

การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมของขวด PET ขนาด 6 ลิตรโดยใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

Optimization of Geometrical Factors for 6-liter PET Bottle using Finite Element and Response Surface Methodology

ฐานวิทย์ แนมใส

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อ.เมือง จ.สงขลา 90000

กุลภัสร์ ทองแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยทางเรขาคณิตของขวด PET ขนาด 6 ลิตร โดยการประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางเรขาคณิตของขวดพลาสติกที่ส่งผลต่อค่าความเค้นสูงสุดของขวดพลาสติก และสามารถนำไปหารูปทรงขวดพลาสติกที่เหมาะสม โดยที่ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้นต้องผ่านค่าความเค้นครากของวัสดุ นอกจากนี้ค่าความเค้นสูงสุดของขวดพลาสติกที่คำนวณจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องผ่านการตรวจสอบความถูกต้องจากผลการทดลอง ผลจากงานวิจัยนี้ได้สมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถ ทำนายค่าปัจจัยที่เหมาะสมของขวดพลาสติก Polyethylene Terephthalate (PET) ขนาด 6 ลิตรได้ ซึ่งประกอบด้วย มุมระหว่างฝาขวดและคอขวดมีค่า 115° มุมระหว่างตัวขวดและคอขวดมีค่า 121° ความกว้างของลอนขวดมีค่า 4.6 mm ความลึกของลอนขวดมีค่า 2.3 mm และระยะห่างระหว่างลอนขวดมีค่า 27.4 mm โดยค่าความเค้นสูงสุดของขวดที่มีรูปทรงเหมาะสมโดยมีค่า 46.05 MPa ซึ่งสามารถลดค่าความเค้นจากรูปแบบปัจจุบันของขวดได้ 4.6 %

คำสำคัญ : ขวด PET ขนาด 6 ลิตร, วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ค่าปัจจัยที่เหมาะสม

Abstract

This article is to study geometrical factors of 6-liter Polyethylene Terephthalate (PET) bottle using Finite Element Method (FEM) and Response Surface Method (RSM) approaches in order to determine mathematical model of the effect geometrical factors on the stress-crack resistance and also can optimize the bottle shape. In the analysis, the maximum stress of designed bottles was less than the yield stress and the FEM model of stress-crack resistance was verified by experimental studies. From the result, the optimal bottle shape included: the neck angle of 115° , the shoulder angle of 121° , the ripple width of 4.6 mm, the ripple depth of 2.3 mm and the distance between ripple of 27.4 mm. Furthermore, these factors can induce the maximum stress to be less than the current bottle shape by 4.6% at 46.05 MPa.

Keywords : 6-liter PET Bottle, Response Surface Methodology, Finite Element Method, Optimization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ปัจจุบันขวดพลาสติกเพื่อการบรรจุน้ำดื่มมีหลายรูปแบบ เนื่องจากลักษณะการใช้งาน และปริมาณน้ำดื่ม เป็นต้น ในการออกแบบขวดพลาสติก ค่าความแข็งแรงของขวดเป็น ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา โดยทั่วไปขวดน้ำพลาสติกจะ รับภาระหลัก 2 ภาระ คือ ความดันที่เกิดขึ้นภายในขวดจากน้ำ ดื่มที่ถูกบรรจุเข้าไป และภาระกระทำตามแนวแกนขวดน้ำ พลาสติกเนื่องจากการวางเรียงเป็นชั้นสำหรับการจัดเก็บและ ขนส่ง [1] ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของขวดพลาสติก มี 3 ปัจจัยหลัก คือ รูปร่างของขวด (bottle shape) ลวดลายบน ตัวขวด (bottle pattern) และความหนาของขวด (bottle thickness)

มีหลายงานวิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความ แข็งแรงของขวด เช่น ความหนาขวดเป็นปัจจัยที่แปรผัน ตรงต่อค่าความแข็งแรงของขวดพลาสติก [2-4] และที่ความ หนาขวดเดียวกันขวดพลาสติกที่มีจำนวนลอนมากจะมีค่า ความแข็งแรงของขวดมากขึ้น จากงานวิจัยของ ชีร์นัช อาซัว และคณะ [5] ได้วิเคราะห์การเพิ่มจำนวนลอนของ ขวดพลาสติกเพื่อลดปริมาณพลาสติก โดยที่ค่าความ แข็งแรงของขวดยังผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.998) [6] ผลการวิจัยสามารถลดความหนาขวดลงได้ 22.6 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ลวดลายบนตัวขวดยังมีผลต่อค่า ความแข็งแรงเช่นกัน โดยวิภาส และ มนต์ศักดิ์ [7] ได้ ออกแบบลายด้านข้างขวดใหม่ทำให้ขวดสามารถรับแรงกด ทับด้านบนได้มากยิ่งขึ้น จากการศึกษาพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาที่ละปัจจัยในการออกแบบขวดที่ส่งผลต่อความ แข็งแรงของขวด แต่ไม่เน้นศึกษาผลกระทบหลายปัจจัยที่ เกิดขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะใช้วิธีการวิเคราะห์ แบบพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) [8] เพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงใน รูปของความเค้นสูงสุดของขวดพลาสติกและหาค่า เหมาะสมของปัจจัยแต่ละตัว โดยรูปร่างของขวดพลาสติก ที่ถูกออกแบบจะต้องผ่านค่าความเค้นครากของวัสดุ และ ผู้วิจัยได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ในการคำนวณค่าความเค้นสูงสุดของขวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

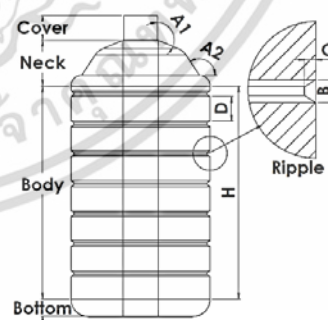
พลาสติกที่รับแรงกระทำตามแนวแกนแทนการวิเคราะห์ ด้วยการทดลองซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้ ได้นำขวดพลาสติก Polyethylene terephthalate (PET) ขนาด 6 ลิตรยี่ห้อสิงห์ (SINGHA) มาเป็นกรณีศึกษา เนื่องจากมีส่วนแบ่งทางการตลาดของน้ำดื่มบรรจุขวดมาก ที่สุดในประเทศ [9] ผลจากงานวิจัยสามารถช่วยผู้ออกแบบ ให้เข้าใจถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของขวดเพื่อ นำไปปรับปรุงรูปร่างขวดพลาสติกให้มีความแข็งแรงที่ ผ่านมาตรฐานการทดสอบขวดน้ำพลาสติก สิ่งนี้อาจส่งผล ต่อการลดปริมาณการใช้พลาสติกที่กระทบต่อต้นทุนการ ทางด้านวัตถุดิบในกระบวนการผลิตได้

2. วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

งานวิจัยนี้ใช้หลักการพื้นผิวผลตอบสนอง (RSM) มา ประยุกต์ในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของ ขวด โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสม กลาง (Central Composite Design, CCD) [8] เพื่อหาค่าที่ เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยโดยแสดงในรูปของทาง คณิตศาสตร์

2.1 ปัจจัยที่ศึกษา

รูปร่างของขวดน้ำพลาสติกขนาด 6 ลิตรประกอบด้วย 4 ส่วนหลักได้แก่ฝาขวด (cover) คอขวด (neck) ตัวขวด (body) และฐานขวด (bottom) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบขวดน้ำพลาสติกขนาด 6 ลิตร

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรง ของขวดพลาสติกเฉพาะคอขวดและตัวขวด เนื่องจากเป็นส่วน ที่มีพื้นที่มากที่สุดและมีความบางที่สุดของขวด [5] โดยปัจจัย ที่ทำการศึกษาคือ 4 ปัจจัย ดังรูปที่ 1 ซึ่งได้แก่

1) อัตราส่วนมุมของขวด (A) คือ อัตราส่วนของมุม A_1 (มุมระหว่างฝาขวดและคอขวด) และมุม A_2 (มุมระหว่างตัวขวดและคอขวด) ดังสมการที่ (1)

$$A = \frac{A_1}{A_2} \quad (1)$$

2) ความกว้างของลอนขวด (B) หน่วยเป็น mm

3) ความลึกของลอนขวด (C) มีค่าเป็น 0.5 เท่าของค่าความกว้างของลอนขวด ($C = 0.5B$) หน่วยเป็น mm

4) ระยะห่างระหว่างลอนขวด (D) มีความสัมพันธ์กับความกว้างของลอนขวดและความสูงของตัวดังสมการที่ (2)

$$D = \frac{H}{N} - B \quad (2)$$

โดยที่ H คือ ระยะของตัวขวดหน่วยเป็น mm และ N คือ จำนวนลอนขวดซึ่งขวดที่นำมาวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 7

