

การสังเคราะห์แบเรียมเฟอร์ไรต์โดยวิธีซีตริก-กลีเซอรอลสำหรับเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด

Synthesis of Barium ferrite via Citric Glycerol Sol-Gel Method for Magnetic-Polylactic acid Fibers

ณัฐกฤตา เฟื่องพล¹ วรวัชร วัฒนฐานะ¹ พงศกร อันทรัดน์² ฉัตรชัย วีระนิติสกุล³ บัทรมน คุณแสง⁴ และ อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁴ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: natkritta.p@ku.th¹, w_worawat@hotmail.com¹, fscipsj@ku.ac.th²,

chatchai.v@en.rmutt.ac.th³, fscinmk@ku.ac.th⁴ and fengapl@ku.ac.th¹

บทคัดย่อ

ผงแบเรียมเฟอร์ไรต์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) สามารถเตรียมได้จากการบวนการโซล-เจล โดยใช้กลีเซอรอลกับกรดซิตริก เพื่อร่วมสร้างเป็นโครงตาข่ายอินทรีย์ ผงแบเรียมเฟอร์ไรต์และพอลิแลกติกแอซิดจะถูกนำมาผสมกันเพื่อทำมาสเตอร์แบทช์ โดยผ่านเครื่องอัดรีดแบบสองเกลียวคู่ จากนั้นขึ้นรูปเส้นใยโดยผสมมาสเตอร์แบทช์ (ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 15 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิแลกติกแอซิด) โดยวิธีการปั่นหลอม เส้นใยที่ขึ้นรูปแล้วจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในขณะที่สมบัติแม่เหล็กวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น

คำสำคัญ:

แบเรียมเฟอร์ไรต์ เส้นใยแม่เหล็ก สมบัติแม่เหล็ก

Abstract

Barium ferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) powders were successfully synthesized by citric glycerol sol-gel method using glycerol incorporating with citric acid to form organic network. The obtained barium ferrite powder and polylactic acid (PLA) were mixed to prepare a masterbatch by using twin screw extruder. Various amounts of masterbatch (0-15 phr) were mixed with PLA to form magnetic-PLA fibers by using melt-spinning technique. The obtained fibers were characterized by using FTIR, DSC, XRD, UTM and SEM while the magnetic property was studied by VSM.

Keywords:

barium ferrite, magnetic fiber, magnetic properties

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่รู้จักกันดีในกลุ่มอาเซียน ในฐานะประเทศที่มีบทบาทสำคัญในการผลิตผลผลิตทางการเกษตร และนอกจากนี้ประเทศไทยยังมีการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น เคมีภัณฑ์ ปิโตรเลียม และวัสดุพอลิเมอร์ด้วยเช่นเดียวกัน วัสดุทางการเกษตรจำนวนมากถูกนำมาพัฒนาเพื่อการใช้ประโยชน์แทนพลาสติก ซึ่งเมื่อใช้งานแล้วจะถูกนำไปทิ้งเป็นขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ และจากสมบัติทางความร้อนและความแข็งแรง รวมถึงต้นทุนทางด้านราคาที่สูงในการนำไปย่อยสลาย จึงได้มีการพัฒนาวัสดุพลาสติกให้มีความสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เช่น พอลิแลกติกแอซิด (polylactic acid, PLA) ที่สามารถตอบสนองการใช้งานเพื่อทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำพอลิแลกติกแอซิดมาใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น ถุงพลาสติก แผ่นฟิล์ม ภาชนะใส่อาหาร เป็นต้น และด้วยราคาต้นทุนที่ไม่สูงมาก พอลิแลกติกแอซิดจึงถูกนำมาพัฒนาต่อยอดเป็นวัสดุขั้นสูง (advanced materials) เช่น เซนเซอร์ วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ในการปลูกถ่ายอวัยวะ และไหมละลาย เป็นต้น จากการที่พอลิแลกติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และผลิตได้จากวัตถุดิบที่สามารถ

สร้างทดแทนใหม่ได้ จึงคาดกันว่าการใช้วัสดุที่ทำจากพอลิแลกติกแอซิดจะสามารถช่วยลดปัญหาขยะและความเป็นพิษของพลาสติกต่อสิ่งแวดล้อมได้ [1, 2]

วัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีการนำพอลิแลกติกแอซิดมาประยุกต์ใช้ในการผลิตคือวัสดุคอมโพสิตไม่ว่าจะเป็นแผ่นยาง เส้นใยสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติหรือเส้นใยสำหรับสิ่งทอ เป็นต้น ล้วนผลิตขึ้นจากพอลิแลกติกแอซิด การทำคอมโพสิตจากพอลิแลกติกแอซิดนั้น อาจทำได้โดยการนำพอลิแลกติกแอซิดไปผสมกับวัสดุอื่นเพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้น และสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์นั้นๆ ได้ ในกลุ่มวิจัยได้มีการทำวัสดุคอมโพสิตมากมาย เช่น ทำแผ่นฟิล์มไดโอดีเล็กทริกจากแบเรียมสฟรอนเซียม-ไทเทเนตกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate, PBS) [3] ทำวัสดุตรวจจับไอสารเคมีจากการดัดแปลงโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl Alcohol, PVA) กับเขม่าดำ (carbon black) [4] เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่มีผู้ที่สนใจนำพอลิเมอร์มาทำคอมโพสิตกับผงแม่เหล็กมากนัก ทางกลุ่มวิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรท์มาทำคอมโพสิตกับพอลิแลกติกแอซิด และขึ้นรูปเป็นเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด ซึ่งแบเรียมเฟอร์ไรท์เป็นสารแม่เหล็กที่สามารถสังเคราะห์

ได้ง่าย มีค่าความเป็นแม่เหล็กถาวรที่มีสภาพแม่เหล็ก
หักล้าง (coercivity) สูง มีค่าความต้านทานไฟฟ้าและ
ค่าความต้านทานอุณหภูมิที่สูง อีกทั้งยังมีความสามารถ
ในการต้านทานสารเคมีและการกัดกร่อน และมีราคา
ไม่สูงมากนัก จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ
มากมาย [5-7] ดังนั้นเมื่อนำมาทำเป็นคอมโพสิตกับ
พอลิแลกติกแอซิดแล้ว จึงคาดว่าจะสามารถเพิ่มสมบัติ
ความเป็นแม่เหล็กให้กับพอลิแลกติกแอซิด เพิ่มมูลค่า
และทำให้เกิดนวัตกรรมใหม่ๆ ขึ้นได้ วัตถุประสงค์ของ
งานวิจัยนี้จึงเป็นการสังเคราะห์แบเรียมเฟอร์ไรต์ที่ใช้
เป็นตัวเติมในการเตรียมเส้นใยแม่เหล็กจากพอลิแลกติก-
แอซิด จากนั้นศึกษาลักษณะเฉพาะ สมบัติทางความร้อน
สมบัติทางกล และสมบัติแม่เหล็ก เพื่อพัฒนาและ
ประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต

2. การทดลอง

2.1 การเตรียมผงแบเรียมเฟอร์ไรต์

แบเรียมเฟอร์ไรต์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) พรีเคอร์เซอร์
สามารถเตรียมจากกระบวนการโซล-เจลของสารตั้งต้น
เหล็กไนเตรต (Iron (III) nitrate, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)
แบเรียมไนเตรต (Barium (II) nitrate, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$)
กรดซิตริก (Citric acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) และกลีเซอรอล
($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) ในสัดส่วน 1 : 11 : 1 : 1 ของ แบเรียมไนเตรต :
เหล็กไนเตรต : กลีเซอรอล กับน้ำปราศจากไอออน
(deionized water) สารตั้งต้นข้างต้นจะถูกผสม

รวมกันและกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารอย่างต่อเนื่อง
ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งกลายเป็นเจล
จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 200 องศาเซลเซียส เพื่อทำ
ให้เจลแห้ง และนำพรีเคอร์เซอร์เผาที่อุณหภูมิ 1000
องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้พรีเคอร์เซอร์
กลายเป็นผง และได้เฟสของแบเรียมเฟอร์ไรต์

2.2 การเตรียมเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด

เตรียมมาสเตอร์แบทช์โดยผสมแบเรียมเฟอร์ไรต์
ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักกับพอลิแลกติกแอซิดในเครื่อง
อัดรีดแบบสองเกลียวคู่ จากนั้นนำเข้าเครื่องตัดเพื่อตัดให้
มีขนาดเล็ก

