วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
Engineering Journal of Research and Development
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

ปีที่ 37 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2569
Volume 37 Issue 1 January-March 2026

Received 19 November 2025
Revised 27 February 2026
Accepted 25 March 2026

การปรับปรุงคุณสมบัติของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากขยะพอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูง ด้วยเส้นใยมะพร้าว

PROPERTY IMPROVEMENT OF RECYCLED PLASTIC PELLETS FROM HIGH DENSITY POLYETHYLENE WASTE WITH COCONUT FIBER

จิตรา รู้กิจการพานิช[1] และปาณิสรา จันทรา[2]
[1]รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
[2]นิสิตปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
*Corresponding author, E-Mail: jittra.r@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากขยะHDPEด้วยเส้นใยมะพร้าว ขยะHDPE ได้มาจากขวดน้ำยาซักผ้าและขวดยาสระผมที่ใช้งานแล้ว ตัวประสานใช้ Polyethylene-grafted-Maleic Anhydride (PE-g-MA) วัตถุดิบทั้งหมดจะถูกบดและผสมกันในอัตราส่วนระหว่าง HDPE : PE-g-MA : เส้นใยมะพร้าว เป็น 50:5:45, 60:5:35 , 70:5:25, 80:5:15 และ 90:5:5 โดยน้ำหนัก และนำมาหลอมรวมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM ประกอบด้วยการทดสอบคุณสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็งผิว และการทดสอบทางกายภาพได้แก่ การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก โดยแยกออกเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด และนำอัตราส่วนนั้นไปทดลองคุณสมบัติกับการผลิตในโรงงาน พบว่า ที่อัตราส่วน 90:5:5 เป็นอัตราส่วนที่ได้คุณสมบัติใกล้เคียงกับเม็ดพลาสติกจากขยะ HDPE ที่100% และสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นพาเลทพลาสติก

คำสำคัญ : เม็ดพลาสติกรีไซเคิล; ขยะHDPE; การปรับปรุงคุณสมบัติเม็ดพลาสติก; เส้นใยมะพร้าว

ABSTRACT

This research aimed to improve the properties of recycled HDPE plastic pellets using coconut fiber as a reinforcing material. The recycled HDPE was obtained from post-consumer detergent bottles and shampoo bottles. Polyethylene-grafted Maleic Anhydride (PE-g-MA) was used as a compatibilizer. All raw materials were ground and mixed at the following weight ratios of HDPE: PE-g-MA: coconut fiber: 50:5:45, 60:5:35, 70:5:25, 80:5:15, and 90:5:5. The mixtures were then melt-blended using a twin-screw extruder at a temperature of 180°C. Subsequently, the samples were tested according to ASTM standards. The mechanical properties evaluated included tensile test, impact test, and hardness test. The physical property tested was the melt flow index (MFI). The research was divided into two stages: laboratory-scale experiments to determine the optimal mixing ratio, followed by validation of the selected ratio under production conditions in the factory. The results indicated that the composition ratio of 90:5:5 provided properties most comparable to those of 100% recycled HDPE. Moreover, this formulation could be successfully processed into plastic pallets, demonstrating its potential for practical industrial applications.

Jittra Rukijkanpanich[1] and Panisara Juntra[2]
[1]Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
[2]Master's Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

KEYWORDS : recycled plastic pellets; HDPE waste; plastic pellet property improvement; coconut fiber

1. บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกแต่เป็นสาเหตุหลักของมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบนิเวศอย่างรุนแรง จากข้อมูลของ ในปี 2025 UNEP [1] ระบุว่าขยะพลาสติกคิดเป็นประมาณ 10% ของขยะมูลฝอยทั่วโลก โดยในปี 2024 มนุษย์ผลิตขยะพลาสติกมากกว่า 400 ล้านตัน และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 408 ล้านตัน ในปี 2025 การนำพลาสติกมารีไซเคิลจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการลดปัญหาการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และลดปริมาณขยะพลาสติกที่ทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อม การส่งเสริมการรีไซเคิลพลาสติกจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อสร้างสังคมที่ยั่งยืนและรักษาสิ่งแวดล้อมให้คงอยู่สำหรับคนรุ่นต่อไป

เม็ดพลาสติกเป็นต้นน้ำของอุตสาหกรรมพลาสติกซึ่งเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ต้องเร่งปรับตัวรับประเด็นความยั่งยืน (Sustainability) ที่ทั่วโลกให้ความสำคัญท่ามกลางการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสุดขั้ว (Climate Change) จากการศึกษาพบว่ามีการเปรียบเทียบเส้นใยเหลือใช้จากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยมะพร้าว เส้นใยกากทะลายปาล์มน้ำมัน และเส้นใยซังข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีจำนวนมาก นำมาใช้เสริมแรงในพลาสติกรีไซเคิลโดยผลจากการศึกษาพบว่าเส้นใยมะพร้าวมีปริมาณลิกนิน (lignin) มากที่สุด [2] ทำให้ เส้นใยมะพร้าวสามารถยึดเกาะกับพอลิเมอร์พลาสติกได้ดีกว่าเส้นใยกากทะลายปาล์มน้ำมันและเส้นใยซังข้าวโพด จึงมีความเป็นไปได้ว่าหากนำเส้นใยมะพร้าวมาใช้เป็นตัวเสริมแรงในพลาสติกรีไซเคิลย่อมเป็นการปรับปรุงค่าสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นได้ โดยงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์อัตราส่วนของวัสดุเชิงประกอบจากพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) และเส้นใยมะพร้าวเพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติกรีไซเคิล ทั้งนี้ใช้ตัวประสานเป็น Polyethylene-grafted-Maleic Anhydride (PE-g-MA)

