

การเตรียมวัสดุคอมโพสิตจากพอลิแลกติกแอซิดผสมดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับสภาพผิวด้วยเอทิลีนไกลคอล

Preparation of biocomposite from PLA with EG treated Montmorillonite

กนกพร อนันต์ชื่นสุข*

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต 12000

*ติดต่อ E-mail: kanokporn_anan@hotmail.com เบอร์โทรศัพท์: 0894451958

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียม จากพอลิแลกติกแอซิด (Polylactic Acid : PLA) ผสมดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite : MMT) ขนาด $\leq 45 \mu\text{m}$ ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยเอทิลีนไกลคอล (Ethyleneglycol : EG) ในอัตราส่วน 0 1 2 3 และ 4 %wt. ด้วยการผสมในเครื่องผสมแบบปิด ที่อัตราเร็วของสกรูเท่ากับ 20 rpm อุณหภูมิ 180 °C ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าแบบ ที่อุณหภูมิ 180 °C ความดัน 1 bar จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ โครงสร้าง มวลโมเลกุลและสมบัติทางกล พบว่า วัสดุคอมโพสิต PLA/MMT ปรับผิวที่ 1 %wt เป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติที่ดีที่สุด เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์ PLA สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของชั้นซิลิเกตที่แตกออกได้สมบูรณ์ เกิดแรงยึดเหนี่ยวกับ PLA ได้อย่างแข็งแรง ทำให้มีสมบัติทางกลที่ดี มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 53.72 MPa มวลโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ 100,186 g/mol

คำสำคัญ: พอลิแลกติกแอซิด, วัสดุคอมโพสิต, มอนต์มอริลโลไนต์, ความต้านทานแรงดึง, มวลโมเลกุล

Abstract

This research studied the properties of biocomposite prepared from polylactic acid (PLA) with Ethyleneglycol (EG) treated montmorillonite which particle size equals to 45 μm or smaller in the ratio 0, 1, 2, 3 and 4 %wt. PLA and montmorillonite were blended in an internal mixer with the screw speed of 20 rpm and temperature of 180 °C. Compression molding was used here to produce the large number of samples at 180 °C and the pressure of 1 bar. The various properties of specimens were investigated such as structure, molecular mass and mechanical properties. The results showed that PLA with EG treated MMT 1 %wt is the best composite material, because the PLA polymer chain dispersed in the completely fractured clay (silicate) platelets. These revealed the good bonding of PLA and intercalated silicate in MMT which resulted in good mechanical properties with a tensile strength and an average molecular mass of 53.72 MPa and 100,186 g/mol respectively.

Keywords: polylactic acid, composite material, montmorillonite, tensile strength, molecular mass