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ได้ควบคุมปริมาตรของขวดพลาสติกซึ่งกำหนดไว้ที่ค่า $1.0042 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ เนื่องจากกระบวนการผลิตขวดพลาสติกชนิดนี้ ปริมาตรพลาสติกของขวดจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัว preform [10] ที่เลือกมาใช้งานในขั้นตอนการฉีดเป่าแบบดึงยืด (Injection Stretch Blow Molding) [10]

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือ Essential Regression ของโปรแกรม MS Excel [11] วิเคราะห์การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) เพื่อศึกษา 4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงขวด (หัวข้อ 2.1) โดยตัวแปรแต่ละตัวจะแบ่งออกเป็น 5 ระดับ และขวดรูปทรงปัจจุบันอยู่ที่ระดับปานกลางซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ (0) ของทุกปัจจัยดังแสดงในตารางที่ 1 โดยค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นของขวดพลาสติกจะเป็นผลตอบสนอง (ตารางที่ 2) ผลของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกเลือกมาจะอยู่ในรูปของสมการพหุนามดีกรี 2 (Second order polynomial equations) ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังนั้นการดำเนินการวิจัยนี้ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย ความแม่นยำของสมการทางคณิตศาสตร์และการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม

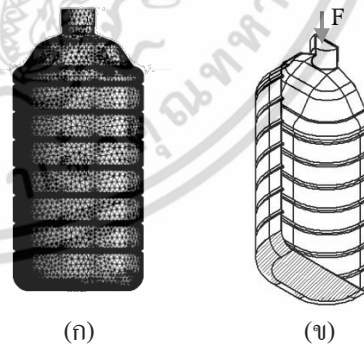
ตารางที่ 1 ระดับของปัจจัยตามการออกแบบ CCD

ปัจจัย/ ระดับ	ต่ำสุด (-2)	ต่ำ (-1)	ปานกลาง (0)	สูง (1)	สูงสุด (2)
A	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
A_1	106	109	112	115	118
A_2	130	127	124	121	118
B	4.50	5.50	6.50	7.50	8.50
C	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25
D	29.33	28.17	27.00	25.83	24.67

3. แบบจำลองการรับภาระขวด

3.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม ANSYS [12] ในการวิเคราะห์ แต่ต้องมีการสร้างแบบจำลองขวดน้ำพลาสติกขนาด 6 ลิตร จากโปรแกรม Solid Work ก่อน เนื่องจากรูปร่างที่ซับซ้อนของตัวขวด หลังจากนั้นนำแบบจำลองขวดมาทำการแบ่งเอลิเมนต์เป็นชนิดทรงสี่หน้า (tetrahedral element) และหาจำนวนเอลิเมนต์น้อยที่สุดที่ใช้ในการจำลอง ผลที่ได้คือขวดน้ำพลาสติกมีจำนวน 122,159 เอลิเมนต์โดยเอลิเมนต์ขนาดเล็กสุดเท่ากับ 0.5 mm อยู่ที่บริเวณลอนขวดแสดงดังรูปที่ 2 (ก) นอกจากนี้คุณสมบัติเชิงกลของขวดพลาสติก PET [4] ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's Modulus) 2.9 GPa ค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) 55 MPa และความหนาแน่นมวล (density) $1,200 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 2 (ก) การแบ่งเอลิเมนต์ขวด (ข) เงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมการรับภาระของขวดดังแสดงรูปที่ 2 (ข) ผู้วิจัยได้กำหนดตามการทดสอบความทนทานการรับน้ำหนักตามมาตรฐาน มอก. 998 [6] มีรายละเอียดดังนี้

1) ฐานขวดถูกยึดการกระจัดทุกทิศทาง

2) แรงกดบนขวดน้ำพลาสติก (F) กำหนดจากการวางเรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

