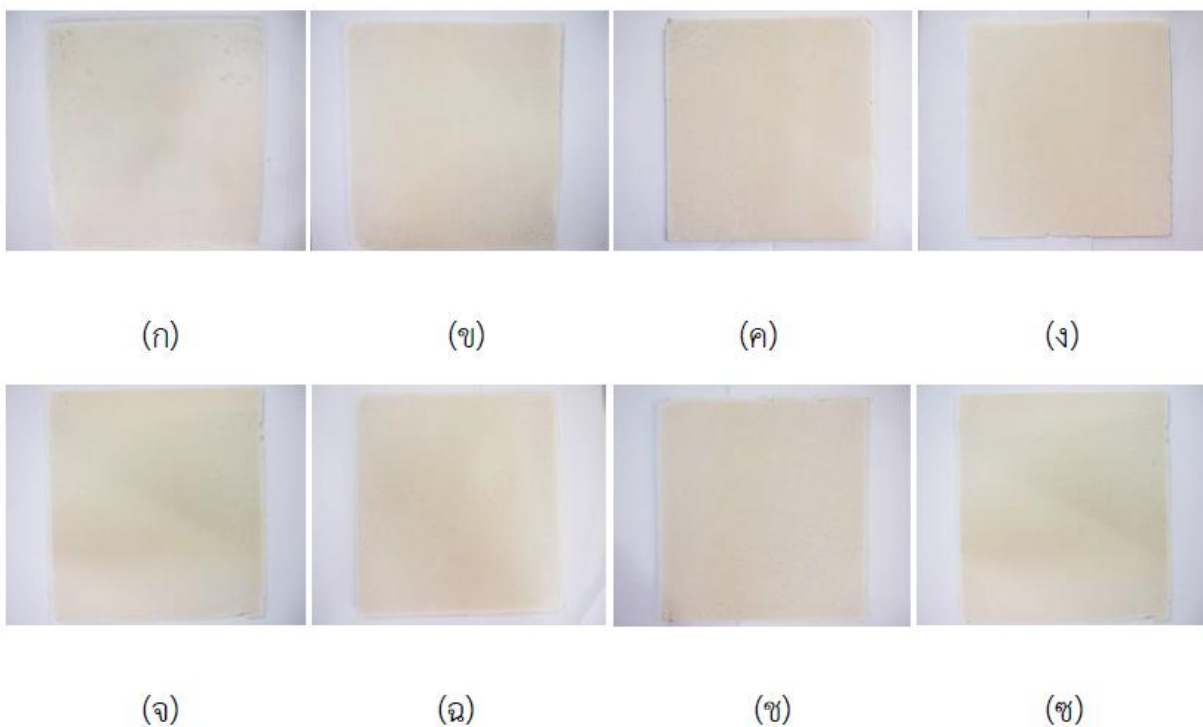
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการฝังดิน; (ก) ขุดดินให้ลึก 10 cm (ข) ใส่ตัวอย่างลงในหลุมดิน (ค) รดน้ำตัวอย่าง

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 โฟมชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง

4.1.1 การขึ้นรูปโฟมจากแป้งมันสำปะหลัง

การศึกษาการขึ้นรูปโฟมที่ทำจากแป้งมันสำปะหลัง และเติมสารเติมแต่งที่มีส่วนประกอบแตกต่างกัน โดยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่ง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป คือ อุณหภูมิ 220 °C ความดัน 1000 atm และเวลา 4.50 นาที และได้โฟมดังรูปที่ 4.1 โฟม CS มีสีขาว ผิวขรุขระและค่อนข้างเหนียว เมื่อเติมสารเติมแต่ง โฟมมีความเรียบเนียนและสามารถลอกออกจากแผ่นฟอยล์อลูมิเนียมได้ง่าย เนื้อโฟมมีความแข็งแรง และเมื่อเติม เกลือโซเดียมมีลักษณะสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเกลือที่เพิ่มขึ้น

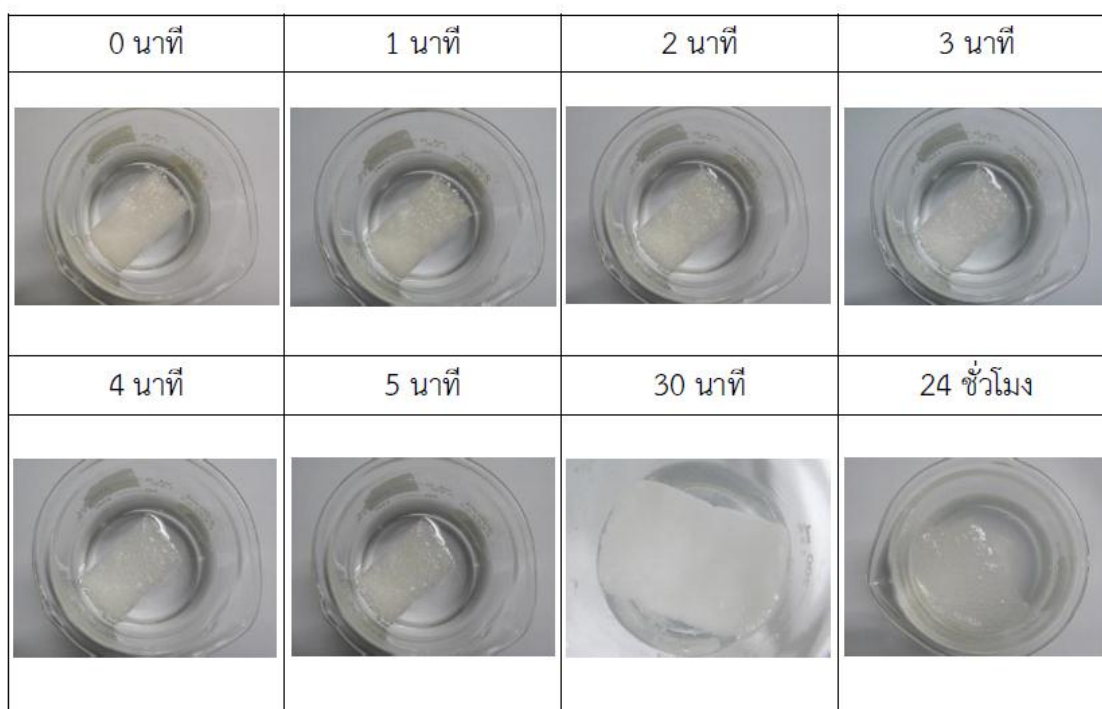


รูปที่ 4.1 แผ่นโฟมตัวอย่างที่ทำมาจากอัตราส่วนต่างกัน (ก) CS (ข) CSA (ค) CSA-5K (ง) CSA-10K (จ) CSA-15K (ฉ) CSA-5MK (ช) CSA-10MK (ซ) CSA-15MK

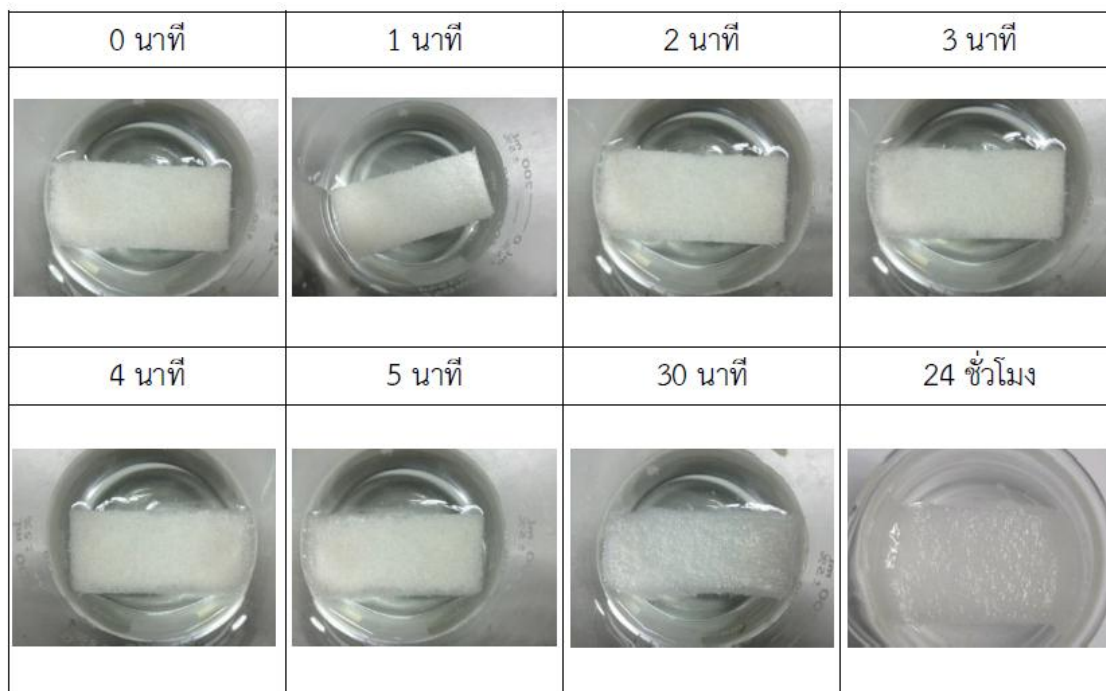
4.1.2 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption capacity)

การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของโฟมตัวอย่างที่อัตราส่วนต่างกัน โดยนำตัวอย่างแช่ลงในน้ำ จับเวลาและถ่ายรูปตัวอย่างในช่วงเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง ได้ผลดังรูปที่ 4.2 (ก)-(ซ) พบว่า โฟมทุกชนิดดูดซับน้ำและเกิดการบวมตัวขึ้น โดยในช่วงเวลา 0-5 นาที ขนาดของตัวอย่างจะใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที โฟมมีการพองตัวและดูดซับน้ำมากขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง โฟม CS (รูปที่ 4.2 ก) มี

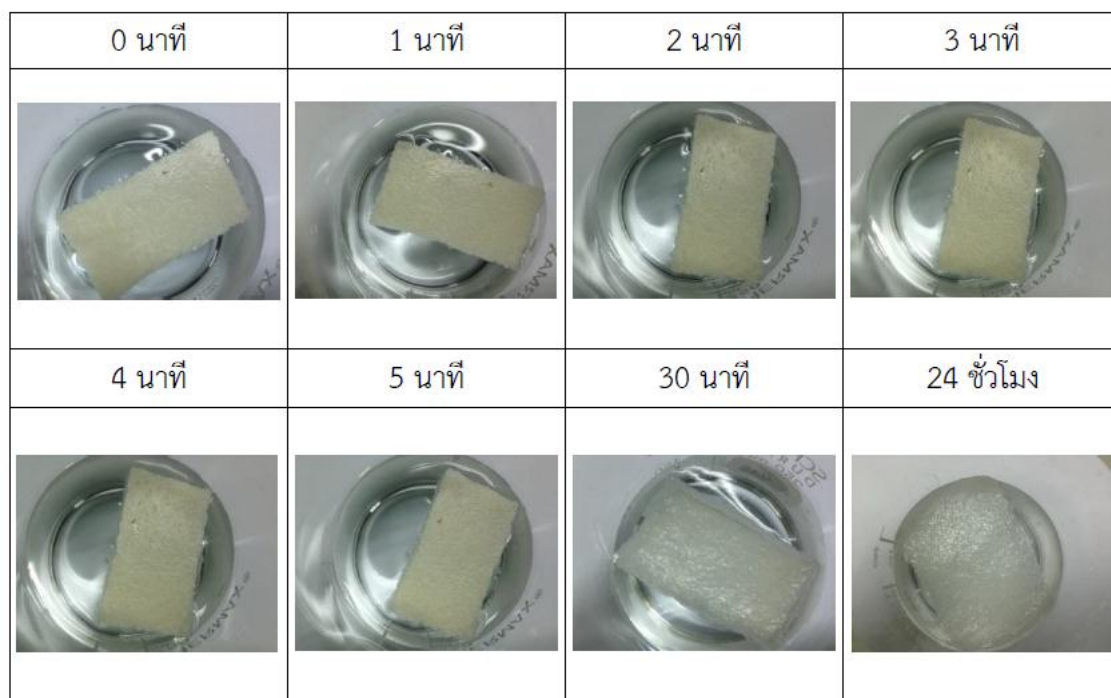
ลักษณะเปื่อย ยุ่ย ละลายไปกับน้ำ เนื่องจากโมเลกุลแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปจับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแป้งและเกิดการดูดน้ำและพองตัวได้ดี จากรูปที่ 4.2 ข พบว่า โฟม CSA มีความต้านทานน้ำและสามารถคงรูปได้ดีกว่าโฟม CS เนื่องจากสารแต่งเติมบางชนิดมีสมบัติไม่ชอบน้ำจึงทำให้เกิดการพองตัวได้น้อยลงและเมื่อเติมเกลือลงไปในตัวอย่าง (รูปที่ 4.2 ค-ซ) โฟมจะพองตัวได้มากแต่ยังคงรูปร่างได้ดีกว่าโฟมที่ไม่เติมเกลือ เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือในโฟมมากขึ้นทำให้ความสามารถในการต้านทานน้ำของโฟมมีประสิทธิภาพดีขึ้น เนื่องจากเกลือมีสมบัติชอบน้ำจึงมีความสามารถในการแย่งจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งแทนน้ำ ทำให้โมเลกุลน้ำเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งได้น้อยลง โฟมจึงยังคงรูปร่างเดิมได้นานขึ้น โดยจะพบว่าโฟมที่มีความต้านทานน้ำได้ดีที่สุด คือ โฟม CSA-15K ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaisangsri และคณะ (2009)



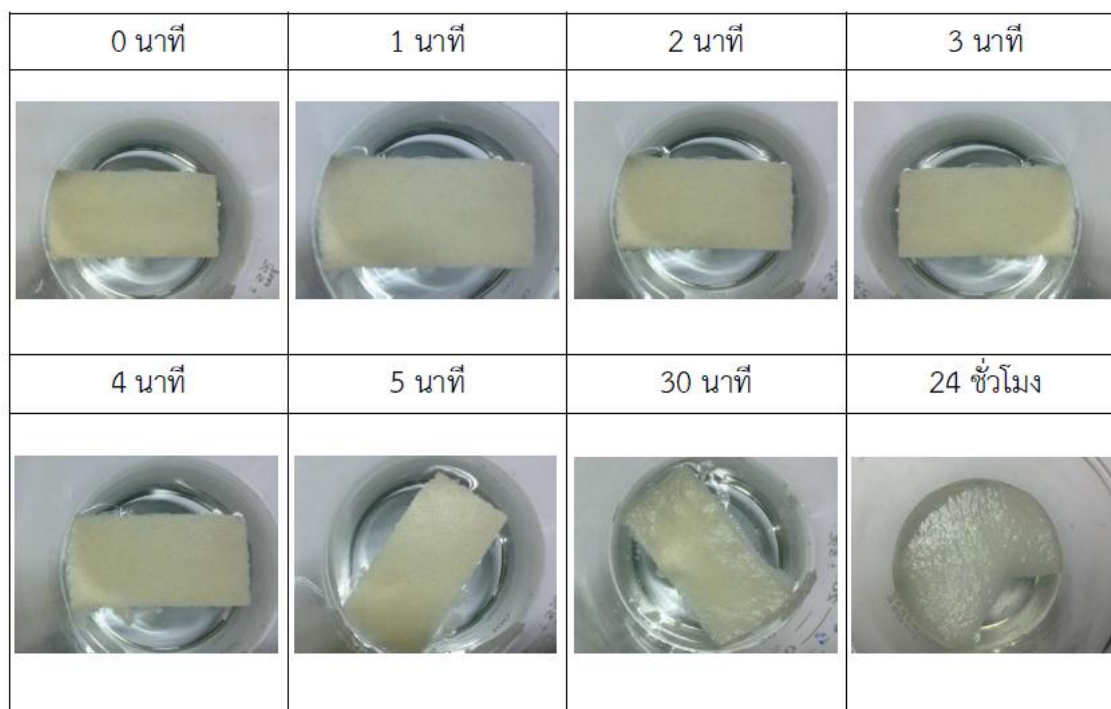
รูปที่ 4.2 (ก) การบวมน้ำของโฟม CS ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาที และ 24 ชั่วโมง



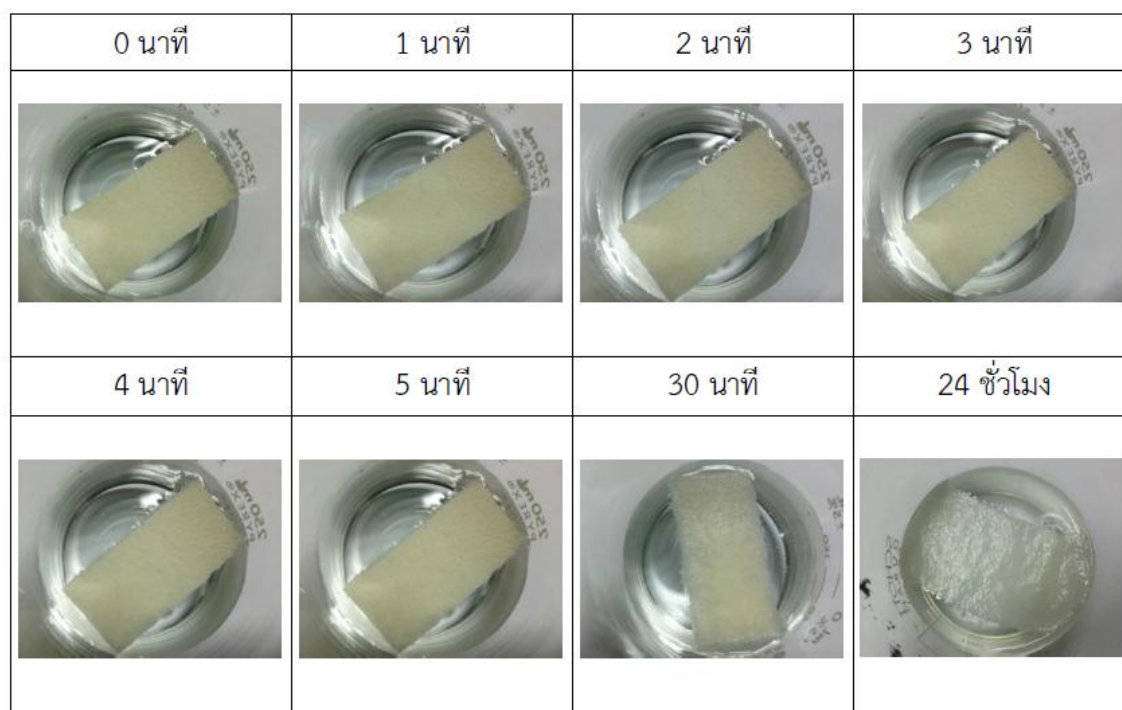
รูปที่ 4.2 (ข) การบวมน้ำของโฟม CSA ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาที และ 24 ชั่วโมง



