



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหการ

วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์
โดยวิธีการออกแบบการทดลอง

An Improvement of Tensile Force in the Packaging Seal Process via Design of
Experiments

นามผู้วิจัย นายนิภาส ลีนะธรรม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์

โดยวิธีการออกแบบการทดลอง

An Improvement of Tensile Force in the Packaging Seal Process via Design of Experiments

โดย

นายนิภาส ลีนะธรรม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นิภาส ลีนะธรรม 2553: การปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงในกระบวนการปิดผนึก
บรรจุภัณฑ์โดยวิธีการออกแบบการทดลอง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมอุตสาหกรรม) สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.
112 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง
ของกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น ตามมาตรฐานที่กำหนด จากการศึกษาสภาพของ
ปัญหาในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ พบว่าปัญหาที่สำคัญคือ มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ
ส่งผลให้รอยปิดผนึกไม่แข็งแรง ทำให้ผลิตภัณฑ์ภายในเกิดความเสียหาย จากการออกแบบการ
ทดลองเบื้องต้น โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า
ความต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ ความเร็วสายพาน
อุณหภูมิความร้อนขึ้นรูป อุณหภูมิในการขึ้นรูป และอุณหภูมิในการปิดผนึก หลังจากการ
ปรับปรุงพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานและไม่มีของเสียเกิดขึ้นใน
กระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์

ลายมือชื่อนิติกร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Nipas Leenatham 2010: An Improvement of Tensile Force in the Packaging Seal Process via Design of Experiments. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering.

Thesis Advisor: Associate Professor Prapaisri Sudusna-na-Ayudhya, Ph.D. 112 pages.

The objective of this research work is to find appropriate parameters setting to gain higher tensile force in the packaging seal process according to the required standard. From an observational study of the problems in the process, it was found that the critical problem was weak sealing of packaging, which led to the damage of the product inside. The 2^k Factorial design was used as a screening experiment to find significant factors. It was found that the conveyor speed, pre-heat temperature, forming temperature and sealing temperature significantly affect the tensile force at the confidence level 0.05. After the improvement, the tensile force was higher than the required standard and the packaging seal process had zero non-conforming part.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

___ / ___ / ___

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายๆ ฝ่าย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัยมาโดยตลอด และ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อ.ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้ง คณะกรรมการในการสอบทุกท่านที่เสียสละเวลาในการควบคุมการสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณบรรจง เก่งเขตร ผู้จัดการแผนก S&T คุณเขตรัตน์ จารุเดชา และ คุณจินตนา เนตรรุ่ง โรงงานกรณีศึกษาโรงงานผลิตถุงยางอนามัย ที่ได้ให้คำปรึกษาและ ช่วยเหลือในการอนุเคราะห์ข้อมูลในการทำวิจัยฉบับนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนทั้งกำลัง ทรัพย์และกำลังใจด้วยดีเสมอมา ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือและ ให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

