

## สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม พอลิแลคติกแอซิดและพอลิไคโตน

ธิดาวรรณ สิทธิมาตร<sup>1\*</sup> และอำนวย ลาภเกษมสุข<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

\*thidawan\_s@mail.rmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยการผสมกับพอลิไคโตน (PK) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก โดยไม่ใช้สารช่วยประสาน เพื่อวิเคราะห์สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/PK ตัวอย่างถูกเตรียมโดยกระบวนการอัดรีดแบบสกรูคู่และขึ้นรูปด้วยการฉีดขึ้นรูป ผลการทดสอบพบว่า การเติม PK ส่งผลให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าสูงสุดที่ 25.14 J/m ที่อัตราส่วน 60/40 wt% ขณะที่ค่าความทนแรงดึง ยังสม่ำเสมอ และการยืดตัว ณ จุดขาด ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ PK การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เกิดการแยกเฟสและการกระจายตัวของ PK ที่ไม่สม่ำเสมอในเมทริกซ์ PLA ซึ่งสัมพันธ์กับการลดลงของสมบัติเชิงกล ในด้านสมบัติทางความร้อน การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น ( $T_c$ ) และอุณหภูมิอ่อนตัวแบบไวแคต (VST) เพิ่มขึ้นตามปริมาณ PK โดยมีค่า VST สูงสุดที่ 61.70 °C ที่อัตราส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า แม้ PLA และ PK จะมีความเข้ากันได้จำกัด แต่การเติม PK สามารถปรับปรุงสมบัติ PLA ได้ โดยเฉพาะในด้านความสามารถในการทนแรงกระแทกและความทนทานต่อความร้อน

**คำสำคัญ:** พอลิแลคติกแอซิด พอลิไคโตน พอลิเมอร์ผสม สมบัติเชิงกลและความร้อน

## Mechanical and Thermal Properties of Polylactic Acid/Polyketone Polymer Blends

Thidawan Sittimad<sup>1\*</sup> and Amnouy Larpkasemsuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi

\*thidawan\_s@mail.rmutt.ac.th

### Abstract

This study investigates the mechanical and thermal properties of polylactic acid (PLA) blended with polyketone (PK) at various weight ratios (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, and 60/40) without the use of a compatibilizer. The blends were prepared via twin-screw extrusion followed by injection molding. Results showed that adding PK slightly improved the impact strength, reaching a maximum of 25.14 J/m at the 60/40 ratio. However, tensile strength, Young's modulus, and elongation at break are decrease with increasing PK content. Scanning electron microscopy (SEM) confirmed phase separation and non-uniform PK dispersion within the PLA matrix, which correlated with the reduction in mechanical performance. Thermal analysis using DSC and Vicat softening temperature (VST) testing indicated an increase in ( $T_{cc}$ ) and VST with higher PK content. The maximum VST observed was 61.70 °C at the 60/40 blend ratio. These findings suggest that although PLA and PK have limited compatibility, blending PK into PLA can improve properties such as impact resistance and thermal.

**Keywords:** Polylactic acid, Polyketone, Polymer blends, Mechanical and thermal properties

### 1.บทนำ

พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เป็นพอลิเอสเตอร์ชนิดอะลิฟาติกแบบเชิงเส้น (linear aliphatic polyester) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในธรรมชาติ โดยสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรที่มีแบ่งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น ซึ่งเป็นทรัพยากรหมุนเวียนที่มีอยู่มากในประเทศไทยและสามารถทดแทนได้ในระยะสั้น ทำให้ PLA ได้รับความสนใจในฐานะวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นทางเลือกสำคัญในการลดการพึ่งพาพลาสติกจากปิโตรเลียมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ

แม้ PLA จะมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรง ยังส้อมดูลึกลับ ความโปร่งใส แต่ยังมีข้อจำกัดทางด้านความเปราะ ความทนแรงกระแทกต่ำ และความทนความร้อนที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะที่ต้องการความเหนียวหรือการรับแรงกระแทกสูง เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของ PLA ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การเติมพลาสติกไซเซอร์ การเติมสารเสริมแรง หรือการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความยืดหยุ่นหรือความเหนียวสูงกว่า [1-2]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ PLA โดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวและทนแรงกระแทกดี เช่นพอลิเคโตน (Polyketone, PK) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์วิศวกรรมที่มีคุณสมบัติโดดเด่นด้านความ

แข็งแรง ทนต่อแรงกระแทกและสารเคมี อีกทั้งยังสามารถผลิตได้จากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และโอเลฟิน ซึ่งเป็นการนำของเสียในอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบ ส่งผลให้ PK เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยั่งยืนและช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การผสม PLA กับ PK จึงนับเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการพัฒนาวัสดุชีวภาพที่สามารถลดการใช้พลาสติกจากปิโตรเคมีและช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมได้ [3-4]

