

การลดของเสียในกระบวนการผลิตขวดน้ำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงโดยการ
นำเศษพลาสติก HDPE กลับมาใช้ใหม่

Reduction of Production Waste in High-Density Polyethylene (HDPE)
Water Bottle Manufacturing by Recycling Plastic Scraps

สมภาร ดอนจันดา¹ อมรรัตน์ พรประเสริฐ² ยุทธณรงค์ จงจันทร์³ ไวรุจน์ อิมโพ⁴ สิทธินัน บุญเลิศ⁵
กัม พรประเสริฐ⁶ ชนาธิป กาลจักร⁷ และ ดนัย สอนสุภาพ⁸*

^{1,4,5}สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
อ.เมือง จ.สกลนคร 47000

²สาขาวิชาการจัดการทั่วไป คณะบริหารธุรกิจและการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
อ.เมือง จ.อุบลราชธานี 34000

³สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์และกระบวนการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000

⁶สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และซัพพลายเชน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
อ.เมือง จ.อุบลราชธานี 34000

^{7,8}สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000
E-mail: Danai.so@Rmuti.ac.th*

Sompan Donchanda¹, Amonrat Pornprasert², Yuthanarong Jongjun³, Wairut Impho⁴, Sitthinan Boonlerd⁵,
Peema Pornprasert⁶, Chanathip Kalchuk⁷ and Danai Sornsuphap⁸*

^{1,4,5}Department of Mechanical and Production Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Sakon Nakhon Rajabhat University, Muang, Sakon Nakhon, 47000

²Department of General Management, Faculty of Business Administration and Management, Ubon Ratchatani
Rajabhat University, Ubon Ratchathani, 34000

³Department of Logistics and Process Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajanagarindra
Rajabhat University, Muang, Chachoengsao, 24000

⁶Department of Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchatani Rajabhat
University, Ubon Ratchathani, 34000

^{7,8}Department of Industrial Technical Education Faculty of Technical Education Rajamangala University
of Technology Isan Khonkaen Campus, Muang, Khonkaen, 40000
E-mail: Danai.so@Rmuti.ac.th*

Received 19 Sep 2025; Revised 11 Mar 2026

Accepted 16 Jun 2026; Available online 30 Jun 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตขวดน้ำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) โดยการนำเศษวัสดุจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดต้นทุนการผลิตซึ่งเดิมก่อให้เกิดความสูญเสียเฉลี่ยมากกว่า 110,000 บาทต่อเดือน การศึกษานี้ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องบดพลาสติกต้นแบบสำหรับย่อยเศษวัสดุ HDPE และทำการทดลองผสมเม็ดพลาสติก HDPE เกรด A กับเศษพลาสติกที่บดแล้วในอัตราส่วนที่ต่างกัน ได้แก่ 1:1, 2:1 และ 1:2 จากนั้นนำส่วนผสมไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) เพื่อผลิตขวดน้ำขนาด 20 ลิตร และเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 แบบ Type IV โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ชิ้นงานทดสอบในแต่ละอัตราส่วนเตรียมจำนวน 5 ตัวอย่าง การทดลองในแต่ละอัตราส่วนทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง และวิเคราะห์ผลโดยใช้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อให้ได้ข้อมูลการทดสอบที่มีความถูกต้อง

ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสม 1:1 และ 2:1 ให้ค่าความต้านทานแรงดึงอยู่ในช่วง 20–31 MPa ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของวัสดุ HDPE โดยอัตราส่วน 1:1 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถรักษาคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ไว้ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของวัสดุ ขณะที่อัตราส่วน 1:2 ให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่ามาตรฐาน ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการนำเศษพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ในสัดส่วนไม่เกิน 50% สามารถลดปริมาณของเสียจากกระบวนการผลิตได้ประมาณ 50% ส่งผลให้ต้นทุนจากการสูญเสียของ

คำหลัก: พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง กระบวนการเป่าขึ้นรูป พลาสติกกลับมาใช้ใหม่ คุณสมบัติเชิงกล การลดของเสียในกระบวนการผลิต

Abstract

This study aimed to reduce waste in the production process of high-density polyethylene (HDPE) water bottles by reusing plastic scraps generated during manufacturing. In the existing production system, plastic waste resulted in an average material loss of more than 110,000 THB per month. To address this issue, a prototype plastic grinder was designed and developed to process HDPE scraps for reuse. The recycled plastic was then mixed with virgin HDPE grade A pellets at different ratios of 1:1, 2:1, and 1:2. The mixtures were subsequently processed using the blow molding technique to produce 20-liter water bottles. Tensile test specimens were prepared according to ASTM D638 Type IV and tested using a Universal Testing Machine (UTM). Five specimens were prepared for each mixing ratio, and each experiment was repeated five times. The results were analyzed using mean values and standard deviations.