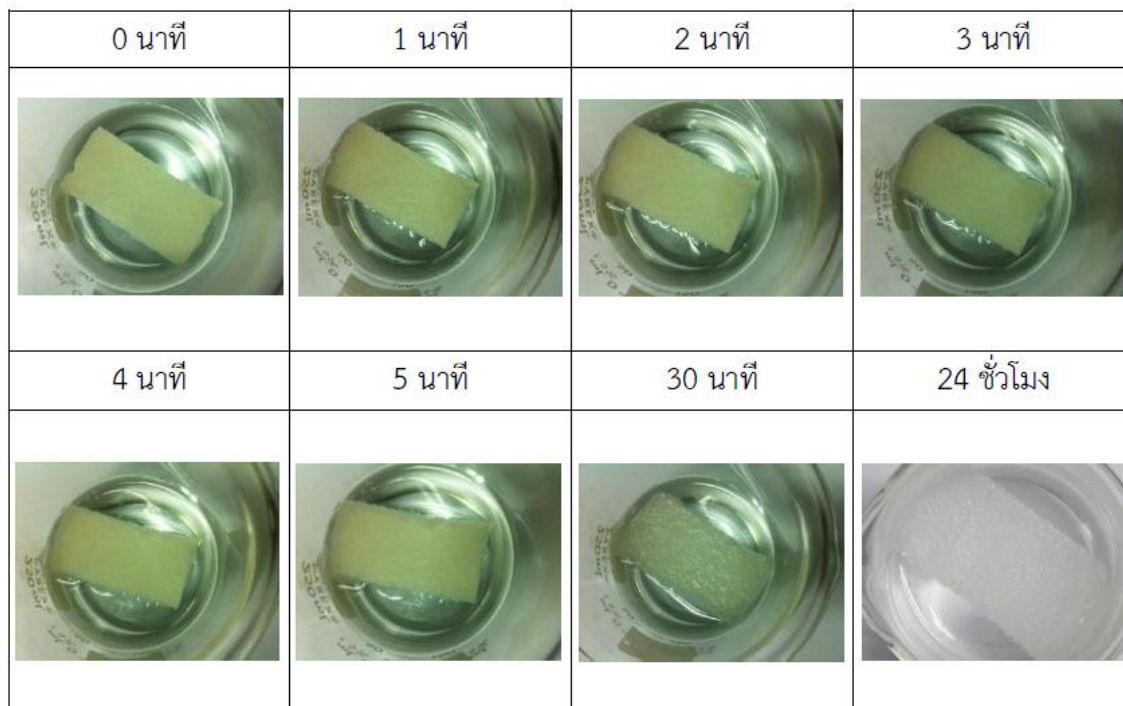
รูปที่ 4.2 (ค) การบวมน้ำของโฟม CSA-5K ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาที และ 24 ชั่วโมง



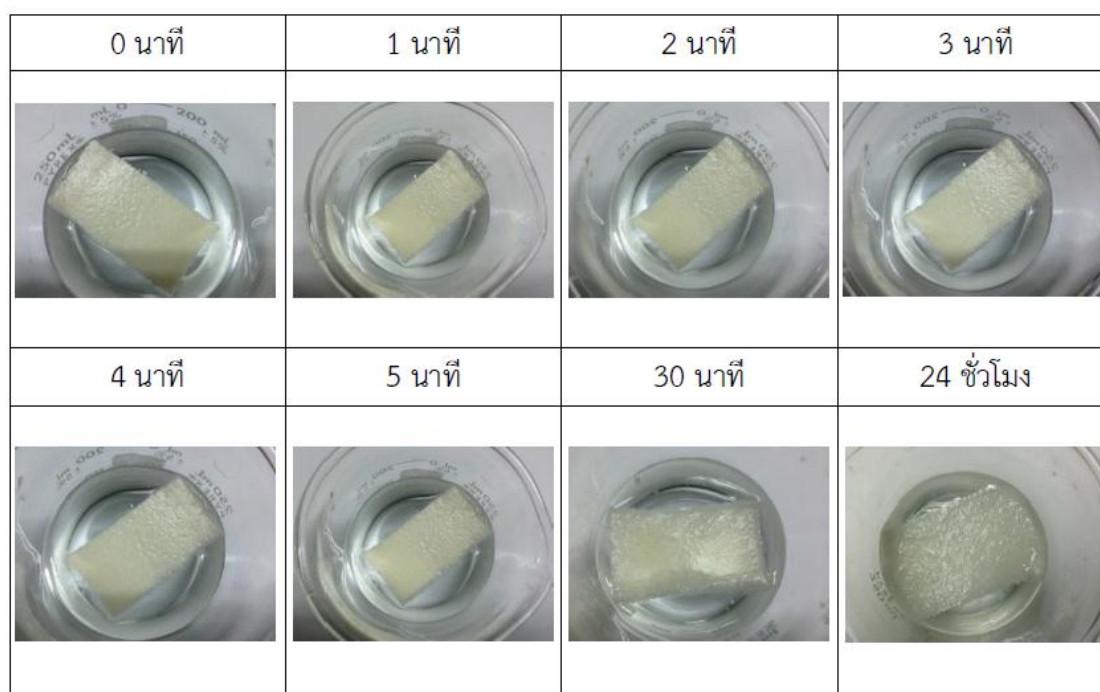
รูปที่ 4.2 (ง) การบวมน้ำของโพลีเมอร์ CSA-10K ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง



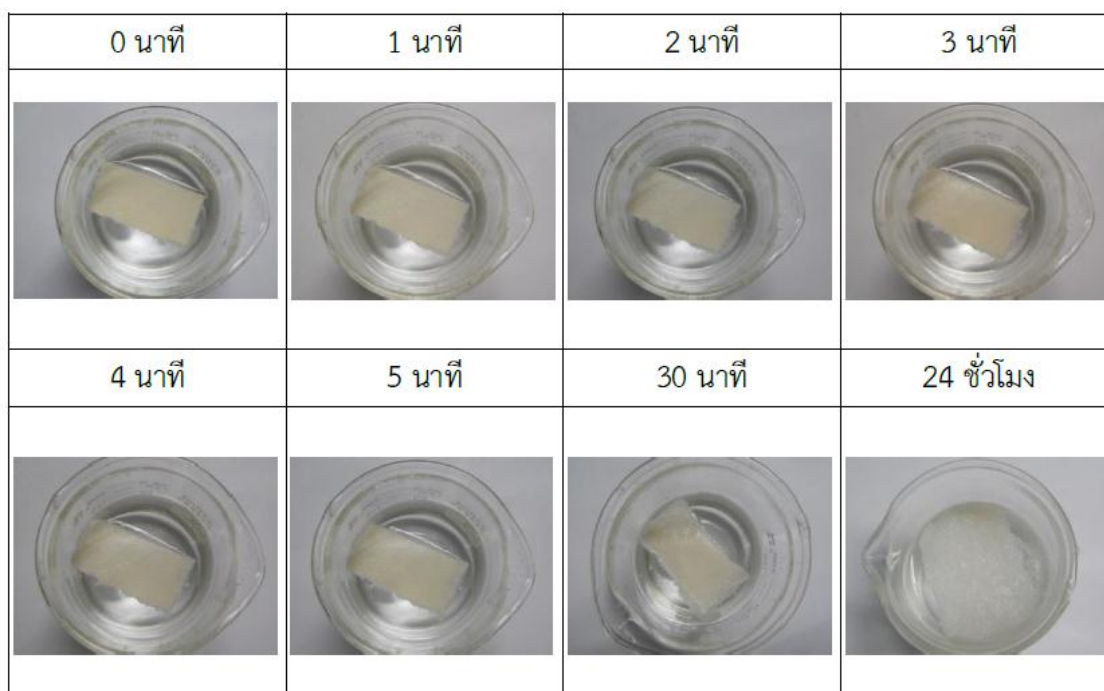
รูปที่ 4.2 (จ) การบวมน้ำของโพลีเมอร์ CSA-15K ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 (ฉ) การบวมน้ำของโฟม CSA-5MK ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 (ซ) การบวมน้ำของโฟม CSA-10MK ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง

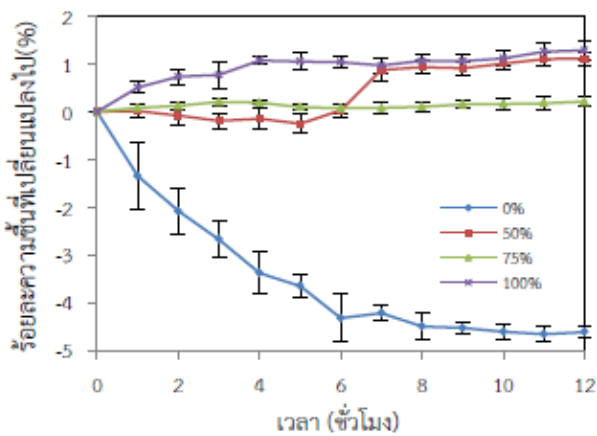


รูปที่ 4.2 (ข) การบวมน้ำของโพลีเมอร์ CSA-15MK ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง

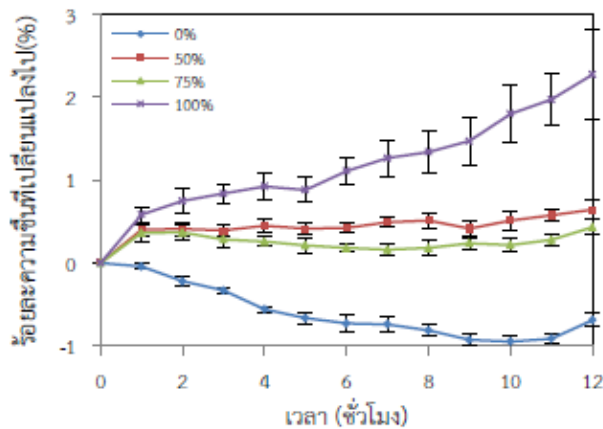
4.1.3 ความสามารถในการดูดซับความชื้น (Water sorption isotherm)

ผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นของแผ่นโพลีเมอร์ตัวอย่าง ภายใต้ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100% เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0% โพลีเมอร์ทุกชนิดมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มากขึ้นใน 1 ชั่วโมงแรกจากนั้นจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งสังเกตได้จากกราฟว่ามีแนวโน้มที่ลดลงทุกชั่วโมง จนกระทั่งคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง สำหรับโพลีเมอร์ CS พบว่าโพลีเมอร์ดูดความชื้นได้น้อยลงเรื่อยๆ จนกระทั่งคงที่ในช่วงเวลา 6-12 ชั่วโมง และที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50 และ 75% โพลีเมอร์ทุกชนิดสามารถดูดความชื้นได้มากขึ้นเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 100% พบว่าโพลีเมอร์ทุกชนิดสามารถดูดความชื้นได้มากที่สุด กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับความชื้นของตัวอย่างโพลีเมอร์ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100% แสดงในรูปที่ 4.3 ผลการทดลองพบว่าโพลีเมอร์ทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับความชื้นมากขึ้นเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น เนื่องจากในแง่มีองค์ประกอบของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำจึงมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี (วัลลดา, 2553) แต่ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0% พบว่าโพลีเมอร์ทุกชนิดมีความสามารถในการดูดความชื้นลดลง จนกระทั่งคงที่ในช่วงเวลา 6-12 ชั่วโมง เนื่องจากในขณะเตรียมตัวอย่างก่อนนำมาทดสอบได้แช่ตัวอย่างโพลีเมอร์เพื่อรักษาระดับความชื้นให้คงที่ในโถดูดความชื้นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50% และเมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0% จึงทำให้โพลีเมอร์ถ่ายเทความชื้นไปยังสภาวะแวดล้อมภายนอก ส่งผลให้โพลีเมอร์มีความสามารถในการดูดซับความชื้นลง โพลีเมอร์ CSA-5K, CSA-10K, CSA-15K, CSA-5MK, CSA-10MK และ CSA-15MK มีความสามารถในการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นสูงกว่าโพลีเมอร์ CS และ โพลีเมอร์ CSA และมีแนวโน้มในการดูดซับความชื้นเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของเกลือ เนื่องจาก

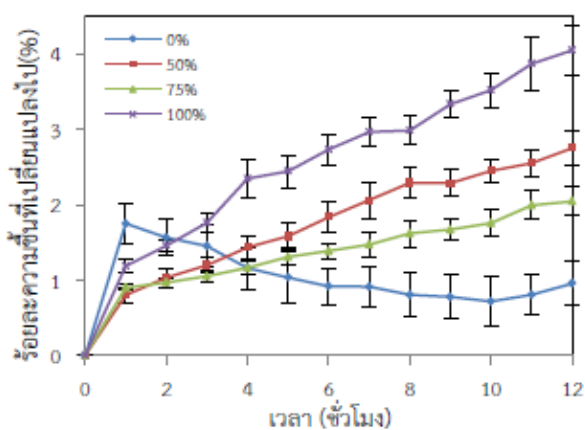
เกล็ดหินมีความสามารถในการดูดซับความชื้น และเมื่อนำมาผสมในโฟมจึงทำให้โฟมมีความสามารถในการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น



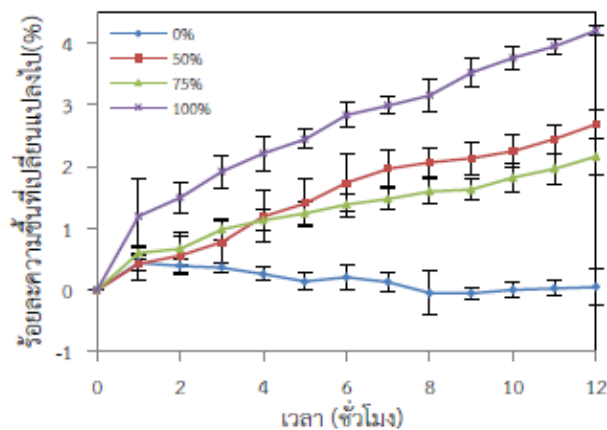
(ก)



(ข)

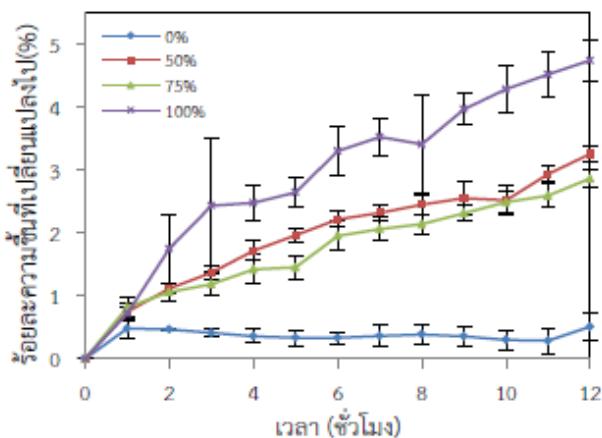


(ค)

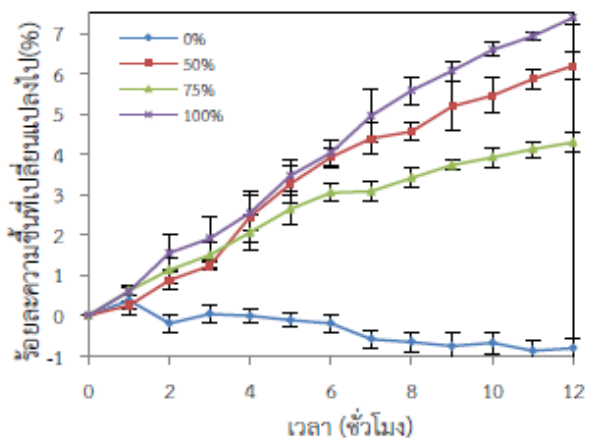


(ง)

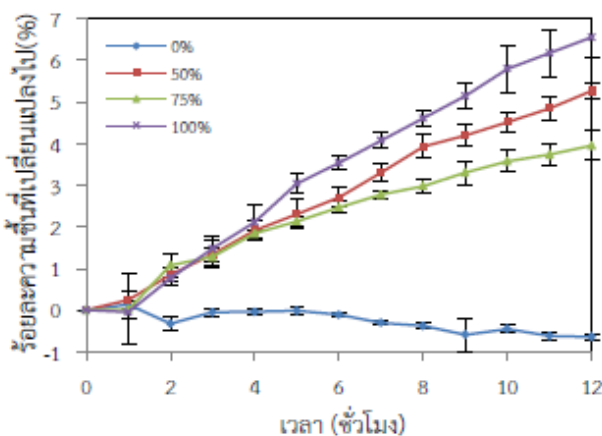
รูปที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100% (ก) CS (ข) CSA (ค) CSA-5K (ง) CSA-10K (จ) CSA-15K (ฉ) CSA-5MK (ช) CSA-10 MK (ซ) CSA-15MK



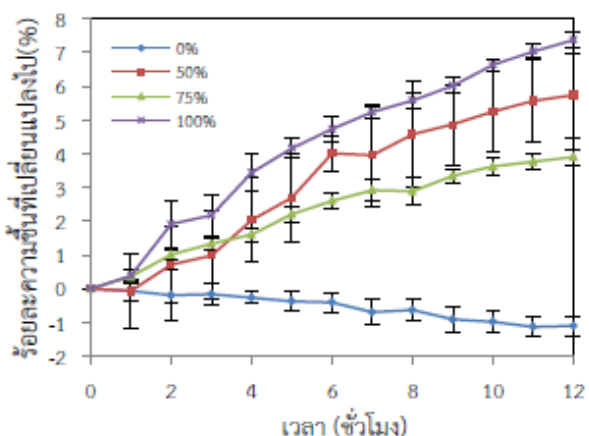
(จ)



(ฉ)



(ช)



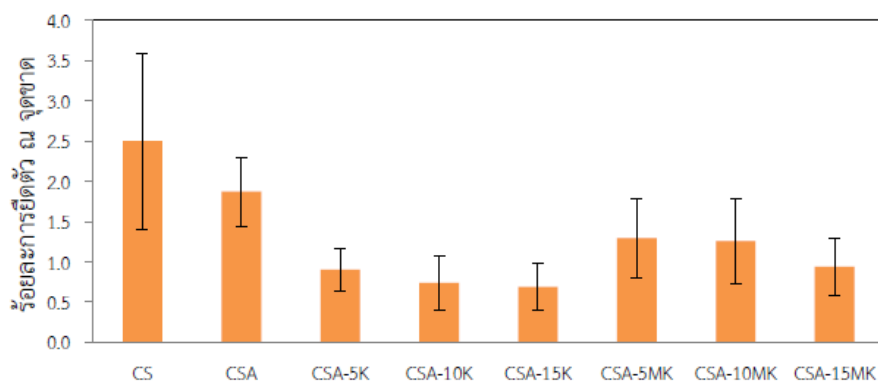
(ซ)

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100% (ก) CS (ข) CSA (ค) CSA-5K (ง) CSA-10K (จ) CSA-15K (ฉ) CSA-5MK (ช) CSA-10 MK (ซ) CSA-15MK

4.1.4 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

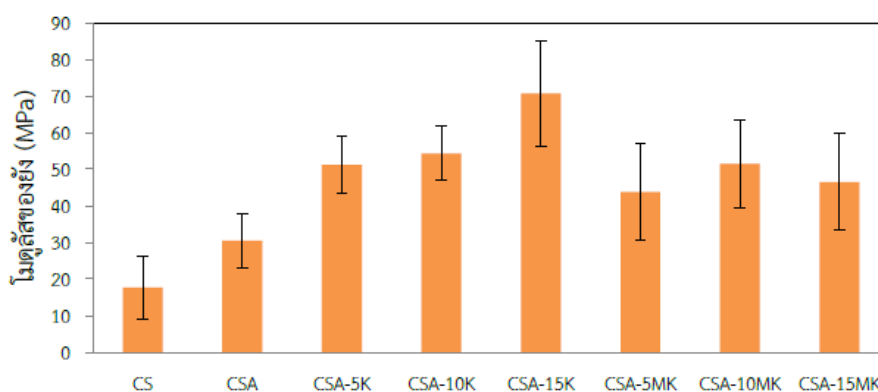
ร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดของตัวอย่างโฟมแสดงใน รูปที่ 4.4 พบว่าโฟม CS มีค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุด เมื่อเติมสารเติมแต่งโฟมมีค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดลดลงและเมื่อเติมเกาลินไม่เผา ค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเกาลินที่เพิ่มขึ้น เพราะชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกาลินมีความเป็นผลึกสูงและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำจึงส่งผลให้โฟมมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อ