บทนำ

ปัจจุบันงานทางวิทยาศาสตร์และภาคอุตสาหกรรมได้ให้ความสนใจพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด หรือ Polylactic acid (PLA) มากขึ้น เป็นผลจากการใช้งาน PLA ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีสมบัติทางกายภาพที่ดี การขึ้นรูปโดยใช้เครื่องจักรที่มีการใช้งานอยู่ เช่น การอัดรีด การฉีดขึ้นรูป การทำให้เป็นฟิล์มหรือเส้นใย มีความสะดวก กระบวนการผลิต PLA ใช้ทรัพยากรที่หมุนเวียนได้จำพวกวัสดุชีวมวลซึ่งย่อยสลายทางชีวภาพได้ ทำให้ PLA เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถควบคุมสมบัติต่างๆของ PLA ได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีซึ่งเป็นผลจากขั้นตอนการเกิดพอลิเมอร์เชิงเส้นของ L โอลิเมอร์ และ D โอลิเมอร์ หรืออาจเกิดจากการผสม PLA กับพอลิเมอร์ชนิดอื่น หรืออาจเกิดจากการเติม PLA ด้วยสารอินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรหรือระดับไมโครเมตร [1] PLA ที่สังเคราะห์ได้ถูกนำมาใช้เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพและถูกนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ใช้เย็บแผลผ่าตัด เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ฟอกไต เยื่อกระดูก การปลดปล่อยยา เพราะมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและไม่เป็นพิษ [2] การประยุกต์ใช้งานทางเกษตรกรรมและสิ่งแวดล้อม ใช้ในการปรับดิน งานที่เกี่ยวกับสารกำจัดวัชพืชและอื่นๆ [3] การใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น ภาชนะบรรจุอาหาร ภาชนะที่ใช้แล้วทิ้ง เป็นต้น [4] ในการศึกษาวิจัยมีการเตรียมวัสดุคอมโพสิตจาก PLA ผสมดินที่ปรับสภาพผิวด้วยสารอินทรีย์ การเตรียมวัสดุคอมโพสิตระดับนาโนเมตรด้วยการผสมดินได้มีการศึกษากับพอลิเมอร์ชนิดอื่นด้วย เช่น พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน พอลิยูเรเทน และอื่นๆ [1] พบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีได้ แม้ว่าจะเติมดินปริมาณเล็กน้อยประมาณ 1-5 % โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคอมโพสิตระดับไมโครเมตร การปรับปรุงสมบัติของของวัสดุคอมโพสิตประกอบด้วย สมบัติทางกล สมบัติของการกักเก็บความชื้นของอากาศและความเสถียรทางความร้อนนั้นเป็นผลของการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคของดินที่มีพื้นที่ผิวสูงและพอลิเมอร์ร่วมกับระบบการขึ้นรูปที่ทำให้ PLA และดินเกิดการผสมกันได้ดีโดยชั้นดินที่ถูกบดผสมจะแยกตัวออกจากกันทำให้พอลิเมอร์แทรกตัวไปตามชั้นดินอย่างสม่ำเสมอ [1] ต่อมาได้มีการค้นพบว่าสารประกอบกลุ่มซิลิเกต ที่ทำหน้าที่เป็นฟิลเลอร์เติมลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจาก PLA เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ เนื่องจากสามารถจับตัวกับพอลิเมอร์ได้ดีแม้ว่าจะเติมฟิลเลอร์ในปริมาณต่ำ สารกลุ่มซิลิเกตที่ได้รับความสนใจคือ มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ที่ปรับสภาพผิวเพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์และเพิ่มการกระจายตัวของชั้นซิลิเกต [5] นอกจากนี้ชั้นของซิลิเกตสัดส่วนสูงจะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสูงซึ่งจะไปทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่ลดน้อยลงเป็นการเพิ่มผลของการเสริมแรง ทำให้ความแข็งแรงถูกถ่ายไปที่เฟสดังกล่าวซึ่งเท่ากับเป็นการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ในวัสดุคอมโพสิตด้วย [6]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระดับไมโครเมตรจากพลาสติก PLA ผสมดินมอนต์มอริลโลไนต์ ขนาดอนุภาค ≤ 45 ไมโครเมตร ที่ถูกปรับผิวด้วยเอทิลีนไกลคอล (EG) และศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้ ได้แก่ โครงสร้าง มวลโมเลกุลและสมบัติทางกล

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

สารตั้งต้น

1. เป็นพลาสติกสีขาวขุ่น เกรด PLA 2003D จากบริษัท บี ซี พอลิเมอร์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด

2. ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) บริษัท เซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียด สีน้ำตาลอ่อน

3. เอทิลีนไกลคอล : EG ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ จากบริษัท Ajax Finechem Ltd. สถานะของเหลว ชั้นใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีสูตรโมเลกุล $C_2H_6O_2$ จุดเดือด $196\text{ }^{\circ}\text{C}$

อุปกรณ์

ตารางที่ 1 อุปกรณ์การวิจัย

อุปกรณ์	หน้าที่
1. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	- ใช้ผสมพลาสติกและดิน MMT ก่อนการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดพลาสติก
2. เครื่องอัดพลาสติก (Compression molding) ยี่ห้อ Hydraulic press รุ่น MGLP 20 AT	- ใช้ขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต
3. เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ COMTECH รุ่น QC- 506BA	- ใช้ทดสอบความต้านทานแรงดึง
4. เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) ยี่ห้อ PHILIP รุ่น X ' Pert Pro	- ใช้วิเคราะห์โครงสร้างของธาตุต่างๆในสารตัวอย่างเพื่อศึกษา เกี่ยวกับโครงสร้างหรือเฟสที่เป็นผลึก
5. เครื่องตรวจสอบค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC) ยี่ห้อ Waters รุ่น 2414 refractive index detector	- ใช้หาค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ย และค่าการกระจายตัวของมวลโมเลกุล