นอกจากนี้ PK มีหมู่คาร์บอนิลที่อยู่ในสายโซ่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมสภาพด้วยแสงได้ง่าย และสามารถนำไปใช้ซ้ำหรือรีไซเคิลได้ การผสม PK ใน PLA จึงเป็นแนวทางในการผลิตวัสดุพอลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น [13]

อย่างไรก็ตาม PLA และ PK มีโครงสร้างโมเลกุลและความมีขั้วที่แตกต่างกัน ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้เกิดการแยกเฟส (phase separation) และการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งแนวทางในการแก้ไขความเข้ากันไม่ได้ของ PLA/PK อาจมีการเติมสารที่ช่วยให้เข้ากัน (Compatibilizer) เช่น การนำสารกลุ่มมาเลอิกกราฟต์บนโครงสร้างโมเลกุลของ PK ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น [14] แต่สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมคู่ดังกล่าว เพื่อให้ทราบ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/PK ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยไม่ใช้สารช่วยประสาน เพื่อเป็นแนวทางการทำวิจัยต่อยอดโดยการผสมพอลิเมอร์ชนิดที่ 3 เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PK ต่อไป

## 2. วัตถุดิบและขั้นตอนการวิจัย

### 2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย PLA เกรด 4043D จากบริษัท Nature Work LLC จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา, PK เกรด M330F จากบริษัท Hyosung Chemical ประเทศเกาหลีใต้

### 2.2 ขั้นตอนการวิจัย

#### 2.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PK โดยมีอัตราส่วนผสมที่ร้อยละ 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 0/100 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำเม็ด PLA มาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำเม็ด PK อบที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำเม็ดพลาสติกทั้ง 2 ชนิด ที่อัตราส่วนต่าง ๆ มาผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนทิศทางเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 210-230 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 50 รอบต่อนาที ส่วนผสมที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นยาวและถูกดึงผ่านน้ำเพื่อทำให้เย็นตัว จากนั้นจึงตัดเป็นเม็ดทรงกระบอกให้มีขนาดใกล้เคียงกัน แล้วนำไปเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป

### 2.3 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติ

#### 2.3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก (notched izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact tester; CEST รุ่น 6542 Serial 8331) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด 63.5 × 12.7 × 3.0 มิลลิเมตร (ยาว×กว้าง×หนา) ที่มีรอยบากตรงกลางชิ้นทดสอบทำมุม 45 องศา ความลึกรอยบาก 2.54 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยค้อนขนาด 2 จูล

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง (tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D638 (type I) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine; hounsfield รุ่น H 50 KS) โดยใช้ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์มีระยะดึง (gauge length)

50 มิลลิเมตร อัตราการดึงยืดคงที่ 50 มิลลิเมตร/นาที และโหลดเซลล์ (load cell) 25 กิโลนิวตัน ผลการทดสอบได้ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ยังสัมมอดูลัส (young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break)

### 2.3.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ตรวจสอบสัณฐานวิทยา (morphology) บริเวณผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM; Hitachi รุ่น JEOL (JSM-IT 200) โดยนำชิ้นทดสอบหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ไปเคลือบด้วยทองในระบบสุญญากาศ ตรวจสอบที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

### 2.3.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทดสอบหาอุณหภูมิอ่อนตัวแบบไวแคต (vicat softening temperature, VST) ตามมาตรฐาน ASTM D1525 (type A) ด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (ceast รุ่น HDT vicat 6911) โดยเตรียมชิ้นทดสอบขนาด  $12 \times 12 \times 3$  มิลลิเมตร (ยาว×กว้าง×หนา) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ  $50.0 \pm 0.2$  องศาเซลเซียส/ชั่วโมง ใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิเริ่มต้นทดสอบเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส น้ำหนักกด 50.00 นิวตัน บันทึกอุณหภูมิที่หัวกดทดสอบกดลงบนผิวชิ้นงานลึกลงไปเป็นระยะ 1 มิลลิเมตร

ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) (DSC 3+ STAR System) โดยนำชิ้นทดสอบประมาณ 8 มิลลิกรัม วางบนจานอะลูมิเนียมแล้วปิดฝานึกทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 250 องศาเซลเซียส โดยเริ่มให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที และอุณหภูมิทดสอบสูงสุด 250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียส/นาที จนถึง 25 องศาเซลเซียส (cooling scan) คงอุณหภูมิที่ภาวะนั้นนาน 5 นาที จากนั้นเริ่มการทดสอบซ้ำเป็นครั้งที่ 2 (second heating scan) โดยใช้ภาวะเดิม ผลการทดสอบแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature,  $T_{cc}$ ), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature,  $T_c$ ), เอนทัลปีของการหลอมเหลว (melting enthalpy,  $\Delta H_m$ ), เอนทัลปีของการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (enthalpy of cold crystallization,  $\Delta H_{cc}$ ), เอนทัลปีของการเกิดผลึก (enthalpy of crystallization,  $\Delta H_c$ ) และคำนวณระดับความเป็นผลึก ( $X_c$ ) ได้จากสมการที่ (1)

$$X_c (\%) = 100 \times [(\Delta H_m - \Delta H_{cc}) / \Delta H_m^0 w] \quad (1)$$

โดย  $w$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม และ  $\Delta H_m^0$  คือ เอนทัลปีของการหลอมเหลวของพอลิแลกติกแอซิดที่เกิดผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 93 จูล/กรัม [5]

## 3. การวิเคราะห์ผลการวิจัย

### 3.1 สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 1 และภาพที่ 1(a)–1(d) แสดงค่าความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัส และร้อยละการยืดตัวของพอลิแลกติกแอซิด พอลิคีโตน และ พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิคีโตน ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบชิ้นทดสอบจำนวน 12 ตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วนผสม

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของพอลิแลกติกแอซิด พอลิอีโตน และพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิอีโตน ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

| PLA/PK ratio<br>(wt%)/(wt%) | IS<br>(J/m) | TS<br>(MPa) | E<br>(MPa)     | EB<br>(%)   |
|-----------------------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| 100/0                       | 22.52±1.40  | 66.31±0.65  | 3260.00±43.97  | 7.23±1.85   |
| 90/10                       | 24.73±1.24  | 59.51±0.66  | 2997.14±114.41 | 3.33±0.38   |
| 80/20                       | 24.89±1.37  | 55.37±0.72  | 2920.00±87.56  | 2.68±0.13   |
| 70/30                       | 24.00±1.39  | 50.04±1.63  | 2747.14±101.61 | 2.66±0.32   |
| 60/40                       | 25.14±1.42  | 50.84±3.52  | 2670.00±46.19  | 2.68±0.31   |
| 0/100                       | 81.78±4.96  | 66.30±0.56  | 1740.00±17.32  | 288.00±1.73 |

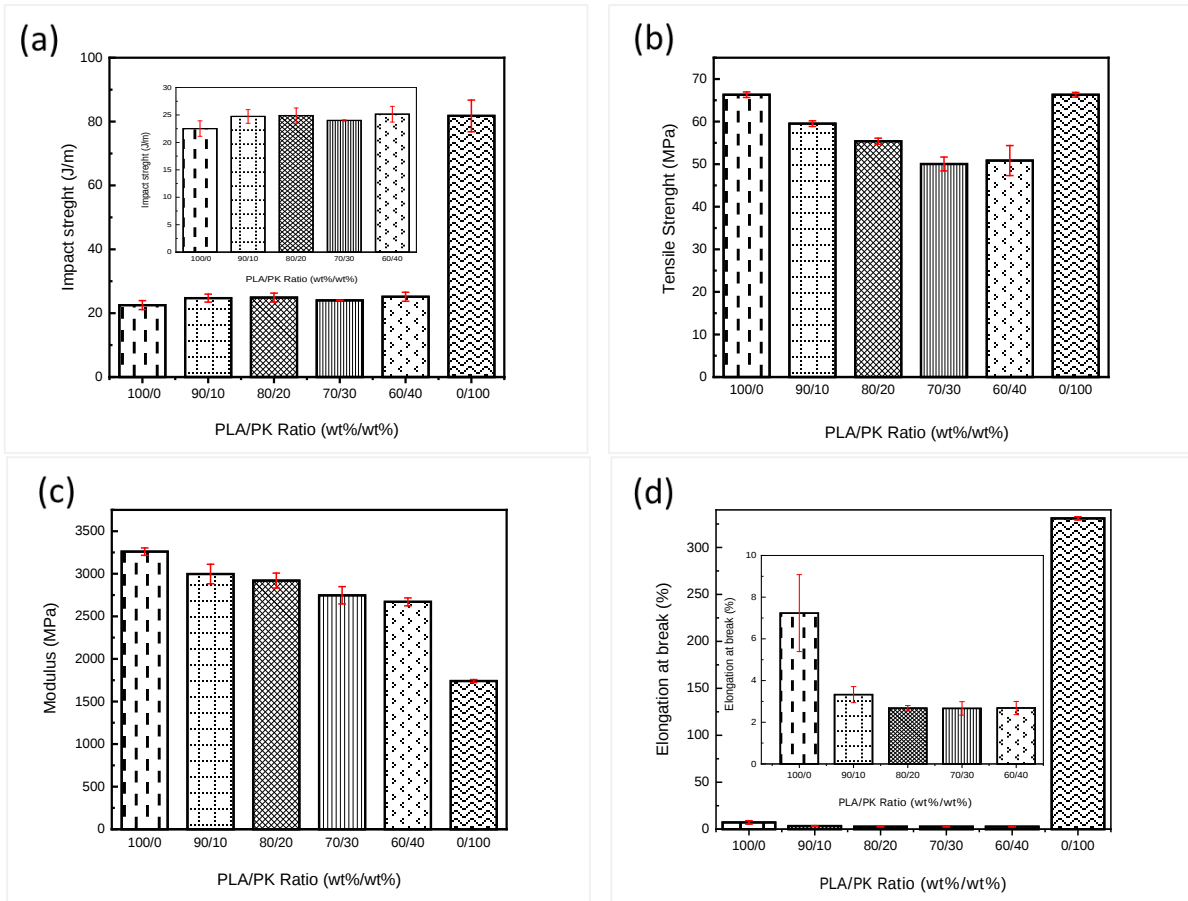
IS = Impact strength TS = Tensile strength E = Modulus EB = Elongation at break

