



การพัฒนารวมวิธีการผลิตวัสดุกันกระแทกย่อยสลายได้ในธรรมชาติจากแป้งมันสำปะหลัง

Development of Methodology for Production of Biodegradable Cushion from Tapioca Starch

นัฐพิชน บุตรี¹, สุวรรณ เอกรัมย์¹, วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน^{2*}

Natphichon Budtri¹, Suwan Aekrum¹, Weerasak Lertsiriyothin Author name^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

¹School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

²School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author: Tel: +66-8-9722-1603, Fax: +66-44-224-610, E-mail: natphichon@gmail.com, lsrytw@sut.ac.th

บทคัดย่อ

การพัฒนารวมวิธีการผลิตวัสดุกันกระแทกย่อยสลายได้ในธรรมชาติจากแป้งมันสำปะหลัง ครอบคลุมการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีการเตรียมเรซินพลาสติกที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นองค์ประกอบหลักสำหรับผลิตวัสดุกันกระแทก และวิธีการขึ้นรูปเป็นวัสดุกันกระแทก โดยงานในส่วนแรกกล่าวถึง การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และกระบวนการทำคอมปาวนด์ให้ได้วัสดุผสมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตวัสดุกันกระแทก เม็ดเรซินคอมปาวนด์ที่ได้จากการเตรียมสูตรคอมปาวนด์นำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยกระบวนการกดอัดในแม่พิมพ์ด้วยความร้อน เพื่อทดสอบหาสมบัติทางกลซึ่งประกอบด้วยค่า tensile strength, elongation at break, Young's modulus และหาค่า melt flow index และในส่วนของการผลิตวัสดุกันกระแทกใช้สารก่อโฟมทางเคมีโดยทำการผลิตด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันชนิดสกรูเดี่ยว ตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบหาความหนาแน่น อัตราการพองตัว และค่า compressive strength ผลการวิจัยแสดงถึงผลสำเร็จของการพัฒนาสูตรคอมปาวนด์ที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุกันกระแทก

คำสำคัญ: แป้งมันสำปะหลัง, โฟมกันกระแทก, เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

Abstract

The research report covered the development of methodology to compound a plastic resin suitable for making a loose-fill foam product and the processing method for producing loose-fill foam. The first part of the research reported the processing method for transform tapioca starch into thermoplastic starch and a compounding method for producing a compound resin that was designed for processing into the loose-fill foam. The compound resins were thermoformed into dumbbell shape samples which then were subjected to mechanical strength testing and determination of a melt flow index. In the latter part of the research, the extrusion technique for producing a loose-fill foam product was described. Development included a foaming method with a chemical blowing agent by using a single screw extruder. The loose-fill foam samples were investigated for density, expansion ratio, and compression strength. This research also showed a success of using the developed compound resin, which contained tapioca starch, to produce the loose-fill foam product.

Keywords: Tapioca starch, Loose-fill foam, Thermoplastic starch

1 บทนำ

วัสดุกันกระแทกที่ใช้กันอุตสาหกรรมการไทยส่วนมากจะผลิตมาจากวัสดุพอลิเมอร์ เช่น polystyrene polyurethane และ polyolefin ซึ่งจำเป็นต้องนำเข้าวัสดุกันกระแทกจากต่างประเทศหรือผลิตในประเทศแต่ใช้วัสดุและกรรมวิธีการผลิตภายใต้ลิขสิทธิ์ของต่างประเทศส่งผลให้ราคาสินค้าโดยเฉพาะในเรื่องบรรจุภัณฑ์มีมูลค่าค่อนข้างสูง นอกจากปัญหาด้านราคาแล้วขณะนี้ทั่วโลกได้มีการรณรงค์เพื่อลดการผลิตหรือการใช้วัสดุกันกระแทกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติเพราะผลิตภัณฑ์เหล่านี้ได้สร้างปัญหาต่อการกำจัดทิ้งจนกระทั่งประเทศคู่ค้าสำคัญของไทยทั้งในสหภาพยุโรป และสหรัฐอเมริกาได้ออกกฎหมายหรือระเบียบข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อการใช้วัสดุกันกระแทกที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุกันกระแทกแบ่งตามรูปแบบของการใช้งานได้สองประเภท คือ วัสดุกันกระแทกชนิดขึ้นเป็นรูปทรงให้เข้ากับช่องว่างระหว่างผลิตภัณฑ์กับบรรจุภัณฑ์ (foam-in-place) และวัสดุกันกระแทกชนิดที่ใช้เติมเข้าช่องว่างแต่ไม่ได้มีรูปทรงพอดีตามช่องว่าง (loose-fill foam) เป็นที่น่าสนใจว่าวัสดุกันกระแทกที่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติที่เป็นที่ยอมรับใช้ในเชิงการค้ายังจำกัดการใช้อยู่แค่วัสดุกันกระแทกชนิด loose-fill foam และมีเพียงผลิตภัณฑ์เดียวภายใต้ชื่อ ENVIROMOLD® ของบริษัท EnPac ที่พึ่งจะขายเทคโนโลยีการทำวัสดุกันกระแทกชนิด foam-in-place ด้วยวิธีการประสานขึ้นวัสดุกันกระแทกที่ย่อยสลายได้ชนิด loose-fill foam ด้วยน้ำ วัสดุกันกระแทกที่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติชนิด loose-fill foam ที่ผลิตขายเชิงการค้าที่ว่าเป็นที่มาจากวัตถุดิบจำพวกแป้งเป็นหลักอันได้แก่ สีนํ้าภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ CLEAN GREEN® ENVIROFIL® ECO-FOAM® FLO-PAK BIO® RENATURE® และ STAR-KORE® และผู้ผลิตกลุ่มนี้ล้วนแล้วแต่เป็นบริษัทของสหรัฐอเมริกาทั้งสิ้น เพราะการผลิตเชิงการค้านี้ทำโดยอาศัยผลงานวิจัยพื้นฐานเกี่ยวกับแป้งข้าวโพดที่สหรัฐผลิตได้มากและรัฐบาลของสหรัฐสนับสนุนงานวิจัยเกี่ยวกับข้าวโพดอย่างจริงจังและต่อเนื่องเพื่อหาประโยชน์ของการใช้ข้าวโพดให้มากที่สุดซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการยกระดับราคาข้าวโพดจากสถิติข้อมูลของ Bureau of Alcohol, Tobacco and Firearms, USA รายงานว่าปริมาณการใช้วัสดุกันกระแทกชนิด loose-fill foam ในสหรัฐเฉลี่ยอยู่ที่ 42.5 ล้านกิโลกรัมต่อปี ในจำนวนนี้คิดเป็นวัสดุกันกระแทกที่ย่อยสลายได้อยู่ราว 15-20% หรือราว 6.38-8.5 ล้านกิโลกรัมต่อปี และประมาณการอัตราการเติบโตไว้ที่ 2% ต่อปี สำหรับช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 90 (Anon, 1996) ตัวเลขการใช้วัสดุกันกระแทกที่ย่อยสลายได้ที่ยังน้อยเป็น