พอลิแลกติกแอซิดจะถูกนำมาใช้เป็นเมทริกซ์
ในการผสมกับมาสเตอร์แบทช์ในสัดส่วนของปริมาณ
มาสเตอร์แบทช์ 0 5 10 และ 15 ส่วนในร้อยละ
พอลิแลกติกแอซิด (phr) เพื่อใช้ทำเส้นใยแม่เหล็ก
พอลิแลกติกแอซิดโดยการปั่นหลอม จากนั้นม้วนเก็บ
เส้นใย

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผงแบเรียม- เฟอร์ไรต์และเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทราน-
สฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (fourier transform
infrared spectrometer, FTIR) โดยใช้ความยาวคลื่น
4000 ถึง 360cm^{-1} สำหรับผงแบเรียมเฟอร์ไรต์ และ
4000 ถึง 500cm^{-1} สำหรับเส้นใยแม่เหล็ก

วิเคราะห์เฟสของวัสดุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray diffractometer, XRD) ใช้ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ และ 30 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ ใช้ความยาวคลื่นในการทดลองเป็น $\text{CuK}\alpha$ (ความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตร) และเก็บข้อมูลช่วง 2θ จาก 10 ถึง 90 องศา

วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผงและเส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ด้วยลำเล็ดทั้งสแตน 5 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับเลนส์ (working distance) 20 มิลลิเมตร

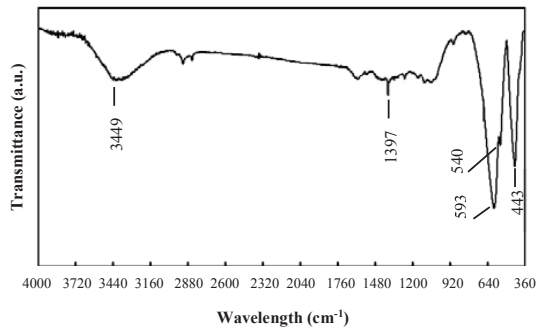
วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเส้นใยด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ที่อุณหภูมิ 0 ถึง 200 องศาเซลเซียส ในอัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

วิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กจากกราฟฮิสเตอรีซิส (hysteresis) จากเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั่น (vibrating sample magnetometer, VSM) โดยวิเคราะห์ในช่วงสนามแม่เหล็ก 10000 แอมแปร์ต่อเมตร (oersteds, Oe)

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลของเส้นใยแม่เหล็กโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (universal testing machine, UTM) ใช้โหลดเซลล์ขนาด 10 นิวตัน ระยะห่างระหว่างโหลดกับหัวดึง 25 มิลลิเมตร และใช้ความเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที

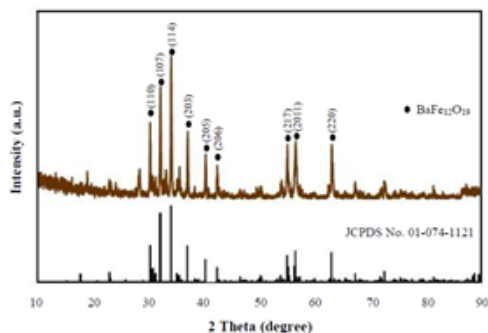
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผงแบเรียมเฟอร์ไรท์



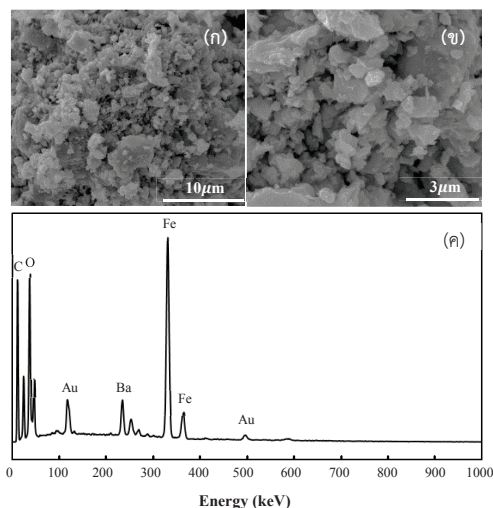
ภาพที่ 1 FTIR สเปกตรัมของผงแบเรียมเฟอร์ไรท์