วิธีการทดลอง

การเตรียมวัสดุดิบ

นำเม็ดพลาสติก PLA อบแห้งที่อุณหภูมิ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ นาน 24 h นำดินหรือ MMT มาบด คัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนใช้ MMT ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 mesh แต่ค้างบนถาดซึ่งเป็น MMT ที่มีขนาด $\leq 45\text{ }\mu\text{m}$ นำไปอบต่อที่อุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 h แล้วจึงทำการเตรียม MMT ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย EG โดยนำมาแช่ในสารละลาย EG ที่ความเข้มข้น 3 %wt นาน 24 h ล้างด้วยน้ำกลั่น ทำให้แห้งโดยการปล่อยให้แห้งในอากาศ นาน 3 day จากนั้นจึงทำการอบที่อุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ นาน 24 h

การเตรียมวัสดุคอมโพสิต

นำเม็ดพลาสติก PLA ที่อบแล้วไปผสม MMT ที่ผ่านการปรับผิวด้วย EG ขนาด $\leq 45\text{ }\mu\text{m}$ ที่อัตราส่วนของ MMT ปรับผิว ปริมาณ 0 1 2 3 และ 4 %wt โดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิดที่อัตราเร็วของสกรู

เท่ากับ 20 rpm อุณหภูมิ 180 °C ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องอัดเข้าแบบ ยี่ห้อ XIHUA รุ่น XH-406 ที่อุณหภูมิ 180 °C ความดัน 1 bar นำไปเข้าระบบหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิและปล่อยให้คงรูปเป็นเวลา 10 min

การวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

ใช้เครื่อง XRD เพื่อหาระยะห่างของชั้นดิน MMT มีแหล่งกำเนิดคลื่นคือ CuK α ความยาวคลื่นเท่ากับ 0.154 nm แรงดัน 40 kV กระแส 40 mA ทำการสแกนที่ 2 θ เท่ากับ 0-30 ° อัตราการสแกนเท่ากับ 2 °/min เขียนสเปกตรัมโดยการพล็อตค่า Intensity เป็นแกน Y และมุม 2 θ เป็นแกน X แล้วทำการวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้โดยการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

การคำนวณหาระยะห่างชั้นดินโดยใช้ Bragg's law แสดงดังสมการที่ (1)

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

หรือ
$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad \dots\dots(1)$$

เมื่อ $d =$ ระยะห่างระหว่างชั้นของดิน (Interlayer distance)

$\lambda =$ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ = 0.154 nm

$\theta =$ มุมของการหักเห

การหามวลโมเลกุลโดยใช้เทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC)

ใช้เครื่อง GPC เพื่อหาการกระจายมวลโมเลกุลและมวลโมเลกุลเฉลี่ยของ PLA ในวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้ โดยใช้พอลิสไตรีนเป็นสารมาตรฐานและใช้เตตระไฮโดรฟورانเป็นตัวทำละลาย ปรับอัตราการไหลเท่ากับ 1.0 mL/min. และอุณหภูมิของเตาเท่ากับ 35 °C

การทดสอบแรงดึง

ตามมาตรฐาน ASTM D638 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ยี่ห้อ COMETECH รุ่น QC – 506BA ตัวอย่างขึ้นงานขนาดความกว้าง 19 mm ความยาว 115 mm ความหนา 4 mm อัตราการดึง 50 mm/min ด้วย Load cell 10 kN ระยะจับขึ้นงาน 30 mm บันทึกผลการทดลอง ได้แก่ ระยะยืด แรงที่ใช้ และนำไปคำนวณค่าความเค้นและความเครียดแล้วนำไปเขียนกราฟเพื่ออ่านค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด เพอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด การคำนวณแสดงดังสมการที่ (2) และ (3)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \dots\dots(2)$$

เมื่อ $F =$ แรงที่ใช้ในการดึง (N)

$A_0 =$ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของขึ้นงาน

σ = ความเค้นเนื่องจากแรงดึงขึ้นงานตัวอย่าง

$$\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad \dots\dots(3)$$

เมื่อ L = ความยาวของชิ้นงาน ณ จุดแตกหัก (m)