เพราะว่าหนึ่งสาเหตุด้านราคาที่สูงกว่าราว 30% เมื่อเทียบกับราคาของวัสดุกันกระแทกชนิด loose-fill foam ที่ทำจาก expanded polystyrene (ราคาขายเฉลี่ยในสหรัฐประมาณ 21.6 บาท ต่อ 16.4 ft³) และสองสาเหตุเรื่องความแตกต่างด้านคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุกันกระแทกที่ย่อยสลายได้ ซึ่งปัจจุบันนี้รัฐบาลสหรัฐก็ยังสนับสนุนงานวิจัยเพื่อพัฒนาให้เทคโนโลยีการผลิตวัสดุกันกระแทกที่ย่อยสลายได้จากแป้งให้สามารถแข่งขันกับวัสดุกันกระแทกที่ทำจากพอลิเมอร์ได้มากขึ้น (Anon, 1996) จากการสำรวจข้อมูลด้านงานวิจัยของเมืองไทยและข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นนี้ตระหนักได้ว่าเราไม่มีงานวิจัยพัฒนาวัสดุกันกระแทกที่ย่อยสลายได้จากผลผลิตที่เมืองไทยเพาะปลูกได้ในปริมาณมากอย่างจริงจัง หรือกล่าวได้ว่าเรายังคงต้องพึ่งพาเทคโนโลยีการผลิตวัสดุกันกระแทกที่ย่อยสลายได้จากต่างประเทศและยังจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเข้มงวดต่อกฎหมายคุ้มครองเรื่องสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะกับตลาดส่งออก

การนำวัสดุที่เกิดขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติมาผลิตเป็นวัสดุด้านบรรจุภัณฑ์ถือได้ว่าเป็นการปฏิรูปทางวัสดุศาสตร์ที่ว่าได้ ทั้งนี้เพราะว่าเทคโนโลยีขณะนี้สามารถสังเคราะห์หรือแปรรูปวัสดุดังกล่าวขึ้นเพื่อทำเป็นบรรจุภัณฑ์บางประเภทที่ใช้งานได้ดีราวกับที่ทำมาจากวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์ และมีข้อดีเหนือกว่าอีกตรงที่วัสดุเกิดขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาตินี้เกิดการย่อยสลายได้สมบูรณ์แบบกลับเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารทำให้มีการผลิตกลับมาทดแทนขึ้นใหม่ได้ วัสดุที่เกิดขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติในกลุ่มของ biopolymer ที่กล่าวมานี้แบ่งเป็นที่ได้สามประเภทหลัก ได้แก่ วัสดุที่สกัดมาจากผลผลิตทางเกษตรโดยตรง เช่น แป้งจากพืช และโปรตีนจากพืช (casein และ wheat gluten) สอง คือ วัสดุที่เกิดจากสารที่ได้จากกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการหมักของผลผลิตทางการเกษตร เช่น polylactate ที่ทำจาก lactic acids และ chitosan ซึ่งจัดเป็นสารจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มาจากผนังเซลล์ของพืชชั้นต่ำ หรือมาจากเปลือกหุ้มเนื้อเยื่อของสัตว์ชั้นต่ำพวก arthropods และ mollusks (Harish et al., 2002) สาม คือ วัสดุที่ผลิตจากสารที่ได้จากจุลินทรีย์ เช่น polyhydroxyalkanoate จากแบคทีเรีย (Peterson et al., 1999) ระหว่างสามกลุ่มนี้วัสดุในกลุ่มแรกกำลังได้รับความนิยมมากที่สุดในการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุกันกระแทกทั้งประเภทที่เรียกว่า “loose-fill foam” และ “foam in place” การวิจัยและพัฒนาที่นำแป้งจากผลิตผลทางการเกษตรมาใช้ผลิตเป็นวัสดุกันกระแทกประเภทนี้สืบเนื่องมาจากการทราบกันมานานแล้วในอุตสาหกรรมอาหารว่าแป้งมีคุณสมบัติจัดเป็นพอลิเมอร์โดยเฉพาะเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนและการทำ

ให้เย็นตัวลง การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของแป้งที่สังเกตเห็นกันในอุตสาหกรรมอาหารแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะที่คล้ายกับคุณลักษณะที่จำเป็นต้องมีของวัสดุกันกระแทกที่ทำจากพอลิเมอร์ เช่น ความคงตัว การขยายตัวอันเนื่องมาจากเซลล์อากาศ ความยืดหยุ่น ความสามารถในการรับแรงกดทับ และความแข็งแรงเชิงกล เป็นต้น จุดนี้เองทำให้องค์กรทั้งภาคเอกชนและรัฐของหลายประเทศที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดูแลผลผลิตเกษตรที่แปรรูปเป็นแป้งได้ให้ความสำคัญกับงานวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากแป้งกันเป็นจำนวนมาก

สาเหตุที่จำเป็นและยังต้องมีการทำวิจัยก็เพราะว่าคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแป้งที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นวัสดุกันกระแทกยังมีคุณลักษณะเหมือนอาหารจำพวกขนมขบเคี้ยวอยู่มาก เป็นต้นว่าคุณสมบัติทางกลที่ค่อนข้างห่างไกลกับคุณสมบัติที่ได้จากพอลิเมอร์ ความเปราะบางของวัสดุ ความยืดหยุ่นที่ต่ำ การสูญเสียลักษณะทางกายภาพเมื่อได้รับความชื้นหรือความไวต่อความชื้น และปัญหาการคงสภาพหรืออายุของวัสดุกันกระแทกที่ทำขึ้นมาได้ เป็นต้น นอกจากปัญหาในเรื่องของคุณสมบัติพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่มาจากวัสดุธรรมชาติแล้ว สิ่งที่เป็นหัวใจของการพัฒนาวัสดุกันกระแทกจากแป้งก็คือกระบวนการแปรรูปส่วนผสมของสารที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักนี้ไปเป็นวัสดุกันกระแทก อันที่จริงน่าจะกล่าวได้ว่ากรรมวิธีการผลิตวัสดุกันกระแทกนี้เป็นตัวกำหนดส่วนผสมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบมากกว่าหรือเป็นปัจจัยกำหนดคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุดิบนั่นเอง ปัญหาเหล่านี้เองที่ทำให้ผู้วิจัยเห็นว่าประเทศไทยยังขาดทั้งงานวิจัยและศูนย์ปฏิบัติการวิจัยขั้นสูงที่มุ่งทำวิจัยในเรื่องการพัฒนาวัสดุกันกระแทกที่ย่อยสลายได้จากวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (renewable resources เน้นที่วัสดุจำพวก biomaterial) งานวิจัยนี้จะถูกนำมาใช้ในการวางรากฐานที่สำคัญนี้เพื่อตอบปัญหาและให้ความช่วยเหลือถ่ายทอดเทคโนโลยีการใช้ประโยชน์จากวัสดุจากผลผลิตทางการเกษตรที่มีความเป็นไปได้สูงมากโดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลังในการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุกันกระแทก ด้วยสภาพความพร้อมทางด้านเครื่องมือหลักที่สำคัญต่องานวิจัยขั้นนี้ที่มีอยู่ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสภาพที่ตั้งที่ใกล้กับแหล่งผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังผู้วิจัยเชื่อว่าโครงการต้นแบบนี้จะสามารถพัฒนาให้บรรลุวัตถุประสงค์ได้ และจะเป็นแรงจูงใจให้ภาคอุตสาหกรรมร่วมลงทุนพัฒนาศูนย์วิจัยขั้นสูงอย่างต่อเนื่อง

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 คัดเลือกวัตถุดิบและส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิต

แป้งที่สามารถใช้ในการผลิตที่สามารถจัดหาได้ภายในประเทศไทย ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรชนิดอะซิเลตเพื่อให้มีปริมาณอะไมโลสสูงขึ้น และพอลิเมอร์หลักที่ใช้ เช่น เม็ดเรซินชนิดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ซึ่งย่อยสลายได้ในธรรมชาติ โดยมีองค์ประกอบอื่นเพื่อเอื้อต่อการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันและให้ได้ผลิตภัณฑ์โฟม ได้แก่ nucleating agent, plasticizer, compatibilizer และสารก่อโฟม (blowing agent) เป็นต้น

2.2 การเตรียมสูตรคอมปาวนด์

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch, TPS) เริ่มจากนำแป้งมันสำปะหลังจากบริษัท สงวนวงศ์ จำกัด จังหวัดนครราชสีมา อบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 4 h จากนั้นนำแป้งปริมาณ 70% ผสมกับกลีเซอรอลปริมาณ 30% นำมาผลิตเป็น TPS ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว (Betol BC32, Betol Machinery Limited, England) ที่อุณหภูมิ 90-130°C ที่ความเร็วรอบ 20 rpm

การเตรียมสูตรคอมปาวนด์สำหรับทำเป็นตัวอย่างโฟมทำโดยการผสมองค์ประกอบของสูตรคอมปาวนด์เข้าเป็นเนื้อเดียวกันให้ได้มาในลักษณะของเม็ดเรซินเทอร์โมพลาสติก การผสมเริ่มจากการนำเม็ดเรซิน *poly(butylene succinate)* (PBS) อบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50-60°C เป็นเวลา 4 h จากนั้นนำ TPS เม็ดพลาสติก และองค์ประกอบอื่นมาผสมกันตามสูตรส่วนผสมดัง Table 1 ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว โดยปรับตั้งค่าอุณหภูมิที่ 110-140°C ที่ความเร็วรอบ 20 rpm

Table 1 The concentrations of loofill foam formulas.