เมื่อตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของผงแบเรียมเฟอร์ไรท์จะได้สเปกตรัมดังภาพที่ 1 โดยพบพีกการสั่นเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 443 และ 593 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของโลหะออกไซด์แบบ Fe-O bending และ Fe-O stretching ในแบเรียมเฟอร์ไรท์ ตามลำดับ [8, 9] ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 540 cm^{-1} สัมพันธ์กับรูปแบบการสั่นของ Ba-O ในโครงสร้างแบบออกตะฮีดรอล ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1397 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพีก C=O ซึ่งสัมพันธ์กับรูปแบบการสั่นของ CO_3^{2-} [8, 9] ซึ่งเป็นสิ่งเจือปนในแบเรียมเฟอร์ไรท์ที่มาจาก BaCO_3 และที่เลขคลื่น 3449 cm^{-1} สัมพันธ์กับรูปแบบการสั่นของ O-H stretching ซึ่งเป็นผลมาจากความชื้นของน้ำที่เจือปนอยู่ในผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ [8, 9]



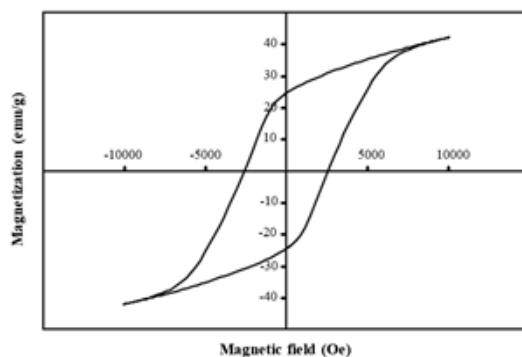
ภาพที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงแบเรียมเฟอร์ไรต์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบรูปแบบการเลี้ยวเบนดังภาพที่ 2 พิกของแบเรียมเฟอร์ไรต์สามารถพบได้ที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 30.35 32.21 34.15 37.13 40.33 42.45 55.09 56.59 และ 63.09 องศา ซึ่งสัมพันธ์กับระนาบการเลี้ยวเบนคือ 110 107 114 203 205 206 217 201 และ 220 ตามลำดับ [5, 7] ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งมาตรฐานของแบเรียมเฟอร์ไรต์ (JCPDS 01-074-1121)



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางจุลภาคของผงแบเรียมเฟอร์ไรต์ (ก) กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) กำลังขยาย 15000 เท่า และ (ค) สเปกตรัมเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงานของผงแบเรียมเฟอร์ไรต์

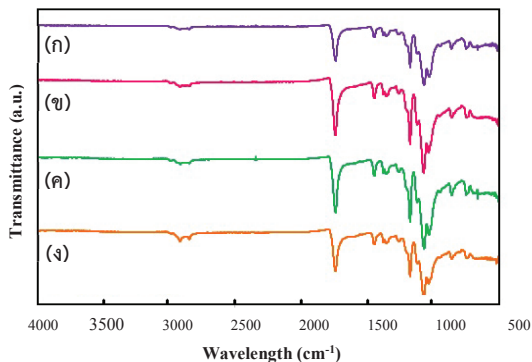
ในการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าอนุภาคผงแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรต์มีขนาดประมาณ 0.6 ไมโครเมตร และมีลักษณะเป็นก้อนเกาะกลุ่มกัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS) พบว่ามีเหล็ก (Fe) และแบเรียม (Ba) กระจายตัวอยู่ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าในสารประกอบมีเหล็กและแบเรียมอยู่จริง ส่วนพิกของทอง (Au) และคาร์บอน (C) ที่ปรากฏขึ้นเป็นผลมาจากการเตรียมชิ้นงานโดยเทคนิคสปัตเตอริง (sputtering)



ภาพที่ 4 ลูปฮิสเทอรีซิสของสารแม่เหล็กแบเรียมเฟอร์ไรต์

ผลจากการวิเคราะห์สมบัติความเป็นแม่เหล็กของผงแบเรียมเฟอร์ไรต์แสดงได้โดยลูปฮิสเทอรีซิสดังภาพที่ 4 พบว่ามีสนามแม่เหล็กหักล้าง (coercivity, H_c) เท่ากับ 2500 Oe ค่าโมเมนต์แม่เหล็กอิ่มตัว (saturation magnetization, M_s) เท่ากับ 42.12 emu/g และค่าโมเมนต์แม่เหล็กหักล้าง (remanent magnetization, M_r) เท่ากับ 25.0 emu/g ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของวัสดุแม่เหล็กถาวร

