

สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม เพทรีไซเคิล/ไนลอน 6 รีไซเคิล

เขมพิชา พิขุนทด^{1*}, นิชนันท์ ปานสร้อย¹ และอำนาจ ลากเกษมสุข¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* Khempicha_p@mail.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ รีไซเคิลพอลิเอทิลีนเทราฟทาเลต (RPET) ได้จากการนำขวดพลาสติกเพทที่ใช้แล้วมาดเป็นชิ้นขนาดเล็ก จากนั้นนำมาผสมแบบหลอมกับไนลอน 6 ที่เป็นของเสียในอุตสาหกรรมผลิตอวน (RNylon 6) ในปริมาณร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลและทางความร้อน พบว่าการใส่ ไนลอน 6 รีไซเคิล 10 ถึง 20 wt% ในพอลิเมอร์ผสม มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกต่ำกว่า RPET ประมาณ 35.53 % และ พอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50/50 โดยน้ำหนัก มีค่าความทนแรงกระแทกสูงสุด การใส่นylon 6 รีไซเคิลส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงดึงลดลงแต่มีค่ามอดุลัสสูงกว่า RPET และมีการยืดตัวที่ต่ำกว่า จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี พบว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่า RPET ประมาณ 11.78 – 14.56 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิหลอมผลึกแสดงแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณของ RNylon 6 ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลการทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวเนื่องจากความร้อนแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการใช้งานได้ต่ำกว่า RPET

คำสำคัญ: พอลิเอทิลีนเทราฟทาเลต ไนลอน 6 พอลิเมอร์เบลนด์ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน

Mechanical and Thermal Properties of Polyethylene terephthalate recycled and Nylon 6 recycled Blends

Khempicha Pikhunthod¹, Nichanan Phansroy¹ and Amnouy Larpkasemsuk¹

¹Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*Khempicha_p@mail.rmutt.ac.th

Abstract

In this study, recycled polyethylene terephthalate (RPET) was prepared by shredding post-consumer PET bottles into small flakes and subsequently melt-blended with recycled nylon 6 (RNylon 6), a waste material derived from the fishing net manufacturing industry, at concentrations ranging from 10 to 50 wt%. The blends were compounded using a twin-screw extruder and molded into test specimens via injection molding. The addition of 10 to 20 wt% RNylon 6 to the RPET matrix resulted in a reduction of impact strength by approximately 35.53% compared to neat RPET. However, the RPET/RNylon 6 blend with a 50/50 wt% ratio exhibited the highest impact strength. The incorporation of RNylon 6 also led to a decrease in tensile strength and elongation at break but an increase in modulus, relative to RPET. Differential scanning calorimetry (DSC) analysis showed that the crystallization temperatures of all blends were 11.78–14.56 °C higher than that of pure RPET, while the melting temperatures slightly decreased with increasing RNylon 6 content. Furthermore, heat deflection temperature (HDT) testing indicated that the thermal resistance of the blends was lower than that of neat RPET.

Keyword: Polyethylene terephthalate, Nylon 6, Polymer blend, Mechanical properties, Thermal properties

1. บทนำ [1-5]

ปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้โดยแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติที่หลากหลายตามชนิดของพลาสติก จึงมีการนำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และไฟฟ้า อุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น พลาสติกที่ใช้ในปัจจุบันส่วนมากเตรียมได้จากแหล่งวัตถุดิบทางธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ปิโตรเลียม ซึ่งทรัพยากรธรรมชาติเหล่านี้เป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป ประกอบกับในกระบวนการนำทรัพยากรมาใช้ กระบวนการสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี หรือการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกจะก่อให้เกิดการปลดปล่อยปริมาณคาร์บอนจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงมีความจำเป็นต้องนำทรัพยากรเหล่านี้มาใช้ให้น้อยลง โดยที่ภาครัฐได้กำหนดเป็นนโยบายสำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกให้ดำเนินการโดยใช้หลักการ 3R ในการผลิต ซึ่งประกอบด้วย Reduce คือ การลดการใช้ ลดการบริโภคทรัพยากรที่ไม่จำเป็นลง Reuse คือ การใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่าที่สุดโดยการนำสิ่งของเครื่องใช้มาใช้ซ้ำอย่างมีประสิทธิภาพ และ R ตัวที่ 3 คือ Recycle ซึ่งหมายถึงการนำทรัพยากรที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

