การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

การยุบตัวของกระป๋องพลาสติกบรรจุของเหลวภายใต้ภาระด้านบนโดยวิธี FEA

Deformation Analysis by Using FEA of Plastic Liquid Bottles Under Top Load Test

สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์[1] ชาคริต สุวรรณจำรัส[2]
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
บางเขน กรุงเทพฯ
โทร 02-942-8555 ต่อ1818 E-mail: fengsjt@ku.ac.th[1], gech1973@hotmail.com[2]

Satjarthip Thusneyapan[1] Chakrit Suvanjumrat[2]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University
Bangkane, Bangkok
Tel. 02-942-8555 ext. 1818 E-mail: fengsjt@ku.ac.th[1], gech1973@hotmail.com[2]

บทคัดย่อ

การออกแบบภาชนะพลาสติกบรรจุของเหลวจะคำนึงถึงการรองรับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่วางซ้อนทับ หรือเป็นภาระด้านบน (Top Load) ที่กระทำที่ปากขวด ระยะยุบตัวของขวดภายใต้ภาระคงที่ ได้ใช้เป็นดรรชนีมาตราฐานในการกำหนดความแข็งแรงของขวด เนื่องจากรูปทรงของบรรจุภัณฑ์พลาสติกในปัจจุบันมีผิวที่ซับซ้อน ทำให้ยากต่อการกำหนดความหนาขวดให้เหมาะสม และผ่านการทดสอบได้ กระป๋องหรือขวดที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นกระป๋องบรรจุน้ำมันเครื่อง ซึ่งผลิตจากกระบวนการเป่า (Blow Molding) โดยความหนาของผนังขวดและน้ำหนักขวดเป็นตัวแปรหลักในการผลิต งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาแนวทางที่เหมาะสมของการคาดคะเนการยุบตัวของกระป๋องพลาสติกบรรจุของเหลวภายใต้ภาระด้านบนโดยใช้ซอฟต์แวร์ Finite Element Analysis (FEA) สำเร็จรูป ผล FEA ของการยุบตัวได้คำนวณความคลาดเคลื่อนนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงโดยกระป๋องที่ใช้ให้ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ –12.38 % สำหรับกระป๋องน้ำมันเครื่องแบบ 2 หู และ –10.79 % สำหรับกระป๋องแบบไม่มีหู

Abstract

One design consideration for a plastic liquid bottle is the capability in resisting loads on top of the bottle, as in the case of the storage. This condition is called “top load”. The deformation under a static top load is an index for determining the strength of the bottle. In the model product, the shapes of plastic bottles are complex surface, which is difficult to design a proper wall thickness to pass the top load test. The product investigated in this research was lubricant oil bottles from blow molding. The wall thickness and the weight of the bottles were the key factors in their manufacturing process. This research studied a proper process to predict the top load deformation by using commercial Finite Element Analysis (FEA) software. The FEA deformation results were compared with the actual mechanical experiment, had the average error of –12.38 % for lubricant oil bottles with two handles, and –10.79 % for bottles with no handle.

1. บทนำ

บรรจุภัณฑ์บรรจุของเหลวที่เป็นภาชนะพลาสติก ในปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้ทดแทนภาชนะโลหะและแก้วเป็นจำนวนมาก เนื่องด้วยภาชนะพลาสติกสามารถขึ้นรูปที่มีรูปแบบซับซ้อนสวยงามได้ง่ายรวดเร็ว และน้ำหนักเบากว่าโลหะและแก้ว ภาชนะพลาสติกจึงได้รับความนิยมและความต้องการสูง โดยทั่วไป ภาชนะพลาสติกเหล่านี้มีกรรมวิธีการผลิตโดยการเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) ที่มีความซับซ้อนในการควบคุมความหนาของภาชนะ และเกิดวัสดุสิ้นเปลืองมาก ในสภาวะการค้าปัจจุบัน รูปทรงของภาชนะมีการเปลี่ยนให้มีรูปทรงที่ทันสมัยอยู่เสมอทุกๆ ปี ทำให้มีผลต่อระยะเวลาในการออกแบบ การปรับปรุง และการผลิตภาชนะนั้นๆ ในกรณีของกระป๋องพลาสติกบรรจุของเหลวนอกจากความสวยงามของรูปทรงแล้ว ยังต้องผ่านมาตราฐานการทดสอบความแข็งแรง มาตราฐานทดสอบที่สำคัญมาตราฐานหนึ่ง คือ การทดสอบภาระด้านบน (Top Load Test) ซึ่งเป็นข้อกำหนดของมาตราฐานความปลอดภัยของการขนส่ง เนื่องจากการจัดเก็บโดยการวางซ้อนเป็นชั้นๆ ภายในคลังสินค้า [1]