#### ความทนแรงกระแทก

จากตารางที่ 1 และภาพที่ 1(a) ผลการทดสอบพบว่าค่าความทนแรงกระแทกของ พอลิแลกติกแอซิด พอลิอีโตน และ พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิอีโตน ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ พบว่าพอลิแลกติกแอซิด มีค่าความทนแรงกระแทกเท่ากับ 22.52 J/m การใส่พอลิอีโตนในพอลิแลกติกแอซิดเมทริกซ์ ที่ปริมาณ 10-40 wt% ส่งผลทำให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น สูงกว่าพอลิแลกติกแอซิดเพียงเล็กน้อย คือประมาณ 24.00-25.14 J/m ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากพอลิอีโตนที่ไม่สามารถ กระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของ PLA และกลายเป็นความบกพร่อง (defect) ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นทดสอบ ซึ่งทำให้ไม่มีผลในการเพิ่มความเหนียว (toughness) ประกอบกับ PLA และ PK มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ (incompatible blend) จึงส่งผลให้ความสามารถการส่งผ่านความเค้น (stress transfer) จาก PLA ไปยัง PK เกิดได้น้อย ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานของการกระแทกได้น้อยลง อย่างไรก็ตาม การที่พอลิเมอร์ผสมมีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า PLA เล็กน้อย อาจเป็นผลมาจากเฟสของ PK ในพอลิเมอร์ผสมที่มีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า PLA มาก [6]

#### ความทนแรงดึง ยังส้อมดูลัส และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด

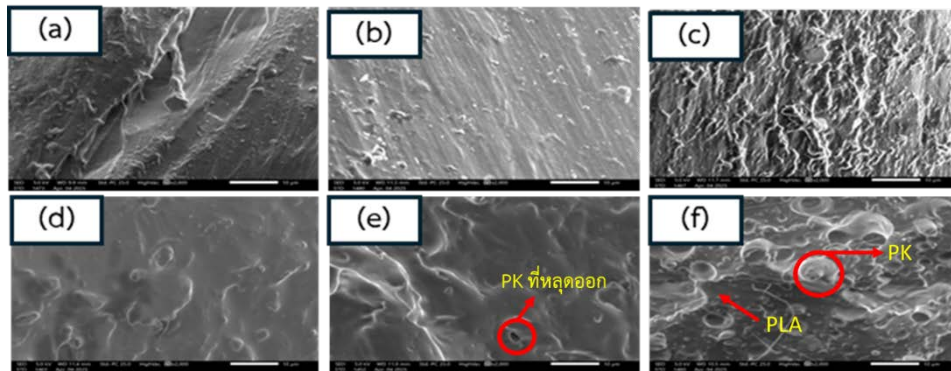
จากตารางที่ 1 ภาพที่ 1 (b)-(d) พบว่า PLA และ PK มีค่าความทนแรงดึงใกล้เคียงกัน (66.31, 66.30 MPa ตามลำดับ) และพอลิเมอร์ผสมแสดงแนวโน้มของค่าความทนแรงดึงลดลงตามปริมาณของ PK ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความทนแรงดึงอยู่ ระหว่าง 50.04-59.51 MPa ทั้งนี้เนื่องจากทั้ง PLA และ PK มีค่าความทนแรงดึงใกล้เคียงกัน ประกอบกับพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ไม่สามารถเข้ากันได้ในทุกสัดส่วน ทำให้เกิดการการแยกเฟส (phase separation) ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง จึงทำให้เกิดการ ขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้รับแรงดึง และเมื่อพิจารณาว่าค่ายังส้อมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่ PK ใน เมทริกซ์ PLA ที่อัตราส่วน 10-40 wt% พบว่ามีค่ายังส้อมดูลัสระหว่าง 2670-2997 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่า PK บริสุทธิ์ (1740 MPa) แต่ค่าลดลงจาก PLA บริสุทธิ์ เพียงเล็กน้อย คือ 3260 MPa การที่พอลิเมอร์ผสมมีค่ายังส้อมดูลัสเปลี่ยนแปลงอาจเนื่องจาก สายโซ่โมเลกุลของ PK ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของ PLA รวมทั้งอาจมีการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (chain entanglement) ระหว่าง PLA-PK อีกทั้ง PK ยังมีค่ายังส้อมดูลัสที่ต่ำกว่า PLA มาก ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการ เปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม จากภาพที่ 1(d) ยังพบว่าค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมใน ทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PLA และ PK โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2.66-3.33 % และแสดงแนวโน้มมีการยืดตัวไม่แตกต่างกัน แม้ว่าปริมาณของ PK เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงว่า PK ไม่มีผลในการปรับปรุงสมบัติการยืดตัวของเมทริกซ์ PLA [7]