ลดปริมาณการใช้งานทรัพยากรตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ในหลายอุตสาหกรรมก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงหรือลดการใช้งานพลาสติกได้ เช่น กลุ่มอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง เป็นเหตุให้มีขยะพลาสติกที่เหลือใช้หรือทิ้งจากอุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นจำนวนมาก และหากมีการจัดการกับพลาสติกเหล่านี้อย่างไม่เหมาะสมก็จะกลายเป็นปัญหาสำคัญที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การใช้เคลพลาสติกจึงเป็นวิธีการแรก ๆ ที่ถูกนำมาใช้อย่างเป็นรูปธรรม เนื่องจากช่วยลดความต้องการใช้งานพลาสติกใหม่ มีต้นทุนที่ถูกกว่าการผลิตพลาสติกใหม่ ช่วยลดปริมาณขยะและยังสามารถลดการปลดปล่อยปริมาณคาร์บอนที่อาจเกิดจากกระบวนการผลิตพลาสติกใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม สมบัติการใช้งานของพลาสติกที่มาจากกระบวนการรีไซเคิลมักต่ำกว่าพลาสติกใหม่ ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อนและแรงกลจากเครื่องจักรทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกถูกตัดขาดสั้นลง เป็นต้น

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต หรือเพท (poly(ethylene terephthalate), PET) เป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเตอร์ ชนิดอิมิตัว จัดอยู่ในกลุ่มพลาสติกวิศวกรรม ที่มีการใช้งานในรูปของบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดน้ำดื่มที่ใช้แล้วทิ้งทั้งนี้เนื่องจากเพทเป็นพลาสติกที่มีสมบัติเด่นด้านความใส น้ำหนักเบา ทนต่อสารเคมี มีสมบัติการสกัดกั้นแก๊สที่ดีและมีราคาถูก อย่างไรก็ตาม เพทที่ใช้มากในปัจจุบัน เป็นพลาสติกที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมสูง ดังนั้น จึงไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ การกำจัดขยะเพทด้วยวิธีการรีไซเคิล จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการสนใจจากทางอุตสาหกรรม โดยกระบวนการรีไซเคิลเพทที่นิยมใช้ คือ กระบวนการรีไซเคิลเชิงกลซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ต้นทุนการดำเนินการต่ำ แต่จะส่งผลทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุลของเพทลดลง สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนลดต่ำลงกว่าเพทที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปแต่สามารถทดแทนสมบัติที่สูญเสียไปได้โดยการนำเพทรีไซเคิลมาปรับปรุงสมบัติด้วยสารเติมแต่งหรือนำมาผสมกับพลาสติกชนิดอื่น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติแตกต่างไปจากเดิมและใช้ประโยชน์ในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างไปจากเดิม

ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพทรีไซเคิลกับพอลิเอไมด์ 6 หรือไนลอน 6 (Polyamide 6 or Nylon 6) รีไซเคิล ที่เป็นของเสียจากการผลิตอวน โดยเป็นเพียงการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพอลิเมอร์ผสมด้านสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ซึ่งจะได้ผลลัพธ์คือเป็นการลดปริมาณขยะ จากเพท ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมตลอดจน ลดการปลดปล่อยปริมาณคาร์บอน มีผลทำให้ต้นทุนการผลิตและการใช้วัตถุดิบจากสารปิโตรเลียมลดลง อีกทั้งยังเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการพัฒนาเพื่อต่อยอดพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพทรีไซเคิลกับไนลอน 6 รีไซเคิล เช่น การใส่สารปรับแต่งสมบัติ การใส่สารตัวเติม ตลอดจนการเตรียมเป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตเพื่อให้สามารถใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตลอดจนสามารถพัฒนาสู่อุตสาหกรรมได้

จากงานวิจัยนี้คาดว่าจะสามารถนำไปใช้งานในทางด้านวัสดุที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น บรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอาหาร กล่องพลาสติกฝาปิดแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เฟอร์นิเจอร์หรือของตกแต่งภายในที่ไม่ต้องรับแรงมากนัก เป็นต้น