การผลิตกระป๋องพลาสติกใช้แม่พิมพ์ที่มีต้นทุนการผลิตสูง ดังนั้นถ้าภาชนะนั้นออกแบบโดยไม่คำนึงถึงมาตราฐานทดสอบความแข็งแรงและถ้าไม่ผ่านการทดสอบก็จะต้องแก้ไขทั้งแบบและแม่พิมพ์ ทำให้เสีย

เวลาและงบประมาณในการดัดแปลงแก้ไขแม่พิมพ์หรือถ้าผ่านการทดสอบก็จะมีความหนาและน้ำหนักมากเกินความจำเป็น การนำเทคโนโลยี (CAD) Computer-Aided Design และซอฟแวร์ Finite Element Analysis (FEA) มาใช้ในกระบวนการการออกแบบกระป๋องพลาสติกที่มีรูปทรงที่ซับซ้อน โดยทำการจำลองการทดสอบภาระด้านบน ในคอมพิวเตอร์ก่อนการผลิต ทำให้สะดวกและรวดเร็วต่อการปรับปรุงแบบให้แข็งแรงในตำแหน่งที่อ่อนแอ ลดการสูญเสียพลาสติกจากการ Over Design ลดการแก้ไขแม่พิมพ์ และลดต้นทุนการผลิต

2. การทดสอบภาระด้านบน

งานวิจัยนี้ได้นำกระป๋องบรรจุน้ำมันเครื่องที่มีรูปทรงประกอบด้วย 2 หูจับ และใช้ HDPE เป็นวัสดุมาใช้ในการทดสอบ โดยเปรียบเทียบผลจาก FEA กับผลการทดสอบทางกล

2.1 การทดสอบทางกล

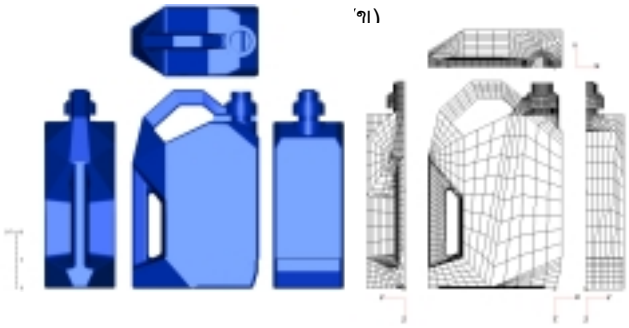
ภาระด้านบนได้กำหนดตั้งแต่ 11.0 กิโลกรัม ถึง 37.3 กิโลกรัม (ค่ามาตราฐานในการทดสอบในอุตสาหกรรม เท่ากับ 24.2 กิโลกรัม [1]) เพิ่มขึ้นทุก ๆ 4 กิโลกรัม แล้ววัดระยะยุบตัวที่ปากขวด (รูปที่ 1) ขนาดกระป๋องที่ใช้มี 4 ขนาด จำแนกตามน้ำหนัก คือ 300, 310, 320 และ 330 กรัม จำนวนขวดที่ใช้ต่อหนึ่งขนาดน้ำหนักคือ 5 ขวด