เปรียบเทียบกับโฟมที่ไม่มีการเติมเกาลิน ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการยืดออกและเปลี่ยนรูปร่างเป็นไปได้ยากกว่า (วัลลดา, 2553)



รูปที่ 4.4 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของโฟมตัวอย่าง

ค่าโมดูลัสของยังของตัวอย่างโฟมแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าโฟม CS มีค่าโมดูลัสของยังต่ำที่สุด เมื่อเติมสารเติมแต่งโฟมมีค่าโมดูลัสของยังเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเติมเกาลินไม่เผา ค่าโมดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณของเกาลินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกาลินมีความเป็นผลึกสูงและมีองค์ประกอบเป็นสารอนินทรีย์ช่วยเพิ่มความแข็งแรง สามารถทนต่อแรงดึงได้ดี (วัลลดา, 2553) และเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างเกาลินกับแบง์ได้ จึงส่งผลให้โฟมมีความแข็งแรงมากขึ้นตามปริมาณเกาลินที่เพิ่มลงไป อย่างไรก็ตามเมื่อเติมเกาลินเผาพบว่าค่าโมดูลัสของยังของโฟมมีค่าเพิ่มมากกว่าโฟมแบง์ที่ไม่เติมเกาลิน แต่มีค่าน้อยกว่าค่าโมดูลัสของยังของโฟมแบง์ที่เติมเกาลินไม่เผา ทั้งนี้เนื่องจากถึงแม้อนุภาคของเกาลินเผาจะมีความแข็งแรงมากกว่าเกาลินไม่เผา แต่มีปริมาณน้ำภายในโครงสร้างน้อยลงจึงอาจเกิดการแยกวัฏภาคกับแบง์ได้ ทำให้เกิดรอยแยกระหว่างวัฏภาคของแบง์และเกาลินเผา จึงส่งผลให้โฟมที่ผสมเกาลินเผามีค่าโมดูลัสของยังต่ำกว่า (Kaewtatip และคณะ, 2012)

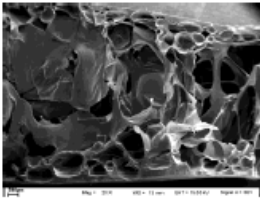
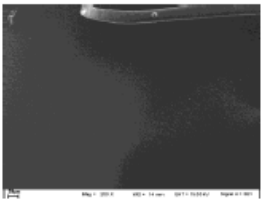
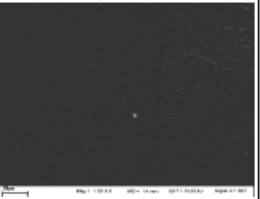
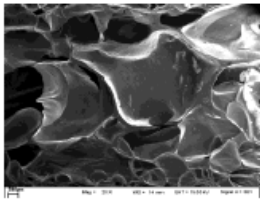
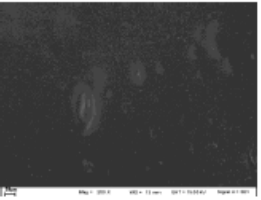
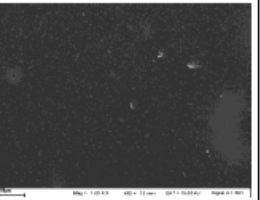
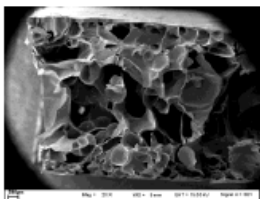
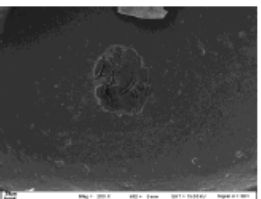
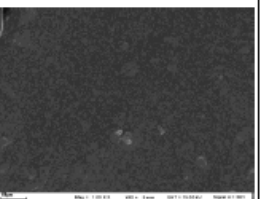


รูปที่ 4.5 ค่าโมดูลัสของยังของโฟมตัวอย่าง

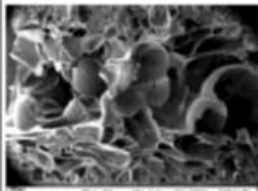
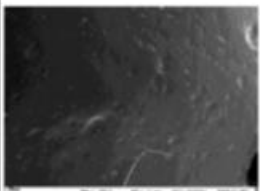
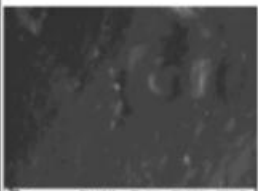
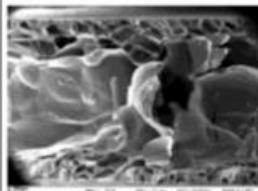

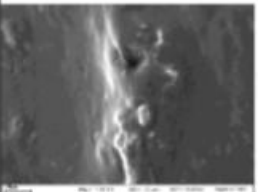
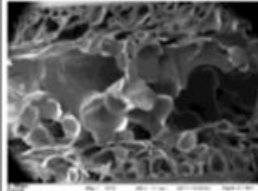
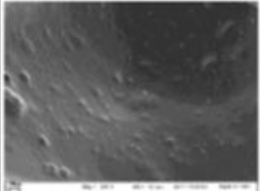
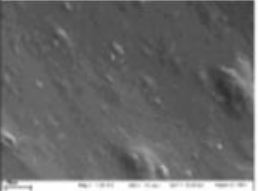
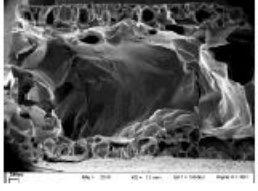
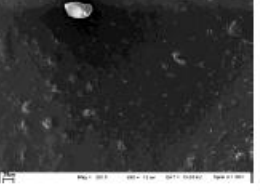
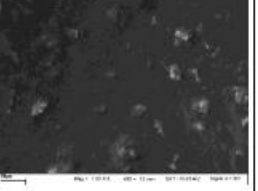
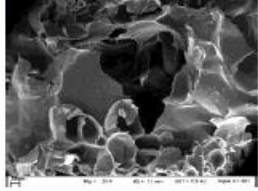

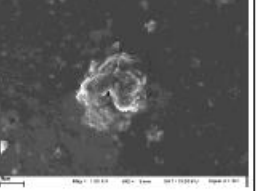
4.1.5 สัณฐานวิทยา (Morphologies)

การศึกษาลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่างโฟมด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า บริเวณผิวโฟม CS มีลักษณะขรุขระเล็กน้อย เมื่อเติมสารเติมแต่งผิวของโฟมมีลักษณะเรียบและเนียนขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mauri และคณะ (2008) และเมื่อเติมเกลือลงไปผิวของโฟมขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือที่เติมลงไป มีอนุภาคเกลือกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ และผิวโฟมของแป้งบางสูตรมีลักษณะเป็นรูเล็กๆ จำนวนมากเนื่องมาจากขณะทำการขึ้นรูปอาจมีการระเหยของน้ำออกมาเร็วเกินไปทำให้เป็นโพรงอากาศ บริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน การศึกษาการกระจายตัวของเกลือในบริเวณรูโพรงของโฟม (ตารางที่ 4.1) พบว่าบริเวณภายในพื้นผิวรูโพรงของโฟม CS มีลักษณะเรียบเนียน และเมื่อเติมสารเติมแต่งผิวของโฟมยังมีลักษณะเรียบและเนียน แต่เมื่อเติมเกลือพบว่าอนุภาคเกลือกระจายตัวได้ค่อนข้างดีและเกาะฝังตัวบนเนื้อแป้งทำให้พื้นผิวขรุขระ และพบว่าพื้นผิวภายในรูโพรงขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือที่เติมลงไป จากรูปยังพบว่าอนุภาคเกลือมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนผิวโฟม และบริเวณรูโพรงของโฟม โดยเกลือไม่เกาะมีรอยต่อระหว่างเฟสของเกลือกับแป้งที่เรียบเนียนมากกว่าเกลือในแป้ง

ตารางที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM แสดงพื้นผิวภายในรูโพรงของโฟม ที่กำลังขยาย 20 200 และ 1000 เท่าและการกระจายตัวของเกลือ

กำลังขยาย \ ชนิดโฟม	20	200	1000
1. CS			
2. CSA			
3. CSA-5K			

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ภาพถ่าย SEM แสดงพื้นผิวภายในรูโพรงของโฟมที่กำลังขยาย 20 200 และ 1000 เท่าและการกระจายตัวของเกล็ดดิน

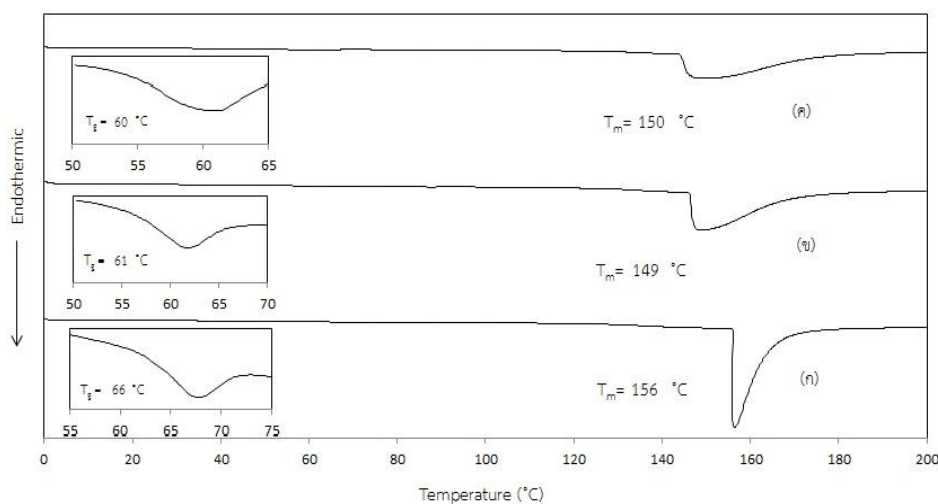
กำลังขยาย	20	200	1000
ชนิดโฟม			
4. CSA-10K			
5. CSA-15K			
6. CSA-5MK			
7. CSA-10MK			
8. CSA-15MK			

4.1.6 สมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ในช่วง 5-200 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ในบรรยากาศของไนโตรเจนของโฟมตัวอย่าง ก) CS ข) CSA และ ค) CSA-15K ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 ผลการทดลองพบว่าโฟมทั้งสามชนิดมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (T_m) ดังนี้ ก) โฟม CS เท่ากับ 156 °C ข) โฟม CSA เท่ากับ 149 °C และ ค) โฟม CSA-15K เท่ากับ 150 °C ดังนั้นการเติมสารเติมแต่ง

ในโพลีเมอร์ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของโพลีเมอร์ลดลง เนื่องจากสารเติมแต่งไปรบกวนการเกิดผลึกของโพลีเมอร์ ทำให้โพลีเมอร์มีความเป็นผลึกน้อยลงจึงมีความสามารถในการทนความร้อนน้อยลง อุณหภูมิหลอมเหลวของโพลีเมอร์ลดลงจาก 156 เหลือ 149 °C เมื่อเติมเกลือลิพิดว่าเกลือลิพิดมีส่วนทำให้โพลีเมอร์มีความสามารถทนความร้อนเพิ่มขึ้นเพราะเกลือลิพิดทำหน้าที่คล้ายกับสารก่อผลึก (Nucleating agent) และเหนี่ยวนำให้สายโซ่ พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น เป็นผลให้ปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้นและส่งผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น (Ouaja, 2011) อุณหภูมิหลอมเหลวของโพลีเมอร์จึงเพิ่มจาก 149 เป็น 150 °C ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลที่กล่าวมาแล้ว

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) พบว่าโพลีเมอร์ CS มีค่า T_g เท่ากับ 66 °C , โพลีเมอร์ CSA มีค่า T_g เท่ากับ 61 °C และ โพลีเมอร์ CSA-15 K มีค่า T_g เท่ากับ 60 °C ซึ่งผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าทั้งสารเติมแต่งเกลือลิพิดที่เติมลงในโพลีเมอร์ จะเข้าไปแทรกตามสายโซ่ของโพลีเมอร์ ทำให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์จึงเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นส่งผลให้ค่า T_g ของโพลีเมอร์ลดลง (Ouaja, 2011)

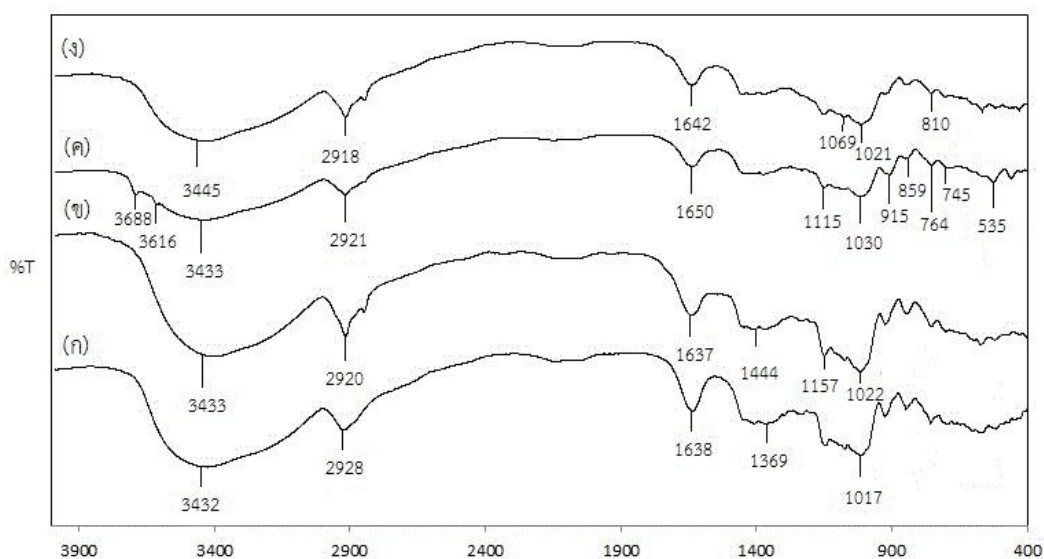


รูปที่ 4.6 DSC เทอร์โมแกรมของโพลีเมอร์ (ก) CS (ข) CSA (ค) CSA-15K

4.1.7 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของโพลีเมอร์ ด้วยเทคนิค FT-IR

อินฟราเรดสเปกตรัมของโพลีเมอร์ตัวอย่าง ก) CS ข) CSA ค) CSA-15K และ 4.) CSA-15MK ทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ที่ช่วงเลขคลื่น 400-4000 cm^{-1} แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าโพลีเมอร์ CS (รูป 4.7 ก) ปรากฏพีกของการสั่นแบบ OH Stretching ที่ 3432 cm^{-1} ของแอมไนด์สำหรับปลาย พีกที่ 2928 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH - Stretching ของ CH_2 หรือ CH_3 ของแอมไนด์สำหรับปลาย พีกที่ 1638 cm^{-1} เป็นลักษณะ C=O Stretching ของหมู่เอไมด์ของแอมไนด์สำหรับปลาย (Tanrattanakul และคณะ, 2014) ซึ่งจะไปซ้อนทับกับลักษณะการสั่นของ OH ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแอมไนด์ พีกที่ 1017 cm^{-1} เป็นของ C-O-C Stretching จากแอมไนด์สำหรับปลาย (Kaewtatip และคณะ, 2008) เมื่อเติมสารเติมแต่ง (รูป 4.7 ข) ปรากฏพีกของการสั่นแบบ OH Stretching พีกที่ 3433 cm^{-1} ของกลีเซอรอล (Hwansanoet และคณะ, 2012) พีกที่ 1444 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C=O ของแอมไนด์เชื่อม

สเตียเรท (Javadzadeh และคณะ, 2012) พีกที่ 1157 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C=O ของไขมัน (Adhikari และคณะ, 2014) พีกที่ 1022 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นของ C-O-C Stretching ของกัมร์กัม (Zia และคณะ, 2013) เมื่อเติมเกาลินไม่เผา (รูป 4.7 ค) ปรากฏพีกของการสั่นแบบ OH Stretching พีกที่ 3616 และ 3688 cm^{-1} ของเกาลินไม่เผา พีกที่ 1115 cm^{-1} เป็นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O Stretching ในเกาลินไม่เผา พีกที่ 1030 cm^{-1} เป็นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O bond ในเกาลินไม่เผา พีกที่ $800-700\text{ cm}^{-1}$ เป็นของหมู่ฟังก์ชัน Al-O bond ในเกาลิน พีกที่ 535 cm^{-1} เป็นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Al bond ในเกาลินไม่เผา (Samet และคณะ, 2013) และเมื่อเติมเกาลินเผา (รูป 4.7 ง) ปรากฏพีกของการสั่นแบบ 1069 cm^{-1} เป็นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O Stretching ในเกาลินเผา พีกที่ 810 cm^{-1} เป็นของหมู่ฟังก์ชัน Al-O bond ในเกาลินเผา (Chen และคณะ, 2014) แสดงให้เห็นว่าทุกองค์ประกอบในโพนัมแปงไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน เป็นเพียงการผสมอยู่ร่วมกันเท่านั้น

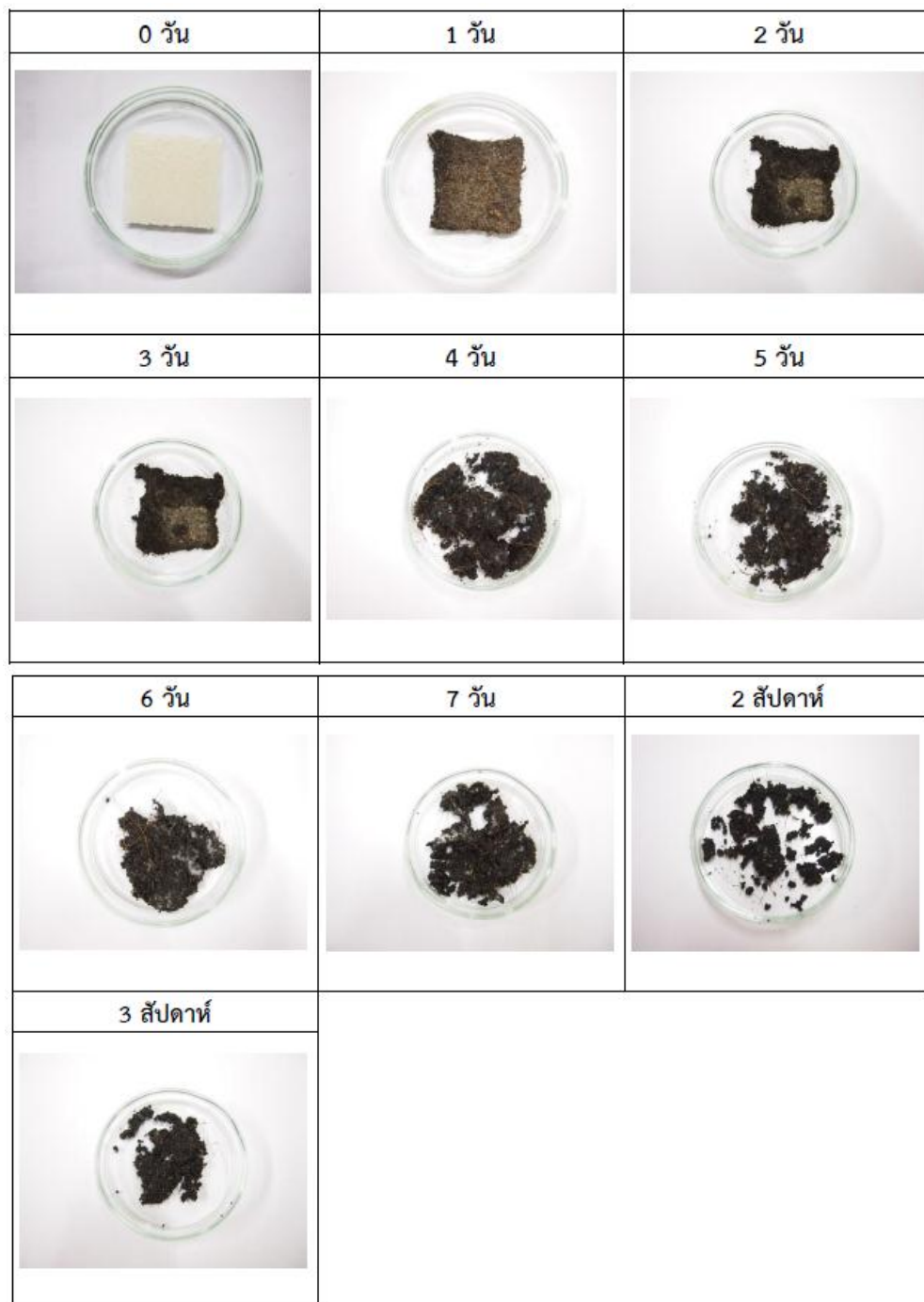


รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของโพนัม (ก) CS (ข) CSA (ค) CSA-15K (ง) CSA-15MK

