

ผลของปริมาณเถาเถาต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ ที่มีแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเหนียวเป็นองค์ประกอบ

ศิริรญา นิวาสประภคฤติ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ สุปราณี แก้วภิรมย์*

บทคัดย่อ

เพื่อลดปริมาณการใช้โฟมพอลิสไตรีนซึ่งก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโฟมชีวภาพจากแป้งข้าวโพดผสมกับแป้งข้าวเหนียว เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้ทดแทนโฟมพอลิสไตรีน โดยใช้สารเติมแต่ง ได้แก่ กัวร์กัม ไซฟิ่ง แมกเนเซียมสเตียเรท และกลีเซอรอล และเสริมแรงด้วยเถาเถา ได้ศึกษาผลของเถาเถา (5 10 และ 15 phr) ต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของโฟม การศึกษาพบว่าการเสริมแรงด้วยเถาเถามีผลให้ความหนาแน่นของโฟมมีค่าสูงขึ้น ขนาดและสัดส่วนของเซลล์เปิดมีค่ามากขึ้น ในขณะที่เซลล์ปิดมีขนาดใกล้เคียงกันแต่มีผนังเซลล์หนาขึ้น และมีสัดส่วนน้อยลง นอกจากนี้ปริมาณเถาเถาที่มากขึ้นยังส่งผลให้โฟมแป้งมีการดูดซับความชื้นน้อยลงและคงรูปร่างได้ดีขึ้นหลังการแช่น้ำเป็นเวลา 30 นาที ถึงแม้ว่าการเติมเถาเถาจะมีผลให้ค่าระเหยไอน้ำ จุดขาดของโฟมลดลง 44% แต่พบว่าโฟมมีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นถึง 87% เมื่อเติมเถาเถา 15 phr นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมเถาเถาส่งผลให้จุดหลอมเหลวของโฟมเพิ่มขึ้นด้วย

คำสำคัญ : โฟมชีวภาพ, แป้งข้าวโพด, แป้งข้าวเหนียว, ดินเถาเถา

Effects of Kaolin Content on Properties of Biofoam Based on Corn Starch/Glutinous Rice Flour Blend

Sirinapa Niwaspragit, Ubolluk Rattanasak and Supranee Kaewpirom*

Abstract

In order to reduce the use of expanded polystyrene (EPS) foam that is a source of solid wastes in the environment, biofoam made of corn starch/glutinous rice flour blend was developed with an aim to replace EPS foam. Some additives such as guar gum, beeswax, magnesium stearate and glycerol were also added and kaolin was used as a reinforcing agent. Effects of kaolin content (5, 10, and 15 phr) on physical, mechanical, and thermal properties of the foam were investigated. It was found that with the addition of kaolin, the foam density, the size and fraction of opened cells increased, accordingly. In contrast, the closed cells showed no change in size, while the thickness of cell wall increased. Furthermore, with increasing in kaolin content, the foam exhibited the reduction in moisture content as well as water absorption capacity, resulting in good dimensional stability after soaking in water for 30 min. Although the addition of 15 phr kaolin brought about the 44% reduction in elongation at break, Young's modulus of the foam increased by 87%. Besides, it was also found that melting temperature of the foam can be increased with increasing kaolin content.

Keywords : Biofoam, Corn starch, Glutinous rice flour, Kaolin

Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University.

* Corresponding author, E-mail: kaewpiro@buu.ac.th Received 16 November 2015, Accepted 27 May 2016

1. บทนำ

โพลีเอทิลีนจัดเป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานในปริมาณมาก และใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลายาวนาน เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้หลากหลาย ราคาถูก น้ำหนักเบา กันแรงกระแทกได้ดี และไม่ดูดซับความชื้น อย่างไรก็ตามหลังจากการใช้งานโพลีเอทิลีนเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ จึงส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมาเนื่องจากขยะพลาสติก นอกจากนี้การนำโพลีเอทิลีนมาใช้งานไม่ถูกวิธี เช่น บรรจุอาหารที่ร้อนและมัน จะมีผลให้สารโมเลกุลเล็ก เช่น สารเติมแต่ง และสไตรีนมอนอเมอร์ ละลายปนมากับอาหารได้ ซึ่งสารเหล่านี้ก่อให้เกิดโทษแก่ร่างกายทั้งในระยะสั้น และระยะยาว

การผลิตโพลีเอทิลีนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เช่น แป้ง (starch) จึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจมาก แต่เนื่องจากแป้งมีข้อด้อยด้านการดูดซับน้ำและความชื้นที่มาก และความยืดหยุ่นน้อย นักวิจัยหลายกลุ่มจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาโพลีเอทิลีน เพื่อให้มีสมบัติใกล้เคียงกับโพลีเอทิลีน โดยเลือกใช้แป้ง และสารเติมแต่งหลากหลายชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลัง เส้นใยข้าวโพด และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [1] แป้งมันสำปะหลัง โปรตีนจากดอกทานตะวัน และเส้นใยเซลลูโลส [2] แป้งมันสำปะหลัง น้ำมันพืช และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [3] และ แป้งมันสำปะหลัง เส้นใยกราฟท์ และโคโคซาน [4] เป็นต้น

ในประเทศไทยนอกจากมันสำปะหลังแล้ว ยังมีการปลูกพืชที่ให้แป้ง เช่น ข้าวโพดและข้าวเหนียว โดยแป้งข้าวโพดเป็นแป้งจากธัญพืชที่มีปริมาณอะไมโลสสูง

(22-30%) [5] ส่วนแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลสต่ำมาก จึงมีความเหนียวนุ่มและยืดหยุ่นสูงกว่า [6] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโพลีเอทิลีนจากแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเหนียวในอัตราส่วน 50 ต่อ 50 โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบบีบอัด (compression molding) ซึ่งเป็นเครื่องขึ้นรูปที่ใช้ทั่วไปในการขึ้นรูปพลาสติกจากปิโตรเลียม มีการเติมสารเติมแต่งได้แก่ กัวร์กัม (guar gum) เพื่อช่วยให้เนื้อแป้งมีการยึดเกาะกัน ไชผึ้ง (beewax) ช่วยลดการดูดซับน้ำและความชื้น แมกนีเซียมสเตียเรท (magnesium stearate) ช่วยให้แป้งไม่ติดแม่พิมพ์ กลีเซอรอล (glycerol) ช่วยเพิ่มความเหนียวและยืดหยุ่น และเกาหลินเพื่อเพิ่มความแข็งแรง และได้ทำการศึกษาผลของการเติมเกาหลินต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของโพลีเอทิลีน ได้แก่ ความหนาแน่น การคงรูปร่าง การดูดซับความชื้น สมบัติความทนต่อแรงดึง และอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

2. วิธีการวิจัย

2.1 สารเคมี

แป้งข้าวโพด ตราซูเปอร์ไฟน์ บริษัทอาร์แอนด์บีฟู๊ดส์พลาซ จำกัด แป้งข้าวเหนียว ตราช้างสามเศียร บริษัทโรงเส้นหมี่ช่อเฮง จำกัด โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride) เกรดวิเคราะห์ และกลีเซอรอล เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Merck กัวร์กัม เกรดอาหารและเครื่องสำอาง เกาหลิน (kaolin) เกรดเครื่องสำอาง ไชผึ้ง เกรดอาหาร และ แมกนีเซียมสเตียเรท เกรดอาหาร จากบริษัทเคมีภัณฑ์ จำกัด

2.2 ส่วนผสมและการขึ้นรูปโฟมแข็ง

อบแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเหนียวในตู้อบลมร้อน เพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแป้งออกมาจากเครื่องอบ และทิ้งเย็นลงที่ อุณหภูมิห้อง เติมน้ำและสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่างๆ (ตารางที่ 1) คนด้วยเครื่องผสมมือ (kitchen aid stand mixer) จนเป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนเทลงบนแม่พิมพ์รูป

สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30 cm x 30 cm x 3 mm ที่รองด้วย แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ ขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบบีบอัด ที่อุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 4:15 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 1,000 บาร์ จากนั้นนำแม่พิมพ์ออกมาจากเครื่องและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที ก่อนแกะแผ่นโฟมออกจากแม่พิมพ์