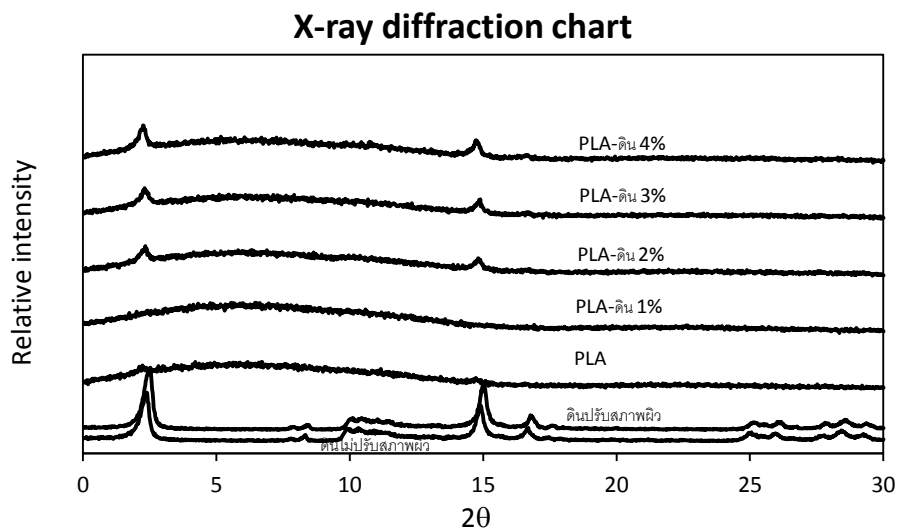
L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (m)

ϵ = การยืดตัวของชิ้นงาน ณ จุดขาด (%)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เทคนิค XRD

การใช้เครื่อง XRD ในการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตและศึกษากลไกของการแตกตัว การกระจายตัวและการแทรกตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวในลักษณะของโครงสร้างแบบ Intercalation หรือ Exfoliation [4] ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยเส้นสเปกตรัมของ MMT MMTปรับผิว PLA และ วัสดุคอมโพสิต PLA/MMTปรับผิว ที่เตรียมด้วยวิธีการหลอมละลายและอัดเข้าแบบ



รูปที่ 1 สเปกตรัม XRD ของMMT MMTปรับผิว PLA และวัสดุคอมโพสิต PLA/MMTปรับผิว

รูปที่ 1 แสดงพีคที่ตำแหน่งจำเพาะของ MMT และ MMTปรับผิว ที่ตำแหน่ง $2\theta = 2.39^\circ$ (ค่าระยะห่าง d-spacing = 3.69 nm) และที่ตำแหน่ง $2\theta = 15.01^\circ$ (ค่าระยะห่าง d-spacing = 0.59 nm) ขณะที่ PLA และ วัสดุคอมโพสิต PLA/MMT ปรับผิว 1%wt ไม่แสดงพีคที่ตำแหน่งจำเพาะเหล่านี้ ผลที่ต่างนี้แสดงให้เห็นว่า กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการหลอมละลายรวมทั้งการบดผสม PLA/MMTปรับผิว ทำให้ชั้นซิลิเกตใน MMT แยกออกจากกันและทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ PLA แทรกเข้าไปในช่องว่างได้อย่างสมบูรณ์ [4] ส่วน PLA ไม่ปรากฏพีค

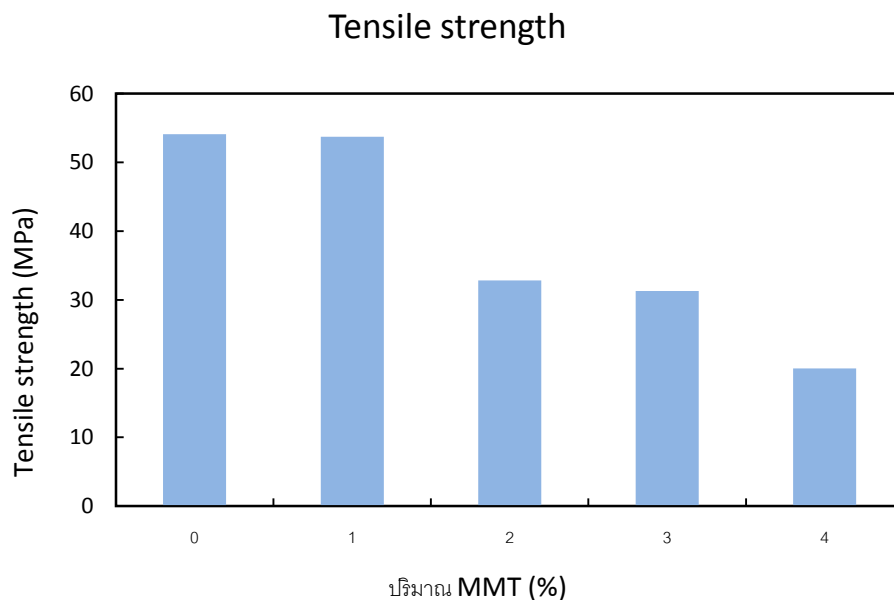
ที่แสดงความเป็นผลึก แต่วัสดุคอมโพสิต PLA/MMTปรับผิว 2 3 และ 4%wt จะปรากฏพีคที่ตำแหน่งจำเพาะ $2\theta = 2.33^\circ$ (d-spacing = 3.79 nm), 2.31° (d-spacing = 3.82 nm) และ 2.25° (d-spacing = 3.92 nm) ตามลำดับ เมื่อปริมาณ MMTปรับผิวเพิ่มขึ้น พีคที่ตำแหน่งนี้จะเลื่อนไปในตำแหน่งมุมที่ต่ำลง แสดงว่าระยะห่างระหว่างชั้นของผลึกหรือซิลิเกตมีค่าเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการที่ชั้นซิลิเกตแตกตัวออกจากกันทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เข้าไปในช่องว่างได้บ้าง [2,4]