4.1.8 การศึกษาความสามารถในการย่อยสลาย

จากการติดตามการย่อยสลายทางชีวภาพของโพนัม CSA-15K โดยการฝังดินในดินที่มีค่า pH เท่ากับ 6.6 ทำการทดลองในห้องซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $22-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของดินในช่วงการย่อยสลายอยู่ระหว่าง $21-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยการติดตามลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงโดยการถ่ายรูปด้วยกล้องดิจิทัลเพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นตัวอย่างโพนัมในเวลาต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 จากการสังเกตพบว่า ก่อนนำตัวอย่างโพนัมมาฝังดิน โพนัมมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบสีขาวนวลปนเหลืองเล็กน้อย เมื่อนำโพนัมมาฝังดินเป็นเวลา 1 วัน พบว่าโพนัมดูดซับความชื้นในดิน เนื้อโพนัมนิ่มขึ้นแต่ยังคงรูปเดิม และมีเศษดินติดอยู่บนเนื้อโพนัม ทำให้ไม่สามารถชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละที่หายไปได้ เมื่อฝังดินครบ 1 สัปดาห์ โพนัมเริ่มฉีกขาดเป็นชิ้นเล็กๆ ในสัปดาห์ที่ 2

โพนเริ่มเปื่อยยุ่ยมากขึ้นและมีการเปลี่ยนรูปร่าง ในสัปดาห์ที่ 3 โพนมีการย่อยสลายเป็นชิ้นเล็กจนเกือบหมด และในสัปดาห์ที่ 4 โพนมีการเสียดสภาพไปจน ไม่สามารถแยกแหว่งเนื้อโพนกับดินได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปจากผลการทดลองนี้ว่าโพนแปงมีการย่อยสลายในดินได้ดีมาก จนกระทั่งรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับดินได้ภายในเวลา 4 สัปดาห์

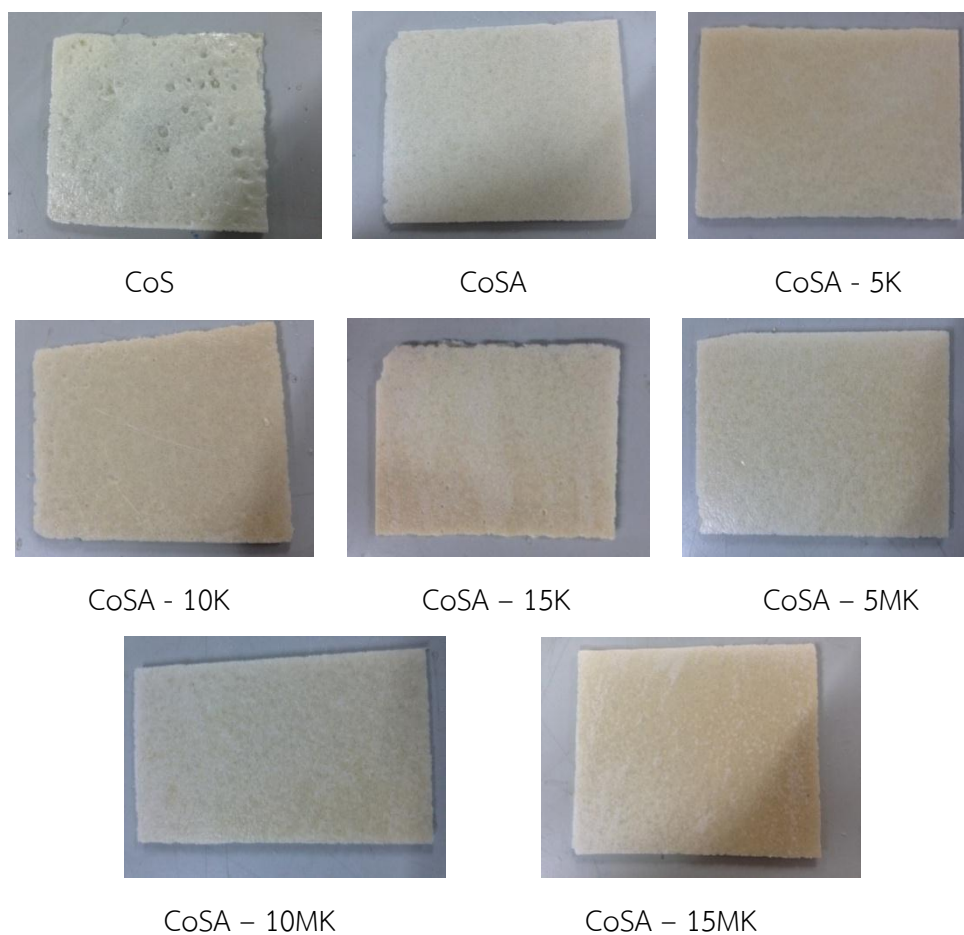


รูปที่ 4.8 การย่อยสลายทางชีวภาพของโพน CSA-15K

4.2 โฟมชีวภาพจากแป้งข้าวโพด

4.2.1 สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

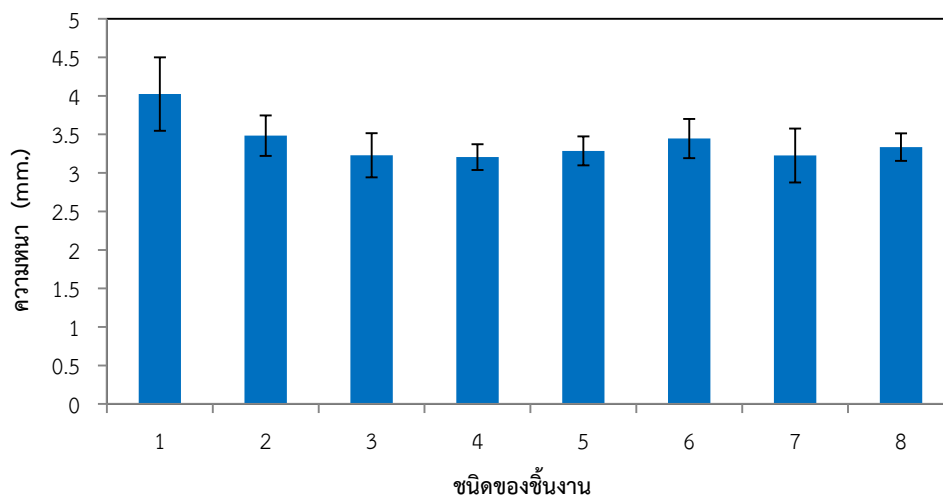
เมื่อทำการขึ้นรูปโฟมที่ทำจากแป้งข้าวโพดผสมกับแป้งข้าวเหนียว และเติมสารเติมแต่งที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป คือ อุณหภูมิ 220 °C ความดัน 1000 atm เป็นเวลา 4:15 นาที และได้แผ่นโฟมดังรูป 4.9 โฟม CoS มีสีขาว มีรูพรุนบนพื้นผิวและค่อนข้างเปราะ เมื่อเติมสารเติมแต่งโฟมมีความเรียบเนียนและสามารถลอกออกจากแผ่นฟอยล์อะลูมิเนียมได้ง่าย เมื่อเติมเกาลินพบว่าโฟมมีสีเหลืองขึ้นตามปริมาณของเกาลินที่เพิ่มขึ้น



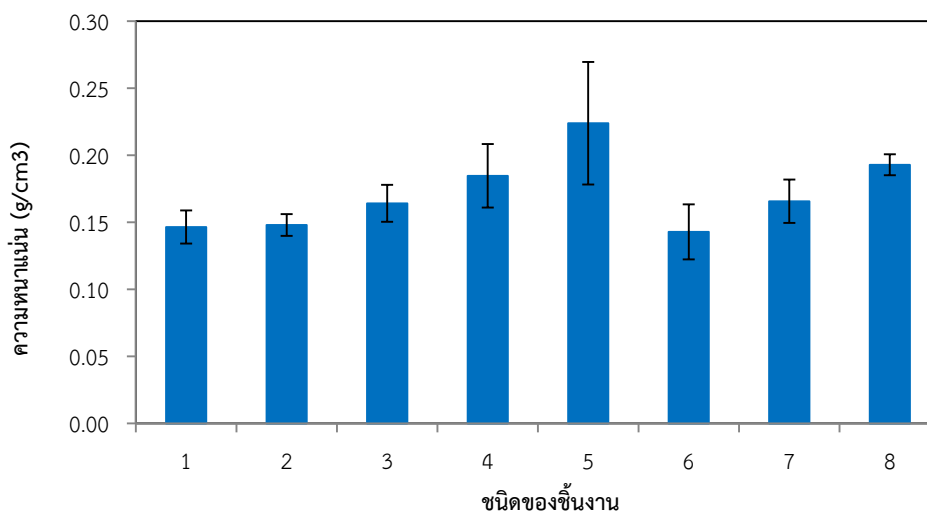
รูปที่ 4.9 แผ่นโฟมตัวอย่าง

4.2.2 ความหนาของแผ่นโฟม

การความหนาของแผ่นโฟมตัวอย่างที่เติมสารเติมแต่งแตกต่างกัน โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ระบบดิจิตอลในการวัด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 พบว่าโฟม CoS มีความหนามากที่สุดเนื่องจากน้ำเป็นตัวทำให้แบ่งเกิดการพองตัวเป็นรูโพรง ส่วนโฟมที่เติมสารเติมแต่งจะมีความหนาลดลงเล็กน้อยเนื่องจากสารเติมแต่งบางชนิดมีความหนืดทำให้เกิดแรงกดทับในขณะที่ขึ้นรูปทำให้แบ่งพองตัวได้น้อยลง และเมื่อเติมเกาลินจะมีความหนาลดลงเช่นกันเนื่องจากเกาลินมีความหนาแน่นสูงจึงทำให้โฟมมีความหนาลดลง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 4 mm.



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับชนิดของแผ่นโฟม (1) CoS (2) CoSA (3) CoSA – 5K (4) CoSA – 10K (5) CoSA – 15K (6) CoSA – 5MK (7) CoSA – 10MK (8) CoSA – 15MK



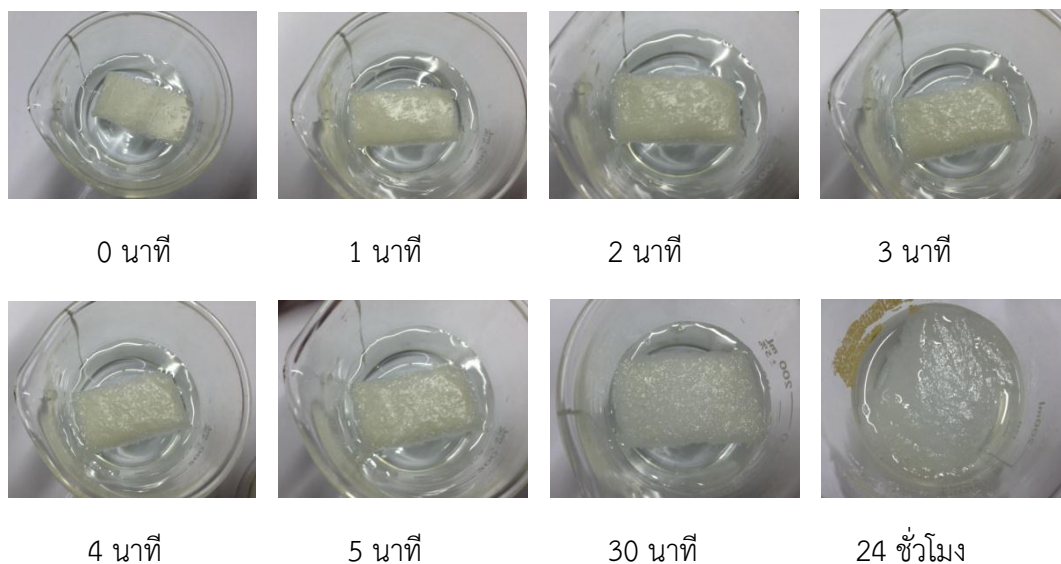
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับชนิดของแผ่นโฟม (1) CoS (2) CoSA (3) CoSA – 5K (4) CoSA – 10K (5) CoSA – 15K (6) CoSA – 5MK (7) CoSA – 10MK (8) CoSA – 15MK

4.2.3 ความหนาแน่นของแผ่นโฟม

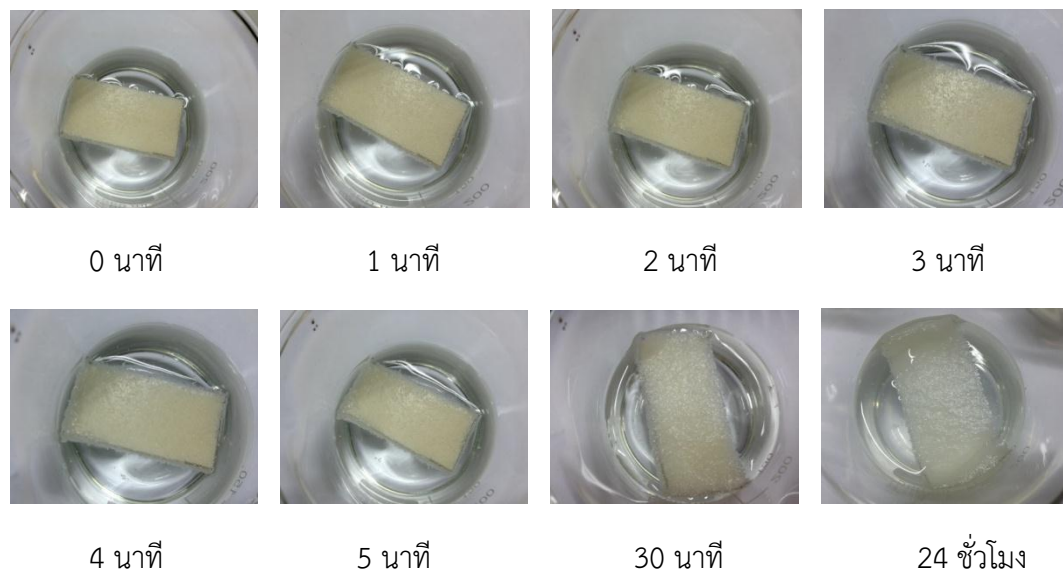
ความหนาแน่นของโฟมตัวอย่างที่อัตราส่วนต่างกัน ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของแผ่นโฟม ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 พบว่าโฟม CoS มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.1464 g/cm^3 ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างแผ่นโฟมที่ใส่สารเติมแต่ง และเมื่อเพิ่มปริมาณเกาลินทั้งเผาและไม่เผาในโฟม พบว่าโฟมมีความหนาแน่นมากขึ้นตามปริมาณเกาลินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกาลินมีความเป็นผลึกสูงและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำเมื่อเติมลงในตัวอย่างจึงช่วยให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแต่ทำให้แตกหักง่าย (ปริดา, 2547)

4.2.4 ความสามารถในการดูดซับน้ำ

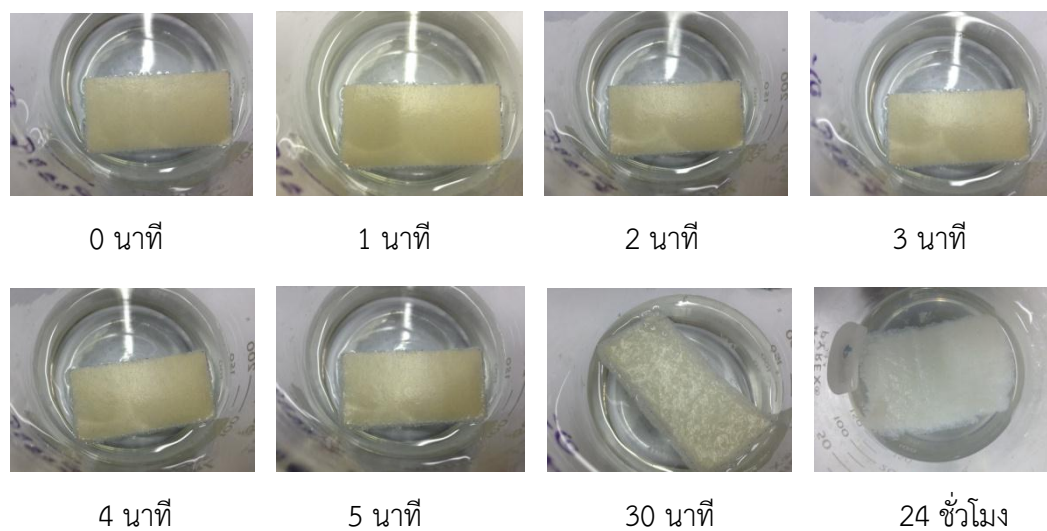
การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของโฟมตัวอย่างที่อัตราส่วนต่างกัน ได้ผลดังรูปที่ 4.12 พบว่าโฟมทุกชนิดดูดซับน้ำและเกิดการบวมตัวขึ้นในช่วงเวลาที่ 0-5 นาทีโดยที่ขนาดของตัวอย่างมีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที โฟมมีการพองตัวและดูดซับน้ำมากขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง โฟม CoS (รูปที่ 4.12 ก) มีลักษณะเปื่อยยุ่ยและละลายไปกับน้ำ เนื่องจากโมเลกุลแบ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปจับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแบ่งและเกิดการดูดซับน้ำและพองตัวได้ดี โฟม CoSA (รูปที่ 4.12 ข) มีความต้านทานน้ำและสามารถคงรูปได้ดีกว่าโฟม CoS และยังคงรูปร่างโดยไม่เปื่อยยุ่ยไปกับน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เนื่องจากสารแต่งเติมบางชนิดมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำจึงทำให้เกิดการพองตัวและดูดซับน้ำได้น้อยลง และเมื่อเติมเกาลินลงในโฟมตัวอย่าง (รูปที่ 4.12 ค-ข) โฟมมีลักษณะพองตัวเล็กน้อยและยังคงรูปร่างเดิม เมื่อเพิ่มปริมาณเกาลินในโฟมมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการต้านทานของน้ำมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกาลินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกาลินมีสมบัติชอบน้ำจึงมีความสามารถในการแย่งจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของแบ่งแทนน้ำ ทำให้โมเลกุลน้ำเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแบ่งได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaisangsri และคณะ, 2009



