

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ

กระป๋องโลหะบรรจุอาหารได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบันเพื่อเก็บรักษาและขนส่งอาหารในการบรรจุอาหารนั้นควรเก็บในภาชนะที่มีความแข็งแรงและปลอดภัยรวมถึงวัตถุดิบในการผลิตจะต้องมีราคาถูก อีกทั้งเมื่อใช้แล้วควรจะสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้อีกด้วย ดังนั้นกระป๋องบรรจุอาหารแบบโลหะจึงถูกนำมาใช้อย่างมากในอุตสาหกรรมอาหารทั่วโลก

ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของกระป๋องทั้งวัสดุในการผลิตและรูปแบบของกระป๋องเพื่อให้กระป๋องมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและลดต้นทุนในการผลิตลักษณะของแรงต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตซึ่งอาจทำให้กระป๋องเกิดการเสียรูปเกิดจากปัจจัยหลัก ๆ 3 ประการคือ 1. แรงดันภายในจากการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค 2. แรงจากความดันสุญญากาศในกระป๋องในขณะทำการบรรจุอาหารทำให้กระป๋องเกิดการเสียรูปและโก่งเดาะ (Buckling) 3. แรงกดในแนวแกนในการประกอบฝากระป๋องเข้ากับตัวกระป๋องและการเรียงกระป๋องเป็นชั้นในระหว่างการขนถ่ายและเก็บ

1.2 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ลักษณะรูปร่างของตัวกระป๋องบรรจุอาหารนิยมสร้างจากแผ่นบางเรียบและนำมาขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกหลังจากนั้นจะมีการขึ้นรูปตัวกระป๋องให้มีลอน เนื่องจากกระป๋องทรงกระบอกเรียบนั้นถึงแม้จะมีความสามารถในการรับแรงในแนวแกนและแรงดันภายในได้ดีแต่จะมีความสามารถในการรับแรงจากความดันสุญญากาศต่ำ หากมีการรับภาระจากกระบวนการผลิตในขั้นต้นอาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวกระป๋องได้ง่าย ดังนั้นการออกแบบตัวกระป๋องให้มีลอนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มความสามารถในการรับภาระดังกล่าว อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวกระป๋องให้มีลอนจะทำให้ความสามารถในการรับแรงในแนวแกนนั้นลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้จำนวนลอนที่เพิ่มขึ้น ก็ทำให้ต้องใช้วัสดุในการผลิตกระป๋องเพิ่มขึ้นอีกด้วย การออกแบบลอนกระป๋องให้มีลักษณะที่เหมาะสมต่อการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูงสุดจึงมีส่วนสำคัญในการลดต้นทุนการผลิตโดยการออกแบบให้กระป๋องมีน้ำหนักลดลงแต่ยังคงความแข็งแรงของกระป๋องให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยังสามารถรับภาระที่เกิดขึ้นได้

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้การคำนวณและสถิติเข้ามาเป็น

ข้อมูลช่วยในการตัดสินใจเลือกตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ในการออกแบบลอนของกระป๋องบรรจุอาหารเพื่อให้กระป๋องบรรจุอาหารมีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการรับภาระที่ต้องการได้ เนื่องจากลอนกระป๋องนั้นเป็นรูปร่างที่ซับซ้อนการคำนวณความสามารถในการรับภาระของกระป๋องบรรจุอาหารจึงทำได้ยาก การออกแบบและขึ้นรูปจริงเพื่อทำการทดสอบจะทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายมาก การนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ผลจากการรับโหลดต่าง ๆ ในขั้นตอนการผลิต โดยใช้โปรแกรม ABAQUS [1] จะทำให้สามารถคำนวณผลจากการออกแบบได้หลากหลายรูปแบบและใช้ต้นทุนต่ำ งานวิจัยนี้จะอาศัยการทดสอบกระป๋องบรรจุอาหารเพื่อตรวจสอบความเชื่อถือได้ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ หลังจากนั้นจะใช้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง และออกแบบรูปร่างลอนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อลดต้นทุนวัสดุของกระป๋องบรรจุอาหาร

1.3 วัตถุประสงค์

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

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมของกระป๋องบรรจุอาหารอุตสาหกรรมแบบมีลอนขนาด 603×700 (เส้นผ่านศูนย์กลาง $6\frac{3}{16}$ นิ้วและสูง 7 นิ้ว) เมื่อได้รับแรงกดในแนวแกนและความดันสุญญากาศจากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ในการศึกษาออกแบบผลของลอนกระป๋องต่อความสามารถในการรับแรงพิจารณาผลจาก 4 ตัวแปรได้แก่ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน ความลึกลอน และจำนวนลอน

3. ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ใช้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาและวิเคราะห์ภาระโหลดต่าง ๆ ระหว่างกระบวนการผลิตกระป๋องบรรจุอาหาร
2. สามารถอธิบายผลกระทบจากตัวแปรต่าง ๆ ของลอนกระป๋อง ได้แก่ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน ความลึกลอน และจำนวนลอน ที่มีต่อความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนของกระป๋องบรรจุอาหาร
3. สามารถนำวิธีพื้นผิวตอบสนองมาช่วยในการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องบรรจุอาหารให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน
4. สามารถออกแบบการทดลองเพื่อลดการใช้วัสดุในการผลิตกระป๋องบรรจุอาหารและสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาการป้องกันบรรจุอาหารเมื่อได้รับภาระโหลดต่าง ๆ ซึ่งโครงสร้างของกระป๋องจะเป็นโครงสร้างเปลือกบาง (Shell) โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นจากภาระโหลดต่าง ๆ จะมีความเสียหายแบบการโก่งเดาะ (Buckling) และสุดท้ายจะออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องโดยการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการพื้นผิวดอปสนองเพื่อให้ได้รูปแบบลอนที่ตัวกระป๋องมีค่าที่เหมาะสมที่สุด

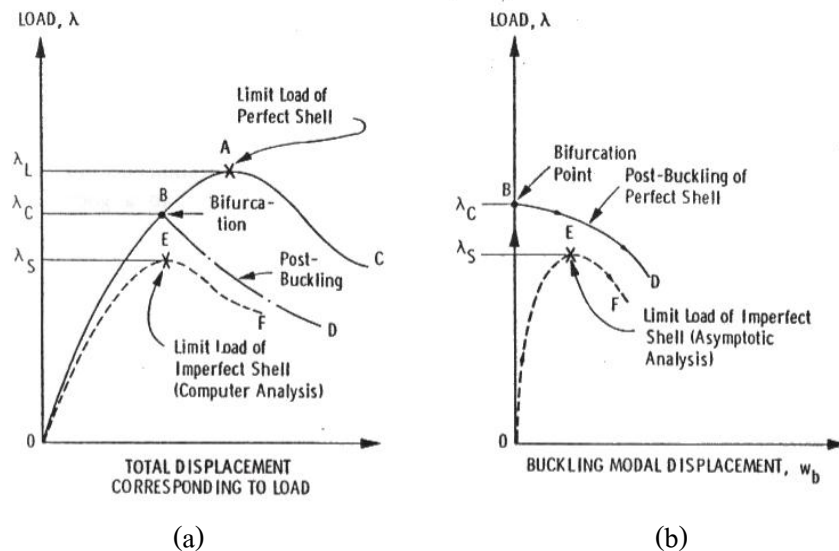
2.1 การโก่งเดาะของโครงสร้างเปลือกบาง

2.1.1 ลักษณะการเกิดการโก่งเดาะ (Buckling)

โดยทั่วไปคนส่วนใหญ่มักเข้าใจว่าการโก่งเดาะคือการวิบัติที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด จากการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์และทางวิศวกรรมจะเห็นว่า การเกิดขึ้นของการโก่งเดาะแท้จริงแล้วเกิดขึ้นก่อนการเสียรูปซึ่งมองเห็นด้วยตา คือ โครงสร้างจะไม่ปรากฏการเสียรูปหรือเสียรูปน้อยมากในการวิเคราะห์ทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างสมบูรณ์แบบ (Perfect structure) การโก่งเดาะก็ไม่ได้ทั้งความเสียหายที่จุดสูงสุดของกราฟระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Displacement) และ Bifurcation buckling ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบนี้เป็นการวิบัติที่เกิดจากความไม่เสถียร (Instability) ดังรูปที่ 2.1 (a) และ (b)

การเสียรูปจากการกดแรงในแนวแกนลงสู่ทรงกระบอก จะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตามเส้น OA จนกระทั่งโหลดสูงสุด (λ_L) เข้าสู่จุด A ถ้าโหลดในแนวแกน (λ) ไม่สามารถลดลงด้วยความแข็งแรงตามแนวแกน (Axial stiffness) ที่เพิ่มขึ้น ทรงกระบอกจะเกิดการวิบัติที่โหลดสูงสุดนี้ซึ่งเส้น BAC คือเส้นที่การเสียรูปเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เส้น OBD คือเส้นที่มีการเสียรูปแบบสมมาตรรอบแกนจาก O ถึง B และหลังจากนั้นจะเสียรูปอย่างไม่สมมาตรรอบแกน จาก B ถึง D จุดที่เกิดการโก่งเดาะหรือ Snap-through จะเกิดขึ้นที่จุด A และ Bifurcation จะเกิดที่จุด B เส้น OAC จะเป็นรูปแบบของการเสียรูปแบบสมมาตรรอบแกนเรียกว่า Fundamental (หรือ Primary หรือ Pre-buckling path) และ Post-bifurcation เส้น BD ซึ่งเป็นการเสียรูปแบบไม่สมมาตรรอบแกน เรียกว่า Secondary หรือ Post-buckling path การเกิดการโก่งเดาะแบบวิบัติหรือ Bifurcation ในตัวอย่างในรูปที่ 2.1 (b) จะเกิด Bifurcation ที่จุด B ซึ่งเกิดหลังจากการวิบัติในกรณีนี้ Bifurcation จะมีความสำคัญน้อยกว่าการวิบัติในกรณีที่เกิดขึ้นในรูป 2.1 (a) จุดที่เกิด Bifurcation จะอยู่ระหว่างเส้น OA ถ้า Fundamental path OAC แสดงการเสียรูปแบบสมมาตรรอบแกน และ BD แสดงการเสียรูปแบบไม่สมมาตรรอบแกน การเสียรูปของโครงสร้างจะมีลักษณะที่เป็นไปทางไม่สมมาตรรอบแกน ในกรณีนี้โหลดสูงสุด (λ_L) จะมีความสำคัญน้อยกว่า Bifurcation point (λ_C) ในกรณีของโครงสร้างจริง Imperfection เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ และไม่มีจุด Bifurcation buckling ที่แท้จริง โครงสร้างจริงจะเป็นไปตาม Fundamental

path OEF ซึ่งจุดที่เกิดการ Snap-through จะเกิดที่จุด E ที่ Collapse load (λ_S) ถ้าจุด B ในรูปที่ 2.1 (a) แสดงถึง Bifurcation buckling ที่เป็นแบบไม่สมมาตรรอบแกน ดังนั้น จุด Collapse ที่จุด E จะกลายเป็นการเสียรูปแบบไม่สมมาตรรอบแกนถึงแม้ว่า Bifurcation buckling จะไม่ปรากฏใน Path นี้ แต่การวิเคราะห์ Bifurcation buckling นี้จะทำให้สะดวกและใช้ประมาณค่าโหลดวิกฤติได้ดีและเป็นที่ยอมรับ



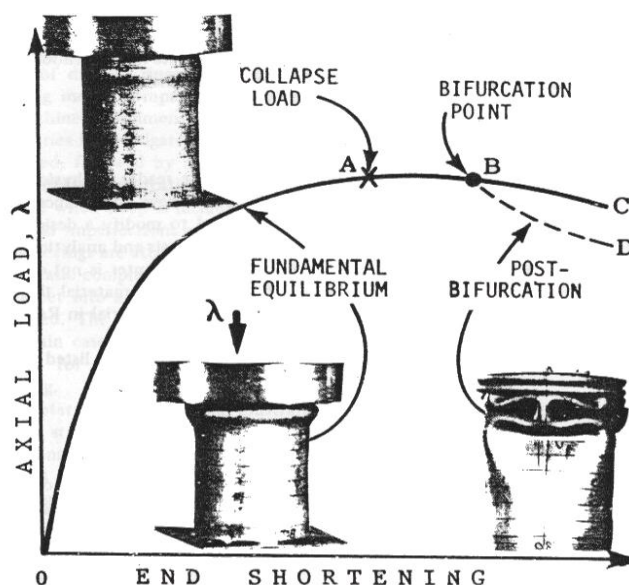
รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแสดงขอบเขตสูงสุดและ Bifurcation points (a) การวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นทั่วไป (b) การวิเคราะห์แบบ Asymptotic

2.1.2 การโก่งเคาะของโครงสร้างเปลือกบาง

สมบัติที่สำคัญของโครงสร้างเปลือกบางคือ จะมีค่าความแข็งแรงของผิว (Membrane) มากกว่าความแข็งแรงรับแรงดัด (Bending stiffness) ซึ่งโครงสร้างเปลือกบางจะสามารถดูดซับพลังงานความเครียดที่ผิว (Membrane strain energy) ได้มากกว่าเช่นกัน เมื่อเปลือกบางเมื่อได้รับพลังงานความเครียด (Strain energy) ในรูปของการอัดตัวของผิวจะเกิดการสะสมพลังงานไว้ที่ผิวในปริมาณมาก และสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานการดัดได้ ซึ่งทำให้เปลือกบางเสียรูปทันทีทันใด หรือที่เรียกว่า การเกิด การโก่งเคาะ

การเกิดการโก่งเคาะขึ้นอยู่กับรูปแบบของโหลดที่กระทำกับเปลือกบาง รูปทรงทางเรขาคณิตของเปลือกบาง และสมบัติของวัสดุ ซึ่งพฤติกรรมก่อนการโก่งเคาะจะมีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) เสมอ ถ้าในเปลือกบางมีสัดส่วนของพลังงานการดัดมาก การเกิดการโก่งเคาะจะมีอยู่ 2

ประเภท คือ Nonlinear collapse และ Bifurcation buckling โดยที่ Nonlinear collapse จะอธิบายได้ด้วยการวิเคราะห์ความเค้น คือ ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างหรือ ความชันของกราฟระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยที่จุดที่เกิดการวิบัติจะมีความชันของเส้นโค้งเป็นศูนย์และถ้ายังคงให้โหลดต่อไปโครงสร้างจะเปลี่ยนรูปหรือเกิดการเสียรูปอย่างทันทีทันใด ที่เรียกว่า Snap-through เมื่อเพิ่มโหลดจนกระทั่งโหลดถึงค่าสูงสุด โครงสร้างจะเริ่มเปลี่ยนรูปอย่างช้า ๆ โดยอัตราการเปลี่ยนรูปจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดสมดุล ความชันเฉลี่ยของเส้นโค้งจะเป็นศูนย์ และขึ้นทดสอบจะเปลี่ยนจาก Snap-through เป็น Post-buckling และเกิดการเปลี่ยนรูปจากโครงสร้างเดิม



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load-end shortening, limit point A, bifurcation point B, และ post-bifurcation equilibrium path BD

ในเทอมของ Bifurcation buckling จะหมายถึงการเสียรูปที่แตกต่างออกไป ซึ่งจะอธิบายได้โดยการวิเคราะห์ Eigenvalue ที่จุดแรงวิกฤติ (Buckling load) หรือ Bifurcation point (B) บน load-deflection path แสดงดังรูปที่ 2.2 การเสียรูปจะเริ่มเกิดเป็นรูปแบบใหม่ ซึ่งแตกต่างจากรูปแบบของ Pre-buckling การวิบัติหรือการเสียรูปแบบใหม่นี้จะเกิดขึ้นได้ ถ้าเส้นโค้งแสดงแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Post bifurcation มีความชันเป็นลบและโหลดไม่ขึ้นอยู่กับ การเสียรูป

2.1.3 การเกิดการโก่งเดาะบนกระป๋องเมื่อได้รับแรงกดในแนวแกน

ลักษณะของการเกิดการโก่งเดาะบนกระป๋องเมื่อได้รับแรงกดในแนวแกนนั้นจะเป็นการโก่งเดาะแบบไม่สมมาตรภายใต้แรงกดในแนวแกนสม่ำเสมอ [2] สำหรับทรงกระบอกแบบผิวเรียบ พิจารณาจาก

วิธีการสมมูลสมการ จะได้ความเค้นวิกฤตที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการโก่งเดาะ σ_{cr} และแรงกดวิกฤตตามแนวแกนต่อหน่วยความยาว N_{cr} ที่เกิดจากโหลดตามแนวแกน โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{t} = \frac{Et}{a\sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (2.1)$$

เมื่อ	E	คือ ค่ายังโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ
	t	คือ ความหนาของผนังทรงกระบอก
	ν	คือ Poisson's Ratio
	a	คือ รัศมีของทรงกระบอก

จากสมการที่ (2.1) จะได้ค่าแรงกดวิกฤต N_{cr} ซึ่งเป็นแรงต่อหน่วยความยาวของเส้นรอบวงทรงกระบอกและแรงกดในแนวแกน P_{cr}

$$P_{cr} = N_{cr}(2\pi a) \quad (2.2)$$

2.2 การออกแบบด้วยวิธีพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology)

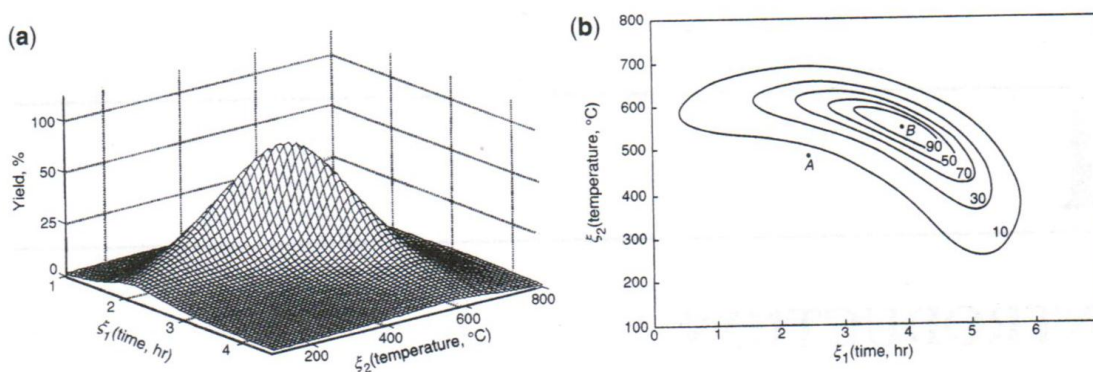
การออกแบบด้วยวิธีพื้นที่การตอบสนอง [3] เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการออกแบบในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เป็นวิธีการที่สามารถประยุกต์ได้กับการพัฒนาทั้งสูตรการผลิตและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยการหาจุดเหมาะสมจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปแบบการวางแผนการทดลองต่างๆ ทำให้นักพัฒนาผลิตภัณฑ์สามารถตัดสินใจรูปแบบที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติในการผลิตในอุตสาหกรรมรวมทั้งใช้เป็นแนวทางในการปรับสูตรและกระบวนการผลิตที่มีการเปลี่ยนแปลงกลไกบางอย่างในอุตสาหกรรม

ปัจจุบันมีความสนใจในการออกแบบเพื่อหาความสอดคล้องกับพื้นที่ของการตอบสนองและประเมินความเหมาะสมในสภาวะของการทดลองเรียกว่าการออกแบบด้วยพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design, RSD) ซึ่งได้ถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาคำตอบของการทดลองที่ประกอบด้วยจำนวนปัจจัยร่วมการทดลองหลายปัจจัยทำให้สามารถคำนวณค่าการตอบสนองที่เหมาะสมในที่สุดการตอบสนองที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้ใน 2 ลักษณะคือการตอบสนองที่มากที่สุด (Maximum) หรือการตอบสนองต่ำสุด (Minimum) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการทดลอง

วิธีการของพื้นที่การตอบสนองประกอบด้วยกลุ่มของเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาจากค่าสังเกตเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนอง (Response variable) ที่วัดได้ 1 หรือ 2 ค่า (ค่าการตอบสนองที่สนใจในงานวิจัยนี้ ได้แก่ค่าแรงวิกฤติจากการโก่งเคาะภายใต้ความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกน) กับตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง (Input variables) เช่น จำนวนลอน รัศมีลอน ความลึกลอน เป็นต้นเทคนิคดังกล่าวนี้ได้ใช้เพื่อให้คำตอบต่างๆเช่น

1. ค่าตอบสนองได้รับผลกระทบจากชุดสิ่งทดลองบนพื้นที่เฉพาะที่น่าสนใจบางอย่างได้อย่างไร
2. ชุดของสิ่งทดลองอะไรที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์หนึ่งเป็นที่น่าสนใจตรงตามข้อกำหนดจำเพาะพร้อมๆกัน
3. ค่าอะไรของสิ่งทดลองที่จะทำให้ผลผลิตในจุดที่สูงสุดของพื้นที่เฉพาะหนึ่งๆและพื้นที่การตอบสนองอะไรที่ใกล้กับค่าสูงสุดนี้ได้

ระเบียบวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) [4] เริ่มจากกำหนดตัวแปรอิสระที่ต้องการปรับเปลี่ยน (Independent variable) และค่าประสิทธิผลต่างๆที่ต้องการ (Response) เมื่อวาดเป็นกราฟก็จะได้เป็นลักษณะของพื้นที่การตอบสนองโดยแกนตั้งจะเป็นค่าตอบสนองและแกนนอนจะเป็นตัวแปรอิสระ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การวาดกราฟระหว่างค่าการตอบสนองกับตัวแปรอิสระ (a) เป็นการวาดแบบพื้นผิว
(b) แบบ contour [4]

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนอง (y) และ ตัวแปรอิสระ ($\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$) สามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันได้ดังนี้

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon \quad (2.3)$$

เมื่อ ε คือค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ

เนื่องจากค่า ε นั้นเป็นค่าที่ไม่สามารถหาค่าได้ จึงไม่ต้องการนำมาคำนวณลงในฟังก์ชัน โดยการสมมติให้ค่าการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อน (E) มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ดังสมการ

$$\begin{aligned} E(y) &\equiv \eta = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\varepsilon) \\ &= f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \end{aligned} \quad (2.4)$$

ค่าตัวแปรอิสระ $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ นั้นจะเรียกว่า Natural variables เนื่องจากค่าของตัวแปรนั้นจะเป็นค่าจริงจากการทดลองเช่น ค่าของอุณหภูมิ ความยาว ความดัน ฯลฯ แต่สำหรับ RSM นั้นตัวแปรเหล่านี้จะถูกแปลงให้เป็นตัวแปรสัญลักษณ์ (Coded variables) $x_1, x_2, \dots, x_k$ และจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (2.5)$$

เนื่องจากเรายังไม่ทราบค่าที่เหมาะสมที่สุด จึงต้องใช้ RSM หาค่าวิกฤต สมการที่จะนำมาใช้ในฟังก์ชันนั้นมีหลายระดับ เริ่มจาก low-order polynomial โดยส่วนมากนั้นจะใช้เพียงแบบจำลองลำดับขั้นที่หนึ่ง (First-order model) หรือแบบจำลองลำดับขั้นที่สอง (Second-order model) โดยสมการสำหรับแบบจำลองลำดับขั้นที่หนึ่งคือ