ภาพที่ 1 สมบัติเชิงกลของ PLA, PK และพอลิเมอร์ผสม PLA/PK ที่อัตราส่วนต่างๆ โดย (a) ความทนแรงกระแทก (b) ความทนแรงดึง (c) ยืดหยุ่นดูลัส และ (d) ร้อยละการยืดตัว

### 3.2 สันฐานวิทยา

ภาพที่ 2 แสดงสันฐานวิทยาบริเวณผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 2,000 เท่า จากภาพที่ 2 (a) พบว่าพอลิแลคติกแอซิด มีพื้นผิวรอยแตกหักที่ค่อนข้างเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความแข็งเปราะ ในขณะที่พื้นผิวการแตกหักของพอลิโพรพิลีนในภาพ 2(b) พบมีรูปร่างการแตกหักสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด แสดงว่าเป็นวัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด อย่างไรก็ตาม เมื่อเติมพอลิโพรพิลีนในพอลิแลคติกแอซิดที่อัตราส่วน 90/10 wt% พบว่าพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม ภาพที่ 2 (c) มีลักษณะคล้ายคลึงและมีความหยาบมากขึ้น และเมื่อใส่พอลิโพรพิลีนในปริมาณสูงขึ้น (ภาพที่ 2(d)-2(f)) เริ่มสังเกตเห็นพฤติกรรมการแยกเฟสของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด [6,8] และการกระจายตัวของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ นอกจากนี้ยังพบหลุมลักษณะเป็นทรงกลมเล็กๆ ที่เกิดจากอนุภาคของพอลิโพรพิลีนถูกดึงให้หลุดจากเมทริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งแสดงว่าการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด เป็นการผสมแบบไม่เข้ากันและอนุภาคของพอลิโพรพิลีนไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิแลคติกแอซิดซึ่งสอดคล้องกับผลความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ได้กล่าวมาแล้ว [9]

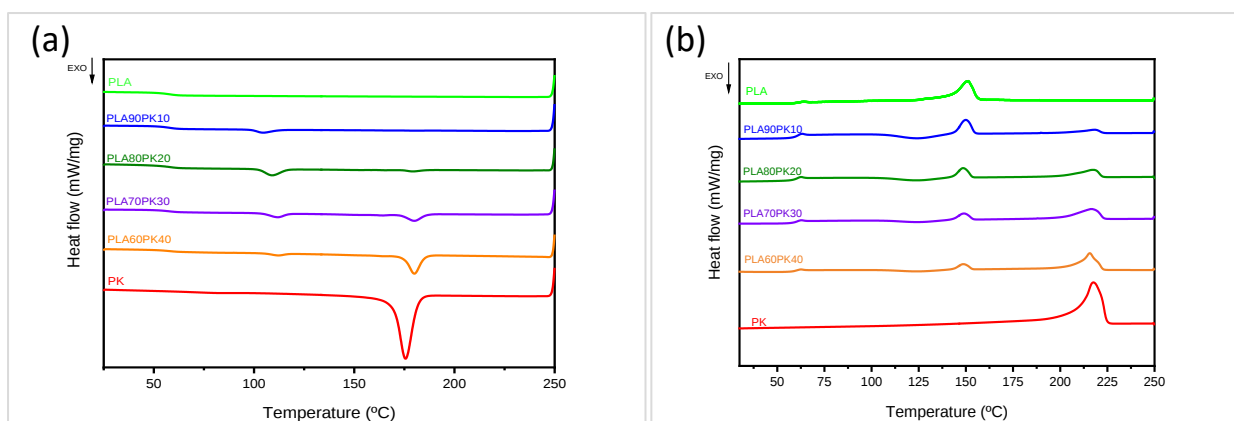


ภาพที่ 2 Representative SEM micrographs ( $\times 2,000$ ) of (a) neat PLA (b) PK and (c)-(f) PLA/PK blends at 90/10, 80/20, 70/30, and 60/40 (wt%), respectively.