เมื่อได้อัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วจะนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พาเลทพลาสติก เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับพลาสติกรีไซเคิลและรองรับการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

ขอบเขตของการศึกษานี้ครอบคลุมการทดสอบคุณสมบัติทางกล ได้แก่ กำลังรับแรงดึง แรงกระแทก และความแข็ง รวมถึงสมบัติการไหล (Melt Flow Index) โดยทำการทดลองทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับโรงงาน

2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials)

วัสดุคอมโพสิต คือ วัสดุที่ประกอบด้วยส่วนผสมวัสดุตั้งแต่สองชนิดหรือมากกว่าที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันโดยมีการจัดเรียงในลักษณะที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความทนทาน การเลือกสัดส่วนของส่วนประกอบ (Volume Fraction of Components) หรือสัดส่วนของวัสดุที่ใช้ในคอมโพสิตจะส่งผลต่อคุณสมบัติสุดท้ายของวัสดุ ตัวอย่างเช่น การเพิ่มปริมาณเส้นใยในคอมโพสิตสามารถเพิ่มความแข็งแรงและความทนทาน แต่การใช้ปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปอาจทำให้วัสดุมีความเปราะและลดความยืดหยุ่น ดังนั้นการควบคุมสัดส่วนของเมทริกซ์พลาสติกและเส้นใยมีความสำคัญในการออกแบบวัสดุคอมโพสิตให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ [3]

2.2 การเสริมแรงด้วยใยธรรมชาติ (Natural Fiber Reinforcement)

การใช้ใยธรรมชาติ เช่น ใยมะพร้าวเป็นวัสดุเสริมแรงในพลาสติกรีไซเคิลช่วยเพิ่มความแข็งแรงและลดน้ำหนักของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างใยและเมทริกซ์พลาสติก [4]

2.2.1 การเพิ่มความแข็งแรงและความทนทาน

เส้นใยธรรมชาติที่เสริมในเมทริกซ์พลาสติกหรือโพลิเมอร์จะช่วยกระจายแรงที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกใช้งานหรือได้รับแรงกระทำ ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงสูงขึ้น เช่น กำลังรับแรงดึง ความทนทานต่อการดัด และความทนทานต่อแรง ซึ่งจะช่วยให้วัสดุทนทานต่อความเค้นหรือแรงต่าง ๆ ได้ดีขึ้น

2.2.2 การกระจายแรง

เส้นใยธรรมชาติสามารถกระจายแรงที่เกิดขึ้นจากการใช้วัสดุ เช่น เมื่อเกิดการดึงหรือการบีบตัว เส้นใยธรรมชาติจะช่วยให้แรงกระจายออกไปแทนที่จะสะสมอยู่ที่จุดเดียว ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้นโดยการผสมเส้นใยธรรมชาติในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เส้นใยที่มีความยาวแตกต่างกัน หรือสัดส่วนที่ต่างกัน สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในการกระจายแรงและเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุได้

2.2.3 การเพิ่มความยืดหยุ่นและความทนทาน

เส้นใยธรรมชาติช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับวัสดุคอมโพสิต โดยทำให้วัสดุสามารถรับแรงดึงหรือการดัดได้ดีขึ้น และไม่เปราะหรือแตกง่ายเมื่อมีการใช้งาน นอกจากนี้เส้นใยยังสามารถเพิ่มความทนทานของวัสดุต่อสภาพแวดล้อม เช่น ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากแสงแดด ความชื้น หรือสารเคมี

2.2.4 การปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อน

การเสริมใยธรรมชาติในโพลิเมอร์บางชนิดอาจช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อน เช่น ความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับความร้อน เส้นใยธรรมชาติช่วยลดการขยายตัวเมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะในวัสดุที่ต้องใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง

2.2.5 ประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม

เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่ยั่งยืนและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งช่วยลดการใช้วัสดุพลาสติกสังเคราะห์ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้เส้นใยธรรมชาติในการผลิตวัสดุคอมโพสิตทำให้วัสดุที่ได้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และลดการสะสมของพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้

2.3 การยึดเกาะระหว่างวัสดุ (Interfacial bonding)

การยึดเกาะระหว่างใยธรรมชาติและเมทริกซ์พลาสติกมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต การใช้สารเคมีในการปรับปรุงการยึดเกาะสามารถเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุได้ เช่น Polyethylene-grafted-Maleic Anhydride (PE-g-MA) [5] เป็นสารประสานที่มีบทบาทในการปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างวัสดุต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตคอมโพสิตหรือวัสดุที่มีเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยมะพร้าว หรือเส้นใยลิกโนเซลลูโลส กับโพลิเมอร์ เช่น HDPE (High-Density Polyethylene) โดยเฉพาะในกรณีที่การยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติและโพลิเมอร์ค่อนข้างอ่อนแอ เพราะเส้นใยธรรมชาติมักมีความชุ่มน้ำ (hydrophilic) ซึ่งไม่สามารถยึดเกาะได้ดี [6]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