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (2.6)$$

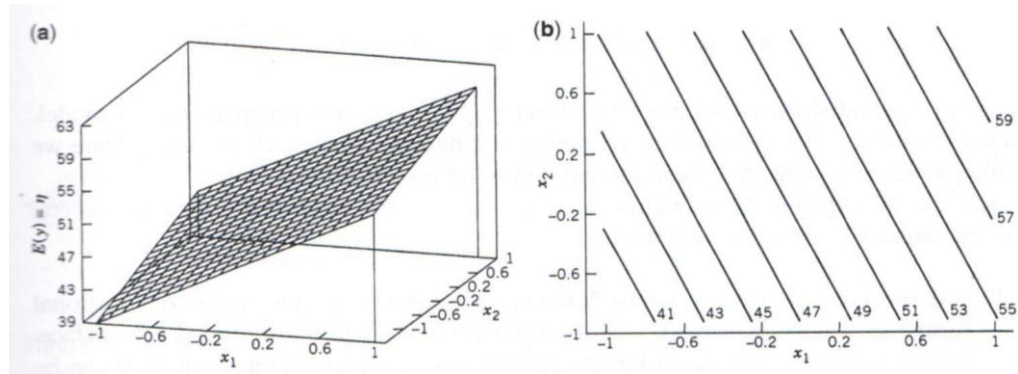
เมื่อ η คือ ผลตอบสนอง

β_i คือ สัมประสิทธิ์ของค่าผลกระทบ เมื่อ $i = 0, 1, 2, \dots$

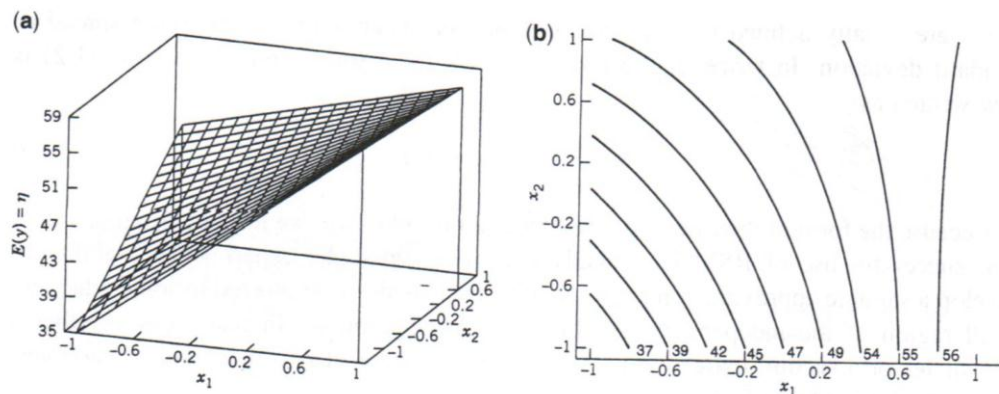
จากรูปที่ 2.4 (a) จะเห็นว่าเมื่อใช้สมการแบบจำลองลำดับขั้นที่หนึ่งจะได้กราฟออกมาเป็นระนาบหากเป็น Contour plot จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.4 (b)

หากต้องการความแม่นยำมากขึ้น โดยคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระด้วยนั้น อาจได้สมการความสัมพันธ์ (Interaction) เข้าไปด้วยดังสมการ

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.4 การวาดกราฟแบบจำลองลำดับขั้นที่หนึ่ง (a) แบบพื้นผิว (b) แบบ contour [4]



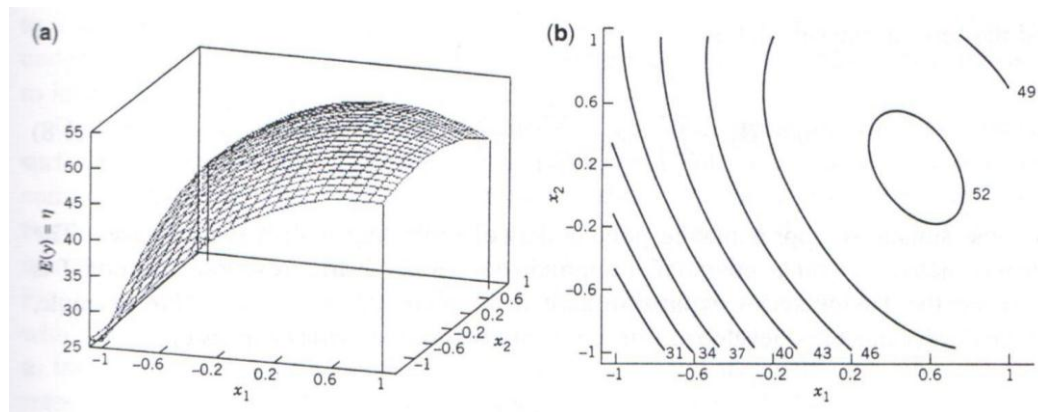
รูปที่ 2.5 การวาดกราฟแบบจำลองลำดับขั้นที่หนึ่งกับความสัมพันธ์ (a) แบบพื้นผิว (b) แบบ contour

จากรูปที่ 2.5 แสดงผลจากแบบจำลองลำดับขั้นที่หนึ่งกับความสัมพันธ์โดยจะมีความโค้งเกิดขึ้นบนพื้นผิวดตอบสนอง แต่เป็นเพียงความโค้งแบบส่วนโค้งของผิวทรงกระบอกเท่านั้น

หากต้องการความละเอียดสูงขึ้นอีกสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองลำดับขั้นที่สอง ดังสมการ

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2.8)$$

สมการนี้จะเป็นรูปแบบที่สามารถหาค่าที่เหมาะสมได้ดีที่สุด เนื่องจากสามารถวาดกราฟผลตอบสนองออกมาได้อย่างละเอียดและจะได้แนวโน้มของกราฟดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6

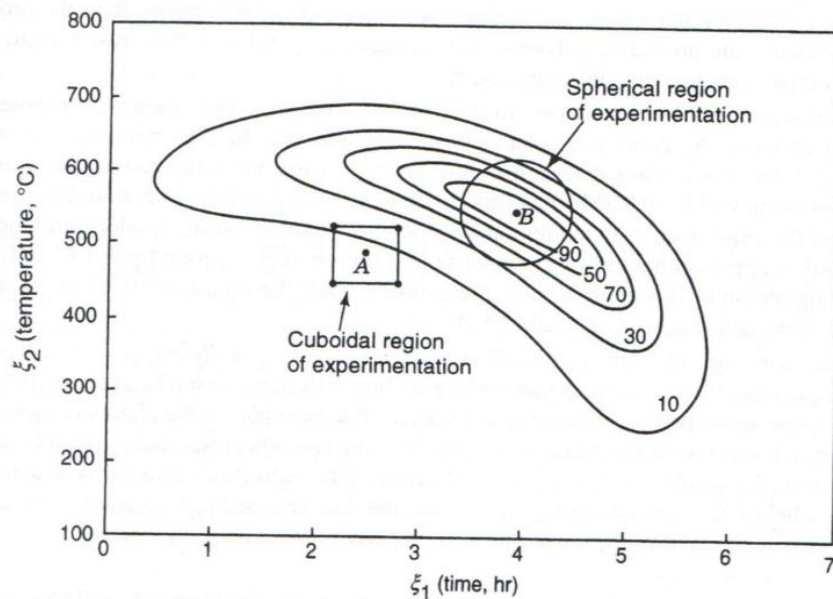


รูปที่ 2.6 การวาดกราฟแบบจำลองลำดับขั้นที่สอง (a) แบบพื้นผิว (b) แบบ contour [4]

2.2.1 ลำดับของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

กระบวนการ RSM นั้นจะมีวิธีการและขั้นตอนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยขั้นแรกเป็นการวิเคราะห์และกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับผลตอบสนอง (Yield) ต่อมาเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรที่กำหนดแต่ละตัวนั้นมีความสำคัญต่อผลตอบสนองมากน้อยเพียงใดและกำจัดตัวแปรที่ไม่มีความสำคัญออก โดยเรียกขั้นตอนนี้ว่า Screening experiment ซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนระดับแรกที่สำคัญ เนื่องจากสามารถกลั่นกรองตัวแปรที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองน้อย ทำให้สามารถลดจำนวนตัวแปรและจำนวนการทดลองในขั้นตอนต่อไป

เมื่อได้ตัวแปรที่สำคัญจากขั้นตอนที่ผ่านมาแล้ว ขั้นตอนต่อไปนี้มีจุดประสงค์เพื่อค้นหาตำแหน่งของค่าขอบเขตของตัวแปรที่ครอบคลุมและใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ให้ค่าของผลตอบสนองสูงที่สุด เช่น ตำแหน่งจุด B ในรูปที่ 2.7 หากขอบเขตที่กำหนดอยู่ในช่วงที่ให้ผลตอบสนองสูงที่สุดแล้วนั้น กระบวนการ RSM ก็จะให้ผลที่ถูกต้องที่สุด บางครั้งการกำหนดขอบเขตการศึกษาไม่ได้อยู่ในช่วงที่ให้ผลตอบสนองสูงที่สุด ดังเช่น จุด A ทำให้ต้องย้ายขอบเขตของตัวแปรให้ไปอยู่ที่จุดที่ให้ผลตอบสนองสูงที่สุด โดยใช้สมการแบบจำลองลำดับขั้นที่หนึ่งในการทดลอง และเรียกขั้นตอนนี้ว่า Steepest ascent ซึ่งถือเป็นขั้นตอนสำคัญของกระบวนการ RSM



รูปที่ 2.7 ตำแหน่งการทดลองและตำแหน่งของผลตอบสนอง

หลังจากได้ขอบเขตตัวแปรที่ใกล้เคียงกับจุดที่ให้ผลตอบสนองสูงที่สุดแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างสมการเพื่อหาพื้นผิวตอบสนองโดยสมการที่ใช้สร้างพื้นผิวตอบสนองนิยมใช้สมการกำลังสอง หรือมากกว่านั้น เพื่อให้ได้ผิวตอบสนองที่มีความโค้งใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด สำหรับใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดตามความต้องการในการออกแบบต่อไป

2.2.2 Two-Level Factorial Design

ในการทดลองต่าง ๆ นั้นอาจต้องมีการปรับเปลี่ยนตัวแปร เพื่อให้ได้ผลการทดสอบหลาย ๆ ค่าตามต้องการถึงแม้ว่าในกระบวนการ RSM นั้นจะสามารถวิเคราะห์การปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรได้หลายค่าก็ตาม แต่หากจำนวนตัวแปรมีมากเกินไปก็อาจทำให้ไม่ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องตามต้องการได้ ดังนั้นการตัดตัวแปรที่ไม่สำคัญออกก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์ผลพื้นที่การตอบสนองในกระบวนการ RSM นั้นจึงมีความสำคัญเสมือนเป็นการคัดกรองตัวแปรที่ไม่สำคัญหรือสำคัญน้อยนั้นออกไป เพื่อให้เหลือแต่ตัวแปรสำคัญ ที่จะนำเข้าสู่กระบวนการ RSM

Two-Level Factorial Design [4] ก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถคัดกรองความสำคัญของตัวแปรต่าง ๆ ได้ โดยจำนวนครั้งของการทดลองนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา โดยเมื่อพิจารณาเฉพาะค่าสูง (+) และค่าต่ำ (-) ของแต่ละตัวแปร (ที่เรียกว่า Two-level) และมีการสลับการปรับค่าของทุกตัวแปรครบทุกแบบหรือ เรียกว่า Full factorial design จะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 2^k โดยค่า k

คือจำนวนตัวแปรอิสระ เช่น เมื่อมีตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัว (A , B และ C) จำนวนกรณีของการทดลองที่ต้องทำการศึกษาเพื่อหาผลตอบสนองจะเท่ากับ 2^3 ครั้ง คือทั้งหมด 8 กรณีดังตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าการศึกษาผลของการปรับค่าภายในช่วงของตัวแปรที่กำหนดไว้จึงมีจำนวนครบถ้วนในการเปรียบเทียบกัน ค่า y ในตารางคือค่าผลตอบสนองที่ต้องการศึกษาผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 การศึกษาเพื่อหาผลตอบสนองชนิด 3 ตัวแปร

Run	A	B	C	y
1	-	-	-	y_1
2	+	-	-	y_2
3	-	+	-	y_3
4	+	+	-	y_4
5	-	-	+	y_5
6	+	-	+	y_6
7	-	+	+	y_7
8	+	+	+	y_8

การวิเคราะห์ผลกระทบ (Effect) ที่มีต่อผลตอบสนองของแต่ละตัวแปรเมื่อมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรชนิดละ 2 ค่าคือ ค่าสูงและค่าต่ำ ทั้งหมด 3 ตัวแปร จะได้รูปแบบการปรับเปลี่ยนออกมาทั้งหมด 8 จุด เป็นลักษณะลูกบาศก์ดังรูปที่ 2.8 สามารถสังเกตวิธีคำนวณง่าย ๆ ได้จากรูปที่ 2.9 และสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$A = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-}$$

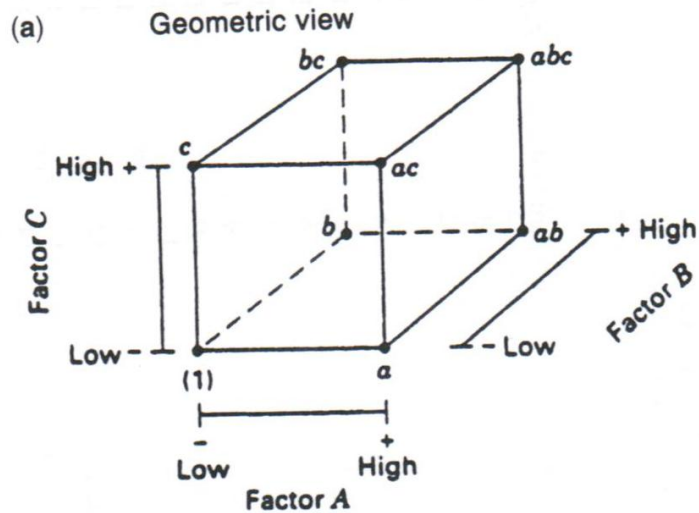
$$= \frac{a + ab + ac + abc}{4n} - \frac{(1) + b + c + bc}{4n}$$

สามารถจัดรูปได้ดังสมการ

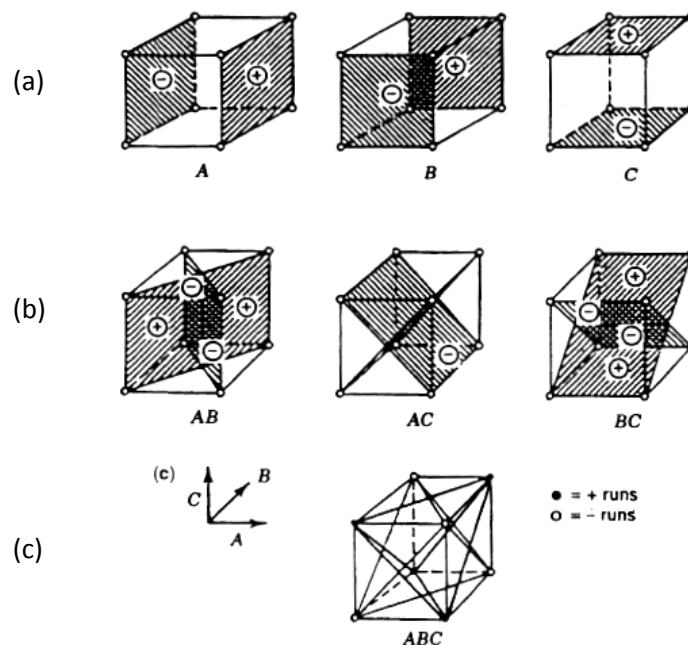
$$A = \frac{1}{4n} (a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc) \quad (2.9)$$

เมื่อ A คือ ผลกระทบของตัวแปร A
 $\bar{y}_{A+}$ คือ ค่าเฉลี่ยผลกระทบของค่าสูงของตัวแปร A

$\bar{y}_A$ คือ ค่าเฉลี่ยผลกระทบของค่าต่ำของตัวแปร A
 n คือ จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง



รูปที่ 2.8 รูปเรขาคณิตแสดงการศึกษาเพื่อหาผลตอบสนองชนิด 3 ตัวแปร



รูปที่ 2.9 รูปเรขาคณิตแสดงความแตกต่างของการคำนวณหาผลกระทบของตัวแปรหลักและความสัมพันธ์ (a) ตัวแปรหลัก (b) ความสัมพันธ์สองตัวแปร (c) ความสัมพันธ์สามตัวแปร

เมื่อพิจารณาค่าผลกระทบของทุกพจน์แล้วสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังตารางที่ 2.2 และสามารถหาค่าผลรวมกำลังสอง (Sum of square, SS) ได้ง่ายเนื่องจากแต่ละผลกระทบนั้นเป็นตัวแปรลำดับขั้นที่หนึ่งดังสมการตัวอย่างของผลรวมกำลังสองของตัวแปร A ดังนี้

$$SS_A = \frac{(a+ab+ac+abc-(1)-b-c-bc)^2}{8n} \quad (2.10)$$

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของเครื่องหมายพีชคณิตสำหรับการคำนวณหาค่าผลกระทบชนิดสามตัวแปร

Treatment	Factorial effect							
Combination	I	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
(1)	+	-	-	+	-	+	+	-
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	+	-	-	-	-
c	+	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	+	-	-	+	+	-	-
bc	+	-	+	-	+	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+	+

2.2.3 กระบวนการ Steepest ascent

ในกระบวนการ RSM นั้นจำเป็นต้องหาขอบเขตที่เหมาะสมรวมถึงครอบคลุมจุดที่ให้ผลตอบสนองสูงที่สุด ถึงแม้จะใช้สมการหลายลำดับขั้นเข้ามาคำนวณก็ไม่สามารถหาค่าที่ให้ผลตอบสนองสูงที่สุดได้หากกำหนดขอบเขตของตัวแปรไม่ถูกต้อง ดังนั้นก่อนที่จะเข้าสู่การสร้างสมการพหุนามนั้นจำเป็นต้องกำหนดขอบเขตของตัวแปรให้ครอบคลุมค่าตอบสนองสูงที่สุด โดยใช้หลักการ Steepest ascent เข้ามาช่วย โดยเริ่มจากสร้างสมการลำดับขั้นที่หนึ่งเพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆดังสมการที่ 2.11

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (2.11)$$

เมื่อได้ผลจากสมการข้างต้น จะได้ค่าผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ (β_j) จากนั้นเลือกตัวแปรที่มีผลกระทบ $|\beta_i|$ สูงที่สุดหรือใกล้เคียงเป็นตัวแปรหลัก ในการคำนวณหาค่าส่วนต่างของตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไป Δx_j โดยจะขึ้นกับส่วนต่างของตัวแปรหลัก Δx_i โดยการคำนวณจาก

$$\Delta x_j = \frac{\beta_j}{\beta_i / \Delta x_i}, j=1, 2, 3, \dots, k, \quad i \neq j \quad (2.12)$$

หลังจากที่หา Δx_j ครบแล้ว สำหรับการคำนวณค่าที่เพิ่มขึ้นของหน่วยธรรมชาติ (Increment of natural units, $[\Delta]$) แต่ละตัวแปร ให้นำช่วงระหว่างค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดของแต่ละตัวแปรหารด้วยสอง คูณกับ Δx_j

จากนั้นนำ Δ ไปรวมกับค่ากึ่งกลางของแต่ละช่วงตัวแปร (Base) จะได้เส้นทางของ Steepest ascent ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งเมื่อเพิ่ม Δ ต่อไปเรื่อย ๆ จนกว่าผลตอบสนองจะถึงจุดสูงสุด เห็นได้จากผลของพื้นผิวตอบสนองของแบบจำลองนั้นมีค่าลดต่ำลง จะทำให้ทราบขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสมการพื้นผิวตอบสนองอย่างละเอียดในขั้นตอนต่อไป

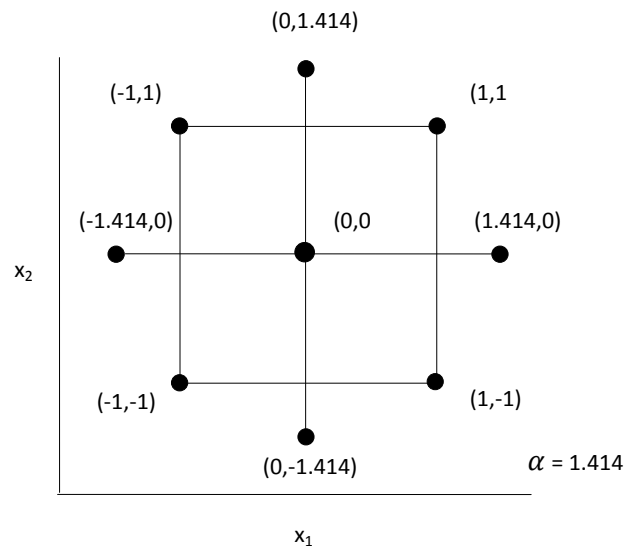
ตารางที่ 2.3 กระบวนการ Steepest ascent

Model	Natural Units				y
	1	2	3	k	
Base	Base ₁	Base ₂	Base ₃	Base _k	
Δ	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_k	
Base+ Δ	Base+ Δ_1	Base+ Δ_2	Base+ Δ_3	Base+ Δ_k	y_1
Base+2 Δ	Base+2 Δ_1	Base+2 Δ_2	Base+2 Δ_3	Base+2 Δ_k	y_2
Base+3 Δ	Base+3 Δ_1	Base+3 Δ_2	Base+3 Δ_3	Base+3 Δ_k	y_3
Base+k Δ	Base+k Δ_1	Base+k Δ_2	Base+k Δ_3	Base+k Δ_k	y_k

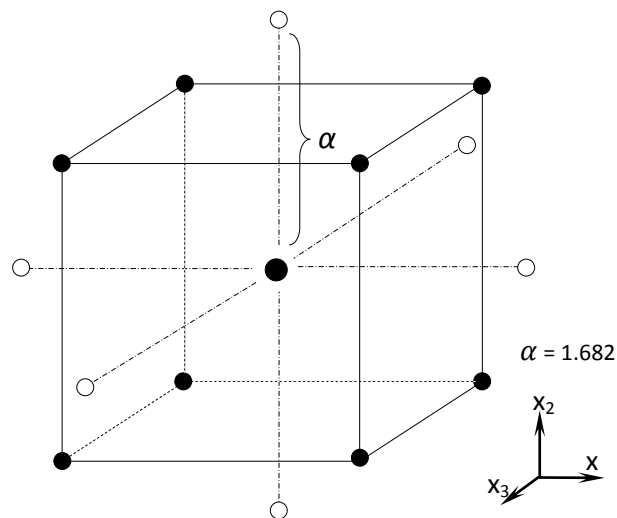
2.2.4 การออกแบบด้วยวิธี Central Composite Design

กระบวนการ RSM นั้นสามารถสร้างพื้นผิวตอบสนองโดยใช้แบบจำลองลำดับขั้นที่สอง ซึ่งสามารถสร้างได้หลายรูปแบบ และวิธี Central Composite Design ก็เป็นวิธีที่นิยมใช้อีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากสามารถสร้างพื้นที่ขอบเขตของพื้นผิวตอบสนองได้ครอบคลุมและสามารถแม่นยำ โดยหลังจากทราบขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับแต่ละตัวแปรแล้วนั้น จะต้องสร้างการทดลองคล้าย ๆ กับ Factorial design

แต่จะกำหนดค่ากลางของช่วงของแต่ละตัวแปรในการทดลอง เพื่อสร้างเป็นจุดศูนย์กลางของการทดลอง ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังนี้



(a) 2 ตัวแปร



(b) 3 ตัวแปร

รูปที่ 2.10 Central composite design สำหรับ (a) 2 ตัวแปร (b) 3 ตัวแปร

1. ตำแหน่งการทดลองของ 2^n Factorial design (ถ้า $n = 2$ จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือ $(-1, -1)$ $(1, -1)$ $(-1, 1)$ และ $(1, 1)$)

2. ตำแหน่งการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาในแนวแกนในลักษณะ $\pm\alpha$ โดยจะมีตำแหน่งการทดลองเมื่อมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร เพิ่มขึ้นอีก 4 ตำแหน่งคือ $(+\alpha, 0)$ $(-\alpha, 0)$ $(0, +\alpha)$ และ $(0, -\alpha)$ ซึ่งค่า α คำนวณได้จากสมการ 2.1.3

3. ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่การทดลอง (Center point) อีก 1 ตำแหน่ง คือ $(0, 0)$

ดังนั้นสำหรับการทดลองที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัวและ 3 ตัว จะมีการทดลองทั้งหมด $(2^2 + 4 + 1)$ การทดลอง และ $(2^3 + 6 + 1)$ การทดลอง ตามลำดับ แสดงรูปตัวอย่างชนิด 2 ตัวแปร และชนิด 3 ตัวแปร ดังรูปที่ 2.10

$$\alpha = (2^k)^{1/4} \quad (2.13)$$

จากการทดลองนั้นสามารถสร้างสมการหาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้ถึงสมการลำดับขั้นที่สอง เมื่อมี 2 ตัวแปรจะเขียนสมการได้เป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2.14)$$

จากสมการ 2 ตัวแปร เมื่อใช้ตัวแปรสัญลักษณ์ (Coded variables) สร้าง เมตริก X และผลตอบสนอง y ได้ดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1.414 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1.414 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1.414 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 1.414 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