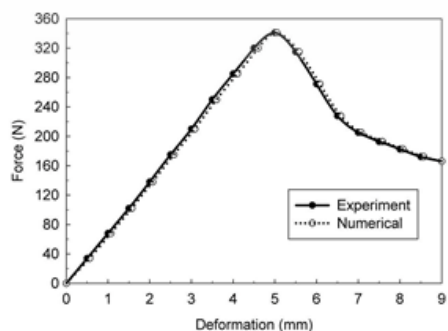
ซ้อนกันของขวด 4 ใบ [6] ดังนั้นแรงที่กระทำกับขวดด้านล่างจึงเกิดจากน้ำหนักขวด 3 ขวดคิดเป็น 183.94 N 3) กำหนดความดันเกจของน้ำที่บรรจุภายในขวดให้ มีค่าสูงสุดที่บริเวณก้นขวดเท่ากับ 3,305 Pa ซึ่งคำนวณมาจากความสูงของขวดเท่ากับ 337 mm นอกจากนี้ได้กำหนดการวิเคราะห์เป็นแบบสถิตย์เชิงเส้น (linear static) กรณีสมมาตร (symmetry) เนื่องจากแรงที่กระทำกับขวดอยู่ในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบคืนรูป (elastic deformation) และลักษณะของรูปทรงขวดที่สมมาตรทำให้ผลลัพธ์ทางคุณสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic)

3.2 การตรวจสอบความถูกต้อง

ในการตรวจสอบความถูกต้องการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลที่ได้จากการทดลองโดยทดสอบการรับภาระด้านบนของขวดที่บรรจุน้ำให้เต็มปริมาตร (top-load test) หากความสัมพันธ์ของแรงที่กดกับระยะขยุบตัวของขวดจนถึงสถานะเสียรูปแบบถาวร (plastic deformation) โดยในส่วนของวิธีการทดลองได้ใช้เครื่อง Instron [13] (รูปที่ 3) นำค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองตรวจสอบกับค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรมซึ่งแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 การทดสอบขวดน้ำพลาสติกโดยเครื่อง Instron



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างค่าจากการทดลอง

และค่าจากการคำนวณการเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4 แนวโน้มของกราฟทั้งสองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อทดสอบทางสถิติด้วยวิธี t-test [14] เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลทั้ง 2 กลุ่ม พบว่า ข้อมูลทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันในช่วงระดับความเชื่อมั่น 95 % และเมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Root Mean Square Deviation, RMSD) เพื่อวัดความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองแบบเมื่อเทียบกับผลการทดลองได้ค่า 0.07596 N ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในการจำลองเชิงตัวเลข

4. ผลการวิเคราะห์

4.1 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย

การวิเคราะห์เพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของขวดในรูปแบบของค่าความเค้นสูงสุด (maximum stress, Y) โดยใช้หลักการพื้นผิวผลตอบสนอง ออกแบบการทดลองแบบ CCD สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 และเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยแต่ละเทอม (coefficient) ค่า P-value, R^2 , R^2_{adj} และค่าผลรวมกำลังสอง (SS) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3 การหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อทำนายค่าความเค้นสูงสุดของขวดน้ำพลาสติกต้องตรวจสอบค่า p-value ของค่าสัมประสิทธิ์ทั้งปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยทั้งหมดหากค่า p-value ของปัจจัยใดมีค่ามากกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นก็จะไม่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นสูงสุด

จากตารางที่ 3 สามารถสรุปเทอมปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นสูงสุดของขวดได้เป็น 2 ส่วน คือ 1) อิทธิพลปัจจัยหลัก (first order term) ได้แก่ A B C และ D และ 2) อิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (two level of interaction term) ได้แก่ AB และ AC และสามารถสร้างสมการพยากรณ์ได้ดังสมการที่ (3) ซึ่งเป็นสมการที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบขวดน้ำพลาสติกขนาด 6 ลิตรภายใต้ มอก. 998 ในส่วนของความทนทานการรับน้ำหนัก

$$\begin{aligned} \text{Maximum stress (Y)} = & 48.142 - 1.1475A + 0.4183B + \\ & 0.7150C - 0.1933D + 0.2313AB \\ & + 0.4438AC \end{aligned} \quad (3)$$

