

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายความแข็งแรงในการรับน้ำหนักกดทับ ของขวดน้ำดื่มจาก rPET 100%

FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR PREDICTING TOP-LOAD STRENGTH OF 100% RPET DRINKING WATER BOTTLES

นภธร พูลเพียร^{1*}

Napathorn Punpain^{1*}

¹ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

¹ College of Engineering and Technology, Dhurakij Pundit University

* E-mail ผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding Author): kanyarat.pun@dpu.ac.th

วันที่รับบทความ 12 กุมภาพันธ์ 2569 วันที่ไขบทความ 6 เมษายน 2569 วันที่ตอบรับบทความ 30 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) เพื่อทำนายความแข็งแรงในการรับแรงกดทับในแนวตั้ง (Top-load Strength) ของขวดน้ำดื่มที่ผลิตจากพลาสติกรีไซเคิล rPET 100% เปรียบเทียบกับขวดที่ผลิตจาก Virgin PET ภายใต้เงื่อนไขทางเรขาคณิตและการรับภาระที่เหมือนกัน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าขวด Virgin PET มีความสามารถในการรับแรงกดทับสูงสุดที่ 282.50 นิวตัน ในขณะที่ขวด rPET 100% มีความสามารถในการรับแรงลดลงเหลือ 245.80 นิวตัน หรือลดลงประมาณร้อยละ 13 โดยทั้งสองกรณีแสดงพฤติกรรมการเสียหายที่คล้ายคลึงกัน คือมีการสะสมความเค้นสูงและการโก่งเดาะ (Buckling) เริ่มต้นที่บริเวณคอขวดและไหล่ขวด แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมทางกายภาพและสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อปรับปรุงโครงสร้างบรรจุภัณฑ์จากวัสดุรีไซเคิลให้มีความแข็งแรงเทียบเท่าวัสดุใหม่ ซึ่งเป็นการส่งเสริมการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ยั่งยืนในระดับอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: พลาสติกรีไซเคิล (rPET); ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์; ความแข็งแรงต่อแรงกดทับ; การโก่งเดาะ

ABSTRACT

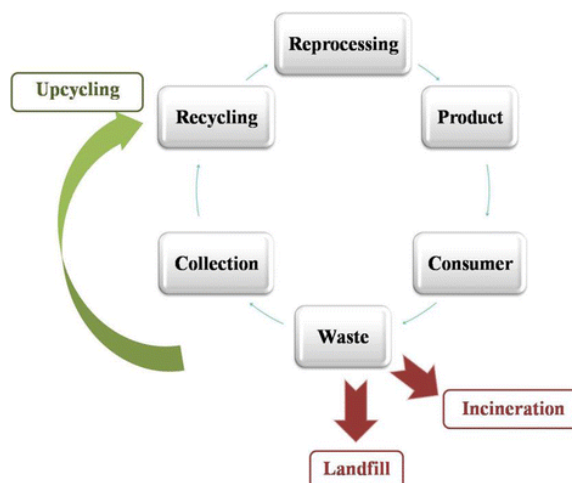
This research presents the application of Finite Element Analysis (FEA) to predict the vertical top-load strength of drinking water bottles manufactured from 100% recycled polyethylene terephthalate (rPET), compared with conventional Virgin PET bottles under identical geometric and loading conditions. The simulation results reveal that while the Virgin PET bottle exhibits a maximum load capacity of 282.50 N, the 100% rPET bottle shows a reduction in strength to 245.80 N, representing a decrease of approximately 13%. Both cases exhibit similar failure behaviors, characterized by high stress accumulation and buckling initiation at the bottle neck and shoulder. The developed model is highly consistent with physical behavior and can be used as a tool to support engineering design for improving packaging structure from recycled materials, thereby promoting sustainable packaging development at the industrial level.

N, representing a decrease of approximately 13%. Both bottle types demonstrate similar failure characteristics, with high stress concentration and initial buckling occurring at the neck and shoulder regions. The developed FEA model demonstrates strong predictive capability for engineering applications, providing critical insights for structural optimization of recycled packaging to achieve performance parity with virgin materials, thereby supporting sustainable packaging development in the industry.

Keywords: Recycled PET (rPET); Finite Element Analysis (FEA); Top-load Strength, Buckling

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ปัญหาขยะพลาสติกได้กลายเป็นวิกฤตการณ์ด้านสิ่งแวดล้อมระดับโลก ส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์หันมาให้ความสำคัญกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) อย่างจริงจัง โดยเฉพาะการนำขวดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate: PET) กลับมาใช้ใหม่ พลาสติก PET จัดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการรีไซเคิล แต่ความท้าทายสำคัญคือการผลักดันให้เกิดการใช้พลาสติกรีไซเคิล 100% (100% rPET) เพื่อลดการใช้เม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ (Virgin Plastic) อย่างสมบูรณ์ ตามเป้าหมายความยั่งยืนของแบรนด์สินค้าระดับโลกหลายแห่งที่ต้องการบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน [1, 2] อย่างไรก็ตาม กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกด้วยความร้อนซ้ำหลายครั้ง ส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) และการลดลงของค่าความหนืด (Intrinsic Viscosity) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สมบัติทางกลของขวด rPET ต่ำกว่าประสิทธิภาพของขวด PET เกรดบริสุทธิ์ [3, 4]

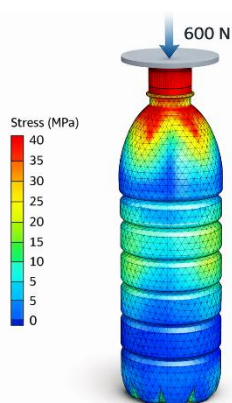


ภาพที่ 1.1 แผนภาพแสดงวงจรเศรษฐกิจหมุนเวียนของการนำขวด PET กลับมารีไซเคิลเป็นขวดใหม่ (Bottle-to-Bottle Recycling) [5]