The experimental results indicated that the mixing ratios of 1:1 and 2:1 produced tensile strength values within the standard range of HDPE materials (20–31 MPa). Among the tested ratios, the 1:1 ratio was identified as the most suitable, as it maintained the mechanical properties of the product without compromising material strength. The results demonstrate that incorporating recycled HDPE at proportions up to 50% can reduce production waste by approximately 50% and decrease raw material losses from about 110,000 THB to approximately 55,000 THB per month. These findings highlight the potential of recycling plastic scraps to improve resource efficiency and support sustainable plastic manufacturing in industrial applications.

Keywords: High-Density Polyethylene (HDPE), Blow Molding Process, Plastic Recycling, Mechanical Properties, Production Waste Reduction

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์น้ำดื่ม มีบทบาทสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจและคุณภาพชีวิตของประชาชน เนื่องจากน้ำดื่มบรรจุขวดเป็นสินค้าที่มีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะขวดน้ำขนาด 20 ลิตร ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคครัวเรือนและภาคธุรกิจ เนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ (Refillable) มีต้นทุนต่อหน่วยต่ำ และสะดวกต่อการขนส่ง วัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตขวดน้ำประเภทดังกล่าวคือพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเกรด A (High-Density Polyethylene: HDPE) ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรง ทนต่อแรงกระแทก ไม่แตกง่าย ปลอดภัยต่อการบรรจุอาหาร และสามารถขึ้นรูปได้ดีด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) อย่างไรก็ตาม แม้ว่ากระบวนการผลิตด้วยเทคโนโลยีดังกล่าวจะสามารถผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในกระบวนการผลิตยังคงเกิดของเสียหรือเศษวัสดุจากหลายสาเหตุ เช่น ครีปพลาสติกจากแนวเชื่อมแม่พิมพ์ การตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่ไม่เหมาะสม การตัดแต่งขอบชิ้นงาน การเสื่อมสภาพของแม่พิมพ์ รวมถึงเศษวัสดุที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นหรือหยุดการทำงานของเครื่องจักร โดยเฉพาะในสายการผลิตขนาดใหญ่ เช่น โรงงานผลิตขวดน้ำขนาด 20 ลิตร ซึ่งอาจเกิดเศษพลาสติกเหลือทิ้งได้สูงถึงประมาณ 200 กรัมต่อขวด ส่งผลให้เกิดต้นทุนความสูญเสียเฉลี่ยมากกว่า 110,000 บาทต่อเดือน ดังนั้น การศึกษาการนำเศษพลาสติกจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ในสัดส่วนที่เหมาะสม จึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดของเสียและต้นทุนการผลิต โดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งนี้ เศษพลาสติกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตขวดน้ำ HDPE ขนาด 20 ลิตร สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เศษพลาสติกส่วนเกินจากตัวผลิตภัณฑ์ และของเสียที่ไม่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างเศษพลาสติก HDPE ที่เกิดจากกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดน้ำ

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาให้ความสำคัญกับการรีไซเคิลพลาสติก HDPE ในระดับวัสดุเป็นหลัก ขณะที่การประยุกต์ใช้เศษวัสดุจากกระบวนการผลิตจริงในอุตสาหกรรมการเป่าขึ้นรูปขวดน้ำขนาดใหญ่ยังมีการศึกษาอย่างจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำเศษพลาสติก HDPE กลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตจริง เพื่อประเมินผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการนำเศษพลาสติกที่เหลือจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ในอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม เพื่อลดการสูญเสียในกระบวนการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้วัตถุดิบ โดยยังคงรักษาคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตอย่างยั่งยืน

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมุ่งเน้นการรวบรวมองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการผลิตขวดน้ำจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ขนาด 20 ลิตร โดยเฉพาะเทคโนโลยีการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการผลิตภาชนะพลาสติกแบบกลวง จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตขวดน้ำขนาดใหญ่ เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระแทก และมีความปลอดภัยต่อการสัมผัส