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล หรือเพทรีไซเคิล (RPET) ที่ได้จากการบดขวดเพทและเส้นใยไนลอน 6 รีไซเคิล (RNylon 6) ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตอวนที่ผ่านการหลอมและตัดเป็นเม็ด

2.2 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ทำโดยนำขวดเพทมาบดให้มีขนาดประมาณ 1×1 เซนติเมตร และ เส้นใย Nylon 6 นำมาหลอมและตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่อุณหภูมิประมาณ 250-300 องศาเซลเซียส จากนั้นนำ

RPET และ RNylon 6 มาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่หมุนทิศทางเดียว ที่ช่วงอุณหภูมิ 220-270 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 60 รอบ/นาที และนำไปเตรียมชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดที่อุณหภูมิระหว่าง 230-250 องศาเซลเซียส

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 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, H 50 KS) โดยชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์มีระยะดึง (gauge length) 50 มิลลิเมตร อัตราการดึงยึดคงที่ 50 มิลลิเมตร/นาที และโหลดเซลล์ (load cell) 25 กิโลนิวตันผลการทดสอบได้ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ยังส์มอดุลัส (young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break)

ทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength) แบบสามจุด (three point bending) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Hounsfield, H 50 KS) ตามมาตรฐาน ASTM D790 เตรียมชิ้นทดสอบแบบ rectangular โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ ใช้ loadcell ขนาด 2,500 นิวตัน อัตราเร็วในการกด 1.37 มิลลิเมตร/นาที ระยะห่างระหว่างหัวกด 50 มิลลิเมตร

2.3.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (differential scanning calorimetry, DSC) ทดสอบโดยนำชิ้นทดสอบประมาณ 8 มิลลิกรัม วางบนจานอะลูมิเนียมแล้วปิดฝานักทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 300 องศาเซลเซียส โดยเริ่มให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที ผลการทดสอบแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c), เอนทัลปีของการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m), เอนทัลปีของการเกิดผลึก (enthalpy of crystallization, ΔH_c) และคำนวณระดับความเป็นผลึก (χ_c) ได้จากสมการ [6] ต่อไปนี้

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

ΔH_m คือ เอนทัลปีการหลอมเหลวผลึกของเพทรีไซเคิล

ΔH_m^w คือ เอนทัลปีของเพทรีไซเคิลที่เกิดผลึก 100% (มีค่า 120 จูล/กรัม) [7]

เอนทัลปีของไนลอนไซเคิลที่เกิดผลึก 100% (มีค่า 230.1 จูล/กรัม) [8]

w คือ อัตราส่วนของเพทรีไซเคิลในพอลิเมอร์ผสม

วิเคราะห์อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) ด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวของพลาสติก การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอ (HDT) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D648 โดยเตรียมชิ้นงานขนาด $12.7 \times 125.0 \times 3.0$ มิลลิเมตร (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ หนา) ใช้ความร้อนในการทดสอบจากอ่างน้ำมันซิลิโคน อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบ 200 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 120 ± 2 องศาเซลเซียส น้ำหนักต่อพื้นที่ที่ใช้กดชิ้นงาน 1.82 MPa ความยาว span 100 มิลลิเมตร จากนั้นบันทึกค่าอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

3. การวิเคราะห์ผลการวิจัย

3.1 สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 1 และภาพที่ 2 (a), 2(b), 2(c) และ 2(d) แสดงสมบัติ ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึงยังสัมผัสดุล ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และความทนแรงดัดโค้ง ของ RPET, RNylon 6, และพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของ RPET, RNylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