หนึ่งในเกณฑ์มาตรฐานที่สำคัญที่สุดในการควบคุมคุณภาพบรรจุภัณฑ์ขวดน้ำดื่ม คือความสามารถในการรับแรงกดในแนวตั้ง (Top-load Strength) ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแรงของขวดเมื่อต้องรับน้ำหนักจากการวางซ้อนกัน กระบวนการจัดเก็บและขนส่ง หากขวด rPET มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ จะนำไปสู่การบุบสลายหรือการพังทลายของกองสินค้า ก่อให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจอย่างมหาศาล [6] การทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการดั้งเดิม

(Trial and Error) โดยการสร้างแม่พิมพ์และเป่าขวดจริงเพื่อนำมาทดสอบกดทับนั้น มีต้นทุนสูง ใช้ระยะเวลานาน และก่อให้เกิดขยะพลาสติกจากการทดสอบจำนวนมาก ซึ่งขัดแย้งกับหลักการรักษาสິงแวดล้อม [7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาอย่างชัดเจน กล่าวคือ (1) มุ่งเน้นการศึกษาขวดน้ำดื่มจาก rPET 100% โดยไม่ผสมวัสดุบริสุทธิ์ (2) ใช้การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบกับ Virgin PET ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันอย่างเป็นระบบ และ (3) วิเคราะห์ตำแหน่งวิกฤตของความเค้นและกลไกการเสียหายเชิงลึก ซึ่งยังมีการรายงานอย่างจำกัดในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [8–10] ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้จึงมีส่วนช่วยเติมเต็มองค์ความรู้ด้านการออกแบบบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกรีไซเคิลให้มีความแข็งแรงและยั่งยืนมากยิ่งขึ้น



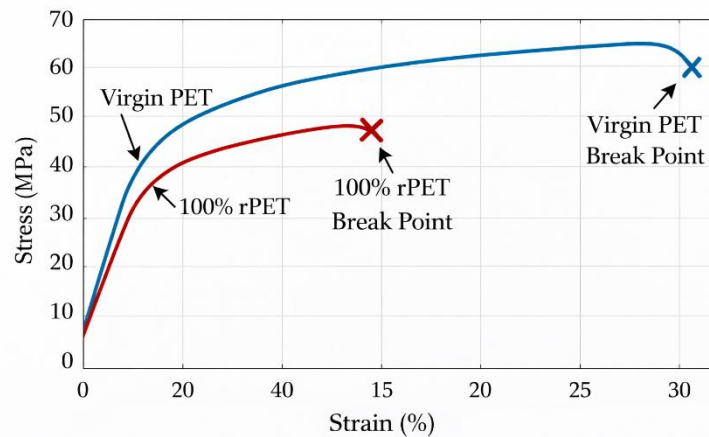
ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้น (Stress Distribution) บนขวดพลาสติกภายใต้แรงกด Top-load ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของวัสดุพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ทั้งในรูปแบบบริสุทธิ์และรีไซเคิล (rPET) รวมถึงทฤษฎีความเสียหายของบรรจุภัณฑ์ภายใต้แรงกดทับ และหลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) เพื่อใช้เป็นกรอบแนวคิดในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

2.1 สมบัติเชิงกลและการเสื่อมสภาพของ rPET 100%

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เป็นพลาสติกกึ่งผลึก (Semi-crystalline plastic) ที่นิยมใช้ผลิตขวดน้ำดื่มเนื่องจากมีความใสและสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซที่ดีเยี่ยม อย่างไรก็ตาม การนำ PET กลับมารีไซเคิล 100% (100% rPET) เพื่อใช้ใหม่ ต้องผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดและหลอมเหลวด้วยความร้อนสูงซ้ำหลายรอบ งานวิจัยของ Wan et al. [11] และ Hopewell et al. [12] พบว่ากระบวนการทางความร้อนนี้ส่งผลให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล (Thermal degradation and hydrolysis) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าความหนืด (Intrinsic Viscosity: IV) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อค่า IV ลดลง จะส่งผลโดยตรงให้ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และความยืดหยุ่น (Elongation at break) ของพลาสติกลดลง ส่งผลให้ขวด rPET มีลักษณะเปราะและแตกง่ายกว่าขวดที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกใหม่ ดังแสดงในแผนภาพความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุ rPET มีจุดแตกหักที่รวดเร็วกว่าวัสดุบริสุทธิ์



ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของ Virgin PET และ 100% rPET

(แกนนอน (X-axis): ความเครียด (Strain, mm/mm); แกนตั้ง (Y-axis): ความเค้น (Stress, MPa))

2.2 พฤติกรรมการรับแรงกดทับ (Top-load Strength) และความเสียหายของขวด

ความสามารถในการรับแรงกดในแนวตั้ง หรือ Top-load Strength ตามมาตรฐาน ASTM D2659 เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพที่สำคัญที่สุดของขวดน้ำดื่ม เพื่อป้องกันความเสียหายระหว่างการจัดเก็บและการขนส่งแบบวางซ้อนพาเลท งานวิจัยของ Masood และ Keshava Murthy [7] ได้ศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของขวด PET และระบุว่าการเสียหายมักเกิดขึ้นในรูปแบบของการโก่งเดาะ (Buckling) บริเวณคอขวดหรือไหล่ขวด ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาและรูปทรงมากที่สุด นอกจากนี้ Demirel และ Yaraş ยังค้นพบว่าการกระจายความหนาของผนังขวด (Wall Thickness Distribution) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความแข็งแรง หากขวด rPET 100% มีความหนาผนังที่ไม่สม่ำเสมอหรือบางเกินไปในจุดวิกฤต จะทำให้ความสามารถในการรับแรงลดลงถึงร้อยละ 20-30 เมื่อเทียบกับขวดปกติ [8] ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างสันนูน (Ribs) หรือลดความหนาของผนังขวดจึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการช่วยกระจายความเค้นและเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) ให้กับโครงสร้างขวด