กระบวนการดำเนินการทดลองของวิจัยเริ่มตั้งแต่การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ กระบวนการผสมโดยเครื่องหลอมตามอัตราส่วนและอุณหภูมิที่กำหนด กระบวนการอัดขึ้นรูป เมื่อได้ชิ้นงานแล้วจึงนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ มาตรฐาน

3.1 วัสดุ

1) วัสดุที่ใช้เป็นขยะพลาสติกรีไซเคิลชนิดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) นำมาล้างทำความสะอาดและตัดให้ได้ขนาดเล็กที่สามารถนำเข้าเครื่องบดเพื่อให้มีขนาดเล็กลงไปอีก

2) ทำการเตรียมเส้นใยมะพร้าวสามารถทำได้โดยตัดเป็นชิ้นเล็กๆนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงจากนั้นนำไปแช่ NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 10 จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3) สารประสาน PE-g-MA ทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับเส้นใยมะพร้าวยึดติดได้ดียิ่งขึ้นเมื่อผสมวัสดุ ทั้ง 2 อย่าง เข้าด้วยกัน [7]

3.2 อุปกรณ์ ประกอบด้วย

1) เครื่องบดพลาสติกใช้ลดขนาดพลาสติกให้เป็นชิ้นเล็กเพื่อให้ผสมได้ง่าย 2) เครื่องบดใยมะพร้าวใช้บดเส้นใยมะพร้าวให้ละเอียดและสม่ำเสมอ 3) ตะแกรงร่อนใช้คัดแยกขนาดวัสดุให้เท่ากันตามที่ต้องการ 4) ตู้อบใช้ไล่ความชื้นออกจากวัสดุก่อนการผลิต 5) เครื่องผสมอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder)ใช้ผสมและหลอมวัสดุให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ 6) เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding)ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานโดยอัดวัสดุในแม่พิมพ์ด้วยความร้อนและแรงดัน 7) เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ใช้วัดความแข็งแรงเมื่อชิ้นงานถูกดึง 8) เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Izod Impact Test)ใช้วัดความทนต่อแรงกระแทกของวัสดุ 9) เครื่องทดสอบความแข็ง (Shore D Durometer)ใช้วัดความแข็งของวัสดุพลาสติก 10) เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Index)ใช้วัดความสามารถในการไหลของพลาสติกเมื่อหลอม 11) เครื่องบากชิ้นงานใช้ทำรอยบากเพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงกระแทก 12) เครื่องชั่งดิจิตอล (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง)ใช้ชั่งน้ำหนักวัสดุอย่างแม่นยำ 13) ขยะพลาสติกชนิด HDPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลดีและสามารถนำกลับมาแปรรูปใหม่ได้จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุเมทริกซ์ในการศึกษาการผลิตวัสดุคอมโพสิตร่วมกับเส้นใยธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่1

รูปที่ 1 ขยะพลาสติกชนิด HDPE

3.3 การดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ

1) นำขยะพลาสติกชนิด HDPE ที่ผ่านการใช้งานแล้วรวมถึงได้ทำการล้างและทำการบดตัดหรือตัดหยาบให้มีขนาด 10-20 มิลลิเมตร (flake form) จากทางโรงงานให้มีขนาดเล็กนำมาเข้าเครื่องบดชนิดตัดโม่ให้พลาสติกมีความละเอียดเพื่อเตรียมผสม

2) การเตรียมเส้นใยมะพร้าวสามารถทำได้โดยการตัดให้มีความยาว 3 มิลลิเมตรจากนั้นนำไปแช่โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)เป็นเวลา 2ชั่วโมง เพื่อให้เส้นใยนิ่มและสะอาด ความเข้มข้นร้อยละ 10 จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น และอบที่อุณหภูมิ 90 °C จนความชื้นคงที่ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำเส้นใยมาบด

3) ชั่งวัสดุรวม 100 กรัมต่อชุดการทดลอง โดยคำนวณตามอัตราส่วนโดยน้ำหนัก และใช้เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.01 กรัมประกอบด้วยผงเส้นใยมะพร้าวและขยะพลาสติกชนิด HDPE ที่ผ่านการบดแล้วตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้และเติมสารประสาน PE-g-MA ลงไป เป็นไปตามอัตราส่วนที่ต้องการทดลอง โดยจะทำการทดลองอย่างละ 5 ครั้ง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการทดลอง

อัตราส่วนผสม (ขยะพลาสติกชนิด HDPE : PE-g-MA : เส้นใยมะพร้าว) ร้อยละโดยน้ำหนัก			
ลำดับ	**ขยะพลาสติกชนิด HDPE**	**PE-g-MA**	**เส้นใยมะพร้าว**
1	50	5	45
2	60	5	35
3	70	5	25
4	80	5	15
5	90	5	5

4) ทำการผสมเบื้องต้นของ HDPE เส้นใยมะพร้าว และ PE-g-MA ให้เข้ากันก่อนนำเข้าเครื่องอัดรีดหลอมรวมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ตามแต่ละอัตราส่วนและอุณหภูมิที่ 180 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการ ผสม 15 นาที ความเร็วของโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที ใช้เวลาผสมทั้งหมด 15 นาที เมื่อผสมเสร็จนำส่วนผสมออก ทำการนำไปอัดขึ้นรูปใช้เวลาในการอัด 10 นาที