Sample	Concentration (%)			Concentration (phr)
	PBS	TPS	Talc	Blowing Agent
PBS	99.5	-	0.5	5
TPS20	79.5	20	0.5	5
TPS30	69.5	30	0.5	5
TPS40	59.5	40	0.5	5

*phr is parts per hundred

2.3 กระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชัน

ในกรณีของตัวอย่างโฟมประเภทโฟมแบบไม่คงรูป (loose-fill foam) เตรียมขึ้นโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูชันชนิดสกรูเดี่ยว เส้นผ่าศูนย์กลาง 31.6 mm และ L/D เท่ากับ 24.62 ซึ่งงานวิจัยนี้ครอบคลุมการศึกษาหาสภาวะเหมาะสมของตัวแปรควบคุมกระบวนการขึ้นรูป โดยตั้งค่าอุณหภูมิระหว่าง 90-140°C และที่ความเร็วรอบ 35 rpm โดยตัวอย่างโฟมขึ้นเป็นรูปได้ด้วยหัวตาย (die) เป็นรูปทรงกระบอกขนาดของรูหัว 3 mm

2.4 ทดสอบคุณสมบัติก่อนการขึ้นรูปโฟม

ทดสอบสมบัติทางกลโดยนำตัวอย่างโฟมที่พัฒนาขึ้นเตรียมตัวอย่างให้ได้ตามมาตรฐานการวัดตาม ASTM หมายเลข D638 วัดด้วยเครื่อง universal testing machine (Instron 5565, Instron Corp., Canton, MA, USA) โดยให้แรงกับตัวอย่างโฟมและวัดค่าเป็น tensile strength และ elongation at break และ Young's modulus ซึ่งขึ้นรูปขึ้นงานจากสูตรคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเองโดยหลักการกดอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ด้วยเครื่องกดอัดพลาสติกที่ความดัน 100 bar ที่อุณหภูมิ 160-180°C

ทดสอบการไหลตัวโดยนำไปหาค่าการไหลตัวของพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM หมายเลข D1238 ที่อุณหภูมิ 190°C

2.5 ทดสอบคุณสมบัติการขึ้นรูปโฟม

อัตราการขยายตัวของตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการอัดพองด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชัน คำนวณจากผลหารของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างโฟมที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันออกมากับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตายโดยใช้ vernier caliper เป็นเครื่องมือวัด

ความหนาแน่น (g/cm^3) วัดโดยการประยุกต์ใช้ตามวิธีของ Bhatnagar and Hanna (1996) โดยใช้วิธีการแทนที่ด้วยทรายในกระบอกตัวอย่างขนาด 100 ml ใส่ตัวอย่างไปในกระบอกตัวอย่าง หลังจากนั้นใส่ทรายลงไปในภาชนะทรงกระบอกตามพื้นที่ว่างของ

ตัวอย่างที่ใส่ลงไปก่อนหน้า นำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณดังสมการที่ 1

$$D = \frac{W_E D_R}{W_{RT} - W_R} \quad (1)$$

โดยที่ W_E คือ น้ำหนักของตัวอย่างโฟม D_R คือ ความหนาแน่นทราย W_{RT} คือ น้ำหนักของทรายในปริมาตร 100 ml และ W_R คือ น้ำหนักของทรายที่เหลือในปริมาตร 100 ml หลังจากการแทนที่

อัตราการผลิตของตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการอัดพองด้วยเอกซ์ทรูเดอร์ คำนวณจากผลหารของมวลตัวอย่างโฟมที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันออกมาเมื่อเทียบกับเวลา

compression strength วัดตามวิธีของ Guan and Hanna (2004) ด้วยเครื่อง universal testing machine (Instron 5565, Instron Corp., Canton, MA, USA) โดยการตัดตัวอย่างจะต้องอยู่ในแนวเส้นตรงตั้งฉากกับแกนของตัวอย่าง แรงที่ใช้ในการกดอัดที่ 80% ของค่า compression strain ความเร็วที่ใช้ในการกดอัด 10 mm/min

3 ผลและวิจารณ์

การศึกษานี้ได้เน้นใช้วัตถุดิบที่ได้จากแป้งมันสำปะหลัง การทดลองได้เลือกใช้มันสำปะหลังตัดแปรชนิดอะซิเลตซึ่งจากคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังจะมีความหนืดสูงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ ส่งผลต่อกระบวนการผลิตโฟมซึ่งอาจจะส่งผลให้แป้งไหม้ติดเครื่องมือการผลิตบริเวณที่ใช้ความร้อนสูง และพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ PBS จากคุณสมบัติของ PBS เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ มีความหนืดค่อนข้างสูงและค่า T_m ต่ำ (~108°C) และในการทดลองเริ่มจากการผลิต TPS โดยใช้แป้งมันสำปะหลังผสมกับกลีเซอรอล 30% อุณหภูมิในการผลิต 110-140°C พบว่าลักษณะของตัวอย่างจะมีลักษณะปรากฏ ใส นุ่ม มีความเป็นพลาสติก และนำ TPS ที่ได้ผสมกับพอลิเมอร์ชนิด PBS