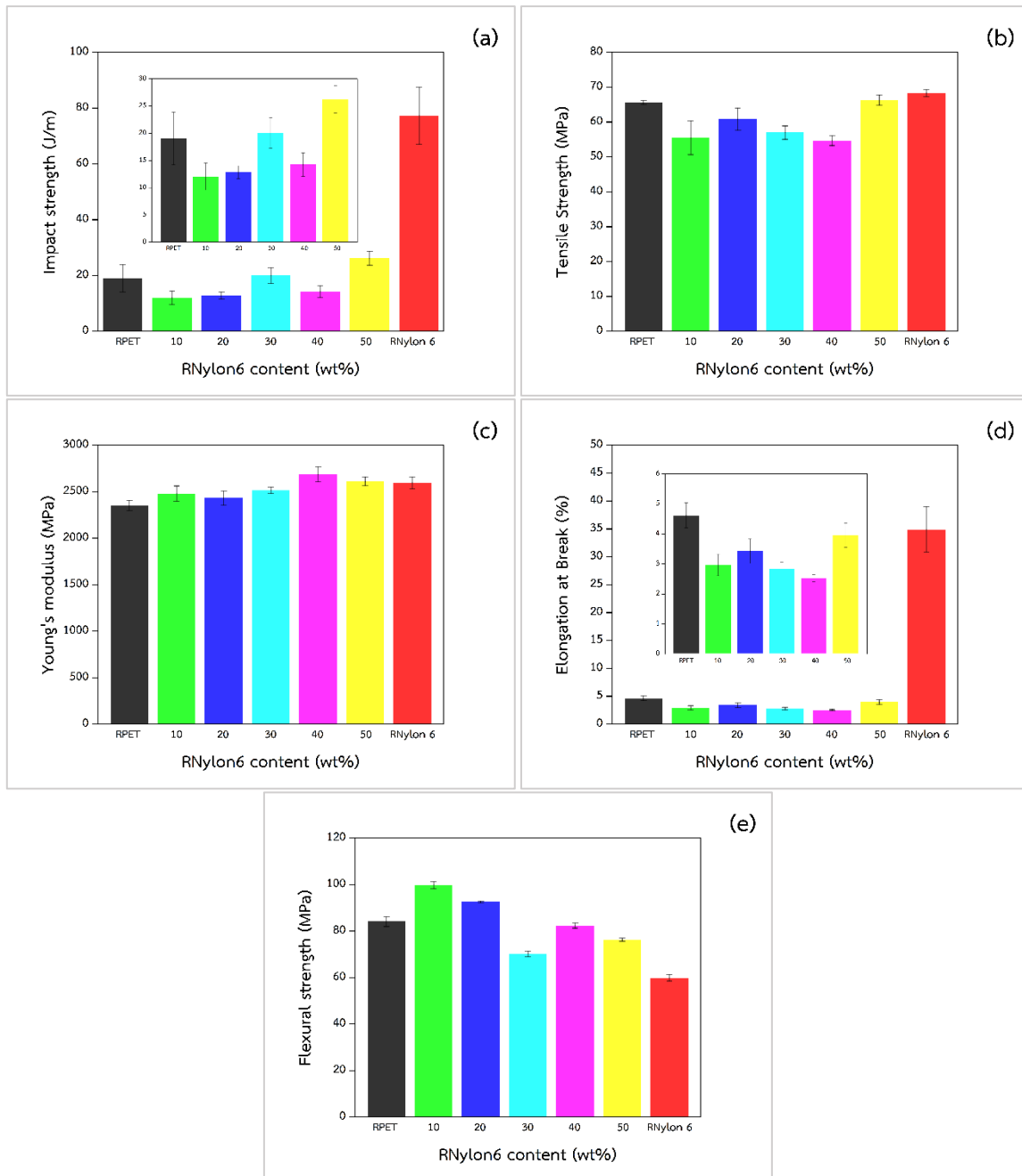
RPET/RNylon 6 (wt%/wt%)	Impact strength (J/m)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)
100/0	19.0 $\pm$ 4.8	65.6 $\pm$ 0.6	2350.0 $\pm$ 54.4	4.6 $\pm$ 0.4	84.1 $\pm$ 2.2
90/10	12.0 $\pm$ 2.5	55.4 $\pm$ 4.8	2478.0 $\pm$ 83.8	3.0 $\pm$ 0.4	99.8 $\pm$ 1.5
80/20	12.8 $\pm$ 1.2	60.8 $\pm$ 3.2	2431.7 $\pm$ 73.1	3.4 $\pm$ 0.4	92.6 $\pm$ 9.1
70/30	20.0 $\pm$ 2.8	57.0 $\pm$ 1.9	2515.0 $\pm$ 32.1	2.8 $\pm$ 0.2	70.3 $\pm$ 1.2
60/40	14.2 $\pm$ 2.2	54.7 $\pm$ 1.4	2685.0 $\pm$ 80.6	2.5 $\pm$ 0.1	82.3 $\pm$ 1.1
50/50	26.2 $\pm$ 2.5	66.3 $\pm$ 1.5	2610.0 $\pm$ 46.9	4.0 $\pm$ 0.4	76.3 $\pm$ 0.7
0/100	77.3 $\pm$ 10.3	68.3 $\pm$ 1.0	2595.7 $\pm$ 61.9	34.9 $\pm$ 4.1	59.9 $\pm$ 1.5