5) นำชิ้นงานไปทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM ประกอบด้วยการทดสอบคุณสมบัติทางกล ได้แก่ 1.การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM International D638 โดยใช้ชิ้นทดสอบชนิด Type I ที่อุณหภูมิ 23 ± 2°C และความเร็ว crosshead 50 mm/min 2.การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) การทดสอบแรงกระแทก ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D256 (Izod impact test) โดยใช้ชิ้นทดสอบแบบมีรอยบาก (notched specimen) ที่อุณหภูมิห้อง 3.การทดสอบความแข็งผิว (Hardness Test)ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้ Shore Durometer ชนิด D และการทดสอบทางกายภาพได้แก่ 4.การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (Melt flow index Test) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1238 ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 190°C และโหลด 2.16 kg

3.4 การดำเนินการทดลองผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิลในโรงงาน

เมื่อทราบว่าอัตราส่วนใดของการทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็งผิวและการทดสอบอัตราการไหลที่ได้จากการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการ ที่มีคุณสมบัติดีที่สุดแล้วจะนำอัตราส่วนนั้นมาใช้ในกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกรีไซเคิลในโรงงานแล้วทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ อีกครั้ง จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้จากทางโรงงานเทียบกับกรณีก่อนปรับปรุงที่ไม่ได้มีเส้นใยมะพร้าว โดยใช้อุณหภูมิการหลอมของโรงงานคือ 180 องศาเซลเซียส [8]

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

จากผลการทดสอบแรงดึงของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลในแต่ละอัตราส่วน พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีบทบาทสำคัญในการเสริมแรงให้กับเมทริกซ์ HDPE โดยช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงดึง (MPa)

อัตราส่วน ขยะพลาสติกชนิด HDPE : PE-g-MA : เส้นใยมะพร้าว					
ครั้งที่	**50:5:45**	**60: 5:35**	**70: 5: 25**	**80: 5: 15**	**90:5:5**
1	25.61	26.57	28.22	28.54	32.75
2	25.76	26.04	28.07	29.09	31.67
3	25.58	26.48	28.15	28.65	31.41
4	25.74	26.43	27.98	29.67	32.92
5	25.67	26.04	28.21	29.12	33.14
ค่าเฉลี่ย	25.68	26.31	28.13	29.01	32.38

จากตารางที่ 2 ที่อัตราส่วน 50:5:45 มีค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด คือ 25.68 MPa ที่อัตราส่วน 60:5:35 มีค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยสูงขึ้นเป็น 26.31 MPa ที่อัตราส่วน70:5:25 มีค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยสูงเป็น 28.13 MPa ที่อัตราส่วน 80:5:15 มีค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยสูงเป็น 29.01 MPa และที่อัตราส่วน 90:5:5 มีค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 32.38 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่ากำลังรับแรงดึงยิ่งมีค่ามากเป็นคุณสมบัติที่ดีของเม็ดพลาสติกรีไซเคิล

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยลดลงเหลือ5% และเมื่อเทียบกับค่ากำลังรับแรงดึงของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากทางโรงงานที่ซึ่งมีค่า 28.24 MPa สรุปได้ว่า ที่อัตราส่วน 90:5:5 มีค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณอัตราส่วนของเนื้อพลาสติกมากกว่าซึ่งมีลักษณะที่เป็นเนื้อหลักที่แข็งแรงและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของเส้นใยมะพร้าวเล็กน้อยเพราะใยมะพร้าวเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดี เช่น ความแข็งแรง และ ความต้านทานการดึง ซึ่งสามารถเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุพลาสติกได้ การเติมเส้นใยมะพร้าวในปริมาณที่เหมาะสมสามารถช่วยเสริมความแข็งแรงดึงของวัสดุได้ เนื่องจากเส้นใยทำหน้าที่เป็นตัวรับและกระจายแรงภายในโครงสร้างคอมโพสิต [9,10] อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นมากเกินไป พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการรวมตัวของเส้นใย (agglomeration) และการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ รวมถึงการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ HDPE ที่ลดลง ส่งผลให้การถ่ายโอนแรงไม่ต่อเนื่องและเกิดจุดอ่อนภายในวัสดุ

4.2 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test)

จากผลการทดสอบแรงกระแทกของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลในแต่ละอัตราส่วน พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีบทบาทสำคัญในการช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุโดยทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรงและช่วยกระจายแรงกระแทกภายในโครงสร้างคอมโพสิต ส่งผลให้วัสดุมีความเหนียวและทนต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยที่เหมาะสม เนื่องจากการมีเส้นใยในปริมาณที่พอดีจะช่วยให้เกิดการยึดเกาะที่ดีระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ HDPE ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแรงกระแทก (kJ/m^2)

