



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ
การวิเคราะห์และออกแบบกระป๋องบรรจุอาหารแบบมีลอน
โดยใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุด

โดย ภัทรมน จงประดิษฐ์ และคณะ

มิถุนายน 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการวิเคราะห์และออกแบบกระป๋องบรรจุอาหารแบบมีลอน
โดยใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุด

Analysis and Design Optimization of Food Container with Corrugated Surface

ผู้วิจัย

นางภัทรมน จงประดิษฐ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5380005

ชื่อโครงการ: โครงการการวิเคราะห์และออกแบบกระป๋องบรรจุอาหารแบบมีลอน
โดยใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุด

ชื่อนักวิจัย: นางภัทรมน จงประดิษฐ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

อีเมล: pattaramon.tan@kmutt.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 16 มิถุนายน 2553 – 16 มิถุนายน 2555

บทคัดย่อ:

กระป๋องบรรจุอาหารส่วนใหญ่มีลักษณะโครงสร้างเป็นทรงกระบอกเปลือกบาง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความสามารถในการรับภาระดัดต่ำ เมื่อเทียบกับความสามารถในการรับพลังงานความเครียดที่ผิว ภาระที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตที่อาจทำความเสียหายให้กระป๋องบรรจุอาหารเกิดจากการโก่งเดาะของกระป๋องเมื่อรับแรงดันสุญญากาศและแรงในแนวแกน การออกแบบกระป๋องบรรจุอาหารให้มีลอนที่ตัวกระป๋อง จะเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันสุญญากาศ แต่จะมีผลทำให้ความแข็งแรงต่อแรงกดในแนวแกนลดลง ลักษณะของลอนจึงจำเป็นต้องออกแบบให้เหมาะสมต่อแรงที่เกิดขึ้นในการใช้งาน งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการจำลองพฤติกรรมความเสียหายของกระป๋องบรรจุอาหารจากความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกน เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้มาวิเคราะห์ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อภาระรับแรง แล้วจึงใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองด้วยการออกแบบแบบ Central Composite Design ในการวิเคราะห์หาฟังก์ชันพหุนามลำดับขั้นที่สอง ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของผลตอบสนองกำลังการรับแรงสุญญากาศ และแรงกดในแนวแกน กับตัวแปรลอนกระป๋องที่สำคัญ จากการศึกษาพบว่าความลึกลอนกระป๋อง รัศมีลอน และระยะห่างระหว่างลอน เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการรับภาระตามลำดับ เมื่อนำฟังก์ชันพหุนามที่ได้ มาออกแบบรูปแบบลอนที่เหมาะสมที่สุดกับสภาพการใช้งานที่ต้องการ พบว่าสามารถลดปริมาณวัสดุในการผลิตตัวกระป๋อง ได้สูงที่สุดถึง 12 เปอร์เซ็นต์ โดยมีประสิทธิภาพการรับแรงที่ต้องการได้

คำหลัก : การวิเคราะห์การโก่งเดาะ; การออกแบบรูปแบบลอน; วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์; วิธีพื้นผิวตอบสนอง; การหาค่าเหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง

Abstract

Project Code : MRG5380005

Project Title : Analysis and Design Optimization of Food Container with Corrugated Surface

Investigator : Pattaramon Jongpradist
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi

E-mail Address : pattaramon.tan@kmutt.ac.th

Project Period : 16 June 2010 – 15 June 2012

Abstract:

Food can structures are usually designed as a cylindrical thin shell which can resist relatively low bending actions comparing to its membrane strain energy. Loading conditions in the manufacturing process that can cause damages to food cans are bucklings due to the vacuum pressure and the compressive axial load. Corrugations on the can body are designed to stiffen the can body against the vacuum load. However, they also decrease the axial load capacity of the can. Therefore, the food can corrugation must be designed to effectively endure the occurred loadings. In the present work, a finite element method is employed to simulate the behaviors of the food can failures under the vacuum pressure and the compressive axial load compared with results from experiments. The finite element model is then used to analyze significant factors affecting the can structural performances. Response Surface Methodology using Central Composite Design is performed to determine second order polynomials to explain the relations between the two responses and the significant corrugation parameters. It was found that the corrugation depth, radius, and spacing, are correspondingly significant to the interested responses. When the obtained polynomial is used to optimize the corrugation design under working conditions, the container material can be reduced to the maximum of 12 percent while the can structural performances meet the manufacturer's requirements.

Keywords : Buckling analysis; Corrugation Design; Finite element analysis; Response surface method; Structural optimization

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้ภาชนะบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม ในการเก็บบรรจุอาหารอย่างแพร่หลาย ในประเทศสหรัฐอเมริกามีการผลิตกระป๋องบรรจุอาหารประมาณ 3 หมื่นล้านกระป๋องต่อปี และในประเทศไทยมีการผลิตกระป๋องบรรจุอาหารประมาณ 600 ล้านกระป๋องต่อปี ทำให้วัสดุที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรมผลิตกระป๋องมีปริมาณมาก การลดปริมาณวัสดุในการผลิตจึงเป็นสิ่งสำคัญในการลดต้นทุนในการผลิต

โครงสร้างของภาชนะบรรจุอาหารที่นิยมใช้ เป็นโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกระบอก (Cylindrical Shell) โดยมีฝากระป๋องแบบแผ่นบาง (Thin Plate) การลดปริมาณวัสดุในการผลิตภาชนะบรรจุอาหารในขณะที่ปริมาตรบรรจุยังคงเดิมนั้น สามารถทำได้โดยการลดความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ทำภาชนะเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของกระป๋องยังจำเป็นต้องมีความสามารถในการรับแรงที่เกิดขึ้นได้เช่นเดิม โดยภาระหลักที่กระทำต่อโครงสร้างของภาชนะบรรจุอาหารมี 3 ภาระ ได้แก่ ความดันที่เกิดขึ้นภายในกระป๋องจากภาวะสุญญากาศในการบรรจุอาหารเข้ากระป๋อง (Vacuum) ความดันภายในจากการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Sterilization) และโหลดกระทำตามแนวแกน (Axial load) จากการวางเรียงกระป๋องซ้อนกันเพื่อจัดเก็บและขนส่ง

รูปร่างเปลือกบางของตัวกระป๋องที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกผิวเรียบ จะมีความสามารถในการรับโหลดตามแนวแกนได้สูง แต่ไม่สามารถรับภาระแรงดันสุญญากาศและแรงดันภายในที่มีค่าสูงมากได้ การสร้างรูปแบบลอน (Corrugation) ที่ตัวกระป๋อง ทำให้ตัวกระป๋องบรรจุอาหารมีความสามารถในการรับแรงดันภายในดีขึ้น แต่ก็ทำให้ความสามารถในการรับโหลดตามแนวแกนลดลงด้วย การคำนวณออกแบบ ลักษณะ รูปแบบและขนาดของลอนให้เหมาะสมกับภาระที่เกิดขึ้น จะทำให้โครงสร้างกระป๋องบรรจุอาหารสามารถรับภาระได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของลอนกระป๋องบรรจุอาหารโดยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาผลต่อความสามารถในการรับภาระของกระป๋องบรรจุอาหาร จากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบลอนกระป๋อง เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการลดความหนาของกระป๋องบรรจุอาหาร เพื่อลดต้นทุนของวัสดุที่ใช้ในการผลิตกระป๋องบรรจุอาหาร

ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย สามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้ดังนี้

1. Formulation of Optimization Problem

การเขียนสมการเพื่อคำนวณหาน้ำหนักที่น้อยที่สุดของกระป๋องบรรจุอาหารที่มีลอน เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของรูปแบบลอนกระป๋อง ภายใต้เงื่อนไข ความสามารถในการต้านทานการโก่งเดาะจากภาระหลัก 3 ชนิด เพื่อให้กระป๋องมีน้ำหนักน้อยที่สุด

เมื่อความหนาของตัวและฝากระป๋องมีค่าคงที่ น้ำหนักที่น้อยที่สุดจะได้จากการทำให้พื้นที่ผิวทั้งหมดของกระป๋องบรรจุอาหาร (S) มีค่าน้อยที่สุด ความต้านทานแรงในแนวแกน (P_a) แรงดันภายใน (P_i) และความดันสุญญากาศ (P_v) ถูกจำกัดให้มีค่ามากกว่าค่าที่ยอมให้ ซึ่งเป็นโหนดที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตในทั้งสามกรณี ($P_{a,min}$, $P_{i,min}$ และ $P_{v,min}$ ตามลำดับ) และระยะโก่งหลังการเสียรูปจากจุดกึ่งกลางฝากระป๋องถึงขอบกระป๋อง (H) ถูกจำกัดให้ไม่น้อยกว่า H_{min} ซึ่งเป็นค่าระยะห่างต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ในกระบวนการผลิต สามารถเขียนสมการสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้ดังนี้

Find: Design variables: $\underline{X} = \{x_i\}; i = 1, \dots, n$ (n = number of design variables)

Minimize: $f = S(\underline{X})$

Subject to: $V(\underline{X}) = V_{req}$

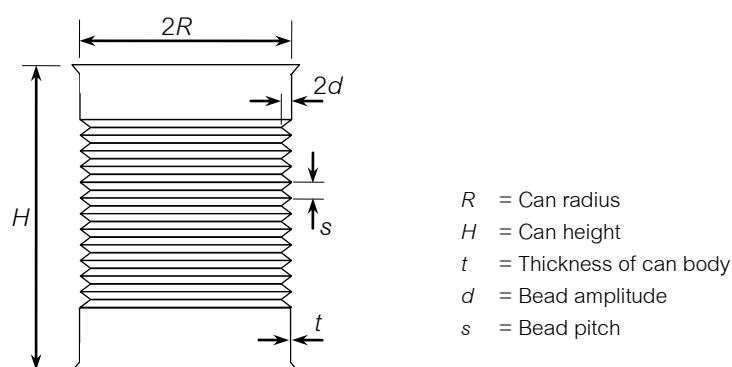
$$g_1 = 1 - \underline{P}(\underline{X})/\underline{P}_{min} < 0, \text{ where } \underline{P} = \{P_a, P_i, P_v\} \text{ and } \underline{P}_{min} = \{P_{a,min}, P_{i,min}, P_{v,min}\}$$

$$g_2 = 1 - H(\underline{X})/H_{min} < 0$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U; i = 1, \dots, n$$

where x_i^L and x_i^U are lower and upper bounds of the design variable i

ตัวแปรในการออกแบบ (Design variable) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ความหนาของตัวกระป๋อง (t) ระยะห่างระหว่างลอน (s) ความลึกลอน (d) และรัศมีลอนกระป๋อง (R) ดังแสดงในรูปที่ 1



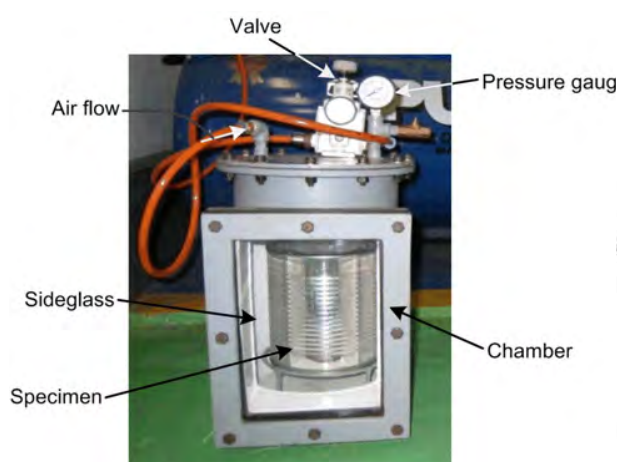
รูปที่ 1 ตัวแปรในการออกแบบ

2. อุปกรณ์การทดลอง

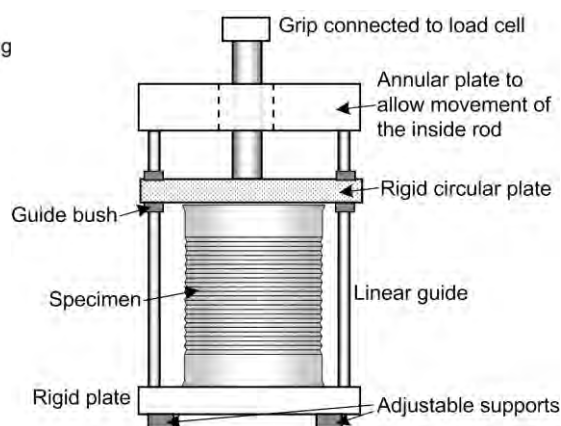
ในงานวิจัยนี้ การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้การเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงดัน และแรงในแนวแกน โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังนี้

2.1 อุปกรณ์ทดสอบแรงดัน การทดสอบแรงดันภายในและแรงดันสุญญากาศ ใช้การทดสอบ ด้วยแรงดันลม อุปกรณ์ทดสอบประกอบด้วย ถังความดันรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่กว่า กระป๋องที่ต้องการทดสอบเล็กน้อย ช่องกระจกด้านหน้าสำหรับสังเกตการเปลี่ยนแปลง รูปร่าง ท่อและวาล์วสำหรับควบคุมปริมาณลมเข้าและออก และ เกจสำหรับอ่านค่าความดัน โดยมีแบบร่างของอุปกรณ์ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3(ก)

2.2 อุปกรณ์เสริมสำหรับการทดสอบแรงกดในแนวแกน การทดสอบแรงกดในแนวแกน ใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ประกอบกับอุปกรณ์เสริมที่จัดทำเพิ่ม มีลักษณะ เป็นแผ่นเหล็กความแข็งแรงสูง 2 แผ่น ต่อเชื่อมกันด้วย Linear guide เพื่อบังคับทิศทางการ เคลื่อนที่ของแผ่นเหล็กหน้าตัดรูปวงกลม ให้สามารถถ่ายแรงจาก load cell ลงสู่ขอบกระป๋องใน แนวตั้ง ได้สม่ำเสมอโดยรอบ เพื่อจำลองแรงที่เกิดจากการวางซ้อนเป็นชั้นของกระป๋อง แบบร่าง ของอุปกรณ์ทดสอบ แสดงในรูปที่ 3(ข)



(ก)

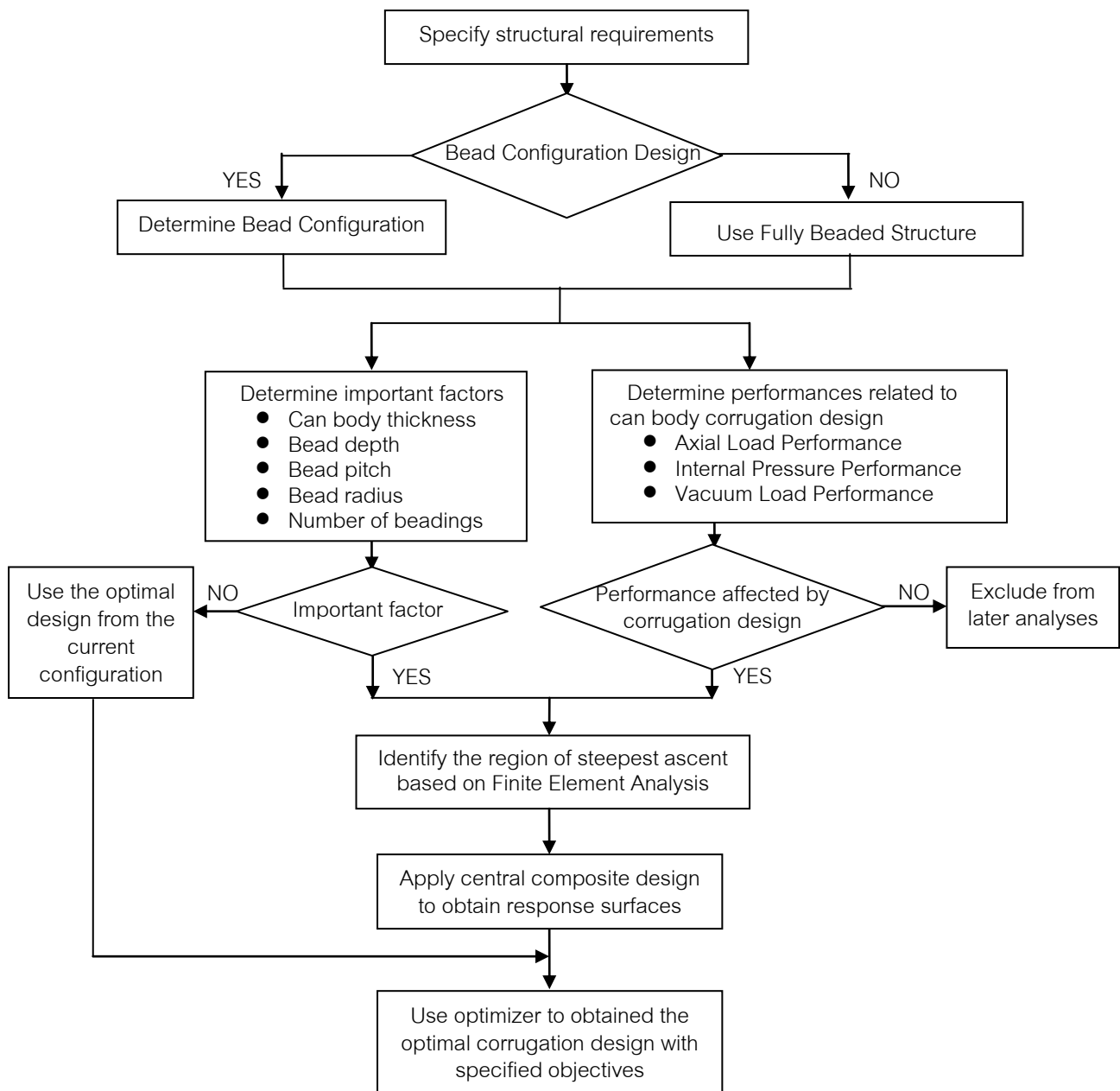


(ข)

รูปที่ 2 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการรับภาระ (ก) แรงดัน (ข) แรงกดในแนวแกน

3. Solution Methodology

การหาผลเฉลยของปัญหาในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิว ตอบสนองประกอบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยเริ่ม จากการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับภาระต่าง ๆ ของ กระป๋องบรรจุอาหารด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อน หลังจากนั้นจึงใช้ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาคำนวณหาพื้นผิวตอบสนอง และรูปแบบของลอนที่เหมาะสมที่สุด ต่อไป โดยมีขั้นตอนการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3



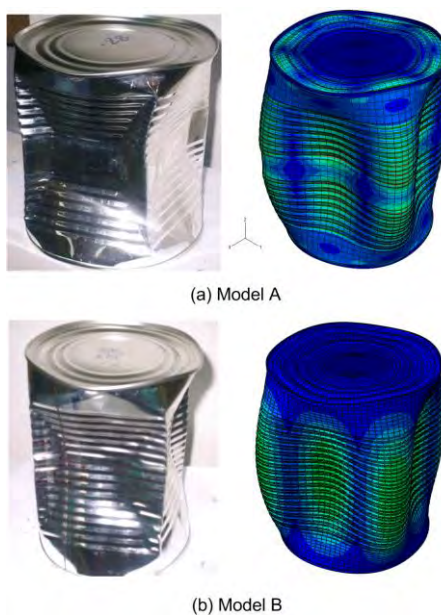
รูปที่ 3 FEA-based optimization for can body corrugation design

ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ข้อค้นพบที่สำคัญดังนี้

1. ผลการทดสอบในการรับภาระสูญญากาศพบว่าในช่วงแรกที่เพิ่มความดันทำให้ฝา ด้านบนและด้านล่างของกระป๋องจะเกิดการยุบตัวเข้าไปก่อน ซึ่งการเสียรูปนี้เป็นการเสียรูปแบบถาวรแต่กระป๋องยังสามารถรับแรงดันที่เพิ่มขึ้นได้ จนตัวกระป๋องเกิดการโก่งเตาะและเสียรูปซึ่งมีลักษณะเป็นรอยบุบย่น 4 ลอนรอบแนวเส้นรอบวงที่ตัวกระป๋อง จากการทดสอบพบว่ากระป๋องรุ่น A ที่มีลักษณะลอนกระป๋องแบบครึ่งลอนมีความสามารถในการรับภาระสูญญากาศมากที่สุด ผลการวิเคราะห์ภาระโก่งเตาะแบบสถิติศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์

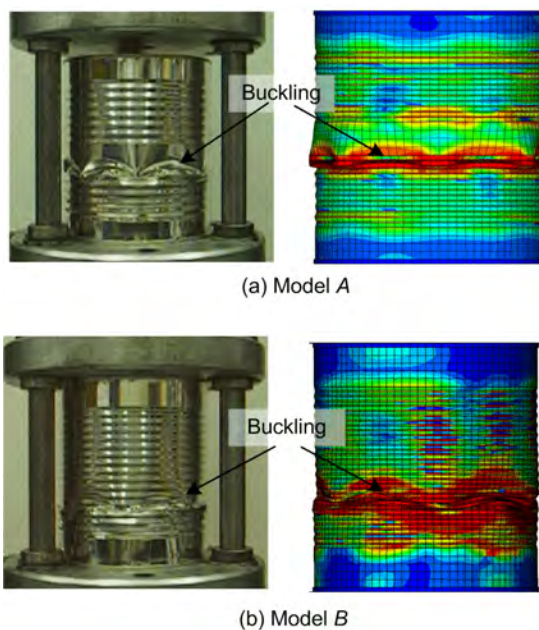
ความดันสูญญากาศก่อนการเสียรูปแบบโก่งเดาะ พบว่าลักษณะการยุบตัวของฝากระป๋อง ด้านบนและด้านล่างสอดคล้องกับการทดสอบ และที่ตัวกระป๋องมีลักษณะเหมือนเดิมไม่เกิดการเสียรูปแบบถาวร โดยระยะยุบตัวมากที่สุดที่จุดกึ่งกลางของฝากระป๋อง ผลการวิเคราะห์ภาระโก่งเดาะแบบสถิตศาสตร์เนื่องจากความดันสูญญากาศ พบว่ามีรูปร่างการเสียหายและค่าความสามารถในการรับภาระสูญญากาศที่กระป๋องรับได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ดังรูปที่ 4 โดยค่าที่ได้มีความแตกต่างกันมากที่สุด 2.93 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4 รูปแบบความเสียหายของกระป๋องบรรจุอาหาร ภายใต้ความดันสูญญากาศ

2. ผลการทดสอบในการรับภาระความดันภายในพบว่าในช่วงแรกที่เพิ่มความดันฝาด้านบนและด้านล่างของกระป๋องจะเกิดการโป่งตัวออกไปก่อน ซึ่งการเปลี่ยนรูปนี้เป็นการเสียรูปแบบถาวรแต่กระป๋องยังสามารถรับแรงดันที่เพิ่มขึ้นได้ จนฝากระป๋องเกิดการโก่งเดาะและเสียรูปมีลักษณะเป็นรอยบุบเป็นกลีบบริเวณลอนแรกถึงลอนที่สามนับจากขอบของฝากระป๋อง ในขณะที่ตัวกระป๋องไม่เกิดความเสียหาย ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ภาระความดันภายในก่อนการเสียรูปแบบโก่งเดาะ พบว่าฝากระป๋องมีความโค้งออกจากตัวกระป๋องสอดคล้องกับการทดสอบ และมีระยะโป่งตัวออกของฝากระป๋องมากที่สุดที่จุดกึ่งกลางของฝากระป๋อง โดยมีค่าความแตกต่าง 13.4 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขการจับยึดในการวิเคราะห์วิจัยครั้งนี้ได้ใช้การจับยึดแบบแน่นที่ด้านบนขอบตะเข็บของฝากระป๋อง แต่จากการทดสอบพบว่าการเคลื่อนที่ที่น้อยมากของตะเข็บที่ขอบฝากระป๋อง จึงได้กำหนดเงื่อนไขการจับยึดแบบแน่นใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ และในการวิเคราะห์หาภาระโก่งเดาะจากแรงดันภายในโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการวิเคราะห์แบบพลวัต พบว่าเกิดความเสียหายสอดคล้องกับผลการทดสอบ และค่าความสามารถในการรับภาระความดันภายในของกระป๋องใกล้เคียงกันมีความแตกต่างกัน 4 เปอร์เซ็นต์

3. ผลการทดสอบการรับแรงในแนวแกนพบว่ารูปร่างความเสียหายของกระป๋อง มีความแตกต่างกันคือกระป๋องรุ่น A จะเกิดการโก่งเตาะที่ผนังกระป๋อง และเกิดรอยบุบย่นขึ้นเป็นลอนคลื่นตามแนวเส้นรอบวงจำนวน 7 ลอน การโก่งเตาะจะเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางรอยต่อระหว่างลอนด้านบนกับลอนด้านล่างของกระป๋อง ส่วนกระป๋องรุ่น B ที่มีลักษณะลอนกระป๋องแบบลอนเต็มโดยมีลอนกระจายไปเต็มลำตัวกระป๋อง จะเกิดการโก่งเตาะที่ผนังกระป๋องบริเวณลอนที่ 5 ถึงลอนที่ 8 ของลำตัวกระป๋อง และเกิดรอยบุบย่นขึ้นเป็นลอนคลื่นตามแนวเส้นรอบวงจำนวน 7 ลอน ดังรูปที่ 5 โดยกระป๋องรุ่น A มีค่าความสามารถในการรับแรงในแนวแกนสูงกว่า เนื่องจากกระป๋องรุ่น A ที่ลำตัวกระป๋องมีแผ่นเปลือกบางแบบเรียบอยู่กึ่งกลางระหว่างลอนบนและลอนล่างของกระป๋องแตกต่างกับกระป๋องรุ่น B และมีความหนาวัสดุมากกว่า