ทำการผลิตเม็ดเรซินด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ค่าอุณหภูมิ 110-140°C

ผลการทดสอบสมบัติทางกลของตัวอย่างเรซินผสมก่อนการขึ้นรูปโฟมพบว่า ค่า tensile strength จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นดัง Figure 1 ที่ปริมาณ TPS 40% ค่า tensile strength จะมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 16.09 MPa และที่ปริมาณ TPS 0% จะมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 33.95 MPa จะเห็นว่าค่า tensile strength ลดลงถึง 2.11 เท่าเมื่อเทียบกับปริมาณ TPS 40% และสภาพการยืดหยุ่นสามารถอธิบายจากค่า Young's modulus เมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้น ค่า Young's modulus มีแนวโน้มลดลงแสดงว่าปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความยืดหยุ่นของตัวอย่างเรซินผสม ค่าดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huneault and Li (2007) ซึ่งได้ศึกษาสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของการเข้ากันได้ระหว่าง polylactic acid (PLA)/TPS ผสม พบว่าเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้น ค่า tensile strength Young's modulus และ elongation at break มีแนวโน้มลดลง เมื่อเติม PLA ที่ถูก graft ด้วย maleic anhydride ลงในส่วนผสมพบว่าค่า elongation at break จะเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณ TPS 46% จะมีค่า elongation at break สูงที่สุด และ Jun (2000) ได้ทำการศึกษการผสม PLA กับแป้ง โดยใช้แป้งข้าวโพดและตัวทำละลายแป้ง 3 ชนิด คือ toluene diisocyanate (TDI), isoporene diisocyanate (IPD), diethylene triamine, 1,6-diisocyanatohexane (DIH), และ 4,4'-methylenebis(phen-ylisocyanate) (MDI) พบว่าเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น ค่า tensile strength Young's modulus และ elongation at break ลดลง และปริมาณของแป้งที่ 25% สูตรที่เติม TDI ให้ค่า tensile strength สูงที่สุด และสูตรที่เติม DIH ให้ค่า elongation at break สูงที่สุด แต่ปริมาณของแป้งที่ 25% และ 50% มีค่า elongation at break ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งสอดคล้องในการทดลองนี้ซึ่งค่า elongation at break มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ดัง Figure 2

ค่าอัตราการไหลของพอลิเมอร์สามารถบ่งบอกถึงสภาพของพอลิเมอร์คร่าวๆ เมื่ออยู่ในเครื่องเอกซ์ทรูชัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการบอกค่าน้ำหนักของโมเลกุลของเม็ดพลาสติก (molecular weight) ได้ ถ้าพอลิเมอร์ที่ทดสอบหา melt flow rate มีค่าสูงก็แสดงว่าพอลิเมอร์นั้นมีค่า molecular weight ต่ำ และขณะเดียวกัน melt flow rate ยังบอกถึงความสามารถในการหลอมไหลของวัสดุภายใต้แรงดัน ในทางกลับกัน melt flow rate ยังใช้ในการวิเคราะห์หาค่าความหนืดของวัสดุภายใต้สภาวะการรับแรงต่างๆ อัตราส่วนระหว่างค่าการทดสอบหา melt flow rate 2 ครั้ง ที่ค่า

น้ำหนักต่างกันก็นำไปหาค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติก หรือ molecular weight distribution ซึ่งในการทดสอบหาค่า MFI ตามมาตรฐาน ASTM พบว่า ค่าอัตราการไหลของเรซินที่มีปริมาณ TPS 20 30 และ 40% มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 47-50 g/10 min Figure 3 แสดงให้เห็นว่า TPS มีผลต่อการไหลของเรซินผสมส่งผลให้ความหนืดลดลงอาจจะส่งผลต่อกระบวนการผลิตโฟมซึ่งจะต้องอาศัยความหนืดของพอลิเมอร์เพื่อให้พอลิเมอร์มีการต้านแรงยกของแก๊สต่อผนังเซลล์โฟม ไม่ให้เกิดสลายผ่านพอลิเมอร์เมตริกก่อนการเกิดเป็นโฟม

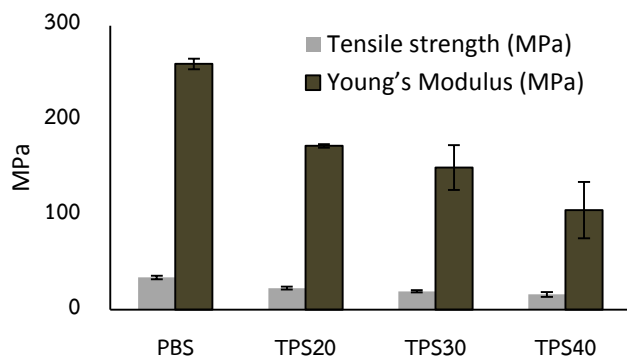


Figure 1 Tensile strength and Young's modulus.

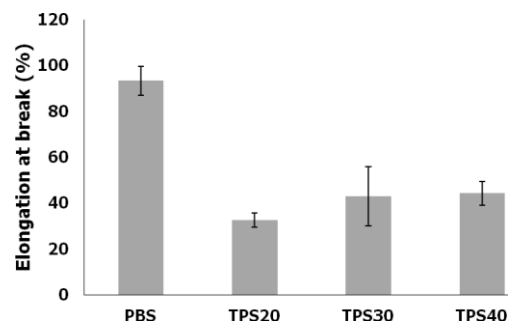


Figure 2 Elongation at break.