ในการทดสอบทางกล ความคลาดเคลื่อนในการปรับค่าภาระอยู่ที่ ±0.108 กิโลกรัม ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดระยะยุบตัว อยู่ที่ ±0.01 มิลลิเมตร และของตาชั่งอิเล็กทรอนิกส์วัดน้ำหนักขวด อยู่ที่ ±0.01 กรัม [2]

รูปที่ 1 กระป๋องทดสอบขนาด 5.0 ลิตร ในขณะทำการทดสอบภาระด้านบน แสดงการยุบตัวเกิดขึ้นที่คอขวด

2.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

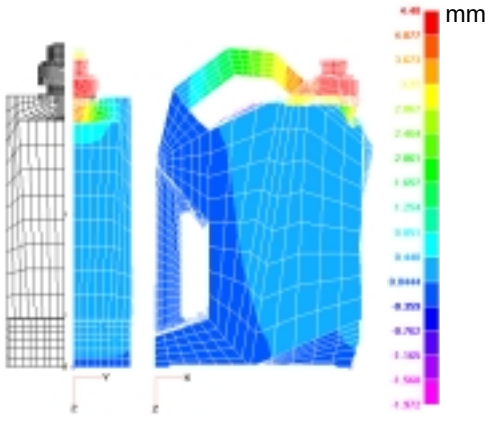
รูปทรงของกระป๋องน้ำมันเครื่อง ใช้ซอฟต์แวร์ CAD (Pro/ENGINEER) สร้างเป็นโซลิดโมเดล (รูปที่ 2ก) แล้วแบ่งครึ่งตามแกนสมมาตรเพื่อลดจำนวนข้อมูลในการวิเคราะห์ แบบโซลิดโมเดลครึ่งใบนำมาแปลงเป็นไฟล์มาตราฐาน STEP แบบพื้นผิว (Surface) เพื่อนำไปใช้ในซอฟต์แวร์ FEA (MSC.NASTRAN for Windows) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model หรือ FEM) ของขวดครึ่งใบที่ใช้ ได้แสดงในรูปที่ 2ข ซึ่งประกอบด้วย 3,500 โหนด และ 3,432 เอลิเมนต์ ผสมเอลิเมนต์ทั้งแบบรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยม โดยมีจำนวน 2 % ที่เป็นรูปสามเหลี่ยม ทั้งสองเอลิเมนต์เป็นแบบผนังบาง โดยกำหนดความหนาเอลิเมนต์ที่ 1.3368, 1.3897, 1.4355 และ 1.4815 มิลลิเมตร สำหรับกระป๋องขนาด 300, 310, 320 และ330 กรัม ตามลำดับ คุณสมบัติของ HDPE ที่ใช้เป็นแบบไม่เชิงเส้นประมาณโดยเส้นตรงสองเส้นโดยมีค่าความเค้น Yield ที่ 27.5 N/mm^2 และความเค้น Break เท่ากับ 34.35 N/mm^2 [3]



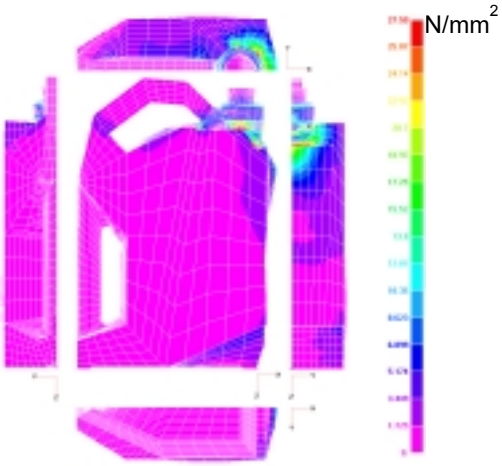
รูปที่ 2 แบบโซลิดโมเดลกระป๋องบรรจุน้ำมันเครื่อง (รูป ก) แบบ FEM แบบครึ่งใบของกระป๋องบรรจุน้ำมันเครื่อง (รูป ข)