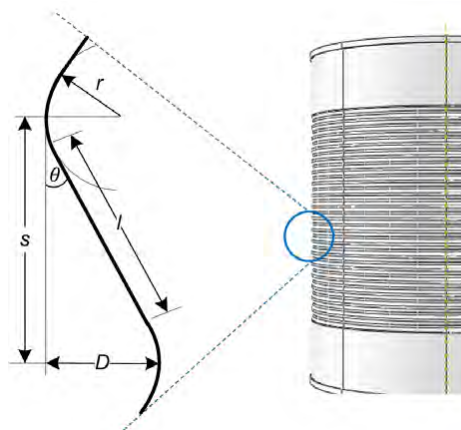


รูปที่ 5 การโก่งเตาะของกระป๋องบรรจุอาหารภายใต้แรงในแนวแกน

4. ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองภายใต้แรงกดในแนวแกน ด้วยวิธีพลวัต (Explicit dynamics) เพื่อจำลองผลต่อความเสียหายของกระป๋อง เมื่อมีการเคลื่อนที่ของแผ่นระนาบกดกระป๋องในแนวตั้งซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงระยะกดตามเวลา พบว่าผลการวิเคราะห์และพฤติกรรมของแบบจำลองภายใต้แรงกดในแนวแกนสอดคล้องกับการทดสอบและให้ผลแรงกดในแนวแกนที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงโดยมีความแตกต่างเพียง 6.27% แต่เนื่องจากการวิเคราะห์แบบพลวัตนั้นเสียเวลามาก และในการคำนวณพื้นที่ผิวตอบสนองจะต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องปรับปรุงการคำนวณโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี Riks เนื่องจากการวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ที่สามารถวิเคราะห์ผลช่วงหลังจากการเกิดการโก่งเตาะได้ สามารถวิเคราะห์ลดเวลาในการวิเคราะห์หลังได้ ซึ่งใช้เวลาในการวิเคราะห์เพียง 1-2 ชั่วโมงต่อ 1 กรณี ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Riks ให้ผลของพฤติกรรมความเสียหายใกล้เคียงกับการทดสอบ

และให้ผลของแรงกดในแนวแกนต่างจากการทดสอบ 5.89% จึงใช้วิธีนี้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนในงานวิจัยนี้

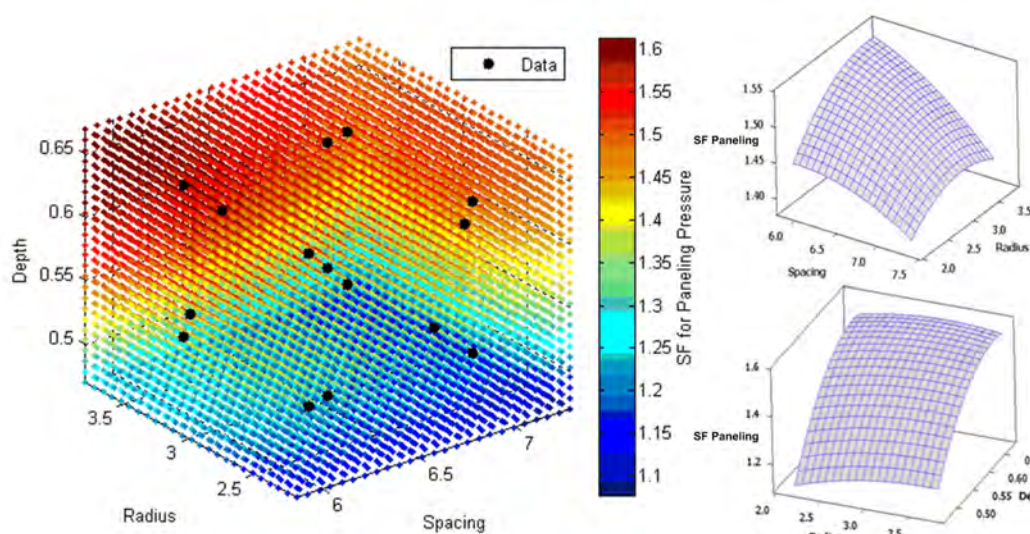
5. การใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองในการปรับเปลี่ยนลอนกระป๋องเริ่มจากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรลอนกระป๋อง 4 ตัวแปร คือ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน ความลึกลอน และจำนวนลอน ซึ่งเป็นตัวแปรที่จะทำให้ลักษณะรูปร่างของลอนที่ตัวกระป๋องนั้นเปลี่ยนไป โดยใช้ Two-level factorial design พบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อผลตอบสนองทั้งความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนได้แก่ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน และความลึกลอนซึ่งตัวแปรที่มีผลกระทบมากที่สุดคือความลึกลอน เนื่องจากการปรับเปลี่ยนความลึกลอนจะส่งผลต่อความแข็งแรงของกระป๋องมาก หากความลึกลอนมากจะทำให้สามารถรับความดันสูญญากาศได้มากแต่จะรับแรงกดในแนวแกนได้ลดลง และในทางกลับกันหากความลึกลอนมีค่าน้อย จะทำให้ความสามารถการรับความดันสูญญากาศลดลง แต่จะเพิ่มความสามารถการรับแรงกดในแนวแกนมากขึ้น ในขณะที่จำนวนลอนนั้นมีความสำคัญน้อยมากต่อผลตอบสนองเนื่องจากไม่มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของลอน จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรที่สำคัญที่ควรนำมาทำการวิจัยสำหรับการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องนั้นมี 3 ตัวแปรคือ ระยะห่างระหว่างลอน (s) รัศมีลอน (r) และความลึกลอน (d) ดังแสดงในรูปที่ 6



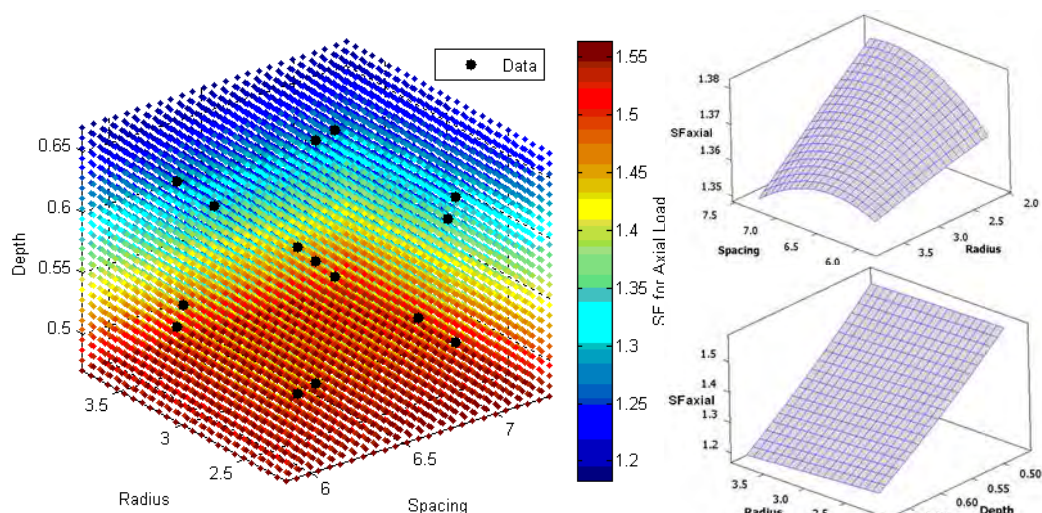
รูปที่ 6 ตัวแปรที่สำคัญของรูปแบบลอนกระป๋องบรรจุอาหาร

6. ในกำหนดขอบเขตที่ครอบคลุมและใกล้เคียงจุดที่จะให้ผลตอบสนองสูงที่สุดโดยใช้วิธี Steepest ascent พบว่าตำแหน่งที่จะให้ผลตอบสนองสูงที่สุดของความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนจะได้ขอบเขตของตัวแปรไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน เป็นผลให้การกำหนดขอบเขตของตัวแปรนั้นไม่สามารถที่จะได้ผลตอบสนองสูงที่สุดทั้งหมด ดังนั้นการกำหนดขอบเขตของตัวแปรจึงนำค่าความสามารถในการรับแรงที่ต้องการของแต่ละผลตอบสนองเข้ามาช่วยในการตัดสินใจ และสามารถกำหนดขอบเขตได้เหมาะสมที่สุดจากค่าสัดส่วนความปลอดภัยไม่น้อยกว่า 1.25 เพื่อให้ได้ขอบเขตที่ทำให้สร้างพื้นผิวตอบสนองอยู่ในขอบเขตที่ทำให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดทั้งสองกรณีซึ่งขอบเขตของตัวแปรที่สามารถกำหนดได้คือ รัศมีลอนและความลึกลอน อยู่ที่ 2.50 – 3.47 มม. และ 0.51 – 0.63 มม. ตามลำดับ ส่วนระยะห่างระหว่าง

ลอน จะมีผลตอบแทนที่สูงขึ้นทั้งสองกรณีเมื่อปรับให้มีระยะห่างระหว่างลอนลดลง แต่หาก ระยะห่างระหว่างลอนมีค่าน้อยเกินข้อจำกัดในการออกแบบ จะไม่สามารถสร้างแบบจำลองได้จึง กำหนดช่วงของระยะห่างระหว่างลอนที่ 6.15 – 7.00 มม.



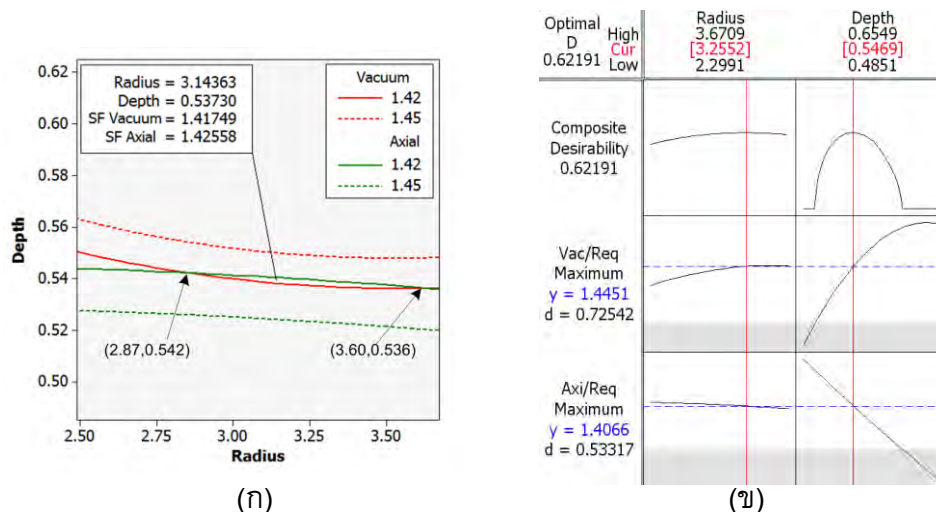
รูปที่ 7 พื้นผิวตอบสนองในการรับความดันสูญญากาศ



รูปที่ 8 พื้นผิวตอบสนองในการรับแรงกดในแนวแกน

7. จากการศึกษาการสร้างพื้นผิวตอบสนองจาก Central composite design พบว่าพื้นผิวตอบสนองจากสมการกำลังสองสำหรับความดันสูญญากาศ และแรงในแนวแกนเป็นดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ จากการตรวจสอบค่า R^2 และ P-value ของผลตอบแทนที่ได้ พบว่า เชื่อถือได้ พื้นผิวตอบสนองของความดันสูญญากาศมีลักษณะเป็นพื้นผิวโค้งตามผลกระทบของความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามตัวแปร ส่วนพื้นผิวตอบสนองของแรงกดในแนวแกนนั้นมีลักษณะเป็นระนาบเอียง เนื่องจากผลกระทบของความลึกลอนมีค่าสูงกว่าผลกระทบจากตัวแปรอื่นมาก และผลจากความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามไม่ชัดเจน โดยผลตอบแทนของทั้งความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนจะมีลักษณะแปรผกผันกันเมื่อปรับเปลี่ยนรัศมีลอนและความ

ลูกกลอน ซึ่งเมื่อนำผลตอบสนองมารวมกันจากทั้งวิธีการ Overlay contour plot (รูปที่ 9ก) และจาก Optimizer (รูปที่ 9ข) นั้นก็สามารถออกแบบลอนกระป๋องให้มีผลตอบสนองที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่สุดได้ใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลองสุดท้ายที่ได้นั้นสามารถให้ผลตอบสนองทั้งสองชนิดให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยได้สูงถึงประมาณ 1.42



รูปที่ 9 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธี (ก) Overlay (ข) Optimizer

8. เมื่อใช้แบบจำลองที่ทำการออกแบบด้วยวิธี RSM มาลดความหนาของตัวกระป๋องลงครึ่งละ 0.01 มม. ผลที่ได้คือหากลดความหนาจาก 0.25 มม. เป็น 0.22 มม. โดยที่กระป๋องยังมีความแข็งแรงของโครงสร้างอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แบบจำลองที่ได้สามารถใช้งานได้ และสามารถลดการใช้วัสดุลงได้สูงสุดถึง 12 % ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนความปลอดภัยและน้ำหนักของกระป๋องที่มีความหนาแตกต่างกัน

Can thickness (mm)	SF Paneling		SF Axial		Weight (g)
	Predicted	FE	Predicted	FE	
0.25	1.417	1.416	1.425	1.425	174.17
0.24	1.336	1.329	1.294	1.316	167.20
0.23	1.255	1.245	1.163	1.202	160.24
0.22	1.173	1.145	1.032	1.103	153.27

9. การวิเคราะห์ออกแบบกระป๋องโดยเทคนิควิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปใช้วิเคราะห์เพื่อลดความหนาของกระป๋อง โดยปรับเปลี่ยนขนาดรูปร่างให้เหมาะสมกับความต้องการความสามารถในการรับภาระที่มากระทำกับกระป๋องบรรจุอาหาร ซึ่งจากเทคนิคกระบวนการนี้สามารถลดความหนาและลดต้นทุนที่ใช้ในการผลิตกระป๋อง

ลงได้ และสามารถช่วยประหยัดเวลาในการทดสอบและลดต้นทุนการทดสอบกระป๋องบรรจุอาหารอื่นๆได้

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในอนาคต

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยต่อไปดังนี้

1. งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมช่วงลอนของตัวกระป๋องภายใต้ภาระแรงเพียงความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนเท่านั้นเนื่องจากต้องการศึกษาความเสียหายและออกแบบอย่างละเอียดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง ในส่วนลอนที่ตัวกระป๋องเท่านั้น โดยการเสียหายของกระป๋องยังสามารถเกิดจากความดันภายใน ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความเสียหายที่ฝากระป๋อง การออกแบบรูปแบบลอนที่ฝากระป๋องที่เหมาะสม จะทำให้สามารถลดวัสดุในการผลิตกระป๋องลงได้อีก อีกทั้งยังมีกระบวนการประกอบฝากระป๋องโดยการขึ้นตะเข็บทั้งด้านบนและล่างซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อกระป๋องอีกด้วย

2. แรงกดในแนวแกนสำหรับงานวิจัยนี้วิเคราะห์เฉพาะแรงกดในแนวตั้งอย่างเดียวเนื่องจากเป็นภาระหลักที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการขนย้ายและเก็บกระป๋อง ในการขนย้ายจริงอาจจะมีแรงกดที่ไม่เป็นแนวตั้ง แรงกดแบบเฉพาะจุด หรืออาจมีการกระแทก ซึ่งเป็นผลทำให้กระป๋องเกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าแรงกดแบบตรง ซึ่งควรนำมาพิจารณาในการออกแบบกระป๋องด้วย

3. การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์กระป๋องเปล่าที่ประกอบฝาทั้งบนและล่างเหมือนกับกระป๋องที่บรรจุอาหารแล้ว ซึ่งสำหรับการขนส่งกระป๋องที่บรรจุอาหารแล้ว จะมีสภาวะที่ต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลทำให้ความแข็งแรงของกระป๋องมีความแตกต่างกันด้วย

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ

กระป๋องโลหะบรรจุอาหารได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบันเพื่อเก็บรักษาและขนส่งอาหารในการบรรจุอาหารนั้นควรเก็บในภาชนะที่มีความแข็งแรงและปลอดภัย รวมถึงวัตถุดิบในการผลิตจะต้องมีราคาถูกลง อีกทั้งเมื่อใช้แล้วควรจะสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้อีกด้วย ดังนั้นกระป๋องบรรจุอาหารแบบโลหะจึงถูกนำมาใช้อย่างมากในอุตสาหกรรมอาหารทั่วโลก

ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของกระป๋องทั้งวัสดุในการผลิตและรูปแบบของกระป๋องเพื่อให้กระป๋องมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและลดต้นทุนในการผลิตลักษณะของแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตซึ่งอาจทำให้กระป๋องเกิดการเสียรูปเกิดจากปัจจัยหลัก ๆ 3 ประการคือ 1. แรงดันภายในจากการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค 2. แรงจากความดันสุญญากาศในกระป๋องในขณะทำการบรรจุอาหารทำให้กระป๋องเกิดการเสียรูปและโก่งเดาะ (Buckling) 3. แรงกดในแนวแกนในการประกอบฝากระป๋องเข้ากับตัวกระป๋องและจากการเรียงกระป๋องเป็นชั้นในระหว่างการขนถ่ายและเก็บ

1.2 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ลักษณะรูปร่างของตัวกระป๋องบรรจุอาหารนิยมสร้างจากแผ่นบางเรียบและนำมาขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกหลังจากนั้นจะมีการขึ้นรูปตัวกระป๋องให้มีลอน เนื่องจากกระป๋องทรงกระบอกเรียบนั้น ถึงแม้จะมีความสามารถในการรับแรงในแนวแกนและแรงดันภายในได้ดีแต่จะมีความสามารถในการรับแรงจากความดันสุญญากาศต่ำ หากมีการรับภาระจากกระบวนการผลิตในขั้นต้นอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวกระป๋องได้ง่าย ดังนั้นการออกแบบตัวกระป๋องให้มีลอนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มความสามารถในการรับภาระดังกล่าว อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวกระป๋องให้มีลอนจะทำให้ความสามารถในการรับแรงในแนวแกนนั้นลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้จำนวนลอนที่เพิ่มขึ้น ก็ทำให้ต้องใช้วัสดุในการผลิตกระป๋องเพิ่มขึ้นอีกด้วย การออกแบบลอนกระป๋องให้มีลักษณะที่เหมาะสมต่อการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูงสุดจึงมีส่วนสำคัญในการลดต้นทุนการผลิตโดยการออกแบบให้กระป๋องมีน้ำหนักลดลงแต่ยังคงความแข็งแรงของกระป๋องให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยังสามารถรับภาระที่เกิดขึ้นได้

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เป็นวิธีหนึ่งที่ยิยมใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้การคำนวณและสถิติเข้ามาเป็นข้อมูลช่วยในการตัดสินใจเลือกตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ในการออกแบบลอนของกระป๋องบรรจุอาหารเพื่อให้กระป๋องบรรจุอาหารมีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการรับภาระที่ต้องการได้เนื่องจากลอนกระป๋องนั้นเป็นรูปร่างที่ซับซ้อนการ

คำนวณความสามารถในการรับภาระของกระป๋องบรรจุอาหารจึงทำได้ยาก การออกแบบและขึ้นรูปจริงเพื่อทำการทดสอบจะทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายมาก การนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ผลจากการรับโหลดต่าง ๆ ในขั้นตอนการผลิต โดยใช้โปรแกรม ABAQUS [1] จะทำให้สามารถคำนวณผลจากการออกแบบได้หลากหลายรูปแบบและใช้ต้นทุนต่ำ งานวิจัยนี้จะอาศัยการทดสอบกระป๋องบรรจุอาหารเพื่อตรวจสอบความเชื่อถือได้ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ หลังจากนั้นจะใช้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง และออกแบบรูปแบบลอนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อลดต้นทุนวัสดุของกระป๋องบรรจุอาหาร

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเสียหายของแรงจากความดันสุญญากาศและแรงในแนวแกนของกระป๋องบรรจุอาหารที่มีรูปแบบลอนแตกต่างกันและคำนวณความสามารถในการรับโหลดของกระป๋อง
2. เพื่อศึกษาผลของปัจจัยทางด้านรูปร่างของลอนกระป๋อง ได้แก่ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน ความลึกลอน และจำนวนลอน ต่อความสามารถในการรับโหลดในรูปแบบต่าง ๆ
3. เพื่อนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองมาใช้ในการออกแบบลอนกระป๋องบรรจุอาหารเพื่อให้ได้รูปแบบลอนที่รับแรงได้ดีและสามารถลดความหนาของกระป๋องเพื่อลดต้นทุนวัสดุได้

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมของกระป๋องบรรจุอาหารอุตสาหกรรมแบบมีลอนขนาด 603x700 (เส้นผ่านศูนย์กลาง $6\frac{3}{16}$ นิ้วและสูง 7 นิ้ว) เมื่อได้รับแรงกดในแนวแกนและความดันสุญญากาศจากการทดสอบเปรียบเทียบกับวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ในการศึกษาออกแบบผลของลอนกระป๋องต่อความสามารถในการรับแรงพิจารณาผลจาก 4 ตัวแปร ได้แก่ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน ความลึกลอน และจำนวนลอน
3. ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ใช้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาและวิเคราะห์ภาระโหลดต่าง ๆ ระหว่างกระบวนการผลิตกระป๋องบรรจุอาหาร
2. สามารถอธิบายผลกระทบจากตัวแปรต่าง ๆ ของลอนกระป๋อง ได้แก่ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน ความลึกลอน และจำนวนลอน ที่มีต่อความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนของกระป๋องบรรจุอาหาร

3. สามารถนำวิธีพื้นผิวตอบสนองมาช่วยในการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องบรรจุอาหาร ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบโครงสร้างกระป๋องบรรจุอาหาร เป้าหมายสำคัญสำหรับผู้ผลิต คือ การลดปริมาณวัสดุ ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการที่ส่งผลมากที่สุดต่อการลดราคาต้นทุนในการผลิต โดยหลักการสำคัญ คือ การใช้ปริมาณวัสดุน้อยที่สุด ที่ทำให้โครงสร้างยังมีความสามารถในการรับแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตและขนส่งได้ ลักษณะโครงสร้างกระป๋องที่เหมาะสมต่อการรับภาระจากแรงในแนวแกน และความดันภายใน มีแนวโน้มจะเป็นไปในทางตรงข้ามกัน กระป๋องทรงกระบอกที่ไม่มีลอนจะสามารถรับแรงในแนวแกนได้ดี ในขณะที่รับโหลดจากความดันภายในได้น้อย ในทางกลับกันความสามารถในการรับแรงในแนวแกนจะลดลง ในขณะที่ความสามารถในการรับความดันภายในเพิ่มขึ้น จากการเพิ่มความลึกของลอนกระป๋องบรรจุอาหาร การออกแบบกระป๋องบรรจุอาหาร จึงมีเป้าหมายที่การหาจุดที่เหมาะสม ที่ความสามารถในการรับแรงทั้งสอง มากที่สุด โดยมีต้นทุนวัสดุน้อยที่สุดด้วย

ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างกระป๋อง จากแรงดันภายในและแรงกดในแนวแกน เป็นการเสียหายแบบโก่งเดาะ (Buckling) การคำนวณเพื่อทำนายความสามารถในการรับแรง และพฤติกรรมความเสียหายหลังการโก่งเดาะ (Postbuckling behavior) ของโครงสร้างเปลือกบาง ทำได้ยาก ค่าที่คำนวณได้จากผลเฉลยทางทฤษฎีและจากการทดสอบมักมีความแตกต่างกันสูงมาก (Yamaki, 1984; Bushnell, 1989) แม้จะเป็นเพียงการทำนายพฤติกรรมหลังการโก่งเดาะของโครงสร้างที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อน เช่น ทรงกระบอกเปลือกบางที่ไม่มีลอน ก็มีความซับซ้อนของผลเฉลยมาก (Fujii, 2000; Aljawi, 2002) เนื่องจากพฤติกรรมการโก่งเดาะของโครงสร้างมีจุดแยกของสมดุล (Bifurcation point) จำนวนมาก และพฤติกรรมการเสียรูปขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ (Imperfection) ของรูปร่าง และสมบัติวัสดุ (Papadopoulos, 2007)

Chen et al. (2009) ได้แบ่งรูปแบบการโก่งเดาะจากแรงกดในแนวแกนบนทรงกระบอกที่มีลอนเป็นคลื่นแบบเส้นโค้งไซน์ เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบสมมาตรรอบแกน และแบบไม่มีความสมมาตร โดยการโก่งเดาะแบบไม่สมมาตร แบ่งเป็นชนิดที่แรงกดที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงขึ้นลง (fluctuate) ตามรอยพับที่เกิดขึ้น และชนิดแรงกดเพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว หรือความเสียหายเป็นแบบการยุบตัว การทำนายรูปแบบการโก่งเดาะที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับความกว้างและความลึกของลอน sine wave บนทรงกระบอก

งานวิจัยเกี่ยวกับกระป๋องบรรจุอาหารที่ผ่านมา โดยมากจะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลเฉลยและความสามารถในการรับภาระของรูปแบบกระป๋องที่มีอยู่แล้ว โดยพิจารณาแรงที่กระทำ และใช้วิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน Sodiek and Sauer (1984) ศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของกระป๋องอาหารในกระบวนการ สเตอริไลซ์เซชัน และได้เสนอต้นแบบเพื่อทำนายความสามารถในการรับภาระของกระป๋อง Siad (1999) เสนอวิธีการคำนวณค่าประมาณของผล

เฉลยทางคณิตศาสตร์ของภาระโก่งเดาะจากแรงดันภายนอกสำหรับกระป๋องทรงกระบอกที่มีพื้นผิวเป็นลอน โดยการแปลงพื้นผิวลอนให้มีลักษณะเป็นผิวที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ได้แก่ ผิวเรียบที่มีสมบัติวัสดุแบบ Orthotropic ผลเฉลยที่ได้ให้ค่าส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบของกระป๋อง 4 รูปแบบ โดย Ross and Humphries (1993) ยกเว้นต้นแบบแบบที่ 1 ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันมาก นอกจากนี้ผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ที่ได้นี้ จะใช้ได้สำหรับกระป๋องที่มีลอนสม่ำเสมอ และเป็นทรงกระบอกที่มีความขรุขระมาก (Batdorf parameter > 100) เท่านั้น

การนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการศึกษาความสามารถในการรับแรงรูปแบบต่างๆ ของกระป๋องที่มีลอน ทำให้สามารถทำนายพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบมากขึ้น Traversin et al. (1992) ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบ เพื่อศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างของกระป๋อง Kahrs et al. (1992) พิจารณาผลของความลึกลอนต่อกำลังรับภาระในแนวแกนและความดันภายใน พบว่าการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถทำนายภาระในแนวแกนได้อย่างถูกต้อง แต่จำเป็นต้องใช้ค่าคงที่จากการทดสอบ (Empirical factor) เพื่อแก้ไขความแตกต่างระหว่างความดันภายในที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FEA และการทดสอบ Jones et al. (1998) ศึกษาการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์กระป๋องบรรจุอาหาร โดยเน้นถึงความสำคัญของสถานะไม่สมมาตรในแนวแกนที่เป็นรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงในกระป๋องบรรจุอาหาร

Reid et al. (2001) ศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ผลจากแรงกด (Indenting) และการแทงทะลุ (Piercing) ที่ผนังด้านข้างของกระป๋องอลูมิเนียม ด้วยความเร็วต่างๆ ผลที่ได้จากการใช้ tied element ให้ผลที่ถูกต้องใกล้เคียงกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง มากกว่าผลที่ได้จากการใช้ merged element นอกจากนี้ การถูกกดอัด (crushing) ก่อนการแทงทะลุ จะช่วยลดซับพลังงานที่เกิดขึ้น และลักษณะการกดอัดจะขึ้นกับความเร็วในการแทงทะลุ และรูปร่างของสิ่งที่แทงทะลุด้วย Teppunkulngam et al. (2008) ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Explicit dynamics ในการศึกษาภาระโก่งเดาะและพฤติกรรมหลังการ- โกงเดาะของกระป๋องบรรจุอาหาร เพื่อหารูปแบบความเสียหาย แรงกดที่กระทำในแนวแกน และความดันภายในสูงสุดของกระป๋องบรรจุอาหารที่มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน รูปแบบความเสียหายที่ได้จากการวิเคราะห์ และค่าภาระโก่งเดาะสอดคล้องกับผลจากการทดสอบ โดยมีความแตกต่างกันน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบกระป๋องบรรจุอาหาร จะเป็นการปรับเปลี่ยนรูปแบบบางส่วน ของลอนกระป๋อง เพื่อให้ความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้น และสามารถลดความหนาของกระป๋อง เพื่อลดต้นทุนการผลิตได้ Ross (1996) ปรับเปลี่ยนมุมของลอนกระป๋องรูป cone ที่มีขนาดและความหนาแตกต่างกัน และคำนวณความต้านทานการโก่งเดาะที่ผนังภายใต้ความดันสุญญากาศ พบว่ามุมลอนกระป๋องที่เหมาะสมมีขนาด 38° และ 45° Yamazaki et al. (2007) กำหนดตัวแปรรูปร่างของฝากระป๋องเครื่องดื่มอลูมิเนียม ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตความสามารถในการรับแรงดันภายใน และระยะยุบตัวของฝากระป๋อง และใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการวิเคราะห์แบบทำซ้ำ เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสม ที่ทำให้ฝากระป๋องมี

น้ำหนักน้อยที่สุด การเปลี่ยนแปลงความลึกลอน รัศมีและมุมที่ฝาครอบ ทำให้สามารถลดน้ำหนักฝาครอบได้ 3 เปอร์เซ็นต์

Wang (2001) วิเคราะห์ผลจากตัวแปรต่างๆของลอนครอบต่อความสามารถในการรับภาระการโก่งเดาะของโครงสร้างครอบ และได้เสนอเทคนิคแนวทางการออกแบบครอบ โดยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด ทำให้ได้รูปแบบลอนที่เหมาะสมกับการใช้งาน และมีความหนาของครอบน้อยที่สุด งานวิจัยนี้ จะใช้เทคนิคการออกแบบที่ Wang นำเสนอ ในการออกแบบรูปแบบลอนของตัวและฝาครอบบรรจุอาหาร เพื่อนำเสนอต้นแบบที่มีความหนาของครอบน้อยที่สุด ที่ยังสามารถรับภาระใช้งานได้

บทที่ 2 การทดสอบกระป๋องบรรจุอาหาร

ในขั้นต้นก่อนจะทำการออกแบบกระป๋องบรรจุอาหาร จะทดสอบความสามารถการรับโหลดของกระป๋อง เพื่อใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทรนี้จะกล่าวถึงแบบกระป๋องบรรจุอาหารที่ทำการวิจัยรวมถึงการทดสอบความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกน

2.1 แบบกระป๋องที่ใช้ในการทดสอบ

กระป๋องบรรจุอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกระป๋องเชิงพาณิชย์แบบมีลอนกระป๋อง ขนาด 603X700 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระป๋อง 157.16 มม. ($6\frac{3}{16}$ in.) ความสูง 177.8 มม. (7 in.) โดยมีรูปแบบลอนและความหนาแสดงในตารางที่ 3.1 และตัวอย่างรูปแบบลอน ดังรูปที่ 3.1 กระป๋องบรรจุอาหารที่ใช้ศึกษาเป็นกระป๋องที่ประกอบฝากับตัวกระป๋องและเข้าตะเข็บแล้วแต่ไม่มีการบรรจุ ทำจากแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (Tin Plate) โดยผ่านการรีดเย็นเพียงรอบเดียว (Single-Reduced) จากนั้นผ่านการอบอ่อนต่อเนื่อง (Continuous annealing) สมบัติของแผ่นเหล็กที่มาทำกระป๋องเป็นดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 รูปแบบกระป๋องขนาด 603X700 ที่นำมาใช้ในการศึกษา

ลักษณะ \ รุ่น	A	B	C
รูปแบบของกระป๋อง	ครึ่งลอน	ลอนเต็ม	ลอนเต็ม
ความหนาตัวกระป๋อง (mm)	0.28	0.26	0.25
ความหนาฝากระป๋อง (mm)	0.28	0.28	0.28

ตารางที่ 2.2 สมบัติของวัสดุที่ใช้ทำกระป๋อง

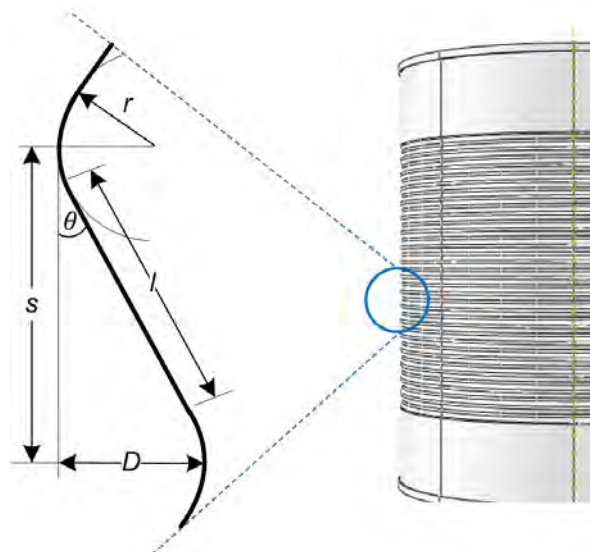
Plate thickness (mm)	Modulus of elasticity (GPa)	Poisson ratio	Yield strength (MPa)
0.25 - 0.26	219.86	0.3	456.74
0.28	229.79	0.3	426.29



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างกระป๋องบรรจุอาหารแบบมีลอนขนาด 603x700

2.1.1 การคำนวณปริมาณวัสดุจากรูปแบบลอน

ในการออกแบบลอนกระป๋องปริมาณวัสดุที่ใช้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างลอน และจำนวนลอนกระป๋อง หากไม่คำนึงถึงการยึดตัวของวัสดุในขบวนการขึ้นรูปลอนปริมาณวัสดุสามารถหาได้จาก สมการอย่างง่าย โดยพิจารณาลอนเป็นส่วนของวงกลมที่มีรัศมี R ดังรูปที่ 2.2 เมื่อขนาดของ s เป็นระยะห่างครึ่งลอน, D คือ ความลึกลอน, L คือความยาวส่วนต่อของเส้นสัมผัสระหว่างลอน และ θ คือมุมที่เส้นสัมผัสกระทำกับกับแนวตั้ง



รูปที่ 2.2 รูปร่างลอนและตัวแปรกำหนดขนาดต่าง ๆ

จะได้ความสัมพันธ์ของส่วนต่าง ๆ เป็น

$$s = L \cos \theta + 2R \sin \theta \quad (2.1)$$

$$D = L \sin \theta + 2R(1 - \cos \theta) \quad (2.2)$$

จากทั้งสองสมการนี้สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปของ L ได้ดังนี้

จากสมการ (2.1) จะได้
$$L = \frac{s - 2R \sin \theta}{\cos \theta} \quad (2.3)$$

จากสมการ (2.1) จะได้

$$L = \frac{D-2R-2R\cos\theta}{\sin\theta} \quad (2.4)$$

จากนั้นจะจัดรูปสมการให้อยู่ในฟังก์ชัน โดยที่ $\theta = f(S, D, R)$ และ $L = g(s, D, R)$ โดยให้ฝั่งขวาของสมการ (2.3) และ (2.4) เท่ากัน จะได้ว่า

$$s \sin \theta - 2R \sin^2 \theta = (D - 2R) \cos \theta + 2R \cos^2 \theta \quad (2.5)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปของสมการกำลังสองได้เป็น

$$((D - 2R)^2 + s^2) \cos^2 \theta + 4R(D - 2R) \cos \theta + 4R^2 - s^2 = 0 \quad (2.6)$$

จะมีคำตอบของสมการเป็น

$$\cos \theta = \frac{-4R(D-2R) \pm \sqrt{4R^2(D-2R)^2 - 4((D-2R)^2 + s^2)(4R^2 - s^2)}}{2((D-2R)^2 + s^2)} \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) จะได้ค่ามุม θ (หน่วยเป็น radian) สองค่าแต่จะมีเพียงค่าเดียวที่ให้ระยะ L เป็นบวก เมื่อแทนค่ามุมลงในสมการ (2.3) หรือ (2.4) ซึ่งจะสามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่ผิวกระป๋องสำหรับรูปแบบลอนที่ต้องการโดยจะได้ว่า ความยาวทั้งหมดของส่วนย่อย $MNOP$ ดังแสดงในรูป 2.2 จะมีค่าเท่ากับ

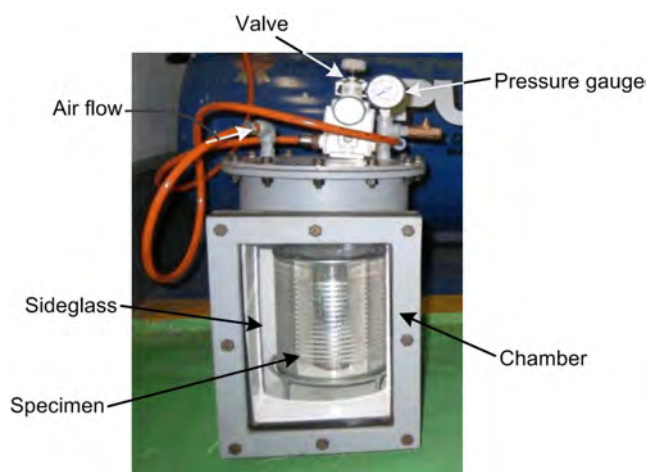
$$A = \pi d(2nQ + (H - 2ns)) \quad (2.8)$$

เมื่อ n คือ จำนวนลอนทั้งหมดตลอดความสูง H ของกระป๋องที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d

2.2 การทดสอบความสามารถในการรับภาระของกระป๋อง

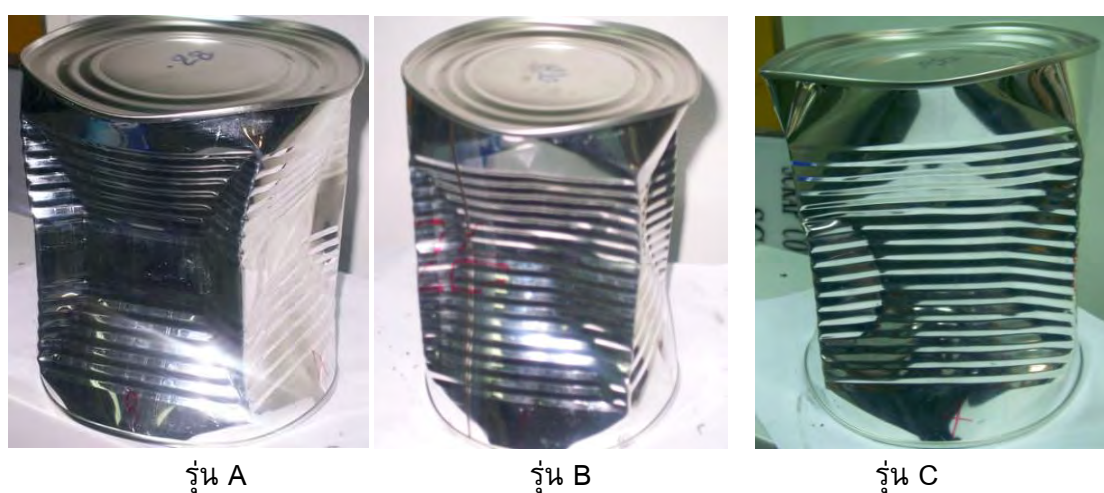
2.2.1 การทดสอบความสามารถในการรับแรงดันสุญญากาศ

ในการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการรับภาระแรงดันอัดใช้อุปกรณ์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งงานจะถูกนำไปวางไว้ในถังควบคุมความดันซึ่งเป็นถังระบบปิด มีวาล์วสำหรับเปิดให้ลมเข้าและออกจากถัง และมีมาตรวัดความดันสำหรับอ่านค่าความดันลมภายในถัง



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ทดสอบการรับความดันสุญญากาศ

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มความดันลมขึ้นด้วยอัตราคงที่ จนกระทั่งเกิดการโก่งเดาะ และอ่านค่าแรงดันสูงสุดที่กระป๋องรับได้ ผลจากการทดสอบพบว่าในช่วงแรกที่เพิ่มความดันในถังควบคุม ฝาด้านบนและด้านล่างของกระป๋องจะเกิดการยุบตัวเข้าไปก่อน ซึ่งการเปลี่ยนรูปร่างนี้เป็นการเสียรูปแบบถาวร (Plastic Deformation) แต่กระป๋องยังสามารถรับแรงดันที่เพิ่มขึ้นได้ จนตัวกระป๋องเกิดการโก่งเดาะและเสียรูป ผลจากการทดสอบพบว่า การเสียรูปที่เกิดขึ้นกับกระป๋องทั้ง 3 รุ่นมีลักษณะเป็นรอยบุบยุบ 4 ลอนรอบแนวเส้นรอบวงที่ตัวกระป๋องทดสอบ ซึ่งรูปร่างที่เกิดความเสียหายของกระป๋องทั้ง 3 รุ่นดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนแรงดันอัดสูงสุดที่กระป๋องรับได้ของกระป๋องรุ่น A, B และ C มีค่าความดันเฉลี่ยเท่ากับ 0.142 MPa, 0.136 MPa และ 0.126 MPa ตามลำดับ ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การโก่งเดาะของกระป๋องรุ่น A, B และ C เนื่องจากแรงดันสูญญากาศ

ตารางที่ 2.3 ค่าความดันเฉลี่ยของกระป๋องทั้ง 3 รุ่นที่ได้จากการทดสอบแรงดันสูญญากาศ

กระป๋องรุ่น	การทดสอบที่ 1 (MPa)	การทดสอบที่ 2 (MPa)	การทดสอบที่ 3 (MPa)	ค่าเฉลี่ย (MPa)
A	0.145	0.140	0.142	0.142
B	0.136	0.136	0.136	0.136
C	0.127	0.125	0.125	0.126

เมื่อทดสอบโดยการเพิ่มความดันลมขึ้นด้วยอัตราคงที่จนถึงความดันที่ 0.120 MPa และปล่อยลมออกทั้งหมด เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระป๋องก่อนที่จะเกิดความเสียหายแบบการโก่งเดาะ ผลการทดสอบพบว่าเกิดการเสียรูปแบบถาวรที่ฝากระป๋อง ส่วนตัวกระป๋องมีลักษณะเหมือนเดิมไม่เกิดการเสียรูปแบบถาวรดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งฝากระป๋องมีการยุบตัวมากที่สุด เกิดที่กึ่งกลางฝากระป๋องมีค่าเฉลี่ย 3.95 mm



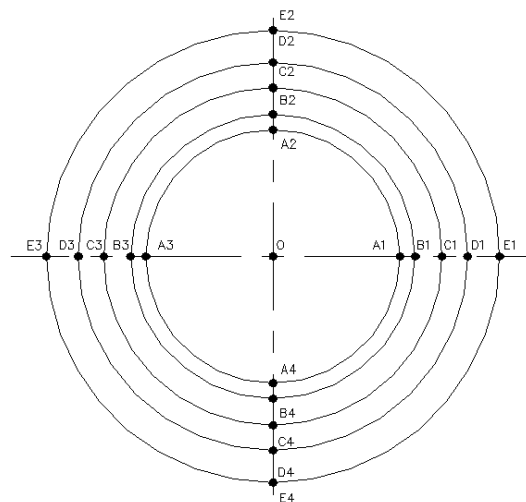
ก่อนทดสอบ



หลังทดสอบ

รูปที่ 2.4 การเสียรูปที่ฝากระป๋องจากการทดสอบความดันสุญญากาศ

การเปลี่ยนรูปแบบถาวรที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนฝากระป๋อง เนื่องจากแรงดันอัด 0.120 MPa หลังการทดสอบความดันสุญญากาศ เป็นดังตารางที่ 2.4 ตำแหน่ง O เป็นจุดกึ่งกลางของฝากระป๋อง ตำแหน่ง A เป็นตำแหน่งเริ่มต้นลอนแรกนับจากจุดกึ่งกลาง ตำแหน่ง B, C และ D เป็นตำแหน่งสูงสุดของลอนฝากระป๋อง และตำแหน่ง E เป็นตำแหน่งด้านบนตะเข็บฝากระป๋อง ค่าเฉลี่ยระยะยุบตัวจากการทดสอบได้จากการวัด 4 จุดห่างเท่าๆกัน ตามแนวเส้นรอบวงดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งการวัดค่าการยุบเสียรูปแบบถาวรของฝากระป๋องจากการทดสอบ

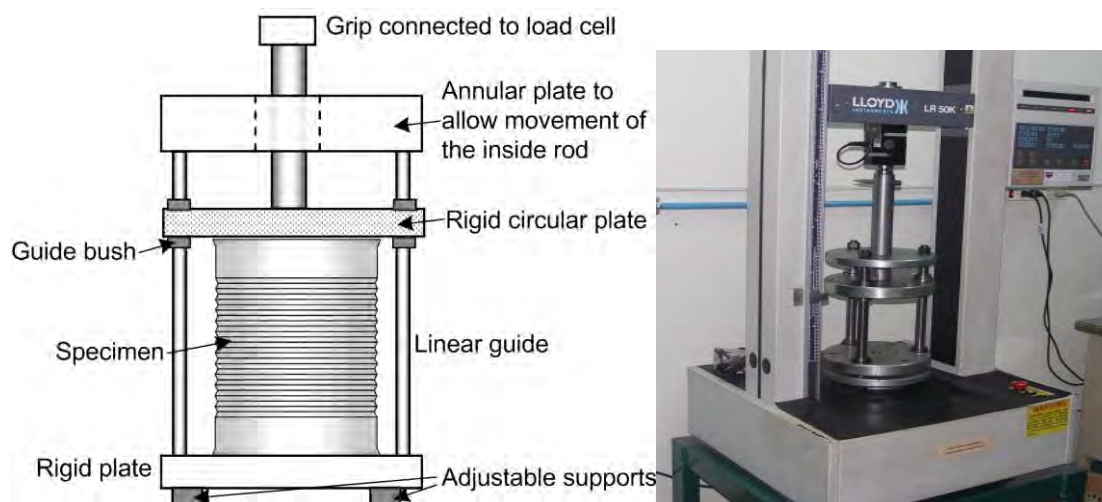
ตารางที่ 2.4 ค่าการเปลี่ยนรูปของฝากระป๋องภายหลังได้รับความดันสุญญากาศ 0.120 MPa

ระยะจาก ระดับอ้างอิง	ตำแหน่งการวัด	O	A	B	C	D
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
ก่อนการทดสอบ		-4.41	-4.91	-4.29	-3.55	-2.37
หลังการทดสอบ		-8.36	-8.87	-8.12	-7.03	-4.72
ระยะยุบจากการทดสอบ		-3.95	-3.97	-3.83	-3.48	-2.36

2.2.2 การทดสอบการรับแรงกดในแนวแกน

การทดสอบความเสียหายจากแรงในแนวแกนของกระป๋องนั้นจะต้องใช้แรงกระทำมากระดับหนึ่ง จึงใช้ Universal Testing Machine ขนาด 5 ตันเป็นต้นกำเนิดแรงในการทดสอบ

ในการทดสอบแรงกด จำเป็นต้องออกแบบอุปกรณ์ยึดจับเพื่อช่วยในการถ่ายแรงจาก Load cell ให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนขอบด้านบนของกระป๋อง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ควรมีความแข็งแรง และสามารถกระจายแรงกดให้อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับกระป๋องได้ โดยการบังคับทิศทางด้วยอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบการกดในแนวแกน (Linear guide) ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 โดยการทำงานของ Linear guide จะมีชุดด้านบนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งเพื่อกดให้กระป๋องยุบตัวลง โดยด้านบนของแผ่นเหล็กนี้จะยึดอยู่กับ Load cell ของ Universal Testing Machine ซึ่งเมื่อ Cross head เคลื่อนที่ลง ชุดแผ่นเหล็กด้านบนจะเคลื่อนที่ลงเป็นระนาบ และออกแรงกดที่ขอบด้านบนของกระป๋องอย่างสม่ำเสมอเข้าหาแผ่นเหล็กด้านล่างที่ไม่เคลื่อนที่ซึ่งจะติดตั้งอยู่ที่พื้น โดยมีชุดบุชและเพลลา 3 ชุด ช่วยควบคุมการเคลื่อนที่ให้ตั้งฉากกับระนาบผากระป๋องมากที่สุดรูปอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบในแนวแกน



รูปที่ 2.6 หลักการของอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบการกดในแนวแกน

สำหรับส่วนรองรับน้ำหนักของอุปกรณ์ยึดจับ จะออกแบบขาตั้งสามารถปรับระดับได้ที่ฐาน 3 จุด โดยปรับระดับความสูงด้วยเกลียวเพื่อทำให้สามารถปรับอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบการกดในแนวแกนให้มีระนาบตรงกับ Universal Testing Machine และเพื่อให้พื้นรองการทดลองมีความแข็งแรงเท่ากันทุกจุดจึงใช้แผ่นเหล็กขนาดความหนา 10 มม. รองระหว่างฐานของอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบการกดในแนวแกนและพื้นของเครื่อง Universal Testing Machine ทำให้พื้นมีลักษณะเป็นระนาบเดียวกัน และสำหรับการตรวจสอบความเป็นระนาบระหว่างการทดลอง จะใช้เครื่องวัดระดับความเอียงที่ความละเอียด 0.1 องศา วัดและปรับ

ระดับพื้นฐานของอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบภาระแรงกดในแนวแกนให้มีขนาดเดียวกับ Universal Testing Machine ก่อนทำการทดลอง

เมื่อทำการทดสอบการรับภาระ โดยใช้กระป๋องทดสอบ 5 ชั้น มีรูปร่างความเสียหาย คล้ายคลึงกัน โดยมีความเสียหายแบบโก่งเดาะเป็นลอนรอบตัวกระป๋องดังแสดงในรูปที่ 2.7 ผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 2.5 ซึ่งมีแรงกดในแนวแกนเฉลี่ย 9885 N



รูปที่ 2.7 การเสียรูปของกระป๋องจากการรับแรงในแนวแกน

ตารางที่ 2.5 ผลการทดสอบแรงกดในแนวแกน

ชั้นทดสอบ	ความสามารถรับแรงกด (N)
1	9516
2	9925
3	10262
4	9582
5	10137
เฉลี่ย	9885

บทที่ 3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของกระป๋องด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะจำลองการรับโหลดและเงื่อนไขขอบเขตให้เหมือนกับสถานะที่เกิดขึ้นจริงและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์กับผลการทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ หลังจากนั้นจึงใช้แบบจำลองที่ตรวจสอบแล้ว ในการคำนวณการรับแรงเมื่อรูปแบบกระป๋องมีความเปลี่ยนแปลงต่อไป

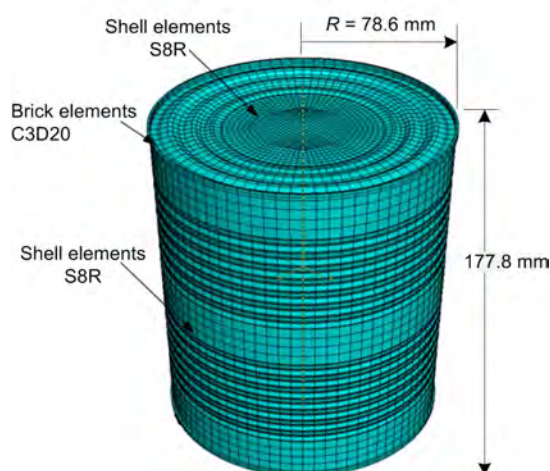
3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองที่นำมาใช้ในการศึกษานี้มีขนาดและรูปร่างลอนตรงกับที่ได้มาจากโรงงานผลิตกระป๋องบรรจุอาหาร ซึ่งมีขนาดตามมาตรฐาน 603x700 โดยจะสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเชิงพาณิชย์ ABAQUS [1] มี

3.1.1 ลักษณะการวิเคราะห์

การจำลองแรงกระทำที่มีต่อกระป๋องในขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการผลิตเพื่อหาภาระโก่งเดาะ (Buckling Load) จากความดันสุญญากาศและจากแรงกดในแนวแกนโดยภาระโก่งเดาะจากความดันสุญญากาศจะวิเคราะห์ในรูปแบบของ Linear perturbation buckling เพื่อหาลักษณะของรูปร่างที่เกิดการโก่งเดาะ (Mode shape) และค่าแรงวิกฤติก่อนการโก่งเดาะหรือ Buckling load