ตารางที่ 1 ชื่อตัวอย่างโฟมและส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต

	Sample name				
	CoS	CoSA	CoSA-5K	CoSA-10K	CoSA-15K
Corn starch (g)	50	50	50	50	50
Glutinous rice flour (g)	50	50	50	50	50
Distilled water (mL)	95	100	105	110	115
Magnesium stearate (g)	-	2	2	2	2
Beewax (g)	-	5	5	5	5
Guar gum (g)	-	1	1	1	1
Glycerol (g)	-	8	8	8	8
Kaolin (g)	-	-	5	10	15

2.3 การทดสอบสมบัติของโฟม

ก่อนทำการทดสอบสมบัติ โฟมตัวอย่างจะถูกเก็บในสภาวะเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 25 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 14 วัน

คำนวณความหนาแน่นของโฟมจากการคำนวณปริมาตรของชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทราบขนาดแน่นอน และชั่งน้ำหนักชิ้นงานด้วยเครื่องชั่งละเอียด จากนั้นศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ต้องเคลือบด้วยทองคำก่อน

ทดสอบความสามารถในการคงรูปร่างหลังการดูดซับน้ำ โดยแช่โฟมขนาด 2.5 cm x 5 cm x 3 mm ในน้ำปราศจากไอออน แล้วบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโฟม ด้วยกล้องดิจิทัล เมื่อเวลาผ่านไป 0.5 และ 30 นาที

ทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้น โดยนำโฟมขนาด 2.5 cm x 2.5 cm x 3 mm ใส่ในโถดูดความชื้นที่มีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลา 14 วัน จากนั้นชั่งน้ำหนักเริ่มต้น (w_0) นำแผ่นตัวอย่างใส่ในโถดูดความชื้นที่ควบคุมระดับความชื้น

สัมพัทธ์ไว้ที่ 75% (สารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว) ชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมง (W_t) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง คำนวณปริมาณความชื้นจากสมการที่ 1

$$\text{Moisture content} = [(W_t - W_0) / W_0] \times 100 \quad (1)$$

ทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Testometric Micro 350) ที่อุณหภูมิ 25 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 52% โดยใช้ตัวอย่างขนาด 2.5 cm x 12.5 cm x 3 mm กำหนดความยาวพิคัด 10 mm อัตราเร็วในการดึง 2 mm/min ส่วนวัดแรง 50 N ดึงด้วยความเร็วคงที่จนกระทั่งชิ้นงานขาด

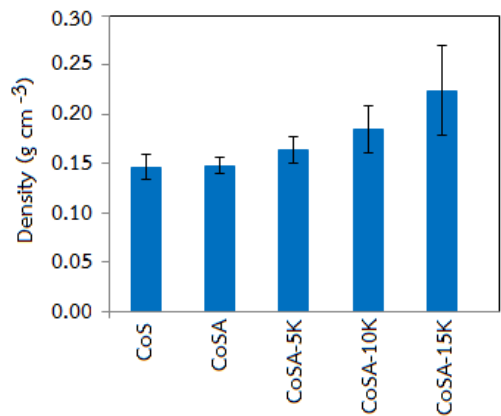
ศึกษาสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างโฟมโดยการวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของโฟม ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ในช่วงอุณหภูมิ 5-200 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

3. ผลการวิจัย และอภิปรายผล

3.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของโฟมคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของโฟมตัวอย่าง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าโฟม CoS มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.1464 g/cm³ ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างโฟมที่ใส่สารเติมแต่ง และเมื่อเพิ่มปริมาณเถาเถา พบว่าโฟมมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเถาเถาที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากเถาเถามีความเป็นผลึกสูง เมื่อเติมลงในตัวอย่างจึงช่วยให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณเถาเถาส่งผลให้โฟมเปราะและแตกหักง่ายมากขึ้น เนื่องจากเถาเถามีความสามารถในการยึดตัวต่ำ [7] ความหนาแน่นของโฟมในงานวิจัยนี้ยังมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของโฟมพอลิस्टิเรินและโฟมพอลิยูรีเทนที่ผลิตขึ้นเพื่อการค้า [8-9] แต่มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของโฟมเป่ามันสำปะหลัง ซึ่งรายงานโดย Kaisangsri et al. [4]