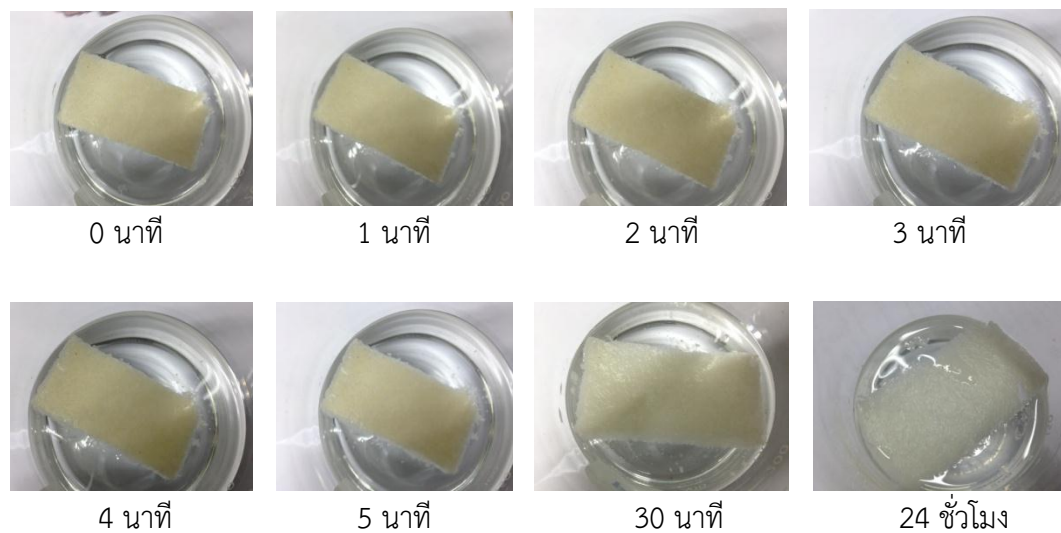
รูปที่ 4.12 (ก) การบวมตัวของโฟม CoS ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง



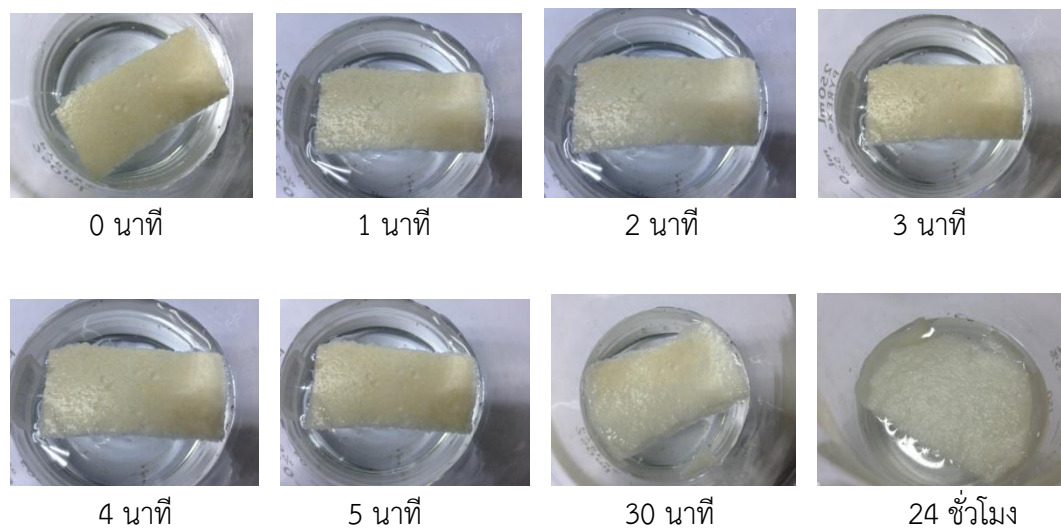
รูปที่ 4.12 (ข) การบวมน้ำของโฟม CoSA ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง



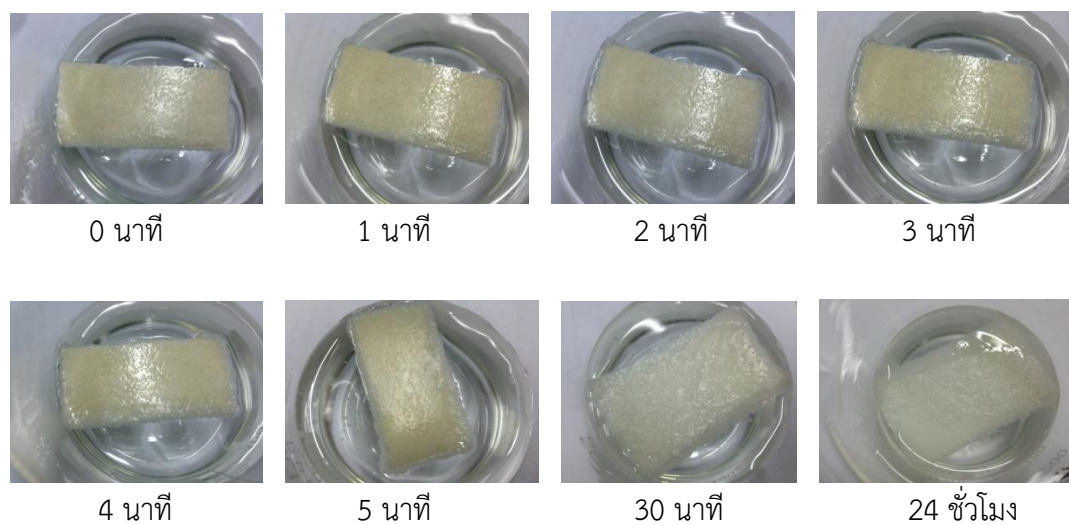
รูปที่ 4.12 (ค) การบวมน้ำของโฟม CoSA - 5K ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง



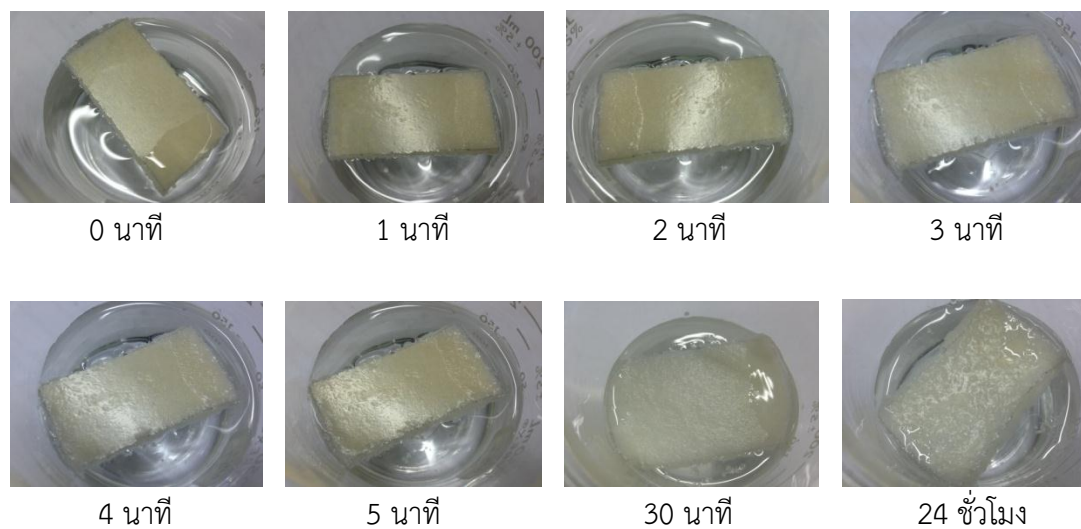
รูปที่ 4.12 (ง) การบวมน้ำของโพลิม CoSA – 10K ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง



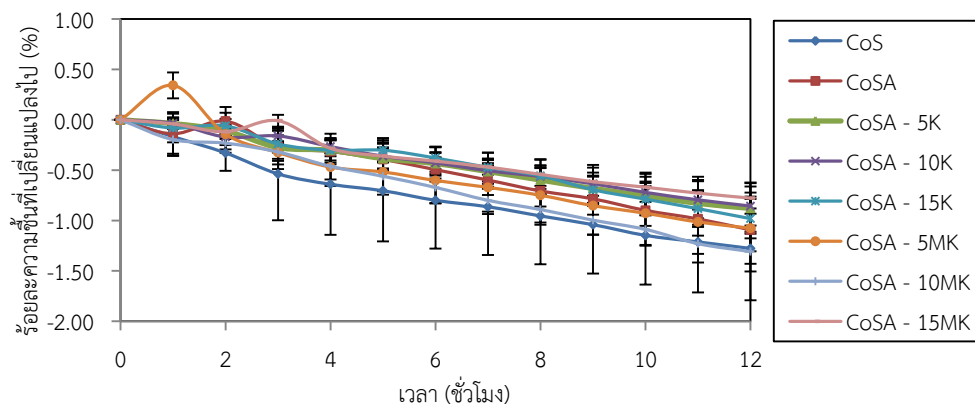
รูปที่ 4.12 (จ) การบวมน้ำของโพลิม CoSA – 15K ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง



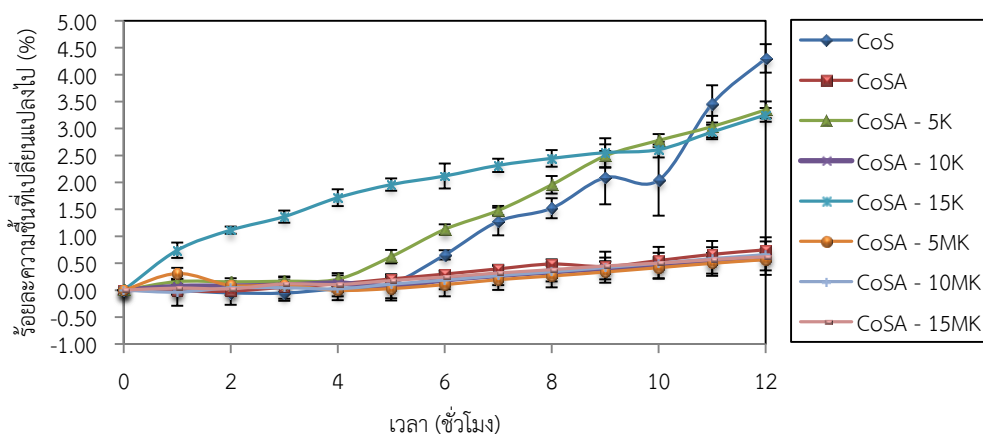
รูปที่ 4.12 (จ) การบวมน้ำของโพลัม CoSA – 5MK ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง



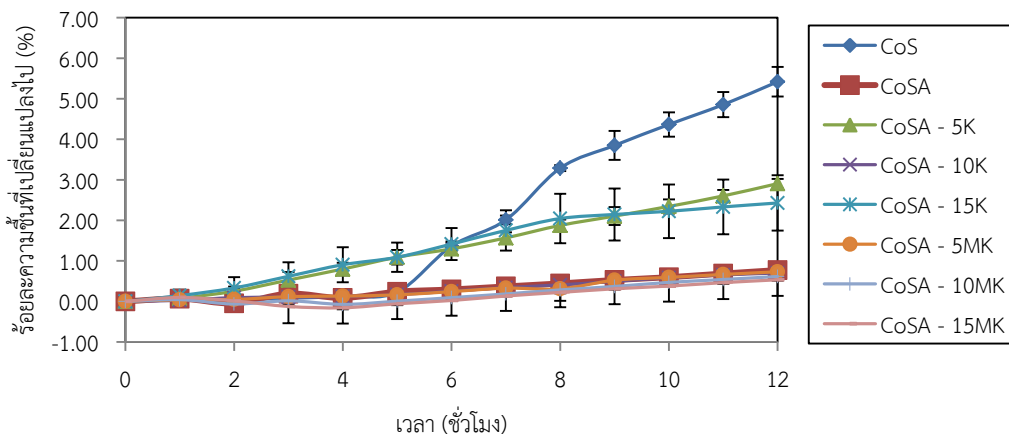
รูปที่ 4.12 (ข) การบวมน้ำของโพลัม CoSA – 10MK ที่แช่น้ำเป็นเวลา 0 1 2 3 4 5 30 นาทีและ 24 ชั่วโมง



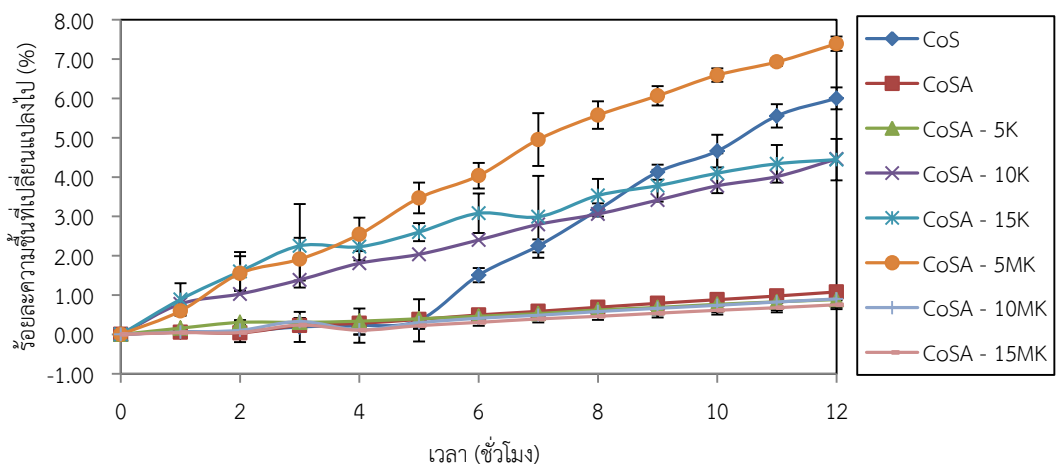
รูปที่ 4.13 (ก) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0%



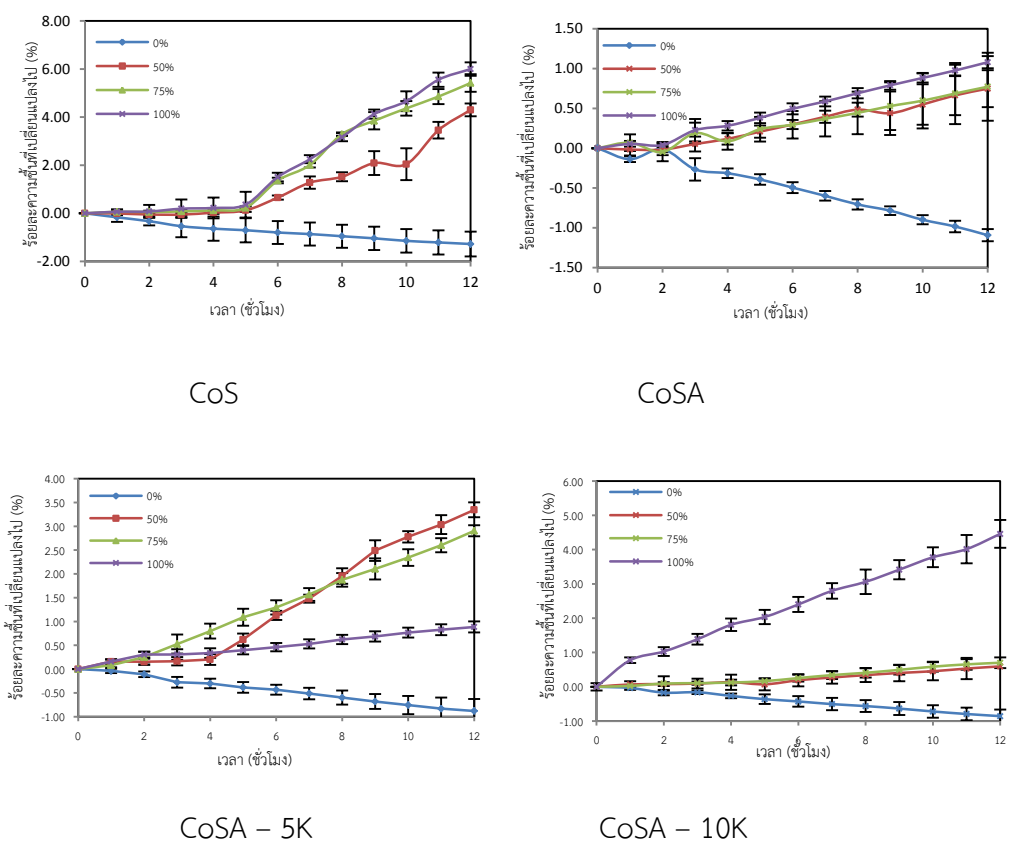
รูปที่ 4.13 (ข) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50%



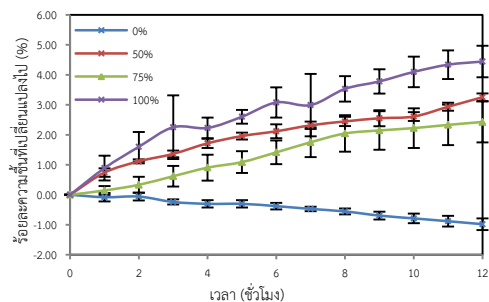
รูปที่ 4.13 (ค) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 75%



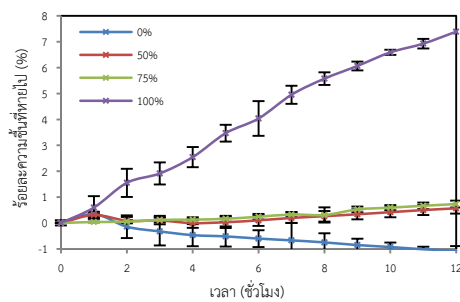
รูปที่ 4.13 (ง) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 100%



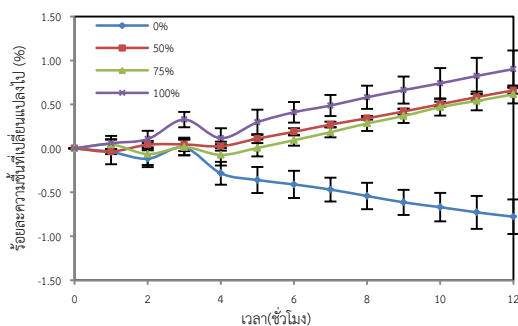
รูปที่ 4.14 ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100%



