

CST-03

การหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุโพลีเมอร์ด้วยวิธีย้อนกลับโดยใช้วิธีหาค่าเหมาะสมร่วมกับการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Determination of Mechanical Property of Polymer Material with Inverse Method using Optimization Technique and Finite Element Method

รวีวัฒน์ รักสัง และ ชาคกริต สุวรรณจรัส*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

*ติดต่อ: อีเมล chakrit.suv@mahidol.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 662 889 2138 ต่อ 6416, เบอร์โทรสาร 662 889 2138 ต่อ 6429

บทคัดย่อ

การหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุประเภทโพลีเมอร์ ได้แก่ ค่าโมดูลัสของยังค์ (Young's Modulus) จำเป็นต้องมีการจัดเตรียมชิ้นทดสอบให้มีรูปร่างตามมาตรฐานของการทดสอบ การตัดชิ้นงานทดสอบจากผลิตภัณฑ์เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกลเป็นวิธีการที่ทำให้ได้ค่าการทดสอบใกล้เคียงกับคุณสมบัติของวัสดุที่ถูกใช้ผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ มากที่สุด แต่ถ้าผลิตภัณฑ์มีรูปร่างซับซ้อนจะทำให้ไม่สามารถทำการตัดชิ้นทดสอบได้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการย้อนกลับเพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene) ซึ่งใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นโดยไม่มีการตัดผนังกระป๋อง วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดจากผลการจำลองการรับภาระต้านบนของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการหาค่าโมดูลัสของยังค์ ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องได้ทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสของยังค์ของวัสดุ HDPE ตามมาตรฐาน ASTM D638 เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการย้อนกลับ ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าโมดูลัสของยังค์ที่ได้จากวิธีย้อนกลับมีค่าคลาดเคลื่อนจากการทดสอบน้อยกว่า 0.61% ซึ่งเป็นผลการคำนวณที่ยอมรับได้ และสามารถนำวิธีการย้อนกลับนี้ไปใช้หาค่าโมดูลัสของยังค์สำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ได้ต่อไป

คำหลัก: คุณสมบัติทางกล โพลีเมอร์ วิธีย้อนกลับ การหาค่าเหมาะสม วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Determination of mechanical property of polymer material as the Young's modulus must prepare specimen with shape according to testing standard. To cut specimen from a product for testing is the method which obtain the mechanical property nearly the material of that product. However, the complex shape of produces is impractical to cut specimens. This research proposed inverse method to calculate the mechanical property of the high density polyethylene (HDPE) which used to produce lubricant oil bottles without cutting of bottle wall. The optimization method had been used to arrange simulated results of top load on the lubricant oil bottle with finite element method to predict the Young's modulus. Therefore, the Young's modulus was determined according to the ASTM D638 standard to compare and verify the inverse method. The comparison shown the Young's modulus of the inverse method deviated from experiment less than 0.61%. This error can satisfy to further use the inverse method for determining the Young's modulus for the other products.

Keywords: Mechanical Property, Polymer, Inverse Method, Optimization, Finite Element Method.