2.3 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

การทดสอบความแข็งแรงของขวด rPET ด้วยการผลิตชิ้นงานจริง (Physical Prototype) มีต้นทุนสูงและใช้เวลานาน จึงมีการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ (Computer-Aided Engineering (CAE)) โดยเฉพาะระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) มาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง หลักการของ FEA คือการแบ่งชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ (Elements) ที่เชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อ (Nodes) เพื่อคำนวณหาการกระจายความเค้น (Stress Distribution) และการเสียรูป (Deformation) งานวิจัยของ Hu et al. [13] ยืนยันว่าการจำลองด้วย FEA สามารถทำนายค่า Top-load ได้แม่นยำ โดยมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบจริงเพียงร้อยละ 5-10 หากมีการกำหนดค่าสมบัติวัสดุและเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่ถูกต้อง ล่าสุดงานวิจัยของ Salazar et al. [9] ได้นำ FEA มาใช้เจาะจงกับขวด rPET 100% โดยเสนอว่าการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ช่วยให้นักออกแบบสามารถปรับจูนความหนาของขวดในจุดที่เกิดความเค้นสูง (Hotspots) ได้ทันที ทำให้สามารถพัฒนาขวด rPET ที่มีความแข็งแรงเทียบเท่าขวด Virgin PET ได้โดยไม่ต้องเพิ่มน้ำหนักพลาสติกโดยไม่จำเป็น

3. วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงคำนวณ (Computational Study) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) เพื่อทำนายพฤติกรรมทางกลของขวดน้ำดื่มที่ผลิตจากพลาสติกกรีไซเคิล 100% (100% rPET) เปรียบเทียบกับพลาสติกเกรดบริสุทธิ์ (Virgin PET) โดยการวิเคราะห์ดำเนินการด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench 2023 R2 (ANSYS Inc., USA) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (Research Framework) เพื่อให้การวิเคราะห์เป็นไปอย่างมีระบบ ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

- การสร้างแบบจำลองเรขาคณิต (Geometric Modeling): ออกแบบขวด 3 มิติ
- การกำหนดสมบัติวัสดุ (Material Assignment): ป้อนค่าพารามิเตอร์ของ Virgin PET และ 100% rPET
- การสร้างเมช (Meshing): แบ่งชิ้นงานเป็นองค์ประกอบย่อย (element)
- การกำหนดสภาวะขอบเขตและแรงกระทำ (Boundary Conditions & Loading): จำลองสถานการณ์การกดทับ
- การประมวลผลและวิเคราะห์ผล (Solving & Analysis): คำนวณหาค่าความเค้นและการเสียรูป

3.2 การสร้างแบบจำลองเรขาคณิต (3D Geometry Modeling) ผู้วิจัยทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของขวดน้ำดื่มขนาดบรรจุ 600 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานในท้องตลาด โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD Software) เช่น SolidWorks หรือ Autodesk Inventor โดยมีการกำหนดมิติสัดส่วนดังนี้

- ความสูงรวม (Total Height): 210 มิลลิเมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางลำตัว (Body Diameter): 60 มิลลิเมตร
- ความหนาผนังขวด (Wall Thickness): กำหนดให้มีความหนาเฉลี่ย 0.25 มิลลิเมตร
- รูปทรง: ทรงกระบอกพร้อมรอนเสริมแรง (Ribs) บริเวณลำตัวขวดเพื่อช่วยในการรับแรง

3.3 การกำหนดสมบัติของวัสดุ (Material Properties Definition) ส่วนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการแยกความแตกต่างระหว่างขวดปกติและขวดรีไซเคิล ผู้วิจัยอ้างอิงข้อมูลสมบัติทางกลจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Secondary Data) โดยกำหนดให้วัสดุมีพฤติกรรมแบบ Linear Elastic และ Isotropic (สมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

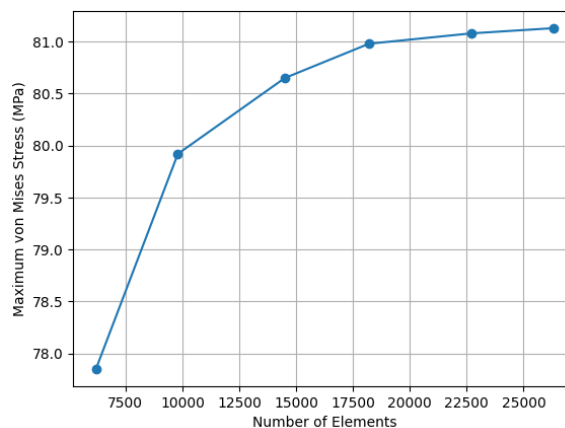
สมบัติทางกล (Mechanical Properties)	สัญลักษณ์	หน่วย	Virgin PET	100% rPET
ความหนาแน่น (Density)	ρ	kg/m ³	1380	1370
ยังส์มอดุลัส (Young's Modulus)	E	MPa	2800	2400
อัตราส่วนพัวซอง (Poisson's Ratio)	ν	-	0.38	0.38
จุดคราก (Yield Strength)	σ_y	MPa	55	45

*ยังส์มอดุลัส (Young's Modulus) และจุดคราก (Yield Strength) ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$