### 3.3 สมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 2 ค่าสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (DSC) ของ PLA, PK และพอลิเมอร์ผสม PLA/PK ในอัตราส่วนต่างๆ

| PLA/PK ratio<br>(wt%)/(wt%) | $T_c$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | $T_g$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | $T_{cc}$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | $T_m$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | $\chi_{c, \text{PLA}}$<br>(%) |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 100/0                       | -                               | 59.46                           | -                                  | 148.08                          | 32.08                         |
| 90/10                       | 104.62                          | 59.66                           | 124.09                             | 149.77                          | 14.61                         |
| 80/20                       | 109.14                          | 59.89                           | 124.10                             | 148.50                          | 10.97                         |
| 70/30                       | 111.49                          | 59.62                           | 124.60                             | 148.86                          | 9.39                          |
| 60/40                       | 111.93                          | 59.70                           | 124.78                             | 148.71                          | 8.05                          |
| 0/100                       | 176.24                          | -                               | -                                  | 217.13                          | 31.87                         |



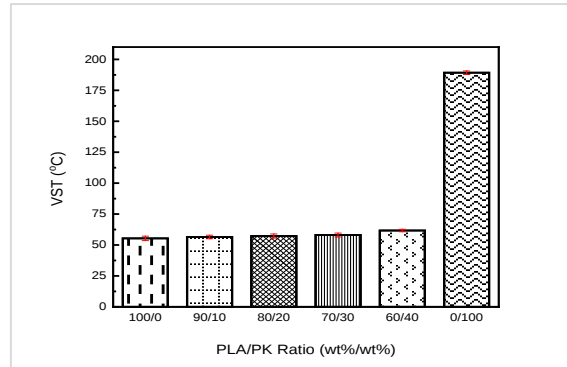
ภาพที่ 3 DSC เทอร์โมแกรมของ PLA, PK และ PLA/PK อัตราส่วนต่างๆที่ได้จาก (a) ขั้นตอนการเย็นตัว และ (b) ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2

จากตารางที่ 2 และภาพที่ 3 คือ DSC เทอร์โมแกรมของ PLA, PK และพอลิเมอร์ผสม PLA/PK ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ของขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (second heating scan) ไม่ปรากฏพิกัดอุณหภูมิ  $T_c$  ของ PLA ซึ่งเป็นพิกัดที่พอลิเมอร์กลับ มาจัดเรียงโมเลกุลในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว และปรากฏพิกัด  $T_c$  ของ PK ที่อุณหภูมิ 176.24 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์ผสมที่ อัตราส่วนการใส่ PK 10-40 wt% พบพิกัดอุณหภูมิ  $T_c$  ที่ 104.62 109.14 111.49 และ 111.93 องศาเซลเซียสตามลำดับ แสดงว่า PK ที่มีอุณหภูมิ  $T_c$  สูง (176.24 °C) สามารถเหนี่ยวนำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดผลึกได้เร็วขึ้น (อุณหภูมิสูงขึ้น) และ PLA พบทั้งอุณหภูมิ  $T_g$  ที่ 59.46 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิ  $T_m$  ที่ 148.08 องศาเซลเซียส [10] ซึ่งเป็นสมบัติของพอลิเมอร์กึ่ง ผลึก พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนพบพิกัดอุณหภูมิ  $T_g$  ไม่แตกต่างจาก PLA อย่างมีนัยสำคัญ พิจารณาได้ว่าที่อุณหภูมิ  $T_g$  ของ PLA เมทริกซ์ ไม่มีการเคลื่อนตำแหน่ง อาจบ่งบอกได้ว่าคู่พอลิเมอร์ผสมเป็นการผสมแบบเข้ากันไม่ได้ นอกจากนี้พอลิเมอร์ ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าอุณหภูมิ  $T_{cc}$  ซึ่งเป็นอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization) เมื่อขึ้นทดสอบได้รับอุณหภูมิ สูงขึ้นก่อนถึงอุณหภูมิ  $T_m$  โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 124.09-124.78 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่สามารถพบพิกัดนี้ใน PLA และ PK ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของ PK ไปขัดขวางการจัดเรียงโมเลกุลของ PLA ซึ่งอุณหภูมินี้แสดงถึงการหน่วงการเกิดผลึกของ PLA นอกจากนี้ยังปรากฏพิกัด  $T_m$  ของ PK ที่อุณหภูมิ 217.13 องศาเซลเซียส พิกัด  $T_m$  ของ PLA ที่อุณหภูมิ 148.08 องศา เซลเซียส และพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน พบพิกัด  $T_m$  อยู่ในช่วง 148.50-149.77 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่แตกต่างจาก PLA เมทริกซ์ แสดงว่าการใส่ PK ในพอลิเมอร์ผสมไม่มีผลต่อการหลอมของ PLA และจากการคำนวณระดับความเป็นผลึกด้วยสมการที่ 1 พบว่า PLA บริสุทธิ์มีระดับความเป็นผลึก 32.08 % และของ PLA เมทริกซ์ในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีระดับการเกิด ผลึกที่ลดลง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 8.05-14.61 % โดยระดับการเกิดผลึกมีค่าลดลงตามปริมาณของ PK ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกได้ ว่าสายโซ่โมเลกุลของ PK ขัดขวางการจัดเรียงโมเลกุลของ PLA [11]