อัตราส่วน ขยะพลาสติกชนิด HDPE : PE-g-MA : เส้นใยมะพร้าว					
ครั้งที่	**50:5:45**	**60: 5: 35**	**70: 5: 25**	**80: 5 :15**	**90:5:5**
1	6.76	6.89	7.40	8.98	10.54
2	6.33	7.27	7.56	9.21	10.75
3	6.98	6.95	7.11	9.06	10.82
4	6.50	7.34	7.85	9.52	10.69
5	6.81	7.16	7.32	9.36	11.01
ค่าเฉลี่ย	6.68	7.12	7.45	9.21	10.77

จากตารางที่ 3 ที่อัตราส่วน 50:5:45 มีค่าทดสอบแรงกระแทกเฉลี่ย 6.68 kJ/m^2ที่อัตราส่วน 60:5:35 มีค่าทดสอบแรงกระแทกเฉลี่ย 7.12 kJ/m^2 ที่อัตราส่วน 70:5:25 มีค่าทดสอบแรงกระแทกเฉลี่ย 7.45 kJ/m^2 ที่อัตราส่วน 80:5:15 มีค่าทดสอบแรงกระแทกเฉลี่ย 9.21kJ/m^2และที่อัตราส่วน 90:5:5มีค่าทดสอบแรงกระแทกเฉลี่ย 10.77 kJ/m^2

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าทดสอบแรงกระแทกจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยลดลงเหลือ5% และเมื่อเทียบกับค่าทดสอบแรงกระแทกของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากทางโรงงานที่ซึ่งมีค่า 9.72 kJ/m^2สรุปได้ว่า ที่อัตราส่วน 90:5:5 มีค่าทดสอบแรงกระแทกเฉลี่ยมากที่สุดเนื่องจากมีการยึดติดของเนื้อพลาสติกมากขึ้นปริมาณพลาสติกที่เพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยมะพร้าวสามารถยึดเกาะให้เป็นเนื้อเดียวกัน [11]

4.3 การทดสอบความแข็งผิว (Hardness Test)

จากผลการทดสอบความแข็งผิวของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลในแต่ละอัตราส่วน พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีบทบาทในการเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุ เนื่องจากลักษณะของเส้นใยที่มีความแข็งและสามารถเสริมโครงสร้างภายในของคอมโพสิตได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้นมากเกินไปอาจส่งผลให้วัสดุมีความเปราะเพิ่มขึ้นและลดความยืดหยุ่น ดังนั้นการควบคุมปริมาณเส้นใยให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การทดสอบความแข็งผิว (หน่วยเป็น Shore D)

อัตราส่วน ขยะพลาสติกชนิด HDPE : PE-g-MA : เส้นใยมะพร้าว					
ครั้งที่	**50:5:45**	**60: 5: 35**	**70: 5: 25**	**80: 5: 15**	**90:5:5**
1	75.53	72.64	70.54	66.50	67.03
2	76.0	72.43	64.38	67.32	66.05
3	75.80	72.18	68.21	67.89	66.52
4	76.24	73.65	70.84	68.31	65.91
5	74.91	73.70	70.40	68.52	67.14
ค่าเฉลี่ย	75.70	72.92	68.87	67.75	66.53

จากตารางที่ 4 ที่อัตราส่วน 50:5:45 มีค่าทดสอบความแข็ง เฉลี่ย 75.70 ที่อัตราส่วน 60:5:35 มีค่าทดสอบความแข็งเฉลี่ยลดลงเป็น 72.92 ที่อัตราส่วน 70:5:25 มีค่าทดสอบความแข็งเฉลี่ย 68.87 ที่อัตราส่วน 80:5:15 มีค่าทดสอบความแข็งเฉลี่ย 67.75 และที่อัตราส่วน 90:5:5 มีค่าทดสอบความแข็งเฉลี่ย 66.53

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าทดสอบความแข็ง จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวเพิ่มมากขึ้นและเมื่อเทียบกับค่าทดสอบความแข็งของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากทางโรงงานที่ซึ่งมีค่า 62.75 Shore D สรุปได้ว่า ที่อัตราส่วน 50:5:45 มีค่าทดสอบความแข็งเฉลี่ยมากที่สุดเนื่องจาก เส้นใยมีความแข็งสูง เมื่อผสมลงไปในวัสดุเชิงประกอบจะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งสูงขึ้นสามารถทนแรงกดได้ดีขึ้นส่งผลให้มีค่าความแข็งผิวเพิ่มมากขึ้น ความแข็งของ HDPE โดยทั่วไปอยู่ในช่วงประมาณ 60–70 Shore D [12] ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงและความทนทาน เช่น ชิ้นงานประเภทพาเลทพลาสติก (Plastic Pallet) หากแข็งเกินไปอาจเสี่ยงแตกหรือเปราะเมื่อตก หรือรับแรงเฉือน (shear) หรือแรงกดซ้ำ ๆ

4.4 ผลการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Index Test)

จากผลการทดสอบอัตราการไหลของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลในแต่ละอัตราส่วน พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของวัสดุ โดยการเติมเส้นใยจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ถูกจำกัด ส่งผลให้อัตราการไหลลดลง อย่างไรก็ตามหากใช้เส้นใยในปริมาณที่เหมาะสมจะยังคงสามารถรักษาความสามารถในการไหลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการขึ้นรูปได้ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (หน่วยเป็น g/10 min) 190°C/2.16kg