จากเมตริก X จะเห็นว่ามีตัวแปรต่างๆอยู่แต่ละหลัก โดย x_1^2 และ x_2^2 จะเป็นผลกำลังสองของ x_1 และ x_2 ตามลำดับ และผลของ x_1x_2 นั้นจะเป็นผลจากการคูณกันของ x_1 และ x_2 สุดท้าย จะสามารถแก้สมการหาค่าผลกระทบของตัวแปร (β) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\beta = (X'X)^{-1}X'y \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$\beta = [\beta_0 \beta_1 \beta_2 \beta_{11} \beta_{22} \beta_{12}]^T$$

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระป๋องบรรจุอาหารมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเปลือกบางซึ่งจะสามารถรับแรงในแนวแกนได้ดี แต่ความสามารถในการรับความดันสุญญากาศและความดันภายในจะต่ำ เพื่อให้กระป๋องมีความแข็งแรงต่อทุกสภาวะจึงออกแบบให้มีลอนที่พื้นผิว ถึงแม้ว่าการเพิ่มลอนจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงต่อความดัน แต่จะลดความแข็งแรงในแนวแกน โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นกับกระป๋องจากแรงต่าง ๆ เกิดจากความไม่แน่นอนของความเป็นเปลือกบางและจะเกิดการโก่งเดาะ ซึ่งค่าแรงวิกฤติที่เกิดขึ้นจากการโก่งเดาะจะคำนวณได้ยากเนื่องจากมีจุดแยกของความเสียหาย (Bifurcation point) หลายจุด ([5]-[6]) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรมการณ์การโก่งเดาะเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของโครงสร้างหรือวัสดุ [7]

Siad [8] ทำการวิเคราะห์ส่วนของเปลือกทรงกระบอกและแนะนำสูตรการวิเคราะห์การคาดคะเนเปลือกทรงกระบอกผนังบางแบบ Orthotropic ภายใต้ความดันภายนอกอย่างสม่ำเสมอ โดยผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะเปรียบเทียบกับทดลองโดยศึกษาจาก [9]

ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของทรงกระบอกเปลือกบาง เช่น กระป๋องบรรจุอาหาร กระป๋องน้ำอัดลม ท่อทรงกระบอก เป็นต้น เพื่อวิเคราะห์ผลจากโหลดต่าง ๆ ที่มากระทำ ซึ่งสามารถวิเคราะห์โหลดได้หลายชนิดเช่น แรงกดในแนวแกน ความดันสุญญากาศ แรงดันภายใน แรงกดแบบพลวัต แรงกดแบบกระแทก อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นต้น ([10]-[15]) พรชัย เทพพันธุ์กุลงาม [16] ได้ศึกษาและเปรียบเทียบภาระของกระป๋องในงานอุตสาหกรรม พบว่าในกระบวนการทางอุตสาหกรรมนั้นจะมีภาระสามชนิดที่สำคัญในการทดสอบกระป๋องคือ แรงกดในแนวแกนกระป๋อง จากการขนย้ายในกระบวนการผลิต ภาระความดันภายในกระป๋องระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อและภาระแรงสุญญากาศในกระบวนการบรรจุ โดยสามารถสร้างแบบจำลองและ

วิเคราะห์โดยโปรแกรม ABAQUS เปรียบเทียบกับการทดสอบ ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกันประมาณ 8% โดยมีข้อสังเกตว่า เมื่อออกแบบให้กระป๋องมีลอนจะสามารถรับความดันรวมถึงแรงที่กระทำที่ตัวกระป๋องได้ดีขึ้น แต่ความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนจะลดลง ซึ่งความสัมพันธ์นี้เป็นสาเหตุให้นักวิจัยต้องคำนึงถึงในการออกแบบ

สำหรับการออกแบบและวิจัยภาชนะบรรจุ ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งมีหลายเครื่องมือ เช่น Design Optimization Tool (DOT), Response surface และ Trial solution เป็นต้น โดยสุดท้ายแบบจำลองที่ออกแบบได้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดการใช้วัสดุลงเพื่อลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย ([17]-[19])

บทที่ 3 การทดสอบกระป๋องบรรจุอาหาร

ในขั้นต้นก่อนจะทำการออกแบบกระป๋องบรรจุอาหาร จะทดสอบความสามารถการรับโหลดของกระป๋อง เพื่อใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบกระป๋องบรรจุอาหารที่ทำการวิจัยรวมถึงการทดสอบความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกน

3.1 แบบกระป๋องที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ใช้กระป๋องบรรจุอาหารเชิงพาณิชย์แบบมีลอนขนาด 603×700 ซึ่งมีขนาดความสูง 177.8 มม. (7 นิ้ว) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 157.16 มม. ($6\frac{3}{16}$ นิ้ว) ดังรูปที่ 3.1 มีความหนาของตัวกระป๋องมี 2 ขนาดคือ 0.25 มม. และ 0.26 มม. ความหนาของฝาเท่ากับ 0.28 มม. ซึ่งมีแบบและขนาดโดยละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก โดยกระป๋องที่ใช้ในการทดสอบเป็นกระป๋องที่ประกอบฝากับตัวกระป๋องและเข้าตะเข็บเรียบร้อยเหมือนกับการบรรจุจริง เพียงแต่ไม่มีการบรรจุอาหารเข้าไปเท่านั้น ซึ่งกระป๋องเป็นแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก (Tinplate) ชนิดที่ผลิตโดยผ่านการรีดเย็นเพียงรอบเดียว (Single-Reduced) จากนั้นผ่านการอบอ่อนต่อเนื่อง (Continuous annealing) และมีสมบัติวัสดุดังตารางที่ 3.1



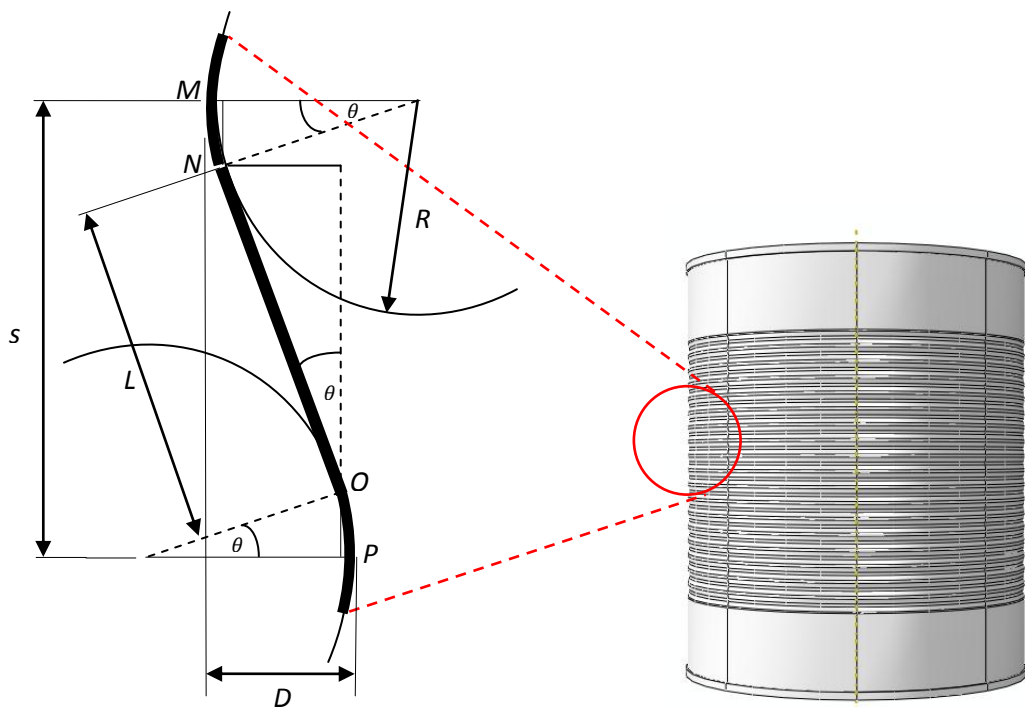
รูปที่ 3.1 กระป๋องบรรจุอาหารแบบมีลอนขนาด 603×700

ตารางที่ 3.1 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

3.1.1 การคำนวณปริมาณวัสดุจากรูปแบบลอน

ในการออกแบบลอนกระป๋องปริมาณวัสดุที่ใช้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างลอน และจำนวนลอนกระป๋อง หากไม่คำนึงถึงการยึดตัวของวัสดุในขบวนการขึ้นรูปลอนปริมาณวัสดุสามารถหาได้จาก สมการอย่างง่าย โดยพิจารณาลอนเป็นส่วนของวงกลมที่มีรัศมี R ดังรูปที่ 3.2 เมื่อขนาดของ s เป็นระยะห่างครึ่งลอน, D คือ ความลึกลอน, L คือความยาวส่วนต่อของเส้นสัมผัสระหว่างลอน และ θ คือมุมที่เส้นสัมผัสกระทำกับกับแนวตั้ง



รูปที่ 3.2 รูปร่างลอนและตัวแปรกำหนดขนาดต่าง ๆ

จะได้ความสัมพันธ์ของส่วนต่าง ๆ เป็น

$$s = L \cos \theta + 2R \sin \theta \quad (3.1)$$

$$D = L \sin \theta + 2R(1 - \cos \theta) \quad (3.2)$$

จากทั้งสองสมการนี้สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปของ L ได้ดังนี้

จากสมการ (3.1) จะได้
$$L = \frac{s - 2R \sin \theta}{\cos \theta} \quad (3.3)$$

จากสมการ (3.1) จะได้
$$L = \frac{D - 2R - 2R \cos \theta}{\sin \theta} \quad (3.4)$$

จากนั้นจะจัดรูปสมการให้อยู่ในฟังก์ชัน โดยที่ $\theta = f(S, D, R)$ และ $L = g(s, D, R)$ โดยให้ฝั่งขวาของสมการ (3.3) และ (3.4) เท่ากัน จะได้ว่า

$$s \sin \theta - 2R \sin^2 \theta = (D - 2R) \cos \theta + 2R \cos^2 \theta \quad (3.5)$$

จากสมการ (3.5) ทำให้อยู่ในรูป $\cos \theta$ จะได้

$$s \sqrt{1 - \cos^2 \theta} = (D - 2R) \cos \theta + 2R \quad (3.6)$$

แล้วยกกำลังสองทั้งสมการจะได้

$$s^2(1 - \cos^2 \theta) = (D - 2R)^2 \cos^2 \theta + 4R(D - 2R) \cos \theta + 4R^2$$

ซึ่งสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปของสมการกำลังสองได้เป็น

$$((D - 2R)^2 + s^2) \cos^2 \theta + 4R(D - 2R) \cos \theta + 4R^2 - s^2 = 0 \quad (3.7)$$

การหาคำตอบของสมการกำลังสองในรูปแบบ $ax^2 + bx + c = 0$

จะมีคำตอบของสมการเป็น

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

จะได้ว่า

$$\cos \theta = \frac{-4R(D - 2R) \pm \sqrt{4R^2(D - 2R)^2 - 4((D - 2R)^2 + s^2)(4R^2 - s^2)}}{2((D - 2R)^2 + s^2)} \quad (3.8)$$

หรือ จากสมการ (3.5) หากทำให้อยู่ในรูป $\sin \theta$

$$(D - 2R)\sqrt{1 - \sin^2 \theta} = s \sin \theta - 2R \quad (3.9)$$

แล้วยกกำลังสองทั้งสมการจะได้

$$(D - 2R)^2(1 - \sin^2 \theta) = s^2 \sin^2 \theta - 4Rs \sin \theta + 4R^2$$

$$\text{หรือ} \quad ((D - 2R)^2 + S^2)\sin^2 \theta - 4RS\sin \theta + 4R^2 - (D - 2R)^2 = 0 \quad (3.10)$$

$$\text{จะได้} \quad \sin \theta = \frac{4Rs \pm \sqrt{16R^2s^2 - 4((D-2R)^2 + s^2)(4R^2 - (D-2R)^2)}}{2((D-2R)^2 + s^2)} \quad (3.11)$$

จากสมการ (3.8) หรือ (3.11) จะได้ค่ามุม θ ออกมา (หน่วยเป็น radian) สองค่าแต่จะมีเพียงค่าเดียวที่ให้ระยะ L เป็นบวก เมื่อแทนค่ามุมลงในสมการ (3.3) หรือ (3.4) ซึ่งจะสามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่ผิวกระป๋องสำหรับรูปแบบลอนที่ต้องการ โดยจะได้ว่า ความยาวทั้งหมดของส่วนย่อย $MNOP$ ดังแสดงในรูป 3.2 จะมีค่าเท่ากับ

$$Q = L + 2R\theta \quad (3.12)$$

และจะสามารถหาพื้นที่ผิวของแผ่นเหล็กเคลือบดินบุกที่ใช้ทำกระป๋อง (A) ได้ดังสมการ

$$A = \pi d(2nQ + (H - 2ns)) \quad (3.13)$$

เมื่อ n คือ จำนวนลอนทั้งหมดตลอดความสูง H ของกระป๋องที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d

3.2 การทดสอบความสามารถในการรับภาระของกระป๋อง

ภาระที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบลอนกระป๋อง ได้แก่ ความดันสุญญากาศ และแรงกดในแนวแกนในกระบวนการผลิตกระป๋องบรรจุอาหารดังแบบที่ได้นำมาทดสอบ กระป๋องจะต้องรับแรงจากความดันสุญญากาศ 80 kPa และแรงกดในแนวแกน 850 kg หรือ 8338.5 N งานวิจัยของ พรชัย เทพพันธุ์กุลงาม [11] ได้ทดสอบความสามารถในการรับความดันสุญญากาศโดยนำกระป๋องไปใส่ไว้ในถังความดันและจะให้ความดันที่ภายนอกของกระป๋องเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในอัตราคงที่จนกว่ากระป๋องจะไม่สามารถรับแรงดันได้อีก หรือมีความเสียหายอย่างเห็นได้ชัด พบว่าประป๋องเกิดความเสียหาย

โดยการเสียรูปเกิดจากการโก่งเดาะมีลักษณะเป็นรอยบุบย่น 4 ลอนรอบแนวเส้นรอบวงที่ตัวกระป๋องทดสอบดังรูปที่ (3.3) เมื่อทำการทดสอบกับกระป๋อง 5 ใบ ได้ค่าเฉลี่ยความดันที่กระป๋องสามารถรับได้เท่ากับ 126 kPa



รูปที่ 3.3 พฤติกรรมการเสียหายแบบการโก่งเดาะของกระป๋องบรรจุอาหารชนิด 603×700 เมื่อได้รับความดันสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบเฉพาะในกรณีการรับแรงกดในแนวแกนเท่านั้น โดยทำการทดสอบกับกระป๋องที่มีลอนดังแสดงในภาคผนวก ก ขนาด 603×700 ที่มีความหนา 0.25 มม.

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ในการทดสอบการรับแรงกดในแนวแกน

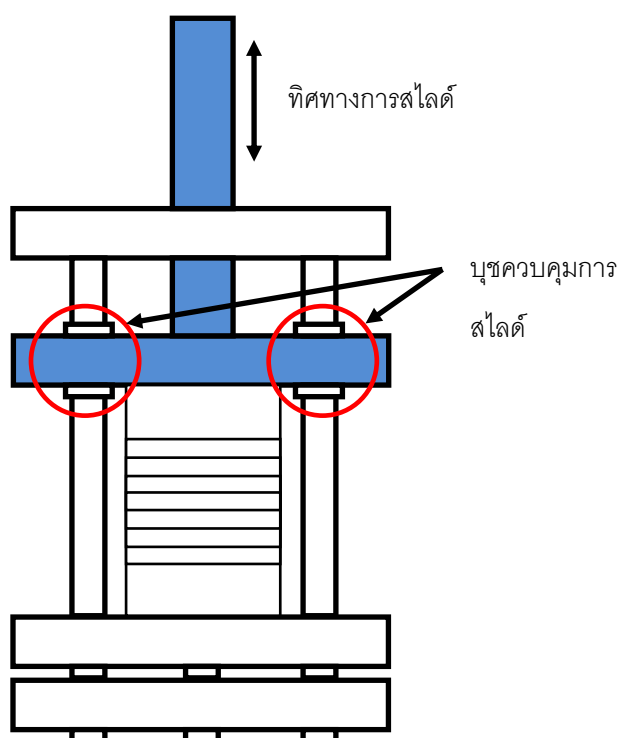
การทดสอบความเสียหายจากแรงในแนวแกนของกระป๋องนั้นจะต้องใช้แรงกระทำมากระดัดหนึ่ง จึงใช้ Universal Testing Machine ขนาด 5 ตันเป็นต้นกำเนิดแรงในการทดสอบ

ในการทดสอบแรงกด จำเป็นต้องออกแบบอุปกรณ์ยึดจับเพื่อช่วยในการถ่ายแรงจาก Load cell ให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนขอบด้านบนของกระป๋อง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ควรมีความแข็งแรง และสามารถกระจายแรงกดให้อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับกระป๋องได้ โดยการบังคับทิศทางด้วยอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบภาระกดในแนวแกน (Linear guide) ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 โดยการทำงานของ Linear guide จะมีชุดด้านบนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้งเพื่อกดให้กระป๋องยุบตัวลง โดยด้านบนของแผ่นเหล็กนี้จะยึดอยู่กับ Load cell ของ Universal Testing Machine ซึ่งเมื่อ Cross head เคลื่อนที่ลง ชุดแผ่นเหล็กด้านบนจะเคลื่อนที่ลงเป็นระนาบ และออกแรงกดที่ขอบด้านบนของกระป๋องอย่างสม่ำเสมอเข้าหาแผ่นเหล็กด้านล่างที่ไม่เคลื่อนที่ซึ่งจะติดตั้งอยู่ที่พื้น โดยมีชุดบุชและ

เพลลา 3 ชุด ช่วยควบคุมการเคลื่อนที่ให้ตั้งฉากกับระนาบฝ่ากระป๋องมากที่สุดรูปอุปกรณ์จับยึดสำหรับการทดสอบในแนวแกนเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.5 (a)

สำหรับส่วนรองรับน้ำหนักของอุปกรณ์จับยึด จะออกแบบขาตั้งสามารถปรับระดับได้ที่ฐาน 3 จุด โดยปรับระดับความสูงด้วยเกลียวเพื่อทำให้สามารถปรับอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบภาระกดในแนวแกนให้มีระนาบตรงกับ Universal Testing Machine และเพื่อให้พื้นรองการทดลองมีความแข็งแรงเท่ากันทุกจุดจึงใช้แผ่นเหล็กขนาดความหนา 10 มม. รองระหว่างฐานของอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบภาระกดในแนวแกนและพื้นของเครื่อง Universal Testing Machine ทำให้พื้นมีลักษณะเป็นระนาบเดียวกัน และสำหรับการตรวจสอบความเป็นระนาบระหว่างการทดลอง จะใช้เครื่องวัดระดับความเอียงที่ความละเอียด 0.1 องศา วัดและปรับระดับที่ฐานของอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบภาระแรงกดในแนวแกนให้มีระนาบเดียวกับ Universal Testing Machine ก่อนทำการทดลอง

จะเห็นว่าส่วนที่ควบคุมการเคลื่อนที่ได้แก่บูชที่ติดอยู่กับส่วนแผ่นเคลื่อนที่กดด้านบนทั้งหมด 3 จุด จะต้องสวมเข้ากับเพลลาที่เป็นส่วนที่ยึดติดอยู่กับที่ได้พอดีทำให้การเคลื่อนที่ขึ้นลงนั้นมีความเป็นระนาบสูงที่สุด ดังรูปที่ 3.5 (b)



รูปที่ 3.4 หลักการของอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบภาระกดในแนวแกนและชิ้นส่วนต่าง



(a)



(b)

รูปที่ 3.5 (a) อุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบภาระกดในแนวแกน (b) ลักษณะของบุชและแกนเพลลา

3.2.2 วิธีการทดสอบ

เพื่อหาแรงกดในแนวแกนที่ทำให้กระป๋องเกิดการเสียรูปมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. ใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ทดสอบกำลังรับแรงกดโดยทำการประกอบอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบภาระกดในแนวแกนสำหรับกดกระป๋องเข้ากับเครื่องทดสอบดังรูปที่ 3.6
2. ปรับค่าต่างๆที่เครื่องทดสอบเช่น ความเร็วในการกด การทดสอบการกด ช่วงของโหลดและช่วงของระยะที่กดลงมา เป็นต้น
3. นำกระป๋องมาทดสอบการรับแรงกดจนกระป๋องเกิดการโก่งเดาะครั้งแรก
4. เก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ไปเทียบกับการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ABAQUS



รูปที่ 3.6 การประกอบอุปกรณ์ยึดจับสำหรับการทดสอบภาระกดในแนวแกนเข้ากับ Universal Testing Machine สำหรับทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบการรับภาระ โดยใช้กระป๋องทดสอบ 5 ชิ้น ได้ผลดังตารางที่ 3.2 ซึ่งมีแรงกดในแนวแกนเฉลี่ย 9885 N

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบแรงกดในแนวแกน

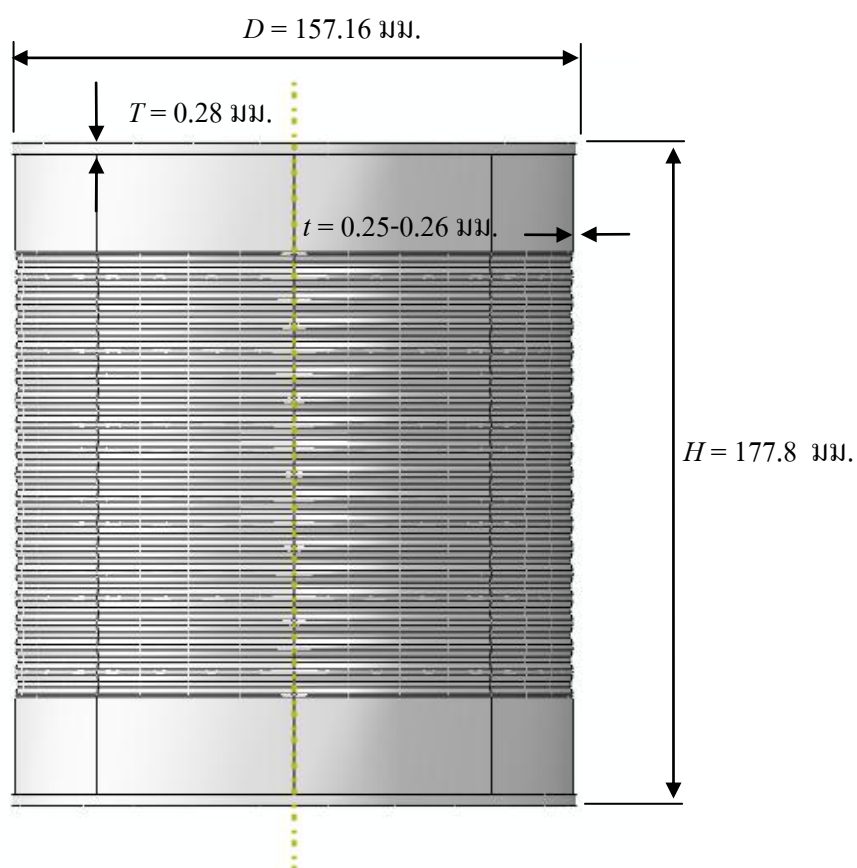
ชิ้นทดสอบ	ความสามารถรับแรงกด (N)
1	9516
2	9925
3	10262
4	9582
5	10137
เฉลี่ย	9885

บทที่ 4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของกระป๋องด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะทำการจำลองการรับโหลดและเงื่อนไขขอบเขตให้เหมือนกับสถานะที่เกิดขึ้นจริงและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์กับผลการทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ หลังจากนั้นจึงใช้แบบจำลองที่ตรวจสอบแล้ว ในการคำนวณการรับแรงเมื่อรูปแบบกระป๋องมีความเปลี่ยนแปลงต่อไป

4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองที่นำมาใช้ในการศึกษานี้มีขนาดและรูปร่างลอนตรงกับที่ได้มาจากโรงงานผลิตกระป๋องบรรจุอาหาร ซึ่งมีขนาดตามมาตรฐาน 603×700 โดยจะสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเชิงพาณิชย์ ABAQUS [1] มีลักษณะและขนาดมิติดังรูปที่ 4.1