ในขณะที่การคำนวณภาระจากแรงกดในแนวแกนนั้นจะเริ่มจากการวิเคราะห์แบบ Linear perturbation buckling เพื่อหารูปร่างที่เกิดการโก่งเดาะ แล้วจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์แบบ Riks เพื่อหารูปภาพความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและระยะที่เปลี่ยนไปและนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ



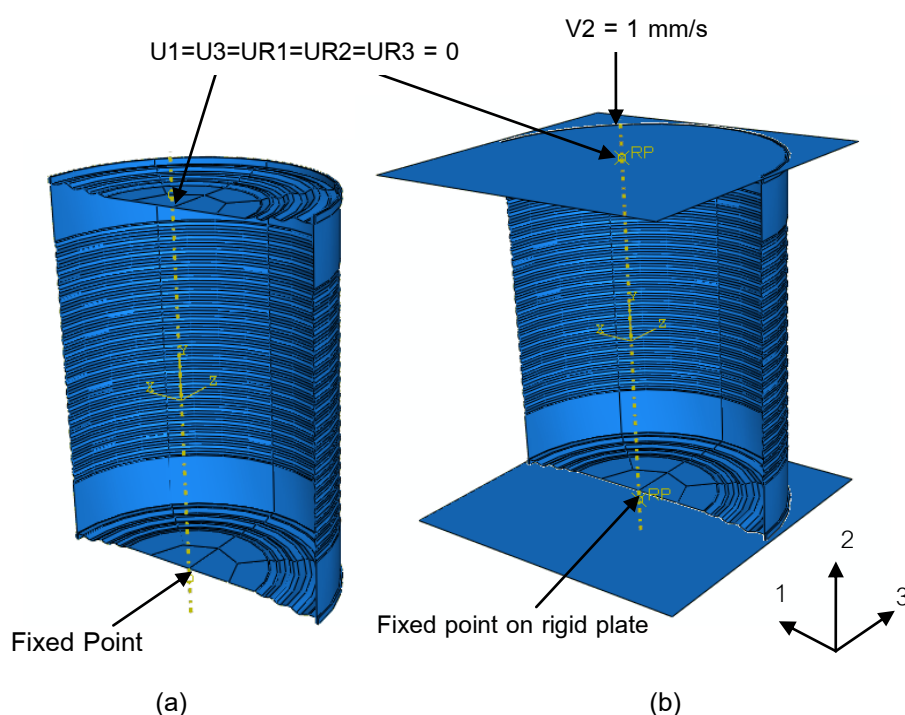
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแบบจำลองและการแบ่งเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1.2 การแบ่งเอลิเมนต์

แบบจำลองและการแบ่งเอลิเมนต์มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 โดยเอลิเมนต์ที่ใช้มีสองชนิด ได้แก่ ส่วนของตัวกระป๋องและฝากระป๋องใช้เอลิเมนต์ชนิด S8R ซึ่งเป็น Shell element ที่มี 8 โหนด แบบ Reduced integration โดยแต่ละโหนดมี 6 Degree of freedom ในขณะที่ตะเข็บบนและล่างของกระป๋องนั้นจะเป็นส่วนที่หนาและมีความแข็งแรงกว่าตัวกระป๋องและฝากระป๋องจึงใช้เอลิเมนต์แบบ Solid element ชนิด C3D20 ซึ่งมี 20 โหนด แต่ละโหนดมี 3 Degree of freedom

3.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบ

การกำหนดเงื่อนไขขอบสำหรับการวิเคราะห์ความสามารถในการรับความดันสูญญากาศจะกำหนดให้มีจุดยึดแน่นที่จุดศูนย์กลางของฝากระป๋องด้านล่าง ในส่วนของจุดศูนย์กลางของฝากระป๋องด้านบนนั้นจะกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่และการหมุน ยกเว้นการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ดังรูปที่ 3.2 (a)



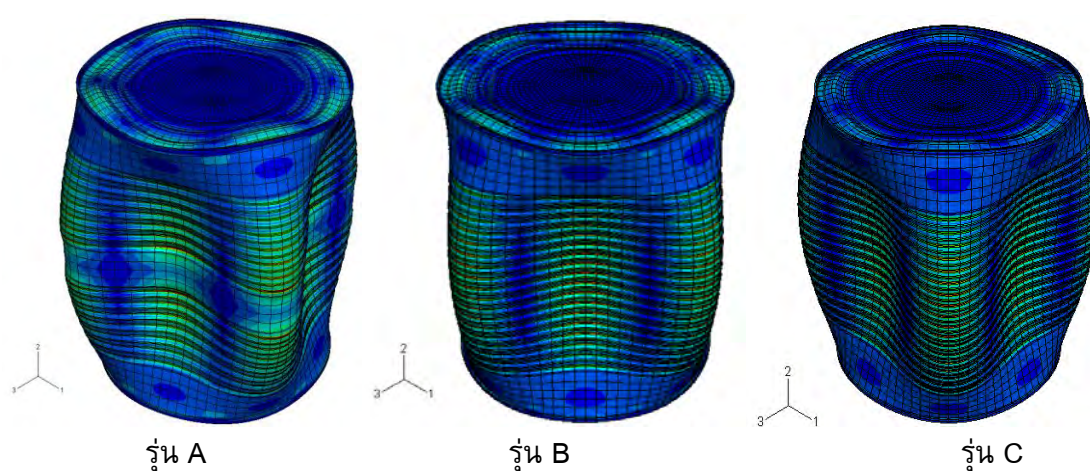
รูปที่ 3.2 เงื่อนไขขอบ (a) ความดันสูญญากาศ (b) แรงกดในแนวแกน

ในขณะที่การวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนนั้นจะจำลองการกด โดยมีแผ่นแข็งเกร็ง (Rigid plate) ประกบด้านบนและล่างของกระป๋องและกำหนดจุดยึดแน่นที่แผ่นแข็งเกร็งแผ่นล่างไว้ โดยกำหนดให้แผ่นแข็งเกร็งด้านบนสามารถเคลื่อนที่ในแนวตั้งได้เพียงทิศทางเดียว และกำหนดให้แผ่นด้านบนเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็วคงที่ 1 มม./วินาทีโดยสร้างความสัมพันธ์ (Interaction) ของผิวสัมผัสระหว่างขอบบนและล่างของกระป๋องกับแผ่นแข็ง

เกร็งเป็นแบบผิวที่สัมผัสกันแบบอิสระต่อกัน และความสัมพันธ์ที่ผิวของตัวกระป๋อง กำหนดให้ผิวสามารถสัมผัสกันกันได้ (Self-contact) เนื่องจากจุดที่เกิดการบีบอัดจะเกิดการยุบและจะมีผิวบางส่วนของตัวกระป๋องสัมผัสกันดังรูปที่ 3.3 (b)

3.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการรับความดันสุญญากาศ

จากการวิเคราะห์การโก่งเดาะแบบสถิตศาสตร์ (Static Buckling) เนื่องจากความดันสุญญากาศ พบว่ากระป๋องบรรจุอาหารรุ่น A, B และ C สามารถรับแรงดันอัดได้สูงสุดที่การโก่งเดาะ 0.143 MPa, 0.138 MPa และ 0.129 MPa ตามลำดับ และการโก่งเดาะเกิดเป็นรอยบุบย่นจำนวน 4 ลอนตามแนวเส้นรอบวงของกระป๋องทั้ง 3 รุ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์การโก่งเดาะของกระป๋อง จากการวิเคราะห์ความดันสุญญากาศ

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดสอบและผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีรูปร่างการเสียรูปเกิดเป็นรอยบุบย่นจำนวน 4 ลอนตามแนวเส้นรอบวงของกระป๋องที่สอดคล้องกันเช่นเดียวกับกระป๋องทั้ง 3 รุ่น และมีความสามารถในการรับภาระสุญญากาศที่ได้จากการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับการทดสอบซึ่งมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบความดันสุญญากาศกับการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Model	ความดันที่ทดสอบ (MPa)	ความดันที่ได้จาก FEA (MPa)	ความแตกต่าง (%)
A	0.142	0.143	0.69
B	0.136	0.138	1.5
C	0.126	0.129	2.93

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปแบบถาวรที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนฝากระป๋อง เนื่องจากแรงดันอัด 0.120 MPa มีความแตกต่างกันไม่เกิน 13% ดังแสดงในตารางที่ 3.2

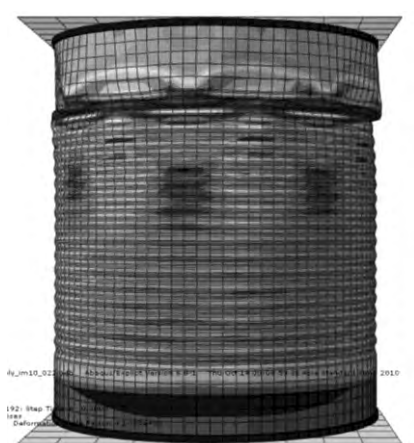
ตารางที่ 3.2 การยุบตัวของฝาจากการทดสอบกับการวิเคราะห์ที่ความดัน 0.120 MPa

ตำแหน่งการวัด ระยะการยุบตัว	O (mm)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
ผลการทดสอบ	-3.95	-3.97	-3.83	-3.48	-2.36
ผลการวิเคราะห์	-4.08	-3.97	-3.89	-3.62	-2.70
ความแตกต่าง (%)	3.35	0.01	1.55	3.77	12.7

3.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงในแนวแกน

3.3.1 การวิเคราะห์แบบ Explicit dynamics

สำหรับการวิเคราะห์แรงกดในแนวแกน จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการวิเคราะห์แบบ Linear perturbation buckling เพื่อศึกษาลักษณะและรูปแบบโหมดในการเกิดความเสียหายจากการโก่งเดาะ ซึ่งการเลือกโหมดเพื่อการวิเคราะห์ส่วนต่อไปจะเลือกโหมดที่มีรูปแบบการเสียหายที่ส่วนของตัวกระป๋องโหมดแรก เนื่องจากเป็นโหมดที่มีภาระการโก่งเดาะน้อยที่สุด ส่วนที่สองคือการวิเคราะห์การรับแรงในแนวแกนแบบ Explicit dynamics ซึ่งเป็นการวิเคราะห์และจำลองการกดลงของแผ่นแข็งเกร็งด้วยความเร็วคงที่ ทำให้สามารถวิเคราะห์และสังเกตพฤติกรรมของกระป๋องได้อย่างละเอียด ซึ่งได้โหลดสูงสุดที่กระป๋องสามารถรับแรงกดในแนวได้เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ



(a)



(b)

รูปที่ 3.4 การเสียรูปของกระป๋องจากการรับแรงในแนวแกนจากการวิเคราะห์ด้วย

(a) ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Explicit dynamics (b) การทดสอบ

ผลการวิเคราะห์พบว่า การรับแรงในแนวแกนแบบ Explicit dynamics ดังรูปที่ 3.4 ได้ค่าความสามารถรับแรงกดคือ 10,505 N ในขณะที่ผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าเฉลี่ย 9,885 N มีความแตกต่างกัน 6.27 เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากการวิเคราะห์การรับแรงด้วยการคำนวณแบบ Explicit dynamics ใช้เวลาในการวิเคราะห์นานมาก แต่สำหรับผลจากการวิเคราะห์ที่ต้องการเพียงค่าของโหนดที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะ ไม่จำเป็นต้องจำลองผลตามเวลา จึงไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ การนำเอาวิธี Riks ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ซึ่งจะเหมาะสมในการคำนวณการโก่งเดาะ เมื่อมีพารามิเตอร์ที่ให้ผลต่อขนาดของโหนดที่กระทำเพียงตัวเดียว โดยจะเห็นลักษณะของรูปร่างและผลในขณะที่ผ่านการโก่งเดาะไปแล้ว และใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยมาก

3.3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Riks

ก่อนที่จะสร้างแบบจำลองกระป๋อง และใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี Riks จะศึกษาและตรวจสอบแบบจำลองและขนาดเอลิเมนต์ที่ต้องใช้ของทรงกระบอกเรียบที่มีความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับกระป๋องที่ใช้ทดสอบและรับแรงกดในแนวแกน โดยกระป๋องมีความสูง 180 มม. มีรัศมี 80 มม. และความหนา 0.25 มม. โดยใช้ค่าสมบัติวัสดุเช่นเดียวกับวัสดุที่ผลิตกระป๋อง กำหนดเงื่อนไขขอบเขตในลักษณะเดียวกับข้างต้นและหาค่าโหนดวิกฤติ (P_{cr}) จากทฤษฎี โดยพิจารณาการโก่งเดาะในโหมดที่ 1

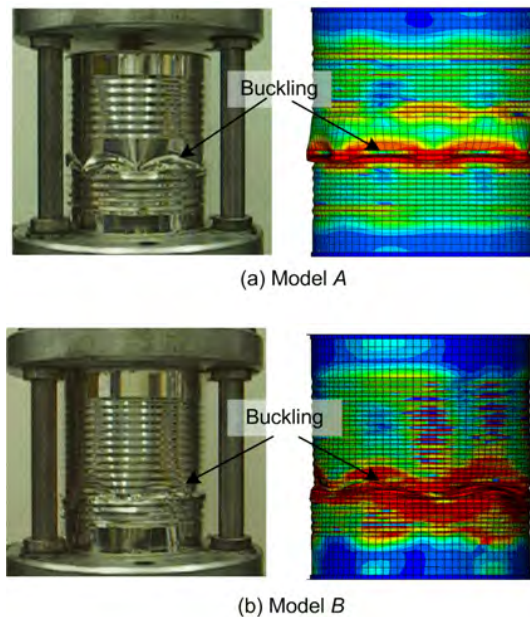
เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นขนาดของเอลิเมนต์มีความสำคัญต่อผลอย่างมาก เอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง แต่การแบ่งเอลิเมนต์ละเอียดมากเกินไปจะเป็นภาระในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ที่เกินจำเป็น จึงต้องมีการทดลองการลู่เข้าของผลเฉลยเมื่อขนาดของเอลิเมนต์มีขนาดลดลงเพื่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อให้ผลที่ได้นั้นมีค่าถูกต้องและระยะในการคำนวณเหมาะสมที่สุด

จากการปรับขนาดของเอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์เป็นดังแสดงในตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์โหนดวิกฤติจากแรงในแนวแกนด้วยวิธี Riks นั้นให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลจากการคำนวณด้วยทฤษฎี จึงเหมาะที่จะนำมาใช้วิเคราะห์การรับแรงในแนวแกนของกระป๋องบรรจุอาหาร และจากการทดสอบการลู่เข้าของผลการวิเคราะห์ จะเห็นว่าขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมมีขนาดไม่เกิน 5 มม. และจะเลือกใช้กับแบบจำลองกระป๋องที่มีลอนต่อไป

เมื่อการวิเคราะห์ภาระการโก่งเดาะภายใต้แรงกดในแนวแกนด้วยวิธี Riks กับกระป๋องบรรจุอาหารที่มีความหนา 0.26 มม. ผลที่ได้นั้นกระป๋องจะมีการเสียรูปลักษณะเดียวกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Explicit dynamics และการทดสอบดังรูปที่ 3.5 และได้แรงกดในแนวแกนเท่ากับ 10,467 N ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบ 5.89% และแตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Explicit dynamics อยู่ 0.36%

ตารางที่ 3.3 การหาโหนดวิกฤติของแบบจำลองทรงกระบอกเรียบ

	ผลการ คำนวณ	วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยขนาดเอลิเมนต์			
		10 mm	7.5 mm	5 mm	2.5 mm
P_{cr} (kN)	52.26	57.18	54.47	53.05	52.51
% Error		9.41	4.23	1.51	0.47



รูปที่ 3.5 การเสียรูปของกระป๋องจากการรับแรงในแนวแกนแบบ Riks

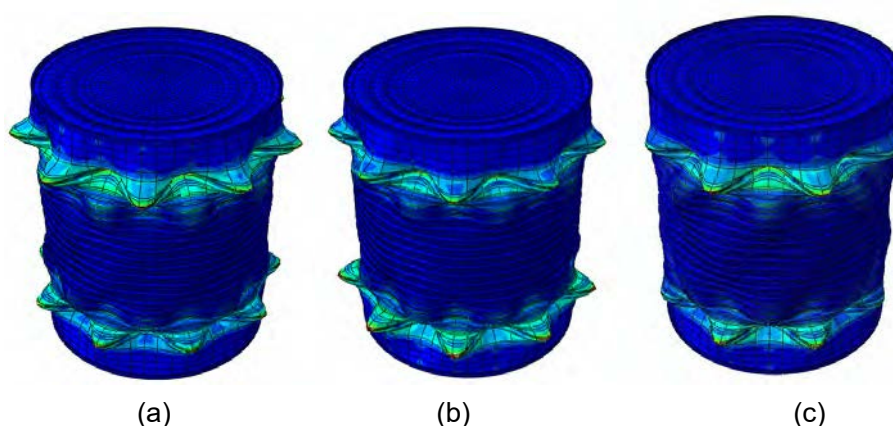
3.3.3 การศึกษาโหมดการโก่งเดาะที่เกิดขึ้นและค่า Imperfection

ดังที่กล่าวมาแล้วจากข้างต้นว่าในการวิเคราะห์ในลักษณะของการโก่งเดาะนั้นจะต้องทำการวิเคราะห์แบบ Linear perturbation buckling ก่อนเพื่อหาโหมดที่จะนำมาวิเคราะห์ต่อไปในส่วนของ Post-buckling นั้น จะมีรูปแบบของการโก่งเดาะที่เป็นไปได้หลายรูปแบบ ในที่นี้จึงวิเคราะห์ผลของรูปแบบการโก่งเดาะต่อค่าแรงวิกฤติที่คำนวณได้ด้วยวิธี Riks ต่างๆเนื่องจากลักษณะของโหมดที่มีรูปร่างตรงตามลักษณะของการทดสอบจริงนั้นมิได้เกิดขึ้นในโหมดแรกเป็นเพราะรูปร่างของทรงกระบอกเปลือกบางนั้นเป็นรูปร่างที่คาดคะเนรูปแบบของการเสียหายจากการโก่งเดาะได้ยากเมื่อพิจารณารูปแบบของการโก่งเดาะ และค่า Eigenvalue ของโหมดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 จะเห็นว่า ค่า Eigenvalue ในโหมดแรก ๆ มีค่าต่างกันน้อยมากเมื่อพิจารณารูปแบบความเสียหาย จะเห็นว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.6 เมื่อพิจารณาผลของโหนดโก่งเดาะที่คำนวณได้ เมื่อพิจารณาที่โหมดที่ 1, 9 และ 17 พบค่าความเสียหายมีลักษณะต่างกันไม่มาก และมีค่าโหนดวิกฤติต่างกันน้อยมากด้วย ดังแสดงในตารางที่

3.5

ตารางที่ 3.4 ค่า Eigenvalue ของโหมดต่าง ๆ

Mode Shape No.	Eigenvalue	Mode Shape No.	Eigenvalue
1	51.397	11	54.191
2	51.397	12	54.191
3	51.425	13	56.472
4	51.425	14	56.472
5	52.544	15	56.484
6	52.545	16	56.484
7	52.553	17	61.014
8	52.553	18	61.014
9	53.896	19	61.686
10	53.896	20	61.700



รูปที่ 3.6 รูปแบบความเสียหาย (a) Mode ที่ 1 (b) Mode ที่ 3 (c) Mode ที่ 5

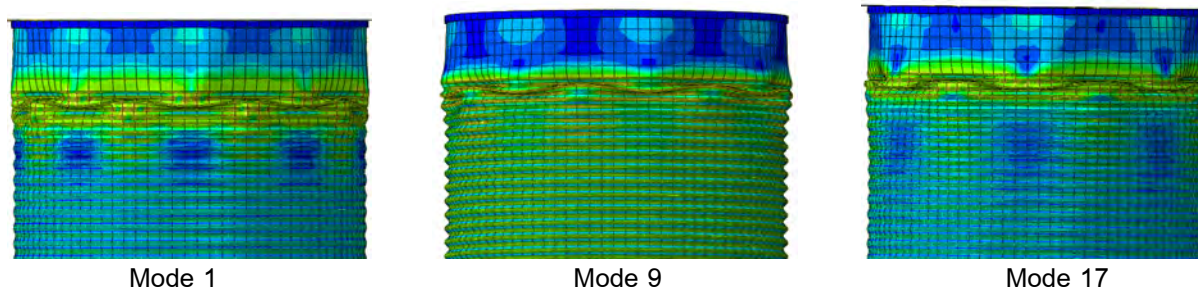
Imperfection คือความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานหรือวัสดุก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อโหลดการโก่งเดาะซึ่งโดยมาก Imperfection ที่เกิดขึ้นจะมีค่าไม่สูงมากนัก แต่ไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงได้ ในมาตรฐานการออกแบบโดยทั่วไปนิยมใช้ Imperfection ประมาณ 20% ในการออกแบบ [20] ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาผลต่อโหลดโก่งเดาะเมื่อ Imperfection มีค่า 1%, 10% และ 50% ของความหนา ดังแสดงในตารางที่ 3.5 จะเห็นว่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า Imperfection ตั้งแต่ 1-50% จะมีค่าโหลดวิกฤติต่างกันน้อยมาก

จากตารางจะสังเกตได้ว่าการเลือกโหมดต่าง ๆ นั้นมีค่าของแรงในแนวแกนต่างกัน สำหรับทุก ๆ ค่า Imperfection อยู่ไม่เกิน 3% ส่วนการปรับเปลี่ยนค่า Imperfection นั้นจะเห็นว่าผลจากแรงในแนวแกนต่างกันไม่เกิน 4 % ซึ่งถือว่าน้อยมาก แต่เนื่องจากส่วนที่มีค่า

Imperfection ที่ต่ำกว่า 10 % จะเริ่มมีความคงที่ของแรงกดในแนวแกนจึงสามารถใช้ค่า Imperfection ที่ 10 % ได้ สำหรับโหมดที่ใช้นั้นก็ไม่มีผลแตกต่างกันมาก จึงไม่มีผลสำหรับการวิเคราะห์ โดยแสดงรูปที่ 3.7 แสดงผลที่ได้จากโหมดที่ 1, 9 และ 17 ซึ่งมีลักษณะไม่ต่างกันมาก ซึ่งมีค่า Eigenvalue (ดังตารางที่ 3.2) จึงสามารถกำหนดให้ใช้โหมดเดียวกันสำหรับทุก ๆ การวิเคราะห์ โดยจะเลือกให้ใช้โหมดแรกสำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ต่อไป

ตารางที่ 3.5 ค่าความสามารถรับแรงในแนวแกนสูงสุดจากการปรับโหมดและค่า Imperfection

Mode	Imperfection 0.01t	0.1t	0.2t	0.5t	% Diff. max to min
Mode 1	10,585 (N)	10,466 (N)	10,546 (N)	10,419 (N)	1.59%
Mode 5	10,581 (N)	10,552 (N)	10,529 (N)	10,459 (N)	1.16%
Mode 17	10,579 (N)	10,542 (N)	10,510 (N)	10,181 (N)	3.90%
% Diff. max to min	0.05%	0.80%	0.34%	2.73%	



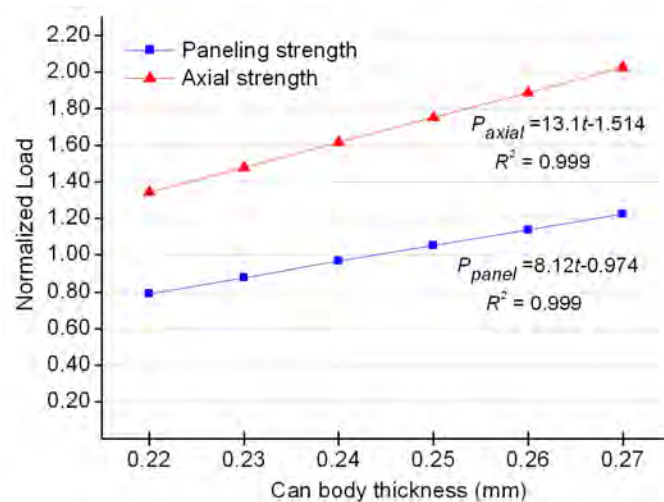
รูปที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์การโก่งเดาะด้วยวิธี Riks โดยมี Imperfection ใน Mode ที่ 1, 9, 17

เมื่อเปรียบเทียบผลแรงโก่งเดาะที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการวิเคราะห์แบบ Explicit dynamics และวิธี Riks กับผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน โดยมีความแตกต่างกันน้อยกว่า 7% แสดงดังตารางที่ 3.6 จึงสามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆของลอนกระป๋องเพื่อออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของลอนกระป๋องในการใช้งานต่อไป

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบผลจาก Axial load ระหว่างการทดสอบกับ Finite element

ผลการวิเคราะห์	Axial load (N)	% Difference
การทดสอบ	9,885	-
Explicit Dynamics	10,505	6.27
Riks	10,467	5.89

เมื่อคำนึงถึงความหนาของกระป๋องบรรจุอาหาร ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญและมีผลต่อความแข็งแรงของกระป๋อง แต่เนื่องจากแนวโน้มของความแข็งแรงจะแปรผันตรงกับความหนาของกระป๋อง และจากการศึกษาแนวโน้มของความหนาที่มีต่อความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 3.8 เมื่อดูจากสมการที่ได้จะเห็นว่าความชันของกราฟมีค่า 8.12 สำหรับการรับความดันสุญญากาศ และ 13.1 สำหรับการรับแรงกดในแนวแกน แสดงว่าการลดความหนาของกระป๋องส่งผลต่อการลดลงของความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนมากกว่าและสามารถนำความชันที่ได้จากแต่ละผลตอบสนองมาทำนายสัดส่วนความปลอดภัยของกระป๋องที่ได้จากการออกแบบลอนกระป๋องโดย RSM



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองของความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความหนาของตัวกระป๋อง