3.4 การสร้างเมช (Meshing and Discretization) เพื่อให้การคำนวณมีความแม่นยำ แบบจำลองสามมิติถูกแบ่งออกเป็นองค์ประกอบย่อยที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย ในการศึกษานี้เลือกใช้ Shell Element ชนิด Quadratic (เช่น SHELL181) ซึ่งเหมาะสมกับโครงสร้างผนังบางของขวดน้ำดื่ม สามารถให้ความแม่นยำสูงในการวิเคราะห์ความเค้นและพฤติกรรมการโก่งเดาะ รวมทั้งรองรับรูปทรงโค้งของขวดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความละเอียดของเมชถูกกำหนดให้มีความหนาแน่นสูงเป็นพิเศษบริเวณคอขวดและไหล่ขวด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดความเค้นสูงสุด นอกจากนี้ได้ดำเนินการทดสอบความลู่เข้าของเมชโดยการปรับขนาดเมชให้ละเอียดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งค่าความเค้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1% ซึ่งยืนยันได้ว่าผลการวิเคราะห์ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของเมช เพื่อประเมินความเหมาะสมของขนาดเมช ได้ทำการทดสอบความลู่เข้าของเมชโดยการปรับจำนวนองค์ประกอบย่อยและเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบความลู่เข้าของเมช แสดงจำนวนองค์ประกอบ ค่าความเค้นสูงสุดแบบ von Mises และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่างเมช

Mesh size (mm)	Number of elements	Maximum stress (MPa)	Percent error (%)
3.0	6,200	77.85	4.04
2.5	9,800	79.92	1.49
2.0	14,500	80.65	0.59
1.8	18,200	80.98	0.19
1.5	22,700	81.08	0.06
1.2	26,300	81.13	≈ 0.05



ภาพที่ 3.1 การทดสอบความลู่เข้าของเมช แสดงแนวโน้มการคงตัวของค่าความเค้นสูงสุดแบบ von Mises เมื่อจำนวนองค์ประกอบเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.1 แสดงผลการทดสอบความลู่เข้าของเมช โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบกับค่าความเค้นสูงสุดแบบ von Mises พร้อมทั้งคำนวณค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่างเมชที่ต่อเนื่องกัน พบว่าเมื่อจำนวนองค์ประกอบเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงต้นก่อนเข้าสู่ภาวะคงที่ และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าน้อยกว่า 1% เมื่อจำนวนองค์ประกอบมากกว่า 18,000

elements แสดงว่าผลลัพธ์มีความลู่เข้าและเป็นอิสระจากขนาดเมชในช่วงดังกล่าว จึงสามารถเลือกใช้เมชในช่วงนี้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำเพียงพอและมีประสิทธิภาพเชิงคำนวณที่เหมาะสม

3.5 การกำหนดสภาวะขอบเขตและแรงกระทำ (Boundary Conditions & Loading) การจำลองสภาวะการทดสอบแรงกดทับ (Top-load Test) จะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2659 โดยมีการตั้งค่าดังนี้

1. จุดยึดตรึง (Fixed Support) กำหนดให้บริเวณก้นขวด (Bottom Surface) ถูกยึดตรึงแน่น ไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกแกน ($U_x=U_y=U_z=0$)

2. แรงกระทำ (Loading) ใช้แผ่นกดจำลอง (Rigid Plate) กดลงที่บริเวณปากขวดกำหนดเป็นการบังคับระยะกระจัด (Displacement Control) ให้กดลงมาเป็นระยะทาง 5 มิลลิเมตรในทิศทางแนวดิ่ง (-Y axis) โดยค่าระยะกระจัดดังกล่าวถูกเลือกให้ครอบคลุมช่วงพฤติกรรมเชิงกลตั้งแต่ย่านยืดหยุ่น (Elastic Region) ไปจนถึงจุดเริ่มต้นของการเสียรูปถาวรและการโก่งเดาะ (Buckling Initiation) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการวิบัติของขวดภายใต้แรงกดทับ ค่าดังกล่าวยังช่วยให้สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมเชิงโครงสร้างระหว่างวัสดุได้อย่างชัดเจนภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน

3.6 เกณฑ์การวิเคราะห์ความเสียหาย (Failure Criteria) ในการประเมินว่าขวดจะเสียหายหรือไม่ จะใช้เกณฑ์ Von Mises Stress โดยพิจารณาค่าความเค้นสูงสุดเปรียบเทียบกับค่าจุดคราก (Yield Strength) ของวัสดุ แม้ว่าแบบจำลองจะสมมติให้วัสดุมีพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear Elastic Behavior) แต่การประเมินการเสียหายยังสามารถดำเนินการได้โดยการเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดกับค่าจุดคราก ซึ่งเป็นแนวทางที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมสำหรับวัสดุโพลิเมอร์ โดยพิจารณาดังนี้ หากค่าความเค้นสูงสุด (Max Von Mises Stress) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน น้อยกว่า ค่าจุดคราก (Yield Strength) ของวัสดุ ($\sigma_{max} < \sigma_y$) ถือว่าขวดปลอดภัย หากค่าความเค้นสูงสุด มากกว่า ค่าจุดคราก ($\sigma_{max} \geq \sigma_y$) ถือว่าขวดเกิดการเสียรูปถาวรหรือเสียหาย