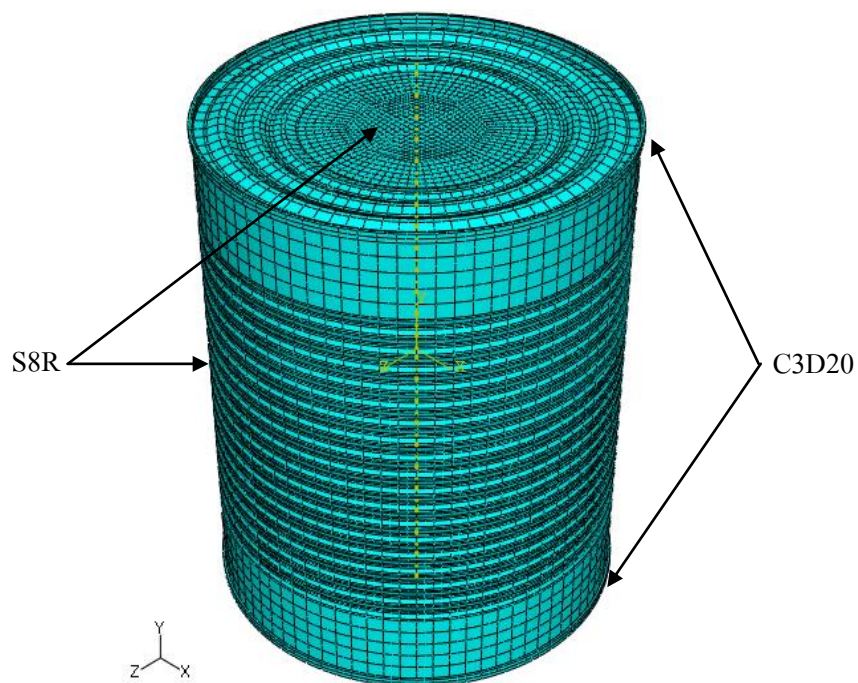


รูปที่ 4.1 ขนาดของกระป๋องที่นำมาทำเป็นแบบจำลองในการวิเคราะห์

4.1.1 ลักษณะการวิเคราะห์

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

ในขณะที่ยังคำนวณภาระจากแรงกดในแนวแกนนั้นจะเริ่มจากการวิเคราะห์แบบ Linear perturbation buckling เพื่อหารูปร่างที่เกิดการโก่งเดาะ แล้วจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์แบบ Riks เพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและระยะที่เปลี่ยนไปและนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างแบบจำลองและการแบ่งเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

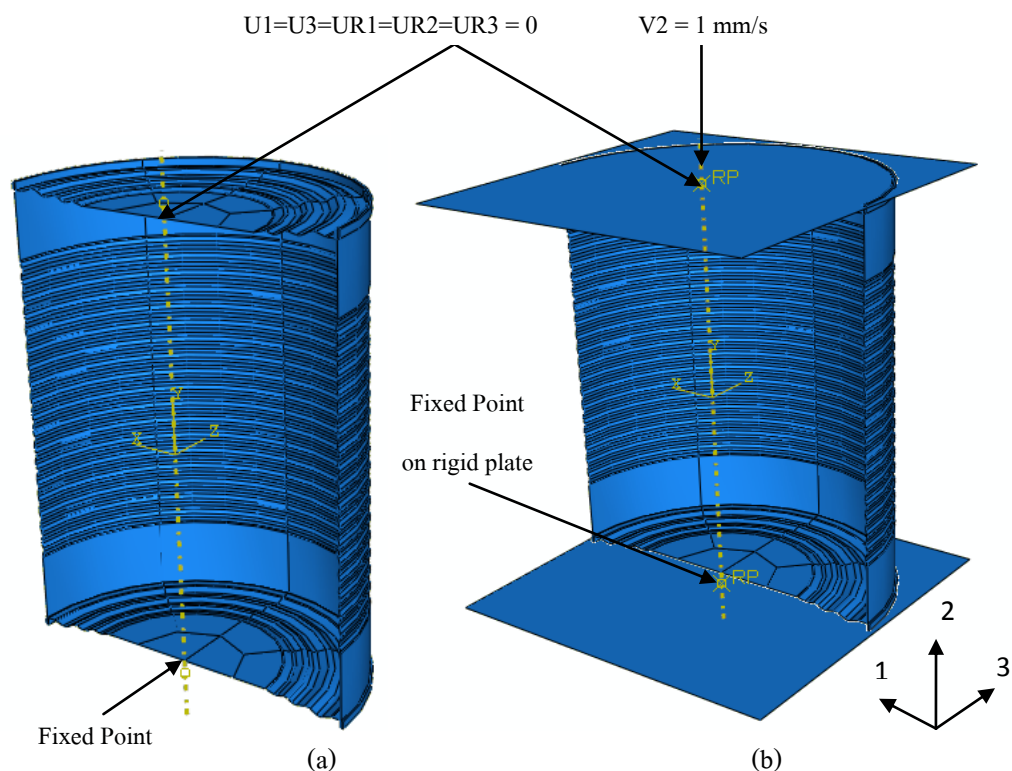
4.1.2 การแบ่งเอลิเมนต์

เอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 มีสองแบบ 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

4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบ

การกำหนดเงื่อนไขขอบสำหรับการวิเคราะห์ความสามารถในการรับความดันสูญญากาศจะกำหนดให้มีจุดยึดแน่นที่จุดศูนย์กลางของฝากระป๋องด้านล่าง ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$) ในส่วนของจุดศูนย์กลางของฝากระป๋องด้านบนนั้นจะกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่และการหมุน ยกเว้นการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ($U_1=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$) ดังรูปที่ 4.3 (a)

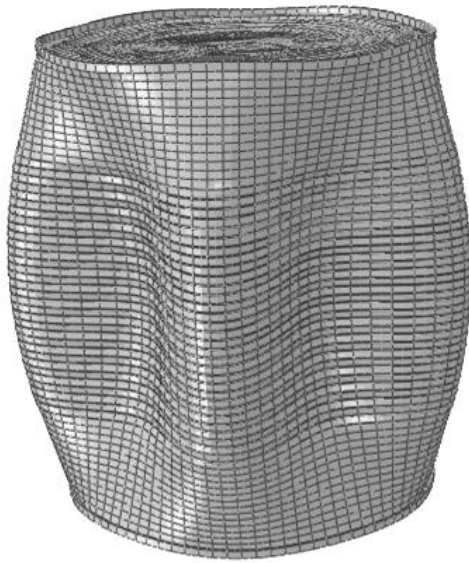
ในขณะที่การวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนนั้นจะจำลองการกดโดยมีแผ่นแข็งเกร็ง (Rigid plate) ประกบด้านบนและล่างของกระป๋องและกำหนดจุดยึดแน่นที่แผ่นแข็งเกร็งแผ่นล่างไว้ ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$) โดยกำหนดให้แผ่นแข็งเกร็งด้านบนสามารถเคลื่อนที่ในแนวตั้งได้เพียงทิศทางเดียว ($U_1=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$) และกำหนดให้แผ่นด้านบนเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็วคงที่ 1 มม./วินาทีโดยสร้างความสัมพันธ์ (Interaction) ของผิวสัมผัสระหว่างขอบบนและล่างของกระป๋องกับแผ่นแข็งเกร็งเป็นแบบผิวที่สัมผัสกันแบบอิสระต่อกัน และความสัมพันธ์ที่ผิวของตัวกระป๋อง กำหนดให้ผิวสามารถสัมผัสกันกันได้ (Self-contact) เนื่องจากจุดที่เกิดการบีบอัดจะเกิดการยุบย่นและจะมีผิวบางส่วนของตัวกระป๋องสัมผัสกันดังรูปที่ 4.3 (b)



รูปที่ 4.3 เงื่อนไขขอบ (a) ความดันสูญญากาศ (b) แรงกดในแนวแกน

4.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการรับความดันสุญญากาศ

การวิเคราะห์ความสามารถในการรับความดันสุญญากาศใช้การวิเคราะห์แบบ Linear perturbation buckling เมื่อให้ความดัน 100 kPa จากนั้นศึกษาคุณสมบัติต่างๆของการเสียหายจากการโก่งเคาะที่เกิดขึ้นกับกระป๋อง เมื่อพิจารณารูปแบบความเสียหาย โหมดแรกที่เกิดการยุบตัวของตัวกระป๋อง มีลักษณะดังรูป 4.4 (a)



(a)



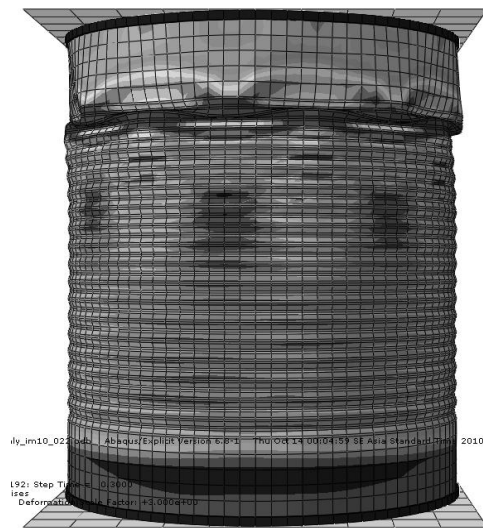
(b)

รูปที่ 4.4 การเสียรูปของกระป๋องจากความดันสุญญากาศจากการวิเคราะห์ด้วย (a) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (b) การทดสอบ

เมื่อเทียบกับรูปร่างความเสียหายของกระป๋องที่ได้จากการทดสอบจะเห็นว่ามิลักษณะรูปร่างการเสียรูปของกระป๋องที่ตรงกัน โดยความสามารถในการรับความดันสุญญากาศที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ 129 kPa ในขณะที่ผลที่ได้จากการทดสอบนั้นมีค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ครั้งเท่ากับ 125 kPa ซึ่งมีความแตกต่างกัน 3.2 เปอร์เซ็นต์

4.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงในแนวแกน

4.3.1 การวิเคราะห์แบบ Explicit dynamics



(a)



(b)

รูปที่ 4.5 การเสียรูปของกระป๋องจากการรับแรงในแนวแกนจากการวิเคราะห์ด้วย

(a) ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Explicit dynamics (b) การทดสอบ

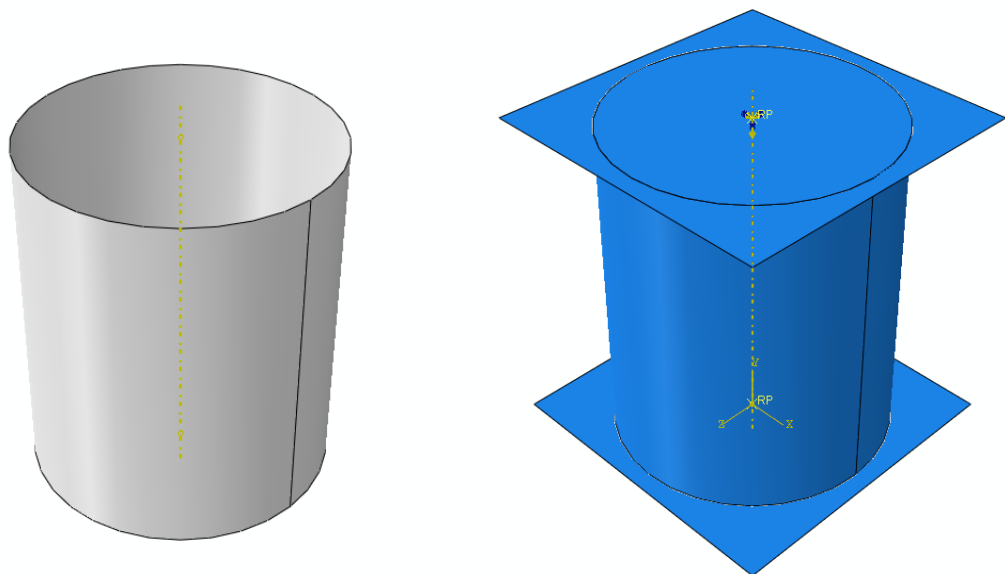
สำหรับการวิเคราะห์แรงกดในแนวแกน จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการวิเคราะห์แบบ Linear perturbation buckling เพื่อศึกษาลักษณะและรูปแบบโหมดในการเกิดความเสียหายจากการโก่งเดาะ ซึ่งการเลือกโหมดเพื่อการวิเคราะห์ส่วนต่อไปจะเลือกโหมดที่มีรูปแบบการเสียหายที่ส่วนของตัวกระป๋องโหมดแรก เนื่องจากเป็นโหมดที่มีภาระการโก่งเดาะน้อยที่สุด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

ผลการวิเคราะห์พบว่า การรับแรงในแนวแกนแบบ Explicit dynamics ดังรูปที่ 4.5 ได้ค่าความสามารถรับแรงกดคือ 10,505 N ในขณะที่ผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าเฉลี่ย 9,885 N มีความแตกต่างกัน 6.27 เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากการวิเคราะห์การรับแรงด้วยการคำนวณแบบ Explicit dynamics ใช้เวลาในการวิเคราะห์นานมาก แต่สำหรับผลจากการวิเคราะห์ที่ต้องการเพียงค่าของโหนดที่ทำให้เกิดการโก่งเคาะ ไม่จำเป็นต้องจำลองผลตามเวลา จึงไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้การนำเอาวิธี Riks ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบสถิตศาสตร์ซึ่งจะเหมาะสมในการคำนวณภาระโก่งเคาะ เมื่อมีพารามิเตอร์ที่ให้ผลต่อขนาดของโหนดที่กระทำเพียงตัวเดียวโดยจะเห็นลักษณะของรูปร่างและผลในขณะที่ผ่านมาการโก่งเคาะไปแล้วและใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยมาก

4.3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Riks

ก่อนที่จะสร้างแบบจำลองกระป๋อง และใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี Riks จะศึกษาและตรวจสอบแบบจำลองและขนาดเอลิเมนต์ที่ต้องใช้ของทรงกระบอกเรียบที่มีความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับกระป๋องที่ใช้ทดสอบและรับแรงกดในแนวแกนดังรูปที่ 4.6 โดยกระป๋องมีความสูง 180 มม. มีรัศมี 80 มม. และความหนา 0.25 มม. โดยใช้ค่าสมบัติวัสดุเช่นเดียวกับวัสดุที่ผลิตกระป๋อง กำหนดเงื่อนไขขอบเขตในลักษณะเดียวกับข้างต้นและหาค่าโหนดวิกฤติ (P_{cr}) จากสมการที่ (2.1) โดยพิจารณาการโก่งเคาะในโหมดที่ 1



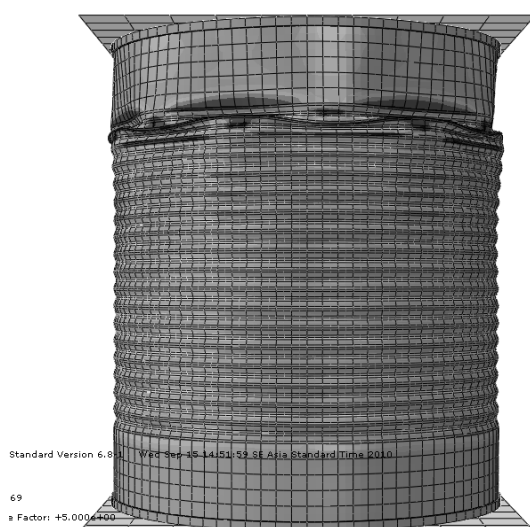
รูปที่ 4.6 แบบจำลองและการกำหนดเงื่อนไขขอบของแบบจำลองทรงกระบอกเรียบ

ตารางที่ 4.1 การหาโหลดวิกฤติของแบบจำลองทรงกระบอกเรียบ

	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

เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นขนาดของเอลิเมนต์มีความสำคัญต่อผลอย่างมาก เอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง แต่การแบ่งเอลิเมนต์ละเอียดมากเกินไปจะเป็นภาระในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ที่เกินจำเป็น จึงต้องมีการทดลองการเข้าสู่ของผลเฉลยเมื่อขนาดของเอลิเมนต์มีขนาดลดลงเพื่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อให้ผลที่ได้นั้นมีค่าถูกต้องและระยะในการคำนวณเหมาะสมที่สุด

จากการปรับขนาดของเอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์โหลดวิกฤติจากแรงในแนวแกนด้วยวิธี Riks นั้นให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลจากการคำนวณด้วยสมการที่ 2.1 จึงเหมาะที่จะนำมาใช้วิเคราะห์การรับแรงในแนวแกนของกระป๋องบรรจุอาหาร และจากการทดสอบการเข้าสู่ของผลการวิเคราะห์ จะเห็นว่าขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมมีขนาดไม่เกิน 5 มม. และจะเลือกใช้กับแบบจำลองกระป๋องที่มีลอนต่อไป

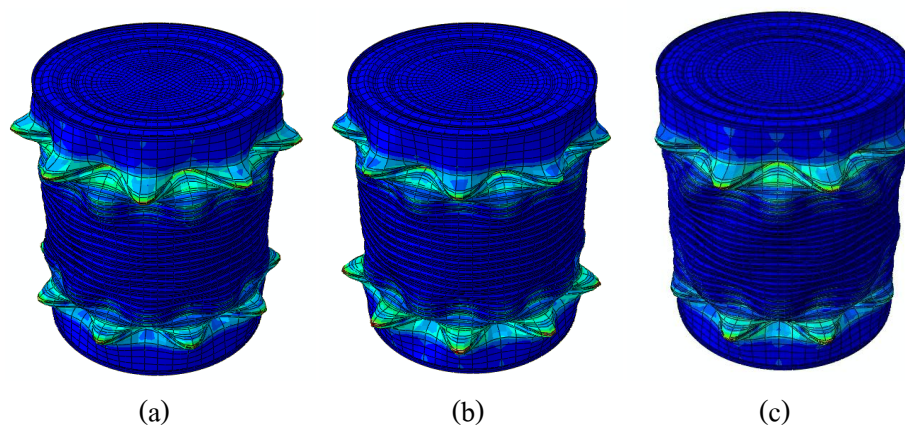


รูปที่ 4.7 การเลือกรูปของกระป๋องจากการรับแรงในแนวแกนแบบ Riks

เมื่อการวิเคราะห์การโก่งเดาะภายใต้แรงกดในแนวแกนด้วยวิธี Riks กับกระป๋องบรรจุอาหารที่มีความหนา 0.26 มม. ผลที่ได้นั้นกระป๋องจะมีการเสียรูปลักษณะเดียวกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Explicit dynamics และการทดสอบดังรูปที่ 4.7 และได้แรงกดในแนวแกนเท่ากับ 10,467 N ซึ่งแตกต่างจากผลการทดสอบ 5.89% และแตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Explicit dynamics อยู่ 0.36%

4.3.3 การศึกษาโหมดการโก่งเดาะที่เกิดขึ้นและค่า Imperfection

ดังที่กล่าวมาแล้วจากข้างต้นว่าในการวิเคราะห์ในลักษณะของการโก่งเดาะนั้นจะต้องทำการวิเคราะห์แบบ Linear perturbation buckling ก่อนเพื่อหาโหมดที่จะนำมาวิเคราะห์ต่อไปในส่วนของ Post-buckling นั้น จะมีรูปแบบของการโก่งเดาะที่เป็นไปได้หลายรูปแบบ ในที่นี้จึงวิเคราะห์ผลของรูปแบบการโก่งเดาะต่อค่าแรงวิกฤติที่คำนวณได้ด้วยวิธี Riks ต่างๆเนื่องจากลักษณะของโหมดที่มีรูปร่างตรงตามลักษณะของการทดสอบจริงนั้นมิได้เกิดขึ้นในโหมดแรก เป็นเพราะรูปร่างของทรงกระบอกเปลือกบางนั้นเป็นรูปร่างที่คาดคะเนรูปแบบของการเสียหายจากการโก่งเดาะได้ยากเมื่อพิจารณารูปแบบของการโก่งเดาะ และค่า Eigenvalue ของโหมดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า ค่า Eigenvalue ในโหมดแรก ๆ มีค่าต่างกันน้อยมาก เมื่อพิจารณารูปแบบความเสียหาย จะเห็นว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาผลของโหลดโก่งเดาะที่คำนวณได้ เมื่อพิจารณาที่โหมดที่ 1, 9 และ 17 พบค่าความเสียหายมีลักษณะต่างกันไม่มาก (ดังรูปที่ 4.9) และมีค่าโหลดวิกฤติต่างกันน้อยมากด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.8 รูปแบบความเสียหาย (a) Mode ที่ 1 (b) Mode ที่ 3 (c) Mode ที่ 5

Imperfection คือความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานหรือวัสดุก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อโหลดการโก่งเดาะ ซึ่งโดยมาก Imperfection ที่เกิดขึ้นจะมีค่าไม่สูงมากนัก แต่ไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงได้ ใน

มาตรฐานการออกแบบโดยทั่วไปนิยมใช้ Imperfection ประมาณ 20% ในการออกแบบ [20] ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาผลต่อโหลดโก่งเดาะเมื่อ Imperfection มีค่า 1%, 10% และ 50% ของความหนา ดังแสดงในตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า Imperfection ตั้งแต่ 1-50% จะมีค่าโหลดวิกฤตต่างกันน้อยมาก

ตารางที่ 4.2 ค่า Eigenvalue ของโหมดต่าง ๆ

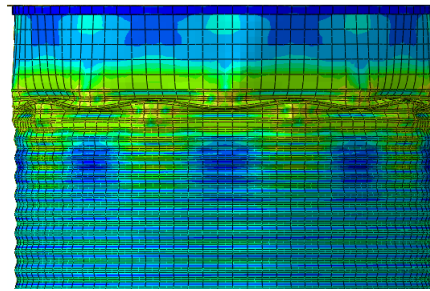
Mode Shape No.	Eigenvalue	Mode Shape No.	Eigenvalue
1	51.397	11	54.191
2	51.397	12	54.191
3	51.425	13	56.472
4	51.425	14	56.472
5	52.544	15	56.484
6	52.545	16	56.484
7	52.553	17	61.014
8	52.553	18	61.014
9	53.896	19	61.686
10	53.896	20	61.700

ตารางที่ 4.3 ผลของค่าความสามารถรับแรงในแนวแกนสูงสุดจากการปรับโหมดและค่า Imperfection

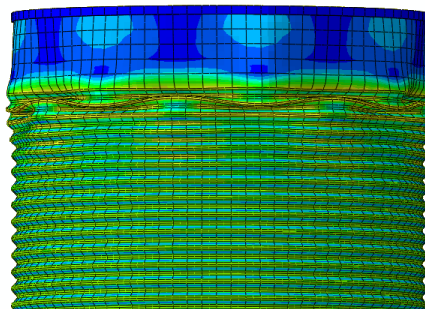
Imperfection	0.01t	0.1t	0.2t	0.5t	% Difference max to min
Mode					
Mode 1	10,585 (N)	10,466 (N)	10,546 (N)	10,419 (N)	1.59%
Mode 5	10,581 (N)	10,552 (N)	10,529 (N)	10,459 (N)	1.16%
Mode 17	10,579 (N)	10,542 (N)	10,510 (N)	10,181 (N)	3.90%
% Difference max to min	0.05%	0.80%	0.34%	2.73%	

จากตารางจะสังเกตได้ว่าการเลือกโหมดต่าง ๆ นั้นมีค่าของแรงในแนวแกนต่างกันสำหรับทุก ๆ ค่า Imperfection อยู่ไม่เกิน 3% ส่วนการปรับเปลี่ยนค่า Imperfection นั้นจะเห็นว่ามิผลจากแรงใน

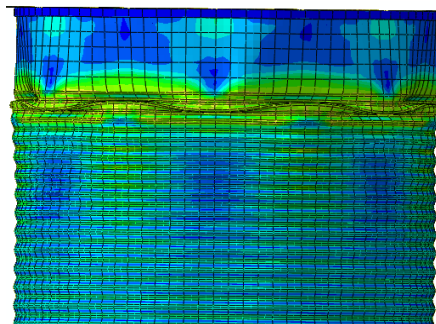
แนวแกนต่างกันไม่เกิน 4 % ซึ่งถือว่าน้อยมาก แต่เนื่องจากส่วนที่มีค่า Imperfection ที่ต่ำกว่า 10 % จะเริ่มมีความคงที่ของแรงกดในแนวแกนจึงสามารถใช้ค่า Imperfection ที่ 10 % ได้ สำหรับโหมดที่ใช้ นั้นก็ไม่มี ความแตกต่างกันมาก จึงไม่มีผลสำหรับการวิเคราะห์ โดยแสดงรูปที่ 4.9-4.11 แสดงผลที่ได้ จากโหมดที่ 1, 9 และ 17 ซึ่งมีลักษณะไม่ต่างกันมาก ซึ่งมีค่า Eigenvalue (ดังตารางที่ 4.2) จึงสามารถ กำหนดให้ใช้โหมดเดียวกันสำหรับทุก ๆ การวิเคราะห์ โดยจะเลือกให้ใช้โหมดแรกสำหรับการ วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ต่อไป



รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์การ โกงเดาะด้วยวิธี Riks โดยมี Imperfection ใน Mode ที่ 1



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์การ โกงเดาะด้วยวิธี Riks โดยมี Imperfection ใน Mode ที่ 9

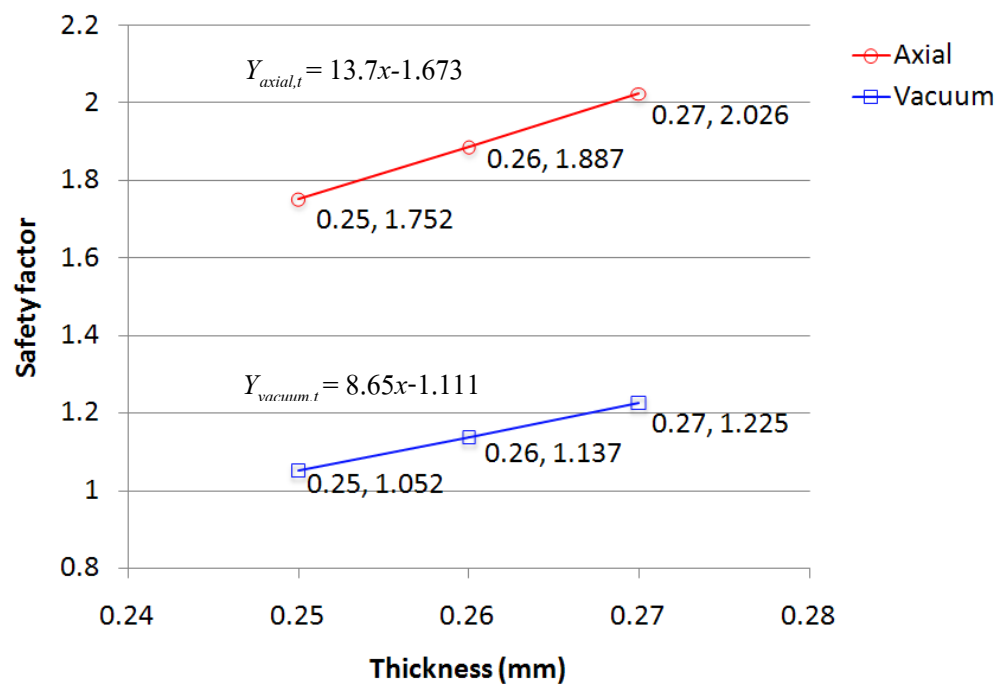


รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์การ โกงเดาะด้วยวิธี Riks โดยมี Imperfection ใน Mode ที่ 17

เมื่อเปรียบเทียบผลแรงโก่งเคาะที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการวิเคราะห์แบบ Explicit dynamics และวิธี Riks กับผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน โดยมีความแตกต่างกันน้อยกว่า 7% แสดงดังตารางที่ 4.4 จึงสามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆของลอนกระป๋องเพื่อออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของลอนกระป๋องในการใช้งานต่อไป

ตารางที่ 4.4 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



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองของความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความหนาของตัวกระป๋อง

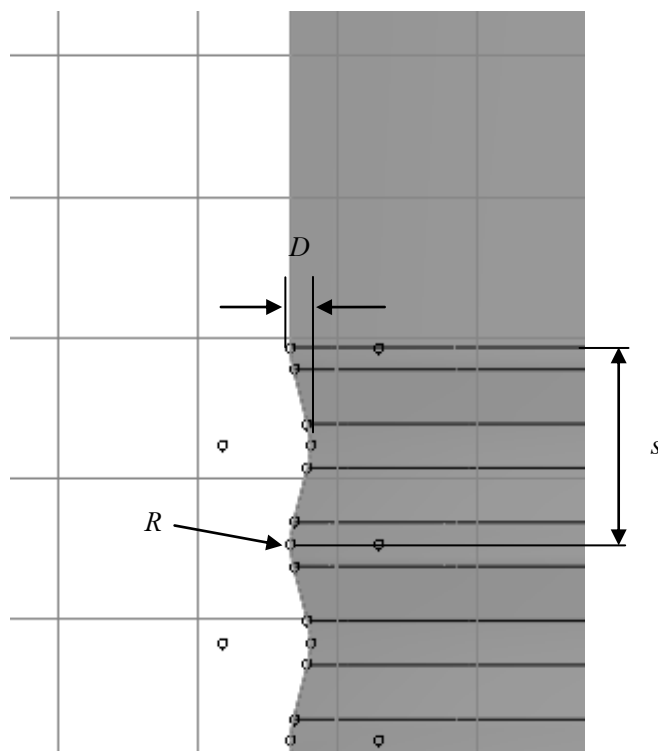
เมื่อคำนึงถึงความหนาของกระป๋องบรรจุอาหาร ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญและมีผลต่อความแข็งแรงของกระป๋อง แต่เนื่องจากแนวโน้มของความแข็งแรงจะแปรผันตรงกับความหนาของกระป๋อง และจากการศึกษาแนวโน้มของความหนาที่มีต่อความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4.12

นอกจากนี้ เมื่อดูจากสมการที่ได้ จะเห็นว่าความชันของกราฟมีค่า 8.65 สำหรับการรับความดันสุญญากาศ และ 13.7 สำหรับการรับแรงกดในแนวแกน แสดงว่าการลดความหนาของกระป๋องส่งผลต่อการลดลงของความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนมากกว่าและสามารถนำความชันที่ได้จากแต่ละผลตอบแทนมาทำนายสัดส่วนความปลอดภัยของกระป๋องที่ได้จากการออกแบบลอนกระป๋อง โดย RSM

บทที่ 5 การออกแบบลอนด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

บทนี้จะกล่าวถึงการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของลอนกระป๋องเพื่อออกแบบให้ได้กระป๋องที่มีรูปร่างเหมาะสมที่สุด โดยมีความสามารถในการรับความดันสุญญากาศ และแรงในแนวแกนได้ตามที่ต้องการ ในขณะที่ใช้วัสดุในการผลิตน้อยที่สุดมีตัวแปรที่สนใจ 4 ตัวแปร คือ ระยะห่างระหว่างลอน (S), รัศมีลอน (R), ความลึกลอน (D) และจำนวนลอน (N) ดังรูปที่ 5.1 ในที่นี้ระยะระหว่างลอนจะมีค่าเป็น 2 เท่าของระยะครึ่งลอน (s) ที่กล่าวในบทที่ 3

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



รูปที่ 5.1 พารามิเตอร์ในการปรับเปลี่ยนรูปแบบลอน

5.1 การวิเคราะห์ด้วย Two-Level Factorial Design

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

จำนวนครั้งของการทดลองทั้งหมด สำหรับ Full factorial คือ 2^4 ครั้ง (16 กรณี) ดังตารางที่ 5.1 ค่า + และ - หมายถึงค่าสูงและค่าต่ำ (ตามลำดับ) ของแต่ละตัวแปร ดังนั้นการศึกษาผลของการปรับค่าภายในช่วงของตัวแปรที่กำหนดไว้จึงมีความครบถ้วนในการเปรียบเทียบกันและสามารถวิเคราะห์ผลเพื่อศึกษาผลกระทบต่ตัวแปรต่างๆได้ในที่สุดความสามารถในการรับความดันสูญญากาศ และแรงในแนวแกน สำหรับทั้ง 16 กรณี ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในบทที่ 4 โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรและผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 2^4 full factorial designs

Analysis point	Coded variables				Natural variables			
	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>D</i>	<i>N</i>	<i>S</i> (mm)	<i>R</i> (mm)	<i>D</i> (mm)	<i>N</i>
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

ตารางที่ 5.2 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

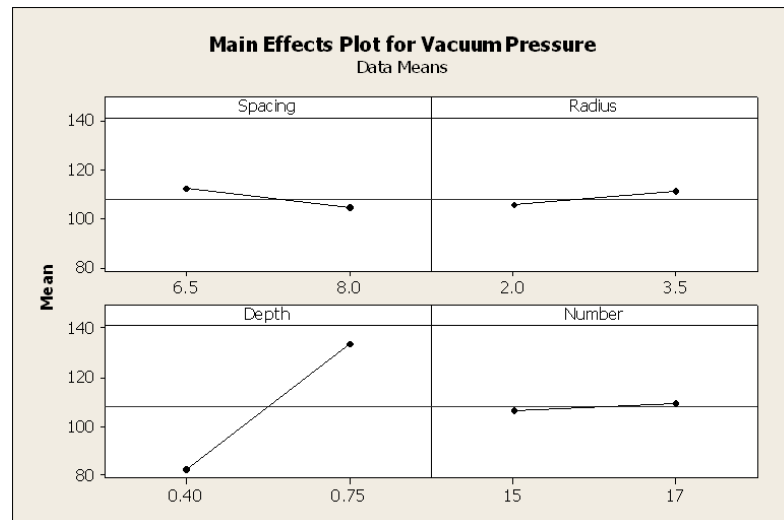
เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ ผลกระทบ (Effect) ของตัวแปรหลัก และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จากสมการที่ 2.9 สำหรับความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนจะได้ผลดังตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าค่าผลกระทบที่ได้นั้นมีทั้งค่าบวกคือผลกระทบของตัวแปรทางด้านบวกที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าสูงขึ้น และค่าลบซึ่งตัวแปรและผลตอบสนองแปรผกผันกัน

เมื่อนำค่าผลกระทบของแต่ละตัวแปรและผลกระทบของความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ มาวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปร จะเห็นว่าความลึกกลอน (D) นั้นมีค่าผลกระทบสูงที่สุดทั้งสองผลตอบสนอง แต่ลักษณะของค่าผลกระทบนั้นจะต่างกัน คือที่ความดันสุญญากาศจะให้ผลตอบสนองสูงขึ้นเมื่อมีความลึกกลอนสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาแรงกดในแนวแกนผลตอบสนองจะผกผันกับค่าความลึกกลอน เช่นเดียวกับรัศมีกลอน (R) ระยะห่างระหว่างลอน (S) นั้นจะให้ผลตรงกันข้ามกับความลึกกลอนและรัศมีกลอนทั้งสองกรณี กล่าวคือ ระยะห่างระหว่างลอนที่มีค่ามาก จะทำให้ความสามารถในการรับความดันสุญญากาศน้อยลง แต่ทำให้ความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนสูงขึ้น (รูปที่ 5.2 และ 5.3)

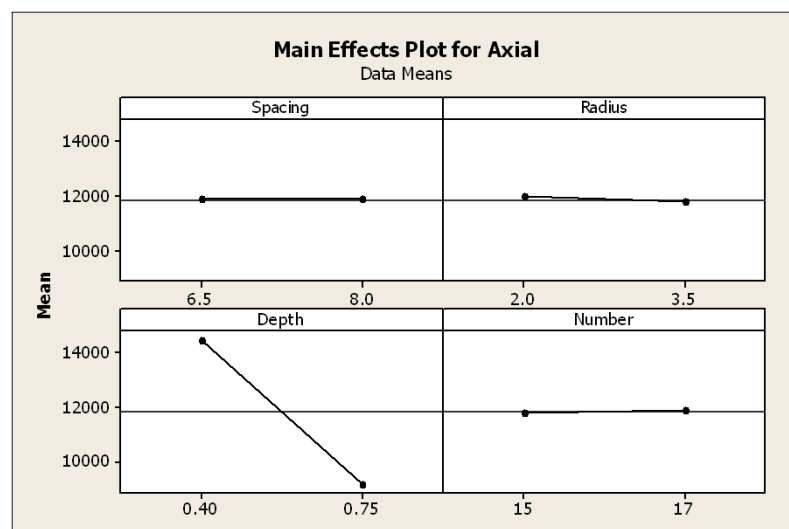
ในขณะที่จำนวนลอนนั้นมีผลกระทบน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น ๆ สำหรับทั้งสองผลตอบสนอง และลักษณะของผลกระทบต่อผลตอบสนองทั้งสองชนิดคือเป็นไปในทางบวกลักษณะของกระทบจากตัวแปรหลักทั้ง 4 ตัวแปรต่อการรับความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนแสดงดังรูปที่ 5.2 และ 5.3

ตารางที่ 5.3 Estimated Effects and Coefficients (coded units)

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



รูปที่ 5.2 ผลความดันสูญญากาศจากการปรับเปลี่ยนโมเดลที่จุดต่าง ๆ



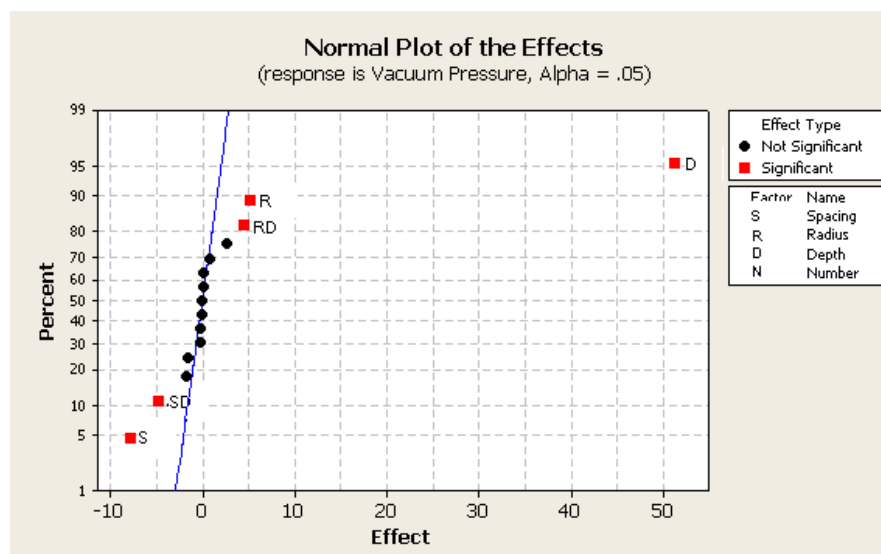
รูปที่ 5.3 ผลของการรับแรงในแนวแกนจากการปรับเปลี่ยนโมเดลที่จุดต่าง ๆ

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

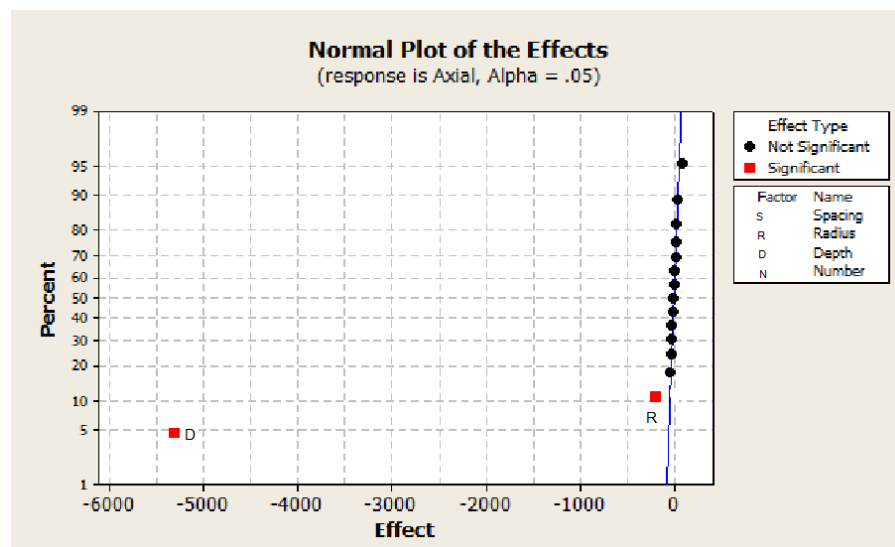
จากกราฟแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติของความดันสูญญากาศ แสดงดังรูปที่ 5.4 ซึ่งตัวแปรที่สำคัญ มีทั้งตัวแปรหลักและตัวแปรร่วมโดยตัวแปรหลักได้แก่ความลึกกลอน ระยะห่างระหว่างลอน และรัศมีลอนตัวแปรร่วมที่มีความสำคัญได้แก่ตัวแปรความลึกกลอนกับระยะห่างระหว่างลอนและตัว

แปรความลึกลอนกับรัศมีลอนจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ผลต่อความสามารถในการรับความดัน
สูญญากาศนั้นจำนวนลอนเป็นตัวแปรหลักและตัวแปรร่วมที่ไม่มีความสำคัญกับผลตอบสนอง

เมื่อพิจารณาความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนนั้น กราฟแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ
เป็นดังรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มีความสำคัญมากคือ ความลึกลอนและรัศมีลอน และ
ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ นั้นไม่มีความสำคัญต่อผลตอบสนอง



รูปที่ 5.4 ผลกระทบต่อการรับความดันสูญญากาศจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปร



รูปที่ 5.5 ผลกระทบต่อการรับแรงในแนวแกนของการเปลี่ยนแปลงตัวแปร

เมื่อพิจารณาถึงผลต่อการรับความดันสัญญาณและแรงในแนวแกนจะเห็นว่า ตัวแปรที่สำคัญมีทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ ความลึกลอน, รัศมีลอนและระยะห่างระหว่างลอน ในขณะที่จำนวนลอนที่ใช้มีความสำคัญน้อยต่อการรับแรง และส่งผลต่อการรับแรงทั้งสองไปในทิศทางเดียวกัน คือ จำนวนลอนที่มากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการรับแรงทั้งสองดีขึ้น จึงสามารถตัดตัวแปรจำนวนลอนจากการออกแบบตัวแปรลอนและใช้จำนวนลอนค่ามาก คือ 17 ลอนในการออกแบบต่อไป

ในส่วนต่อไปเป็นการใช้วิธี Steepest ascent เพื่อหาขอบเขตที่เหมาะสมในการใช้ค่าที่เหมาะสมที่สุดจะสนใจตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัว คือ ความลึกลอน, รัศมีลอนและระยะห่างระหว่างลอน

5.2 การหาขอบเขตค่าสูงสุดด้วยวิธี Steepest ascent

จากผลการวิเคราะห์จาก Two-level factorial design พบว่า ความลึกลอนเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อผลตอบแทนทั้ง ความดันสัญญาณและการรับแรงในแนวแกนสูงที่สุด โดยมีผลการทดสอบสูงกว่าตัวแปรอื่น ๆ มาก ในกระบวนการ Steepest ascent จะกำหนดขอบเขตตัวแปรใหม่โดยลดขอบเขตของความลึกลอนลงเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 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) ด้วยค่าผลกระทบของตัวแปรต่างๆ เนื่องจากสามารถลำดับขั้นที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์ 4 ค่า จึงต้องใช้ผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนทั้งหมด 4 จุด และเป็นค่าสูงและค่าต่ำ ดังตารางที่ 5.5 ได้ผลการวิเคราะห์การรับแรงทั้งสองจาก FEM แสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.5 แนวทางการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการหาค่าผลกระทบของตัวแปร

Run	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>D</i>
1	-	-	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	+

ตารางที่ 5.6 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

จากตารางที่ 5.6 สามารถแยกการวิเคราะห์โดยกระบวนการ Steepest ascent ออกเป็นสองส่วนควบคู่กันไปคือความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกน

สำหรับการออกแบบจะใช้ค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Safety factor, SF) ของกระป๋องแทนการใช้ค่าความสามารถในการรับแรง เนื่องจากในการออกแบบเราต้องการให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยทั้งสองมีค่าสูงสุด ในขณะที่การปรับเปลี่ยนตัวแปร จะทำให้สัดส่วนความปลอดภัยแปรผกผันกัน เพื่อให้กระป๋องบรรจุอาหารสามารถรับแรงได้สูงสุด 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

5.2.1 Steepest ascent สำหรับความดันสุญญากาศ

ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 5.6 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามในรูปแบบตัวแปรสัญลักษณ์ (Coded variable) คือ ระยะห่างระหว่างลอน (x_1), รัศมีลอน (x_2), ความลึกลอน (x_3) ต่อผลตอบสนองของการรับความดันสุญญากาศ (Y_{vacuum}) ได้ดังนี้

$$Y_{vacuum} = 122.3 - 4.1x_1 + 2.35x_2 + 4.85x_3 \quad (5.1)$$

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

$$Y_{SF,vacuum} = 1.529 - 0.051x_1 + 0.029x_2 + 0.061x_3 \quad (5.2)$$

เมื่อนำสมการข้างต้นเข้าสู่กระบวนการ Steepest ascent แล้ว จะได้ค่า Δ_v สำหรับผลตอบสนองทั้งสองจากการคำนวณด้วยสมการ 2.12 แสดงค่าดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 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 5.7 จะเห็นว่าตัวแปรที่มีผลกระทบมากที่สุดสำหรับความดันสุญญากาศได้แก่ ความลึกลอน และทั้งสามตัวแปรนั้น มีผลกระทบไม่ต่างกันมากนัก ทำให้ค่า Δ_v สำหรับการปรับเปลี่ยนแบบจำลองในกระบวนการ Steepest ascent แต่ละตัวแปรมีผลมากต่อการปรับเปลี่ยนแบบจำลองทั้งหมดโดยที่ค่าปรับเปลี่ยนของระยะห่างระหว่างลอนนั้นมีค่าเป็นลบ แสดงถึงการแปรผกผันกันระหว่างค่าของระยะห่างระหว่างลอนกับผลของความดันสุญญากาศ ส่วนรัศมีลอนและความลึกลอนนั้นมีค่าเป็นบวก จึงแปรผันตรงกับความดันสุญญากาศ ผลจากวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง FEM จากกระบวนการ Steepest ascent สำหรับความดันสุญญากาศนั้นแสดงในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 Steepest ascent สำหรับความดันสุญญากาศ

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 5.8 จะเห็นว่าความดันสุญญากาศจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากที่มีการปรับแบบจำลองตามกระบวนการ Steepest ascent ของผลตอบสนองความดันสุญญากาศ แต่เมื่อพิจารณาผลต่อการรับแรงกดในแนวแกน จะเห็นว่าความสามารถในการรับแรงในแนวแกนมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เกือบถึงขอบเขตค่าที่ยอมรับได้ ($SF_{axial} = 1.25$) นอกจากนี้ หากมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรมากกว่านี้ (แบบจำลอง Base + 3 Δ_v) จะไม่สามารถสร้างแบบจำลองได้ เนื่องจากระยะห่างระหว่างลอนน้อย ในขณะที่รัศมีความโค้งและความลึกลอนมีค่ามากเกินไป ดังจะสามารถตรวจสอบได้จากการนำค่าของตัวแปรจากแบบจำลองมาคำนวณค่าในเครื่องหมายรากที่สองของสมการที่ 3.8 $(4R^2(D - 2R)^2 - 4((D - 2R)^2 + s^2)(4R^2 - s^2))$ หรือค่าในเครื่องหมายรากที่สองของสมการ 3.11 $(6R^2s^2 - 4((D - 2R)^2 + s^2)(4R^2 - (D - 2R)^2))$ ซึ่งหากผลเป็นค่าลบ แสดงว่าไม่มีจำนวนจริงที่ให้ผลมุม θ และระยะ l ในสมการได้ ดังนั้นจึงเป็นค่าตัวแปรที่ไม่สามารถเป็นไปได้อีก

เมื่อทดสอบแทนค่า จากตัวแปรในแบบจำลองทั้ง 4 แบบจำลองลงในสมการในเครื่องหมายรากที่สองของสมการ 3.8 และ 3.11 จะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 5.9 พบว่าแบบจำลอง Base + 3 Δ_v มีค่าติดลบทั้งสองสมการ แสดงว่าไม่สามารถสร้างแบบจำลองได้ กระบวนการ Steepest ascent สำหรับความดันสุญญากาศจึงสามารถสร้างได้เพียงสองแบบจำลองเท่านั้น