3. ผลการวิเคราะห์ FEA และเปรียบเทียบผลการทดสอบจริง

ผลการวิเคราะห์ FEA ของระยะยุบตัวจากภาระด้านบนในแนวดิ่งเป็นระดับชั้นสี ที่ภาระด้านบนเท่ากับ 24.2 กิโลกรัม (ค่ามาตราฐานสำหรับการทดสอบ) ของกระป๋องน้ำมันเครื่องขนาด 330 กรัม ได้แสดงในรูปที่ 3 โดยรูปซ้าย แสดงกระป๋องในขณะที่ไม่มีภาระ รูปกลาง แสดงการยุบตัวภายใต้ภาระที่กำหนด และรูปขวา แสดงการยุบตัวเมื่อมองจากด้านในขวด ค่าความเค้นของผนังขวดทั้ง 5 ด้าน ได้แสดงในรูปที่ 4 ทั้งในรูปที่ 3 และ 4 นี้ แสดงสภาพการยุบตัวเกิดขึ้นชัดเจนที่บริเวณคอขวด ซึ่งมีสภาพใกล้เคียงกับการทดสอบจริง (รูปที่ 1)

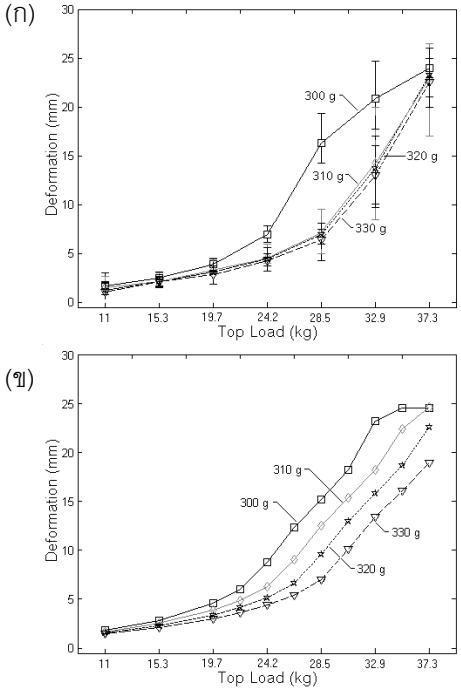


รูปที่ 3 ระยะยุบตัวที่ภาระ 24.2 กิโลกรัม ของกระป๋องขนาด 330 กรัม

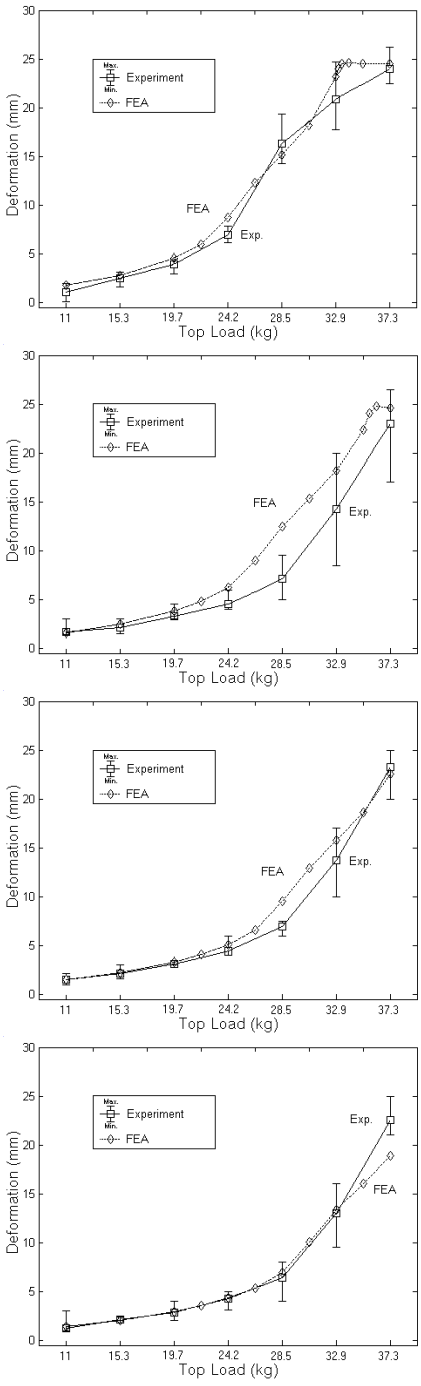


รูปที่ 4 ค่าความเค้นที่ภาระ 24.2 กิโลกรัม ของกระป๋องขนาด 330 กรัม

รูปที่ 5 เปรียบเทียบระยะยุบตัวของกระป๋องทั้ง 4 ขนาดจากผลการทดสอบทางกล (รูปที่ 5ก) และผลจาก FEA (รูปที่ 5ข) รูปที่ 6 เปรียบเทียบกราฟของระยะยุบตัวของขวดทดสอบทั้ง 4 ขนาด ที่ภาระตั้งแต่ 11.0 กิโลกรัม ถึง 37.3 กิโลกรัม ของผลการทดสอบทางกล และผลการวิเคราะห์ FEA ซึ่งในรูปที่ 6 นี้แสดงความสัมพันธ์ของ FEA คล้ายคลึงกันกับผลการทดสอบจริง ตารางที่ 1 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนจากผลการวิเคราะห์โดยใช้ FEA โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเท่ากับ -13.39 %, -24.80 %, -9.93 % และ –1.41 % สำหรับขวดขนาด 300, 310, 320 และ 330 กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบในช่วงภาระต่ำกว่า 24.2 กิโลกรัม มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ –20.36 %, -15.85 %, -5.25 % และ –3.48 % ตามลำดับ และช่วงภาระสูงกว่า