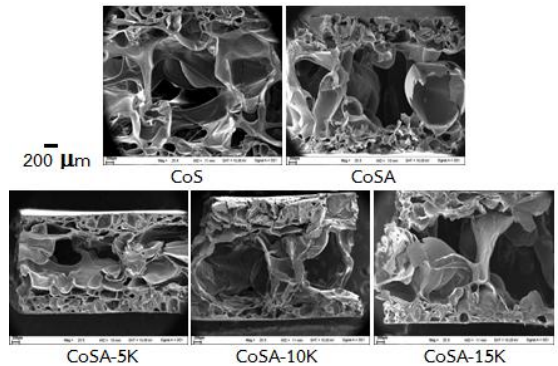


รูปที่ 1 ผลของเถาเถาต่อความหนาแน่นของโฟม

3.2 โครงสร้างของโฟม

รูปร่างของเซลล์ภายใน โครงสร้างของโฟมนับเป็นปัจจัยหนึ่งที่สะท้อนถึงสมบัติทางกายภาพของโฟม เช่น ความหนาแน่น ความนุ่ม ความยืดหยุ่น และความแข็งแรง เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมด้วยเทคนิค SEM และพบว่าโครงสร้างของเซลล์มีทั้งแบบเซลล์ปิด (closed-cell foam) ที่มีขนาดเล็ก และแบบเซลล์เปิด (open-cell foam) ที่มีขนาดใหญ่กว่ามาก และสัดส่วนของเซลล์เปิดมากกว่าเซลล์ปิด ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจะพบเซลล์ปิดที่บริเวณที่ติดกับพื้นผิวทั้ง

ด้านบนและด้านล่างของชิ้นงาน และพบเซลล์เปิดที่ด้านบน สำหรับโฟมแข็งที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง (CoS) พบว่าเซลล์ปิดมีขนาดไม่เกิน 200 μm ในขณะที่เซลล์เปิดมีขนาดประมาณ 1.4 mm และเมื่อใส่สารเติมแต่ง (CoSA) พบว่าเซลล์ปิดมีขนาดเล็กลงและมีแนวโน้มเป็นเซลล์กึ่งปิด และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงด้วย ในขณะที่เซลล์เปิดยังมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของเซลล์เปิดในตัวอย่าง CoS ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปเป็นผลให้ความหนืดของสารผสมเพิ่มขึ้น การระเหยของน้ำซึ่งเป็นสารฟู (blowing agent) ในระบบนี้เป็นไปได้ยากขึ้น เซลล์ที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็กลง [10] สำหรับโฟมที่เติมแก๊ส 5 phr พบว่าแก๊สมีผลทำให้ความหนาแน่นของสารผสมเพิ่มขึ้นอีก ขนาดของเซลล์ปิดใกล้เคียงกับโฟม CoSA แต่ขนาดของเซลล์เปิดลดลงและมีผนังเซลล์หนาขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณแก๊สจาก 5 เป็น 10 และ 15 phr เป็นผลให้ขนาดของเซลล์เปิดเพิ่มขึ้น และมีสัดส่วนมากขึ้น ในขณะที่เซลล์ปิดมีสัดส่วนน้อยลงและผนังเซลล์หนาขึ้นมาก ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณแก๊สที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้มีการยึดเกาะระหว่างหมู่ไฮโดรอกซิลของแป้ง และสารประกอบออกไซด์ของโลหะที่เป็นองค์ประกอบในแก๊สเพิ่มขึ้นด้วย น้ำจึงระเหยออกจากเนื้อแป้งได้ยากขึ้น และถูกกักไว้ด้านบน และกลายเป็นเซลล์เปิดขนาดใหญ่ในโครงสร้างของโฟม น้ำที่ระเหยออกมาสู่พื้นผิวของโฟมขณะขึ้นรูปมีปริมาณน้อยกว่าจึงสร้างเซลล์ปิดที่มีผนังเซลล์หนาขึ้นที่บริเวณใกล้กับพื้นผิวของโฟม ส่งผลให้โฟมมีความแข็งแรงมากแต่มีความยืดหยุ่นน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบในการทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟม ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.5