ตารางที่ 5.9 การตรวจสอบแบบจำลองเพื่อหลีกเลี่ยงการออกแบบที่เกินขีดจำกัดของการผลิต

Analysis point	$s^*(\text{mm})$	$R \text{ (mm)}$	$D \text{ (mm)}$	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 (3.8) และ (3.11) เป็นระยะครึ่งลอน ซึ่งคำนวณได้จาก $S/2$

5.2.2 Steepest ascent สำหรับ แรงกดในแนวแกน

ในทำนองเดียวกันเมื่อนำผลที่ได้จากตารางที่ 5.7 มาสร้างสมการความสัมพันธ์ของตัวแปร ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอนและความลึกลอนในรูปแบบตัวแปรสัญลักษณ์กับแรงกดในแนวแกน (Y_{axial}) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Y_{axial} = 11443.5 - 0.5x_1 - 74.5x_2 - 435.5x_3 \quad (5.3)$$

หรือในผลตอบสนองในการคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยของการรับแรงกดในแนวแกน

$$Y_{SF,axial} = 1.372 - 0.00006x_1 - 0.009x_2 - 0.052x_3 \quad (5.4)$$

เมื่อนำสมการข้างต้นเข้าสู่กระบวนการ Steepest ascent แล้ว จะได้ค่า Δ_u สำหรับการคำนวณดังตารางที่ 5.10

จากตารางที่ 5.10 จะได้ค่า Δ_u เป็นค่าลบทั้งสามตัวแปรแสดงว่าการเข้าสู่ช่วงขอบเขตของตัวแปรที่ทำให้แรงกดในแนวแกนมีผลตอบสนองสูงขึ้นนั้นจะต้องลดค่าของตัวแปรทั้งสามตัว โดยสังเกตได้ว่าตัวแปรที่มีผลกระทบมากที่สุดและเป็นตัวแปรหลักสำหรับการปรับเปลี่ยนแบบจำลองที่ได้จากค่า Δ_u นั้นคือความลึกลอน นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าระยะห่างระหว่างลอนมีผลต่อกำลังรับแรงกดในแนวแกนน้อยมาก สังเกตจากค่า Δ_u ของตัวแปรระยะห่างระหว่างลอนที่มีค่าน้อยกว่าตัวแปรอื่น ๆ มาก ซึ่งผลที่ได้จากกระบวนการ Steepest ascent นั้นสามารถสร้างแบบจำลองใหม่และได้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM แสดงดังในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.10 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

ตารางที่ 5.11 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 5.11 จะเห็นว่าผลตอบสนองที่กำลังศึกษา (แรงกดในแนวแกน) จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากที่มีการปรับแบบจำลองแต่ความสามารถในการรับความดันสุญญากาศจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ และที่แบบจำลอง Base+3 Δ_a ค่าสัดส่วนความปลอดภัยของความดันสุญญากาศมีค่าน้อยกว่า 1.25 จึงไม่ควรนำมาใช้ ในทำนองเดียวกันกับกรณีข้างต้น จะสังเกตเห็นว่าผลตอบสนองที่สูงที่สุดของความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนนั้นจะไปในทิศทางตรงข้ามกัน

5.2.3 ช่วงที่ให้ผลตอบสนองที่เหมาะสมจาก Steepest ascent

จากวิธีการ Steepest ascent จะเห็นว่าแบบจำลองต่าง ๆ ที่ได้ขึ้นมาใหม่นั้น ตัวแปรต่าง ๆ นั้นจะมีค่าอยู่เข้าสู่ช่วงที่ให้ผลตอบสนองที่สูงขึ้น

เมื่อสังเกตจากตารางที่ 5.8 จะได้ว่าความดันสูญญากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนแรงกดในแนวแกนนั้นจะมีค่าลดลง เมื่อจำกัดค่าสัดส่วนความปลอดภัยภายใต้แรงกดในแนวแกนที่ 1.25 แบบจำลองที่ได้จะอยู่ในแบบจำลอง Base+2 Δ_u ขอบเขตตัวแปรที่ควรใช้ในการศึกษา ที่ได้ คือ ระยะห่างระหว่างลอนไม่น้อยกว่า 6.15 มม. รัศมีลอนไม่เกิน 3.47 มม. และความลึกลอนไม่เกิน 0.63 มม.

ในทำนองเดียวกันตารางที่ 5.11 จะได้ว่า แรงกดในแนวแกนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ความดันสูญญากาศมีค่าลดลง เมื่อจำกัดค่าสัดส่วนความปลอดภัยใต้ความดันสูญญากาศไม่ต่ำกว่า 1.25 ขอบเขตที่ได้จะอยู่ในแบบจำลองที่ Base+2 Δ_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. ส่วนระยะห่างระหว่างลอนนั้นมีการลู่เข้าทางด้านลบทั้งสองการทดลอง โดยมีค่าน้อยกว่า 6.15 มม. และ 6.99 มม. ซึ่งค่าที่ต่ำ จะส่งผลให้ความสามารถในการรับภาระดีกว่า ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างลอนมีค่า 6.15-7.00 มม.

5.3 การวิเคราะห์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

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

5.3.1 Central Composite Design 3 ตัวแปร

สำหรับการวิเคราะห์โดย CCD 3 ตัวแปรซึ่งมีตัวแปรที่ต้องการคือ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน และความลึกลอน โดยกำหนดขอบเขตการปรับเปลี่ยนที่ ระยะห่างระหว่างลอน 6.15-7.00 มม. รัศมีลอน 2.5 - 3.47 มม. และความลึกลอน 0.51-0.63 มม. โดยกำหนดให้มีจำนวนลอนคงที่ที่ 17 ลอน ในกระบวนการ CCD การออกแบบการทดลองนั้นจะทำการปรับค่าตัวแปรทั้งหมดโดยจะใช้จุดกึ่งกลางของขอบเขตแต่ละตัวแปรเป็นจุดศูนย์กลางและจะได้การทดลองทั้งหมดดังตารางที่ 5.12 โดยที่ ค่า -1 และ 1 คือขอบเขตล่างและขอบเขตบนของตัวแปรสัญลักษณ์ จากนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์การรับความ

คั้นสุญญากาศ และแรงกดในแนวแกน โดยวิธี FEM แล้ว จะได้ผลตอบสนองของค่าสัดส่วนความ
ปลอดภัย ดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.12 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

ตารางที่ 5.13 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

5.3.1.1 Central Composite Design สำหรับความดันสุญญากาศ

จากตาราง 5.13 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ของความสามารถการรับความดันสุญญากาศ (Y_{vacuum}) กับตัวแปรสัญลักษณ์ของระยะห่างระหว่างลอน, รัศมีลอนและความลึกลอน ด้วยสมการลำดับขั้นที่สอง เป็น

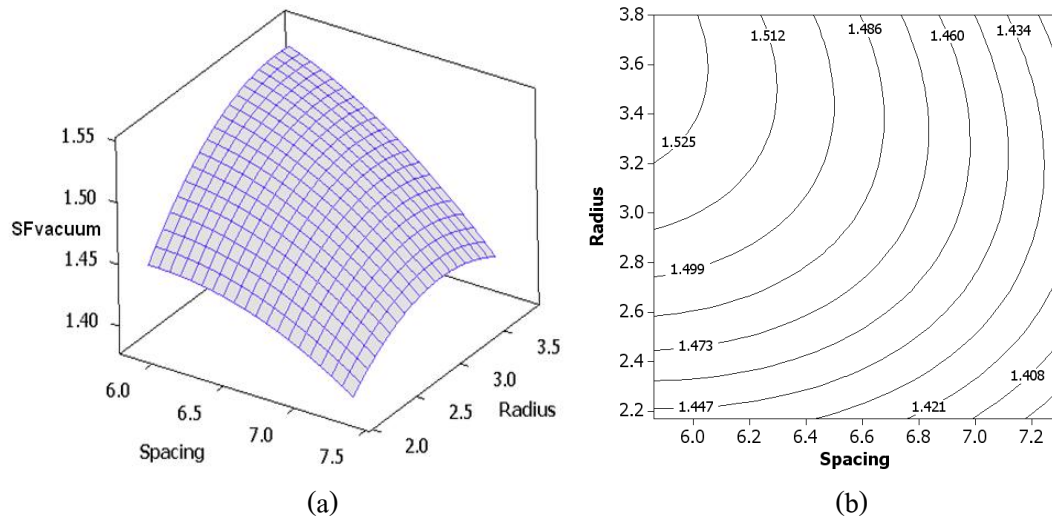
$$Y_{vacuum} = 118.877 - 2.079x_1 + 1.389x_2 + 9.125x_3 - 0.417x_1^2 - 0.788x_2^2 - 3.192x_3^2 - 0.45x_1x_2 - 0.225x_1x_3 - 0.45x_2x_3 \quad (5.5)$$

และสมการพื้นผิวของสัดส่วนความปลอดภัยภายใต้ความดันสุญญากาศเป็น

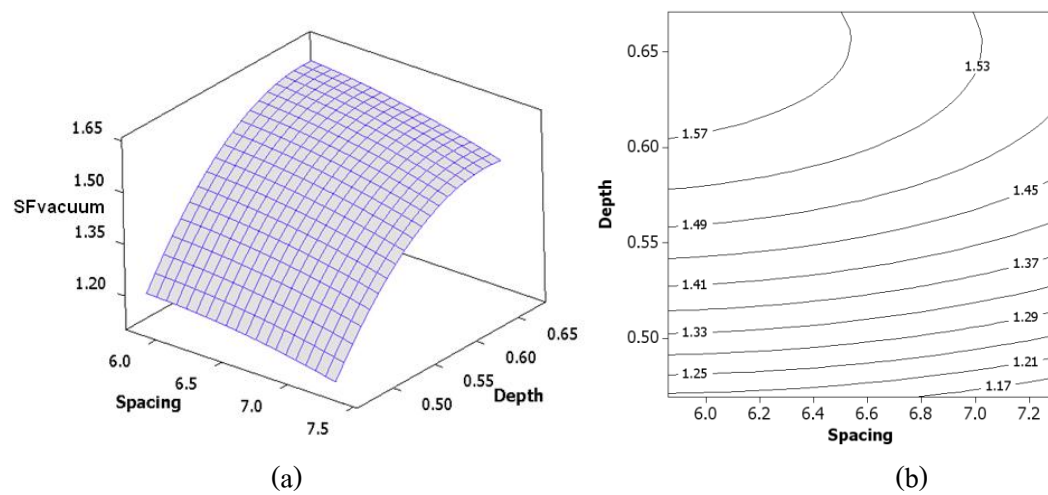
$$Y_{SF,vacuum} = 1.486 - 0.026x_1 + 0.017x_2 + 0.114x_3 - 0.005x_1^2 - 0.009x_2^2 - 0.039x_3^2 - 0.006x_1x_2 - 0.003x_1x_3 - 0.006x_2x_3 \quad (5.6)$$

จากสมการข้างต้นสามารถสร้างผลตอบสนองของค่าความดันสุญญากาศได้ในลักษณะของพื้นผิวตอบสนองและแบบ Contour plot โดยสมการลำดับขั้นที่สองที่ใช้ในการวาดกราฟนั้นจะมีผลตอบสนองใกล้เคียงกับผลจริงมาก เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2 , Coefficient of determination) เท่ากับ 98.23% อธิบายได้ว่า ผลของความดันสุญญากาศที่ได้เป็นผลหรืออิทธิพลจากตัวแปร 98.23% ส่วนที่เหลืออีก 1.77% เป็นผลจากตัวแปรหรือปัจจัยอื่นที่ไม่ทราบได้ ดังนั้นหากมีสมการมีค่า R^2 ยิ่งสูงเท่าใด ความแม่นยำของการนำสมการไปใช้เพื่อทำนายหรือคาดคะเนผลลัพธ์ย่อมมีสูงมากยิ่งขึ้นโดยทั่วไป สมการที่มักนำไปใช้ควรมีค่า R^2 อย่างน้อย 0.75 หากสูงกว่า 0.90 ถือว่าดีมาก อย่างไรก็ตามค่า R^2 เป็นการประมาณความถูกต้องในการวาดกราฟที่เกินจริง จึงมักใช้ค่า R^2 -adjusted ในการวัดความถูกต้องในการวาดกราฟแทนเนื่องจากค่า R^2 จะอ่อนไหวต่อขนาดของกลุ่มตัวอย่างและจำนวนของตัวแปรซึ่งจะประมาณค่าสหสัมพันธ์พหุคูณของผลตอบสนองได้สูงเกินความเป็นจริง โดยทั่วไป R^2 -adjusted จะมีค่าต่ำกว่าค่า R^2 เล็กน้อย ซึ่งจากสมการที่ได้มีค่า 96.63% แสดงว่าสมการที่ใช้สำหรับสร้างพื้นผิวตอบสนองความดันสุญญากาศมีความน่าเชื่อถือสูงมาก และมีค่าความแตกต่างของผลตอบสนอง (P-value) ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.001 แสดงว่าสมการที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากสำหรับการนำมาวาดพื้นผิวตอบสนอง หาก P มีค่ามากกว่า 0.05 จะหมายถึงตัวแปรที่กำหนดไว้ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับข้อมูลดังกล่าวหรือค่า R^2 เท่ากับ 0 นั่นเอง

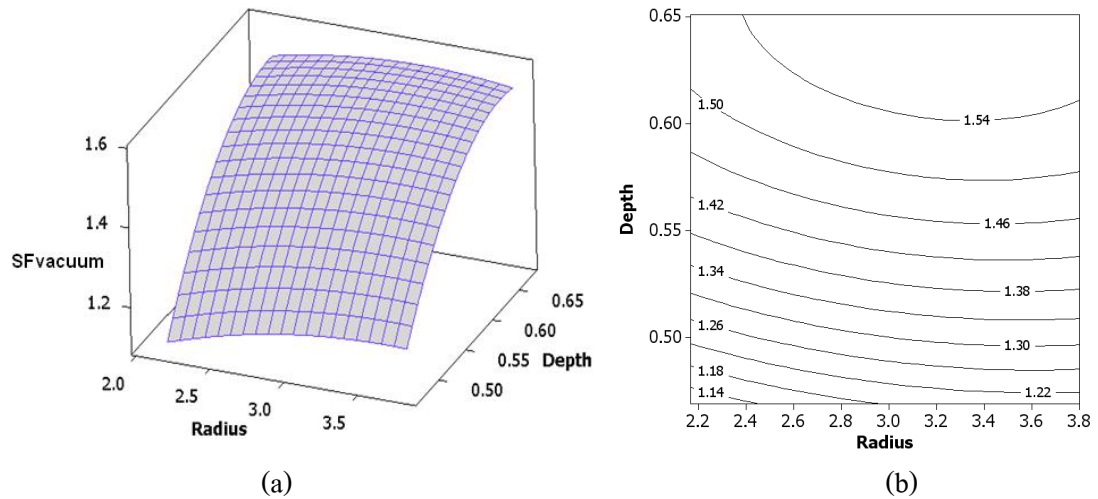
จากตัวแปรทั้งหมด 3 ตัวแปร สามารถแบ่งการวาดกราฟออกเป็น 3 กราฟ โดยมีความดันสุญญากาศเป็นแกนตั้งและมีคู่ตัวแปรในแกนตั้งจากกับผลตอบสนอง โดยแบ่งออกเป็น ระยะห่างระหว่างลอนกับรัศมีลอน ระยะห่างระหว่างลอนกับความลึกลอน และ รัศมีลอนกับความลึกลอน แสดงดังรูปที่ 5.6, 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงผลการตอบสนองอย่างละเอียดภายในขอบเขตที่ทดลอง



รูปที่ 5.6 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยความดันสุญญากาศจากผลของระยะห่างระหว่างลอนกับรัศมีลอนเมื่อให้ความลึกลอนคงที่ 0.57 มม.



รูปที่ 5.7 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยความดันสุญญากาศจากผลของระยะห่างระหว่างลอนกับความลึกลอนเมื่อให้รัศมีลอนคงที่ 2.985 มม.



รูปที่ 5.8 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยความดันสูญญากาศจากผลของรัศมีลอนกับความลึกลอนเมื่อให้ระยะห่างระหว่างลอนคงที่ 6.5 มม.

จากรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างลอนและรัศมีลอนจะให้ผลการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากลักษณะความชันของพื้นผิวตอบสนอง หรือลักษณะการกระจายตัวของผลตอบสนอง จาก Contour plot จะมีลักษณะค่อนข้างสมมาตรกันทั้งสองตัวแปร ซึ่งต่างจากรูปที่ 5.7-5.8 ที่ลักษณะของพื้นผิวตอบสนองจะมีความชันสูงจากการปรับเปลี่ยนความลึกลอน หรือลักษณะการกระจายตัวของผลตอบสนองจาก Contour plot จะมีแนวโน้มที่มากกว่าทั้งระยะห่างระหว่างลอนและรัศมีลอนตามลำดับ

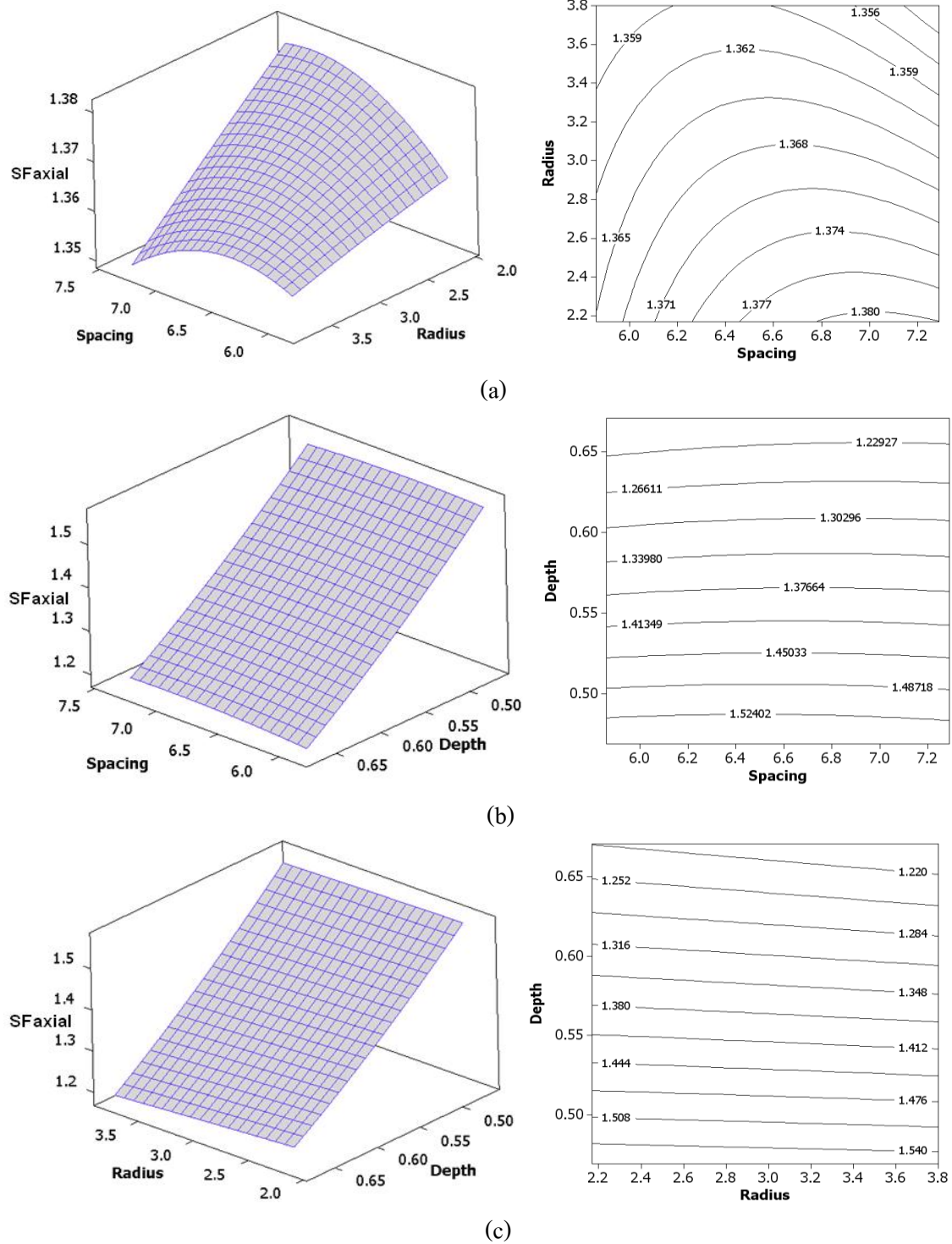
5.3.1.2 Central Composite Design สำหรับ แรงกดในแนวแกน

ในทำนองเดียวกันเมื่อนำผลจากตาราง 5.13 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

$$Y_{SF,axial} = 1.369 + 0.001x_1 - 0.006x_2 - 0.106x_3 - 0.002x_1^2 - 0.0001x_2^2 + 0.005x_3^2 - 0.002x_1x_2 + 0.002x_1x_3 - 0.002x_2x_3 \quad (5.8)$$



รูปที่ 5.9 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยแรงกดในแนวแกนจากผล
ของ (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 5.9

5.3.1.3 Optimizer

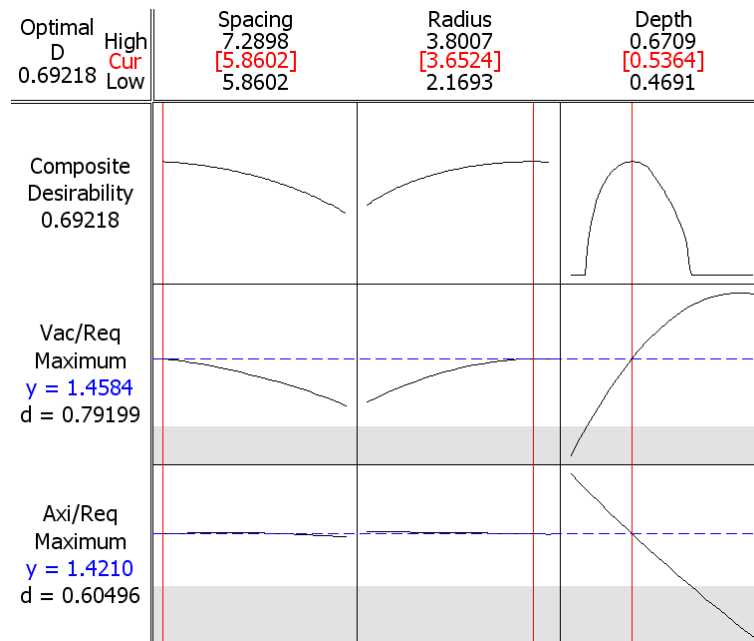
ดังที่กล่าวมาแล้ว ว่าเมื่อการออกแบบมีหลายปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง จะทำให้ไม่สามารถออกแบบให้ทุกผลตอบสนองนั้นมีผลออกมาดีที่สุด แต่สามารถออกแบบให้ทุกผลตอบสนองนั้นมีผลที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดย Optimizer คือตัวช่วยการออกแบบซึ่งจะมีหลักการคล้ายกับ Overlay contour plot แต่จะช่วยให้ออกแบบได้สะดวกขึ้นเมื่อมีตัวแปรและผลตอบสนองมากกว่า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

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

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > T \end{cases} \quad (5.9)$$

เมื่อกำหนดน้ำหนักการถ่วงเข้าของสมการ (r) มีค่าในช่วง $0 \leq r \leq 10$ หาก $r < 1$ จะให้ความสำคัญการถ่วงเข้าในช่วงแรก ซึ่งถ้าให้ $r = 1$ จะให้ผลการถ่วงเข้าเป็นแบบเชิงเส้น และถ้าให้ $r > 1$ จะให้ความสำคัญในช่วงสุดท้ายของการถ่วงเข้า

จากรูปที่ 5.10 จะเห็นว่าขอบเขตที่ใช้ในการออกแบบนั้นจะเป็นขอบเขตทั้งหมดจากกระบวนการ CCD เป็นค่าสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งจะมีกราฟของผลตอบสนองแยกพิจารณาในแต่ละตัวแปรและแต่ละผลตอบสนอง โดยจะมีการรวมผลของผลตอบสนองที่กราฟแฉกบน จึงสามารถพิจารณาและออกแบบขนาดของตัวแปรให้มีผลต่อผลตอบสนองรวมสูงที่สุด ซึ่งมีค่าความพอใจ (d) เท่ากับ 0.69218 เมื่อเลือกค่าขอบเขตของผลตอบสนองรวมที่สนใจที่ SF 1.3-1.5 และกำหนดค่าน้ำหนักการถ่วงเข้าของสมการ (r) เท่ากับ 3 เนื่องจากมีความแม่นยำเหมาะสมสำหรับช่วงที่ถ่วงเข้าในสมการนี้ และมีความสำคัญ (Importance) ของทั้งสองผลตอบสนองเท่ากับ 1 เนื่องจากมีความสำคัญเท่ากัน