บทที่ 4 การออกแบบลอนด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

บทนี้จะกล่าวถึงการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของลอนกระป๋องเพื่อออกแบบให้ได้กระป๋องที่มีรูปร่างเหมาะสมที่สุด โดยมีความสามารถในการรับความดันสูญญากาศ และแรงในแนวแกนได้ตามที่ต้องการ ในขณะที่ใช้วัสดุในการผลิตน้อยที่สุดมีตัวแปรที่สนใจ 4 ตัวแปร คือ ระยะห่างระหว่างลอน (S), รัศมีลอน (R), ความลึกลอน (D) และจำนวนลอน (N)

จากข้อจำกัดในการผลิต ขอบเขตของพารามิเตอร์ที่ใช้ มีดังนี้ ระยะห่างระหว่างลอนมีค่าอยู่ระหว่าง 6.5 - 8 มม. รัศมีลอนที่ 2 - 3.5 มม. ความลึกลอนระหว่าง 0.4 - 0.75 มม. และจำนวนลอนอยู่ระหว่าง 15 - 17 ลอน

4.1 การวิเคราะห์ด้วย Two-Level Factorial Design

ในขั้นแรกของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นจะเป็นการหาตัวแปรที่มีผลต่อการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งจะใช้หลักการสถิติคือ Design of Experiment จากโปรแกรม Minitab 15 ช่วยในการออกแบบการทดสอบการปรับเปลี่ยนตัวแปรรูปร่างของลอนทั้ง 4 ตัวด้วย Two-Level Factorial Design

ตารางที่ 4.1 2^4 full factorial designs

Analysis point	Coded variables				Natural variables			
	S	R	D	N	S (mm)	R (mm)	D (mm)	N
1	-	-	-	-	6.5	2	0.4	15
2	+	-	-	-	8	2	0.4	15
3	-	+	-	-	6.5	3.5	0.4	15
4	+	+	-	-	8	3.5	0.4	15
5	-	-	+	-	6.5	2	0.75	15
6	+	-	+	-	8	2	0.75	15
7	-	+	+	-	6.5	3.5	0.75	15
8	+	+	+	-	8	3.5	0.75	15
9	-	-	-	+	6.5	2	0.4	17
10	+	-	-	+	8	2	0.4	17
11	-	+	-	+	6.5	3.5	0.4	17
12	+	+	-	+	8	3.5	0.4	17
13	-	-	+	+	6.5	2	0.75	17
14	+	-	+	+	8	2	0.75	17
15	-	+	+	+	6.5	3.5	0.75	17
16	+	+	+	+	8	3.5	0.75	17

จำนวนครั้งของการทดลองทั้งหมด สำหรับ Full factorial คือ 2^4 ครั้ง (16 กรณี) ดังตารางที่ 4.1 ค่า + และ - หมายถึงค่าสูงและค่าต่ำ (ตามลำดับ) ของแต่ละตัวแปร ดังนั้นการศึกษาผลของการปรับค่าภายในช่วงของตัวแปรที่กำหนดไว้จึงมีความครบถ้วนในการเปรียบเทียบกันและสามารถวิเคราะห์ผลเพื่อศึกษาผลกระทบต่ตัวแปรต่าง ๆ ได้ในที่สุดความสามารถในการรับความดันสุญญากาศ และแรงในแนวแกน สำหรับทั้ง 16 กรณี ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในบทที่ 3 โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรและผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 Analysis point สำหรับตัวแปรต่าง ๆ และความสามารถในการรับโหลด

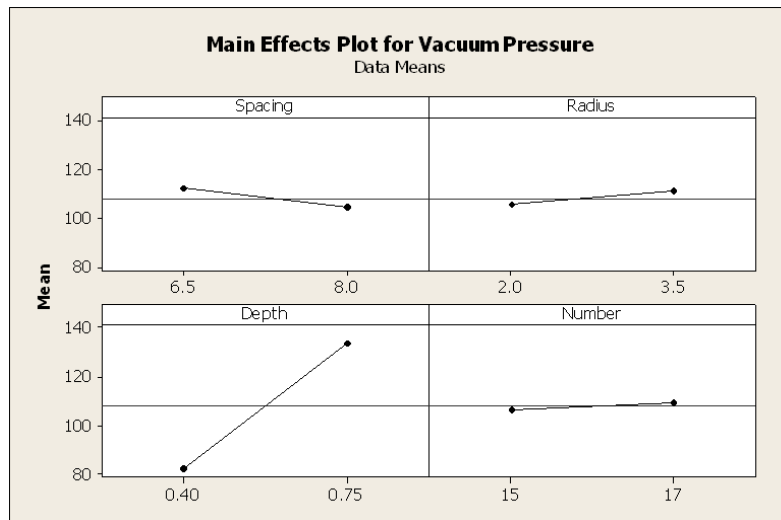
Analysis points	S (mm)	R (mm)	D (mm)	N	Vacuum pressure (kPa)	Axial load (N)
1	6.5	2	0.4	15	82.8	14,598
2	8	2	0.4	15	79.9	14,584
3	6.5	3.5	0.4	15	83.3	14,327
4	8	3.5	0.4	15	80.4	14,317
5	6.5	2	0.75	15	131.9	9,288
6	8	2	0.75	15	122.7	9,288
7	6.5	3.5	0.75	15	144.6	9,086
8	8	3.5	0.75	15	129.0	9,123
9	6.5	2	0.4	17	84.2	14,600
10	8	2	0.4	17	81.7	14,742
11	6.5	3.5	0.4	17	85.7	14,484
12	8	3.5	0.4	17	82.1	14,507
13	6.5	2	0.75	17	135.5	9,289
14	8	2	0.75	17	125.9	9,325
15	6.5	3.5	0.75	17	148.5	9,188
16	8	3.5	0.75	17	132.2	9,126

เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ ผลกระทบ (Effect) ของตัวแปรหลัก และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ สำหรับความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนจะได้ผลดังตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าผลกระทบที่ได้นั้นมีทั้งค่าบวกคือผลกระทบของตัวแปรทางด้านบวกที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าสูงขึ้น และค่าลบซึ่งตัวแปรและผลตอบสนองแปรผกผันกัน

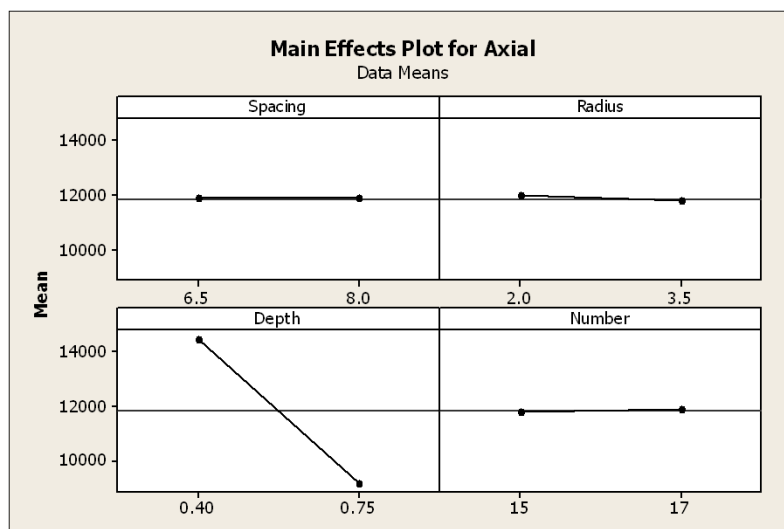
เมื่อนำค่าผลกระทบของแต่ละตัวแปรและผลกระทบของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ มาวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปร จะเห็นว่าความลึกลอน (D) นั้นมีค่าผลกระทบสูงที่สุดทั้งสองผลตอบแทน แต่ลักษณะของค่าผลกระทบนั้นจะต่างกัน คือที่ความดันสุญญากาศจะให้ผลตอบแทนสูงขึ้นเมื่อมีค่าความลึกลอนสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาแรงกดในแนวแกนผลตอบแทนจะผกผันกับค่าความลึกลอนเช่นเดียวกับรัศมีลอน (R) ระยะห่างระหว่างลอน (S) นั้นจะให้ผลตรงกันข้ามกับความลึกลอนและรัศมีลอนทั้งสองกรณี กล่าวคือ ระยะห่างระหว่างลอนที่มีค่ามากจะทำให้ความสามารถในการรับความดันสุญญากาศน้อยลง แต่ทำให้ความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนสูงขึ้น (รูปที่ 4.2 และ 4.3) ในขณะที่จำนวนลอนนั้นมีผลกระทบน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น ๆ สำหรับทั้งสองผลตอบแทนและลักษณะของผลกระทบต่อผลตอบแทนทั้งสองชนิดคือเป็นไปในทางบวกลักษณะของกระทบจากตัวแปรหลักทั้ง 4 ตัวแปรต่อการรับความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลกระทบและค่าสัมประสิทธิ์ในรูปของ Coded units

Term	Vacuum pressure		Axial load	
	Effect	Coefficient	Effect	Coefficient
Constant		108.2		11867
S	-7.8	-3.9	19	10
R	5.2	2.6	-194	-97
D	51.3	25.6	-5306	-2653
N	2.7	1.3	81	41
$S*R$	-1.8	-0.9	-22	-11
$S*D$	-4.9	-2.4	-16	-8
$S*N$	-0.2	-0.1	16	8
$R*D$	4.4	2.2	28	14
$R*N$	0.2	0.1	32	16
$D*N$	0.8	0.4	-46	-23
$S*R*D$	-1.5	-0.8	7	3
$S*R*N$	-0.2	-0.1	-32	-16
$S*D*N$	-0.1	-0.05	-32	-16
$R*D*N$	-0.1	-0.05	-15	-7
$S*R*D*N$	0.1	0.05	-1	-1



รูปที่ 4.2 ผลความดันสุญญากาศจากการปรับเปลี่ยนโมเดลที่จุดต่าง ๆ



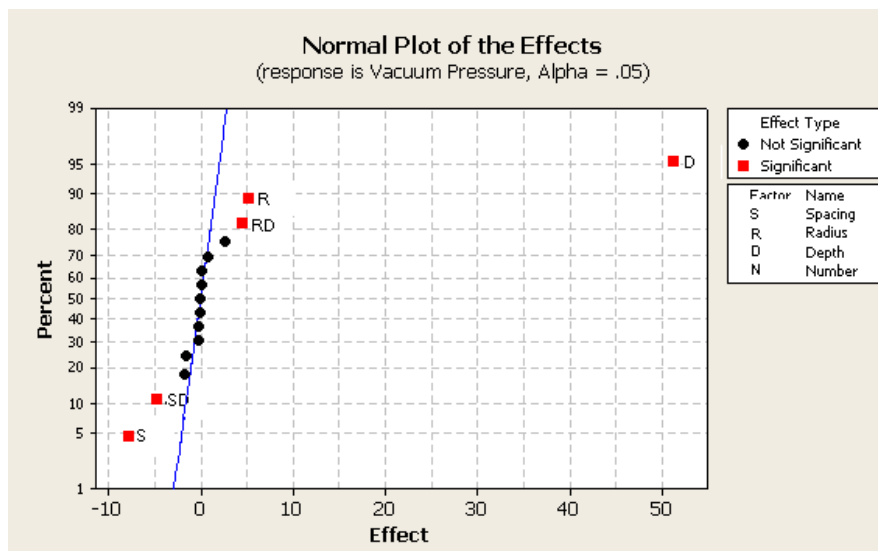
รูปที่ 4.3 ผลของการรับแรงในแนวแกนจากการปรับเปลี่ยนโมเดลที่จุดต่าง ๆ

กราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal probability plot) ซึ่งเป็นเทคนิคการเขียนกราฟ เพื่อตรวจสอบว่ากลุ่มข้อมูล มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยจากกราฟจะมีเส้นแสดงการกระจายของข้อมูลแบบปกติ ซึ่งตัวแปรที่อยู่ห่างจากเส้นแสดงถึงตัวแปรนั้นออกจากภาวะปกติ ซึ่งหมายความว่าตัวแปรนั้นมีความสำคัญ (Significant) ต่อผลตอบสนอง

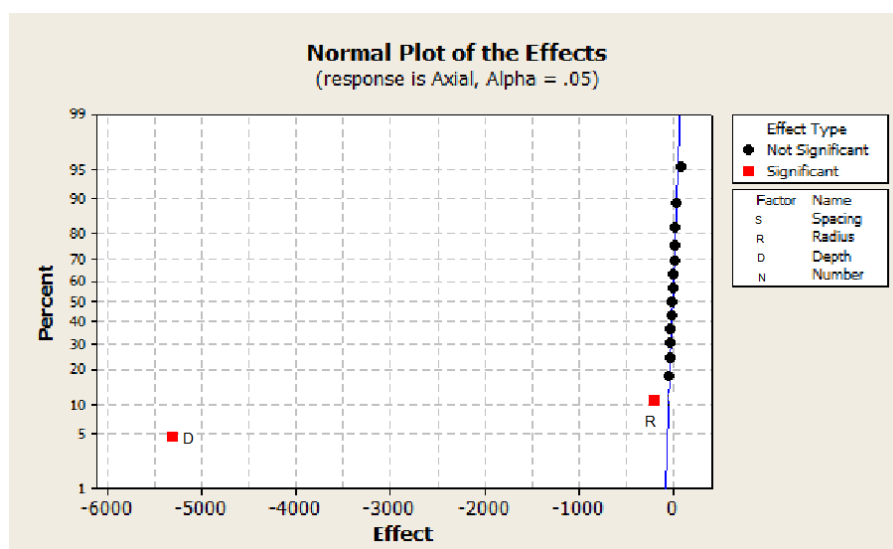
จากกราฟแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติของความดันสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งตัวแปรที่สำคัญ มีทั้งตัวแปรหลักและตัวแปรร่วมโดยตัวแปรหลักได้แก่ความลึกลอน ระยะห่างระหว่างลอนและรัศมีลอนตัวแปรร่วมที่มีความสำคัญได้แก่ตัวแปรความลึกลอนกับระยะห่างระหว่างลอนและตัวแปรความลึกลอนกับรัศมีลอนจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ผลต่อ

ความสามารถในการรับความดันสุญญากาศนั้นจำนวนลอนเป็นตัวแปรหลักและตัวแปรร่วมที่ไม่มีความสำคัญกับผลตอบสนอง

เมื่อพิจารณาความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนนั้น กราฟแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติเป็นดังรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มีความสำคัญมากคือ ความลึกลอนและรัศมีลอน และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ นั้นไม่มีความสำคัญต่อผลตอบสนอง



รูปที่ 4.4 ผลกระทบต่อการรับความดันสุญญากาศจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปร



รูปที่ 4.5 ผลกระทบต่อการรับแรงในแนวแกนของการเปลี่ยนแปลงตัวแปร

เมื่อพิจารณาทั้งผลต่อการรับความดันสุญญากาศและแรงในแนวแกนจะเห็นว่า ตัวแปรที่สำคัญมีทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ ความลึกลอน, รัศมีลอนและระยะห่างระหว่างลอน ในขณะที่จำนวนลอนที่ใช้มีความสำคัญน้อยต่อการรับแรง และส่งผลต่อการรับแรงทั้งสองไปในทิศทาง

เดียวกัน คือ จำนวนลอนที่มากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการรับแรงทั้งสองดีขึ้น จึงสามารถตัดตัวแปรจำนวนลอนจากการออกแบบตัวแปรลอนและใช้จำนวนลอนค่ามาก คือ 17 ลอนในการออกแบบต่อไป

4.2 การหาขอบเขตค่าสูงสุดด้วยวิธี Steepest ascent

จากผลการวิเคราะห์จาก Two-level factorial design พบว่า ความลึกลอนเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองทั้ง ความดันสัญญาณและการรับแรงในแนวแกนสูงที่สุดโดยมีผลการทดสอบสูงกว่าตัวแปรอื่น ๆ มาก ในกระบวนการ Steepest ascent จะกำหนดขอบเขตตัวแปรใหม่โดยลดขอบเขตของความลึกลอนลงเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ขอบเขตการวิเคราะห์ด้วยวิธี Steepest ascent

	Spacing (mm)	Radius (mm)	Depth (mm)
Minimum	6.5	2	0.54
Middle	7	2.75	0.57
Maximum	7.5	3.5	0.6

จากขอบเขตที่กำหนดข้างต้น นำค่าสูงที่สุดและต่ำที่สุดมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการลำดับขั้นที่ 1 (First-order) ด้วยหาค่าผลกระทบของตัวแปรต่างๆ เนื่องจากสามารถลำดับขั้นที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์ 4 ค่า จึงต้องใช้ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทั้งหมด 4 จุด และเป็นค่าสูงและค่าต่ำ ดังตารางที่ 4.5 ได้ผลการวิเคราะห์การรับแรงทั้งสองจาก FEM แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 แนวทางการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการหาค่าผลกระทบของตัวแปร

Run	S	R	D
1	-	-	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	+

จากตารางที่ 4.6 สามารถแยกการวิเคราะห์โดยกระบวนการ Steepest ascent ออกเป็นสองส่วนควบคู่กันไปคือความดันสัญญาณและแรงกดในแนวแกน สำหรับการออกแบบจะใช้ค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Safety factor, SF) ของกระป๋องแทนการใช้ค่าความสามารถในการรับแรง เนื่องจากในการออกแบบเราต้องการให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยทั้งสองมีค่าสูงสุด ในขณะที่การปรับเปลี่ยนตัวแปร จะทำให้สัดส่วนความปลอดภัยแปรผกผันกัน เพื่อให้กระป๋องบรรจุ

อาหารสามารถรับแรงได้สูงสุด โดยไม่เกิดการโก่งเดาะ เนื่องจากภาระใดภาระหนึ่งก่อน จึงออกแบบสัดส่วนความปลอดภัยให้มีค่าเท่ากันและไม่ต่ำกว่าสัดส่วนความปลอดภัยที่ให้อยู่ในกระป๋องปัจจุบัน ($SF = 1.25$) เนื่องจากความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนที่ต้องการสำหรับกระป๋องที่ออกแบบ มีค่า 80 kPa และ 8,338.5 N ตามลำดับ หากพิจารณาที่สัดส่วนความปลอดภัย 1.25 จะได้ค่าความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนที่ต้องการเท่ากับ 100 kPa และ 10,423 N ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 Analysis point และผลตอบสนองสำหรับสมการลำดับขั้นที่ 1

Analysis points	Spacing (mm)	Radius (mm)	Depth (mm)	Vacuum (kPa)	Axial (N)
1	6.5	2	0.6	128.9	11,083
2	7.5	2	0.54	111.0	11,953
3	6.5	3.5	0.54	123.9	11,805
4	7.5	3.5	0.6	125.4	10,933

4.2.1 Steepest ascent สำหรับความดันสุญญากาศ

ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.6 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามในรูปแบบตัวแปรสัญลักษณ์ (Coded variable) คือ ระยะห่างระหว่างลอน (x_1), รัศมีลอน (x_2), ความลึกลอน (x_3) ต่อผลตอบสนองของการรับความดันสุญญากาศ (Y_{vacuum}) ได้ดังนี้

$$Y_{vacuum} = 122.3 - 4.1x_1 + 2.35x_2 + 4.85x_3 \quad (4.1)$$

หรือสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปของ ($Y_{SF,vacuum}$) ดังนี้

$$Y_{SF,vacuum} = 1.529 - 0.051x_1 + 0.029x_2 + 0.061x_3 \quad (4.2)$$

เมื่อนำสมการข้างต้นเข้าสู่กระบวนการ Steepest ascent แล้ว จะได้ค่า Δ_v สำหรับผลตอบสนองทั้งสองจากการคำนวณ แสดงค่าดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 Coefficient ของความดันสุญญากาศและ Δ สำหรับการปรับเปลี่ยนแบบจำลอง

Term	Y_{vacuum}		$Y_{SF,vacuum}$	
	Coefficient	Δ_v	Coefficient	Δ_v
Constant	122.3		1.529	
Spacing, ξ_1	-4.10	-0.423	-0.051	-0.423
Radius, ξ_2	2.35	0.363	0.029	0.363
Depth, ξ_3	4.85	0.030	0.061	0.030

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าตัวแปรที่มีผลกระทบมากที่สุดสำหรับความดันสูญญากาศ ได้แก่ ความลึกกลอน และทั้งสามตัวแปรนั้น มีผลกระทบไม่ต่างกันมากนัก ทำให้ค่า Δ_v สำหรับการปรับเปลี่ยนแบบจำลองในกระบวนการ Steepest ascent แต่ละตัวแปรมีผลมากต่อการปรับเปลี่ยนแบบจำลองทั้งหมดโดยที่ค่าปรับเปลี่ยนของระยะห่างระหว่างลอนนั้นมีค่าเป็นลบ แสดงถึงการแปรผกผันกันระหว่างค่าของระยะห่างระหว่างลอนกับผลของความดันสูญญากาศ ส่วนรัศมีลอนและความลึกกลอนนั้นมีค่าเป็นบวก จึงแปรผันตรงกับความดันสูญญากาศ ผลจากวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง FEM จากกระบวนการ Steepest ascent สำหรับความดันสูญญากาศ นั้นแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 Steepest ascent สำหรับความดันสูญญากาศ

Analysis point	Natural variables			Dependent variables			
	Spacing (mm)	Radius (mm)	Depth (mm)	Y_{vacuum} (kPa)	$Y_{SF,vacuum}$	Y_{axial} (N)	$Y_{SF,axial}$
Base	7	2.75	0.57	117.3	1.466	11431	1.371
Δ_v	-0.422	0.363	0.03				
Base+1 Δ_v	6.577	3.113	0.6	119.9	1.498	10903	1.307
Base+2 Δ_v	6.154	3.476	0.63	126.8	1.585	10491	1.258
Base+3 Δ_v	5.732	3.840	0.66	N/A	N/A	N/A	N/A

ผลจากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าความดันสูญญากาศจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากที่มีการปรับแบบจำลองตามกระบวนการ Steepest ascent ของผลตอบสนองความดันสูญญากาศ แต่เมื่อพิจารณาผลต่อการรับแรงกดในแนวแกน จะเห็นว่าความสามารถในการรับแรงในแนวแกนมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เกือบถึงขอบเขตค่าที่ยอมรับได้ ($SF_{axial} = 1.25$) นอกจากนี้ หากมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรมากกว่านี้ (แบบจำลอง Base + 3 Δ_v) จะไม่สามารถสร้างแบบจำลองได้ เนื่องจากระยะห่างระหว่างลอนน้อย ในขณะที่รัศมีมีความโค้งและความลึกกลอนมีค่ามากเกินไป ดังจะสามารถตรวจสอบได้จากการนำค่าของตัวแปรจากแบบจำลองมาคำนวณค่าในเครื่องหมายรากที่สองของสมการที่ 2.7 ($4R^2(D - 2R)^2 - 4((D - 2R)^2 + s^2)(4R^2 - s^2)$) ซึ่งหากผลเป็นค่าลบ แสดงว่าไม่มีจำนวนจริงที่ให้ผลมุม θ และระยะ l ในสมการได้ ดังนั้นจึงเป็นค่าตัวแปรที่ไม่สามารถเป็นไปได้

เมื่อทดสอบแทนค่า จากตัวแปรในแบบจำลองทั้ง 4 แบบจำลองลงในสมการในเครื่องหมายรากที่สองของสมการ 2.7 จะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าแบบจำลอง Base + 3 Δ_v มีค่าติดลบ แสดงว่า การกำหนดลักษณะดังกล่าว ไม่สามารถสร้างได้จริง เนื่องจากมี

ลักษณะทางกายภาพไม่เหมาะสม กระบวนการ Steepest ascent สำหรับความดันสุญญากาศ จึงสามารถสร้างได้เพียงสองแบบจำลองเท่านั้น

ตารางที่ 4.9 การตรวจสอบแบบจำลองเพื่อหลีกเลี่ยงการออกแบบที่เกินขีดจำกัดของการผลิต

Analysis point	s*(mm)	R (mm)	D (mm)	Square - root term	
				In Eq. (3.8)	In Eq. (3.11)
Base	3.500	2.750	0.57	308.92	612.95
Base+1 Δ_v	3.279	3.113	0.6	156.57	460.93
Base+2 Δ_v	3.077	3.476	0.63	41.86	176.71
Base+3 Δ_v	2.866	3.840	0.66	-48.89	-293.33

* ระยะ S ในสมการ (2.8) เป็นระยะครึ่งลอน ซึ่งคำนวณได้จาก $s/2$

4.2.2 Steepest ascent สำหรับ แรงกดในแนวแกน

ในทำนองเดียวกันเมื่อนำผลที่ได้จากตารางที่ 4.7 มาสร้างสมการความสัมพันธ์ของตัวแปร ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอนและความลึกลอนในรูปแบบตัวแปรสัญลักษณ์กับแรงกดในแนวแกน (Y_{axial}) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Y_{axial} = 11443.5 - 0.5x_1 - 74.5x_2 - 435.5x_3 \quad (4.3)$$

หรือในผลตอบสนองในการคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยของการรับแรงกดในแนวแกน

$$Y_{SF,axial} = 1.372 - 0.00006x_1 - 0.009x_2 - 0.052x_3 \quad (4.4)$$

เมื่อนำสมการข้างต้นเข้าสู่กระบวนการ Steepest ascent แล้ว จะได้ค่า Δ_a สำหรับการคำนวณดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์ของแรงกดในแนวแกนและ Δ สำหรับการปรับเปลี่ยนแบบจำลอง

Term	Y_{axial}		$Y_{SF,axial}$	
	Coefficient	Δ_a	Coefficient	Δ_a
Constant	11443.5		1.372	
Spacing	-0.5	-0.0005	-0.00006	-0.0005
Radius	-74.5	-0.128	-0.009	-0.128
Depth	-435.5	-0.030	-0.052	-0.030

จากตารางที่ 4.10 จะได้ค่า Δ_a เป็นค่าลบทั้งสามตัวแปรแสดงว่าการลู่เข้าสู่ช่วงขอบเขตของตัวแปรที่ทำให้แรงกดในแนวแกนมีผลตอบสนองสูงขึ้นนั้นจะต้องลดค่าของตัวแปรทั้งสามตัว โดยสังเกตได้ว่าตัวแปรที่มีผลกระทบมากที่สุดและเป็นตัวแปรหลักสำหรับการปรับเปลี่ยนแบบจำลองที่ได้จากค่า Δ_a นั้นคือความลึกลอน นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าระยะห่างระหว่างลอนมีผลต่อการรับแรงกดในแนวแกนน้อยมาก สังเกตจากค่า Δ_a ของตัวแปรระยะห่างระหว่างลอนที่มีค่าน้อยกว่าตัวแปรอื่น ๆ มาก ซึ่งผลที่ได้จากกระบวนการ Steepest ascent นั้นสามารถสร้างแบบจำลองใหม่และได้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM แสดงดังในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 Steepest ascent สำหรับแรงกดในแนวแกน

Analysis point	Natural variables			Dependent variables			
	Spacing (mm)	Radius (mm)	Depth (mm)	Y_{axial} (N)	$Y_{SF,axial}$	Y_{vacuum} (kPa)	$Y_{SF,vacuum}$
Base	7	2.75	0.57	11431	1.371	117.3	1.466
Δ_a	-0.0005	-0.128	-0.03				
Base+1 Δ_a	6.999	2.622	0.54	11872	1.423	108.6	1.358
Base+2 Δ_a	6.998	2.493	0.51	12351	1.481	100.7	1.258
Base+3 Δ_a	6.998	2.365	0.48	12876	1.544	94.1	1.176*

* ต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าผลตอบสนองที่กำลังศึกษา (แรงกดในแนวแกน) จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากที่มีการปรับแบบจำลองแต่ความสามารถในการรับความดันสุญญากาศจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ และที่แบบจำลอง Base+3 Δ_a ค่าสัดส่วนความปลอดภัยของความดันสุญญากาศมีค่าน้อยกว่า 1.25 จึงไม่ควรนำมาใช้ ในทำนองเดียวกันกับกรณีข้างต้น จะสังเกตเห็นว่าผลตอบสนองที่สูงที่สุดของความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนนั้นจะไปในทิศทางตรงข้ามกัน

4.2.3 ช่วงที่ให้ผลตอบสนองที่เหมาะสมจาก Steepest ascent

จากวิธีการ Steepest ascent จะเห็นว่าแบบจำลองต่าง ๆ ที่ได้ขึ้นมาใหม่นั้น ตัวแปรต่าง ๆ นั้นจะมีค่าลู่เข้าสู่ช่วงที่ให้ผลตอบสนองที่สูงขึ้น

เมื่อสังเกตจากตารางที่ 4.8 จะได้ว่าความดันสุญญากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนแรงกดในแนวแกนนั้นจะมีค่าลดลง เมื่อจำกัดค่าสัดส่วนความปลอดภัยภายใต้แรงกดในแนวแกนที่ 1.25 แบบจำลองที่ได้จะอยู่ในแบบจำลอง Base+2 Δ_v ขอบเขตตัวแปรที่ควรใช้ในการศึกษา ที่ได้ คือ ระยะห่างระหว่างลอนไม่น้อยกว่า 6.15 มม. รัศมีลอนไม่เกิน 3.47 มม. และความลึกลอนไม่เกิน 0.63 มม.