รูปที่ 5 เปรียบเทียบระยะยุบของการทดสอบทางกล(Exp.) และผล FEA ของกระป๋อง ขนาด 300, 310, 320 และ 330 กรัม ตามลำดับ



รูปที่ 6 เปรียบเทียบระยะยุบตัวของกระป๋องทดสอบทั้ง 4 ขนาด (ขนาด 300 กรัม, 310 กรัม, 320 กรัม และ 330 กรัม)

24.2 กิโลกรัม มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ -8.16%, -37.10 %, -15.95 % และ 0.64 % ตามลำดับโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรวมทั้งหมดเท่ากับ -12.38 % ความเค้นสูงสุดของขวดทุกขนาดจากการวิเคราะห์ FEA มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งยุบตัวของปากขวด โดยมีค่าเท่ากับ 27.5 N/mm^2 หรือเท่ากับค่า Yield ของ HDPE ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นที่แตกหัก ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระในช่วงภาระด้านบน (11.0 กิโลกรัม ถึง 34.3 กิโลกรัม) ของเส้น

กราฟในรูปที่ 5 และ 6 เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นในรูปสมการ Quadratic ซึ่งมีสมการของระยะยุบตัว (Δ) และภาระด้านบน (F) ในรูป

$$\Delta = CF^2 + KF + \Delta_0 \quad (1)$$

โดยค่า C, K และ Δ_0 คำนวณจากวิธี Least Squares ค่า SEE ในตารางที่ 2 คือค่า Standard Error of the Estimate ซึ่งเป็นค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูลที่กระจายออกจากสมการ Quadratic (สมการ 1) ค่าเฉลี่ย SEE ของขวดทั้ง 4 ขนาด เท่ากับ 1.38 มิลลิเมตร สำหรับผลการทดสอบทางกล และ 0.92 มิลลิเมตร สำหรับผลจาก FEA