รูปที่ 5.10 กราฟ Optimizer ที่รวมผลทุกตัวแปรและทุกผลตอบสนอง

จะเห็นว่าจากกราฟ 2 แกนด้านล่างจะแสดงผลตอบสนองความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนแยกกัน ซึ่งแกนบนจะเป็นการรวมผลตอบสนองทั้งสองเข้าด้วยกันโดยจุดที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อรวมผลตอบสนอง (เส้นสีแดง) ได้แก่ที่ระยะห่างระหว่างลอน 5.86 มม. รัศมีลอน 3.65 มม. และความลึกลอน 0.54 มม. ซึ่งให้ค่าสัดส่วนความปลอดภัยที่ความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนคือ 1.4584 และ 1.4210 ตามลำดับ ดังนั้นหากใช้จุดที่ออกแบบจาก Optimizer จะสามารถทำนายได้ว่ากระป๋องจะสามารถรับค่าความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนอยู่ที่ 116.7 kPa และ 11,849 N ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ออกแบบได้พบว่าได้สัดส่วนความปลอดภัยสูง แต่เมื่อคำนวณค่าในรากที่สองจากสมการที่ (3.8 และ 3.11) จะได้ 35.59 และ 189.96 ซึ่งมีค่าน้อย แสดงว่าเป็นแบบจำลองที่ยากแก่การผลิต เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างลอนที่น้อยมาก ในขณะที่มีรัศมีลอนขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาความสำคัญของตัวแปรระยะห่างระหว่างลอน จะเห็นว่าส่งผลต่อกำลังรับความดันสุญญากาศมาก โดยระยะห่างระหว่างลอนน้อย จะทำให้กระป๋องสามารถรับความดันสุญญากาศได้ดีกว่า และส่งผลต่อกำลังรับแรงกดในแนวแกนน้อยมาก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในกระบวนการผลิต จึงปรับปรุงกระบวนการออกแบบลอน โดยเลือกใช้ระยะห่างระหว่างลอนคงที่ค่าหนึ่ง ระยะนี้ควรมีค่าน้อยแต่ไม่น้อยจนทำให้ไม่สามารถเพิ่มรัศมีลอนได้ ในที่นี้เลือกใช้ 6.5 มม. แล้วจึงออกแบบลอนด้วยวิธี CCD โดยพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อการกำหนดขอบเขตเพียง 2 ตัวแปรคือรัศมีลอนและความลึกลอน

5.3.2 Central Composite Design 2 ตัวแปร

สำหรับกระบวนการ CCD 2 ตัวแปร ซึ่งมีตัวแปรที่ต้องการปรับเปลี่ยนสองตัวแปรคือ รัศมีลอนและความลึกลอน โดยกำหนดขอบเขตการปรับเปลี่ยนรัศมีลอนระหว่าง 2.5 และ 3.47 มม. และความลึกลอน 0.51-0.63 มม. ส่วนจำนวนลอนและระยะห่างระหว่างลอนนั้นคงที่ที่ 17 ลอน และ 6.5 มม. ตามลำดับเมื่อตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์หาค่าลดลงทำให้จำนวนครั้งในการวิเคราะห์ด้วย FEM น้อยลงตามไปด้วย ซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์การรับความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกนด้วย CCD 2 ตัวแปร

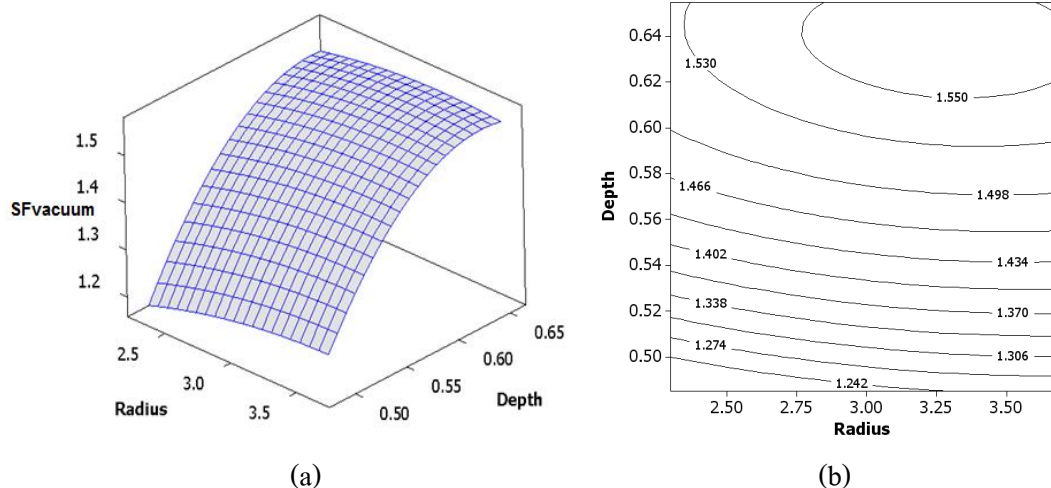
Analysis point	Coded variables		Natural variables		Dependent variables			
	Radius	Depth	Radius	Depth	Y_{vacuum}	$Y_{SF,vacuum}$	Y_{axial}	$Y_{SF,axial}$
			(mm)	(mm)	(kPa)		(N)	
1	-1	-1	2.5	0.51	102.6	1.283	12,357	1.482
2	1	1	3.47	0.51	107.3	1.341	12,269	1.471
3	-1	-1	2.5	0.63	121.2	1.515	10,584	1.269
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

5.3.2.1 Central Composite Design สำหรับ ความดันสุญญากาศ

จากตาราง 5.14 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรในรูปแบบของสัดส่วนความปลอดภัยในการรับความดันสุญญากาศ ($Y_{SF,vacuum2}$) กับรัศมีลอน และความลึกลอน ด้วยสมการลำดับขั้นที่สองเป็น

$$Y_{SF,vacuum2} = 1.489 + 0.016x_1 + 0.114x_2 - 0.008x_1^2 - 0.049x_2^2 - 0.006x_1x_2 \quad (5.10)$$

สมการกำลังสองที่ได้นี้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 98.92% และค่า R^2 -adjusted คือ 98.14% ในขณะที่ค่า (P-value) ยังคงมีค่าน้อยกว่า 0.0001 จึงถือได้ว่าสมการที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถืออย่างมาก ผลตอบสนองของสัดส่วนความปลอดภัยในการรับความดันสุญญากาศมีลักษณะดังรูปที่ 5.11 ซึ่งแสดงผลการตอบสนองการปรับพารามิเตอร์ระหว่างรัศมีลอนและความลึกลอนอย่างละเอียดภายในขอบเขตที่ทดลอง โดยความต้านทานความดันสุญญากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความลึกลอนในขณะที่เดียวกับที่เพิ่มรัศมี จนกระทั่งความลึกลอนอยู่ในช่วง 0.62 - 0.64 มม. และรัศมีลอนอยู่ในช่วง 3.0 - 3.5 มม. จะเป็นช่วงที่ทำให้เกิดค่าความต้านทานความดันสุญญากาศของกระป๋องสูงที่สุดซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับนำไปออกแบบหาความต้องการให้ค่าความดันสุญญากาศมีค่าสูงในช่วงการทดลองนี้



รูปที่ 5.11 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยความดันสุญญากาศจากผลของรัศมีลอนกับความลึกลอน

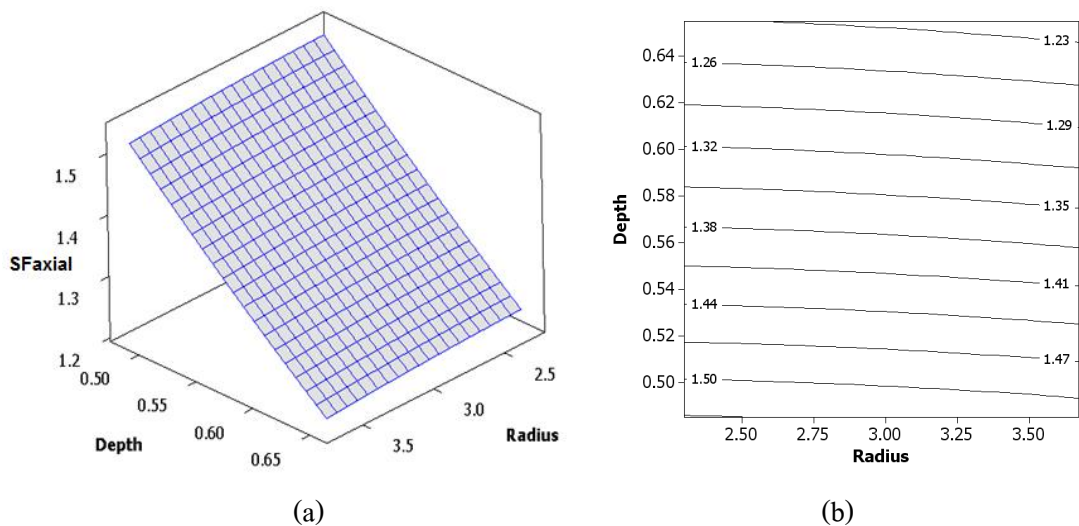
5.3.2.2 Central Composite Design สำหรับ แรงกดในแนวแกน

ในทำนองเดียวกันจากผลของสัดส่วนความปลอดภัยในการรับแรงกดในแนวแกน ($Y_{SF,axial2}$) ตาราง 5.14 สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ กับรัศมีลอน และความลึกลอน ด้วยสมการลำดับขั้นที่สองได้เป็น

$$Y_{SF,axial2} = 1.369 - 0.006x_1 - 0.106x_2 - 0.001x_1^2 + 0.004x_2^2 - 0.0001x_1x_2 \quad (5.11)$$

โดยสมการพื้นผิวตอบสนองนี้ แรงกดในแนวแกนมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสนใจเท่ากับ 99.99 % และมีค่า R^2 - adjusted คือ 99.98% และมีค่า P-value น้อยกว่า 0.001 แสดงถึงความน่าเชื่อถือของกลุ่มข้อมูล ผลตอบสนองของสัดส่วนความปลอดภัยในการรับแรงกดในแนวแกนแสดงได้ดังรูปที่ 5.12

จะเห็นว่ากราฟที่ได้นั้นมีลักษณะค่อนข้างเป็นแผ่นเรียบและค่อนข้างชันในทิศทางการปรับเปลี่ยนความลึกกลอนคล้ายกับพื้นผิวที่ได้จากการทดลอง 3 ตัวแปร เนื่องจากผลของการปรับเปลี่ยนความลึกกลอนมีผลกระทบมากกว่ารัศมีกลอนมากดังเช่นผลการทดลองจาก Two-level factorial design และแนวโน้มของแรงกดในแนวแกนจะยังคงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปรับความลึกกลอนให้มากยิ่งขึ้นเนื่องจากขอบเขตที่ทำการทดลองนั้นไม่ได้อยู่ในช่วงที่ให้ค่าผลตอบสนองสูงที่สุด

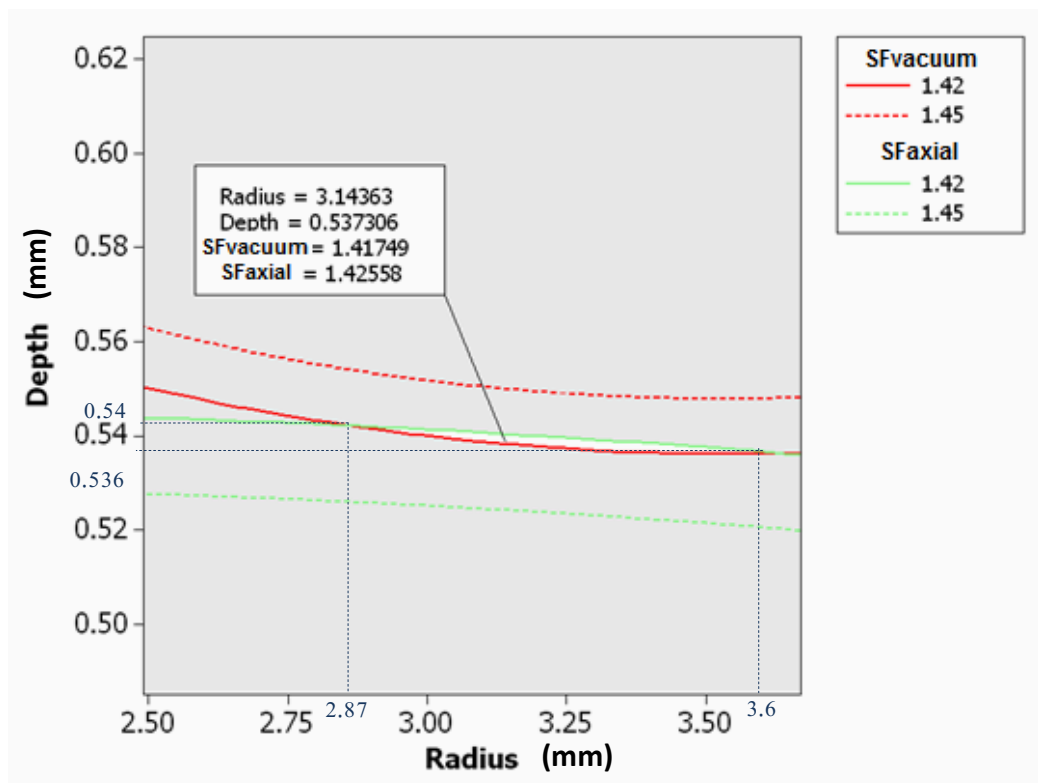


รูปที่ 5.12 พื้นผิวตอบสนองและ Contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัยแรงกดในแนวแกนจากผลของรัศมีกลอนกับความลึกกลอน

5.3.2.3 ผลรวมการวิเคราะห์ระหว่างความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกน

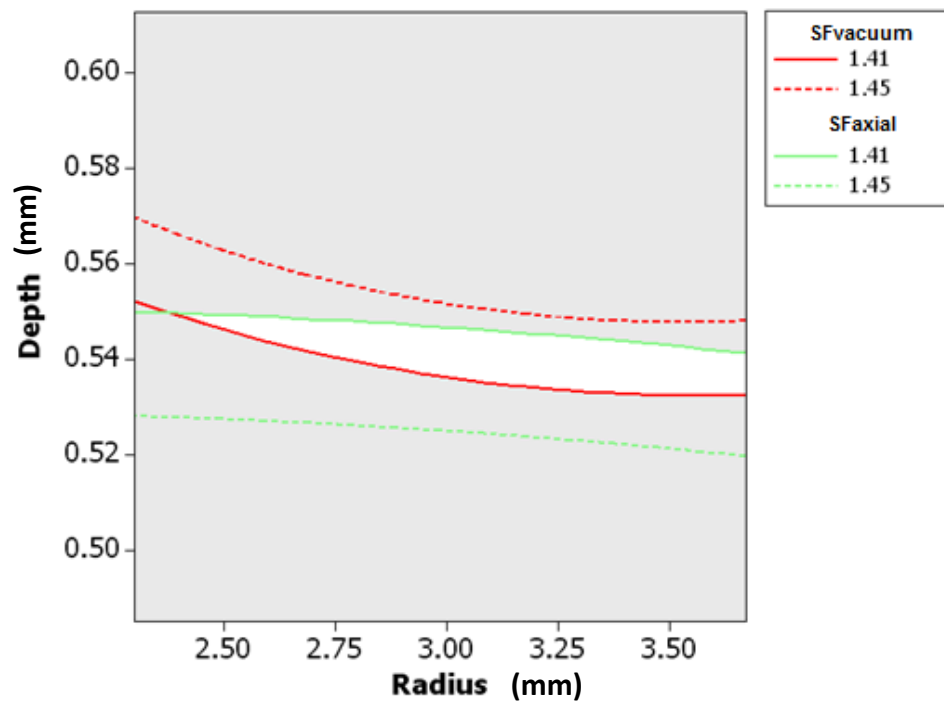
ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดจำเป็นต้องพิจารณาผลตอบสนองทั้งสองไปพร้อม ๆ กัน สำหรับการวิเคราะห์ 2 ตัวแปรจะสามารถสังเกตผลตอบสนองที่ได้โดยอาศัยการวาดกราฟของทั้งสองเงื่อนไขที่ต้องการลงใน Contour plot เดียวกันเรียกว่า Overlay contour plot ซึ่งนิยมใช้เมื่อมีตัวแปรที่สนใจเพียง 2 ตัวแปร หากจำนวนตัวแปรมากกว่านี้จะนิยมใช้ Optimizer ในการหา Desirability ดังแสดงในหัวข้อ 5.3.1.3 สำหรับการออกแบบนี้จะใช้ทั้ง 2 วิธี เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบผลการออกแบบที่ได้ทั้งสองกรณี

Overlay contour plot คือการนำผลตอบสนองมารวมกันภายในขอบเขตของตัวแปรเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบและออกแบบให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการโดยส่วนมากนั้นจะเน้นในส่วนที่ให้ผลตอบสนองสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ของทุก ๆ ตัวแปรโดยการกำหนดขอบเขตของผลตอบสนองที่ต้องการของแต่ละผลตอบสนอง ซึ่งการกำหนดนั้นจะต้องให้ผลตอบสนองอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดเพื่อให้เกิดการทับกันของพื้นที่ผลตอบสนองที่ต้องการซึ่งเมื่อใช้ผลจากการเปรียบเทียบสัดส่วนความปลอดภัย ทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่ให้ผลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทั้งสองผลตอบสนอง โดยเมื่อให้กำหนดผลตอบสนองของทั้งสองกรณีนั้นมีค่าใกล้เคียงกันก็จะได้พื้นที่ที่แสดงส่วนที่ให้ผลตอบสนองมีค่าสูงใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงที่กำหนดของทั้งสองกรณี ดังแสดงในรูปที่ 5.13 หากกำหนดค่าขอบเขตที่สนใจของผลตอบสนองในช่วง 1.42 -1.45 จะเห็นว่ามีช่วงขอบเขตความลึกกลอนระหว่าง 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 5.13 Overlay contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัย 1.42 – 1.45

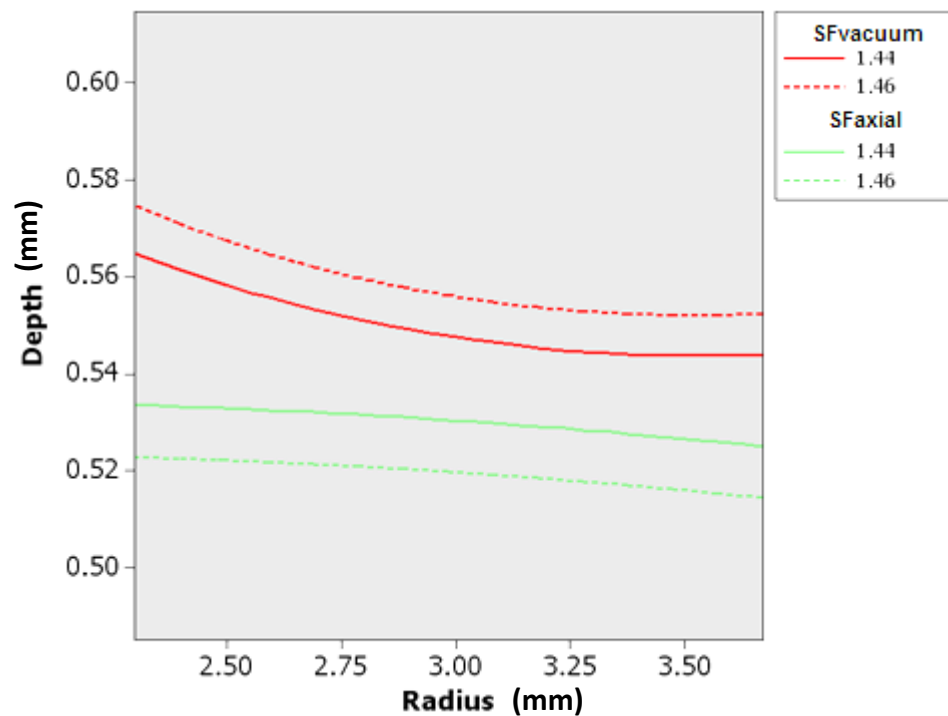
หากกำหนดสัดส่วนความปลอดภัยที่ต้องการต่ำลงทั้งสองกรณี ช่วงขอบเขตของตัวแปรความลึกกลอน และรัศมีลอนที่เป็นไปได้จะกว้างขึ้น เช่นหากขอบเขตความสนใจของสัดส่วนความปลอดภัยในช่วง 1.41 – 1.45 จากรูปที่ 5.14 จะเห็นว่าพื้นที่ที่ใช้ในการออกแบบได้กว้างยิ่งขึ้น (รัศมีลอน 2.3 – 3.8 มม. และความลึกกลอน 0.53 – 0.55 มม.) แต่จะทำให้การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดยากขึ้น



รูปที่ 5.14 Overlay contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัย 1.41 – 1.45

ในทางตรงข้าม หากกำหนดขอบเขตของสัดส่วนความปลอดภัยที่ต้องการมีค่าสูงขึ้นทั้งสองกรณี โดยกำหนดให้ขอบเขตความปลอดภัยที่สนใจอยู่ในช่วง 1.44 – 1.46 ดังรูปที่ 5.15 จะทำให้ไม่สามารถหาช่วงสัดส่วนความปลอดภัยที่เป็นไปได้ทั้งสองกรณีได้

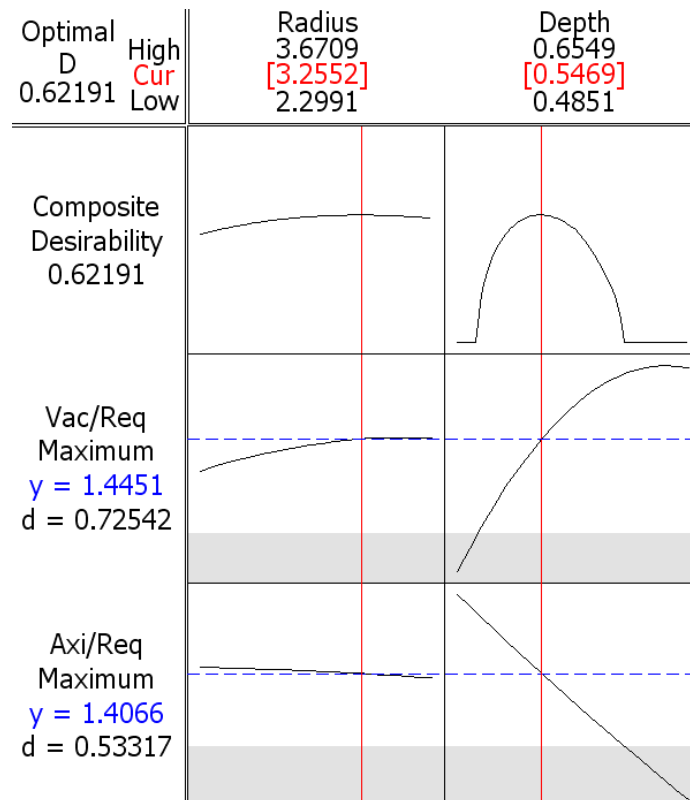
ดังนั้นการเลือกใช้ค่าขอบเขตที่สนใจให้สามารถอยู่ในช่วงของผลตอบสนองทั้งสองกรณี จำเป็นต้องกำหนดขอบเขตให้เหมาะสม เพื่อให้การวิเคราะห์และการออกแบบมีประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 5.15 Overlay contour plot ของสัดส่วนความปลอดภัย 1.44 – 1.46

เมื่อทดลองนำผลที่ได้จากตารางที่ 5.14 มาออกแบบโดยใช้ Optimizer โดยเลือกค่าขอบเขตของผลตอบสนองรวมที่สนใจที่ SF 1.3 - 1.5 และกำหนดค่าน้ำหนักการถ่วงเข้าของสมการเท่ากับ 3 และมีค่าความสำคัญ (Importance) เท่ากับ 1

จากผลดังแสดงในรูปที่ 5.16 จะเห็นว่าค่าที่ออกแบบได้อยู่ในขอบเขตของกระบวนการ CCD โดยเมื่อรวมผลของผลตอบสนองที่แถวบน 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 5.16 กราฟ Optimizer ที่รวมผลทุกตัวแปรและทุกผลตอบสนอง