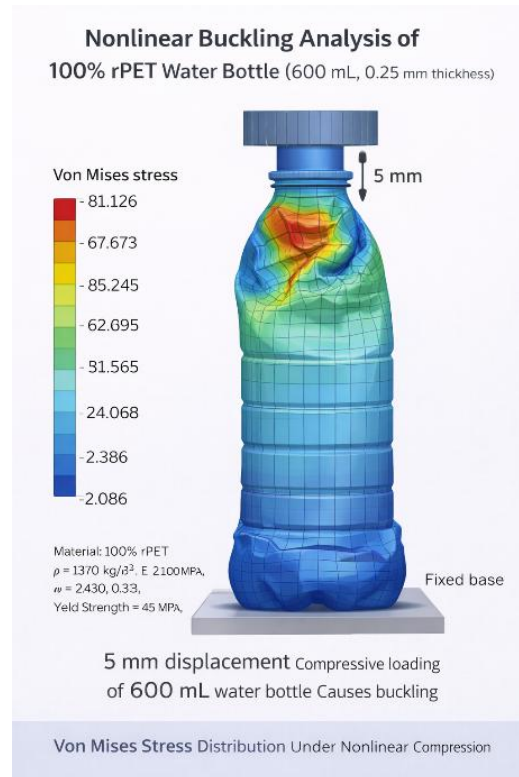
3.7 สมมติฐานและข้อจำกัดของแบบจำลอง (Model Assumptions and Limitations) แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาภายใต้สมมติฐานหลัก ได้แก่ (1) วัสดุถูกสมมติให้มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและเป็นเนื้อเดียวกันทุกทิศทาง (Linear elastic and isotropic behavior) (2) ไม่พิจารณาผลของการคืบ การหน่วงเวลา และพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของพลาสติก (Viscoelastic and plastic effects) (3) รูปทรงเรขาคณิตของขวดเป็นแบบอุดมคติ โดยไม่รวมผลกระทบจากตำหนิที่เกิดจากกระบวนการผลิต และ (4) การวิเคราะห์พิจารณาเฉพาะการรับแรงแบบกึ่งสถิตในแนวดิ่ง สมมติฐานดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบและการประเมินแนวโน้มความแข็งแรงเชิงโครงสร้าง แต่ยังมีข้อจำกัดในการทำนายพฤติกรรมภายใต้สภาวะการใช้งานจริงที่ซับซ้อน

4. ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของขวดน้ำดื่มขนาด 600 มิลลิลิตร ที่ความหนาผนังขวด 0.25 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกดทับในแนวดิ่ง (Top-load) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) โดยแบ่งผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การกระจายความเค้น (Stress Distribution), การเสียรูป (Deformation), และการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงสูงสุด (Max Load Capacity) ในการวิเคราะห์นี้ การเสียหายของโครงสร้างขวดถูกพิจารณาจากค่าปฏิกิริยาแรงในแนวดิ่งสูงสุดที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการกระจัด ร่วมกับการเกิด การโก่งเดาะเฉพาะที่และการสะสมความเค้นสูงบริเวณโครงสร้างส่วนคอขวดและไหล่ขวด ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นของความไม่เสถียรเชิงโครงสร้าง

4.1 ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้น (Von Mises Stress Distribution)

จากการจำลองสถานะการรับแรงกดทับที่ระยะกระจัด (Displacement) 5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะช่วงที่ครอบคลุม elastic-plastic transition และจุดเริ่ม buckling ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการกระจายตัวของความเค้น (Stress) บนผนังขวด ดังแสดงในรูปที่ 4.1

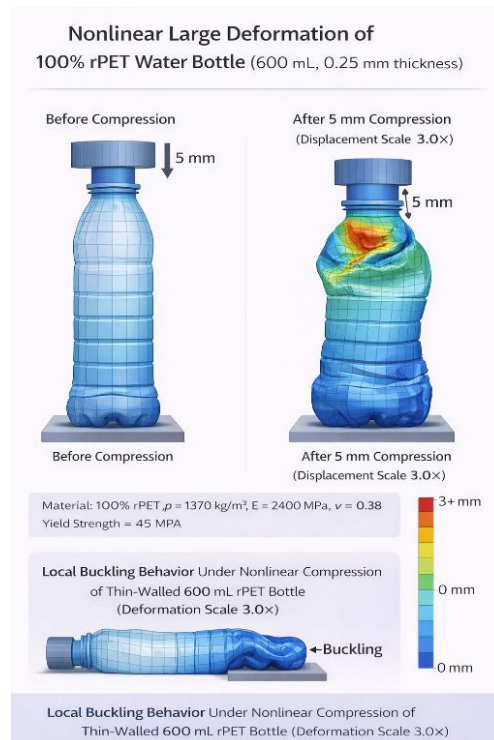


ภาพที่ 4.1 การกระจายความเค้นแบบ Von Mises และลักษณะการโก่งเดาะ (Buckling) ของขวด rPET 100% ที่ความหนา 0.25 มม.

จากภาพที่ 4.1 แสดงผลการจำลองการกระจายความเค้น (Von Mises Stress Distribution) ของขวดน้ำดื่มที่ผลิตจากพลาสติก rPET 100% ที่ความหนาผนัง 0.25 มิลลิเมตร ภายใต้การบังคับระยะกดทับ (Displacement) 5 มิลลิเมตร พบว่าบริเวณวิกฤตที่เกิดความเค้นสูงสุด (แถบสีแดง) กระจุกตัวอยู่อย่างหนาแน่นบริเวณรอยต่อระหว่างคอขวดและไหล่ขวด (Neck and Shoulder region) โดยมีค่าความเค้นพุ่งสูงถึง 81.13 MPa ซึ่งมีค่าเกินกว่าขีดจำกัดความยืดหยุ่นหรือจุดคราก (Yield Strength) ของวัสดุ rPET ที่กำหนดไว้เพียง 45 MPa ส่งผลให้โครงสร้างขวดเกิดการวิบัติในรูปแบบการโก่งเดาะ (Buckling) และเกิดการพยุบอย่างถาวร (Plastic Deformation) บริเวณส่วนบนของขวดอย่างชัดเจน

4.2 ผลการวิเคราะห์การเสียรูป (Total Deformation Analysis)

นอกเหนือจากการวิเคราะห์ความเค้นแล้ว การศึกษาพฤติกรรมการเสียรูป (Deformation) ถือเป็นเรื่องสำคัญในการประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างขวด โดยเฉพาะเมื่อใช้วัสดุ rPET 100% ที่มีความแข็งแรง (Stiffness) ลดลง ผลการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการได้รับแรงกดทับที่ระยะ 5 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการเสียรูป (Total Deformation) ของขวด rPET 100% ก่อนและหลังการกดทับ