อัตราส่วน ขยะพลาสติกชนิด HDPE : PE-g-MA : เส้นใยมะพร้าว					
ครั้งที่	**50:5:45**	**60: 5: 35**	**70: 5 :25**	**80: 5: 15**	**90:5:5**
1	1.87	1.63	3.54	3.76	4.27
2	0.67	1.68	3.61	3.88	4.51
3	0.54	2.82	2.51	3.67	5.02
4	0.32	1.04	2.72	3.83	4.43
5	0.77	1.06	2.12	3.62	5.15
ค่าเฉลี่ย	0.83	1.65	2.70	3.76	4.68

จากตารางที่ 5 ที่อัตราส่วน 50:5:45 มีค่าการทดสอบอัตราการไหลเฉลี่ย 0.83 g/10 min ที่อัตราส่วน 60:5:35 มีทดสอบอัตราการไหลเฉลี่ย 1.65 g/10 min ที่อัตราส่วน 70:5:25 มีค่าทดสอบอัตราการไหลเฉลี่ย 2.70 g/10 min ที่อัตราส่วน 80:5:15 มีค่าทดสอบอัตราการไหลเฉลี่ย 3.76 g/10 min และที่อัตราส่วน 90:5:5 มีค่าทดสอบอัตราการไหลเฉลี่ย 4.68 g/10 min

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า เมื่อมีเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าดัชนีการไหลลดลงและมีการขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเมื่อมีส่วนผสมของเส้นใยมากเกินไปและเมื่อเทียบกับค่าของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากทางโรงงานที่ซึ่งมีค่า 5.83 g/10 min ทั้งนี้ค่า Melt Flow Index Test ที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นพาเลทพลาสติก ควรมีค่า 2 – 6 g/10 min เป็นการไหลที่พอเหมาะ [13] ในเกณฑ์ที่จะสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นพาเลทพลาสติก ที่ได้จากการรีไซเคิลต่อไปได้ งานวิจัยนี้พบว่าอัตราส่วนที่ 90: 5: 5 มีค่าดัชนีการไหลมากที่สุดซึ่งทำให้นำไปขึ้นรูปได้ง่าย

ผลการทดสอบทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยมะพร้าวในสัดส่วนสูง (15–45%) ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงและแรงกระแทกลดลงเมื่อเทียบกับสัดส่วนเส้นใยต่ำ (5%) ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ไม่สม่ำเสมอ และการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับ HDPE อาจไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดจุดอ่อนภายในวัสดุการเพิ่มปริมาณเส้นใยมากเกินไปยังอาจทำให้เกิดช่องว่าง (voids) และการสะสมความชื้นในเส้นใย ซึ่งเป็นปัจจัยที่ลดความสามารถในการรับแรงและเพิ่มความเปราะของวัสดุ ในขณะที่สมบัติเชิงกลด้านกำลังรับแรงดึงและแรงกระแทกลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย พบว่าค่าความแข็ง (Hardness) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวมีลักษณะเป็นเฟสแข็ง (rigid phase) ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกดของพื้นผิววัสดุ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความแข็งดังกล่าวมักมาพร้อมกับความเปราะที่เพิ่มขึ้นนอกจากนี้ ผลการทดสอบดัชนีการไหล (MFI) แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ค่า MFI ลดลง เนื่องจากเส้นใยทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ในสถานะหลอม ส่งผลให้การไหลของวัสดุและความสามารถในการขึ้นรูปลดลง

จึงอภิปรายผลได้ว่า ปริมาณเส้นใยมะพร้าวในระดับต่ำ (เช่น 5% โดยน้ำหนัก) ร่วมกับการใช้สารประสาน (compatibilizer) ให้สมดุลของสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ค่ากำลังรับแรงดึงและแรงกระแทกสูงขณะที่ยังคงความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี

4.5 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลก่อนและหลังนำเส้นใยมะพร้าวเข้ามาผสม

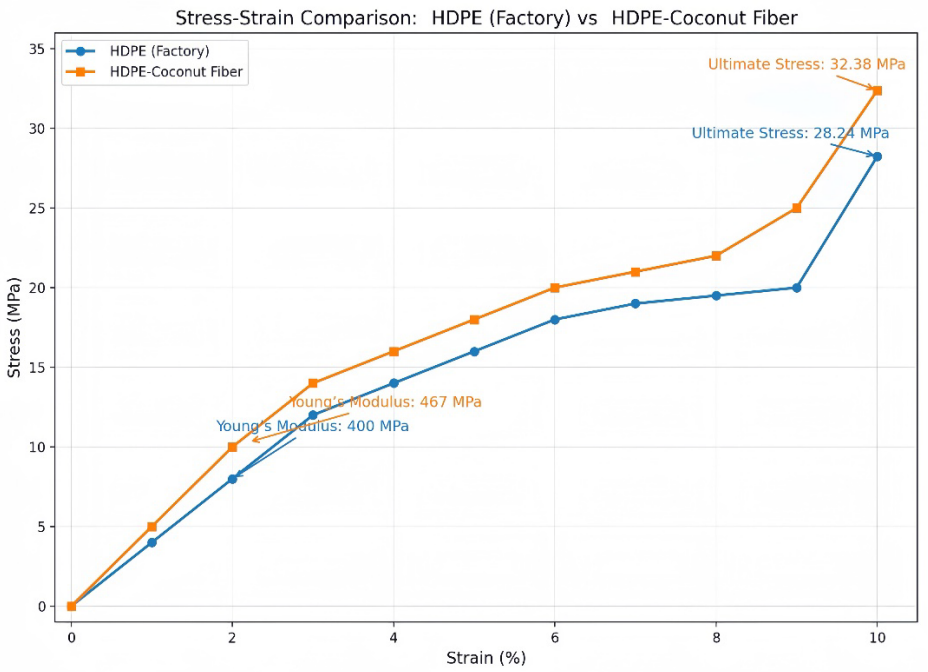
จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลก่อนและหลังการเติมเส้นใยมะพร้าว พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยช่วยเพิ่มความแข็งแรงดึงและความทนต่อแรงกระแทก รวมถึงช่วยปรับค่าความแข็งให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเส้นใยที่ใช้ ซึ่งต้องมีความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าการทดสอบคุณสมบัติทางกลของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลก่อนและหลังนำเส้นใยมะพร้าวเข้ามาผสม