จากตารางที่ 1 และภาพที่ 1(a) พบว่า ความทนแรงกระแทกของ RPET และ RNylon 6 มีค่า เท่ากับ 19.0 และ 77.3 J/m ตามลำดับ การใส่ RNylon 6 ในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน 10 ถึง 20 wt% มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม มีค่าต่ำกว่า RPET ประมาณ 35.53 % และต่ำกว่า RNylon 6 เนื่องจาก RNylon 6 มีการกระจายตัวและมีแรงยึดเกาะที่ผิวใน RPET ต่ำ จึงทำให้มีการส่งผ่านแรงกระแทกระหว่างพอลิเมอร์ได้น้อย อย่างไรก็ตามการใส่ RNylon 6 ที่อัตราส่วน 30 wt% ในพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่าความทนแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น (20.0 J/m) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่อัตราส่วนนี้ RNylon 6 มีการกระจายตัวดีในเฟสของ RPET อย่างไรก็ตาม การใส่ RNylon 6 ที่ปริมาณ 40 wt% กลับพบว่าค่าความทนแรงกระแทกมีค่าลดต่ำกว่า RPET (14.2 J/m) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกาะกลุ่ม (agglomerate) และกระจายตัวในเมทริกซ์ของ RPET นอกจากนี้ยังพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน RNylon 6 เท่ากับ 50 wt% มีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า RPET (26.2 J/m) ทั้งนี้เนื่องจาก RNylon 6 เกิดการเกาะกลุ่มกันเอง และแยกเฟสกับ RPET โดย RNylon 6 ซึ่งมีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า RPET และสามารถดูดซับพลังงานการกระแทกไว้ได้มากกว่าแตกหัก หรือคาดว่าอาจเกิดจากพฤติกรรมการกลับเฟส (phase reversion) และยังพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ RNylon 6 ที่อัตราส่วน 10-40 wt% มีร้อยละการยืดตัวอยู่

ในช่วงระหว่าง 2.5-3.0 % (ภาพที่ 1 (d)) ซึ่งลดลงตามปริมาณของ RNylon 6 ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สายโซ่โมเลกุลเกิดการเกี่ยวพันกันทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนไหวของโมเลกุลกันเอง และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมเริ่มแสดงแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใส่ RNylon 6 ที่ปริมาณ 50 wt% ในพอลิเมอร์ผสม ตามเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว จากตารางที่ 1 และภาพที่ 1(b) เป็นค่าความทนแรงดึงของ RPET, RNylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยน้ำหนักพบว่า RPET มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 65.6 MPa และ ซึ่งต่ำกว่า RNylon 6 ที่มีค่าความทนแรงดึงเท่ากับ 68.3 MPa และพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่ RNylon 6 เท่ากับ 10-40 wt% มีค่าความทนแรงดึงต่ำกว่า RPET ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากการเกิดการแยกเฟส (phase separation) ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง อย่างไรก็ตาม การใส่ RNylon 6 เพิ่มขึ้นเป็น 50 wt% พบว่าค่าความทนแรงดึง (66.3 MPa) มีค่าเข้าใกล้ RNylon 6 ทั้งนี้อาจเกิดจากพฤติกรรมเกาะกลุ่มและแยกเฟส จึงทำให้พอลิเมอร์แต่ละประเภทแสดงสมบัติของตัวเองในพอลิเมอร์ผสม

เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม (ภาพที่ 1 (c)) พบว่า RPET และ RNylon 6 มีค่าเท่ากับ 2350.0 และ 2595.7 MPa ตามลำดับ และพอลิเมอร์ผสมในทุกอัตราส่วนมีค่ามอดูลัสสูงกว่า RPET (2431.7-2685.0 MPa) แต่มอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมแสดงแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นที่ไม่แน่นอน การที่พอลิเมอร์ผสมมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นหรือลดลง อาจเป็นผลมาจากพฤติกรรมของสายโซ่โมเลกุลของ RNylon 6 ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของ RPET รวมถึงทั้งมีการพันกันของสายโซ่ (Chain entanglement) ระหว่าง RPET-RNylon 6 และ RNylon 6-RNylon 6 ซึ่งส่งผลต่อความยากง่ายในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์ผสม โดยอัตราส่วนการใส่ RNylon 6 40 wt% พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่ามอดูลัสสูงสุดเท่ากับ 2685.0 MPa อาจเป็นผลมาจาก RNylon 6 ในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณมากในเมทริกซ์ของ RPET ทำให้สายโซ่โมเลกุลของ RNylon 6 มีโอกาสเกี่ยวพันกับสายโซ่โมเลกุลของ RPET ได้สูงจึงส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยาก

จากภาพที่ 1(e) พบว่าความทนแรงดัดโค้งของ RPET และ RNylon 6 มีค่าเท่ากับ 84.1 และ 59.9 MPa ตามลำดับ ดังนั้น การเติม Nylon 6 ใน RPET จึงมีผลทำให้ความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ RPET ยกเว้นที่อัตราส่วนการใส่ RNylon 6 เท่ากับ 10 ถึง 20 wt% ตามเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม การใส่ปริมาณ RNylon 6 เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสมแสดงแนวโน้มค่าความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นนั่นคือชิ้นงานสามารถโค้งงอได้ยากขึ้นเมื่อได้รับแรงกด [10]



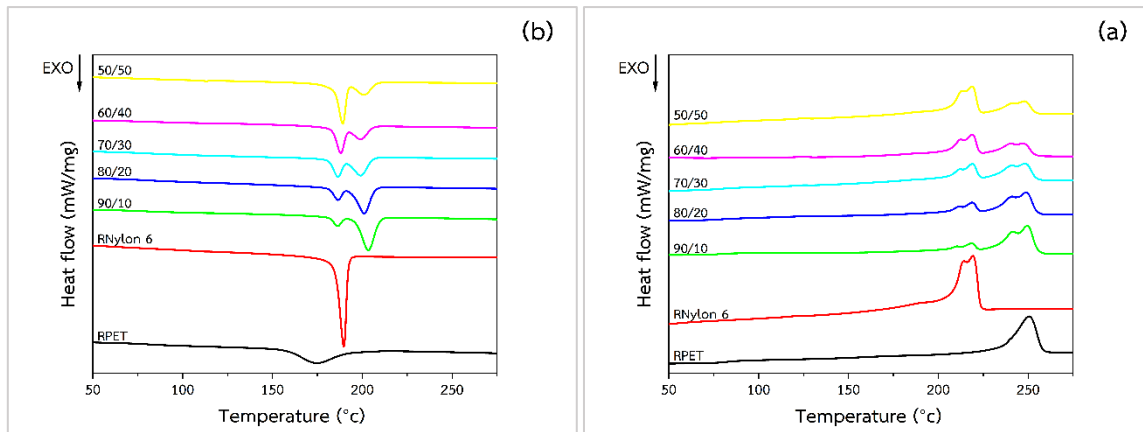
ภาพที่ 1 สมบัติเชิงกลของ RPET, RNylon 6 และ พอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ โดย (a) ความทนแรงกระแทก (b) ความทนแรงดึง (c) ยังส์มอดุลัส (d) ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และ (e) ความทนแรงดัดโค้ง

3.2 สมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 2 DSC เทอร์โมแกรม ของ RPET, RNylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

RPET/Nylon 6 (wt%/wt%)	T_{cPET} (°C)	T_{mRPET} (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔH_m (J/g)	X_{cRPET} (%)
100/0	174.56	250.50	44.03	44.50	37.08
90/10	186.34	249.64	4.63	28.16	23.22
80/20	186.37	248.98	6.76	26.49	22.08
70/30	186.43	248.29	9.85	20.88	17.40
60/40	187.97	247.40	15.58	16.79	13.99
50/50	189.12	247.95	24.86	14.94	12.45
0/100	192.29	219.25	61.17	68.10	29.60