ในการทำนองเดียวกันตารางที่ 4.11 จะได้ว่า แรงกดในแนวแกนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ความดันสูญญากาศมีค่าลดลง เมื่อจำกัดค่าสัดส่วนความปลอดภัยภายใต้ความดันสูญญากาศไม่ต่ำกว่า 1.25 ขอบเขตที่ได้จะอยู่ในแบบจำลองที่ $\text{Base}+2\Delta_u$ นั่นคือ ระยะห่างระหว่างลอนไม่เปลี่ยนแปลง รัศมีลอนไม่น้อยกว่า 2.49 มม. และความลึกลอนไม่น้อยกว่า 0.51 มม.

ผลจากการศึกษาทั้งสองกรณี จะเห็นว่าสามารถกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยรัศมีลอนมีค่าระหว่าง 2.49 และ 3.47 มม. ความลึกลอนมีค่า 0.51-0.63 มม. ส่วนระยะห่างระหว่างลอนนั้นมีการลู่อเข้าทางด้านลบทั้งสองการทดลอง โดยมีค่าไม่น้อยกว่า 6.15 มม. และ 6.99 มม. ซึ่งค่าที่ต่ำ จะส่งผลให้ความสามารถในการรับภาระดีกว่า ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างลอนมีค่า 6.15-7.00 มม.

ตารางที่ 4.12 แนวทางการปรับเปลี่ยนแบบจำลองตามกระบวนการ CCD 3 ตัวแปร

Analysis point	Coded variables			Natural variables		
	x_1	x_2	x_3	Spacing (mm)	Radius (mm)	Depth (mm)
1	-1	-1	-1	6.15	2.50	0.51
2	1	-1	-1	7.00	2.50	0.51
3	-1	1	-1	6.15	3.47	0.51
4	1	1	-1	7.00	3.47	0.51
5	-1	-1	1	6.15	2.50	0.63
6	1	-1	1	7.00	2.50	0.63
7	-1	1	1	6.15	3.47	0.63
8	1	1	1	7.00	3.47	0.63
9	-1.682	0	0	5.86	2.985	0.57
10	1.682	0	0	7.29	2.985	0.57
11	0	-1.682	0	6.575	2.169	0.57
12	0	1.682	0	6.575	3.80	0.57
13	0	0	-1.682	6.575	2.985	0.47
14	0	0	1.682	6.575	2.985	0.67
15	0	0	0	6.575	2.985	0.57
16	0	0	0	6.575	2.985	0.57
17	0	0	0	6.575	2.985	0.57
18	0	0	0	6.575	2.985	0.57
19	0	0	0	6.575	2.985	0.57
20	0	0	0	6.575	2.985	0.57

4.3 การวิเคราะห์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง คือกระบวนการสุดท้ายในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยวิธีการที่นำมาใช้คือ Central Composite Design (CCD) เนื่องจากสามารถเพิ่มย่านที่กว้างขึ้นของขอบเขตที่กำหนดที่มีสมมติฐานเบื้องต้นว่ามีผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดอยู่จากจุดศูนย์กลางของขอบเขตการทดลองเป็นระยะที่เท่ากันทุกทิศทาง และเป็นการสร้างสมการพื้นผิวลำดับที่ 2 ซึ่งจะสามารถวาดกราฟพื้นผิวตอบสนองได้ใกล้เคียงกับแนวโน้มที่เกิดขึ้นจริง

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์การรับความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนด้วย CCD 3 ตัวแปร

Analysis point	Natural variables			Dependent variables			
	Spacing (mm)	Radius (mm)	Depth (mm)	Y_{vacuum} (kPa)	$Y_{SF,vacuum}$	Y_{axial} (N)	$Y_{SF,axial}$
1	6.15	2.50	0.51	104.1	1.301	12,361	1.482
2	7.00	2.50	0.51	100.7	1.259	12,352	1.481
3	6.15	3.47	0.51	109.5	1.369	12,299	1.475
4	7.00	3.47	0.51	104.4	1.305	12,264	1.470
5	6.15	2.50	0.63	123.1	1.539	10,581	1.269
6	7.00	2.50	0.63	118.9	1.486	10,661	1.279
7	6.15	3.47	0.63	126.8	1.585	10,496	1.259
8	7.00	3.47	0.63	120.7	1.509	10,479	1.257
9	5.86	2.985	0.57	121.9	1.524	11,333	1.359
10	7.29	2.985	0.57	116.2	1.453	11,409	1.368
11	6.575	2.169	0.57	116.7	1.459	11,486	1.377
12	6.575	3.80	0.57	119.3	1.491	11,345	1.361
13	6.575	2.985	0.47	95.2	1.190	13,015	1.561
14	6.575	2.985	0.67	127.2	1.590	10,050	1.205
15	6.575	2.985	0.57	118.8	1.485	11,416	1.369
16	6.575	2.985	0.57	118.8	1.485	11,416	1.369
17	6.575	2.985	0.57	118.8	1.485	11,416	1.369
18	6.575	2.985	0.57	118.8	1.485	11,416	1.369
19	6.575	2.985	0.57	118.8	1.485	11,416	1.369
20	6.575	2.985	0.57	118.8	1.485	11,416	1.369

4.3.1 Central Composite Design 3 ตัวแปร

สำหรับการวิเคราะห์โดย CCD 3 ตัวแปรซึ่งมีตัวแปรที่ต้องการคือ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอนและความลึกลอนโดยกำหนดขอบเขตการปรับเปลี่ยนที่ ระยะห่างระหว่างลอน 6.15-7.00 มม. รัศมีลอน 2.5 - 3.47 มม. และความลึกลอน 0.51-0.63 มม. โดยกำหนดให้มีจำนวนลอนคงที่ที่ 17 ลอน ในกระบวนการ CCD การออกแบบการทดลองนั้นจะทำการปรับค่าตัวแปรทั้งหมดโดยจะใช้จุดกึ่งกลางของขอบเขตแต่ละตัวแปรเป็นจุดศูนย์กลางและจะทำการทดลองทั้งหมดดังตารางที่ 4.12 โดยที่ ค่า -1 และ 1 คือขอบเขตล่างและขอบเขตบนของตัวแปรสัญลักษณ์ จากนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์การรับความดันสุญญากาศ และแรงกดในแนวแกนโดยวิธี FEM แล้ว จะได้ผลตอบสนองของค่าสัดส่วนความปลอดภัย ดังตารางที่ 4.13

4.3.1.1 Central Composite Design สำหรับความดันสุญญากาศ

จากตาราง 4.13 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ของความสามารถการรับความดันสุญญากาศ (Y_{vacuum}) กับตัวแปรสัญลักษณ์ของระยะห่างระหว่างลอน, รัศมีลอนและความลึกลอน ด้วยสมการลำดับขั้นที่สอง เป็น

$$Y_{vacuum} = 118.877 - 2.079x_1 + 1.389x_2 + 9.125x_3 - 0.417x_1^2 - 0.788x_2^2 - 3.192x_3^2 - 0.45x_1x_2 - 0.225x_1x_3 - 0.45x_2x_3 \quad (4.5)$$

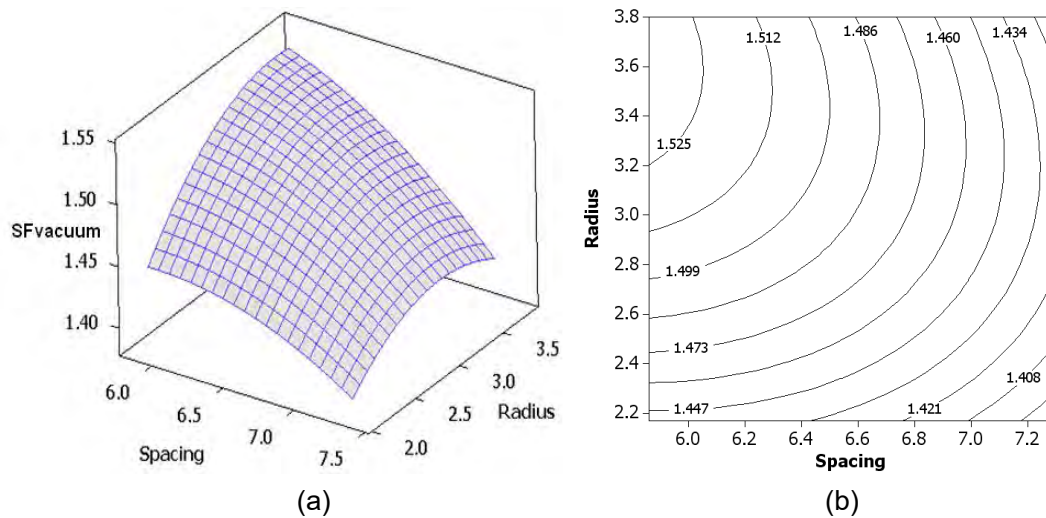
และสมการพื้นผิวของสัดส่วนความปลอดภัยภายใต้ความดันสุญญากาศเป็น

$$Y_{SF, vacuum} = 1.486 - 0.026x_1 + 0.017x_2 + 0.114x_3 - 0.005x_1^2 - 0.009x_2^2 - 0.039x_3^2 - 0.006x_1x_2 - 0.003x_1x_3 - 0.006x_2x_3 \quad (4.6)$$

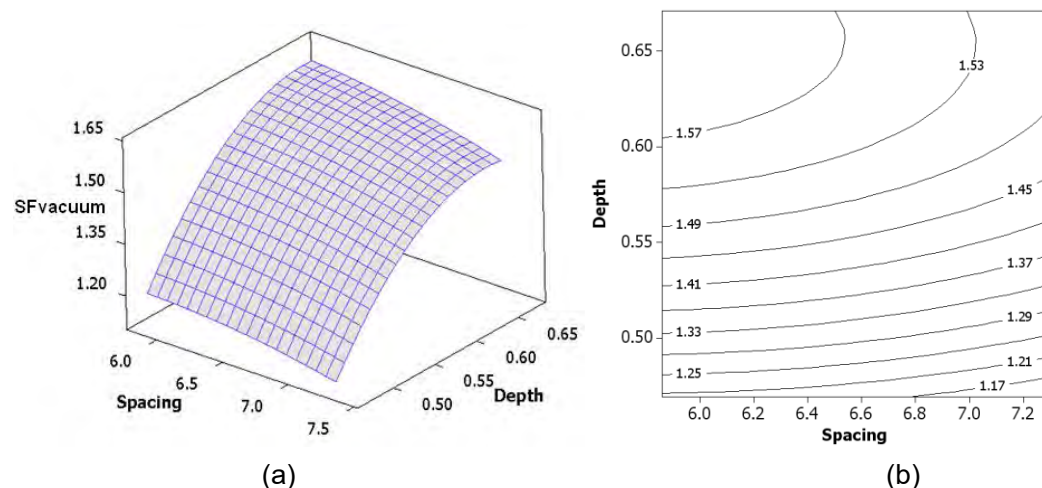
จากสมการข้างต้นสามารถสร้างผลตอบสนองของค่าความดันสุญญากาศได้ในลักษณะของพื้นผิวตอบสนองและแบบ Contour plot โดยสมการลำดับขั้นที่สองที่ใช้ในการวาดกราฟนั้นจะมีผลตอบสนองใกล้เคียงกับผลจริงมาก เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2 , Coefficient of determination) เท่ากับ 98.23% อธิบายได้ว่า ผลของความดันสุญญากาศที่ได้เป็นผลหรืออิทธิพลจากตัวแปร 98.23% ส่วนที่เหลืออีก 1.77% เป็นผลจากตัวแปรหรือปัจจัยอื่นที่ไม่ทราบได้ดังนั้นหากมีสมการมีค่า R^2 ยิ่งสูงเท่าใด ความแม่นยำของการนำสมการไปใช้เพื่อทำนายหรือคาดคะเนผลลัพธ์ย่อมมีสูงมากยิ่งขึ้นโดยทั่วไป สมการที่มักนำไปใช้ควรมีค่า R^2 อย่างน้อย 0.75 หากสูงกว่า 0.90 ถือว่าดีมากอย่างไรก็ตามค่า R^2 เป็นการประมาณความถูกต้องในการวาดกราฟที่เกินจริง จึงมักใช้ค่า R^2 -adjusted ในการวัดความถูกต้องในการวาดกราฟแทนเนื่องจากค่า R^2 จะอ่อนไหวต่อขนาดของกลุ่มตัวอย่างและจำนวนของตัวแปรซึ่งจะประมาณค่าสหสัมพันธ์พหุคูณของผลตอบสนองได้สูงเกินความเป็นจริงโดยทั่วไป R^2 -adjusted จะมีค่าต่ำกว่าค่า R^2 เล็กน้อย ซึ่งจากสมการที่ได้มีค่า 96.63% แสดงว่าสมการที่ใช้สำหรับสร้างพื้นผิวตอบสนองความดันสุญญากาศมีความน่าเชื่อถือสูงมาก และมีค่าความแตกต่างของ

ผลตอบสนอง (P-value) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.001 แสดงว่าสมการที่ได้มีความน่าเชื่อถือมาก สำหรับการนำมาวาดพื้นผิวตอบสนอง หาก P มีค่ามากกว่า 0.05 จะหมายถึงตัวแปรที่กำหนดไว้ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับข้อมูลดังกล่าวหรือค่า R^2 เท่ากับ 0 นั่นเอง

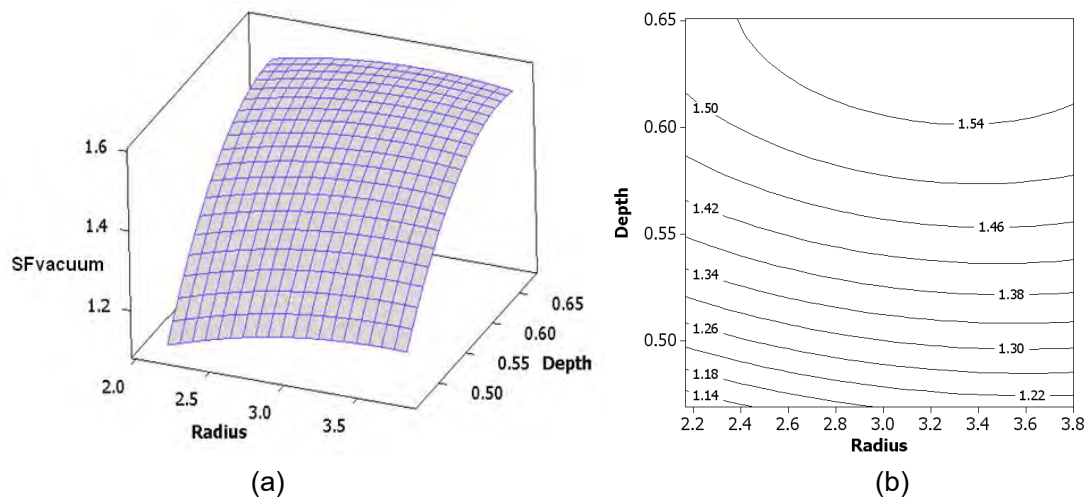
จากตัวแปรทั้งหมด 3 ตัวแปร สามารถแบ่งการวาดกราฟออกเป็น 3 กราฟ โดยมีความดันสุญญากาศเป็นแกนตั้งและมีคู่ตัวแปรในแกนตั้งฉากกับผลตอบสนอง โดยแบ่งออกเป็น ระยะห่างระหว่างลอนกับรัศมีลอน ระยะห่างระหว่างลอนกับความลึกลอน และ รัศมีลอนกับความลึกลอน แสดงดังรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงผลการตอบสนองอย่างละเอียดภายในขอบเขตที่ทดลอง



รูปที่ 4.6 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยความดันสุญญากาศ จากผล ของระยะห่างระหว่างลอนกับรัศมีลอนเมื่อให้ความลึกลอนคงที่ 0.57 มม.



รูปที่ 4.7 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยความดันสุญญากาศ จากผล ของระยะห่างระหว่างลอนกับความลึกลอนเมื่อให้รัศมีลอนคงที่ 2.985 มม.



รูปที่ 4.8 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยความดันสุญญากาศ จากผล ของรัศมีลอนกับความลึกลอนเมื่อให้ระยะห่างระหว่างลอนคงที่ 6.5 มม.

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างลอนและรัศมีลอนจะให้ผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากลักษณะความชันของพื้นผิวตอบสนอง หรือลักษณะการกระจายตัวของผลตอบสนองจาก Contour plot จะมีลักษณะค่อนข้างสมมาตรกันทั้งสองตัวแปร ซึ่งต่างจากรูปที่ 4.7-4.8 ที่ลักษณะของพื้นผิวตอบสนองจะมีความชันสูงจากการปรับเปลี่ยนความลึกลอน หรือลักษณะการกระจายตัวของผลตอบสนองจาก Contour plot จะมีแนวโน้มที่มากกว่าทั้งระยะห่างระหว่างลอนและรัศมีลอนตามลำดับ

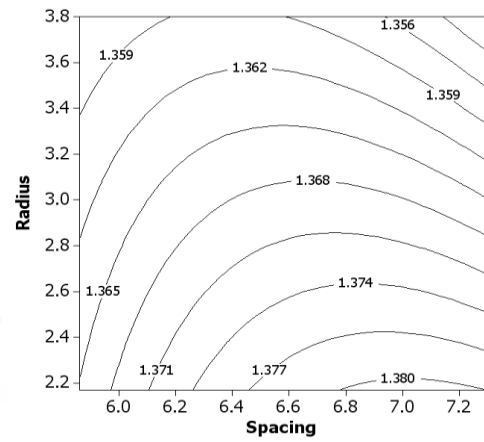
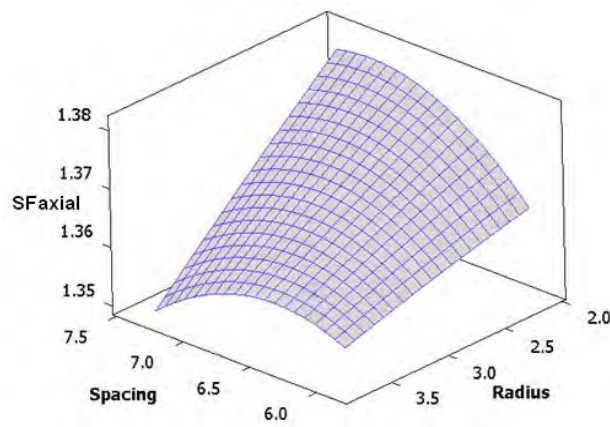
4.3.1.2 Central Composite Design สำหรับ แรงกดในแนวแกน

ในการทำนองเดียวกันเมื่อนำผลจากตาราง 4.13 มาสร้างสมการความสัมพันธ์ของความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกน (Y_{axial}) กับระยะห่างระหว่างลอนรัศมีลอน และความลึกลอน ด้วยสมการลำดับขั้นที่สองจะได้เป็น

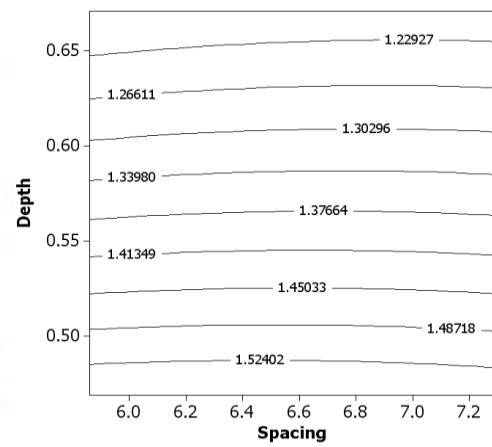
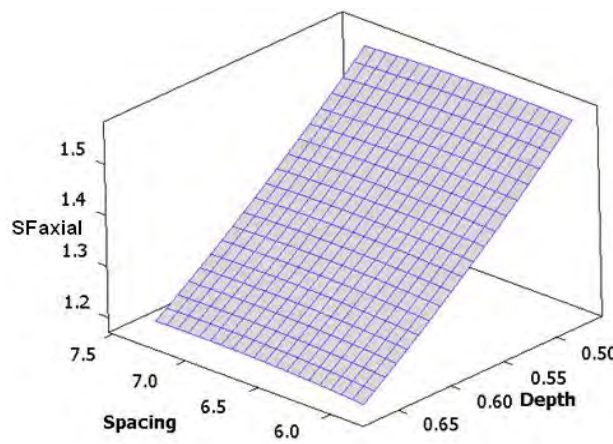
$$Y_{axial} = 11416.1 + 10.8x_1 - 47.9x_2 - 882x_3 - 16.9x_1^2 - 1.1x_2^2 + 40.2x_3^2 - 15.4x_1x_2 + 13.4x_1x_3 - 14.6x_2x_3 \quad (5.7)$$

และสมการพื้นผิวของสัดส่วนความปลอดภัยภายใต้แรงกดในแนวแกนเป็น

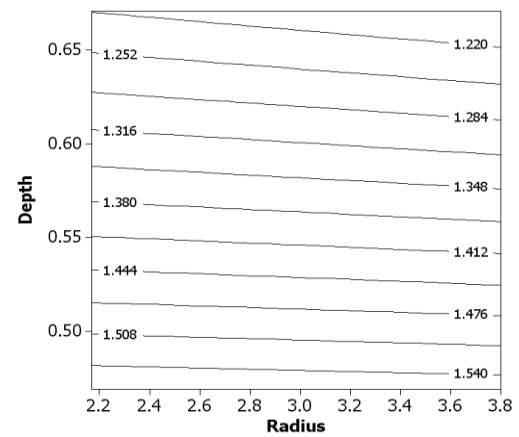
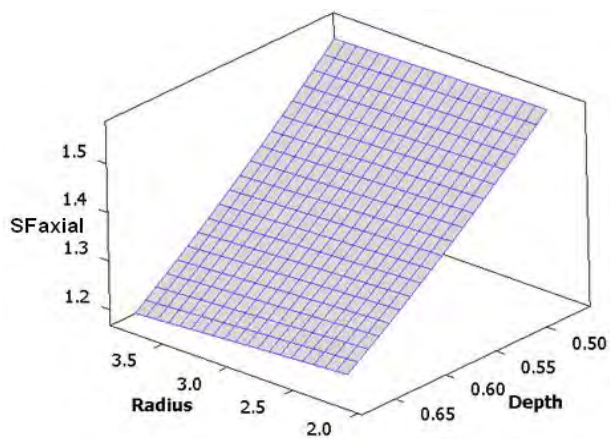
$$Y_{SF,axial} = 1.369 + 0.001x_1 - 0.006x_2 - 0.106x_3 - 0.002x_1^2 - 0.0001x_2^2 + 0.005x_3^2 - 0.002x_1x_2 + 0.002x_1x_3 - 0.002x_2x_3 \quad (4.8)$$



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.9 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยแรงกดในแนวแกนจาก
ผลของ (a) ระยะห่างระหว่างลอนกับรัศมีลอน (b) ระยะห่างระหว่างลอนกับความลึกลอน
(c) รัศมีลอนกับความลึกลอน

สำหรับสมการพื้นผิวแรงกดในแนวแกนมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 99.98% และมีค่า R^2 -adjusted คือ 96.63 % จึงมีความถูกต้องในการวาดพื้นผิวดตอบสนองสูง ส่วนค่าความแตกต่างของผลตอบสนอง (P-value) น้อยกว่า 0.001 เช่นเดียวกัน ทำให้แบบจำลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น และสามารถสร้างผลตอบสนองของแรงกดในแนวแกนเป็นพื้นผิวดตอบสนองและ Contour plot โดยแบ่งได้เป็น 3 คู่ตัวแปรเช่นเดียวกับที่ผ่านมา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