CST-03

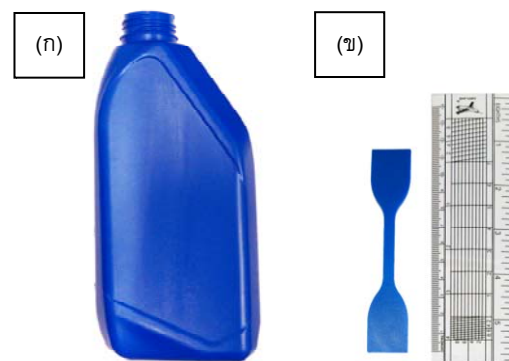
1. บทนำ

การหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุประเภทโพลีเมอร์มีความจำเป็นต่อการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อให้สามารถรองรับแรงกระทำจากภายนอกขณะถูกนำไปใช้งาน วิธีการทดสอบโดยใช้มาตรฐานการทดสอบต่างๆ เช่น ASTM D638 [1], ASTM D882 [2] หรือ ISO 527 [3] ด้วยชิ้นงานทดสอบ (Specimen) รูปร่างตามมาตรฐานของการทดสอบ ทำให้สามารถกำหนดค่าโมดูลัสของยังค์ (Young's modulus) ของวัสดุโพลีเมอร์ที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ ได้ ชิ้นงานทดสอบที่ได้ตัดจากผลิตภัณฑ์เพื่อทดสอบการดึงเป็นวิธีการที่ทำให้ได้ค่าโมดูลัสของยังค์ใกล้เคียงกับคุณสมบัติการต้านทานแรงภายนอกของผลิตภัณฑ์นั้นๆ มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์ที่มีรูปร่างซับซ้อนมีความหนาไม่คงที่ซึ่งทำให้ไม่สามารถจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยการตัดเป็นรูปร่างที่ต้องการตามมาตรฐานการทดสอบได้ วิธีการหาคุณสมบัติของวัสดุทางอ้อมสามารถทำได้โดยใช้ผลการทดสอบทางกลของผลิตภัณฑ์ใดๆ จำนวนย้อนกลับเพื่อหาค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ การกดด้วยหัวกด (Indenter) รูปร่างต่างๆ ให้เกิดเป็นร่องรอยบนผิวของวัสดุเป็นวิธีการทดสอบวัสดุวิธีหนึ่งที่สามารถนำร่องรอยการกดบนผิววัสดุและแรงที่ใช้กดซึ่งทำให้เกิดร่องรอยนั้นมาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสของยังค์ของวัสดุได้ [4,5] ร่องรอยของการกดมีการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) จำลองผลแทนการทดสอบจริงเพื่อนำไปใช้ร่วมกับการคำนวณย้อนกลับทำให้สามารถหาค่าโมดูลัสของยังค์ของวัสดุที่ผิวแข็งและทำให้เกิดรอยการกดไม่ชัดเจน [6] การทดสอบทางกลด้วยวิธีการเคาะวัสดุให้เกิดการสั่นร่วมกับการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้วิธีย้อนกลับเพื่อคำนวณหาค่าโมดูลัสของยังค์ของวัสดุได้ [7] ดังนั้นการทดสอบทางกลของผลิตภัณฑ์ใดๆ สามารถนำผลการทดสอบทางกลมาใช้คำนวณด้วยวิธีย้อนกลับร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นได้ต่อไป

2. การหาคุณสมบัติทางกลโดยวิธีการทดสอบดึง

กระป๋องน้ำมันหล่อลื่นผลิตจากพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene)เกรด H6140B (รูปที่ 1ก) ถูกนำมาตัดชิ้นงานทดสอบ

รูปร่างตามมาตรฐาน ASTM D638 (รูปที่ 1ข) เพื่อหาค่าสมบัติทางกล ซึ่งประกอบด้วย ค่าโมดูลัสของยังค์ (Young's Modulus) ค่าความเค้นคราก (Yield Stress) และความเค้นที่ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Proportional Limit) ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นนำมาทดสอบดึงด้วยความเร็วในการดึงยึดคงที่ 200 mm/min ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Tensile Testing Machine หรือ UTM) ยี่ห้อ Instron รุ่น 4667 ของบริษัท Instron Corporation, USA (รูปที่ 2) ผลการทดสอบถูกนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริง (True Stress) และความเครียดจริง (True Strain) แสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยสามารถหาคุณสมบัติทางกลต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ผลิตกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นจากกราฟความสัมพันธ์และสามารถแสดงค่าของคุณสมบัติทางกลที่หาได้ในตารางที่ 1

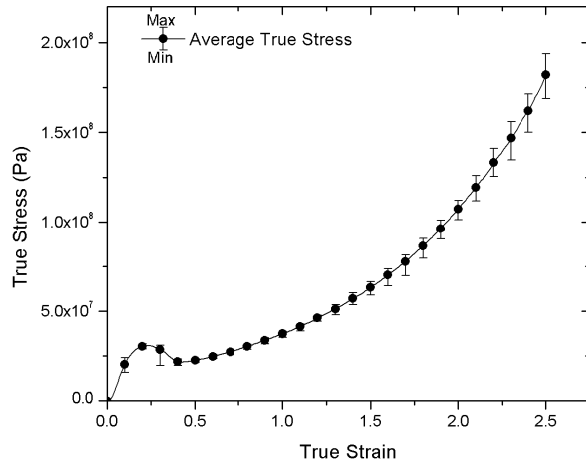


รูปที่ 1 (ก) กระป๋องน้ำมันหล่อลื่น และ (ข) ชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบดึงยี่ห้อ Instron รุ่น 4667