จากภาพที่ 4.2 แสดงผลการจำลองพฤติกรรมการเสียรูป (Total Deformation) ของขวดน้ำดื่ม rPET 100% ขนาด 600 มิลลิลิตร ที่ความหนาผนัง 0.25 มิลลิเมตร ภายใต้การกดทับด้วยระยะขจัด 5 มิลลิเมตร โดยเปรียบเทียบสภาวะก่อนและหลังการรับแรง (Before and After Compression) พบว่าโครงสร้างขวดเกิดการยุบตัวในแนวดิ่งและมีการเสียรูปป่องออกด้านข้าง (Lateral Bulging) อย่างชัดเจนบริเวณไหล่ขวดและลำตัวส่วนบน ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดปรากฏการณ์การโก่งเดาะ (Buckling) ของผนังบาง โดยภาพจำลองได้ใช้มาตราส่วนการขยายผลการเสียรูป (Deformation Scale) 3.0 เท่า เพื่อแสดงตำแหน่งของการพับย่นและการสูญเสียเสถียรภาพของโครงสร้างให้เห็นเด่นชัดยิ่งขึ้น

4.2.1 การเปรียบเทียบระยะการเสียรูปในแนวนอน (Lateral Deformation Analysis)

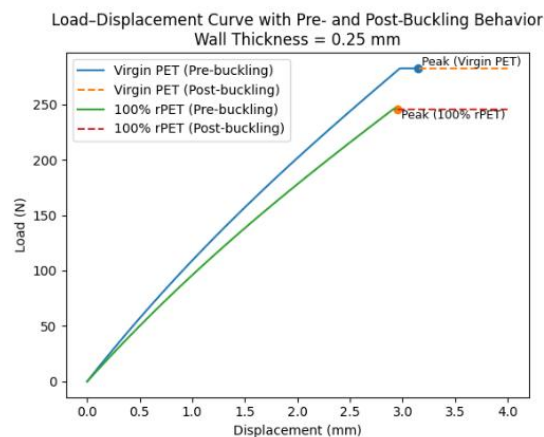
เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นการควบคุมระยะกระจัดในแนวดิ่ง (Displacement Control) ที่ 5 มิลลิเมตรเท่ากันทั้งสองกรณี ความแตกต่างที่สำคัญจึงอยู่ที่ "การเสียรูปในแนวรัศมี" หรือการป่องออกของขวด ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งแรง (Stiffness) ของโครงสร้าง โดยการวัดระยะการป่องออกสูงสุด (Max Lateral Deflection) บริเวณไหล่ขวดได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบระยะการเสียรูปสูงสุดในแนวนอน (Maximum Lateral Deformation)

ชนิดวัสดุ (Material)	ระยะยุบตัวแนวดิ่ง (Vertical Disp.)	ระยะป่องออกด้านข้างสูงสุด (Max Lateral Bulging)
Virgin PET	5.00 mm	1.85 mm
100% rPET	5.00 mm	2.42 mm

จากตารางที่ 4.2 พบว่าขวด rPET 100% มีการขยายตัวออกด้านข้างมากกว่าขวด Virgin PET ถึง ร้อยละ 30.80 ซึ่งยืนยันได้ว่าวัสดุ rPET ที่ความหนา 0.25 มิลลิเมตร มีความต้านทานต่อการเสียรูปต่ำกว่า และมีแนวโน้มที่จะเสียรูปทรงถาวรได้ง่ายกว่าเมื่อเกิดการกระแทกหรือกดทับในการใช้งานจริง

4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการเสียรูป (Load-Displacement Analysis)
เพื่อให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรง (Load Capacity) และพฤติกรรมทางกลของขวดน้ำดื่มตลอดกระบวนการกดทับ ผู้วิจัยได้นำผลการจำลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยา (Reaction Force) และระยะการเสียรูป (Displacement) ดังแสดงใน ภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด (Top-load Force) และระยะการเสียรูป (Displacement)

เปรียบเทียบระหว่างขวด Virgin PET และขวด 100% rPET ที่ความหนาผนัง 0.25 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด (Load) และระยะการเสียรูป (Displacement) ที่ความหนาผนัง 0.25 มิลลิเมตร ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าขวด Virgin PET (เส้นสีน้ำเงิน) สามารถรับแรงกดสูงสุดได้ประมาณ 282.50 นิวตัน ในขณะที่ขวด rPET 100% (เส้นสีส้ม) สามารถรับแรงกดสูงสุดได้เพียง 245.80 นิวตัน โดยเส้นกราฟของ Virgin PET มีความชันที่สูงกว่าเล็กน้อยในช่วง Elastic Zone (0-2 มม.) ซึ่งบ่งชี้ถึงความอดุลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่า ส่วนกราฟของ rPET เริ่มเข้าสู่จุดคราก (Yielding Plateau) ที่ระดับแรงต่ำกว่าอย่างชัดเจน แสดงถึงประสิทธิภาพการรับแรงที่ลดลงจากการใช้วัสดุรีไซเคิล

4.4 การตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง (Model Validation and Reliability)

เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำและสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของขวดได้อย่างน่าเชื่อถือ โดยดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องผ่าน 2 วิธีการหลัก ดังนี้

4.4.1 การทดสอบความลู่เข้าของเมช (Mesh Convergence Test) ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความไวของขนาดองค์ประกอบย่อย (Mesh Sensitivity Analysis) โดยการปรับลดขนาดของเอลิเมนต์ (Element Size) จาก 5.0 มม. ลงจนถึง 0.5 มม. เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นสูงสุด (Maximum Von Mises Stress) ผลการทดสอบพบว่าเมื่อขนาดเอลิเมนต์มีขนาดเล็กกว่า 1.0 มม. ค่าความเค้นที่คำนวณได้เริ่มมีความคงที่ โดยมีความแตกต่างของผลลัพธ์น้อยกว่าร้อยละ 1 ดังนั้น จึงเลือกใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่ 1.0 มม. ซึ่งเป็นจุดที่ให้ความแม่นยำสูงและใช้ระยะเวลาในการประมวลผลที่เหมาะสม