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

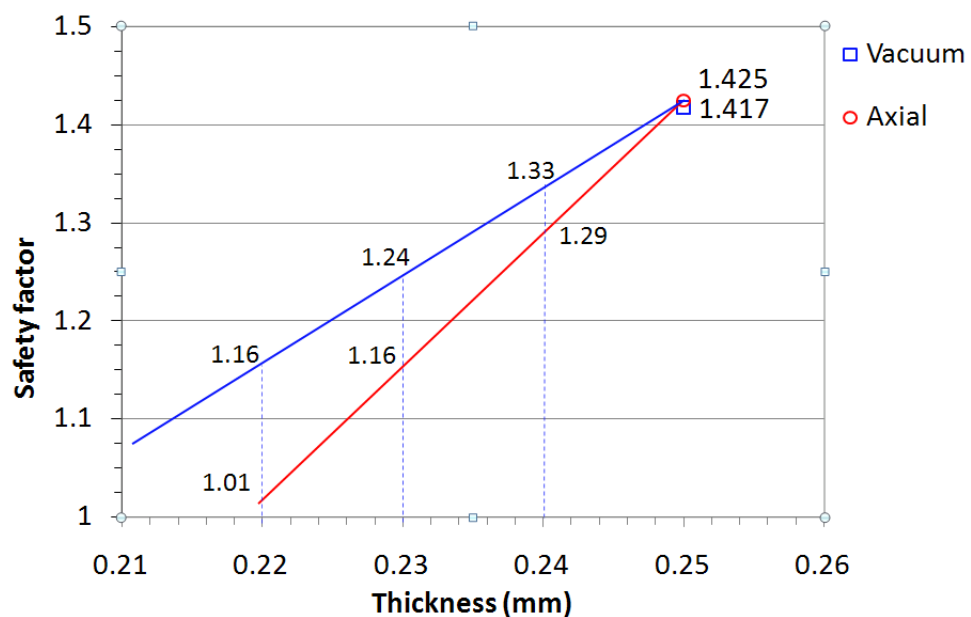
เมื่อเปรียบเทียบผลจาก Optimizer ระหว่าง CCD 3 และ CCD 2 จะเห็นว่า แบบจำลองที่ออกแบบโดย CCD 3 เป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด แต่จากข้อจำกัดและความยากในการผลิตจึงใช้แบบจำลองจาก CCD 2

5.4 การลดวัสดุในการผลิตกระป๋อง

ผลจากการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้นซึ่งมีผลจาก Overlay contour plot และ Optimizer ซึ่งได้ผลออกมาใกล้เคียงกันมากทั้งผลตอบสนองและสัดส่วนของแบบจำลองที่ได้ จึงเลือกแบบจำลองมาคำนวณเพื่อลดความหนา เนื่องจากมีค่าสัดส่วนความปลอดภัยของทั้งสอง

ผลตอบสนองใกล้เคียงกัน คือมีค่าสัดส่วนความปลอดภัยของความดันสุญญากาศและแรงกดในแนวแกน 1.417 และ 1.425 จาก Overlay contour plot รูปแบบที่ได้มีค่าระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน และความลึกลอนเท่ากับ 6.5 มม. , 3.14 มม. และ 0.537 มม. ตามลำดับ

เมื่อนำค่าความชันระหว่างสัดส่วนความปลอดภัยในการรับแรงกับความหนาของกระป๋องที่ได้จากกราฟรูปที่ 4.12 มาคำนวณหาสัดส่วนความปลอดภัยของกระป๋องที่มีรูปแบบลอนใหม่ที่ความหนากระป๋องแตกต่างกันจะได้ผลดังรูปที่ 5.17 และตารางที่ 5.15



รูปที่ 5.17 กราฟแนวโน้มการลดความหนาของกระป๋องจากแบบจำลองที่ออกแบบโดย RSM

ตารางที่ 5.15 ผลของค่าความปลอดภัยและการคำนวณน้ำหนักวัสดุจากการลดความหนาของกระป๋อง

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 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับกระป๋องบรรจุอาหาร 603×700 ชนิดลอนเต็ม เมื่อได้รับภาระต่าง ๆ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองการทดสอบ ทำให้ทราบถึงลักษณะและพฤติกรรมของกระป๋องบรรจุอาหารที่เกิดขึ้นและสามารถออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวดอปสนองในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกน รวมถึงสามารถกำหนดขอบเขตของตัวแปรสำหรับสร้างสมการพื้นผิวดอปสนองที่เหมาะสมในการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ในบทนี้จะนำเสนอสรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้และข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระป๋องบรรจุอาหารต่อไป

6.1 สรุปผลการทดสอบกระป๋องและการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การทดสอบภาระแรงกดในแนวแกนจะต้องควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เพื่อแรงกดในแนวแกนสม่ำเสมอบนระนาบฝากระป๋องมากที่สุด เช่น ชุดบุชที่ควบคุมการเคลื่อนของแผ่นกดในแนวแกนเพลจะต้องมีการสวมที่มีความคลาดเคลื่อนน้อย และที่ฐานของชุดอุปกรณ์ยึดจับจะต้องสามารถปรับระดับได้เพื่อรองรับสภาพของฐานรองรับได้ทุกแบบ ส่วนฐานรองชุดทดสอบจะต้องมีความแข็งแรง เนื่องจากระหว่างการทดสอบจะต้องรับภาระแรงกดสูงมาก และจะต้องมีอุปกรณ์ตรวจสอบความเป็นระนาบของแผ่นเหล็กด้านบนก่อน และระหว่างการทดลองอีกด้วย จากการทดลองพบว่ากระป๋องจะเกิดการยุบตัวโดยเสียหายจากการโก่งเดาะ ซึ่งความเสียหายและความเค้นสูงจะเกิดในบริเวณลอนของกระป๋องเนื่องจากส่วนตัวกระป๋องช่วงที่มีลอนจะรับแรงกดได้น้อยกว่าช่วงที่ไม่มีลอน ความเสียหายจะเกิดการโก่งเดาะและยุบย่นเป็นลอนคลื่นตามแนวเส้นรอบวงจากการทดลอง และเมื่อสังเกตจากอุปกรณ์วัดความเป็นระนาบ และผลของการยุบตัวของกระป๋องระหว่างการทดสอบพร้อมกันตลอดแนวเส้นรอบวง สามารถนำผลการทดลองเป็นค่าที่อ้างอิงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองภายใต้แรงกดในแนวแกน ด้วยวิธีพลวัต (Explicit dynamics) เพื่อจำลองผลต่อความเสียหายของกระป๋อง เมื่อมีการเคลื่อนที่ของแผ่นระนาบกดกระป๋องในแนวตั้งซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงระยะกดตามเวลา พบว่าผลการวิเคราะห์และพฤติกรรมของแบบจำลองภายใต้แรงกดในแนวแกนสอดคล้องกับการทดสอบและให้ผลแรงกดในแนวแกนที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงโดยมีความแตกต่างเพียง 6.27% แต่เนื่องจากการวิเคราะห์แบบพลวัตนั้นเสียเวลามาก และในการคำนวณพื้นผิวดอปสนองจะต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องปรับปรุงการคำนวณโดยใช้

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Riks เนื่องจากการวิเคราะห์แบบสถิติศาสตร์ที่สามารถวิเคราะห์ผลช่วงหลังจากการเกิดการ โกงเดาะได้ สามารถวิเคราะห์ลดเวลาในการวิเคราะห์หลังได้ ซึ่งใช้เวลาในการวิเคราะห์เพียง 1-2 ชั่วโมงต่อ 1 กรณี ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Riks ให้ผลของพฤติกรรมความเสียหายใกล้เคียงกับการทดสอบ และให้ผลของแรงกดในแนวแกนต่างจากการทดสอบ 5.89% จึงใช้วิธีนี้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนในงานวิจัยนี้

6.2 สรุปผลการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

การใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองในการปรับเปลี่ยนลอนกระป๋องเริ่มจากการศึกษาผลกระทบของตัวแปรลอนกระป๋อง 4 ตัวแปร คือ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน ความลึกลอน และจำนวนลอน ซึ่งเป็นตัวแปรที่จะทำให้ลักษณะรูปร่างของลอนที่ตัวกระป๋องนั้นเปลี่ยนไป โดยใช้ Two-level factorial design พบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อผลตอบสนองทั้งความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนได้แก่ ระยะห่างระหว่างลอน รัศมีลอน และความลึกลอนซึ่งตัวแปรที่มีผลกระทบมากที่สุดคือความลึกลอน เนื่องจากการปรับเปลี่ยนความลึกลอนจะส่งผลต่อความแข็งแรงของกระป๋องมาก หากความลึกลอนมากจะทำให้สามารถรับความดันสูญญากาศได้มากแต่จะรับแรงกดในแนวแกนได้ลดลง และในทางกลับกันหากความลึกลอนมีค่าน้อย จะทำให้ความสามารถการรับความดันสูญญากาศลดลง แต่จะเพิ่มความสามารถการรับแรงกดในแนวแกนมากขึ้น ในขณะที่จำนวนลอนนั้นมีความสำคัญน้อยมากต่อผลตอบสนองเนื่องจากการไม่มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของลอน จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรที่สำคัญที่ควรนำมาทำการวิจัยสำหรับการออกแบบลอนที่ตัวกระป๋องนั้นมี 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 จะมีผลตอบสนองที่สูงขึ้นทั้งสองกรณีเมื่อปรับให้มีระยะห่างระหว่างลอน

ลดลง แต่หากระยะห่างระหว่างลอนมีค่าน้อยเกินข้อจำกัดในการออกแบบ จะไม่สามารถสร้างแบบจำลองได้จึงกำหนดช่วงของระยะห่างระหว่างลอนที่ 6.15 – 7.00 มม.

จากการศึกษาการสร้างพื้นผิวตอบสนองจาก Central composite design พบว่าพื้นผิวตอบสนองจากสมการกำลังสองนั้นจะมีการสร้างพื้นผิวตอบสนองได้ใกล้เคียงกับผลจริง โดยตรวจสอบจากค่า R^2 และ P-value ของผลตอบสนองที่ได้ พื้นผิวตอบสนองของความดันสูญญากาศมีลักษณะเป็นพื้นผิวโค้งตามผลกระทบของความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามตัวแปร ส่วนพื้นผิวตอบสนองของแรงกดในแนวแกนนั้นมีลักษณะเป็นระนาบเอียง เนื่องจากผลกระทบของความถี่ลอนมีค่าสูงกว่าผลกระทบจากตัวแปรอื่นมาก และผลจากความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามไม่ชัดเจน โดยผลตอบสนองของทั้งความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนจะมีลักษณะแปรผกผันกันเมื่อปรับเปลี่ยนรัศมีลอนและความถี่ลอน 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 %

6.3 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมช่วงลอนของตัวกระป๋องภายใต้ภาระแรงเพียงความดันสูญญากาศและแรงกดในแนวแกนเท่านั้นเนื่องจากต้องการศึกษาความเสียหายและออกแบบอย่างละเอียดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง ในส่วนลอนที่ตัวกระป๋องเท่านั้น โดยการเสียหายของกระป๋องยังสามารถเกิดจากความดันภายในในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความเสียหายที่ฝากระป๋อง การออกแบบรูปแบบลอนที่ฝากระป๋องที่เหมาะสม จะทำให้สามารถลดวัสดุในการผลิตกระป๋องลงได้อีก อีกทั้งยังมีกระบวนการประกอบฝากระป๋องโดยการขึ้นตะเข็บทั้งด้านบนและล่างซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อกระป๋องอีกด้วย

แรงกดในแนวแกนสำหรับงานวิจัยนี้วิเคราะห์เฉพาะแรงกดในแนวตั้งอย่างเดียว เนื่องจากเป็นภาระหลักที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการขนย้ายและเก็บกระป๋อง ในการขนย้ายจริงอาจจะมีแรงกดที่ไม่เป็นแนวตั้ง

แรงกดแบบเฉพาะจุด หรืออาจมีการกระแทก ซึ่งเป็นผลทำให้กระดูกเกิดความเสียหายได้ง่ายกว่าแรงกดแบบตรง ซึ่งควรนำมาพิจารณาในการออกแบบกระดูกด้วย

การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์กระดูกเปล่าที่ประกอบฝาทั้งบนและล่างเหมือนกับกระดูกที่บรรจุอาหารแล้ว ซึ่งสำหรับการขนส่งกระดูกที่บรรจุอาหารแล้ว จะมีสถานะที่ต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลทำให้ความแข็งแรงของกระดูกมีความแตกต่างกันด้วย

เอกสารอ้างอิง

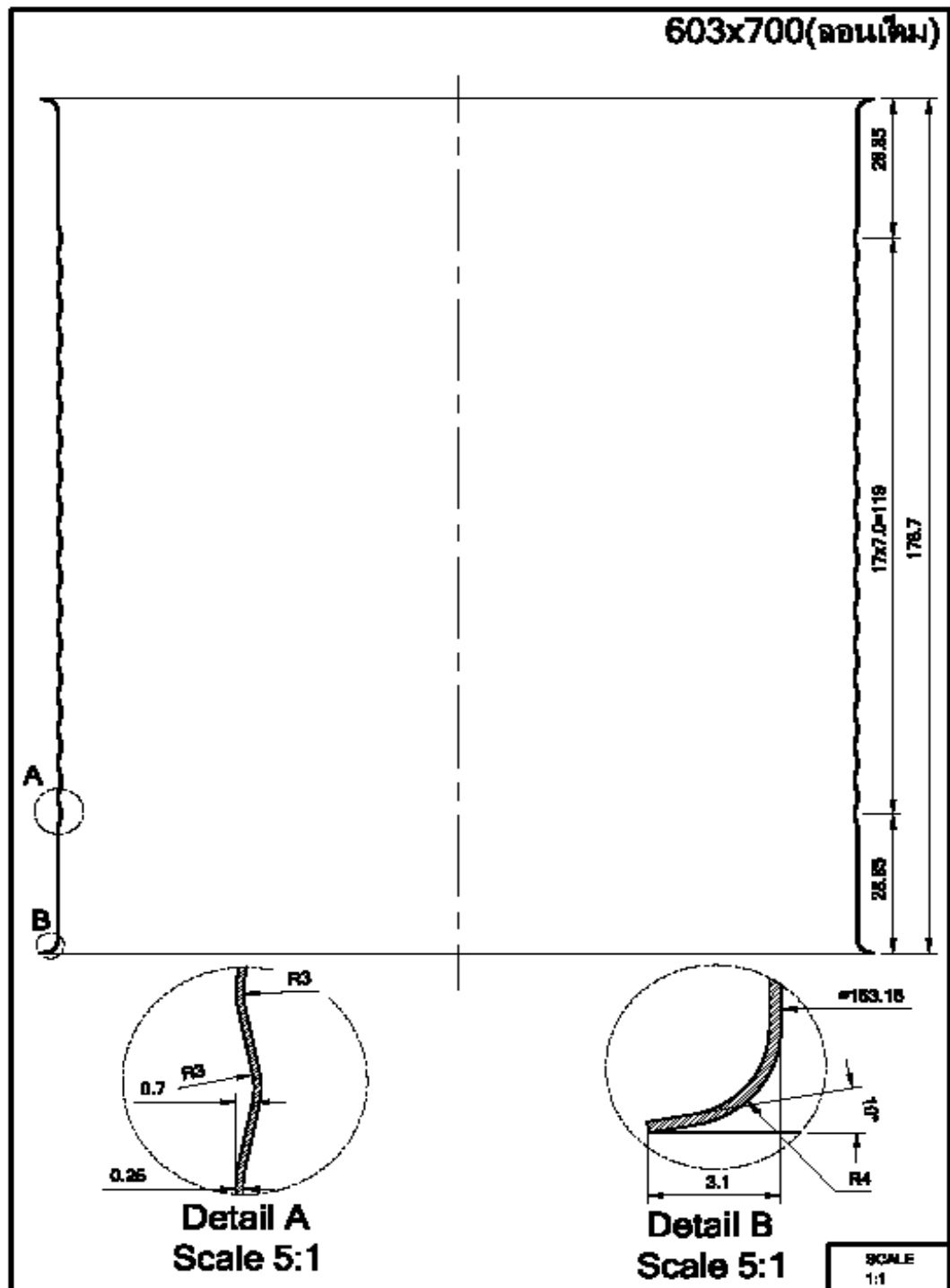
1. Abaqus/CAE User's Manual (Version 6.81).
2. Ugural, A C., 1999, **Stresses in Plates and Shells**, 2nd ed., New Jersey Institute of Technology, New Jersey, pp. 468-471.
3. ไพโรจน์ วิริยารวี, 2544, **Response Surface Design**, พิมพ์ครั้งที่ 1, คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, หน้า 1-6.
4. Myers, R.H., 2009, **Response Surface Methodology**, 3rd ed., Virginia Polytechnic University.
5. Fujii, F., Noguchi, H., and Ramm, E., 2000, "Static path jumping to attain postbuckling equilibria of a compressed circular cylinder", **Computational Mechanic**, Vol. 26, No. 3, pp. 259-266.
6. Aljawi, A.A.N., Alghamdi, A.A.A., and Abu-Mansour, T.M.-N., 2002, "Modes of axial collapse of unconstrained capped frusta", **International Journal of Mechanical Sciences**, Vol. 44, pp. 1145-1161.
7. Papadopoulos, V., and Iglesis, P., 2007, "The effect of non-uniformity of axial loading on the buckling behaviour of shells with random imperfections", **International Journal of Solids and Structures**, Vol. 44, pp. 6299-6317.
8. Siad, L., 1999, "Buckling of thin-walled orthotropic cylindrical shells under uniform external pressure. Application to corrugated tin cans", **Thin-Walled Structures**, Vol. 35, pp. 101-115.
9. Ross, C.T.F., 1993, "The Buckling of Corrugated Cylinders under Uniform External Pressure", **Thin-Walled Structures**, Vol. 17, pp. 259-271.

10. Jones, I.B., Owen, D.R.J., Jones, D., Crook, A.J.L., Liu, G. Q., 1998, “Applicability of finite element method to design and optimisation of food cans” **Ironmaking and Steel making**, Vol. 25, pp. 74-80.
11. Teppunkulngam, P., Tantichattanont, P., Kamnerdtong, T., 2008, “Study of Loading Capacity of Corrugated Food Cans Using Finite Element Method”, **Proceeding of the Mechanical Engineering Network Thailand 22nd Conference**, 15-17 October, Pathumthani, Thailand, pp. 110-115.
12. Chen, D.H., Ozaki, S., 2009, “Numerical study of axially crushed cylindrical tubes with corrugated surface”, **Thin-Walled Structures**, Vol. 47, pp. 1387-1396.
13. Xu, X., Ma, Y, Lim, C.W., Chu, H., 2006, “Dynamic buckling of cylindrical shells subject to an axial impact in a symplectic system”, **International Journal of Solids and Structures**, Vol. 43, pp. 3905-3919.
14. Xu, X., Ma, J., Lim, C.W., Chu, H., 2009, “Dynamic local and global buckling of cylindrical shells under axial impact”, **Engineering Structures**, Vol. 31, pp. 1132-1140.
15. Zhu, E., Mandal, P., Calladine, C.R., 2002, “Buckling of thin cylindrical shells: an attempt to resolve a paradox”, **International Journal of Mechanical Sciences**, Vol. 44, pp. 1583-1601.
16. พรชัย เทพพันธุ์กุลงาม, 2551, การออกแบบขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมของกระป๋องบรรจุอาหารโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
17. Wang, J., 2001, “Design optimization of rigid metal containers”, **Finite Elements in Analysis and Design**, Vol. 37, pp. 273-286.
18. Yamazaki, K., Itoh, R., Watanabe, M., Han, J., Nishiyama, S., 2007, “Applications of structural optimization techniques in light weighting of aluminum beverage can ends” **Journal of Food Engineering**, Vol. 81, pp. 341-346.

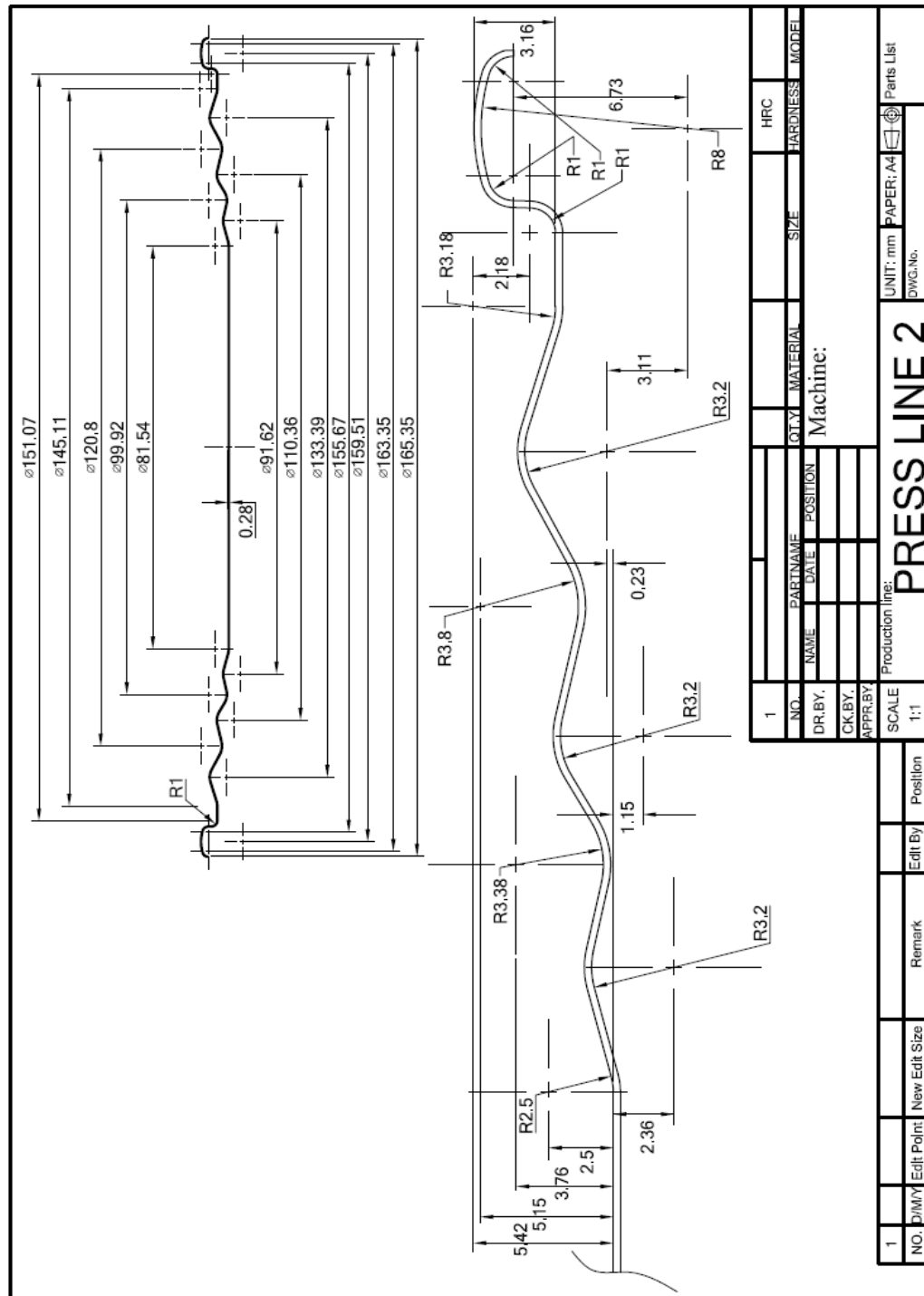
19. Sin, H.N., Yusof, S., Sheikh Abdul Hamid, N., Abd. Rahman, R., 2005 “Optimization of enzymatic clarification of sapodilla juice using response surface methodology”, **Journal of Food Engineering**, Vol. 73, pp. 313-319.
20. Golling, S., 2009, **Stress Concentration at the Door Opening of Steel Towers for Wing Turbines**, Lulea University of Technology, Sweden, pp. 43-48

ภาคผนวก ก

แบบกระป๋องบรรจุอาหารที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ ก.1 แบบลอนบริเวณตัวกระป๋อง



รูปที่ ก.2 แบบลอนบริเวณฝากระป๋อง