CST-03



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริงของ HDPE เกรด H6140B

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของ HDPE เกรด H6140B ที่ได้จากการดึงขึ้นงานทดสอบ

คุณสมบัติวัสดุ	ปริมาณ	หน่วย
โมดูลัสของยังค์	522.45	MPa
ความเค้นครากบน	27.369	MPa
ความเค้นครากล่าง	18.751	MPa
ขีดจำกัดการแปรผันตรง	15.673	MPa

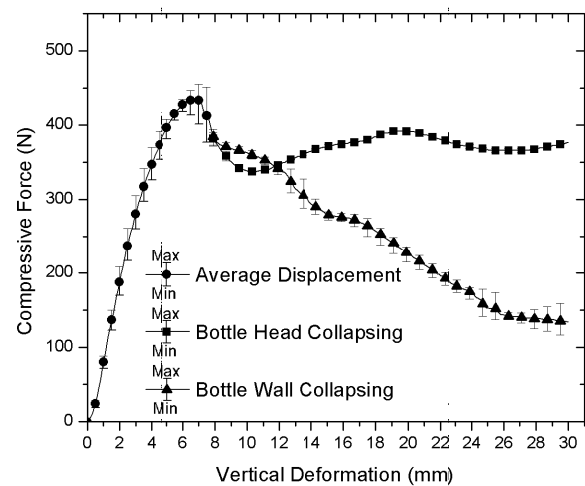
3. การทดสอบภาระด้านบน

กระป๋องน้ำมันหล่อลื่นความจุ 1 ลิตร จำนวน 10 ใบ ได้ถูกนำมาทดสอบภาระด้านบน (Top Load Test) โดยวิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D642 [8], D2659 [9] และ ISO 8113 [10] ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H50KS ของบริษัท Tinius Olsen Co. Ltd., UK (รูปที่ 4) การทดสอบจะกำหนดหัวกดซึ่งวางบนปากกระป๋องเคลื่อนที่ลงมากดในแนวตั้งเป็นระยะทาง 30 mm ด้วยความเร็ว 50 mm/min ผลการทดสอบภาระด้านบนของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นความจุ 1 ลิตร สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบในแนวตั้งของกระป๋องได้ดังรูปที่ 5 ผลการทดสอบภาระด้านบนพบว่าลักษณะการเสียหายโดยการยุบตัวของกระป๋องสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณี ได้แก่ การเสียหายด้วยการยุบที่บริเวณคอและไหล่ของกระป๋อง และการเสียหายโดยการพังของผนังด้านข้างกระป๋อง รูปที่ 6 ได้แสดงลักษณะการยุบตัวทั้ง 2 กรณี ซึ่งการยุบตัวจากการพังของผนังกระป๋องจะสังเกตเห็นได้ชัดที่ระยะทางของการกดเท่ากับ 15 mm

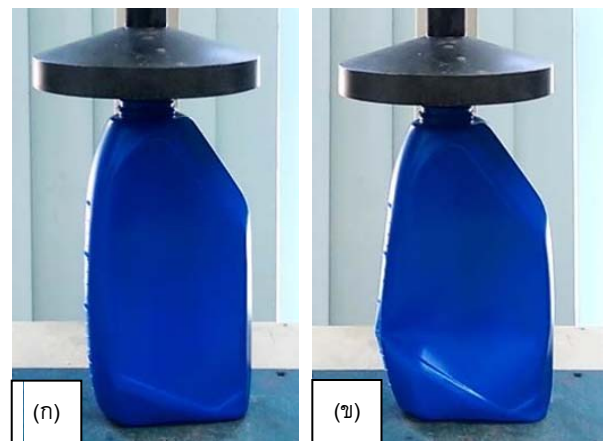


รูปที่ 4 การทดสอบภาระด้านบนของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น

H50KS



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระด้านบนและระยะยุบตัวในแนวตั้งของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่น ความจุ 1 ลิตร