ตารางที่ 3 พบว่า อุณหภูมิอ่อนตัวแบบไวแคต (VST) ของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าเท่ากับ 55.33 องศาเซลเซียส มีค่าสูง กว่าของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน (56.50-61.70 องศาเซลเซียส) เนื่องจากพอลิไคโตนมีอุณหภูมิอ่อนตัวแบบไวแคตเท่ากับ 189.27 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าของพอลิแลกติกแอซิดมาก ดังนั้น การเติมพอลิไคโตนในพอลิเมอร์ผสมจึงส่งผลให้อุณหภูมิ อ่อนตัวแบบไวแคตของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิไคโตนที่เพิ่มขึ้น [12]

ตารางที่ 3 ค่าอุณหภูมิอ่อนตัวแบบไวแคตของ PLA,PK และพอลิเมอร์ผสม PLA/PK

| PLA/PK ratio<br>(wt%)/(wt%) | VST (°C)    |
|-----------------------------|-------------|
| 100/0                       | 55.33±1.78  |
| 0/100                       | 189.27±1.42 |
| 90/10                       | 56.50±1.42  |
| 80/20                       | 57.27±1.66  |
| 70/30                       | 58.07±1.57  |
| 60/40                       | 61.70±1.01  |



ภาพที่ 4 ค่าอุณหภูมิอ่อนตัวแบบไวแคทของ PLA,PK และพอลิเมอร์ผสม PLA/PK

#### 4. สรุปผล

การผสมพอลิไคโตน (PK) ในเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ในอัตราส่วนต่าง ๆ มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์ผสม โดยพบว่าค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติม PK โดยเพิ่มจาก 22.52 J/m (PLA บริสุทธิ์) เป็น 25.14 J/m ที่อัตราส่วน PLA/PK 60/40 wt% อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นดังกล่าวมีข้อจำกัดเนื่องจากการกระจายตัวของ PK ที่ไม่สม่ำเสมอในเมทริกซ์ PLA ซึ่งนำไปสู่ปัญหาในการส่งผ่านแรงกระแทก ในทางกลับกันความต้านทานแรงดึง ยังสม่ำเสมอ และการยืดตัว ณ จุดขาด กลับมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ PK ที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน 40 wt% PK ค่าการยืดตัวลดลงจาก 7.23% (PLA บริสุทธิ์) เหลือเพียง 2.68% และค่ายังสม่ำเสมอลดลงจาก 3260 MPa เป็น 2670 MPa สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบจากการแยกเฟสและความเข้ากันไม่ได้ระหว่างสองพอลิเมอร์ ในด้านสมบัติทางความร้อน อุณหภูมิอ่อนตัวแบบไวแคท (VST) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติม PK โดยเพิ่มจาก 55.33 °C ใน (PLA บริสุทธิ์) เป็น 61.70 °C ที่อัตราส่วน PK 40 wt% ซึ่งแสดงถึงการปรับปรุงความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูงของวัสดุ

ผลจากการวิเคราะห์ด้วย DSC พบว่าอัตราการตกผลึกของ PLA มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณ PK ที่เติม โดยมีค่าการตกผลึกสูงสุดที่ 14.61% ที่อัตราส่วน PLA/PK 90/10 wt% ซึ่งลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณ PK แสดงให้เห็นว่า PK ส่งผลให้เกิดการรบกวนการจัดเรียงโมเลกุลของ PLA ในขณะเดียวกัน พิกของอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น ( $T_{cc}$ ) ก็ปรากฏเฉพาะในสูตรที่มีการเติม PK ซึ่งไม่พบใน PLA หรือ PK บริสุทธิ์ ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นการแยกเฟสอย่างชัดเจน โดยอนุภาค PK ไม่สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอใน PLA และมีลักษณะของการหลุดออกจากเมทริกซ์ ซึ่งเป็นผลจากความเข้ากันได้ที่จำกัดระหว่าง PLA และ PK