อาหารและเครื่องดื่ม Dugo et al. (2020) [1] รายงานว่าการผลิตถังและขวดพลาสติกขนาด 20 ลิตรจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปสามารถนำวัสดุกลับมารีไซเคิลได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) โดยช่วยลดของเสียและเพิ่มการใช้วัตถุดิบรองในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ Goyal et al. (2014) [2] ได้ศึกษาการควบคุมพารามิเตอร์ของเครื่องเป่าขึ้นรูปสำหรับ HDPE และพบว่า การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ความเร็วรอบ และความดัน มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ขณะเดียวกัน Rosato (1990) [3] ได้อธิบายหลักการของกระบวนการเป่าขึ้นรูปไว้อย่างละเอียดในตำราด้านการแปรรูปพลาสติก โดยระบุว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเป็นหนึ่งในวัสดุที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตภาชนะพลาสติกขนาดใหญ่ เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงโครงสร้างและสามารถขึ้นรูปได้ดีในกระบวนการดังกล่าว จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการผลิตขวดน้ำขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

2.2 กระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding)

เป็นเทคนิคการขึ้นรูปพลาสติกที่นิยมใช้ในการผลิตภาชนะพลาสติกแบบกลวง เช่น ขวดน้ำหรือถังบรรจุของเหลว กระบวนการเริ่มจากการหลอมเม็ดพลาสติกให้กลายเป็นหลอดพลาสติกกึ่งสำเร็จรูป (Parison) จากนั้นจึงนำหลอดพลาสติกดังกล่าวไปวางภายในแม่พิมพ์ และทำการเป่าลมเข้าไปภายในหลอดพลาสติกเพื่อให้วัสดุขยายตัวและแนบสนิทกับผนังแม่พิมพ์ เมื่อวัสดุเย็นตัวจึงเปิดแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามรูปทรงที่ต้องการ สำหรับการผลิตขวดน้ำขนาดใหญ่ นิยมใช้กระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบอัดรีด (Extrusion Blow Molding) เนื่องจากสามารถผลิตภาชนะที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถควบคุมความหนาของชิ้นงานได้อย่างเหมาะสม ทั้งการตั้งค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ ความเร็วรอบของสกรู ความดันลม และระยะเวลาในการเป่า มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของ

ผลิตภัณฑ์ รวมถึงปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างการขึ้นรูปขวดน้ำจากเม็ดพลาสติก HDPE ด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding)

2.3 การทดสอบแรงดึงของพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงตามมาตรฐาน ASTM D638

การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นวิธีการพื้นฐานที่ใช้ในการประเมินสมบัติเชิงกลของวัสดุพลาสติก โดยเฉพาะความสามารถของวัสดุในการต้านทานแรงดึงก่อนที่จะเกิดการเสียรูปถาวรหรือการแตกหัก มาตรฐานที่นิยมใช้สำหรับการทดสอบวัสดุเทอร์โมพลาสติกแบบแข็งคือ ASTM D638 ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่กำหนดวิธีการทดสอบ รูปแบบชิ้นงาน การเตรียมตัวอย่าง และแนวทางการรายงานผลอย่างเป็นระบบ

สำหรับวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ถือว่าอยู่ในช่วงความหนาที่เหมาะสมตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM D638 ซึ่งกำหนดให้ความหนาของชิ้นงานอยู่ในช่วง 1.00–14.00 มิลลิเมตร ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ชิ้นงานทดสอบแบบ Type IV ซึ่งเหมาะสมสำหรับวัสดุที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางหรือวัสดุที่เตรียมมาจากผลิตภัณฑ์จริง (ASTM International, 2022) [4]

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดตามมาตรฐาน จากนั้นนำไปยึดกับเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine: UTM) แล้วทำการดึงชิ้นงานด้วยความเร็วประมาณ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ HDPE ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน การทดสอบนี้จะทำการวัดค่าความเค้น (Stress) และค่า

การยืดตัว (Strain) เพื่อใช้ในการคำนวณสมบัติเชิงกลที่สำคัญ ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength), การยืดตัวเมื่อขาด (Elongation at

Break) และมอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติแรงดึงของ HDPE (ความหนา 2 มม.) ตามมาตรฐาน ASTM D638