การทดสอบคุณสมบัติ	**ขยะพลาสติกชนิด HDPE 100% จากทางโรงงาน**	**ขยะพลาสติกชนิด HDPE : PE-g-MA : เส้นใยมะพร้าว อัตราส่วน 90: 5: 5 (การทดลองในห้องปฏิบัติการ)**	**ขยะพลาสติกชนิด HDPE : : PE-g-MA : เส้นใยมะพร้าว อัตราส่วน 90: 5: 5 (การทดลองผลิตในโรงงาน)**
ทดสอบสมบัติการทนแรงดึง (Tensile Test)	28.24 MPA	32.38 MPA	31.64 MPA
การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test)	9.72 kJ/m^2	10.77 kJ/m^2	9.82 kJ/m^2
การทดสอบความแข็ง (Hardness test)	62.75 Shore D	66.53 Shore D	66.07 Shore D
การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Index Test ,MFI)	5.83 g/10 min	4.68 g/10 min	4.51 g/10 min

จากผลการทดสอบที่อัตราส่วน 90:5:5 พบว่า การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก มีค่ามากที่สุด และมีค่าทดสอบความแข็ง อยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงนำอัตราส่วนนี้มาใช้และเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจากทางโรงงานก่อนนำเส้นใยมะพร้าวเข้ามาผสม

จากรูปที่ 2 พบว่า ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Stress) ได้แสดงถึงความเค้นที่วัสดุต้านทานได้สูงสุด [14] ที่ 28.24 MPa สำหรับ ขยะพลาสติกชนิด HDPE 100% จากทางโรงงาน และ 31.64 MPa สำหรับ ขยะพลาสติกชนิด HDPE ผสมเส้นใยมะพร้าว จากช่วงเริ่มต้น (Elastic Region) ซึ่ง ขยะพลาสติกชนิด HDPE จากทางโรงงาน มีค่าโมดูลัส (Young's Modulus) 400 MPa และ ขยะพลาสติกชนิด HDPE -เส้นใยมะพร้าว มีค่าโมดูลัส 467 MPa แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของวัสดุทั้งสองชนิด โดย ขยะพลาสติกชนิด HDPE ผสมเส้นใยมะพร้าว มีทั้งความแข็งแรงสูงกว่าและสามารถต้านทานการยืดได้ดีกว่า ขยะพลาสติกชนิด HDPE 100% จากโรงงาน



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบ Stress-Strain ระหว่าง ขยะพลาสติกชนิด HDPE โรงงาน และ ขยะพลาสติกชนิด HDPE ผสมเส้นใยมะพร้าว

5. สรุปผล

จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนขยะพลาสติกชนิดHDPE : PE-g-MA : เส้นใยมะพร้าว = 90:5:5 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการปรับปรุงคุณสมบัติของเม็ดพลาสติกรีไซเคิล HDPE ที่เหมาะกับการนำเม็ดพลาสติกไปขึ้นรูปเป็นพาเลทพลาสติก เนื่องจาก

1) การเติมเส้นใยมะพร้าวช่วยเพิ่มความแข็งแรงดึงได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากเส้นใยทำหน้าที่เสริมแรงให้กับวัสดุ แต่หากเติมมากเกินไปจะทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง

2) ค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อเติมเส้นใยมะพร้าว แสดงว่าวัสดุสามารถดูดซับพลังงานได้ดีขึ้นและมีความเหนียวมากขึ้น ทนแรงกระแทกได้ดีขึ้น

3) จากการทดสอบความแข็งจะเห็นว่าเมื่อเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้นตาม แต่จะมีคุณสมบัติเปราะตามมาเช่นกันหากมีอัตราส่วนของเส้นใยมะพร้าวมากเกินไป

4) การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกพบว่า การเติมเส้นใยมะพร้าวทำให้อัตราการไหลลดลงเล็กน้อยแต่ยังอยู่ในเกณฑ์เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปได้ พาเลทที่ได้จะแข็งแรงขึ้น ทนแรงกดและแรงกระแทกได้ดีขึ้น