#### 5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ศึกษาการใช้สารตัวเติมที่ใช้ให้เข้ากัน (Compatibilizer) เพื่อลดการแยกเฟสของพอลิเมอร์ เช่น maleic anhydride-grafted PK, PLA-g-GMA หรือใส่สารตัวเติม เช่น Nanobentonite เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล

5.2 ศึกษาผลของการเติม PK ต่ออัตราการย่อยสลายของ PLA

5.3 ศึกษาการวางแผนการใช้ซ้ำหรือการรีไซเคิลเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนสถานที่ดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ ดร.พศวรรณ์ ชัยวุฒินันท์ สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่เอื้อเฟื้อวัสดุดิบและเครื่องมือในการผสมและแปรรูป

## 7. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Li, X., Lin, Y., Liu, M., Meng, L., & Li, C. (2023). A review of research and application of polylactic acid composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(7), e53477.
- [2] Naser, A. Z., Deiab, I., & Darras, B. M. (2021). Poly (lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review. *RSC advances*, 11(28), 17151-17196.
- [3] Yang, Y., Li, S. Y., Bao, R. Y., Liu, Z. Y., Yang, M. B., Tan, C. B., & Yang, W. (2018). Progress in polyketone materials: blends and composites. *Polymer International*, 67(11), 1478-1487.
- [4] Xiao, X., Zheng, H., Gao, H., Cheng, Z., Feng, C., Yang, J., & Gao, H. (2024). Recent advances in synthesis of non-alternating polyketone generated by copolymerization of carbon monoxide and ethylene. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(2), 1348.
- [5] Farias, N. C., Coudert, L., Devine, D., Abdeali, G., & Pezzoli, R. (2024). Repeated mechanical recycling of biodegradable polymers: PLA exhibits less deterioration than PBAT/PLA blend. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 9, 100430.
- [6] Tang, F., & Jeong, Y. G. (2022). Improvement in thermal stability, elastic modulus, and impact strength of Poly (lactic acid) blends with modified polyketone. *Polymer*, 257, 125281.
- [7] Ebadi-Dehaghani, H., Khonakdar, H. A., Barikani, M., & Jafari, S. H. (2015). Experimental and theoretical analyses of mechanical properties of PP/PLA/clay nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 69, 133-144.
- [8] Uysal, I. N., & Tasdelen, M. A. (2024). Comparison of mechanical and tribological properties of glass-fiber-reinforced polyketone and polyketone/polyamide 6 blend composites. *Macromolecular Research*, 32(7), 663-671.
- [9] Rahmatabadi, D., Soltanmohammadi, K., Aberoumand, M., Soleyman, E., Ghasemi, I., Baniassadi, M., ... & Baghani, M. (2024). 4D printing of porous PLA-TPU structures: effect of applied deformation, loading mode and infill pattern on the shape memory performance. *Physica Scripta*, 99(2), 025013.
- [10] Li, S., Yang, Y., Zha, X., Zhou, Y., Yang, W., & Yang, M. (2018). Nanoscale morphology, interfacial hydrogen bonding, confined crystallization and greatly improved toughness of polyamide 12/polyketone blends. *Nanomaterials*, 8(11), 932.
- [11] Arash, S., Akbari, B., Ghaleb, S., Kaffashi, B., & Marouf, B. T. (2023). Preparation of PLA-TPU-Nanoclay composites and characterization of their morphological, mechanical, and shape memory properties. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 139, 105642.



- [12] Dmtruk, A., Ludwiczak, J., Skwarski, M., Makuła, P., & Kaczyński, P. (2023). Influence of PBS, PBAT and TPS content on tensile and processing properties of PLA-based polymeric blends at different temperatures. *Journal of Materials Science*, 58(4), 1991-2004.
- [13] Surisetty, J., Sharifian, M., Lucyshyn, T., & Holzer, C. (2023). Investigating the aging behavior of high-density polyethylene and polyketone in a liquid organic hydrogen carrier. *Polymers*, 15(22), 4410.
- [14] dos Santos, F. A., Iulianelli, G. C., & Tavares, M. I. (2017). Effect of microcrystalline and nanocrystals cellulose fillers in materials based on PLA matrix. *Polymer Testing*, 61, 280-288.