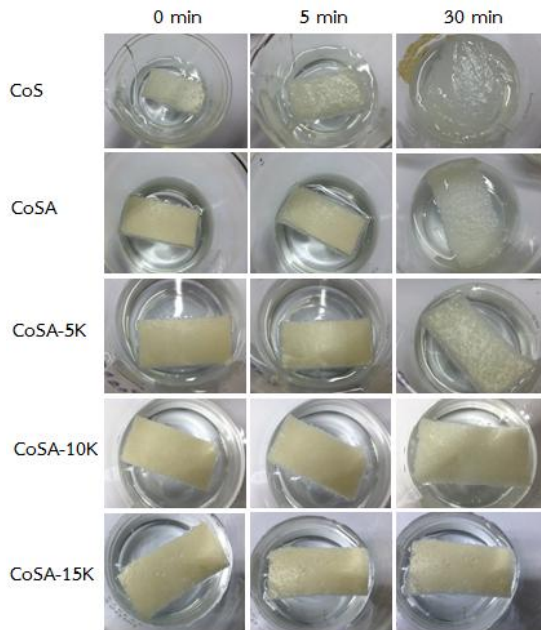


รูปที่ 2 รูปร่างของเซลล์ภายในโครงสร้างของโฟม

3.3 การคงรูปร่างหลังการดูดซับน้ำ

เมื่อโฟมแช่ในน้ำจะเกิดการดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างจำนวนมาก โดยโฟมทุกสูตรเกิดการบวมตัวภายในเวลา 5 นาที แต่ยังคงรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้ (รูปที่ 3) แต่เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที โฟม CoS มีการพองตัวและดูดซับน้ำมากขึ้น จนไม่สามารถคงรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้ เปื่อยยุ่ย และบางส่วนละลายไปกับน้ำ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปจับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของเม็ดแป้งที่อยู่ภายในชิ้นงานได้ ส่วนโฟม CoSA ที่ใส่สารเติมแต่งหลายชนิดเพิ่มเข้าไป พบว่าสามารถคงรูปร่างได้ดีกว่าโฟม CoS และยังคงรูปร่างโดยไม่เปื่อยยุ่ยไปกับน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที เนื่องจากสารเติมแต่งแป้งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ จึงทำให้โฟมเกิดการดูดซับน้ำได้น้อยกว่าโฟมที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง ส่วนโฟมที่เติมแก๊สนั้น พบว่าแก๊สทำให้โฟมเกิดการต้านทานน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากแก๊สมีสมบัติชอบน้ำจึงมีความสามารถในการแย่งจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งแทนโมเลกุลของน้ำ ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งที่สามารถจับกับโมเลกุลน้ำได้มีจำนวนน้อยลง [3]

และ เมื่อเพิ่มปริมาณเกลือมากขึ้น ความสามารถในการต้านทานน้ำของโฟมก็มีมากขึ้นตามลำดับ ทำให้โฟมมีความสามารถในการคงรูปร่างดีขึ้น และไม่เปื่อยยุ่ยเร็วขึ้นเอง

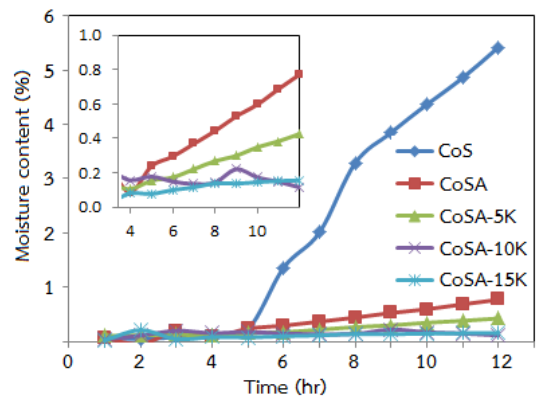


รูปที่ 3 การคงรูปร่างของโฟมเป่าหลังการแช่น้ำเป็นเวลา 0 5 และ 30 นาที

3.4 ความสามารถในการดูดซับความชื้น

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 75% โฟมทุกชนิดสามารถดูดความชื้นได้มากขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าโฟม CoS มีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด และเมื่อเติมสารเติมแต่ง (โฟม CoSA) พบว่าโฟมมีการดูดซับความชื้นลดลงอย่างมาก (จาก 5.5% เหลือเพียง 0.7% หลังจากแช่ทิ้งไว้ 12 ชม.) เนื่องจากอิทธิพลของสารเติมแต่งที่ไม่ชอบน้ำในเป่า และเมื่อเติมเกลือ พบว่าเกลือทำให้โฟมเกิดการต้านทานน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากเกลือมี

สมบัติชอบน้ำจึงแข่งจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของเป่าแทนโมเลกุลของน้ำ (ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.3) และเมื่อเพิ่มปริมาณเกลือมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับความชื้นของโฟมก็ลดลงไปตามลำดับ และการเติมเกลือ 10 และ 15 phr ให้ผลต่างกันไม่มากนัก ผลการทดลองในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการเติมเกลือทำให้โฟมมีสมบัติดีขึ้น และมีการดูดซับความชื้นประมาณ 0.1% เท่านั้น



รูปที่ 4 ความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 75%

3.5 สมบัติเชิงกล

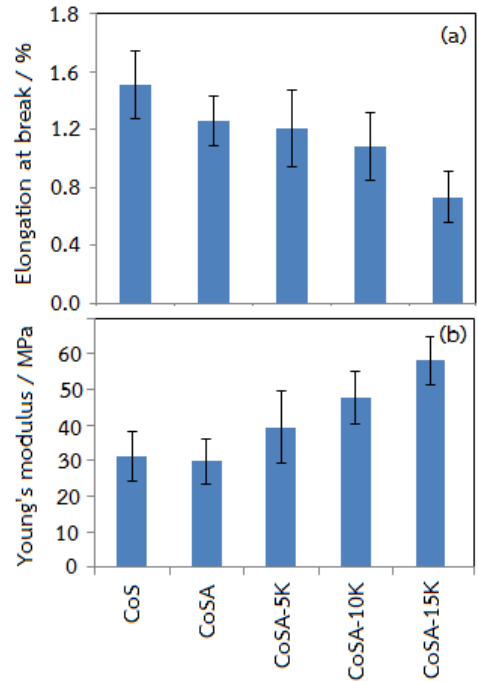
นอกจากน้ำหนักที่เบา ความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลยังเป็นปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงอย่างมากในการใช้งานวัสดุโฟม รูปที่ 5(a) แสดงค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และรูปที่ 5 (b) แสดงค่าโมดูลัสของตัวอย่างโฟม พบว่าโฟม CoS มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด สูงที่สุด ($1.44 \pm 0.51\%$) แม้จะมีค่าต่ำกว่าค่าร้อยละการยืดตัวของโฟมเป่าจากมันสำปะหลังที่มีเส้นใยกราฟท์และไคโตซานเป็นสารเติมแต่ง (2.43%) [4] เมื่อเติมสารเติมแต่ง พบว่าโฟม CoSA มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง

เหลือ $1.34 \pm 0.24\%$ (ลดลง 7% เมื่อเทียบกับโพล CoS) และเมื่อเติมเกาลิน พบว่า ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเกาลินที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากเกาลินมีความเป็นผลึกสูงและมีความสามารถในการยึดตัวต่ำ เมื่อเติมลงในตัวอย่างโพลจึงช่วยให้โพลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความยืดหยุ่นลดลง โดยโพลที่เติมเกาลิน 15 phr แสดงค่าร้อยละการยืดตัวต่ำที่สุดเท่ากับ $0.80 \pm 0.16\%$