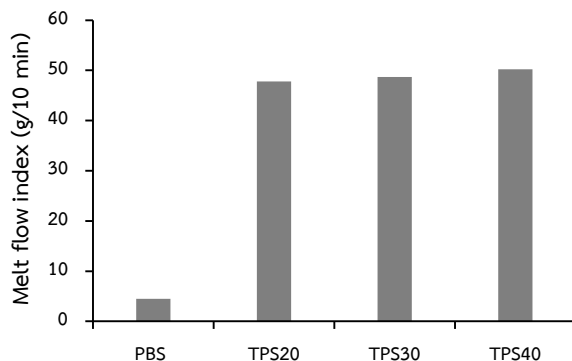


Figure 3 Melt flow index (MFI).

ตัวอย่างโฟมที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันที่สภาวะเหมาะสมถูกแสดงใน Figure 4 พบว่าสูตรคอมพาวนด์ที่ผู้วิจัย

คิดขึ้นเมื่อนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันที่สภาวะเหมาะสมสามารถทำให้เกิดการขยายตัวของตัวอย่างโฟมได้ และพบว่าอัตราการขยายตัวของโฟมมีค่าแปรผกผันกับปริมาณแป้งที่ผสมในสูตรคอมปาวนด์ที่นำมาขึ้นรูป ดังจะเห็นได้จาก Figure 4 (A) ซึ่งเป็นโฟมที่ขึ้นรูปจากเรซิน PBS มีการพองตัวของโฟมมากที่สุด เนื่องจากไม่มีการผสมแป้งและมีอัตราการขยายตัวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งในสูตรคอมปาวนด์ที่นำมาขึ้นรูป แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาขนาดของโฟมที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วพบว่า การขึ้นรูปโดยใช้สูตรคอมปาวนด์ TPS20 โฟมมีขนาดสม่ำเสมอ นอกจากนั้นแล้วบริเวณผิวของตัวอย่างยังมีลักษณะเรียบซึ่งเป็นลักษณะที่พึงประสงค์ของโฟม สำหรับสูตรคอมปาวนด์ TPS30 และ TPS40 พบว่าถึงแม้สูตรคอมปาวนด์ดังกล่าวจะสามารถขึ้นรูปโฟมได้แต่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ



Figure 4 Loose-fill foam by extrusion process (A) PBS, (B) TPS20, (C) TPS30 and (D) TPS40.

ใน Figure 5 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของโฟมมีค่าแปรผันตามปริมาณของแป้งที่ผสมในสูตรคอมปาวนด์ กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งในสูตรคอมปาวนด์ให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้โฟมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วมีค่าความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถบ่งชี้ได้ว่าการเพิ่มปริมาณแป้งในสูตรคอมปาวนด์จะส่งผลให้อัตราการขยายตัวของโฟมมีค่าลดลง

อัตราการพองตัวของตัวอย่างโฟมเป็นดัชนีบ่งชี้สำคัญถึงขีดความสามารถของสูตรคอมปาวนด์และกระบวนการขึ้นรูปโฟม โดยผลการวัดอัตราการพองตัวของตัวอย่างโฟมที่ได้จากงานวิจัยนี้ถูกแสดงไว้ใน Figure 6

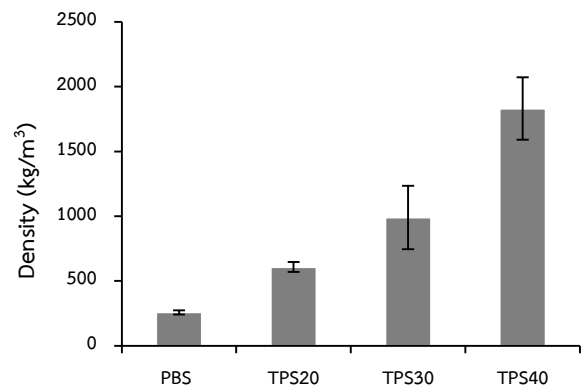


Figure 5 Density of foam.

พิจารณา Figure 6 พบว่าอัตราการพองตัวของโฟมมีค่าสูงมาก โดยเฉพาะการขึ้นรูปโฟมโดยใช้เรซิน PBS ซึ่งมีอัตราการพองตัวสูงมากกว่า 400% และมีค่าอัตราการพองตัวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งในสูตรคอมปาวนด์ที่นำมาขึ้นรูปโฟม แต่อย่างไรก็ตามกลับพบว่าอัตราการพองตัวของตัวอย่างโฟมต่ำสุดยังมีค่าสูงกว่า 200% ซึ่งจากผลดังกล่าวเป็นดัชนีบ่งชี้ได้เป็นอย่างดีถึงขีดความสามารถของสูตรคอมปาวนด์ที่ผู้วิจัยได้คิดขึ้นว่าสามารถนำไปผลิตเป็นโฟมได้ถึงแม้จะมีปริมาณแป้งเป็นส่วนผสมอยู่ในปริมาณมากก็ตาม ในการทดลองนี้มีทิศทางของอัตราการพองตัวของโฟมตรงข้ามกับ Xu and Hanna (2005) ซึ่งได้ศึกษาการเตรียมและคุณสมบัติของโฟมที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติจากแป้งชนิดอะซีเตทกับ poly(tetramethylene adipate-co-terephthalate) โดยปริมาณแป้ง 60-100% และผลิตโฟมด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันชนิดสกรูคู่ใช้เอทานอลและน้ำเป็นสารก่อโฟม พบว่าเมื่อปริมาณแป้งลดลงอัตราการพองตัวของโฟมลดลง ซึ่งอัตราการพองตัวของโฟมมีค่าสูงที่สุดที่ประมาณ 27 ที่ปริมาณแป้ง 95%