4.3.1.3 Optimizer

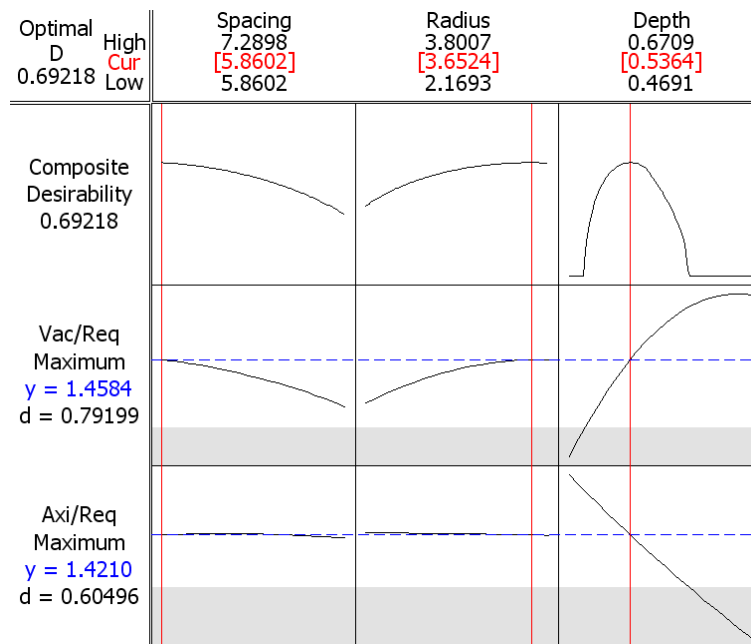
ดังที่กล่าวมาแล้ว ว่าเมื่อการออกแบบมีหลายปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง จะทำให้ไม่สามารถออกแบบให้ทุกผลตอบสนองนั้นมีผลออกมาดีที่สุด แต่สามารถออกแบบให้ทุกผลตอบสนองนั้นมีผลที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดย Optimizer คือตัวช่วยการออกแบบซึ่งจะมีหลักการคล้ายกับ Overlay contour plot แต่จะช่วยให้ออกแบบได้สะดวกขึ้นเมื่อมีตัวแปรและผลตอบสนองมากกว่า 2

สำหรับการออกแบบรูปแบบลอนที่ตัวกระป๋องจะใช้ฟังก์ชันค่าความพอใจ (d , Desirability) มาใช้ในการตัดสินใจผลตอบสนองที่ได้จากการออกแบบ โดยค่าความพอใจจะมีค่าในช่วง $0 \leq d \leq 1$ หากมีค่าผลตอบสนองที่ต้องการ (T) และผลตอบสนองขั้นต่ำ (L) และผลตอบสนอง y จะคำนวณค่าความพอใจได้ดังสมการ

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > T \end{cases} \quad (4.9)$$

เมื่อค่านำหนักการลู่เข้าของสมการ (r) มีค่าในช่วง $0 \leq r \leq 10$ หาก $r < 1$ จะให้ความสำคัญการลู่เข้าในช่วงแรก ซึ่งถ้าให้ $r = 1$ จะให้ผลการลู่เข้าเป็นแบบเชิงเส้น และถ้าให้ $r > 1$ จะให้ความสำคัญในช่วงสุดท้ายของการลู่เข้า

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าขอบเขตที่ใช้ในการออกแบบนั้นจะเป็นขอบเขตทั้งหมดจากกระบวนการ CCD เป็นค่าสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งจะมีกราฟของผลตอบสนองแยกพิจารณาในแต่ละตัวแปรและแต่ละผลตอบสนอง โดยจะมีการรวมผลของผลตอบสนองที่กราฟแฉกบน จึงสามารถพิจารณาและออกแบบขนาดของตัวแปรให้มีผลต่อผลตอบสนองรวมสูงที่สุด ซึ่งมีค่าความพอใจ (d) เท่ากับ 0.69218 เมื่อเลือกค่าขอบเขตของผลตอบสนองรวมที่สนใจที่ SF 1.3-1.5 และกำหนดค่านำหนักการลู่เข้าของสมการ (r) เท่ากับ 3 เนื่องจากมีความแม่นยำเหมาะสมสำหรับช่วงที่ลู่เข้าในสมการนี้ และมีค่าความสำคัญ (Importance) ของทั้งสองผลตอบสนองเท่ากับ 1 เนื่องจากมีความสำคัญเท่ากัน



รูปที่ 4.10 กราฟ Optimizer ที่รวมผลทุกตัวแปรและทุกผลตอบสนอง

จะเห็นว่าจากกราฟ 2 แก้วด้านล่างจะแสดงผลตอบสนองความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนแยกกัน ซึ่งแถวบนจะเป็นการรวมผลตอบสนองทั้งสองเข้าด้วยกันโดยจุดที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อรวมผลตอบสนอง (เส้นสีแดง) ได้แก่ที่ระยะห่างระหว่างลอน 5.86 มม.รัศมีลอน 3.65 มม. และความลึกลอน 0.54 มม. ซึ่งให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยที่ความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกน คือ 1.4584 และ 1.4210 ตามลำดับดังนั้นหากใช้จุดที่ออกแบบจาก Optimizer จะสามารถทำนายได้ว่ากระป๋องจะสามารถรับค่าความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนอยู่ที่ 116.7 kPa และ 11,849 N ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ออกแบบได้พบว่าได้สัดส่วนความปลอดภัยสูง แต่เมื่อคำนวณค่าในรากที่สองจากสมการที่ 2.7 จะได้ 35.59 ซึ่งมีค่าน้อย แสดงว่าเป็นแบบจำลองที่ยากแก่การผลิต เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างลอนที่น้อยมาก ในขณะที่มีรัศมีลอนขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาความสำคัญของตัวแปรระยะห่างระหว่างลอน จะเห็นว่าส่งผลต่อการรับความดันสุญญากาศมาก โดยระยะห่างระหว่างลอนน้อย จะทำให้กระป๋องสามารถรับความดันสุญญากาศได้ดีกว่า และส่งผลต่อการรับแรงกดในแนวแกนน้อยมาก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในกระบวนการผลิต จึงปรับปรุงกระบวนการออกแบบลอน โดยเลือกใช้ระยะห่างระหว่างลอนคงที่ค่าหนึ่ง ระยะนี้มีค่าน้อยแต่ไม่น้อยมากจนทำให้ไม่สามารถเพิ่มรัศมีลอนได้ ในที่นี้เลือกใช้ 6.5 มม. แล้วจึงออกแบบลอนด้วยวิธี CCD โดยพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อการกำหนดขอบเขตเพียง 2 ตัวแปร คือรัศมีลอนและความลึกลอน

4.3.2 Central Composite Design 2 ตัวแปร

สำหรับกระบวนการ CCD 2 ตัวแปร ซึ่งมีตัวแปรที่ต้องการปรับเปลี่ยนสองตัวแปรคือ รัศมีลอนและความลึกลอนโดยกำหนดขอบเขตการปรับเปลี่ยนรัศมีลอนระหว่าง 2.5 และ 3.47 มม. และความลึกลอน 0.51-0.63 มม. ส่วนจำนวนลอนและระยะห่างระหว่างลอนนั้นคงที่ที่ 17 ลอน และ 6.5 มม.ตามลำดับเมื่อตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ลดลงทำให้จำนวนครั้งในการวิเคราะห์ด้วย FEM น้อยลงตามไปด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์การรับความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนด้วย CCD 2 ตัวแปร

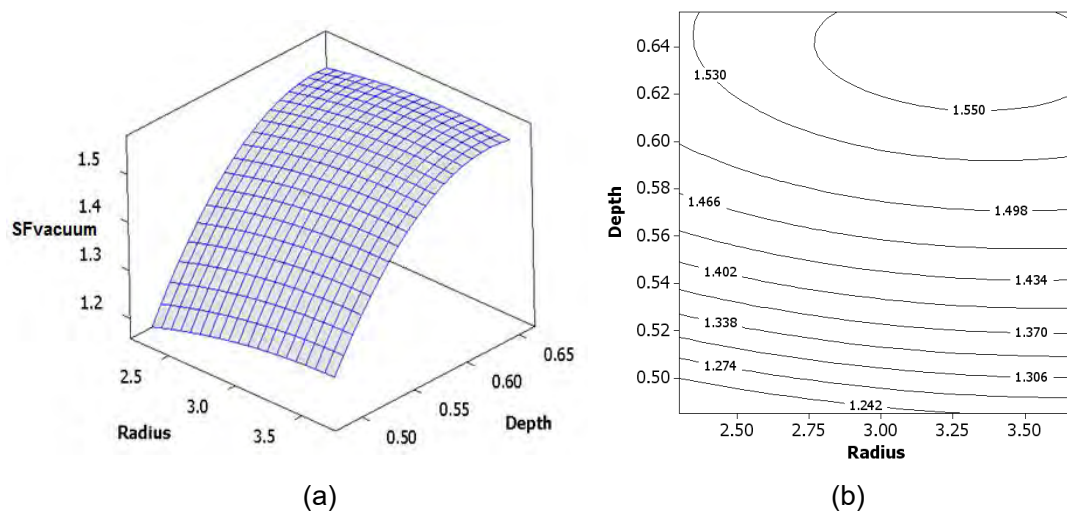
Analysis point	Coded variables		Natural variables		Dependent variables			
	Radius	Depth	Radius (mm)	Depth (mm)	Y_{vacuum} (kPa)	$Y_{SF,vacuum}$	Y_{axial} (N)	$Y_{SF,axial}$
1	-1	-1	2.5	0.51	102.6	1.283	12,357	1.482
2	1	1	3.47	0.51	107.3	1.341	12,269	1.471
3	-1	-1	2.5	0.63	121.2	1.515	10,584	1.269
4	1	1	3.47	0.63	124.1	1.551	10,492	1.258
5	-1.414	0	2.299	0.57	117.7	1.471	11,470	1.376
6	1.414	0	3.671	0.57	119.5	1.494	11,333	1.359
7	0	-1.414	2.985	0.485	98.8	1.235	12,729	1.527
8	0	1.414	2.985	0.655	125.4	1.568	10,233	1.227
9	0	0	2.985	0.57	119.1	1.489	11,412	1.369
10	0	0	2.985	0.57	119.1	1.489	11,412	1.369
11	0	0	2.985	0.57	119.1	1.489	11,412	1.369
12	0	0	2.985	0.57	119.1	1.489	11,412	1.369
13	0	0	2.985	0.57	119.1	1.489	11,412	1.369

4.3.2.1 Central Composite Design สำหรับ ความดันสุญญากาศ

จากตาราง 4.14 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปแบบของสัดส่วนความปลอดภัยในการรับความดันสุญญากาศ ($Y_{SF,vacuum2}$) กับรัศมีลอน และความลึกลอน ด้วยสมการลำดับขั้นที่สอง เป็น

$$Y_{SF,vacuum2} = 1.489 + 0.016x_1 + 0.114x_2 - 0.008x_1^2 - 0.049x_2^2 - 0.006x_1x_2 \quad (4.10)$$

สมการกำลังสองที่ได้นี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 98.92% และค่า R^2 -adjusted คือ 98.14% ในขณะที่ค่า (P-value) ยังคงมีค่าน้อยกว่า 0.0001 จึงถือได้ว่าสมการที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถืออย่างมาก ผลตอบสนองของสัดส่วนความปลอดภัยในการรับความดันสุญญากาศมีลักษณะดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงผลการตอบสนองการปรับพารามิเตอร์ระหว่างรัศมีลอนและความลึกลอนอย่างละเอียดภายในขอบเขตที่ทดลอง โดยความต้านทานความดันสุญญากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความลึกลอนในขณะที่เพิ่มรัศมี จนกระทั่งความลึกลอนอยู่ในช่วง 0.62 - 0.64 มม. และรัศมีลอนอยู่ในช่วง 3.0 - 3.5 มม. จะเป็นช่วงที่ทำให้เกิดค่าความต้านทานความดันสุญญากาศของกระป๋องสูงที่สุดซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับนำไปออกแบบหากต้องการให้ค่าความดันสุญญากาศมีค่าสูงในช่วงการทดลองนี้



รูปที่ 4.11 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยความดันสุญญากาศจากผลของรัศมีลอนกับความลึกลอน

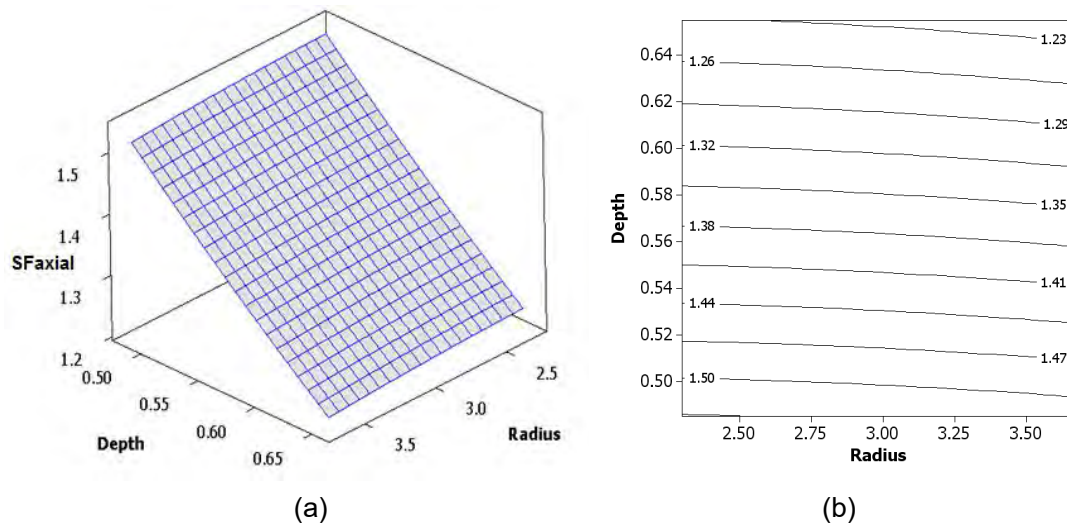
4.3.2.2 Central Composite Design สำหรับ แรงกดในแนวแกน

ในทำนองเดียวกันจากผลของสัดส่วนความปลอดภัยในการรับแรงกดในแนวแกน ($Y_{SF,axial2}$) ตาราง 4.14 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ กับรัศมีลอน และความลึกลอน ด้วยสมการลำดับขั้นที่สองได้เป็น

$$Y_{SF,axial2} = 1.369 - 0.006x_1 - 0.106x_2 - 0.001x_1^2 + 0.004x_2^2 - 0.0001x_1x_2 \quad (4.11)$$

โดยสมการพื้นผิวตอบสนองนี้ แรงกดในแนวแกนมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจเท่ากับ 99.99 % และมีค่า R^2 -adjusted คือ 99.98% และมีค่า P-value น้อยกว่า 0.001 แสดงถึงความน่าเชื่อถือของกลุ่มข้อมูล ผลตอบสนองของสัดส่วนความปลอดภัยในการรับแรงกดในแนวแกนแสดงได้ดังรูปที่ 4.12

จะเห็นว่ากราฟที่ได้นั้นมีลักษณะค่อนข้างเป็นแผ่นเรียบและค่อนข้างชันในทิศทางการปรับเปลี่ยนความลึกกลอนคล้ายกับพื้นผิวที่ได้จากการทดลอง 3 ตัวแปร เนื่องจากผลของการปรับเปลี่ยนความลึกกลอนมีผลกระทบมากกว่ารัศมีกลอนมากดังเช่นผลการทดลองจาก Two-level factorial design และแนวโน้มของแรงกดในแนวแกนจะยังคงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปรับความลึกกลอนให้มากยิ่งขึ้นเนื่องจากขอบเขตที่ทำการทดลองนั้นไม่ได้อยู่ในช่วงที่ให้ค่าผลตอบแทนสูงที่สุด



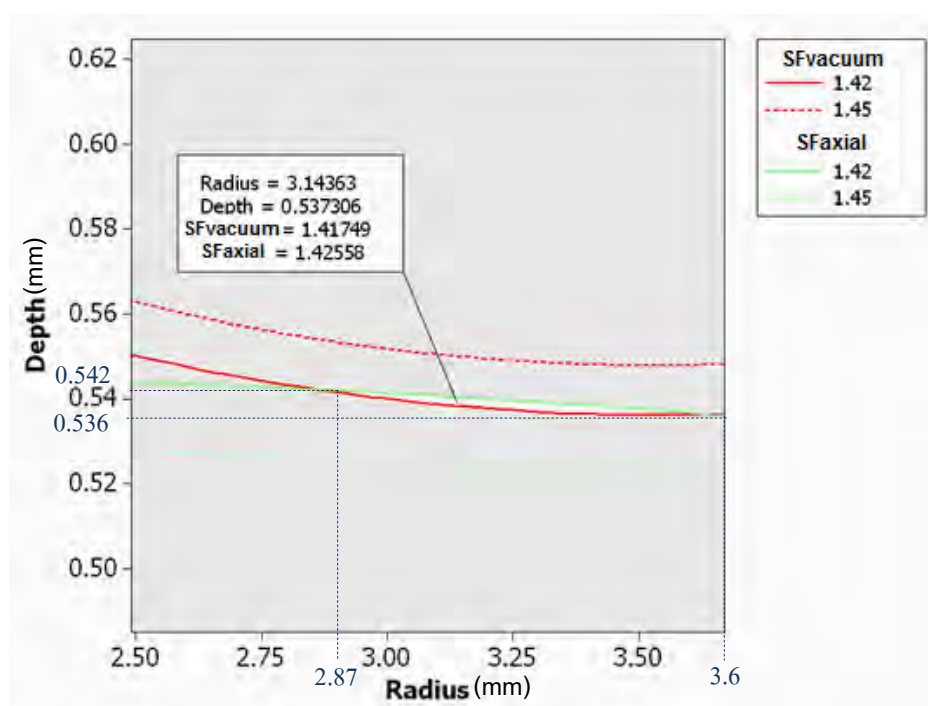
รูปที่ 4.12 พื้นผิวดอกเบี้ยและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยแรงกดในแนวแกน จากผลของรัศมีกลอนกับความลึกกลอน

4.3.2.3 ผลรวมการวิเคราะห์ระหว่างความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกน

ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดจำเป็นต้องพิจารณาผลตอบแทนทั้งสองไปพร้อม ๆ กัน สำหรับการวิเคราะห์ 2 ตัวแปรจะสามารถสังเกตผลตอบแทนที่ได้โดยอาศัยการวาดกราฟของทั้งสองเงื่อนไขที่ต้องการลงใน Contour plot เดียวกันเรียกว่า Overlay contour plot ซึ่งนิยมใช้เมื่อมีตัวแปรที่สนใจเพียง 2 ตัวแปร หากจำนวนตัวแปรมากกว่านี้จะนิยมใช้ Optimizer ในการหา Desirability ดังแสดงในหัวข้อ 4.3.1.3 สำหรับการออกแบบนี้จะใช้ทั้ง 2 วิธี เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบผลการออกแบบที่ได้ทั้งสองกรณี

Overlay contour plot คือการนำผลตอบแทนมารวมกันภายในขอบเขตของตัวแปรเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบและออกแบบให้ได้ผลตอบแทนตามที่ต้องการโดยส่วนมากนั้นจะเน้นในส่วนที่ให้ผลตอบแทนสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ของทุก ๆ ตัวแปรโดยการกำหนดขอบเขตของผลตอบแทนที่ต้องการของแต่ละผลตอบแทน ซึ่งการกำหนดนั้นจะต้องให้ผลตอบแทนอยู่ในขอบเขตที่กำหนดเพื่อให้เกิดการทับกันของพื้นที่ผลตอบแทนที่ต้องการซึ่งเมื่อใช้ผลจากการเปรียบเทียบสัดส่วนความปลอดภัย ทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่ให้ผลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทั้งสองผลตอบแทน โดยเมื่อให้กำหนดผลตอบแทนของทั้งสองกรณีนั้นมีค่าใกล้เคียงกันก็จะได้พื้นที่ที่แสดงส่วนที่ให้ผลตอบแทนมีค่าสูงใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงที่กำหนดของทั้งสองกรณี ดัง

แสดงในรูปที่ 4.13 หากกำหนดค่าขอบเขตที่สนใจของผลตอบสนองในช่วง 1.42 -1.45 จะเห็นว่าช่วงขอบเขตความลึกกลอนระหว่าง 0.536 และ 0.452 มม. และ รัศมีกลอนระหว่าง 2.87 และ 3.60 มม. ที่ให้ค่าผลตอบสนองทั้งสองเป็นไปตามเงื่อนไข และสามารถทราบตำแหน่งที่ให้ผลตอบสนองสูงที่สุดทั้งสองกรณี โดยจะเห็นว่าแบบจำลองสุดท้ายที่ออกแบบจาก Overlay contour plot นั้น จะได้ค่ารัศมีกลอนที่ 3.14 มม. และความลึกกลอนที่ 0.537 มม. ซึ่งสามารถให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยในการรับความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนประมาณ 1.417 และ 1.425 หรืออาจกล่าวได้ว่าสามารถทำนายได้ว่ากระป๋องจะสามารถรับค่าความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนอยู่ที่ 114.2 kPa และ 11,877 N ตามลำดับ

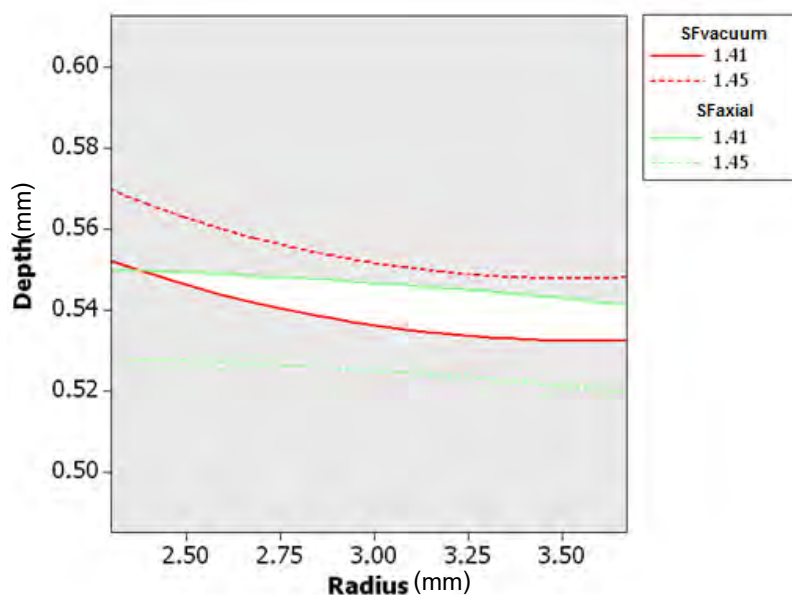


รูปที่ 4.13 Overlay contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัย 1.42 – 1.45

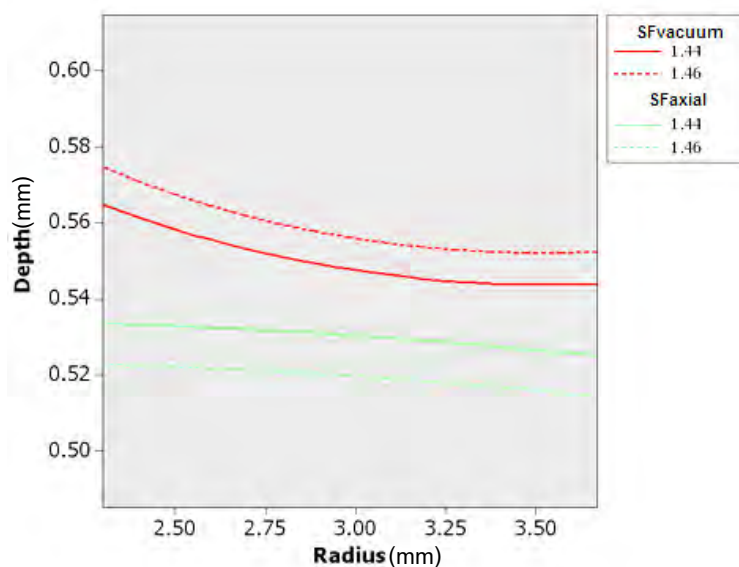
หากกำหนดสัดส่วนความปลอดภัยที่ต้องการต่ำลงทั้งสองกรณี ช่วงขอบเขตของตัวแปรความลึกกลอนและรัศมีกลอนที่เป็นไปได้จะกว้างขึ้น เช่นหากขอบเขตความสนใจของสัดส่วนความปลอดภัยในช่วง 1.41 – 1.45 จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าพื้นที่ที่ใช้ในการออกแบบได้กว้างยิ่งขึ้น (รัศมีกลอน 2.3 – 3.8 มม. และความลึกกลอน 0.53 – 0.55 มม.) แต่จะทำให้การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดยากขึ้น

ในทางตรงข้าม หากกำหนดขอบเขตของสัดส่วนความปลอดภัยที่ต้องการมีค่าสูงขึ้นทั้งสองกรณี โดยกำหนดให้ขอบเขตความปลอดภัยที่สนใจอยู่ในช่วง 1.44 – 1.46 ดังรูปที่ 4.15 จะทำให้ไม่สามารถหาช่วงสัดส่วนความปลอดภัยที่เป็นไปได้ทั้งสองกรณีได้

ดังนั้นการเลือกใช้ค่าขอบเขตที่สนใจให้สามารถอยู่ในช่วงของผลตอบสนองทั้งสองกรณี จำเป็นต้องกำหนดขอบเขตให้เหมาะสม เพื่อให้การวิเคราะห์และการออกแบบมีประสิทธิภาพสูงสุด