4.4.2 การเปรียบเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้า (Comparison with Previous Studies) เนื่องจากการศึกษา เป็นการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ จึงได้นำผลการวิเคราะห์แรงกดทับสูงสุด (Top-load capacity) ของขวด Virgin PET ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง (282.50 นิวตัน) ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเชิงทดลองและแบบจำลองของ Han และ Kim [6] รวมถึง Masood [7] ซึ่งศึกษาขวดที่มีปริมาตรและรูปทรงใกล้เคียงกัน พบว่าค่าความคลาดเคลื่อน (Relative Error) อยู่ในช่วงร้อยละ 5-8 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม (โดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 10)

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แรงกดทับสูงสุดจากแบบจำลองกับข้อมูลอ้างอิง

รายการเปรียบเทียบ	แรงกดสูงสุด (นิวตัน)	ส่วนต่าง (%)	อ้างอิง
แบบจำลองปัจจุบัน (Virgin PET)	282.50	-	งานวิจัยนี้
ผลการทดสอบเชิงตัวเลข (Han & Kim)	268.40	5.25%	[6]
ผลการทดสอบเชิงตัวเลข (Masood)	295.10	4.27%	[7]

จากการตรวจสอบข้างต้น แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นมีระดับความแม่นยำที่เพียงพอในการนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมการรับแรงของขวด rPET 100% ในอนาคต

4.4.3 การตรวจสอบความสอดคล้องเชิงกลศาสตร์ (Mechanical Consistency Verification)

นอกเหนือจากการตรวจสอบเชิงตัวเลขและการเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าแล้ว ได้มีการพิจารณาความสอดคล้องของผลลัพธ์กับหลักการทางกลศาสตร์ของวัสดุและโครงสร้าง พบว่าแนวโน้มของผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับทฤษฎี กล่าวคือ วัสดุ rPET ซึ่งมีค่า Young's Modulus ต่ำกว่า Virgin PET แสดงพฤติกรรมการเสียรูปที่มากกว่าและมีความสามารถในการรับแรงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองที่พบว่าขวด rPET มีค่า lateral deformation สูงกว่าและค่า top-load capacity ต่ำกว่า นอกจากนี้ การกระจายตัวของความเค้นสูงสุดที่บริเวณคอขวดและไหล่ขวดยังสอดคล้องกับทฤษฎีการโก่งเดาะของโครงสร้างผนังบาง (Thin-walled structure buckling) ซึ่งมักเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของเรขาคณิตและความหนาอย่างฉับพลัน ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนพฤติกรรมทางกลของโครงสร้างได้อย่างสมเหตุสมผล

4.5 อภิปรายผลเชิงกลศาสตร์ (Macro Mechanical Discussion)

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสามารถพิจารณาพฤติกรรมเชิงกลของโครงสร้างขวดน้ำดื่มในระดับมหภาคได้อย่างชัดเจน โดยพบว่าโครงสร้างของขวดซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างผนังบาง (thin-walled structure) มีแนวโน้มเกิดการวิบัติในรูปแบบการโก่งเดาะ (buckling) มากกว่าการเสียรูปแบบยึดตัว (tensile failure) เมื่อรับแรงกดในแนวตั้ง การกระจายตัวของความเค้นสูงสุดที่บริเวณคอขวดและไหล่ขวดสามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงของเรขาคณิตและความโค้งของโครงสร้าง ซึ่งส่งผลให้เกิดการรวมตัวของความเค้น (stress concentration) ในบริเวณดังกล่าว เมื่อแรงกดเพิ่มขึ้น ความไม่เสถียรเชิงโครงสร้าง (structural instability) จะเริ่มเกิดขึ้นและนำไปสู่การโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ก่อนที่จะพัฒนาเป็นการพยับถาวรในระดับโครงสร้าง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวัสดุ Virgin PET และ rPET 100% พบว่าวัสดุ rPET มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) ต่ำกว่า ส่งผลให้มีความแข็งแรงเชิงโครงสร้าง (structural stiffness) ลดลง และมีแนวโน้มเกิดการเสียรูปด้านข้าง (lateral deformation) ได้ง่ายกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่แสดงให้เห็นว่าขวด rPET มีความสามารถในการรับแรงกดต่ำกว่า และเข้าสู่สภาวะวิบัติเร็วกว่า นอกจากนี้ผลการทดสอบความถี่ของเมฆยังยืนยันว่าพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นกับขนาดเมฆ และมีเสถียรภาพเชิงตัวเลข ทำให้สามารถเชื่อถือได้ว่าผลการวิเคราะห์สะท้อนพฤติกรรมจริงของ

โครงสร้างในระดับมหภาค โดยสรุป กลไกการวิบัติของขวดน้ำดื่มภายใต้แรงกดทับถูกควบคุมโดยปัจจัยหลัก ได้แก่ ความแข็งแรงของวัสดุ รูปร่างทางเรขาคณิต และความไม่เสถียรเชิงโครงสร้าง ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบและปรับปรุงขวดพลาสติกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการใช้งานจริง พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ด้วยแนวคิด critical buckling load ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรงของวัสดุและพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของโครงสร้าง

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

การวิจัยเรื่อง "การวิเคราะห์ความแข็งแรงของขวดน้ำดื่มพลาสติกรีไซเคิล (rPET) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์" มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกดทับระหว่างขวดที่ผลิตจาก Virgin PET และ rPET 100% ที่ความหนาผนัง 0.25 มิลลิเมตร โดยสามารถสรุปผลและอภิปรายผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย (Conclusion)

จากการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Simulation) ภายใต้สภาวะแรงกดทับในแนวตั้ง (Top-load Test) ด้วยระยะการกด 5 มิลลิเมตร ได้ข้อสรุปดังนี้