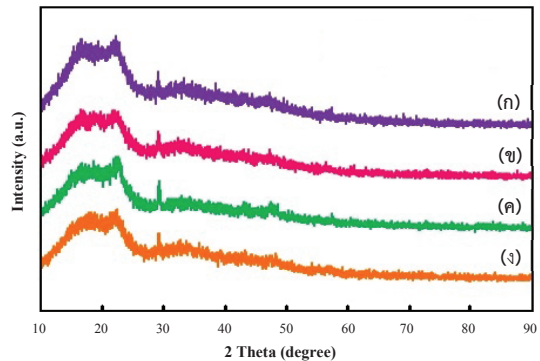
3.2 เส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด



ภาพที่ 5 สเปกตร้าของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด ที่มีสัดส่วนมาสเตอร์แบทช์ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 10phr และ (ง) 15 phr

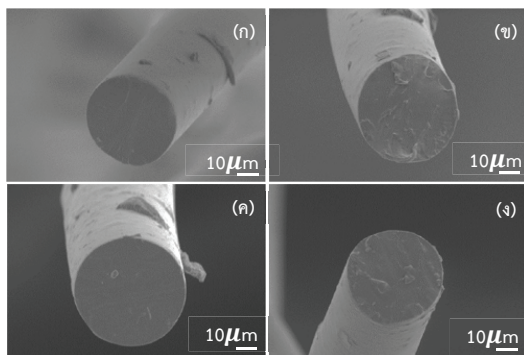
เมื่อนำเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิดไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์พบว่า เส้นใยทั้งหมดที่มีสัดส่วน 0 5 10 และ 15phr มีสเปกตร้าที่คล้ายกัน ได้แก่ ช่วงเลขคลื่น $2850-2990\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของ C-H stretching [8, 9] ช่วงเลขคลื่น $1742-1744\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching [10, 11] C-H bending และ C-O stretching แสดงในช่วงเลขคลื่น

$1380-1450\text{ cm}^{-1}$ และ $1035-1178\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ [10, 11] ซึ่งแสดงและยืนยันได้ว่าพิกทั้งหมดของเส้นใยมีพอลิแลกติกแอซิดเป็นเมทริกซ์



ภาพที่ 6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิดที่มีสัดส่วนมาสเตอร์แบทช์ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 10 phr และ (ง) 15 phr

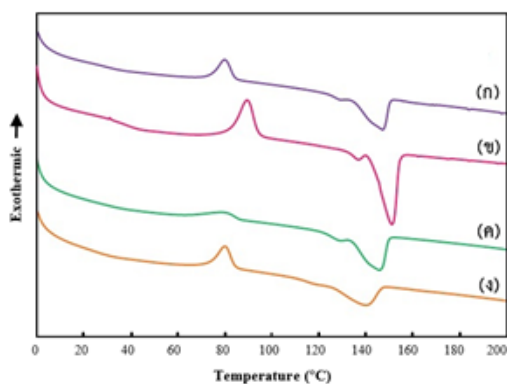
จากภาพที่ 6 พิกของเส้นใยแสดงให้เห็นว่ามีพอลิแลกติกแอซิดอยู่ สังเกตได้จากช่วงมุม 2θ ที่ $29-31$ องศา [11, 12] มากไปกว่านั้นจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะไม่ปรากฏพิกของแบเรียมเฟอร์ไรท์ เนื่องจากมีปริมาณของผงแบเรียมเฟอร์ไรท์ในเส้นใยน้อย



ภาพที่ 7 โครงสร้างทางจุลภาคของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิดที่มีสัดส่วนมาสเตอร์แบทช์ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 10 phr และ (ง) 15 phr

ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของเส้นใยแม่เหล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่ามาสเตอร์แบทช์แบเรียมเพอร์ไรท์ที่สัดส่วน 0 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิแลกติกแอซิดมีพื้นที่ผิวเรียบและมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 45 ไมโครเมตร แสดงได้ดังภาพที่ 7 (ก) เมื่อเพิ่มปริมาณมาสเตอร์แบทช์แบเรียมเพอร์ไรท์ไปที่สัดส่วน 5 10 และ 15 phr พบว่าพื้นที่

ผิวมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแบเรียมเพอร์ไรท์ที่เป็นสารเสริมแรงผสมเข้าไปไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และเส้นใยมีขนาด 51 56 และ 46 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 7 (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ นอกจากนี้พื้นที่ผิวของเส้นใยนั้นมีความขรุขระซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยค่อนข้างยืดหยุ่นและเหนียวเมื่อดึงหรือตัดเส้นใย