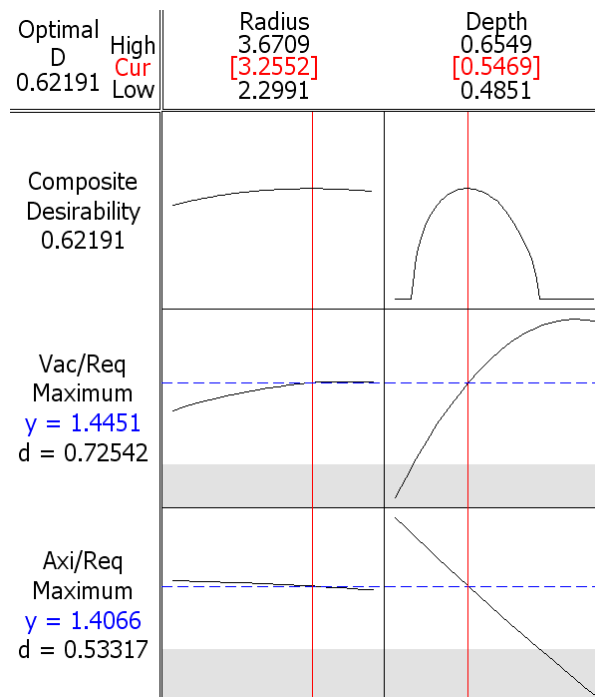
รูปที่ 4.14 Overlay contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัย 1.41 – 1.45



รูปที่ 4.15 Overlay contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัย 1.44 – 1.46

เมื่อทดลองนำผลที่ได้จากตารางที่ 4.14 มาออกแบบโดยใช้ Optimizer โดยเลือกค่าขอบเขตของผลตอบสนองรวมที่สนใจที่ SF 1.3 - 1.5 และกำหนดค่าน้ำหนักการลู่เข้าของสมการเท่ากับ 3 และมีค่าความสำคัญ (Importance) เท่ากับ 1

จากผลดังแสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าค่าที่ออกแบบได้อยู่ในขอบเขตของกระบวนการ CCD โดยเมื่อรวมผลของผลตอบสนองที่แฉกบน จะได้ค่าของตัวแปรที่สามารถให้ผลตอบสนองรวมทั้งสองกรณีสูงสุดโดยสังเกตจากเส้นสีแดง โดยมีค่าความพอใจเท่ากับ 0.62191 เมื่อรัศมีลอน 3.26 มม. และความลึกลอน 0.55 มม. ซึ่งให้สัดส่วนความปลอดภัยในการรับความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนคือ 1.4451 และ 1.4066 ตามลำดับและสามารถทำนายได้ว่ากระป๋องจะสามารถรับค่าความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนอยู่ที่ 115.6 kPa และ 11,729 N



รูปที่ 4.16 กราฟ Optimizer ที่รวมผลทุกตัวแปรและทุกผลตอบสนอง

จะเห็นว่าการใช้ Optimizer จะเป็นการคำนวณที่ให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยของสองกรณีแตกต่างกันพอสมควร เนื่องจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดขึ้นกับการคำนวณค่าความพอใจสูงสุด ทำให้มีความคลาดเคลื่อนได้เล็กน้อย ในขณะที่การใช้ Overlay contour plot ผู้ออกแบบสามารถเลือกจุดที่เหมาะสมได้ด้วยตนเอง จึงทำให้เลือกจุดที่เหมาะสมได้โดยละเอียด อย่างไรก็ตาม ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การใช้ Overlay contour plot เหมาะสำหรับในกรณีที่มีตัวแปร 2 ตัว และจะค่อนข้างยุ่งยากเมื่อมีจำนวนตัวแปรมากกว่าสอง

เมื่อเปรียบเทียบผลจาก Optimizer ระหว่าง CCD 3 และ CCD 2 จะเห็นว่า แบบจำลองที่ออกแบบโดย CCD 3 เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด แต่จากข้อจำกัดและความยากในการผลิต จึงใช้แบบจำลองจาก CCD 2

4.4 การลดวัสดุในการผลิตกระป๋อง

ผลจากการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้นซึ่งมีผลจาก Overlay contour plot และ Optimizer ซึ่งได้ผลออกมาใกล้เคียงกันมากทั้งผลตอบสนองและสัดส่วนของแบบจำลองที่ได้ จึงเลือกแบบจำลองมาคำนวณเพื่อลดความหนา เนื่องจากมีค่าสัดส่วนความปลอดภัยของทั้งสองผลตอบสนองใกล้เคียงกัน คือมีค่าสัดส่วนความปลอดภัยของความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกน 1.417 และ 1.425 จาก Overlay contour plot รูปแบบที่ได้มีค่าระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน และความลึกลอนเท่ากับ 6.5 มม. , 3.14 มม. และ 0.537 มม. ตามลำดับ

เมื่อนำค่าความชันระหว่างสัดส่วนความปลอดภัยในการรับแรงกับความหนาของกระป๋องที่ได้จากกราฟรูปที่ 3.8 มาคำนวณหาสัดส่วนความปลอดภัยของกระป๋องที่มีรูปแบบลอนใหม่ที่มีความหนากระป๋องแตกต่างกันจะได้ผลดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลของค่าความปลอดภัยและน้ำหนักวัสดุจากการลดความหนาของกระป๋อง

Can thickness (mm)	SF Vacuum		SF Axial		Weight (g)	Weight difference
	Predicted	FE	Predicted	FE		
0.25	1.417	1.416	1.425	1.424	174.17	-
0.24	1.330	1.329	1.290	1.316	167.20	-3.99 %
0.23	1.240	1.245	1.160	1.202	160.24	-7.99 %
0.22	1.160	1.145	1.010	1.103	153.27	-12.00 %

โดยลดความหนาของกระป๋องลงครึ่งละ 0.01 มม. ซึ่งผลที่ได้คือเมื่อลดความหนาลงเหลือ 0.24 มม. จะทำให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยของความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนคือ 1.33 และ 1.29 ตามลำดับซึ่งมากกว่าค่าความปลอดภัยที่ต้องการคือ 1.25 และสามารถลดการใช้วัสดุลงได้ 3.99 % เมื่อความหนาของกระป๋องเท่ากับ 0.23 มม. ค่าสัดส่วนความปลอดภัยทั้งสองจะมีค่า 1.24 และ 1.16 ตามลำดับ ซึ่งยังสามารถใช้งานได้ และลดการใช้วัสดุลงได้ถึง 7.99 % และหากลดความหนาต่อไปที่ 0.22 มม. จะเห็นว่าค่าสัดส่วนความปลอดภัยของจะมีค่า 1.16 และ 1.01 ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดการใช้วัสดุลงได้มากถึง 12 % แต่มีสัดส่วนค่าปลอดภัยต่ำ ผู้ผลิตจึงสามารถเลือกใช้ความหนาของกระป๋องบรรจุอาหารที่ต้องการขึ้นอยู่กับค่าความปลอดภัยที่ยอมรับได้ในการผลิต

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับกระป๋องบรรจุอาหาร 603x700 ชนิดลอนเต็ม เมื่อได้รับภาระต่าง ๆ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการทดสอบ ทำให้ทราบถึงลักษณะและพฤติกรรมของกระป๋องบรรจุอาหารที่เกิดขึ้นและสามารถออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกน รวมถึงสามารถกำหนดขอบเขตของตัวแปรสำหรับสร้างสมการพื้นผิวตอบสนองที่เหมาะสมในการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ในบทนี้จะนำเสนอสรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้และข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระป๋องบรรจุอาหารต่อไป

5.1 สรุปผลการทดสอบกระป๋องและการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการทดสอบในการรับภาระสุญญากาศพบว่าในช่วงแรก que เพิ่มความดันทำให้ฝาด้านบนและด้านล่างของกระป๋องจะเกิดการยุบตัวเข้าไปก่อน ซึ่งการเสียรูปนี้เป็นการเสียรูปแบบถาวร แต่กระป๋องยังสามารถรับแรงดันที่เพิ่มขึ้นได้ จนตัวกระป๋องเกิดการโก่งเตาะและเสียรูปซึ่งมีลักษณะเป็นรอยบุบย่น 4 ลอนรอบแนวเส้นรอบวงที่ตัวกระป๋อง จากการทดสอบพบว่ากระป๋องรุ่น A ที่มีลักษณะลอนกระป๋องแบบครึ่งลอนมีความสามารถในการรับภาระสุญญากาศมากที่สุด ผลการวิเคราะห์ภาระโก่งเตาะแบบสถิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความดันสุญญากาศก่อนการเสียรูปแบบโก่งเตาะ พบว่าลักษณะการยุบตัวของฝาด้านบนและด้านล่างสอดคล้องกับการทดสอบ และที่ตัวกระป๋องมีลักษณะเหมือนเดิมไม่เกิดการเสียรูปแบบถาวร โดยระยะยุบตัวมากที่สุดที่จุดกึ่งกลางของฝาด้านบน ผลการวิเคราะห์ภาระโก่งเตาะแบบสถิตศาสตร์เนื่องจากความดันสุญญากาศ พบว่ามีรูปร่างการเสียหายและค่าความสามารถในการรับภาระสุญญากาศที่กระป๋องรับได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ดังรูปที่ 4 โดยค่าที่ได้มีความแตกต่างกันมากที่สุด 2.93 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดสอบในการรับภาระความดันภายในพบว่าในช่วงแรก que เพิ่มความดันฝาด้านบนและด้านล่างของกระป๋องจะเกิดการโป่งตัวออกไปก่อน ซึ่งการเปลี่ยนรูปนี้เป็นการเสียรูปแบบถาวร แต่กระป๋องยังสามารถรับแรงดันที่เพิ่มขึ้นได้ จนฝาด้านบนเกิดการโก่งเตาะและเสียรูปมีลักษณะเป็นรอยบุบเป็นกลีบบริเวณลอนแรกถึงลอนที่สามนับจากขอบของฝาด้านบน ในขณะที่ตัวกระป๋องไม่เกิดความเสียหาย ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ภาระความดันภายในก่อนการเสียรูปแบบโก่งเตาะ พบว่าฝาด้านบนมีความโค้งออกจากตัวกระป๋องสอดคล้องกับการทดสอบ และมีระยะโป่งตัวออกของฝาด้านบนมากที่สุดที่จุดกึ่งกลางของฝาด้านบน โดยมีค่าความแตกต่าง 13.4 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขการจับยึดในการวิเคราะห์วิจัยครั้งนี้ได้ใช้การจับยึดแบบแน่นที่ด้านบนขอบตะเข็บของฝาด้านบน แต่จากการทดสอบพบว่าการเคลื่อนที่ที่น้อยมากของตะเข็บที่ขอบฝาด้านบน จึงได้กำหนดเงื่อนไข

การจับยึดแบบแน่นใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ และในการวิเคราะห์หาภาระโก่งเดาะจากแรงดันภายในโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการวิเคราะห์แบบพลวัต พบว่าเกิดความเสียหายสอดคล้องกับผลการทดสอบ และค่าความสามารถในการรับภาระความดันภายในของกระป๋องใกล้เคียงกันมีความแตกต่างกัน 4 เปอร์เซนต์

ผลการทดสอบการรับแรงในแนวแกนพบว่ารูปร่างความเสียหายของกระป๋อง มีความแตกต่างกันคือกระป๋องรุ่น A จะเกิดการโก่งเดาะที่ผนังกระป๋อง และเกิดรอยบยุบขึ้นเป็นลอนคลื่นตามแนวเส้นรอบวงจำนวน 7 ลอน การโก่งเดาะจะเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางรอยต่อระหว่างลอนด้านบนกับลอนด้านล่างของกระป๋อง ส่วนกระป๋องรุ่น B ที่มีลักษณะลอนกระป๋องแบบลอนเต็มโดยมีลอนกระจายไปเต็มลำตัวกระป๋อง จะเกิดการโก่งเดาะที่ผนังกระป๋องบริเวณลอนที่ 5 ถึงลอนที่ 8 ของลำตัวกระป๋อง และเกิดรอยบยุบขึ้นเป็นลอนคลื่นตามแนวเส้นรอบวงจำนวน 7 ลอน ดังรูปที่ 5 โดยกระป๋องรุ่น A มีค่าความสามารถในการรับแรงในแนวแกนสูงกว่า เนื่องจากกระป๋องรุ่น A ที่ลำตัวกระป๋องมีแผ่นเปลือกบางแบบเรียบอยู่กึ่งกลางระหว่างลอนบนและลอนล่างของกระป๋องแตกต่างกับกระป๋องรุ่น B และมีความหนาวัสดุมากกว่า

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองภายใต้แรงกดในแนวแกน ด้วยวิธีพลวัต (Explicit dynamics) เพื่อจำลองผลต่อความเสียหายของกระป๋อง เมื่อมีการเคลื่อนที่ของแผ่นระนาบกดกระป๋องในแนวตั้งซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงระยะกดตามเวลา พบว่าผลการวิเคราะห์และพฤติกรรมของแบบจำลองภายใต้แรงกดในแนวแกนสอดคล้องกับการทดสอบและให้ผลแรงกดในแนวแกนที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงโดยมีความแตกต่างเพียง 6.27% แต่เนื่องจากการวิเคราะห์แบบพลวัตนั้นเสียเวลามาก และในการคำนวณพื้นผิวตอบสนองจะต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องปรับปรุงการคำนวณโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี Riks เนื่องจากการวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ที่สามารถวิเคราะห์ผลช่วงหลังจากการเกิดการโก่งเดาะได้ สามารถวิเคราะห์ลดเวลาในการวิเคราะห์หลังได้ ซึ่งใช้เวลาในการวิเคราะห์เพียง 1-2 ชั่วโมงต่อ 1 กรณี ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Riks ให้ผลของพฤติกรรมความเสียหายใกล้เคียงกับการทดสอบ และให้ผลของแรงกดในแนวแกนต่างจากการทดสอบ 5.89% จึงใช้วิธีนี้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนในงานวิจัยนี้

5.2 สรุปผลการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

การใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองในการปรับเปลี่ยนลอนกระป๋องเริ่มจากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรลอนกระป๋อง 4 ตัวแปร คือ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน ความลึกลอน และจำนวนลอน ซึ่งเป็นตัวแปรที่จะทำให้ลักษณะรูปร่างของลอนที่ตัวกระป๋องนั้นเปลี่ยนไป โดยใช้ Two-level factorial design พบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อผลตอบสนองทั้งความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนได้แก่ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน และความลึกลอนซึ่งตัวแปรที่มีผลกระทบมากที่สุดคือความลึกลอน เนื่องจากการปรับเปลี่ยนความลึกลอนจะส่งผลต่อความแข็งแรงของกระป๋องมาก หากความลึกลอนมากจะทำให้สามารถรับความดันสูญญากาศ

ได้มากแต่จะรับแรงกดในแนวแกนได้ลดลง และในทางกลับกันหากความลึกลอนมีค่าน้อย จะทำให้ความสามารถการรับความดันสูญญากาศลดลง แต่จะเพิ่มความสามารถการรับแรงกดในแนวแกนมากขึ้น ในขณะที่จำนวนลอนนั้นมีความสำคัญน้อยมากต่อผลตอบสนองเนื่องจากไม่มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของลอน จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรที่สำคัญที่ควรนำมาทำการวิจัย สำหรับการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องนั้นมี 3 ตัวแปรคือ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน และความลึกลอน

เมื่อผ่านขั้นตอนการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อผลตอบสนองจาก Two-level factorial design แล้ว ก่อนที่จะสร้างพื้นผิวตอบสนองจำเป็นต้องกำหนดขอบเขตที่ครอบคลุมและใกล้เคียงจุดที่จะให้ผลตอบสนองสูงที่สุดโดยใช้วิธี Steepest ascent ทำให้ทราบถึงตำแหน่งขอบเขตของตัวแปรที่จะส่งผลให้ได้ผลตอบสนองสูงที่สุด แต่ผลตอบสนองนั้นมีทั้งความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนซึ่งจากกระบวนการ Steepest ascent นั้นตำแหน่งที่จะให้ผลตอบสนองสูงที่สุดจะได้ขอบเขตของตัวแปรไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน เป็นผลให้การกำหนดขอบเขตของตัวแปรนั้นไม่สามารถที่จะได้ผลตอบสนองสูงที่สุดทั้งหมด ดังนั้นการกำหนดขอบเขตของตัวแปรจึงนำค่าความสามารถในการรับแรงที่ต้องการของแต่ละผลตอบสนองเข้ามาช่วยในการตัดสินใจ และสามารถกำหนดขอบเขตได้เหมาะสมที่สุดจากค่าสัดส่วนความปลอดภัยไม่น้อยกว่า 1.25 เพื่อให้ได้ขอบเขตที่ทำให้สร้างพื้นผิวตอบสนองอยู่ในขอบเขตที่ทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งสองกรณีซึ่งขอบเขตของตัวแปรที่สามารถกำหนดได้คือ รัศมีลอนและความลึกลอน อยู่ที่ 2.50 – 3.47 มม. และ 0.51 – 0.63 มม. ตามลำดับ ส่วนระยะห่างระหว่างลอน จะมีผลตอบสนองที่สูงขึ้นทั้งสองกรณีเมื่อปรับให้มีระยะห่างระหว่างลอนลดลง แต่หากระยะห่างระหว่างลอนมีค่าน้อยเกินข้อจำกัดในการออกแบบ จะไม่สามารถสร้างแบบจำลองได้จึงกำหนดช่วงของระยะห่างระหว่างลอนที่ 6.15 – 7.00 มม.

จากการศึกษาการสร้างพื้นผิวตอบสนองจาก Central composite design พบว่าพื้นผิวตอบสนองจากสมการกำลังสองนั้นจะมีการสร้างพื้นผิวตอบสนองได้ใกล้เคียงกับผลจริง โดยตรวจสอบจากค่า R^2 และ P-value ของผลตอบสนองที่ได้ พื้นผิวตอบสนองของความดันสูญญากาศมีลักษณะเป็นพื้นผิวโค้งตามผลกระทบของความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามตัวแปร ส่วนพื้นผิวตอบสนองของแรงกดในแนวแกนนั้นมีลักษณะเป็นระนาบเอียง เนื่องจากผลกระทบของความลึกลอนมีค่าสูงกว่าผลกระทบจากตัวแปรอื่นมาก และผลจากความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามไม่ชัดเจน โดยผลตอบสนองของทั้งความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนจะมีลักษณะแปรผกผันกันเมื่อปรับเปลี่ยนรัศมีลอนและความลึกลอน ซึ่งเมื่อนำผลตอบสนองมารวมกันจากทั้งวิธีการ Overlay contour plot และจาก Optimizer นั้นก็สามารถออกแบบลอนกระป๋องให้มีผลตอบสนองที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่สุดได้ใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลองสุดท้ายที่ได้นั้นสามารถให้ผลตอบสนองทั้งสองชนิดให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยได้สูงถึงประมาณ 1.42

ส่วนสุดท้ายสำหรับงานวิจัยนี้คือการออกแบบและลดการใช้วัสดุในการผลิตกระป๋องบรรจุอาหาร พบว่าเมื่อใช้แบบจำลองที่ทำการออกแบบจาก RSM ทำการลดความหนาของตัวกระป๋องลงครึ่งละ 0.01 มม. ผลที่ได้คือหากลดความหนาจาก 0.25 มม. ไปที่ 0.22 มม. แบบจำลองที่ได้สามารถใช้งานได้ และสามารถลดการใช้วัสดุลงได้สูงสุดถึง 12 %

5.3 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมช่วงลอนของตัวกระป๋องภายใต้ภาระแรงเพียงความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนเท่านั้นเนื่องจากต้องการศึกษาความเสียหายและออกแบบอย่างละเอียดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง ในส่วนลอนที่ตัวกระป๋องเท่านั้น โดยการเสียหายของกระป๋องยังสามารถเกิดจากความดันภายในในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความเสียหายที่ฝากระป๋อง การออกแบบรูปแบบลอนที่ฝากระป๋องที่เหมาะสม จะทำให้สามารถลดวัสดุในการผลิตกระป๋องลงได้อีก อีกทั้งยังมีกระบวนการประกอบฝากระป๋องโดยการขึ้นตะเข็บทั้งด้านบนและล่างซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อกระป๋องอีกด้วย

แรงกดในแนวแกนสำหรับงานวิจัยนี้วิเคราะห์เฉพาะแรงกดในแนวตั้งอย่างเดียวเนื่องจากเป็นภาระหลักที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการขนย้ายและเก็บกระป๋อง ในการขนย้ายจริงอาจจะมีแรงกดที่ไม่เป็นแนวตั้ง แรงกดแบบเฉพาะจุด หรืออาจมีการกระแทก ซึ่งเป็นผลทำให้กระป๋องเกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าแรงกดแบบตรง ซึ่งควรนำมาพิจารณาในการออกแบบกระป๋องด้วย

การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์กระป๋องเปล่าที่ประกอบฝาทั้งบนและล่างเหมือนกับกระป๋องที่บรรจุอาหารแล้ว ซึ่งสำหรับการขนส่งกระป๋องที่บรรจุอาหารแล้ว จะมีสภาวะที่ต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลทำให้ความแข็งแรงของกระป๋องมีความแตกต่างกันด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Wang, Design Optimization of Rigid Metal Containers. *Finite Elem. Anal. Des.* 37 (2001) 273-286.
- [2] F. Fujii, H. Noguchi, E. Ramm, Static Path Jumping to Attain Postbuckling Equilibria of a Compressed Circular Cylinder. *Computational Mech.* 26 (2000) 259-266.
- [3] A.N. Aljawi, Numerical Simulation of Axial Crushing of Circular Tubes. *J. of King AbdulAziz University: Eng. Sci.* 14 (2002) 3-17.
- [4] N. Yamaki, *Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells*. Amsterdam-New York-Oxford, North Holland, 1984.
- [5] D. Bushnell, *Computerized buckling analysis of shells*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1989.
- [6] V. Papadopoulos, P. Iglesis, The Effect of Non-Uniformity of Axial Loading on the Buckling Behavior of Shells with Random Imperfections. *Int. J. of Solids and Struc.* 44 (2007) 6299-6317.
- [7] M. Sodiek, R. Sauer, Mechanical Behaviour of Food Cans under Radial and Axial Load, *Third International Tin Plate Conference*, 1984.
- [8] L. Siad, Buckling of Thin-Walled Orthotropic Cylindrical Shells under Uniform External Pressure. Application to Corrugated Tin Cans, *Thin-Walled Structures* 35 (1999) 101-115.
- [9] C.T.F. Ross, M. Humphries, The Buckling of Corrugated Circular Cylinders under uniform External Pressure. *Thin-Walled Structures* 17 (1993) 259-271.
- [10] J.D. Reid, R.W. Bielenberg, B.A. Coon. Indenting, Buckling and Piercing of Aluminum Beverage Cans, *Finite Elem. Anal. Des.* 37 (2001) 131-144.
- [11] P. Teppunkulngam, P. Tantichattanont, T. Kamnertong. Study of Loading Capacity of Corrugated Food Cans using Finite Element Method. *Proc. of Mechanical Engineering Network Thailand 22nd Conference* 2008, October 15-17, 2008, Rungsit, Thailand.
- [12] R. Rotbunsongsri, P. Jongpradist, T. Kamnerdtong, Parametric Study of Food Can Corrugation Geometry by using Finite Element Method, *Proc. of the Second TSME International Conference on Mechanical Engineering*, October 19-21, 2011, Krabi, Thailand.
- [13] D.H. Chen, S. Ozaki, Numerical Study of Axially Crushed Cylindrical Tubes with Corrugated Surface. *Thin-Walled Structures* 47 (2009) 1387-1396.
- [14] K.K. Choong, E. Ramm, Simulation of Buckling Process of Shells by using Finite

- Element Method, *Thin-Walled Structures* 31 (1998) 39-72.
- [15] C.T.F. Ross. A Redesign of the Corrugated Tin Can, *Thin-Walled Structures* 26 (1996) 179-193.
- [16] [K. Yamazaki, R. Itoh, M. Watanabe, J. Han, S. Nishiyama, Applications of Structural Optimization Techniques in Light Weighting of Aluminum Beverage Can Ends, *J. of Food Engineering* 81(2007) 341-346.
- [17] J. Han, R. Itoh, S. Nishiyama, K. Yamazaki, Application of Structure Optimization technique to Aluminum Beverage Bottle Design, *Struct. Multidis Optim.* 29 (2005) 304-311.
- [18] H. Ugail, Parametric Design and Optimization of Thin-Walled Structures for Food Packaging, *Optimization and Engineering* 4 (2003) 291-307.
- [19] Simulia. *Abaqus Analysis User's Manual*. 2011.
- [20] R. H. Myers, D. C. Montgomery, C. M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey (2009)
- [21] G. Steenackers, F. Presezniak, P. Guillaume, Development of an Adaptive Response Surface Method for Optimization of Computation-Intensive Models, *Computers and Industrial Engineering* 57 (2009) 847-855.
- [22] K.P. Singh, A.K. Singh, S. Gupta, S. Sinha, Optimization of Cr(VI) Reduction by Zero-valent Bimetallic Nanoparticles Using the Response Surface Modeling Approach, *Desalination* 270 (2011) 275-284.
- [23] C.-S. Cho, E.-H. Choi, J.-R. Cho, O.-K. Lim, Topology and Parameter Optimization of Foaming Jig Reinforcement Structure by Response Surface Method, *CAD Computer-Aided Design* 43 (2011) 1707-1716.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ
 - **P Jongpradist***, R Rojbunsongsri, T Kamnerdtong, S Wongwises, Parametric Study and Optimization of Corrugated Food Can using a Response Surface Method; submitted to *Journal of Mechanical Science and Technology* (under review, Submitted 29 Feb. 2012)
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - เชิงพาณิชย์
 - นำเสนอผลงานให้บริษัท Universal Can Company จำกัด โดยส่งมอบรายงานฉบับสมบูรณ์ 1 เล่ม
 - เชิงวิชาการ
 - ผลิตนักศึกษาระดับปริญญาโท 1 คน ได้แก่ นายรัฐรงค์ โรจน์บุญสงค์ศรี
3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)
 - การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ได้แก่ Parametric Study of Food Can Corrugation Geometry by using Finite Element Method, R Rojbunsongsri, **P Jongpradist*** and T Kamnerdtong, The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 19-21 October, 2011, Krabi

ภาคผนวก

1. บทความสำหรับเผยแพร่ในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ
Parametric Study of Food Can Corrugation Geometry by using Finite Element Method, R Rotbunsongsri, **P Jongpradist*** and T Kamnerdtong, The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering, 19-21 October, 2011, Krabi