คุณสมบัติแรงดึง (Tensile Property)	ช่วงค่าปกติ (Typical Value Range)	หน่วย (Unit)
ความทนทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)	20 – 31	MPa
ความเค้นคราก (Yield Strength)	20 – 26	MPa
การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break)	500 – 800	เปอร์เซ็นต์ (%)
มอดูลัสของยัง (Young's Modulus)	700 – 1400	MPa

2.4 การออกแบบเครื่องบดเพื่อรีไซเคิลเศษ

พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)

เศษวัสดุที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเป่าขึ้นรูปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) ยังคงมีคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นเพื่อให้การรีไซเคิลเศษพลาสติกจากกระบวนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบและพัฒนาเครื่องบดพลาสติกที่เหมาะสมสำหรับย่อยเศษวัสดุ HDPE ให้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตได้อีกครั้ง

เครื่องบดที่ออกแบบควรสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการบดได้ เช่น ขนาดและรูปแบบของใบมีด ความเร็วรอบของเพลาบด และอัตราการป้อนวัสดุ เพื่อให้สามารถรองรับลักษณะของเศษพลาสติกที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันได้อย่างเหมาะสม การออกแบบระบบบดที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้ได้วัสดุรีไซเคิลที่มีขนาดสม่ำเสมอ ลดการสะสมความร้อนระหว่างกระบวนการบด และช่วยรักษาคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกสำหรับการนำกลับไปขึ้นรูปใหม่ได้

แนวทางการออกแบบดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Santos et al. (2020) [5] ซึ่งรายงานว่า การออกแบบเครื่องบดพลาสติกที่เหมาะสมสามารถช่วยลดการเกิดความร้อนสะสมในระหว่างกระบวนการบด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการคงคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกสำหรับการนำกลับไปใช้

ใหม่ในกระบวนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แบบจำลองการออกแบบเครื่องบดพลาสติก HDPE

2.5 การพัฒนาและทดสอบเครื่องบด HDPE

จากแนวทางการออกแบบเครื่องบดสำหรับเศษพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ได้มีการพัฒนาและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบจริง โดยคำนึงถึงองค์ประกอบสำคัญของระบบ ได้แก่ โครงสร้างเครื่องบดที่มีความแข็งแรง ใบมีดสำหรับการย่อยวัสดุ และระบบส่งกำลังที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถรองรับการทำงานกับเศษพลาสติกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากสร้างเครื่องบดต้นแบบแล้ว ได้ทำการทดสอบการทำงานกับเศษพลาสติก HDPE ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตจริง โดยมุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพในการบด ความสม่ำเสมอของขนาดชิ้นวัสดุที่ได้ และความต่อเนื่องใน

การทำงานของเครื่องจักร

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องบดต้นแบบสามารถบดเศษพลาสติก HDPE ได้ตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ และวัสดุที่ผ่านการบดมีขนาดเหมาะสมสำหรับนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องบดพลาสติก HDPE ต้นแบบที่ใช้สำหรับย่อยเศษพลาสติกจากกระบวนการผลิต

2.6 กำหนดอัตราส่วนในการทดลอง

การทดลองนี้กำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเกรด A (High-

Density Polyethylene: HDPE Grade A) กับเศษพลาสติก HDPE ที่ผ่านกระบวนการบด เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการขึ้นรูปขวดน้ำขนาด 20 ลิตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของเสียและต้นทุนการผลิต ในขณะที่ยังคงรักษาสสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม แนวทางการกำหนดอัตราส่วนผสมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Boz Noyan และ Boldizar (2024) [6] ซึ่งศึกษาผลของการผสมพลาสติก HDPE รีไซเคิลจากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วกับเม็ดพลาสติกใหม่ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยพบว่าอัตราส่วนผสม 1:1 และ 2:1 ยังคงสามารถรักษาสสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความต้านทานแรงดึงและความเหนียว ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้กำหนดอัตราส่วนผสมของเม็ดพลาสติกใหม่และพลาสติกกรีไซเคิลในระดับต่าง ๆ เพื่อใช้เปรียบเทียบผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของ HDPE เกรด A ต่อพลาสติก HDPE รีไซเคิลที่ใช้ในการทดลอง

อัตราส่วนผสม (Mixing Ratio)	HDPE เกรด A (%) (HDPE Grade A (%))	เศษ HDPE ที่บดแล้ว (%) (Ground HDPE Scrap (%))	หมายเหตุ (Remarks)
1:1	50	50	สัดส่วนเท่ากันระหว่างเกรด A และเศษพลาสติก
1:2	33.3	66.7	ใช้เศษพลาสติกมากกว่าเกรด A
2:1	66.7	33.3	ใช้เกรด A มากกว่าเศษพลาสติก