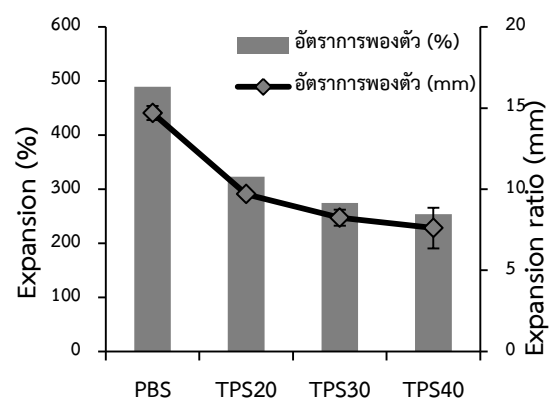


Figure 6 Expansion ratio of foam.

ค่า compressive strength เป็นค่าความสามารถของโฟมในการต้านแรงกดที่กระทำต่อโฟมจนเสียรูปหรือรับแรงกดต่อไปอีกไม่ได้ ซึ่งเป็นค่าแรงที่มากที่สุดที่โฟมสามารถรับแรงกดได้ ค่าดังกล่าวยัง

บ่งบอกถึงความแข็งแรงของโฟมได้ด้วย และจาก Figure 7 แสดงถึงค่า compressive strength ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ TPS ที่เปลี่ยนไป เมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า compressive strength เพิ่มขึ้น และที่ปริมาณ TPS 40% มีค่า compressive strength สูงที่สุด และปริมาณ TPS 0% มีค่า compressive strength ต่ำสุด ที่ 16.24 และ 10.60 MPa ตามลำดับ เมื่อเทียบกับโฟมทางการค้า (PP-Foam) ซึ่งมีค่า compressive strength เท่ากับ 0.09 MPa แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างโฟมที่ได้จากการทดลองยังมีความแข็งแรงน้อยกว่าโฟมทางการค้า และจากการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu and Hanna (2005) พบว่าค่า compressibility มีค่าเพิ่มเมื่อปริมาณแป้งลดลง ค่า compressibility สูงที่สุดเท่ากับ 6.93 MPa ที่ปริมาณแป้ง 60% ซึ่งจะเห็นได้ว่าแป้งส่งผลให้โฟมมีลักษณะที่นุ่มขึ้น ดังนั้นแป้งจึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการผลิตโฟม พร้อมทั้งยังเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติด้วย กระบวนการย่อยของจุลินทรีย์

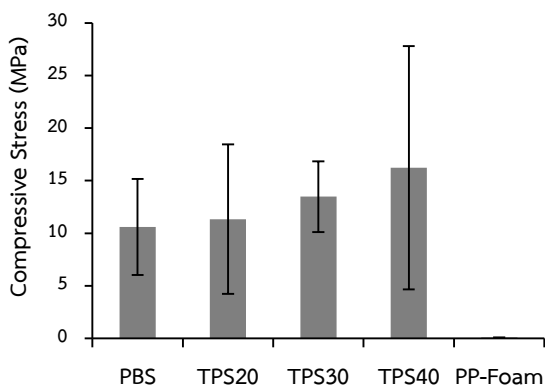


Figure 7 Compressive strength of foam.

นอกจากนี้ TPS ยังมีผลต่อการคืนตัวของโฟมหลังจากขั้นตอนการ compression ดัง Figure 8 ซึ่งอัตราการคืนตัวที่ TPS ปริมาณ 40% ที่อัตราการคืนตัว 66% และอัตราการคืนตัวต่ำสุดคือ 47% ที่ปริมาณ TPS 0% ซึ่งมีอัตราการคืนตัวเกิน 50% เป็นแนวทางที่ดีในการใช้แป้งเป็นส่วนผสมเพื่อผลิตเป็นโฟม และเมื่อเทียบกับโฟมทางการค้าอัตราการคืนตัวสูงถึง 99%

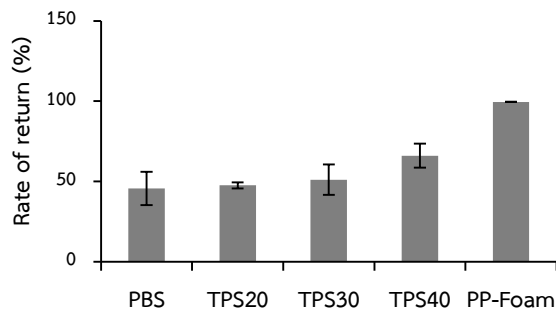


Figure 8 Rate of return of foam.