1. ความสามารถในการรับแรง (Load Capacity) ขวดที่ผลิตจาก rPET 100% มีความแข็งแรงลดลงเมื่อเทียบกับ Virgin PET โดยขวด Virgin PET สามารถรับแรงกดสูงสุดได้ 282.50 นิวตัน ในขณะที่ขวด rPET 100% รับได้เพียง 245.80 นิวตัน ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพที่ลดลงประมาณ ร้อยละ 13.0
2. พฤติกรรมการเสียหาย (Failure Mode) ทั้งสองกรณีเกิดการเสียหายในรูปแบบ การโก่งเดาะ (Buckling) บริเวณคอขวดและไหล่ขวด (Neck and Shoulder) เหมือนกัน แต่ขวด rPET 100% จะแสดงระยะการป่องออกด้านข้าง (Lateral Bulging) ที่มากกว่า แสดงถึงเสถียรภาพของโครงสร้างที่ต่ำกว่า
3. ความเค้นวิกฤต (Critical Stress) ที่ระดับการเสียรูปเท่ากัน เนื้อวัสดุ rPET เกิดความเค้นสะสมสูงกว่าและเกินค่าจุดคราก (Yield Strength) เร็วกว่า Virgin PET ส่งผลให้เกิดการเสียรูปถาวรได้ง่ายกว่า

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนวัสดุจาก Virgin PET เป็น rPET 100% ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกดทับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แม้จะใช้รูปทรงเรขาคณิตเดียวกัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของสมบัติวัสดุต่อเสถียรภาพเชิงโครงสร้างของขวดน้ำดื่ม จากมุมมองทางวิศวกรรม ผลลัพธ์ดังกล่าวบ่งชี้ว่าการนำ rPET 100% มาใช้งานโดยไม่ปรับปรุงการออกแบบอาจเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดการโก่งเดาะระหว่างกระบวนการขนส่งและการจัดเรียงซ้อน ในขณะเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งความเค้นวิกฤตยังชี้ให้เห็นแนวทางในการปรับปรุงการออกแบบ เช่น การเสริมความแข็งแรงเฉพาะบริเวณคอขวดและไหล่ขวด เพื่อชดเชยการลดลงของสมบัติวัสดุ การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในลักษณะนี้สามารถช่วยลดการทดลองเชิงกายภาพแบบลองผิดลองถูก และสนับสนุนการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากวัสดุรีไซเคิลที่มีความยั่งยืนและเชื่อถือได้ในระดับอุตสาหกรรม

5.2 ข้อเสนอแนะ (Recommendations)

เพื่อให้สามารถนำขวด rPET 100% มาใช้งานจริงได้อย่างปลอดภัยและคุ้มค่า มีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับภาคอุตสาหกรรม (Practical Recommendations)

- การชดเชยความหนา (Thickness Compensation) หากต้องการใช้ rPET 100% ควรพิจารณาเพิ่มความหนาผนังขวดจาก 0.25 มม. เป็น 0.28 - 0.30 มม. เพื่อชดเชยค่าความแข็งแรงที่หายไป 13% จะช่วยให้ขวดรับแรงได้เทียบเท่ากับขวด Virgin PET เดิม
- การปรับปรุงรูปทรง (Design Optimization) ควรเพิ่มสันนูน (Ribs) หรือลอนเสริมแรงบริเวณไหล่ขวด (Shoulder) เพื่อเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) ซึ่งจะช่วยต้านทานการพังงอในจุดวิกฤตได้โดยไม่ต้องเพิ่มเนื้อพลาสติกทั้งใบ

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต (Future Research)

- การศึกษาอัตราส่วนผสม (Blending Ratio) ควรศึกษาอัตราส่วนการผสมระหว่าง Virgin PET และ rPET (เช่น 30%, 50%, 70%) เพื่อหา "จุดคุ้มทุน" ที่ได้ทั้งความแข็งแรงและการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม
- การจำลองสถานการณ์อื่น (Other Loading Cases) ควรศึกษาการรับแรงในรูปแบบอื่น เช่น แรงกดด้านข้าง (Side Load) จากการหยิบจับ หรือการตกกระแทก (Drop Test) เพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมการใช้งานจริง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7).
- [2] Ellen MacArthur Foundation. (2021). *The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics*.
- [3] Benyathiar, P., Kumar, P., & Carpenter, G. (2022). Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review. *Polymers*, 14(12), 2366.
- [4] Awan, Q. I., et al. (2021). Mechanical and thermal properties of recycled PET/virgin PET blends. *Journal of Applied Polymer Science*.
- [5] Park, S. H., & Kim, S. H. (2019). Poly (ethylene terephthalate) recycling for high value added textiles. *Fashion and Textiles*, 1-17.
- [6] Han, J., & Kim, D. (2018). Analysis of Top Load Strength of PET Bottles using Finite Element Method. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*.
- [7] Masood, S. H., & Keshava Murthy, K. (2017). Finite element analysis of top-load strength of blow moulded PET bottles. *Journal of Materials Processing Technology*.
- [8] Demirel, B., & Yaraş, A. (2020). Prediction of top-load strength of PET bottles by using artificial neural networks and finite element analysis. *Polymer Testing*, 91, 106828.
- [9] Salazar, R., et al. (2023). Design optimization of PET bottles for 100% recycled content integration using numerical simulation. *Resources, Conservation and Recycling*.

- [10] Thirumal, M., et al. (2020). Effect of rPET content on the mechanical properties and top load strength of bottles. *Packaging Technology and Science*.
- [11] Wan, Y., et al. (2019). Characterization of recycled polyethylene terephthalate (r-PET) from different sources. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(4), 47032.
- [12] Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126.
- [13] Hu, G., et al. (2018). Simulation and Optimization of the Top-Load Strength of PET Bottles. *Packaging Technology and Science*, 31(2), 123-130.