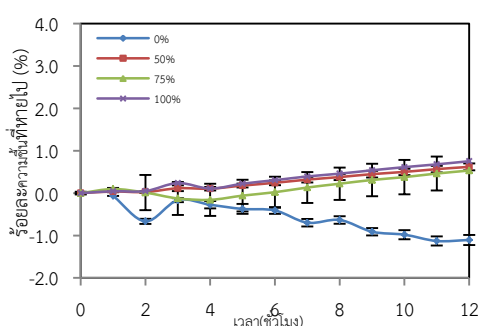
CoSA - 15K



CoSA - 5MK



CoSA - 10MK



CoSA - 15MK

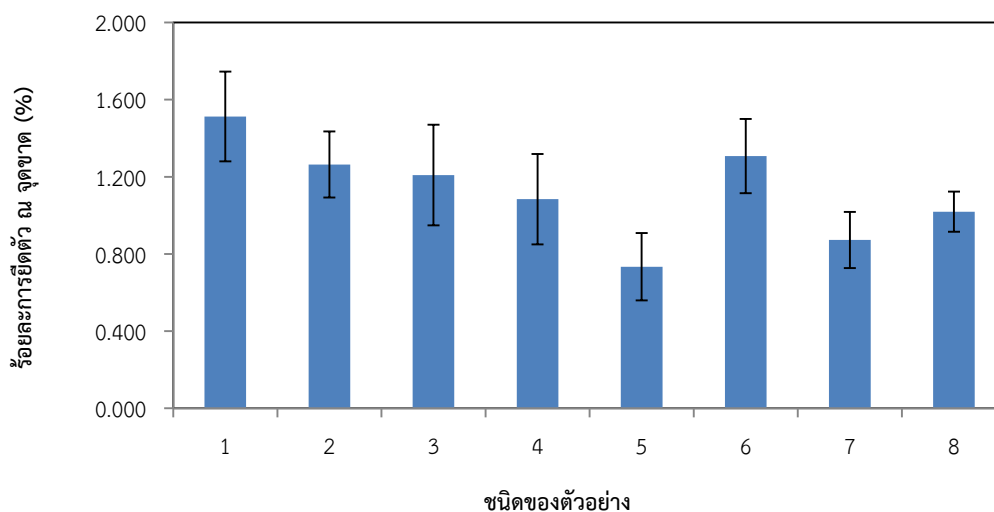
รูปที่ 4.14 (ต่อ) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโพลีที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 0 50 75 และ 100%

4.2.6 สมบัติเชิงกลของโพลี

จากการทดสอบความทนแรงดึงของโพลีตัวอย่าง ตัวอย่างละ 15 ชิ้น โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 29 °C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50% โดยกำหนดความยาวพิกัด (Gauge length) 10 mm อัตราเร็วในการดึง 2 mm/sec ส่วนวัดแรง (Load cell) 500 N ดึงด้วยอัตราเร็วคงที่จนกระทั่งชิ้นงานขาด วัดร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break) โมดูลัสของยัง (Young's modulus) ความเค้น (Stress at break) ความเค้นสูงสุด (Stress at peak) ได้ผลการทดลองดังนี้

การทดสอบการร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของตัวอย่างโพลี ได้ผลดังรูปที่ 4.15 พบว่าโพลี CoS มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุด เมื่อเติมสารเติมแต่งลงในตัวอย่างโพลีพบว่า ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงคิดเป็น 7% เมื่อเทียบกับโพลี CoS และเมื่อเติมเกาลินไม่เผาพบว่า ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเกาลินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกาลินมีความเป็นผลึกสูงและมีความสามารถในการยืดตัวต่ำเมื่อเติมลงในตัวอย่างจึงช่วยให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงขึ้นแต่ทำให้แตกหักง่าย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wattanakornsiri, A. และคณะ (2012) เมื่อเติมเกาลินเผา พบว่าค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของโพลีมีค่ามา

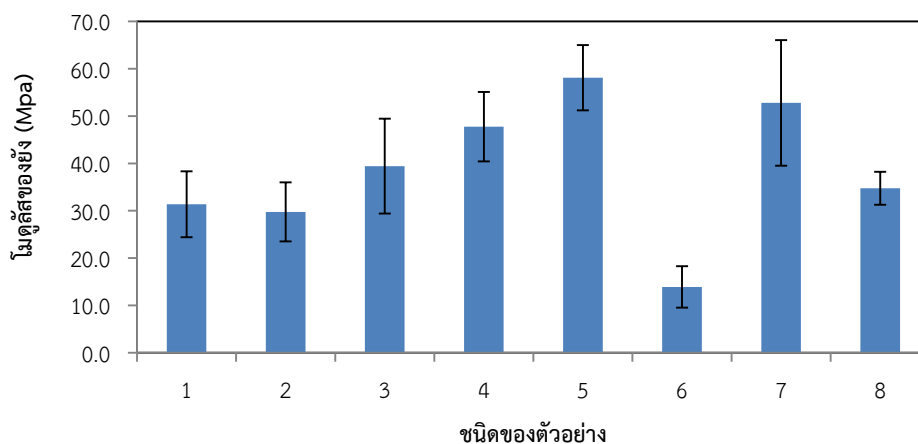
กว่าเกลินไม่เผา เนื่องจากเกลินไม่เผาและเผามีองค์ประกอบที่ต่างกันคือเกลินเผาไม่มีน้ำเป็นองค์ประกอบและมีปริมาณซิลิกอนออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้นและเมื่อนำไปทดสอบพบว่าชิ้นงานแตกหักง่าย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ปรีดา, 2547)



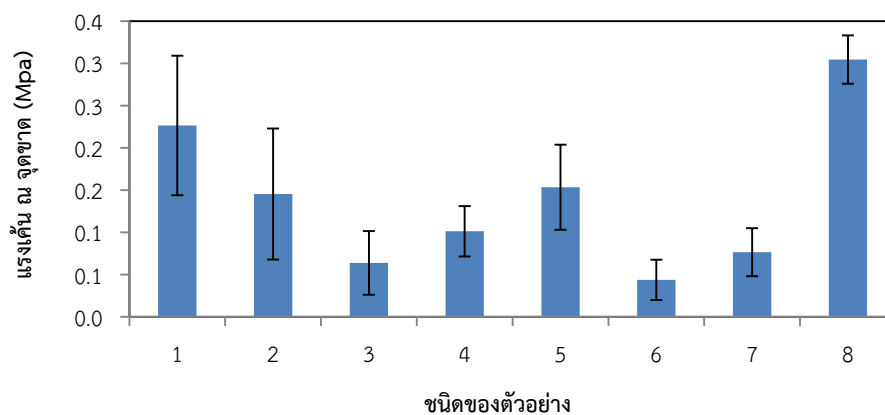
รูปที่ 4.15 ผลของตัวอย่างโม่ต่อค่าร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด ของโม่ (1) CoS (2) CoSA (3) CoSA – 5K (4) CoSA – 10K (5) CoSA – 15K (6) CoSA – 5MK (7) CoSA – 10MK (8) CoSA – 15MK

ค่าโมดูลัสของยังของตัวอย่างโม่แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าโม่ CoS มีค่าโมดูลัสของยังต่ำที่สุด เมื่อเติมสารเติมแต่งโม่มีค่าโมดูลัสของยังเพิ่มขึ้น 11% เมื่อเทียบกับโม่ CoS และเมื่อเติมเกลินไม่เผาค่าโมดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณของเกลินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกลินมีความเป็นผลึกมากและมีองค์ประกอบเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งมีความแข็งแรงและสามารถทนต่อแรงดึงได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งกับเกลินจึงส่งผลให้โม่มีความแข็งแรงมากขึ้นตามปริมาณของเกลินที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมเกลินเผาพบว่า ค่าโมดูลัสของยังมีค่าน้อยลงมาก เพราะ เกลินเผามีส่วนของซิลิกอนออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้มีความแข็งแรงและเปราะมากขึ้นเมื่อเทียบกับเกลินไม่เผา ดังนั้นจึงทำให้ค่าโมดูลัสของยังน้อยลง (ปรีดา, 2547)

แรงเค้น ณ จุดขาดของตัวอย่างโม่แสดงในรูปที่ 4.17 จากรูปพบว่าโม่ CoS มีค่าแรงเค้น ณ จุดขาดสูงที่สุด เมื่อเติมสารเติมแต่งแรงเค้น ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยคิดเป็น 16% เนื่องจากแป้งและเกลินไม่เผาสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ และเมื่อเติมเกลินไม่เผาค่าแรงเค้น ณ จุดขาดมีค่าลดลงอีก แต่จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณเกลินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแร่อะลูมิโนซิลิเกตในเกลินมีสมบัติเป็นสารเสริมแรง ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับแป้งได้ (วิชัย และกำธร 2549) จึงส่งผลให้ค่าแรงเค้น ณ จุดขาดของตัวอย่างโม่ที่เติมเกลินไม่เผา มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลินที่เพิ่มขึ้น ในกรณีของโม่ที่เติมเกลินเผาพบว่า มีค่าแรงเค้น ณ จุดขาดลดลงเมื่อเทียบกับการเติมเกลินไม่เผาเนื่องจากเกลินเผามีความแข็งแรงเปราะมากกว่าเกลินไม่เผา

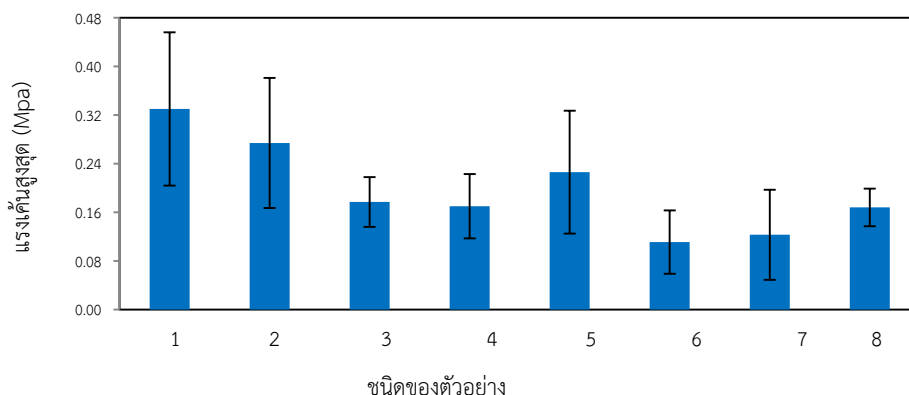


รูปที่ 4.16 ผลของตัวอย่างโคมต่อค่าโมดูลัสของยังของโคม (1) CoS (2) CoSA (3) CoSA – 5K (4) CoSA – 10K (5) CoSA – 15K (6) CoSA – 5MK (7) CoSA – 10MK (8) CoSA – 15MK



รูปที่ 4.17 ผลของตัวอย่างโคมต่อแรงเค้น ณ จุดขาดของโคม (1) CoS (2) CoSA (3) CoSA – 5K (4) CoSA – 10K (5) CoSA – 15K (6) CoSA – 5MK (7) CoSA – 10MK (8) CoSA – 15MK

แรงเค้นสูงสุดของตัวอย่างโคมแสดงในรูป 4.18 จากรูปพบว่าโคม CoS มีค่าแรงเค้นสูงสุดมากที่สุด เมื่อเติมสารเติมแต่งแรงเค้นสูงสุดมีแนวโน้มลดลงคิดเป็น 17% และเมื่อเติมเกาลินเผาและไม่เผาค่าแรงเค้นสูงสุดมีค่าลดลงไปอีก แต่มีค่าที่สูงขึ้นตามปริมาณเกาลินที่เพิ่มขึ้นและโคมแปงที่เติมเกาลินเผาจะมีค่าแรงเค้นสูงสุดต่ำกว่าแปงที่เติมเกาลินไม่เผา ทั้งนี้เนื่องจากการเติมเกาลินมีผลให้โครงสร้างโมเลกุลเดิมของแปงถูกทำลาย และอาจเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลจนเกิดเป็นผลึกมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนผ่านของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้ยาก ส่งผลให้ค่าแรงเค้นสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกาลิน (Zhong และคณะ, 2011)



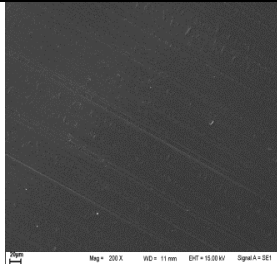
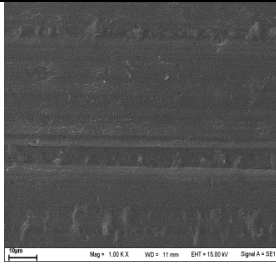
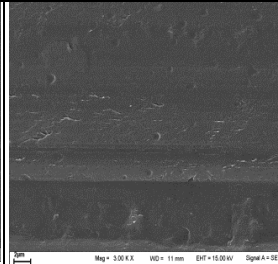
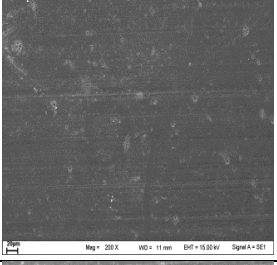
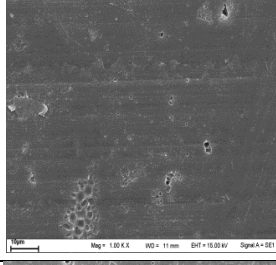
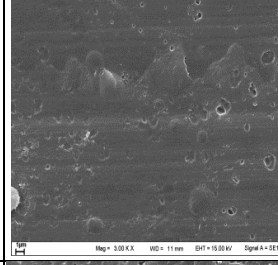
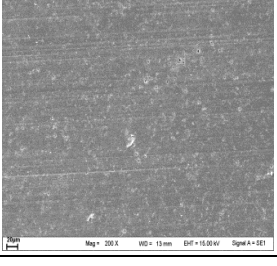
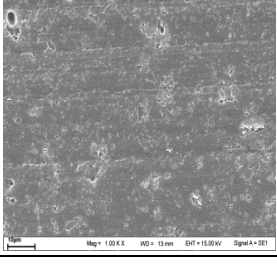
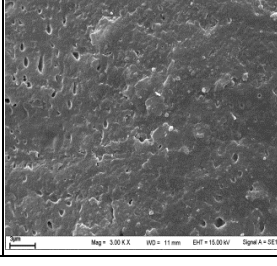
รูปที่ 4.18 ผลของตัวอย่างโฝมต่อแรงเค้นสูงสุดของโฝมชนิดต่างกัน (1) CoS (2) CoSA (3) CoSA – 5K (4) CoSA – 10K (5) CoSA – 15K (6) CoSA – 5MK (7) CoSA – 10MK (8) CoSA – 15MK

4.2.7 การกระจายตัวของเกล็ดและสัณฐานวิทยาของโฝม

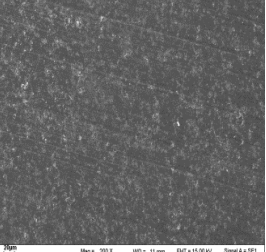
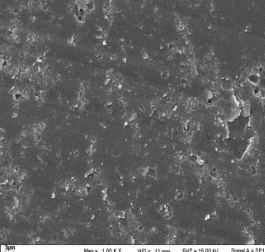
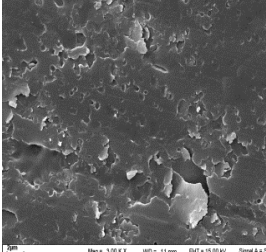
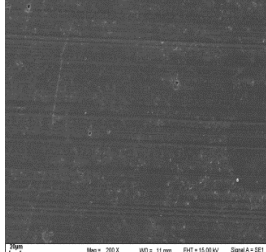
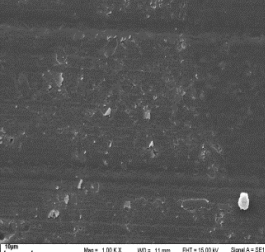
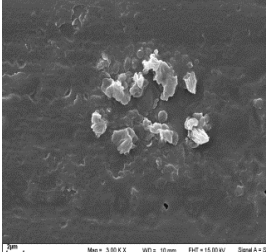
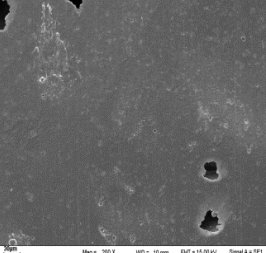
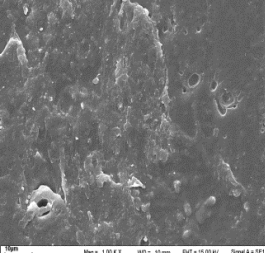
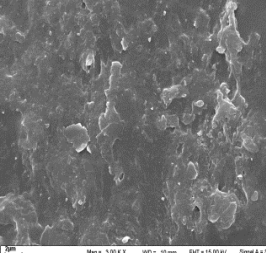
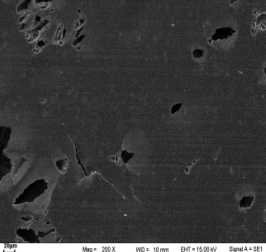
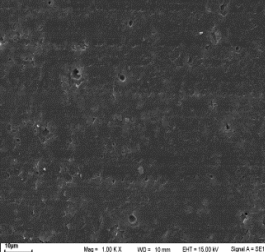
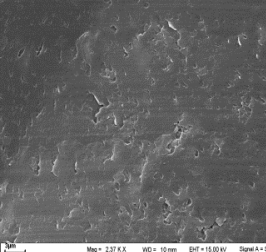
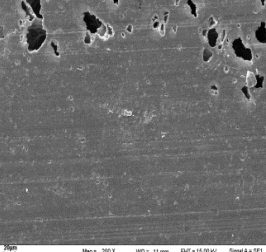

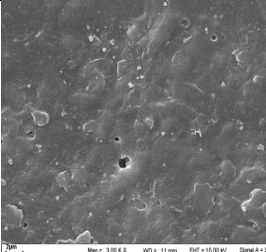
การศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโฝมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 1000 และ 3000 เท่า พบว่าผิวของโฝม CoS มีลักษณะเรียบเนียน เมื่อเติมสารเติมแต่งผิวของโฝมขรุขระมากขึ้น เนื่องจากสารเติมแต่งบางชนิดมีสมบัติไม่ชอบน้ำและไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับแป้งได้ส่งผลให้ผิวของโฝมมีความขรุขระเพิ่ม และเมื่อเติมเกล็ดพบว่าพื้นผิวของโฝมมีลักษณะขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกล็ดที่เติมลงไป ดังตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ยังพบว่าผิวของโฝมที่เติมเกล็ดเผาและไม่เผา มีลักษณะเป็นรูเล็กๆ จำนวนมาก เนื่องจากขณะขึ้นรูปอาจมีการระเหยของน้ำออกมาเร็วเกินไปทำให้เป็นโพรงอากาศบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน

ศึกษาการกระจายตัวของเกล็ดบริเวณรูโพรงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 20 200 และ 1000 เท่า พบว่าบริเวณภายในพื้นผิวรูโพรงของโฝม CoS มีลักษณะขรุขระเล็กน้อย รูโพรงมีขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน เมื่อเติมสารเติมแต่งผิวของโฝมมีลักษณะเรียบและเนียนขึ้น (Mauri และคณะ, 2008) และเมื่อเติมเกล็ดพบว่าอนุภาคเกล็ดกระจายตัวได้ค่อนข้างดีและเกาะฝังตัวบนเนื้อแป้ง ทำให้พื้นผิวของแป้งขรุขระ รูโพรงมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และพบว่าพื้นผิวจะขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกล็ดที่เติมลงไป เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแป้งแสดงความมีขั้วเหมือนกันกับเกล็ดที่เติมลงไปจึงทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดเกล็ดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนผิวโฝม ดังตารางที่ 4.3