ตารางที่ 2 ผลการจำลองจากการออกแบบ CCD

No.	A	B (mm)	C (mm)	D (mm)	Y (MPa)
1	-1	-1	-1	-1	50.05
2	1	-1	-1	-1	46.34
3	-1	1	-1	-1	50.13
4	1	1	-1	-1	47.38
5	-1	-1	1	-1	50.45
6	1	-1	1	-1	48.55
7	-1	1	1	-1	50.55
8	1	1	1	-1	49.55
9	-1	-1	-1	1	49.92
10	1	-1	-1	1	46.22
11	-1	1	-1	1	50.01
12	1	1	-1	1	47.25
13	-1	-1	1	1	50.32
14	1	-1	1	1	48.41
15	-1	1	1	1	50.42
16	1	1	1	1	49.41
17	0	0	0	0	48.25
18	0	0	0	0	48.25
19	0	0	0	0	48.25
20	0	0	0	0	48.25
21	-2	0	0	0	50.45
22	2	0	0	0	46.00
23	0	-2	0	0	46.85
24	0	2	0	0	49.65
25	0	0	-2	0	46.55
26	0	0	2	0	49.95
27	0	0	0	-2	49.15
28	0	0	0	2	47.35
29	0	0	0	0	48.25
30	0	0	0	0	48.25

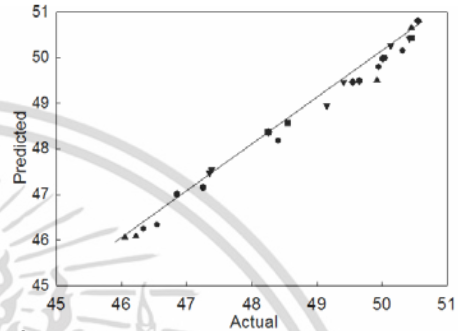
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Source	SS	Coefficient	F	P
Model	54.3748	48.1420	20.22	<0.002*
A	31.6022	-1.1475	164.5	<0.000*
B	4.2001	0.4183	21.87	<0.000*
C	12.2694	0.7150	63.88	<0.000*
D	0.8971	-0.1933	4.67	<0.048*
A*A	0.4999	0.1350	2.60	0.129
B*B	0.4999	0.1350	2.60	0.129
C*C	0.4999	0.1350	2.60	0.129
D*D	0.4999	0.1350	2.60	0.129
A*B	0.8556	0.2313	4.65	<0.049*
A*C	3.1506	0.4438	16.40	<0.001*
A*D	0.0000	-0.0013	0.00	0.991
B*C	0.0001	-0.0025	0.00	0.982
B*D	0.0000	-1.13e-16	0.00	1.000
C*D	0.0001	-0.0025	0.00	0.982

PRESS = 16.9358 $R^2 = 95.51\%$ $R^2_{adj} = 90.70\%$

4.2 ความแม่นยำของสมการทางคณิตศาสตร์

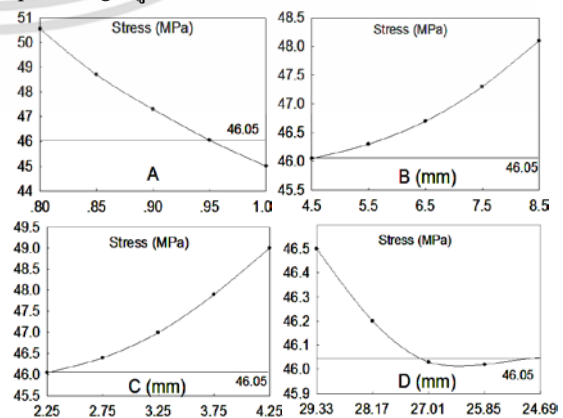
เพื่อยืนยันความแม่นยำของสมการทางคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้นำค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทำนาย (ค่าแกน X) มาเทียบกับค่าจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ค่าแกน Y) ทุกคู่อันดับของค่าทั้งสองมีค่าเข้าใกล้ค่าเศษตกค้าง (residual) ที่เท่ากับศูนย์ (เส้นทแยงมุม และค่าเศษตกค้างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.24 MPa



รูปที่ 5 แผนภาพการกระจายของค่าความเค้นสูงสุด

4.3 การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม

จากรูปที่ 6 ค่าเหมาะสมที่สุดของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยมีดังนี้ 1) อัตราส่วนมุมของขดน้ำ (A) เท่ากับ 0.95 ซึ่งเกิดจากมุมระหว่างฝาขวดและคอขวดมีค่าเท่ากับ 115° และมุมระหว่างตัวขวดและคอขวดมีค่าเท่ากับ 121° 2) ความกว้างของลอนขวด (B) เท่ากับ 4.6 mm 3) ความลึกของลอนขวด (C) เท่ากับ 2.3 mm และ 4) ระยะห่างระหว่างลอนขวด (D) เท่ากับ 27.4 mm โดยใช้ค่าของผลตอบสนอง (Y) ที่ส่งผลให้เกิดค่าความเค้นน้อยที่สุดของขวดพลาสติกเมื่อรับแรงกระทำจากด้านบน (Top load) มีค่าเท่ากับ 46.05 MPa และค่าความพึงพอใจรวม (Desirability) ของ Response optimizing อยู่ที่ 0.996