การหามวลโมเลกุลโดยใช้เทคนิค GPC

ค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยของวัสดุคอมโพสิต PLA/MMTปรับผิว 0 1 2 3 และ 4 %wt. มีค่าเท่ากับ 109,693 100,186 90,935 82,335 และ 77,563 g/mol ซึ่งมีค่าลดลง เมื่อเติม MMTปรับผิวปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติม MMT ที่ปรับผิวด้วย EG เป็นพลาสติกไซเซอร์ จะไปเพิ่มความเปื่อย ความสามารถลื่นไถล ทำให้เกิดการกระจายตัวของฟิลเลอร์ หรือ MMTปรับผิวและเกิดช่องว่างในพอลิเมอร์ ขณะที่อนุภาคของฟิลเลอร์หรือ MMTปรับผิวจะทำตัวเป็นนิวเคลียสขนาดเล็กที่คงตัวเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดวัสดุคอมโพสิตที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงจำนวนมากกระจายตัวออกไป [7, 8]

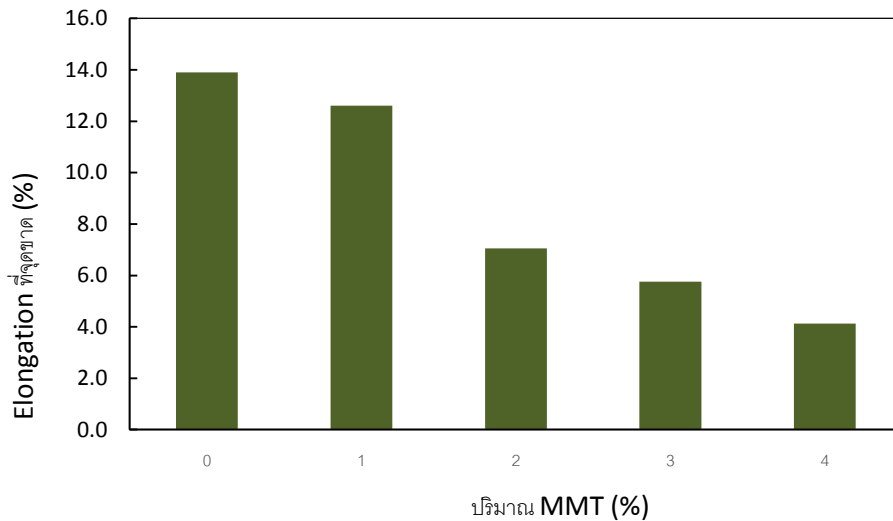
สมบัติทางกล

จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD จะเห็นได้ว่าวัสดุคอมโพสิต PLA/MMTปรับผิว 1 %wt มีการกระจายของ MMTปรับผิวดีที่สุด ซึ่งปริมาณของ MMTปรับผิวมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้โดยผลการศึกษาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดที่จุดขาด แสดงดังรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