ดังนั้นสูตรขยะพลาสติกชนิด HDPE : PE-g-MA : เส้นใยมะพร้าว ที่ 90: 5: 5 สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของเม็ดพลาสติกรีไซเคิล HDPE ให้ แข็งแรงขึ้น ทนทานต่อแรงกระแทกดีขึ้น และมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยไม่ทำให้วัสดุเปราะจนเกินไป นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปเป็น พาเลทพลาสติกได้โดยไม่มีปัญหาการไหลที่ยากเกินไป และวัสดุที่ได้มีความแข็งแรงและทนทานต่อการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งเหมาะสมสำหรับการผลิตพาเลทพลาสติกที่มีคุณภาพสูงขึ้นจากขยะพลาสติกรีไซเคิล

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะ 2 ประการ ดังนี้

1) ในการศึกษาความทนทานของวัสดุในสภาพแวดล้อมจริงควรนำวัสดุไปทดสอบการใช้งานจริง เช่น การรับแรงในระยะยาว การทนต่อรังสี UV ความชื้น และอุณหภูมิสูง เพื่อประเมินอายุการใช้งานของพาเลทพลาสติกในสภาพแวดล้อมภาคสนามจะช่วยให้ข้อมูลใกล้เคียงการใช้งานจริงมากขึ้น และสามารถนำผลไปใช้ในอุตสาหกรรมได้จริง

2) ในการทดลองนี้ใช้สารช่วยยึดเกาะ (Compatibilizer) หรือสารประสาน PE-g-MA ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับสารประสานอื่น เช่น EVA-g-MA เพื่อประเมินผลต่อการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ สารแต่ละชนิดมีหมู่ฟังก์ชันและระดับการเกิดพันธะกับเส้นใยแตกต่างกัน อาจเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีกว่า

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ให้คำปรึกษา อาจารย์ และเพื่อนร่วมงานทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษาและทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วง ขอขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่โรงงานพลาสติกรีไซเคิล ที่ให้การสนับสนุนด้านวัสดุและข้อมูลในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งให้โอกาสในการเข้าศึกษาดูงานกระบวนการผลิตภายในโรงงานขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญประจำห้องปฏิบัติการคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทดสอบเชิงกล ขอขอบคุณบุคลากรของห้องปฏิบัติการของโรงงานฉีดขึ้นรูปพลาสติก P.C.T. ลาดบัวหลวง ที่ให้การสนับสนุนด้านการทดสอบเพิ่มเติมและให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

[1] United Nations Environment Programme. *Plastic pollution*, 2025. Available from: https://www.unep.org/topics/chemicals-and-pollution-action/plastic-pollution [Accessed 15 March 2025].

[2] Carrijo, O. A., Liz, R. S. de and Makishima, N. Fiber of green coconut shell as an agricultural substrate. *Horticultura Brasileira*, 2002, 20 (4), pp. 533–535.

[3] Composites KN. *Composite materials theory*. Available from: https://compositeskn.org/KPC/A100 [Accessed 15 March 2025].

[4] Alsubari, S., Zuhri, M. Y. M., Sapuan, S. M., Ishak, M. R., Ilyas, R. A. and Asyraf, M. R. M. Potential of natural fiber reinforced polymer composites in sandwich structures: A review on its mechanical properties. *Polymers*, 2022, 14 (17), 3698.

[5] Noranizan, I. and Ahmad, I. Effect of fiber loading and compatibilizer on rheological, mechanical and morphological behaviors. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 2012, 2 (2), pp. 31–41.

[6] Rao, J. and Zhou, Y. Revealing the interface structure and bonding mechanism of wood plastic composites based on recycled wood flour and polyethylene. *Polymers*, 2018, 10 (3), 266.

[7] Noranizan, I. A. and Ahmad, I. Effect of fiber loading and compatibilizer on rheological, mechanical and morphological behaviors. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 2012, 2 (2), pp. 31–41.

[8] Mol Group Chemicals. *HDPE product catalogue 2023: Recommended melt temperatures 180–220 °C*, 2023. Available from: https://molgroupchemicals.com/userfiles/catalog/hdpe/HDPE_Product_catalogue_2023_EN.pdf [Accessed 2 April 2024].

[9] Brahmakumar, M. and Rajendran, A. Coconut fibre reinforced polyethylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36 (10), pp. 1431–1442.

[10] Sabri, M., Mukhtar, A., Shahril, K. and Husseinsyah, S. Effect of compatibilizer on mechanical properties and water absorption behaviour of coconut fiber filled polypropylene composite. *Journal of Physical Science*, 2013, 24 (2), pp. 15–27.

[11] ศิรประภา ดีประดิษฐ์, ธนพล วงศ์พานิช และสุชานันท์ หาญพาณิชย์. สมบัติการทนต่อแรงกระแทกและสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนผสมเส้นใยกาบกล้วย. *วารสารวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี*, 2024, 18 (4), pp. 112–125.

[12] EL-Lene. *EL-Lene H5840B: High density polyethylene for blow molding*, 2021. Hardness = 66 Shore D, ASTM D2240. Available from: https://stavianchem.com/sites/default/files/product-specs/H5840B.pdf [Accessed 19 March 2026].

[13] General Polymer Service. *Recycling plastic granules: Understanding MFI ranges for different uses*. Available from: https://www.generalpolymerservice.com/recycling-plastic-granules-understanding-mfi-ranges-for-different-uses [Accessed 26 June 2025].

[14] Callister, W. D. *Materials science and engineering: An introduction*. 9th ed. New York: John Wiley & Sons, 2014.