2.7 การออกแบบสเปกชีนงานทดสอบแรงดึงสำหรับ HDPE ความหนา 2 มิลลิเมตร

การศึกษาคุณสมบัติทางแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ผ่านการรีไซเคิลบางส่วน จำเป็นต้องมีการออกแบบชิ้นทดสอบ (Specimen) ให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สามารถเปรียบเทียบและวิเคราะห์ได้อย่าง

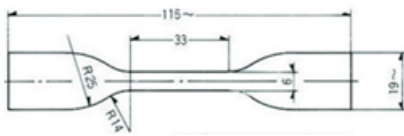
ถูกต้อง โดยมาตรฐานที่ใช้คือ ASTM D638 ซึ่งกำหนดขนาดและรูปทรงของชิ้นงานที่เหมาะสมกับวัสดุเทอร์โมพลาสติกประเภทแข็งสำหรับ HDPE ความหนา 2 มิลลิเมตร จะเหมาะสมกับการใช้ ชิ้นงานทดสอบแบบ Type IV ซึ่งออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับวัสดุแผ่นบางหรือชิ้นงานที่ได้จากการรีไซเคิล และมีขนาดจำกัด ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขนาดชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 แบบ Type IV

พารามิเตอร์ (Parameter)	ค่า (Value)	คำอธิบาย (Description)
ความยาวโดยรวม (Overall length)	115 มม.	ความยาวทั้งหมดของชิ้นทดสอบ
ความกว้างส่วนแคบ (Narrow section width)	6 มม.	ความกว้างของส่วนแคบ (ส่วนวัดระยะ)
ความยาวช่วงวัด (Gage length)	33 มม.	ความยาวของช่วงวัดระยะ

รัศมีส่วนโค้ง (Fillet radius)	14 มม.	รัศมีระหว่างส่วนแคบกับส่วนกว้าง
ความหนา (Thickness)	2 มม.	ความหนาของชิ้นทดสอบ

ข้อมูลจากรายละเอียดจากตารางที่ 3 สามารถนำไปกำหนดเป็นของสเปกการทดสอบแรงดึง (Tensile Test Specification) สำหรับ HDPE ตามมาตรฐาน ASTM D638 ดังแสดงในรูปที่ 5

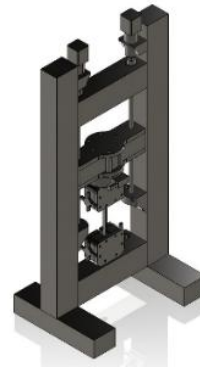


รูปที่ 5 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบ Type IV ตามมาตรฐาน ASTM D638

การทดสอบแรงดึงดำเนินการโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยกำหนดความเร็วในการดึงที่ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ตามข้อแนะนำของมาตรฐาน ASTM D638 เพื่อให้กระบวนการยึดตัวและการแตกหักของวัสดุเกิดขึ้นภายในช่วงเวลา 0.5–5 นาที ตามเงื่อนไขการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก

ค่าที่ได้จากการทดสอบประกอบด้วย ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength), ความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength), การยืดตัวเมื่อขาด (Elongation at Break) และ มอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินสมบัติเชิงกลของวัสดุ HDPE ที่มีการผสมวัสดุรีไซเคิลในอัตราส่วนต่าง ๆ

แบบจำลองของเครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine (UTM) ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะของเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine: UTM)

3. การดำเนินการทดลอง

3.1 การเตรียมส่วนผสมและขึ้นรูปขวดน้ำ

การเตรียมส่วนผสมของพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene: HDPE) เริ่มจากการคัดแยกวัสดุหลัก 2 ประเภท ได้แก่ เม็ดพลาสติก HDPE เกรด A และเศษพลาสติก HDPE ที่เหลือจากกระบวนการเป่าขึ้นรูปในรอบการผลิตก่อนหน้านี้ เศษพลาสติกดังกล่าวถูกนำมาทำความสะอาด อบแห้ง และบดให้มีขนาดประมาณ 4–6 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถหลอมละลายและผสมกับเม็ดพลาสติกใหม่ได้อย่างสม่ำเสมอในกระบวนการขึ้นรูป ขั้นตอนการผสมวัสดุดำเนินการโดยใช้ เครื่องผสมแบบถังหมุน (Rotary Mixer) เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่มีความสม่ำเสมอ โดยกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างเม็ดพลาสติก HDPE เกรด A กับพลาสติกรีไซเคิลในสัดส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 (โดยน้ำหนักของเม็ดพลาสติกใหม่ต่อพลาสติกรีไซเคิล) วัตถุดิบในแต่ละชุดการทดลองถูกชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลเพื่อควบคุมความแม่นยำของสัดส่วนการผสม ดังแสดงในรูปที่ 7

แนวทางการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Roslan, S. A. H., 2013 [7] ซึ่งศึกษาผลของอัตราส่วนการผสมระหว่าง HDPE รีไซเคิลกับเม็ดพลาสติกใหม่ต่อค่าความต้านทานแรงดึงตาม

มาตรฐาน ASTM D638 โดยพบว่าการผสมพลาสติก ไรไซเคิลในสัดส่วนที่เหมาะสมยังสามารถรักษาสสมบัติเชิงกลของวัสดุให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 7 ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมของพลาสติก HDPE สำหรับทำการทดลอง

หลังจากขั้นตอนการผสมวัสดุเสร็จสิ้น ส่วนผสม

ของเม็ดพลาสติก HDPE และพลาสติกกรีไซเคิลจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่อง เป่าขึ้นรูป (Blow Molding Machine) ในกระบวนการขึ้นรูปขวดน้ำ HDPE ด้วยวิธีการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) ได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของวัสดุและลักษณะของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและความสม่ำเสมอของความหนา พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย อุณหภูมิการหลอมพลาสติก ความเร็วรอบสกรู ความดันลมเป่า และระยะเวลาในการทำความเย็น ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดน้ำ HDPE

พารามิเตอร์ของกระบวนการ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง	หน่วย
อุณหภูมิการหลอมพลาสติก (Melt Temperature)	180 - 200	°C
ความเร็วรอบสกรู (Screw Speed)	40 - 80	rpm
ความดันลมเป่า (Blow Pressure)	6 - 8	bar
เวลาเป่าขึ้นรูป (Blow Time)	10 - 15	s
เวลาในการทำความเย็น (Cooling Time)	20 - 30	s
ความหนาของชิ้นงาน	2	mm
ขนาดผลิตภัณฑ์	20	L

เมื่อกระบวนการขึ้นรูปเสร็จสิ้น ชิ้นงานจะถูกนำมาตัดแต่งส่วนเกินและเตรียมเป็นแผ่นตัวอย่าง จากนั้นจึงนำไปตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมเพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 แบบ Type IV โดยกำหนดความหนาของชิ้นงานทดสอบที่ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ HDPE ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนผสมของเม็ดพลาสติกใหม่ต่อพลาสติกกรีไซเคิล 1:1, 1:2 และ 2:1

ภายหลังจากการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปตามอัตราส่วนผสมของเม็ดพลาสติก HDPE เกรด A กับพลาสติกกรีไซเคิลที่บดแล้วในสัดส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 ชิ้นงานในแต่ละชุดการทดลองจะถูกนำมาเตรียมเป็นตัวอย่างทดสอบเพื่อใช้ในการประเมินสมบัติเชิงกลของวัสดุในขั้นตอนถัดไป

3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในขั้นตอนนี้ ชิ้นงานตัวอย่างจากแต่ละอัตราส่วนผสมจะถูกนำมาตัดแต่งและเตรียมให้มีขนาดและรูปทรงตามมาตรฐาน ASTM D638 แบบ Type IV เพื่อให้การทดสอบสมบัติเชิงกลมีความแม่นยำและสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองได้อย่างถูกต้อง จะดำเนินการโดยการตัดตัวอย่างจากขวดน้ำ HDPE ขนาด 20 ลิตร ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว โดยมีการกระจายตำแหน่งการตัดจากบริเวณต่าง ๆ

รอบตัวถังอย่างทั่วถึง เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบสามารถเป็นตัวแทนของสมบัติโดยรวมของผลิตภัณฑ์ในแต่ละอัตราส่วนผสมได้อย่างเหมาะสม ตัวอย่างชิ้นงานที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่เตรียมจากขวดน้ำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ขนาด 20 ลิตร