รูปที่ 6 จุดที่เหมาะสมแต่ละปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุป

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสร้างสมการคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความเค้นสูงสุดของขวดน้ำพลาสติก PET ขนาด 6 ลิตร ที่ และสามารถหาค่าเหมาะสมของปัจจัยแต่ละตัวที่ส่งผลต่อค่าความเค้นของขวด โดยรูปทรงของขวดพลาสติกที่ถูกออกแบบยังอยู่ภายใต้ค่าความเค้นคราก (55 MPa) ผลจากการวิจัยสามารถสร้างสมการคณิตศาสตร์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสอง และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การรับภาระของขวดพลาสติกเพื่อหาค่าความเค้นสูงสุดแทนการทดลองได้ ผลจากการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นสูงสุดของขวดพลาสติกแสดงดังสมการที่ (3) นอกจากนี้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าความเค้นของขวดน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 46.05 MPa คือ 1) อัตราส่วนมุมของขวดคือ 0.95 ประกอบด้วยมุมระหว่างฝาขวดและคอขวดคือ 115° มุมระหว่างตัวขวดและคอขวดคือ 121° 2) ความกว้างของลอนขวดคือ 4.6 mm 3) ความลึกของลอนขวดคือ 2.3 mm และ 4) ระยะห่างระหว่างลอนขวดคือ 27.4 mm ซึ่งสามารถลดความเค้นที่เกิดขึ้นจากรูปแบบปัจจุบันของขวดได้ 4.6 % และเพิ่มค่าความปลอดภัย (SF) ได้ 4 % จากค่า SF ของขวดรูปแบบปัจจุบันซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.5

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์กริดมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (PSU Grid Center Thailand) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Demirel and F. Daver, "Effects of Preform Deformation Behavior on the Properties of the Poly (ethylene terephthalate) Bottles," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.126, pp.1300–1306, 2012.
- [2] B. Demirel and F. Daver, "Optimization of Poly (ethylene terephthalate) Bottles via Numerical Modeling: A Statistical Design of Experiment Approach," *Journal of Applied Polymer Science* Vol.114, pp.1126–1132, 2009.
- [3] B. Demirel and F. Daver, "An energy saving

drink bottles," *Procedia Engineering* Vol.49, pp.280- 286, 2012.

- [4] C.A. Miranda, J.J. Câmara, O. P. Monken and C.G. Santos, "Design Optimization and Weight Reduction of 500 mL CSD PET Bottle through FEM Simulations," *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 1, pp. 947-959, 2011.
- [5] T. Nitivaraput and M. Pimsarn, "Mass reduction study of a water filled PET-Plastic bottle," *The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, pp. CST09, October, 2554.
- [6] C. Bannawat, "Thai Industrial Standard of Water Filled Plastic Bottle (TIS.998-2010)," *Royal Thai Government Gazette*, Bangkok, Thailand, vol. 127, pp. 14, 2553.
- [7] V. Nitivaraput and M. Pimsarn, "Buckling Load Analysis of a PET-Plastic Bottle," *The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, pp. AMM-027184, November, 2552.
- [8] J. Cornell, "Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data (third ed.)," *Wiley* ISBN 0-471-07916-2, 2002.
- [9] A. Hernmar, "Singha vs Nestle purelife Competitive Brand" [online] information on: <http://www.positioningmag.com/magazine/printnews.aspx?id=69742.2551>
- [10] B. Ottmar, "Stretch Blow Molding (Second Edition)," pp. 95-118, 2012.
- [11] S. David, W. Joachim and Y. Robert, "Essential Regression and Essential Experimental Design," [online] information on: <http://www.jowerner.homepage.t-online.de/download.htm> 2013
- [12] ANSYS Software, [online] information on: <http://www.ansys.com>. 2013
- [13] Instron machine, [online] information on: <http://www.instron.co.th/wa/product/5900-Series-Mechanical-Testing-Systems.aspx>. 2013

เอกสารอ้างอิงในบทความนี้เป็นการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้