รูปที่ 6 ผลการทดสอบภาระด้านบนที่ระยะกด (ก) 7.5 mm และ (ข) 15 mm

CST-03

ผลการทดลองสามารถนำไปใช้ในการระบุความแข็งแรงต่อการทดสอบภาระด้านบน ตามมาตรฐาน ASTM D2659 ของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่น โดยการระบุผลการทดสอบเป็นค่าภาระการกดคราก (Crushing Yield Load) การเสียรูปที่ภาระการกดคราก (Deflection at Crushing Yield Load) และความแข็งดิ่งต่อการกด (Apparent Crushing Stiffness) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ในตารางที่ 2 โดยค่าความแข็งดิ่งต่อการกดสามารถคำนวณด้วยสมการ (1)

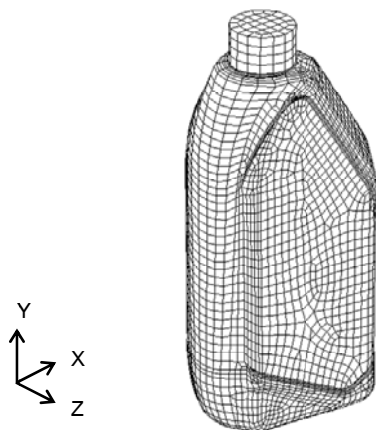
$$S_c = \frac{F_c}{D_c} \quad (1)$$

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแรงทางกลของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่น ความจุ 1 ลิตร

คุณสมบัติผลิตภัณฑ์	ปริมาณ	หน่วย
ภาระการกดคราก (F_c)	434.30	N
การเสียรูปที่ภาระการกดคราก (D_c)	6.481	mm
ความแข็งดิ่งต่อการกด (S_c)	67.353	kN/m

4. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบภาระด้านบน

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นความจุ 1 ลิตร ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เอลิเมนต์แบบชนิดแผ่นบาง (Shell Element) จำนวน 9,772 เอลิเมนต์ (รูปที่ 7) และกำหนดให้ความหนาแต่ละเอลิเมนต์มีค่าไม่เท่ากัน (Non-Uniform Thickness) การกำหนดความหนาของเอลิเมนต์จะใช้ค่าความหนาจากผลการวัดความหนากะป๋องน้ำมันหล่อลื่นจริง



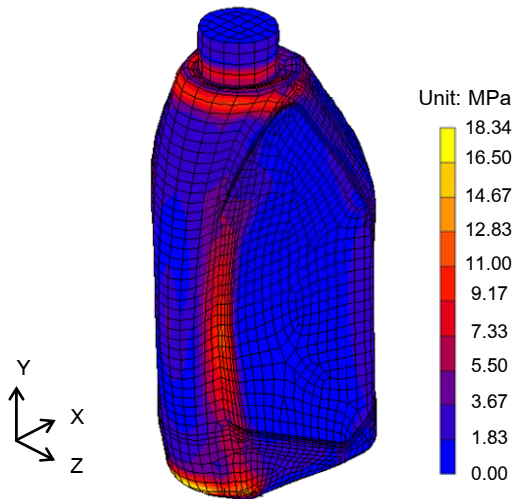
รูปที่ 7 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่น ความจุ 1 ลิตร

ค่าการเสียรูปของวัสดุของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกกำหนดให้เป็นแบบอีลาสติคพลาสติก (Elastic-Plastic) และมีการเสียรูปในช่วงพลาสติกเป็นแบบพลาสติกสมบูรณ์ (Perfectly Plastic) โดยการกำหนดค่าโมดูลัสของยังค์และค่าความเค้นครากเท่ากับค่าโมดูลัสของยังค์และค่าความเค้นครากบนที่ได้จากผลการทดสอบดึงชิ้นงานทดสอบในตารางที่ 1