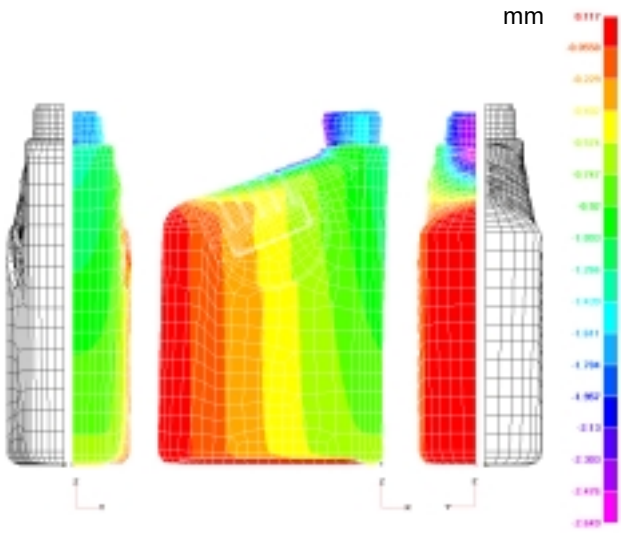
หลักการ FEA ที่ใช้ ได้นำมาทดสอบกับกระป๋องรูปทรงใหม่แบบไม่มีหู ดังแสดงในรูปที่ 7 ในรูปนี้แสดงระดับชั้นสีของระยะยุบตัวของกระป๋อง และรูปที่ 8 แสดงกราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัวจากผล FEA และการทดสอบทางกล ซึ่งให้ผลความคลาดเคลื่อนเท่ากับ -1.65 % ที่ภาระทดสอบมาตราฐาน (24.2 กิโลกรัม) และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย -10.79 % ตลอดช่วงภาระทดสอบ 11.0 กิโลกรัม ถึง 32.9 กิโลกรัม

ตารางที่ 1 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์โดยใช้ FEA

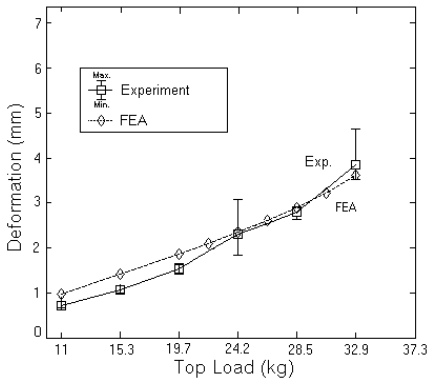
ภาระด้านบน (kg)	ความคลาดเคลื่อน (%)			
	ขวด 300 g	ขวด 310 g	ขวด 320 g	ขวด 330 g
11.00	-31.45	6.47	2.81	-12.08
15.30	-13.13	-16.67	-3.13	3.06
19.70	-16.49	-14.96	-5.40	-3.38
24.20	-26.52	-38.25	-15.30	-1.52
28.50	7.32	-75.70	-37.00	-9.54
32.90	-11.25	-27.37	-14.38	-2.70
37.30	-2.20	-7.10	2.87	16.31
เฉลี่ย	-13.39	-24.80	-9.93	-1.41

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นในช่วง 11 ถึง 37.3 กิโลกรัม

ขนาด (กรัม)	$\Delta = CF^2+KF+\Delta_0$	C (mm/kg^2)	K (mm/kg)	Δ_0 (mm)	SDE (mm)
300	การทดสอบทางกล	0.1103	-0.3200	-0.80	1.96
300	การวิเคราะห์ FEA	0.1113	-0.3104	-0.31	1.89
310	การทดสอบทางกล	0.2211	-3.2202	13.1	1.07
310	การวิเคราะห์ FEA	0.1709	-1.8074	6.38	0.63
320	การทดสอบทางกล	0.2254	-3.3118	13.4	1.18
320	การวิเคราะห์ FEA	0.1822	-2.2839	8.73	0.46
330	การทดสอบทางกล	0.2208	-3.2636	13.1	1.30
330	การวิเคราะห์ FEA	0.1612	-2.1329	8.51	0.68