ตารางที่ 5 สรุปผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน HDPE

อัตราส่วนผสม HDPE ใหม่ : รีไซเคิล	Tensile Strength (MPa) ค่าเฉลี่ย	Elongation at Break (%) ค่าเฉลี่ย	ลักษณะการแตกหัก	ผลการประเมิน
1:1	27.6	485	Ductile fracture	ผ่านมาตรฐาน
1:2	18.4	310	Semi-ductile	ไม่ผ่านมาตรฐาน
2:1	29.1	520	Ductile fracture	ผ่านมาตรฐาน

จากผลการทดลองใน ตารางที่ 5 พบว่าอัตราส่วนผสม 2:1 ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงที่สุดที่ 29.1 MPa และค่าการยืดตัวเมื่อขาด 520% ซึ่งแสดงถึงสมบัติเชิงกลที่ดีและมีลักษณะการแตกหักแบบ Ductile fracture อันเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุ HDPE โดยอัตราส่วน 1:1 ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 27.6 MPa และค่าการยืดตัวเมื่อขาด 485% ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานของวัสดุ HDPE (20–31 MPa) ตามมาตรฐาน ASTM D638 แสดงให้เห็นว่าการนำพลาสติกกรีไซเคิลกลับมาใช้ในส่วนไม่เกิน 50% ยัง

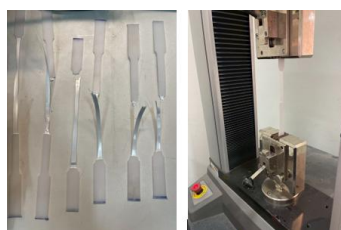
4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

ชิ้นงานทดสอบที่ผลิตจากส่วนผสมระหว่างเม็ดพลาสติก HDPE เกรด A และพลาสติกกรีไซเคิลที่ผ่านการบดแล้วในอัตราส่วน 1:1, 2:1 และ 1:2 ถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต้านแรงดึงโดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D638 แบบ Type IV และควบคุมความหนาของชิ้นงานที่ 2 มิลลิเมตร การทดสอบดำเนินการภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ โดยกำหนด ความเร็วในการดึงที่ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM D638

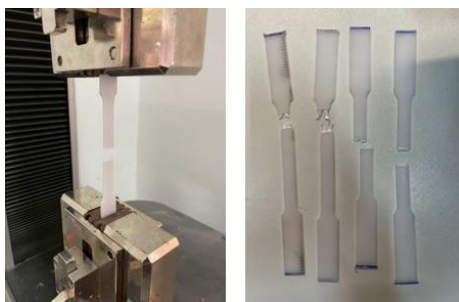
ในการทดลองแต่ละอัตราส่วนผสมได้เตรียมชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง ($n = 5$) และทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง โดยผลการทดลองถูกวิเคราะห์โดยใช้ ค่าเฉลี่ย (Mean) และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานในแต่ละอัตราส่วนผสม ผลการทดลองสรุปไว้ใน ตารางที่ 5

สามารถรักษาสมบัติเชิงกลของวัสดุไว้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสม 1:1 และ 2:1

ในทางตรงกันข้าม อัตราส่วนผสม 1:2 ซึ่งประกอบด้วยเม็ดพลาสติก HDPE ใหม่ 33.3% และพลาสติกรีไซเคิล 66.7% ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเพียง 18.4 MPa และค่าการยืดตัวเมื่อขาด 310% ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานของวัสดุ HDPE ส่งผลให้ชิ้นงานไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานแรงดึงขั้นต่ำ และมีลักษณะการแตกหักแบบ Semi-ductile แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณพลาสติกรีไซเคิลในสัดส่วนที่สูงเกินไปส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุลดลงอย่างชัดเจนดังแสดงใน รูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสม

1:2

ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณพลาสติกรีไซเคิลในสัดส่วนที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้โครงสร้างโมเลกุลของวัสดุมีความไม่สม่ำเสมอ และทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุลดลง

ผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zubakri et al. (2024) [8] ซึ่งรายงานว่า การผสม HDPE รีไซเคิลกับเม็ดพลาสติกใหม่ในสัดส่วนที่เหมาะสมยังสามารถรักษาค่าความต้านทานแรงดึงและค่าการยืดตัวของวัสดุให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยเฉพาะในกรณีที่มีปริมาณวัสดุรีไซเคิลไม่เกินครึ่งหนึ่งของส่วนผสมทั้งหมด