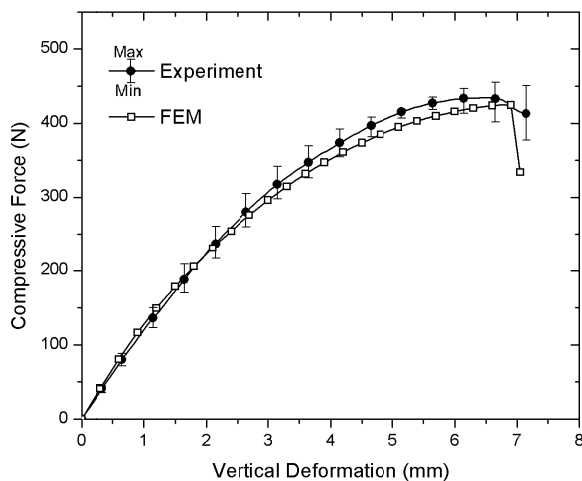
เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบภาระด้านบนของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วยการกำหนดเงื่อนไขตรึง (Fix) ให้กับโหนด (Node) ที่บริเวณฐานกระป๋อง และกำหนดการเคลื่อนที่ลงในแนวดิ่ง (ทิศทาง-y) เป็นระยะ 30 mm การกดกระป๋องให้เกิดการเคลื่อนที่ลงในแนวดิ่งได้สร้างเงื่อนไขบังคับแบบหลายจุด (Multiple Point Constraint หรือ MPC) ในการกระจายแรงลงบนโหนดที่บริเวณปากกระป๋อง เพื่อควบคุมระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของทุกโหนดที่บริเวณปากขวดให้มีความเท่ากัน

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบภาระด้านบนได้ถูกวิเคราะห์โดยใช้สมการการเสียรูปและความเครียดสูง (Large Deformation/Large Strain) ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบภาระด้านบนสามารถแสดงเป็นระดับขั้นสีของความเค้นและการเสียรูปที่ระยะการเคลื่อนที่ 6.75 mm ในรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงผลการยุบตัวของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง ผลการเคลื่อนที่เนื่องจากการกดทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งสามารถแสดงผลด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบตัวในแนวดิ่งของปากกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นของผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบภาระด้านบนจริงได้ในรูปที่ 9 ผลการจำลองการทดสอบภาระด้านบนของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่น ความจุ 1 ลิตรด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาหาความแข็งแรงทางกลของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่น ได้ค่าการกดคราก 424.53 N ค่าการเสียรูปที่ภาระการกดคราก 6.75 mm และค่าความแข็งดิ่งต่อการกด 62.89 kN/m ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นทั้งสามค่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบจริงมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็นร้อยละแสดงได้ในตารางที่ 3

CST-03



รูปที่ 8 ผลการแสดงความเค้นบนผนังและการเสียรูปของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบภาระด้านบนกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นความจุ 1 ลิตร ที่ระยะกด 6.75 mm



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์ย้อนกลับของภาระด้านบนกับการกระจัดในแนวตั้งของโหนดที่บริเวณปากขวด

ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงทางกลของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบภาระด้านบน

%error	F_c (N)	D_c (mm)	S_c (kN/m)
	2.25	4.68	6.62

5. การหาคุณสมบัติทางกลด้วยวิธีย้อนกลับ

วิธีการย้อนกลับ (Inverse Method) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) แบบเกรเดียนต์ (Gradient Based

Method) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ค่าโมดูลัสของยังค์จากผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบภาระด้านบนของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่น ความจุ 1 ลิตร สามารถเขียนสมการการคำนวณย้อนกลับได้ดังสมการ (2)

$$E_{i+1} = E_i \cdot \frac{S_{c,target}}{S_{c,i}} \quad (2)$$

เมื่อ E_i คือ ค่าโมดูลัสของยังค์แต่ละชั้นการทำซ้ำ i

$S_{c,target}$ คือ ค่าความแข็งแรงดึงต่อการกดจากการทดสอบภาระด้านบนเท่ากับ 67.353 kN/m

งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ใช้ค่าโมดูลัสของยังค์เริ่มต้น (E_0) มีค่าเท่ากับ 1 GPa การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของโมดูลัสของยังค์สามารถทำได้โดยป้อนค่า E_i ในแต่ละชั้นการทำซ้ำให้เป็นข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบภาระด้านบน ผลการคำนวณทำให้ได้ค่า $S_{c,i}$ ในแต่ละชั้นของการทำซ้ำเป็นข้อมูลนำออกเพื่อนำมาใช้คำนวณค่า E_{i+1} ในชั้นการทำซ้ำต่อไปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกกำหนดให้หยุดการคำนวณและทำการเก็บผลเมื่อค่าผลต่างของค่าภาระด้านบนที่คำนวณได้ในแต่ละชั้นเวลา (Time Step) มีค่าติดลบ ซึ่งสามารถแสดงการกำหนดได้ดังสมการ (3)

$$\Delta f = f_{i+1} - f_i \leq 0 \quad (3)$$

การเก็บผลทำให้ได้ค่าโมดูลัสของยังค์ และค่าความแข็งแรงทางกลของกระป๋องน้ำมันหล่อลื่นแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณย้อนกลับโดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