จากตารางที่ 2 พบว่า T_c ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการลดอุณหภูมิในครั้งที่ 1 (first cooling scan) ของ RPET มีค่าเท่ากับ 174.56 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลของการเกิดผลึกจาก RPET หลอมเหลวในระหว่างการทำให้นิ่มตัวลงมาที่อัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที่ โดย RPET มีเวลาเพียงพอสำหรับการเกิดผลึก และ T_c ของ RNylon 6 มีค่าเท่ากับ 192.29 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงว่า RNylon 6 สามารถเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า RPET และพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ตรวจพบค่า T_c อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 186.34 - 189.12 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่า T_c ของ RPET ประมาณ 11.78 - 14.56 องศาเซลเซียส แสดงว่าพอลิเมอร์ผสมเกิดผลึกได้เร็วกว่า RPET ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลในสภาวะของหลอมไหลของ RPET ในพอลิเมอร์ผสมสามารถเคลื่อนตัวมาจัดเรียงโมเลกุลได้ง่ายขึ้น ดังนั้น RPET จึงสามารถเกิดผลึกได้เร็วขึ้น จากภาพที่ 2(b) พบว่าความสูงของพีค RPET แสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ RNylon 6 เพิ่มขึ้น คาดว่าเป็นผลมาจากความปริมาณของ RNylon 6 ที่เพิ่มขึ้น ส่วนในขั้นตอนการให้ความร้อนพบว่า T_m ของ RPET มีค่าเท่ากับ 250.50 องศาเซลเซียส และ RNylon 6 มีค่า T_m เท่ากับ 219.25 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการหลอมของผลึกในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน มีค่า T_m อยู่ในช่วง 247.40 - 249.64 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่า RPET โดยที่ค่า T_m แสดงแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ RNylon 6 ที่เพิ่มขึ้น คาดว่าเป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลของ RNylon 6 ไปขัดขวางการเกิดผลึกของ RPET นอกจากนี้ จากภาพที่ 2(a) พบว่าที่พีคแสดงตำแหน่ง T_m ของ RPET ในพอลิเมอร์ผสม มีฐานของพีคที่กว้างและแสดงยอดพีค 2 ตำแหน่งซึ่งอยู่ใกล้กัน [9] คาดว่าเป็นผลมาจาก RPET บางส่วนเกิดผลึกที่มีความสมบูรณ์น้อยซึ่งเกิดในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว ในขณะที่ T_m ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเกิดจากการหลอมเหลวของผลึกที่มีโครงสร้างสมบูรณ์มากขึ้น นอกจากนี้ RPET มีระดับการเกิดผลึกเท่ากับ 37.08 % และ RNylon 6 มีระดับการเกิดผลึกต่ำกว่า เท่ากับ 29.60 % พอลิเมอร์ผสมในทุกอัตราส่วนมีระดับการเกิดผลึกอยู่ระหว่าง 12.45 - 23.22 % ซึ่งลดลงตามปริมาณของ RNylon 6 ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก RNylon 6 มีการกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์ของ RPET ขัดขวางความสามารถในการจัดเรียงของ RPET



ภาพที่ 2 DSC เทอร์โมแกรมของ RPET, RNylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่ได้จาก (a) ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 และ (b) ขั้นตอนการเย็นตัวครั้งที่ 1

จากตารางที่ 3 แสดงอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของ RPET, RNylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/ RNylon 6 พบว่า อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของ RPET และ RNylon 6 มีค่าเท่ากับ 64.50 และ 50.57 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้น การใส่ RNylon 6 ที่มีอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนต่ำกว่าจึงมีผลทำให้อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของพอลิเมอร์ผสมทุกองค์ประกอบมีค่าต่ำกว่าของ RPET (0.3–4 องศาเซลเซียส) [10]

ตารางที่ 3 อุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของ RPET, RNylon 6 และพอลิเมอร์ผสม RPET/RNylon 6 ที่อัตราส่วนต่างๆ

RPET/Nylon 6 (wt%/wt%)	HDT(°C)
100/0	64.50±1.08
90/10	66.17±1.01
80/20	63.30±4.46
70/30	62.77±4.14
60/40	61.87±3.96
50/50	60.17±4.76
0/100	50.57±0.55