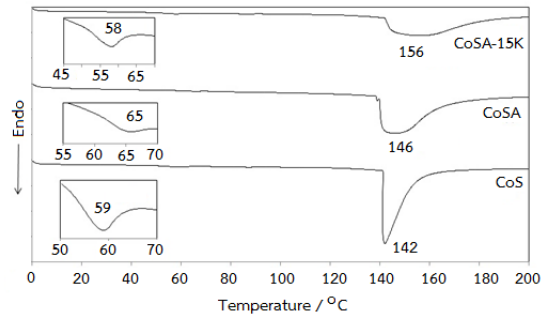
รูปที่ 5(b) แสดงให้เห็นว่าโพล CoS มีค่าโมดูลัสต่ำที่สุด (31 ± 7 MPa) และใกล้เคียงกับโพลที่เติมสารเติมแต่ง (CoSA) เมื่อเติมเกาลินค่าโมดูลัสของตัวอย่างโพลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเกาลินที่เพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 58 ± 7 MPa (เพิ่มขึ้น 87%) ในตัวอย่าง CoSA-15K เนื่องจากเกาลินมีความเป็นผลึกมาก และมีองค์ประกอบเป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งมีความแข็งแรงและสามารถทนต่อแรงดึงได้ดี (ดังได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้) นอกจากนี้การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งกับเกาลินยังส่งผลให้โพลมีความแข็งแรงมากขึ้นตามปริมาณของเกาลินที่เพิ่มขึ้น [11-12] เกาลินจึงนับเป็นสารเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพอีกชนิดหนึ่งในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโพลแป้ง

3.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

ถึงแม้โพลตัวอย่างที่เติมเกาลิน 15 phr (CoSA-15K) มีความยืดหยุ่นน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโพลสูตรอื่น แต่พบว่า มีค่าโมดูลัสสูงขึ้นถึง 87% และยังคงมีความทนทานต่อความชื้น และคงรูปร่างได้ดี งานวิจัยนี้จึงเลือกวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิหลอมเหลว เฉพาะตัวอย่างโพล CoS CoSA และ CoSA- 15K ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 ผลของเกาลินต่อสมบัติเชิงกลของโพลแป้ง



รูปที่ 6 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิหลอมเหลว ของโพล CoS CoSA และ CoSA- 15K

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าสารเติมแต่งทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของโพลเพิ่มขึ้น (เพิ่มจาก 142 เป็น 146 °C) แต่ผลของการหลอมเหลวมีความกว้างมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ที่น้อยลงระหว่างเฟสของแป้ง และ

สารเติมแต่ง เมื่อเติมเกาลินพบว่าโฟมมีความทนต่อความร้อนเพิ่มขึ้นอีก โดยอุณหภูมิหลอมเหลวของโฟมเพิ่มขึ้นจาก 142 เป็น 156 °C เนื่องจากเกาลินทำหน้าที่คล้ายกับสารก่อผลึก (Nucleating agent) ซึ่งเหนี่ยวนำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ เป็นผลให้ปริมาณผลึกเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น [13]

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว พบว่าสารเติมแต่งที่เติมลงในโฟมทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น (จาก 59 เป็น 65°C) ซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณของผลึกที่เพิ่มขึ้น นั่นคือผลึกที่เพิ่มขึ้นจะช่วยยึดสายโซ่พอลิเมอร์ให้สั้นหรือเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น [14] จึงทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเติมเกาลินลงในโฟมทำให้ความเป็นผลึกของโฟมเพิ่มสูงขึ้นมาก (อุณหภูมิหลอมผลึกสูงขึ้น 12 °C) จึงอาจเป็นผลให้ส่วนที่เป็นอสัณฐานมีสัดส่วนน้อยลงมาก ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงเหลือเพียง 58 °C เท่านั้น

4. สรุปผล

สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโฟมชีวภาพจากแป้งที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเหนียวในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก เป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้เครื่องขึ้นรูปแบบบีบอัด คืออุณหภูมิ 220 °C เวลา 4:15 นาที ภายใต้อุณหภูมิ 1,000 บาร์ ความหนาแน่นของโฟมที่ได้อยู่ในช่วง 0.14-0.22 g cm⁻³ โดยเพิ่มตามปริมาณเกาลิน การศึกษาพื้นฐานวิทยาของโฟมโดยเทคนิค SEM พบว่าโครงสร้างของโฟมประกอบด้วยเซลล์ปิดที่มีขนาดเล็กที่บริเวณใกล้กับพื้นผิว และเซลล์