คุณสมบัติทางกลของวัสดุและผลิตภัณฑ์	วิธีย้อนกลับ	หน่วย
ภาระการกดคราก	428.65	N
การเสียรูปที่ภาระการกดคราก	6.45	mm
ความแข็งแรงดึง	66.46	kN/m
โมดูลัสของยังค์	525.66	MPa

CST-03

ผลการใช้วิธีย้อนกลับร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงมีค่าความคลาดเคลื่อนของภาระการกดคราก การเสียรูป ความแข็งตึง และโมดูลัสของยังค์เท่ากับ 1.30%, 0.03%, 1.33% และ 0.61% ตามลำดับ

6. สรุป

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบภาระด้นบนได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับการคำนวณย้อนกลับ โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเกรเดียนต์เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุและผลิตภัณฑ์กระป๋องน้ำมันหล่อลื่น ความจุ 1 ลิตร ซึ่งผลิตจากวัสดุโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง เกรด H6140B คุณสมบัติทางกลที่คำนวณได้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ โมดูลัสของยังค์ ภาระการกดคราก การเสียรูปที่ภาระการกดคราก และความแข็งตึงต่อการกด ผลการคำนวณด้วยวิธีย้อนกลับถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง พบว่าค่าโมดูลัสของยังค์ ภาระการกดคราก การเสียรูปที่ภาระการกดคราก และความแข็งตึงต่อการกดของผลการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อน 0.61%, 1.30%, 0.03% และ 1.33% จากผลการทดลองตามลำดับ วิธีการย้อนกลับเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเกรเดียนต์ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าความแม่นยำสูง ซึ่งสามารถนำวิธีการย้อนกลับนี้ไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าโมดูลัสของยังค์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงซับซ้อนอื่นๆ ได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์จากห้องปฏิบัติการกลศาสตร์เชิงคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบ (Laboratory of Computer Mechanics for Design, LCMD) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และได้รับการสนับสนุนการใช้เครื่องทดสอบดึงยืดจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ASTM. (2003). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM D 638-03. ASTM, West Conshohoken, PA.

[2] ASTM. (2002). *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*, ASTM D 882-02. ASTM, West Conshohoken, PA.

[3] ISO. (1993). *Plastics - Determination of Tensile Properties*, ISO 527:1993. London.

[4] Giro-Paloma, J., Rao, J.J., Diez-Pascual, A.M., Rayon, E., Flores, A., Martinez, M., Chimanos, J.M. and Fernandez, A.I. (2013). Depth-sensing indentation applied to polymer: A comparison between standard methods and analysis in relation to the nature of the materials, *European Polymer Journal*, vol. 49, pp. 4047 – 4053.

[5] Song, Z. and Komvopoulos, K. (2013). Elastic-plastic spherical indentation: deformation regimes, evolution of plasticity, and hardening effect, *Mechanics of Materials*, vol. 61, pp. 91 – 100.

[6] Hao, P., Liu, Y., Du, Y. and Zhang, Y. (2014). Young's modulus of polycrystalline titania microspheres determined by in situ nanoindentation and finite element modeling, *Journal of Nanomaterials*, vol. 2014, December 2014, pp. 1 – 5.

[7] Srikanth, N., Lim, V.C. and Gupta, M. (2000). The modeling and determination of dynamic elastic modulus of magnesium based metal matrix composite, *Journal of Materials Science*, vol. 35, March 2000, pp. 4661 – 4666.

[8] ASTM. (2000). *Standard Test Method for Determining Compressive Resistance of Shipping Containers, Components, and Unit Loads*, ASTM D642. ASTM, West Conshohoken, PA.

[9] ASTM. (2001). *Standard Test Method for Column Crush Properties of Blown Thermoplastic Containers*, ASTM D 2569-95. ASTM, West Conshohoken, PA.

[10] ISO. (2004). *Glass containers - Resistance to vertical load - Test method*, ISO 8113:2004. London.