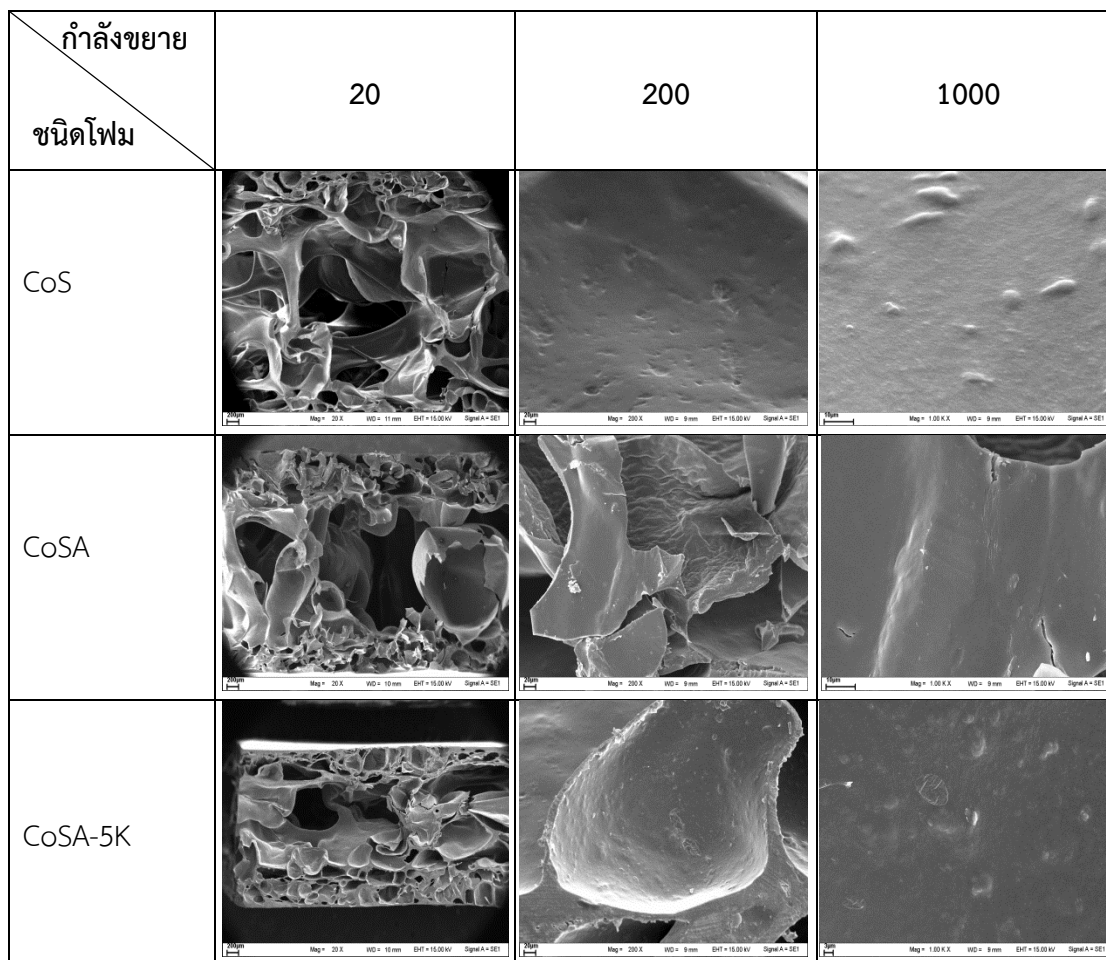
ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของโพลี ที่กำลังขยาย 200 1000 และ 3000 เท่าและการกระจายตัวของเกลือ

กกำลังขยาย ชนิดโพลี	200	1000	3000
CoS			
CoSA			
CoSA-5K			

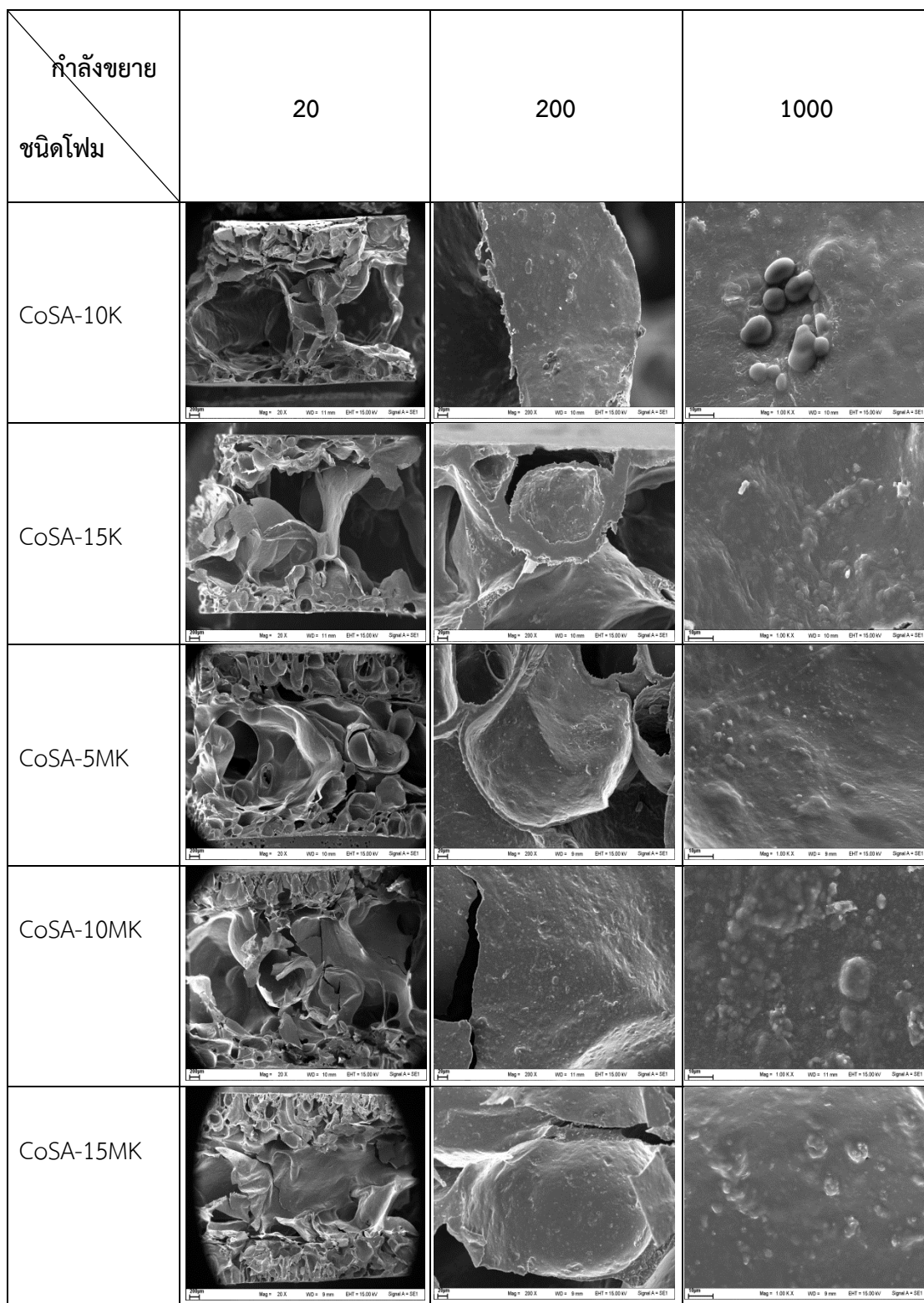
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวของโพลี ที่กำลังขยาย 200 1000 และ 3000 เท่าและการกระจายตัวของเกาหลีน

กำลังขยาย ชนิดโพลี	200	1000	3000
CoSA-10K			
CoSA-15K			
CoSA-5MK			
CoSA-10MK			
CoSA-15MK			

ตารางที่ 4.3 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวภายในรูโพรงของโฟม ที่กำลังขยาย 20 200 และ 1000 เท่าและการกระจายตัวของเกล็ดดิน

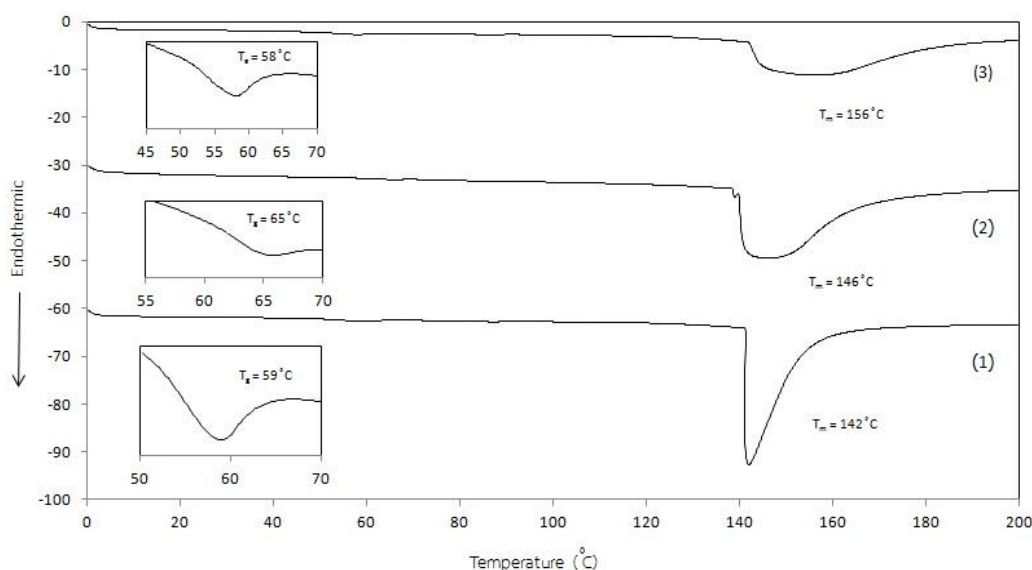


ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ภาพถ่ายจาก SEM แสดงพื้นผิวภายในรูพรongของโฟมที่กำลังขยาย 20 200 และ 1000 เท่า และการกระจายตัวของเกาหลีน



4.2.8 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

การวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ในช่วง 5-200 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ในบรรยากาศของไนโตรเจนของโพลีเมอร์ตัวอย่าง คือ CoS CoSA และ CoSA - 15K ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19



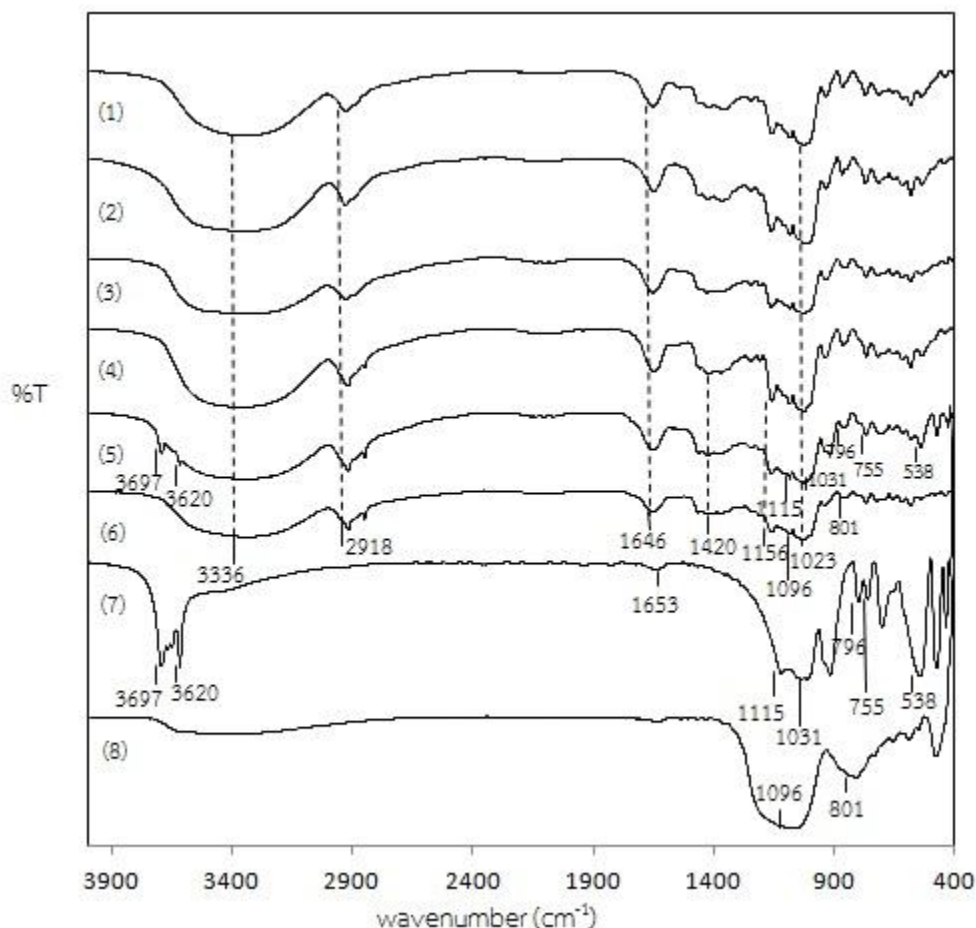
รูปที่ 4.19 DSC เทอร์โมแกรมของโพลีเมอร์ (1) CoS (2) CoSA (3) CoSA - 15K

ผลการทดลองพบว่าโพลีเมอร์ทั้งสามชนิดมีอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ดังนี้ โพลีเมอร์ CoS มีอุณหภูมิหลอมเหลว 142 °C โพลีเมอร์ CoSA มีอุณหภูมิหลอมเหลว 146 °C และโพลีเมอร์ CoSA - 15K มีอุณหภูมิหลอมเหลว 156 °C ดังนั้นการเติมสารเติมแต่งทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น แต่ทิศของการหลอมเหลวมีความชัดเจนน้อยลงแสดงถึงความเข้ากันได้ที่น้อยลงระหว่างเฟสของแข็ง สารเติมแต่ง และเกลลีน ดังนั้นสารเติมแต่งที่เติมลงไปทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นจาก 142 เป็น 146 °C เมื่อเติมเกลลีนพบว่าเกลลีนมีส่วนทำให้โพลีเมอร์มีความสามารถทนความร้อนเพิ่มขึ้นได้อีก อุณหภูมิหลอมเหลวของโพลีเมอร์จึงเพิ่มขึ้นจาก 142 เป็น 156 °C เพราะเกลลีนทำหน้าที่คล้ายกับสารก่อผลึก (Nucleating agent) อาจเหนี่ยวนำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น เป็นผลให้ปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้นและส่งผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น (Hajji และคณะ, 2005)

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) พบว่าโพลีเมอร์ CoS มีค่า T_g เท่ากับ 59 °C โพลีเมอร์ CoSA มีค่า T_g เท่ากับ 65 °C และโพลีเมอร์ CoSA - 15K มีค่า T_g เท่ากับ 58 °C ซึ่งผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งที่เติมลงในโพลีเมอร์ ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของผลึก หากพอลิเมอร์มีปริมาณผลึกสูงขึ้น การเกิดผลึกนี้จะช่วยยึดสายโซ่พอลิเมอร์ให้สั้นหรือเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น จึงทำให้ T_g มีค่าสูงขึ้น และเมื่อเติมเกลลีนลงในโพลีเมอร์ เกลลีนจะเข้าไปแทรกตามสายโซ่ของโพลีเมอร์ ทำให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่เพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์จึงเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่า T_g ของโพลีเมอร์ลดลง

4.2.9 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี ด้วยเทคนิค FT-IR

อินฟราเรดสเปกตรัมของโพลีเมอร์ตัวอย่าง คือ 1) Glutinous riceflour 2) Corn starch 3) CoS 4) CoSA 5) CoSA-15K 6) CoSA-15MK 7) Kaolin และ 8) Metakaolin ทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ที่ช่วงเลขคลื่น 400-4000 cm^{-1} แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 อินฟราเรดสเปกตรัมของ 1) Glutinous riceflour 2) Corn starch 3) CoS 4) CoSA 5) CoSA-15K 6) CoSA-15MK 7) Kaolin 8) Metakaolin

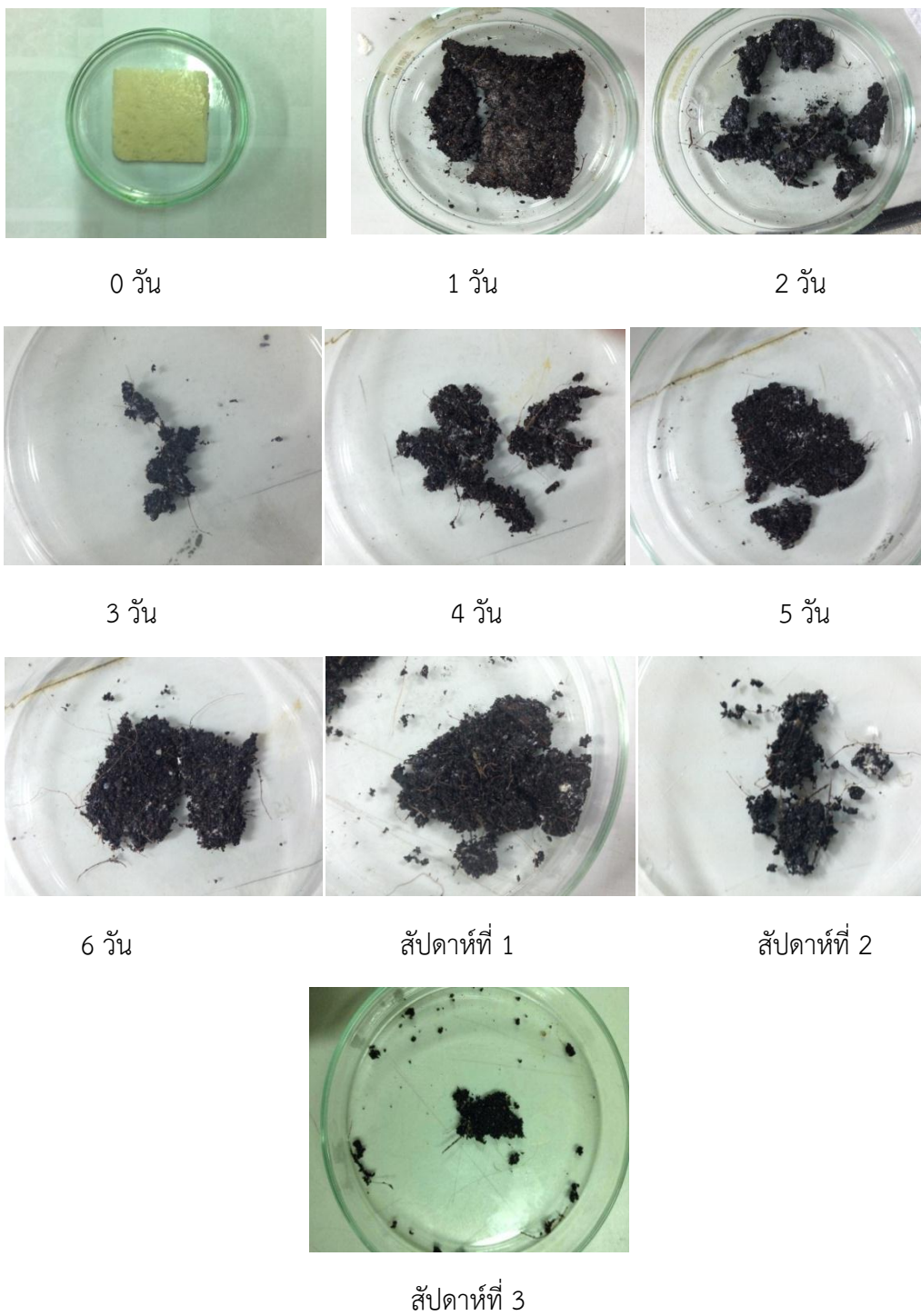
รูป 4.20 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของโพลีเมอร์ พบว่าโพลีเมอร์ CoS รูป 4.20 (3) ปรากฏพีดการสั้นของ -OH Stretching ที่ 3336 cm^{-1} พีดการสั้นของ CH-Stretching ของ CH_2 หรือ CH_3 ที่ 2918 cm^{-1} พีดการสั้นของ C=O Stretching ของหมู่เอไมด์ของแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเหนียว ที่ 1646 cm^{-1} ซึ่งซ้อนทับกับการสั้นของ O-H ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในแป้ง (Lian และคณะ, 2014) นอกจากนี้ยังพบพีดการสั้นของ C-O-H Stretching ที่ 1023 cm^{-1} ซึ่งแป้งเหล่านี้พบในสเปกตรัมของแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเหนียว ในรูป 4.20 (1) - (2) (Teoh และคณะ, 2014) เมื่อเติมสารเติมแต่ง รูป 4.20 (4) ปรากฏพีดการสั้นของ -OH Stretching ที่ 3336 cm^{-1} ของกลีเซอรอล (Liu และคณะ, 2011) พีดการสั้นของ C=O ที่ 1420 cm^{-1} ของแมกนีเซียมสเตียเรท (Javadzadeh และคณะ, 2012) พีดการสั้นของ C=O ที่ 1156 cm^{-1} ของไขมัน (Muscat และคณะ, 2014) และพีดการสั้นของ C-O-C Stretching ที่ 1023 cm^{-1} ของกำมะถัน (Shahid และคณะ, 2013) เมื่อเติมแคลิไนต์