เปิดที่มีขนาดใหญ่กว่ามากที่ด้านในของโฟม การเติมเกาลินส่งผลให้สัดส่วนและขนาดของเซลล์ปิดเพิ่มขึ้น ในขณะที่เซลล์ปิดมีสัดส่วนน้อยลงและมีผนังเซลล์หนาขึ้น นอกจากนี้เกาลินยังช่วยให้โฟมคงรูปร่างได้ดีขึ้น และทนต่อความชื้นมากขึ้น โดยเมื่ออยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 75% เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โฟมที่เติมเกาลิน 15 phr ดูดซับความชื้นเพียง 0.1% เท่านั้น ผลการทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้การเติมเกาลิน 15 phr ส่งผลให้ความยืดหยุ่นของโฟมลดลงอย่างมาก (ระยะยืด ณ จุดขาดลดลง 44%) แต่พบว่าค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นถึง 87% เนื่องจากความเป็นผลึกของเกาลิน และการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเกาลินกับแป้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ซึ่งพบว่าการเติมเกาลิน 15 phr ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวของโฟมเพิ่มจาก 142 เป็น 156 °C

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 39/2558

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.H. Imam, P. Cineli, E. Chiellini and J.W. Lawton, "Foamed Articles Based on Potato Starch, Corn Fibers and Poly (vinyl alcohol)", *Polymer Degradation and Stability* 91, 2006, pp. 1147-1155.

- [2] A.N. Mauri, P.R. Salgado, V.C. Schmidt, S.M. Ortiz and J.B. Lualaba, “Biodegradable Foams Based on Cassava Starch, Sunflower Proteins and Cellulose Fibers Obtained by a Baking Process”, *Journal of Food Engineering* 85, 2007, pp. 435-443.
- [3] N. Kaisangsri, O. Kerdchoechuen, N. Laohakunjit and S. Pratheepthithong, “Development of Cassava Starch Based Foam by Adding the agent”, *Journal of Agricultural Science* 40, 2009, pp. 113-116.
- [4] N. Kaisangsri, O. Kerdchoechuen, N. Laohakunjit and S. Pratheepthithong, “Biodegradable Foam Tray From Cassava Starch Blended with Natural Fiber and Chitosan”, *Industrial Crops and Products* 37, 2012, pp. 542-546.
- [5] A. Wattanakornsiri, “Thermoplastic Starch Reinforced with Recycled Paper Cellulose Fibers”, Doctoral Dissertation, Environmental Science, Faculty of Science, Burapha University, Thailand. 2012.
- [6] R. Siritong, “*Khanom Thai*”, Duang Kamol Publishing Company, 2009. (in Thai)
- [7] P. Pimkhaokhum, “*Ceramics* (5th eds.)”, Chulalongkorn University Press, 2004. (in Thai)
- [8] Quality Foam Packaging Inc., “EPS Foam (Expanded Polystyrene)”, Available: <http://www.qualityfoam.com/expanded-polystyrene.asp>, 28 October 2015.
- [9] Polyurethane Foam Association, “Information on Flexible Polyurethane Foam”, In Touch 1, 1991, pp. 1-4.
- [10] M. Tanadkha, “The Study on Production, Structure, and Properties of EVA Foam”, Master Thesis, Faculty of Science, Mahidol University, Thailand. 1997. (in Thai)
- [11] S. Polat, M. Uslu, A. Aygün, and M. Certel, “The Effects of the Addition of Corn Husk Fibre, Kaolin and Beeswax on Cross-linked Corn Starch Foam”, *Journal of Food Engineering* 116, 2013, pp. 267-276.
- [12] K. Kaewtatip and V. Tanrattanakul, “Structure and Properties of Pregelatinized Cassava Starch/kaolin Composites”, *Materials and Design* 37, 2012, pp. 423-428.
- [13] M. Hajji, N. Khedher, B. Beessais, H. Ezzaouia, H. Rahmouni and F.R. Ouaja, “Performance Improvements of Crystalline Silicon by Iterative Guttering Process for Short Duration and with Use of Porous Silicon as Sacrificial Layer”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 87, 2005, pp. 493-499.
- [14] L.H. Sperling, “*Introduction to Physical Polymer Science*”, John Wiley & Sons, Inc., 2006.