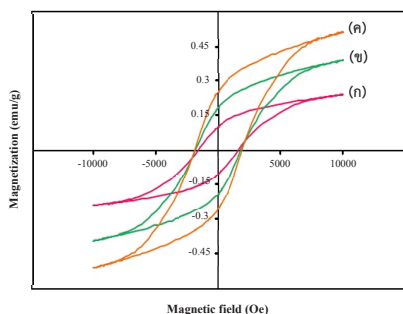
ภาพที่ 8 สเปกตรากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิดที่มีสัดส่วนมาสเตอร์แบทช์ (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 10 phr และ (ง) 15 phr

ตารางที่ 1 สมบัติทางความร้อน และสมบัติแม่เหล็กของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด

สัดส่วนมาสเตอร์แบทช์ในเส้นใย แม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด (phr)	สมบัติทางความร้อน			สมบัติแม่เหล็ก		
	T_g (°C)	T_c (°C)	T_m (°C)	M_r (emu/g)	M_s (emu/g)	H_c (Oe)
0	37.46	79.83	146.83	-	-	-
5	39.00	89.33	150.00	0.10	0.24	1790
10	36.45	79.33	145.50	0.19	0.39	1794
15	32.83	80.0	139.83	0.28	0.52	1795

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิดจากเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ (crystallization temperature, T_c) และค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8 และตารางที่ 1 โดยพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณมาสเตอร์แบทช์ให้กับเส้นใยพอลิแลกติกแอซิด ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ และอุณหภูมิการหลอมเหลว

มีค่าค่อนข้างแตกต่างกัน กล่าวคือ ที่สัดส่วน 5 phr จะพบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์และอุณหภูมิการหลอมเหลวจะมีค่าสูงมากกว่าสัดส่วนอื่นๆ ในขณะที่สัดส่วน 10 phr และ 15 phr จะมีค่าอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ใกล้เคียงกัน แต่ที่ 15 phr จะมีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวน้อยที่สุด และเมื่อคำนวณหาครีโอลิตี (crystallinity) ของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด พบว่าที่สัดส่วน 0 5 10 และ 15 phr มีค่าความเป็นผลึกร้อยละ 24.58 16.02 32.54 และ 7.84 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นผลึกค่อนข้างแตกต่างกันมาก อาจเป็นผลมาจากการที่มาสเตอร์แบทช์ผสมเข้ากับพอลิแลกติกแอซิดไม่สม่ำเสมอในขณะที่ทำการขึ้นรูปเป็นเส้นใย



ภาพที่ 9 รูปฮิสเทอริซิสของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด ที่มีสัดส่วนมาสเตอร์แบทช์ (ก) 5 phr (ข) 10 phr และ (ค) 15 phr

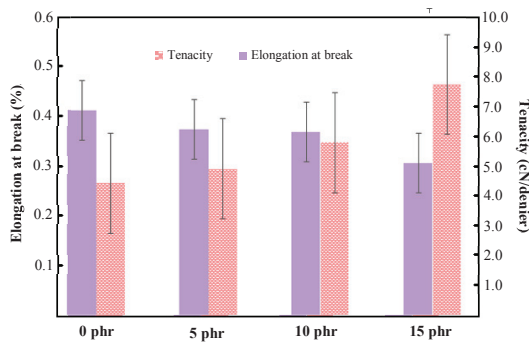
เมื่อวิเคราะห์สมบัติความเป็นแม่เหล็กของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด ค่ารูปฮิสเทอริซิสสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9 และตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด มีค่าสนามแม่เหล็กหักล้าง (coercivity, H_c) ใกล้เคียงกัน แต่เส้นใยแม่เหล็กที่มีสัดส่วน 15 phr จะมีค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัว (saturation magnetization, M_s) และมีค่าโมเมนต์แม่เหล็กหักล้าง (remanent magnetization, M_r) มากที่สุด

ตารางที่ 2 การทนต่อแรงดึง และร้อยละการดึงยืดของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด

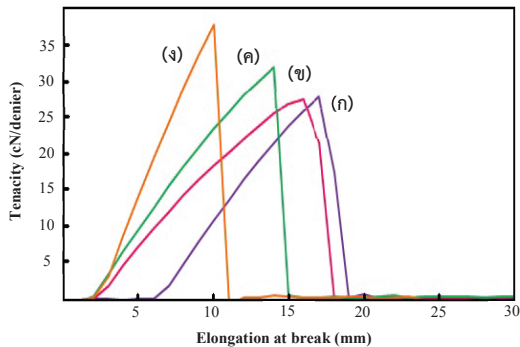
สัดส่วนมาสเตอร์แบทช์ในเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด (phr)	การทนต่อแรงดึง (N/denier)	ร้อยละการดึงยืด (%)
0	0.27	6.89
5	0.30	6.26
10	0.35	6.17
15	0.47	5.13

จากตารางที่ 2 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณมาสเตอร์แบทช์ ลงในเส้นใยแม่เหล็กพอลิแลกติกแอซิด จะทำให้ค่าการทนต่อแรงดึง (tenacity) มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ในทางกลับกันจะส่งผลทำให้ค่าร้อยละการดึงยืด (elongation) ลดลง ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 10 และเมื่อนำมาวิเคราะห์

และแสดงผลในรูปความสัมพันธ์ของการทนต่อแรงดึงกับการดึงยืด (tenacity - elongation at break) ดังภาพที่ 11 พบว่าการเพิ่มปริมาณมาสเตอร์แบทช์ จะส่งผลทำให้เส้นใยมีความเปราะมากขึ้น



ภาพที่ 10 การต้านทานต่อแรงดึงและร้อยละการดึงยืดของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแล็กติกแอซิด



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ของการทนต่อแรงดึงกับการดึงยืดของเส้นใยแม่เหล็กพอลิแล็กติกแอซิด (ก) 0 phr (ข) 5 phr (ค) 10 phr และ (ง) 15 phr

ดังนั้นจากภาพที่ 10 และ ภาพที่ 11 ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การผสมมวลสารแบทช์ในสัดส่วน 5 phr จะทำให้เส้นใยมีความทนต่อแรงดึง และมีความยืดหยุ่นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนอื่นๆ

4. สรุปผลการทดลอง

ผงแบเรียมเฟอร์ไรท์สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยแม่เหล็กได้จากกระบวนการปั่นหลอม โดยการใช้พอลิแล็กติกแอซิดเป็นเมทริกซ์ ในอัตราส่วนปริมาณมวลสารแบทช์ต่อพอลิแล็กติกแอซิด 5 10 และ 15 phr โดยพบว่าเส้นใยแต่ละสัดส่วนมีสมบัติทางความร้อนแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ค่าแม่เหล็กอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณมวลสารแบทช์ที่เติมลงไป นอกจากนี้เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเส้นใยแม่เหล็กจะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงแปรผกผันกับค่าอัตราการดึงยืด กล่าวคือหากเพิ่มปริมาณสัดส่วนมวลสารแบทช์จะทำให้เส้นใยมีความเปราะมากขึ้น ดังนั้นพบว่าสัดส่วนที่เหมาะสม คือ สัดส่วน 5 phr เนื่องจากมีค่าอัตราการดึงยืดใกล้เคียงกับเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ได้เติมมวลสารแบทช์แบเรียมเฟอร์ไรท์ (0 phr) แต่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า จึงคาดว่าสัดส่วนดังกล่าวสามารถนำไปใช้ทดแทนเป็นผ้าได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคต เช่น ผ้าใช้กรองฝุ่นละออง แม่เหล็กในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย

- [8] Anju, Agarwal A, Aghamkar P, and Lal B (2017). Structural and multiferroic properties of barium substituted bismuth ferrite nanocrystallites by sol-gel Method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 426: 800-805.
- [9] Zhang W, Tang H, Peng B, and Zhang W (2010). Influence of citric acid on the morphology and magnetic properties of barium ferrite thin films. *Applied Surface Science*, 257: 176-179.
- [10] Lopes M, Jardim A, and Filho R (2014). synthesis and characterizations of poly (lactic acid) by ring-opening polymerization for biomedical applications. *Chemical engineering transactions*, 38: 331-336.
- [11] Wang H, Zhang Y, Tian M, Zhai L, Wei Z, and Shi T (2008). preparation and degradability of poly (lactic acid)-poly (ethylene glycol)-poly (lactic acid)/SiO₂ hybrid material. *Journal of Applied Polymer Science*, 110: 3985
- [12] Lu Y, Chen Y, and Zhang P (2016). preparation and characterisation of polylactic acid (PLA)/polycaprolactone (PCL) composite microfibre membranes. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 24: 17-25.