4. สรุปผลการทดลอง

การเติม RNylon 6 ลงในเนื้อเมทริกซ์ของ RPET พบว่าค่าความทนแรงกระแทกต่ำสุดเกิดขึ้นที่อัตราส่วนผสม 10–20 wt% ซึ่งลดลงจาก RPET บริสุทธิ์ประมาณ 35.53% ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติม RNylon 6 ในช่วงอัตราส่วนผสม 10–40 wt% โดยมีค่าต่ำกว่า RPET อย่างไรก็ตามค่านี้เพิ่มขึ้นอีกครั้งที่อัตราส่วนผสม 50 wt% ค่ามอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนเมื่อเติม RNylon 6 โดยสูงสุดที่อัตราส่วนผสม RNylon 6 เท่ากับ 40 wt% อาจเป็นผลมาจากโอกาสที่สายโซ่โมเลกุลของ RNylon 6 เกี่ยวพันกับสายโซ่โมเลกุลของ RPET จึงส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างยาก ขณะที่ร้อยละการยืดตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ RNylon 6 ในพอลิเมอร์ผสม เช่นเดียวกับค่าความทนแรงดัดโค้งที่มีค่าลดลง ยกเว้นที่อัตราส่วนผสม 10 ถึง 20 wt% ที่มีค่าความทนแรงดัดโค้งสูงขึ้นเล็กน้อย แสดงถึงความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นในบางอัตราส่วนของการเติม RNylon 6 และจาก DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมพบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของพอลิเมอร์ผสมสูงกว่า RPET ประมาณ 11.78

– 14.56 องศาเซลเซียส แสดงถึงการเกิดผลึกที่รวดเร็วขึ้น ขณะที่อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณ RNYlon 6 ที่เพิ่มขึ้น คาดว่าเป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลของ RNYlon 6 ไปขัดขวางการเกิดผลึกของ RPET นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิการโค้งงอจากความร้อนของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณของ RNYlon 6 ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก RNYlon 6 มีค่าการทนความร้อนต่ำกว่า RPET ส่งผลให้สมบัติด้านความร้อนโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนสถานที่ดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ ดร.พศวรรณ์ ชัยวุฒินันท์ สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เอื้อเฟื้อเครื่องมือการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] de Cort, S., Godts, F., & Moreau, A. (2017). Packaging Materials 1: Polyethylene Terephthalate (PET) for Food Packaging Applications. Updated version.
- [2] Valentino, G. (2016). Life Cycle Assessment of PET bottles: closed and open loop recycling in Denmark and Lombardy region.
- [3] Goodship, V. (2007). Plastic recycling. *Science progress*, 90(4), 245-268.
- [4] Hansapalangkool, K., Hongsriphan, N., & Patanathabutr, P. (2021, September). Mechanical property enhancement of recycled Poly (ethylene terephthalate) with Nylon6. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2397, No. 1). AIP Publishing.
- [5] Joseph, B., James, J., Kalarikkal, N., & Thomas, S. (2021). Recycling of medical plastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(3), 199-208.
- [6] Sharma, K., Braun, O., Tritsch, S., Muff, R., Hufenus, R., & Perret, E. (2021). 2D Raman, ATR-FTIR, WAXD, SAXS and DSC data of PET mono-and PET/PA6 bicomponent filaments. *Data in Brief*, 38, 107416.
- [7] Chaiwutthinan, P., Pimpong, A., Larpkasemsuk, A., Chuayjuljit, S., & Boonmahitthisud, A. (2019). Wood plastic composites based on recycled poly (ethylene terephthalate) and poly (butylene adipate-co-terephthalate). *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 29(2).
- [8] Korkees, F., Aldrees, A., Barsoum, I., & Alshammari, D. (2021). Functionalised graphene effect on the mechanical and thermal properties of recycled PA6/PA6, 6 blends. *Journal of Composite Materials*, 55(16), 2211-2224.
- [9] Costa, A. R. D. M., Henrique, M. A., Luna, C. B. B., Carvalho, L. H. D., & Almeida, Y. M. B. D. (2022). Influence of a multifunctional epoxy additive on the performance of polyamide 6 and PET post-consumed blends during processing. *Sustainability*, 14(24), 16658.
- [10] Chuthong, N. (2015). Recycled PET/Nylon 6/montmorillonite nanocomposite: Physical properties and morphology (Master's thesis, Chulalongkorn University).