รูปที่ 7 ระดับชั้นสีแสดงระยะยุบตัว ที่ภาระ 24.2 กิโลกรัม ของกระป๋องแบบไม่มีหู



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบระยะยุบตัวของผลการทดสอบทางกลและผลจาก FEA ของกระป๋องแบบไม่มีหู

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและทดสอบการยุบตัวของกระป๋องพลาสติกภายใต้ภาระด้านบน โดยใช้ FEA และเปรียบเทียบความแม่นยำกับการทดสอบทางกล ผลที่ได้จาก FEA เป็นแนวทางที่สามารถนำมาใช้ในการกำหนดความหนาเฉลี่ยของผนังขวดได้ และความเค้นที่วิเคราะห์ได้สามารถใช้ปรับเครื่องเป่าขวดให้ได้ความหนาของผนังขวดในตำแหน่งตามแนวขวางที่เกิดความเค้นสูงสุดได้ ผลจาก FEA สามารถช่วยวิเคราะห์ความคงทนของกระป๋องบรรจุของเหลวใดๆ ได้ก่อนดำเนินการผลิตจริง จึงลดการสูญเสียเวลาจากการแก้ไขปรับปรุงแม่พิมพ์และลดการสูญเสียของพลาสติกที่สิ้นเปลืองในการทดสอบการผลิต ซึ่งเป็นการลดความสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการผลิต

การยุบตัวของกระป๋องพลาสติกบรรจุของเหลว จากงานวิจัยนี้พบความสัมพันธ์ของระยะยุบตัวกับภาระด้านบนเป็นแบบไม่เชิงเส้นตามสมการ Quadratic ความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ FEA โดยมีค่าเฉลี่ยทั้งหมดของขวดทั้งสองรูปแบบที่วิจัยเท่ากับ -12.38 %

ตัวแปรความเที่ยงตรงในการใช้ FEA ในการวิเคราะห์การยุบตัวของกระป๋องพลาสติก ได้แก่

1. ความหนาของผนังกระป๋องพลาสติกจากการเป่าจะไม่สม่ำเสมอจึงมีความคลาดเคลื่อนจากการกำหนดให้มีความหนาคงที่ทั้งใบของแบบจำลอง FEM ที่ใช้
2. ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง FEM จากแบบจริง
3. การกำหนดขนาดและทิศทางของแรงหรือโหลด
4. ค่าคุณสมบัติทางกลของพลาสติก (HDPE) เช่น ค่าความหนาแน่น และค่า Young's Modulus ของ HDPE ที่ทดสอบ และกำหนดโดยผู้ผลิตเม็ดพลาสติก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ บริษัทปัญจวัฒนาพลาสติก จำกัด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์ และคณะ, "**รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการการออกแบบภาชนะบรรจุของเหลวโดยกรรมวิธีวิศวกรรม",** สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.), ปี พ.ศ. 2546

[2] ชาคริต สุวรรณจำรัส, "**การจำลองมาตราฐานการทดสอบขวดพลาสติกโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม**", วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ,ปี พ.ศ. 2546

[3] บริษัทไทยโพลีเอททีลีน จำกัด, "**สมบัติทางกายภาพของ TPE H6240 B**", ปี พ.ศ. 2541, หน้า 1.

[4] Belcher, S. J. "**Practical Extrusion Blow Molding**", Marcel Dekker, Inc. New York, 1999

[5] Lee, N. C. "**Plastic Blow Molding Handbook**", Van Nostrand Reinhold, New York, 1990

[6] Lee, N. C. "**Blow Molding Design Guide**", Carl Hanser Verlag, Munich, 1998

[7] Strebel, J. "ESCR Performance of Blow Molded Polyethylene Bottles as Measured by The Internal Pressure Test", **Polymer Testing**, Vol.14, pp.189-202