4 สรุป

การพัฒนากรรมวิธีการผลิตวัสดุกันกระแทกย่อยสลายได้ในธรรมชาติจากแป้งมันสำปะหลัง เริ่มต้นจากการพัฒนาคิดค้นสูตรคอมพาวนด์สำหรับทำ loose-fill foam ที่มีแป้งเป็นส่วนผสมหลัก เทคนิคการผลิตเรซินคอมพาวนด์ครอบคลุมเรื่องกระบวนการแปรรูปแป้งเป็น thermoplastic starch และการปรับปรุงสมบัติเชิงกลสูตรคอมพาวนด์ให้เหมาะแก่การผลิตเป็นแผ่นไมโครเซลโฟม ผลการศึกษายังพบว่าการเพิ่มความยืดหยุ่นสูตรคอมพาวนด์ทำได้โดยการเพิ่มสารเติมแต่งในเฟสผสม เช่น PBS และสารเติมแต่งอื่นๆ ทั้งนี้ปริมาณสารเติมแต่งที่ใช้มีผลต่อการเข้ากันได้ของเฟสผสม และขึ้นรูปโฟมแบบต่อเนื่องโดยเครื่องเอกซ์ทรูชันในการผลิตพบว่า อัตราการพองตัวของโฟมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งลดลง และความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แป้งยังมีผลทำให้ค่า compressive strength สูงขึ้นเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น และการคืนตัวของโฟมหลังจากขั้นตอนการ compression ส่งผลให้ทราบความนุ่มของโฟมที่มีแป้งเป็นส่วนผสม

5 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการสนับสนุนงบประมาณเพื่องานศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และหน่วยวิจัยนวัตกรรมบรรจุภัณฑ์และอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการศึกษาวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

- Anon, 1996. Ethanol production down but packaging and adhesive uses are up. Economic Research Service, USDA, Industrial Uses, IUS-6, 12-16.
- Boehmer, E.W., Hanlon, D.L. 1993. Biodegradable expanded foam material. US Patent No. 5,272,181.

- Biby, G., Hanna, M., Fang, Q. 2001. Water resistant degradable foam and method of making the same. US Patent No. 6,184,261.
- Bhatnagar S., Hanna M.A. 1996. Physical, mechanical, and thermal properties of starch-based plastic foam. Transactions of ASAE, 38, 567-571.
- Fang, Q., Hanna, M.A. 2001. Preparation and characterization of biodegradable copolyester starch based foams. Bioresource Technology, 78, 115-122.
- Gilbert, R.D., Kadla, J.F. 1998. Chapter 3 Polysaccharides-Cellulose in Biopolymers from Renewable Resources (Kaplan D.L.), Springer, Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Guan, J., Hanna, M.A. 2004. Functional properties of extruded foam composites of starch acetate and corn cob fiber. Industrial Crops and Products, 19, 255-269.
- Harish, P.K.V., Kittur, F.S., Tharanathan, R.N. 2002. Solid state structure of chitosan prepared under different N-deacetylating conditions. Carbohydrate Polymers, 50, 27-33.
- Hudson, S.M., Smith, C. 1998. Chapter 4 Polysaccharides: Chitin and Chitosan: Chemistry and Technology of Their Use and Structure Materials, in Biopolymers from Renewable Resources (Kaplan D.L.). Springer, Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Huneault, M.A., Li, H. 2007. Morphology and properties of compatibilized polylactide/ thermoplastic starch blends. Polymer, 48, 270-280.
- Jane, J.L., Zhang, S.S. 1998. Soy protein-based thermoplastic composition for foamed articles. US Patent No. 5,710,190.
- Jun, C.L. 2000. Reactive Blending of Biodegradable Polymers: PLA and Starch. Journal of Polymers and the Environment, 8, 33-37.
- Knight, A.T. 1994. Starch derived shaped articles. US Patent No. 5,314,754.
- Lacourse, N.L., Altieri, P.A. 1991. Biodegradable shaped products and the method of preparation thereof. US Patent No. 5,035,930.
- Lacourse, N.L., Altieri, P.A. 1991. Biodegradable shaped products and the method of preparation thereof. US Patent No. 5,043,196.
- Myllarinen, P., Buleon, A., Lahtinen, R., Forssell, P. 2002. The crystallinity of amylose and amylopectin films. Carbohydrate Polymers 48, 41-48.
- Nabeshima, E.H., Grossmann, M.V.E. 2001. Functional properties of pregelatinized and cross-linked cassava starch obtained by extrusion with sodium trimetaphosphate. Carbohydrate Polymers 45, 347-353.
- National Starch and Chemical Co. 2000. Pregelatinized starches obtained from different botanical sources as binders in high-shear wet granulation system. Poster#1283 presented at the AAPS 2000 annual meeting.
- Neumann, P.E., Seib, P.A. 1993. Starch-based biodegradable packing filler and method of preparing same. US Patent No. 5,248,702.
- Peterson, J.M., Bartoshuk, L.M., Duffy, V.B. 1999. Intensity and preference for sweetness influenced by genetic taste variation. Journal of the American Dietetic Association, 99(supply 1), A-28.
- 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.
- Tormey, B.C., Altieri, P.A., Rose, R.R. 1996. Expanded starch-based shaped products and the method of preparation thereof. European Patent No. 0712883.
- Tsai, J., Kulp, C.L., Maliczyszyn, W., Altieri, P.A., Rawlins, D.C. 1999. Starch foam products with improved flexibility and the method of preparation thereof. US Patent No. 5,863,342.
- Wollerdorber, M., Bader, H. 1998. Influence of natural fibers on the mechanical properties of biodegradable polymers. Industrial Crops and Products, 8, 105-112.
- Xu, Y., Hanna, M.A. 2005. Preparation and properties of biodegradable foams from starch acetate and poly(tetramethylene adipate-co-terephthalate). Carbohydrate Polymers, 59, 521-529.