Elongation



รูปที่ 3 เปรอเซ็นต์การยืดที่จุดขาด

พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลงและมีค่าต่ำกว่าของ PLA เมื่อเติม MMT ที่ปรับผิวด้วย EG ปริมาณเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 54.11 53.72 32.83 31.28 และ 20.04 MPa เมื่อเติม MMTปรับผิว 0 1 2 3 และ 4 %wt เนื่องจากอนุภาค MMTที่เข้าไปแทรกใน PLA จะเป็นตัวรวมความเค้นและกระจายความเค้นออกไป ซึ่งต่อมาจะส่งผลให้การจับตัวของอนุภาค MMT และ PLA ถูกแยกออกจากกัน ทั้งนี้เป็นผลร่วมกันจากการบดผสม MMT กับ PLA จนหลอมละลายและเกิดแรงเฉือนทำให้อนุภาค MMT กระจายตัวออกไป อนุภาค MMT ที่ถูกปรับผิวด้วย EG จะมีการกระจายตัวที่ดี ทำให้เกิดช่องว่างเล็กๆจำนวนมาก ช่องว่างเหล่านี้จะเชื่อมต่อกันเกิดเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ ส่งผลให้การจับตัวกันของอนุภาค MMT และ PLA ไม่ดี ค่าความเค้นหรือค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดจึงมีค่าลดลง [2] และทำให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ลดลงด้วย อย่างไรก็ตามวัสดุคอมโพสิต PLA/MMTปรับผิวที่ 1 %wt มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดใกล้เคียงกับของ PLA แสดงถึงการกระจายตัวของอนุภาค MMT ในเมทริกซ์ของ PLA อย่างดีและสม่ำเสมอส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวของพื้นผิวที่ดี [4]

สรุปผลการทดลอง

วัสดุคอมโพสิตที่เตรียมจาก PLA ผสม MMT ที่ผ่านการปรับผิวด้วยเอทิลีนไกลคอลและมีขนาด ≤ 45 μm ในอัตราส่วน 0 1 2 3 และ 4 % wt. ขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression molding ที่อุณหภูมิ 180 °C ความดัน 1 bar ให้วัสดุคอมโพสิต PLA/MMTปรับผิวที่ 1 %wt เป็นวัสดุคอมโพสิตที่ดีที่สุด จากการที่อนุภาคของ MMTปรับผิวมีการกระจายตัวในเมทริกซ์ของ PLA อย่างดีและสม่ำเสมอ การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธี XRD ไม่พบพีคของ MMTปรับผิวในโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้ แสดงถึงชั้นซิลิเกตใน MMTที่ถูกบดและแยกออกจากกันในกระบวนการขึ้นรูปที่มีการหลอมละลายและการบดผสม PLA/MMTปรับผิว ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ PLA แทรกเข้าไปในช่องว่างได้อย่างสมบูรณ์ เกิดแรงยึดเหนี่ยวกับ PLA ได้อย่างแข็งแรง ทำให้มีสมบัติทางกลที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 53.72 MPa และมวลโมเลกุลเท่ากับ 100,186 g/mol

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pluta, M., Galeski, A., Alexandre, M., Paul, M.-A., Dubois, P. (2002). Polylactide/Montmorillonite nanocomposites and microcomposites prepared by melt blending: structure and some physical properties. *Journal of applied polymer science*, 86, 1497-1506.
- [2] Lai, S.-M., Wu, S.-H., Lin, G.-G., Don, T.-M. (2014). Unusual mechanical properties of melt-blended poly(lactic acid) (PLA)/clay nanocomposites. *European polymer journal*, 52, 193-206.
- [3] Soo, H.K. and Young, H.K. (2001) Synthesis and Characterization of Biodegradable Polymers. *Cellucon '99 Proceedings*, J.F. Kennedy, Ed., Woodhead Publishing, Cambridge, 217-226.
- [4] Leu, Y. Y., et al. (2011). Kinetics of water absorption and thermal properties of poly(lactic) /organomontmorillonite/poly(ethyleneglycol) nanocomposites. *Journal of vinyl & additive technology*, 17, 40-47.
- [5] Nakagaito, A.N. Fujimura, A., Sakai, T. Hama, Y. and Yano, H. (2009). Production of microfibrillated cellulose (MFC)-reinforced polylactic acid (PLA) nanocomposites from sheets obtained by a papermaking-like process. *Composites science technology*, 69, 1293-1297.
- [6] Thellen, C., Orroth, C., Froio, D., Ziegler, D., Lucciarini, J., Farrell, R., Ann D'souza, N. and Ratto, J.A. (2005). Polymer layered silicate nanocomposites: a review. *Polymer*, 46, 11716-11727.
- [7] Nam, J. M., Sinha, R. S., Okamoto, M. (2003). Polylactic acid green nanocomposites for automotive applications. *Macromolecule*, 36, 7126-7131.
- [8] Fukushima, K., Tabuani, D., Camino, G. (2012). Poly(lactic acid)/clay nanocomposites: effect of nature and content of clay on morphology, thermal and thermo-mechanical properties. *Material science engineering*, 32, 1790-1795.