เผา รูป 4.20 (5) โฟม CoSA – 15K ปรากฏพีคการสั่นของ -OH Stretching ที่ 3697 และ 3620 cm^{-1} โดยพีคที่ 3697 cm^{-1} คือการสั่นของโมเลกุลน้ำบริเวณพื้นผิวด้านใน (Inner surface -OH in-phase stretching vibration) และพีคที่ 3620 cm^{-1} คือการสั่นของโมเลกุลน้ำที่อยู่ด้านใน (Inner -OH stretching vibration) ที่ $3400\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคการสั่นของโมเลกุลน้ำที่อยู่ระหว่างชั้น (Interlayer water -OH vibration) และที่ 1653 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นของโมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorbed water -OH vibration) (Chen และคณะ, 2014) พีคการสั่นของ Si-O Stretching และ Si-O bond ในเกลิติน ไม่เผา ที่ 1115 และ 1031 cm^{-1} ตามลำดับ พีคที่ $800\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ เป็นของหมู่ฟังก์ชัน Al-O bond ในเกลิตินไม่เผา พีคที่ 538 cm^{-1} เป็นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Al bond ในเกลิตินไม่เผา (Ghorbel and Samet 2013) และเมื่อเปรียบกับโฟมแข็งที่เติมเกลิตินเผา รูป 4.20 (6) พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกัน ยกเว้นในตัวอย่างที่เติมเกลิตินเผาจะไม่ปรากฏพีคที่ 3697 และ 3620 cm^{-1} เนื่องจากการเผาเกลิตินทำให้โมเลกุลของน้ำในโครงสร้างของเกลิตินหลุดออกไป และนอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเติมเกลิตินเผา รูป 4.20 (6) ปรากฏพีคที่ 1096 cm^{-1} ของหมู่ฟังก์ชัน Si-O Stretching และพีคที่ 801 cm^{-1} เป็นของหมู่ฟังก์ชัน Al-O bond ในเกลิตินเผา (Yuan และคณะ, 2013)

4.2.10 ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน

จากการติดตามการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นโฟม CoSA – 15K ดินก่อนการทดสอบมี pH เท่ากับ 6.6 อุณหภูมิของห้องในช่วงการย่อยสลายอยู่ระหว่าง $22\text{-}27\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของดินในช่วงการย่อยสลายอยู่ระหว่าง $21\text{-}26\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยการติดตามลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงโดยการถ่ายภาพรูปร่างด้วยกล้องดิจิทัลเพื่อเปรียบเทียบลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของแผ่นตัวอย่างโฟมในเวลาต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.21

จากการสังเกตพบว่า ก่อนนำตัวอย่างโฟมมาฝังดินโฟมมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบสีขาวปนเหลืองเล็กน้อย เมื่อฝังดินเป็นเวลา 1 วัน พบว่าโฟมดูดซับความชื้นในดินเนื่องจากดินมีความชื้น แต่ยังคงรูปร่างและมีเศษดินติดอยู่บนเนื้อโฟมทำให้ไม่สามารถชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักที่หายไปได้ เมื่อฝังดินครบ 1 สัปดาห์ โฟมเริ่มไม่คงรูปร่างเดิม ในสัปดาห์ที่ 2 โฟมเริ่มมีการฉีกขาดเป็นชิ้นเล็ก เปื่อยยุ่ยมากขึ้นและเปลี่ยนรูปร่างในสัปดาห์ที่ 3 โฟมมีการย่อยเหลือเป็นชิ้นเล็กจนเกือบหมด และในสัปดาห์ที่ 4 โฟมเสียสภาพไปจนไม่สามารถแยกระหว่างเนื้อโฟมกับดินได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า โฟมแข็งมีการย่อยสลายได้ดี จนกระทั่งรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันกับดินภายในระยะเวลา 4 สัปดาห์



รูปที่ 4.21 พฤติกรรมการย่อยสลายทางชีวภาพของโพลีเมอร์ CoSA - 15K

บทที่ 5

สรุปผล

จากการสังเคราะห์และวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา การยืนยันโครงสร้างด้วยเทคนิค FT-IR และศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินของโพลีเอสเตอร์ที่ได้ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

(1) สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมภาคโพลีเอสเตอร์จากแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียว โดยวิธีเทอร์มอลรีฟอร์มมิ่งมีสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโพลีเอสเตอร์ คือ อุณหภูมิ 220 °C ความดัน 1000 atm และเวลา 4.50 นาที ความหนาแน่นของโพลีเอสเตอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.15-0.19 g/cm³

(2) โพลีเอสเตอร์ดูดซับน้ำและเกิดการบวมตัวขึ้นในช่วงเวลาที่ 0-5 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที โพลีเอสเตอร์มีการพองตัวและดูดซับน้ำมากขึ้นและเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เมื่อเติมเกลือ โพลีเอสเตอร์มีลักษณะพองตัวได้มากและยังคงรูปร่างได้ดีกว่าโพลีเอสเตอร์ที่ไม่เติมเกลือ เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือในโพลีเอสเตอร์มากขึ้นความสามารถในการต้านทานน้ำของโพลีเอสเตอร์ดีขึ้นตามปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้น

(3) ความสามารถในการดูดซับความชื้นของแผ่นโพลีเอสเตอร์ที่ระดับที่ความชื้น 0% โพลีเอสเตอร์ทุกชนิดมีความสามารถในการดูดความชื้นมากขึ้นใน 1 ชั่วโมงแรก จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงทุกชั่วโมงจนกระทั่งคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง และที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 50 75 และ 100% โพลีเอสเตอร์ทุกชนิดสามารถดูดความชื้นได้มากขึ้น

(4) การศึกษาสมบัติเชิงกลของแป้งโพลีเอสเตอร์จากแป้งมันสำปะหลัง ได้ข้อสรุป คือ โพลีเอสเตอร์ CS มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด เมื่อเติมสารเติมแต่งในตัวอย่างพบว่าตัวอย่างมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง 25% และเมื่อเติมเกลือ ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มเริ่มลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้น และโพลีเอสเตอร์ CS มีค่าโมดูลัสของยังต่ำที่สุด เมื่อเติมสารเติมแต่งในโพลีเอสเตอร์ค่าโมดูลัสของยังเพิ่มขึ้น 72% เมื่อเติมเกลือ ค่าโมดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้น และนอกจากจากนี้โพลีเอสเตอร์ตัวอย่างยังมีค่าแรงเค้น ณ จุดขาด และ ค่าแรงเค้นสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน

ส่วนแป้งโพลีเอสเตอร์ที่ทำจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียว ได้ข้อสรุป คือ โพลีเอสเตอร์ CoS มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด เมื่อเติมสารเติมแต่งในตัวอย่างพบว่าตัวอย่างมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงร้อยละ 7 และเมื่อเติมเกลือ ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มเริ่มลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสของยังของโพลีเอสเตอร์ CoS เท่ากับ 27.68 Mpa เมื่อเติมสารเติมแต่งโพลีเอสเตอร์ค่าโมดูลัสของยังเพิ่มขึ้นร้อยละ 11 เมื่อเทียบกับโพลีเอสเตอร์ CoS และเมื่อเติมเกลือ ค่าโมดูลัสของยังมีค่าลดลง ส่วนโพลีเอสเตอร์ CoS มีค่าแรงเค้น ณ จุดขาดสูงสุด เมื่อเติมสารเติมแต่งแรงเค้น ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยคิดเป็นร้อยละ 16 และเมื่อเติมเกลือไม่เผาค่าแรงเค้น ณ จุดขาดมีค่าลดลงอีก แต่จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมเกลือไม่เผาค่าแรงเค้น ณ จุดขาดลดลงเมื่อเทียบกับการเติมเกลือไม่เผา และเช่นเดียวกัน โพลีเอสเตอร์ CoS มีค่าแรงเค้นสูงสุดมากที่สุด เมื่อเติมสารเติมแต่งแรงเค้นสูงสุด มีแนวโน้มลดลงคิดเป็นร้อยละ 16 และเมื่อเติมเกลือไม่เผาและไม่เผาค่าแรงเค้นสูงสุดมีค่าลดลงอีก แต่มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเกลือที่เพิ่มขึ้น

(5) การศึกษาลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่างโพลิเมอร์จากแป้งมันสำปะหลังด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งทำให้ผิวของโพลิเมอร์เรียบและเนียนขึ้น แต่การเติมเกลือทำให้ผิวของโพลิเมอร์ขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือที่เติมลงไปและมีอนุภาคเกลือกระจายตัวในโพลิเมอร์ได้ดี

ส่วนแป้งโพลิเมอร์ที่ทำจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียว ได้ข้อสรุป คือ การศึกษาลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่างโพลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าผิวของโพลิเมอร์ CoS มีลักษณะเรียบเนียน เมื่อเติมสารเติมแต่งผิวของโพลิเมอร์ขรุขระมากขึ้น และเมื่อเติมเกลือพบว่าพื้นผิวของโพลิเมอร์มีลักษณะขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือที่เติมลงไปและมีอนุภาคเกลือกระจายตัวในโพลิเมอร์ได้ดี

(6) การวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของตัวอย่างโพลิเมอร์จากแป้งมันสำปะหลัง ได้ข้อสรุปว่าโพลิเมอร์ CS มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงที่สุด เมื่อเติมสารเติมแต่งอุณหภูมิหลอมเหลวของโพลิเมอร์ลดลง การเติมเกลือทำให้โพลิเมอร์มีความสามารถทนความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) พบว่าสารเติมแต่งและเกลือ ส่งผลให้ค่า T_g ของโพลิเมอร์ลดลง

ส่วนแป้งโพลิเมอร์ที่ทำจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียว ได้ข้อสรุป คือ โพลิเมอร์ CoS มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำที่สุด การเติมสารเติมแต่งและการเติมเกลือทำให้โพลิเมอร์มีอุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) พบว่าการเติมสารเติมแต่งทำให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น และเมื่อเติมเกลือค่า T_g ของโพลิเมอร์มีค่าลดลง

(7) ผลการติดตามการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นโพลิเมอร์จากแป้งมันสำปะหลัง CSA-15K โดยการฝังดินในดินที่มีค่า pH เท่ากับ 6.6 ในห้องซึ่งอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 22-27 °C และอุณหภูมิของดินในช่วงการย่อยสลายอยู่ระหว่าง 21-26 °C พบว่าโพลิเมอร์แป้งที่สังเคราะห์ได้มีการย่อยสลายในดินดีมาก และรวมกันเป็นเนื้อเดียวกับดินได้ภายในเวลา 4 สัปดาห์

ส่วนแป้งโพลิเมอร์ที่ทำจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียว CoSA-15K มีการย่อยสลายในดินดีมาก และรวมกันเป็นเนื้อเดียวกับดินได้ภายในเวลา 4 สัปดาห์

บรรณานุกรม

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

มณิศรา พิริยวิรุฒม์, พรทิพย์ ทูลจินดา และปาริชาติ มาเนียว. (2552). *การศึกษาผลของการเติมน้ำยารพาราที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของคอมพอลิตีโพลีที่มีแป้งมันสำปะหลังและไคตินเป็นส่วนประกอบ*. วิจัยทางพารา, 4, 196-204.

ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์ และวิมลลักษณ์ สุตะพันธ์. (2554). *พอลิโพรพิลีนคอมพอลิทีทจากเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อน*. คุษณินิพนธ์วิทยาศาสตร์คุษณินิพนธ์ิต, สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วิชัย สังวรปทานสกุล และกำธร ผดุงกิจ. (2549). *ผลกระทบของความดันขึ้นรูปต่อค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวของดินขาวที่ผสมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. หน้า 101

วัลลดา หวานเสนาะ. (2553). *สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรคอมพอลีจากแป้งข้าวเจ้าเสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิด*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุรพงศ์ มีชัย. (2557). *สมบัติและการย่อยสลายโดยวิธีชีวภาพของโพลีที่มีแป้งข้าวโพดเป็นองค์ประกอบหลัก*. ภาคนิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

อรทัย ตั้งสิรินฤนาท, อำนวย ลาภเกษมสุข, นที ศรีสวัสดิ์ และอารียา ตงสาลี. (2552). *Preparation of Biodegradable Plastic of Glutinous Starch Blend with Plastic and Application in Textile*. คลังข้อมูลงานวิจัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Adhikari, B., Muscat, D., Tobin, M.J. & Guo, Q. (2014). Understanding the distribution of natural wax in starch-wax films using Synchrotron-based FTIR (S-FTIR). *Carbohydrate Polymers*, 102, 125-135.

Bergeret, A., & Benezet, J. C. (2011). Natural fibre-reinforced biofoams. *International Journal of Polymer Science*, 2011, Article ID 569871, 14 pages, doi:10.1155/2011/569871.

Cha, J. Y., Chung, D.S., Seib, P.A., Flores, R.A., & Hanna, M.A. (2001). Physical properties of starch-based foams as affected by extrusion temperature and moisture content. *Industrial Crops and Products*, 14(1), 23–30.

Chen, Y., Zhou, C., Alshameri, A., Zhou, S., Ma, Y., Sun, T., Liang, H., Gong, Y., Wang, Y., & Yan, C. (2014). Effect of rice hulls additions and calcination conditions on the whiteness of kaolin. *Ceramic International*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.04.003>

El-Tahlawy, K., Venditti, R. A., & Pawlak, J. J. (2007). Aspects of the preparation of starch microcellular foam particles crosslinked with glutaraldehyde using a solvent exchange technique. *Carbohydrate Polymers*, 67, 319–331.

Ganjyal, G. M., Weber, R., & Hanna, M. A. (2007). Laboratory composting of extruded starch acetate and polylactic acid blended foams. *Bioresource Technology*, 98(16), 3176–3179.

Ghorbel, H., & Samet, B. (2013). Effect of iron on pozzolanic activity of kaolin. *Construction and Building Materials*, 44, 185–191.

Hajji, M., Khedher, N., Beessais, B., Ezzaovia, H., Rahmouni, H., & Ouaja, F.R. (2005). Performance improvements of crystalline silicon by iterative gettering process for short duration and with the use of porous silicon as sacrificial layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87, 493-499.

Hwansanoet, W. & Prachayawarakorn, J. (2012). Effect of silk protein fibers on properties of thermoplastic rice starch. *Fibers and polymers*, 13(5), 606-612.

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

Javadzadeha, Y., Adibkiab, K., Bozorgmehr, Z. & Dastmalchic, S. (2012). Evaluating retardation and physicochemical properties of co-ground mixture of Na- diclofenac with magnesium stearate. *Powder Technology*, 218, 51–56.

Kaewtatipa, K. & Tanrattanakul, V. (2008). Preparation of cassava starch grafted with polystyrene by suspension polymerization. *Carbohydrate Polymers*, 73(4), 647–655.

Kaewtatip, K., & Tanrattanakul, V. (2012). Structure and properties of pregelatinized cassava starch/kaolin composites. *Materials and Design*, 37, 423–428.

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

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

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

Liu, H., Chaudhary, D., Yusa, S., & Tadé, M.O. (2011). Glycerol/starch/ Na^+ -montmorillonite nanocomposites: A XRD, FTIR, DSC and ^1H NMR study. *Carbohydrate Polymers*. 83, 1591-1597.

Manoi, K., & Rizvi, S.S.H. (2010). Physicochemical characteristics of phosphorylated cross-linked starch produced by reactive supercritical fluid extrusion. *Carbohydrate Polymers*, 81(3), 687–694.

Mauri, A. N., et al. (2008). Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process. *Journal of Food Engineering*, 85, 435-443.

Muscat, D., Tobin, J. M., Guo, Q., & Adhikari, B. (2014). Understanding the distribution of natural wax in starch–wax films using synchrotron-based FTIR (S-FTIR). *Carbohydrate Polymers*, 102, 125–135.

Ouaja, W. (2011). Hybrid Lagrangian Relaxation for Bandwidth-Constrained Routing: Knapsack Decomposition. *ACM Symposium on Applied Computing*, 383-387.

Polat, S., Uslu, M.K., Aygün, A., & Certel, M. (2013). The effects of the addition of corn husk fibre, kaolin and beeswax on cross-linked corn starch foam. *Journal of Food Engineering*, 116, 267–276.

Salgado, P. R., Schmidt, 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.

Samet, B., Khmiri, A. & Chaabouni, M. (2013). Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials* *44*, 74-80.

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

Shogren, R. L., Lawton, J. W., Doane, W. M., & Tiefenbacher, K. F. (1998). Structure and morphology of baked starch foams. *Polymer*, *39* (25), 6649–6655.

Shogren, R.L., Lawton, J.W., & Tiefenbacher, K.F. (2002). Baked starch foams: starch modifications and additives improve process parameters, structure and properties. *Industrial Crops and Products*, *16*, 69–79.

Soykeabkaew, N., Supaphol, P., & Rujiravanit, R. (2004). Preparation and characterization of jute- and flax-reinforced starch-based composite foams. *Carbohydrate Polymers*, *58*, 53–63.

Tanrattanakul, V., Bunkaew, P. (2014). Effect of different plasticizers on the properties of bio-based thermoplastic elastomer containing poly(lactic acid) and natural rubber. *Express Polymer Letters*, *8*(6), 387-396.

Teoh, K.M., Lim, C., & Ramesh, S. (2014). Lithium ion conduction in corn starch based solid polymer electrolytes. *Measurement*, *48*, 87-95.

Uslu, M.K. & Polat, S. (2012). Effects of glyoxal cross-linking on baked starch foam. *Carbohydrate Polymers*, *87*, 1994– 1999

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

Wattanakornsiri, A., Pachana K., Kaewpirom S., Traina M., & Migliaresi C. (2012). Preparation and properties of green composites based on tapioca starch and differently recycled paper cellulose fiber. *Journal of Polymer and the Environment*, 20, 801-809.

Yuan, Y., Chen H., Lin, J., & Ji, Y. (2013). Surface modification of calcined kaolin with toluene diisocyanate based on high energy ball milling. *Applied Surface Science*, 284, 214–221.

Zia, M. K., Griffel, B., Fridman, V., Saponieri, C. & Semmlow, J. L. (2013). Path length entropy of diastolic heart sounds. *Computers in biology and medicine*, 43(9), 1154-1166.

Zhou, J., Song, J., & Parker, R. (2006). Structure and properties of starch-based foams prepared by microwave heating from extruded pellets. *Carbohydrate Polymers*, 63, 466–475.

Zhou, J., Song, J., & Parker, R. (2007). Microwave-assisted moulding using expandable extruded pellets from wheat fours and starch. *Carbohydrate Polymers*, 69, 445–454.

Zhong, R., Zhang, X., Xiao, F., Li, X., & Cai, Z. (2011). Effects of humic acid on physical and hydrodynamic properties of kaolin flocs by particle image velocimetry. *Water Research*. 45, 3981-3990.