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 อภิปรายผลการทดลอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์แนวทางการลดการสูญเสียในกระบวนการผลิตขวดน้ำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่เกิดจากเศษวัสดุในกระบวนการผลิต ซึ่งพบว่าการสูญเสียจากเศษวัสดุ

เหลือทิ้งมีมูลค่ามากกว่า 110,000 บาทต่อเดือน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอการนำเศษพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ผ่านกระบวนการบดและผสมกับเม็ดพลาสติกใหม่เพื่อลดปริมาณของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรในกระบวนการผลิต

ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสม 1:1 ซึ่งประกอบด้วยเม็ดพลาสติกใหม่ 50% และพลาสติกรีไซเคิล 50% เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากชิ้นงานที่ผลิตได้ยังคงมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) อยู่ในช่วงมาตรฐานของวัสดุ HDPE ที่ 20–31 MPa แสดงให้เห็นว่าการนำเศษพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ในสัดส่วนดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลที่สำคัญของผลิตภัณฑ์

ในทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มสัดส่วนพลาสติกรีไซเคิลเป็น 1:2 พบว่า คุณภาพของชิ้นงานลดลงอย่างชัดเจนและไม่สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานแรงดึงขั้นต่ำตามที่กำหนดไว้ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดของการใช้วัสดุรีไซเคิลในปริมาณที่สูงเกินไป

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงศักยภาพในการนำเศษวัสดุจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ โดยสามารถ ลดของเสียและต้นทุนการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ พร้อมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรและสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนในภาคอุตสาหกรรม

ผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Al-Salem et al. (2018) [9] ที่รายงานว่า พลาสติก HDPE ที่ผ่านการรีไซเคิล สามารถรักษาคูสมบัติเชิงกลได้เมื่อมีการควบคุมสัดส่วนการผสมอย่างเหมาะสม และยังคงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hope et al. (2020) [10] ที่ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของ HDPE รีไซเคิลสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบ Blow Molding โดยพบว่า การผสมพลาสติกใหม่กับพลาสติกรีไซเคิลในสัดส่วนที่เหมาะสม เป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาคูคุณภาพของผลิตภัณฑ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาี้ควรมีการวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยในกระบวนการผลิต เช่น อุณหภูมิการขึ้นรูป และความเร็วในการขึ้นรูป เพื่อศึกษาผลกระทบต่อ

พฤติกรรมของวัสดุและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว นอกจากนี้ ควรมีการวิเคราะห์ ต้นทุน-ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ (Cost-Benefit Analysis) และการประเมิน ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อยืนยันความคุ้มค่าและความยั่งยืนของการนำพลาสติกรีไซเคิลกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร, มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการดำเนินการวิจัย รวมถึงขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลืออันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dugo G, Mancuso T, Massa C, Zerbo A, Gatto S. Recycling of plastic materials obtaining second raw materials in a circular economy. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020; 20(2): 31-38.
- [2] Goyal P, Agrawal V, Chaturvedi V. Investigation of control parameter setting of extrusion blow molding machine for HDPE material using approach. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*. 2014; 4(4): 1-10.
- [3] Rosato DV. Blow molding. In: *Plastics Processing Data Handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold; 1990. p. 391-443.
- [4] ASTM International. ASTM D638-22: Standard test method for tensile properties of plastics. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2022.
- [5] Santos AM, Silva MG, Rocha GD. Design and analysis of a plastic granulator for sustainable recycling. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 259: 120851.
- [6] Boz Noyan EC, Boldizar A. Blow molding of mechanically recycled post-consumer rigid polyethylene packaging waste. *Polymer Engineering & Science*. 2024.
- [7] Roslan SAH. The effect of recycled-high density polyethylene (HDPE) mixing ratio on the tensile strength of high density polyethylene (HDPE) polymer [Bachelor thesis]. Pahang: Universiti Malaysia Pahang; 2013.
- [8] Zulfakri ML, Abdullah MK, Amin AAM. Experimental investigations on mechanical properties of virgin and recycled high-density polyethylene (HDPE) for the blown film extrusion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024; 2907(1): 012015.
- [9] Al-Salem SM, Khan AR, Al-Hajji MN. A review of the mechanical properties of recycled high-density polyethylene (HDPE). *Journal of Polymers and the Environment*. 2018; 26(1): 1-15.
- [10] Hope T, Vreeland JD. Improving the physical properties of recycled high-density polyethylene (HDPE) for blow-molding applications. *Plastics*. 2020; 2(1): 54-68.