นิภาส ถิ่นธรรม

มีนาคม 2553

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| สารบัญ | (1) |
| สารบัญตาราง | (2) |
| สารบัญภาพ | (5) |
| คำนำ | 1 |
| วัตถุประสงค์ | 3 |
| การตรวจเอกสาร | 5 |
| อุปกรณ์และวิธีการ | 42 |
| อุปกรณ์ | 42 |
| วิธีการ | 42 |
| ผลและวิจารณ์ | 49 |
| สรุปและข้อเสนอแนะ | 75 |
| สรุป | 75 |
| ข้อเสนอแนะ | 79 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง | 80 |
| ภาคผนวก | 84 |
| ภาคผนวก ก แสดงข้อมูลก่อนการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก | 85 |
| ภาคผนวก ข แสดงข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k | 87 |
| ภาคผนวก ค แสดงข้อมูลการยืนยันผลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k | 96 |
| ภาคผนวก ง แสดงข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ | 98 |
| ภาคผนวก จ แสดงข้อมูลการยืนยันผลของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ | 107 |
| ภาคผนวก ฉ แสดงวิธีการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก | 109 |
| ประวัติการศึกษา และการทำงาน | 112 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 1 | แสดงปีกำเนิดของพลาสติกที่ใช้ทำภาชนะบรรจุ | 5 |
| 2 | แสดงการจำแนกหน้าที่ของภาชนะบรรจุสินค้าตามด้านต่างๆ | 10 |
| 3 | ลักษณะทางกายภาพของโพลีโพรพิลีน | 18 |
| 4 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^k (Analysis of Variance for 2^k) | 32 |
| 5 | การออกแบบการทดลองทากูชิแบบ $L_8 2^7$ | 36 |
| 6 | ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองก่อนการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึง | 44 |
| 7 | ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^4 | 49 |
| 8 | การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล | 54 |
| 9 | ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล | 59 |
| 10 | ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล | 61 |
| 11 | ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองทากูชิสำหรับปัจจัยที่ควบคุมได้ | 64 |
| 12 | ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองทากูชิสำหรับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ | 64 |
| 13 | ค่า S/N Ratio กรณี Larger The Better ณ ระดับต่างๆ ของปัจจัย | 64 |
| 14 | ค่าผลกระทบของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ | 68 |
| 15 | ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลองแบบทากูชิ | 71 |
| 16 | ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลองแบบทากูชิ | 73 |
| 17 | ปัจจัยและระดับที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล | 76 |
| 18 | ค่าสถิติต่างๆ ก่อนและหลังการปรับปรุงจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล | 76 |
| 19 | ปัจจัยและระดับที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตจากแผนการทดลองแบบทากูชิ | 77 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|--------------|--|------|
| 20 | ค่าสถิติต่างๆ ก่อนและหลังการปรับปรุงจากแผนการทดลองแบบทากูชิ | 78 |
| 21 | ค่าสถิติต่างๆ ซึ่งคำนวณได้จากข้อมูลที่ทำการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล | 78 |
| | | |
| ตารางผนวกที่ | | |
| ก1 | ข้อมูลก่อนการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก | 86 |
| ข1 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำ 1 ตำแหน่งที่ 1 | 88 |
| ข2 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำ 1 ตำแหน่งที่ 2 | 89 |
| ข3 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำ 1 ตำแหน่งที่ 3 | 90 |
| ข4 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำ 1 ตำแหน่งที่ 4 | 91 |
| ข5 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำ 2 ตำแหน่งที่ 1 | 92 |
| ข6 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำ 2 ตำแหน่งที่ 2 | 93 |
| ข7 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำ 2 ตำแหน่งที่ 3 | 94 |
| ข8 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำ 2 ตำแหน่งที่ 4 | 95 |
| ค1 | ข้อมูลการยืนยันผลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k | 97 |
| ง1 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 1 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ) | 99 |
| ง2 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 2 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ) | 99 |
| ง3 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 3 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ) | 100 |
| ง4 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 4 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ) | 100 |
| ง5 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 1 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ) | 101 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ | | หน้า |
|--------------|--|------|
| ง6 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 2 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ) | 101 |
| ง7 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 3 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ) | 102 |
| ง8 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 4 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ) | 102 |
| ง9 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 1 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับสูง) | 103 |
| ง10 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 2 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับสูง) | 103 |
| ง11 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 3 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับสูง) | 104 |
| ง12 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 4 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับสูง) | 104 |
| ง13 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 1 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับสูง) | 105 |
| ง14 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 2 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับสูง) | 105 |
| ง15 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 3 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับสูง) | 106 |
| ง16 | ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 4 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับสูง) | 106 |
| จ1 | ข้อมูลการขึ้นชั้นผลของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ | 108 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 1 | โครงสร้างของไอโซแทกติกโพลีโพรพิลีน | 17 |
| 2 | โครงสร้างของซินดีโอแทกติกโพลีโพรพิลีน | 17 |
| 3 | การอัดด้วยสุญญากาศ | 19 |
| 4 | การอัดลม | 20 |
| 5 | การปิดผนึกด้วยการให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง | 22 |
| 6 | การปิดผนึกด้วยการให้ความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง | 23 |
| 7 | การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล) | 29 |
| 8 | การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล) | 30 |
| 9 | Linear Graph | 36 |
| 10 | แสดงกระบวนการผลิตยางอนามัย | 43 |
| 11 | การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการผลิตก่อนการปรับปรุง | 44 |
| 12 | แผนผังเหตุและผลจากสาเหตุของปัญหาค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก | 45 |
| 13 | Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล | 50 |
| 14 | กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล สำหรับการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล | 51 |
| 15 | กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ สำหรับการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล | 51 |
| 16 | กราฟแสดงอิทธิพลหลักของอุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป | 55 |
| 17 | กราฟแสดงอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการขึ้นรูป | 56 |
| 18 | กราฟแสดงอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก | 57 |
| 19 | กราฟแสดงอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการปิดผนึก | 57 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|-------------------|--|------|
| 20 | กราฟแสดงผลการทดสอบความแปรปรวนของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล | 60 |
| 21 | การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล | 62 |
| 22 | กราฟเส้นตรงสำหรับการออกแบบการทดลองแบบทากูชิของ $L_8 2^7$ | 63 |
| 23 | กราฟแสดงอิทธิพลหลักของความเร็วสายพาน | 65 |
| 24 | กราฟแสดงอิทธิพลหลักของอุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป | 66 |
| 25 | กราฟแสดงอิทธิพลหลักของอุณหภูมิในการขึ้นรูป | 66 |
| 26 | กราฟแสดงอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก | 67 |
| 27 | กราฟแสดงอิทธิพลหลักของความหนาของแผ่นพลาสติก | 69 |
| 28 | กราฟแสดงผลการทดสอบความแปรปรวนของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลองแบบทากูชิ | 72 |
| 29 | การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลองแบบทากูชิ | 74 |
| ภาพผนวกที่ | | |
| ฉ1 | ตัวอย่างชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ของถุงยางอนามัย | 110 |
| ฉ2 | เครื่อง Disc Pack Machine | 110 |
| ฉ3 | ตัวอย่างชิ้นงานก่อนทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก | 111 |
| ฉ4 | ตัวอย่างชิ้นงานขณะทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก | 111 |

การปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์

โดยวิธีการออกแบบการทดลอง

An Improvement of Tensile Force in the Packaging Seal Process

via Design of Experiments

คำนำ

ถุงยางอนามัยเป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่สำคัญและมีประโยชน์อย่างมาก โดยช่วยในการควบคุมประชากรและช่วยป้องกันโรคติดต่อทางเพศสัมพันธ์ เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันภาครัฐได้มีการรณรงค์ให้เห็นถึงประโยชน์ของถุงยางอนามัยมากขึ้น และผู้ผลิตถุงยางอนามัยเองก็ให้ความสำคัญในกระบวนการผลิตถุงยางอนามัยให้มีคุณภาพตามมาตรฐานการผลิต GMP (Good Manufacturing Practice) คือ ข้อพึงปฏิบัติในการผลิตที่ดี ดังนั้นถุงยางอนามัยที่ได้จึงมีคุณภาพที่ดี

ในกระบวนการผลิตถุงยางอนามัยมีหลายขั้นตอน อาทิเช่น การผสมสูตรน้ำยางและสี การขึ้นรูปถุงยางอนามัย การบรรจุหีบห่อและปิดผนึกถุงยางอนามัย เป็นต้น ทุกส่วนล้วนมีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตถุงยางอนามัย ในส่วนของการบรรจุหีบห่อและปิดผนึกถุงยางอนามัยเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากเช่นกัน เนื่องจากในปัจจุบันมีการแข่งขันในอุตสาหกรรมประเภทนี้สูงมาก ดังนั้นผู้ผลิตถุงยางอนามัยจึงต้องทำการพัฒนาและปรับปรุงให้หีบห่อที่บรรจุนั้น มีความสวยงาม รูปทรงและสีสันทันสมัยใหม่ พกพาง่าย สะดวกต่อการใช้งาน และวัสดุที่นำมาผลิตนั้นต้องเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้สิ่งที่สำคัญมาก คือ ความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก (Tensile Force of the Packaging Seal) เพราะหากไม่มีการควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว ก็อาจทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกมีค่าต่ำ คือ รอยปิดผนึกไม่แข็งแรง ซึ่งส่งผลทำให้ถุงยางอนามัยที่อยู่ภายในเกิดความเสียหาย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาถึงกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ในเครื่อง Disc Pack Machine โดยศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก และกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกมีค่าสูงขึ้นภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ และอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด ส่งผลทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงและลดโอกาสการเกิดของเสียจากปัญหารอยปิดผนึกไม่แข็งแรง โดยมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

ได้แก่ ความเร็วสายพาน อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป อุณหภูมิในการขึ้นรูป อุณหภูมิในการปิด
ผนึก ดังนั้นจึงนำเอาวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) มาใช้ในการปรับปรุง
กระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ และในการศึกษาหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการ
ปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ครั้งนี้สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้



วัตถุประสงค์

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาดังนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกของกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ในเครื่อง Disc Pack Machine
2. เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกมีค่าสูงขึ้นภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ และอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด
3. เสนอเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกเพื่อทำให้ค่า C_{pk} อยู่ในระดับที่ดีขึ้น และลดความคลาดเคลื่อนของกระบวนการลง ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้

ขอบเขตงานวิจัย

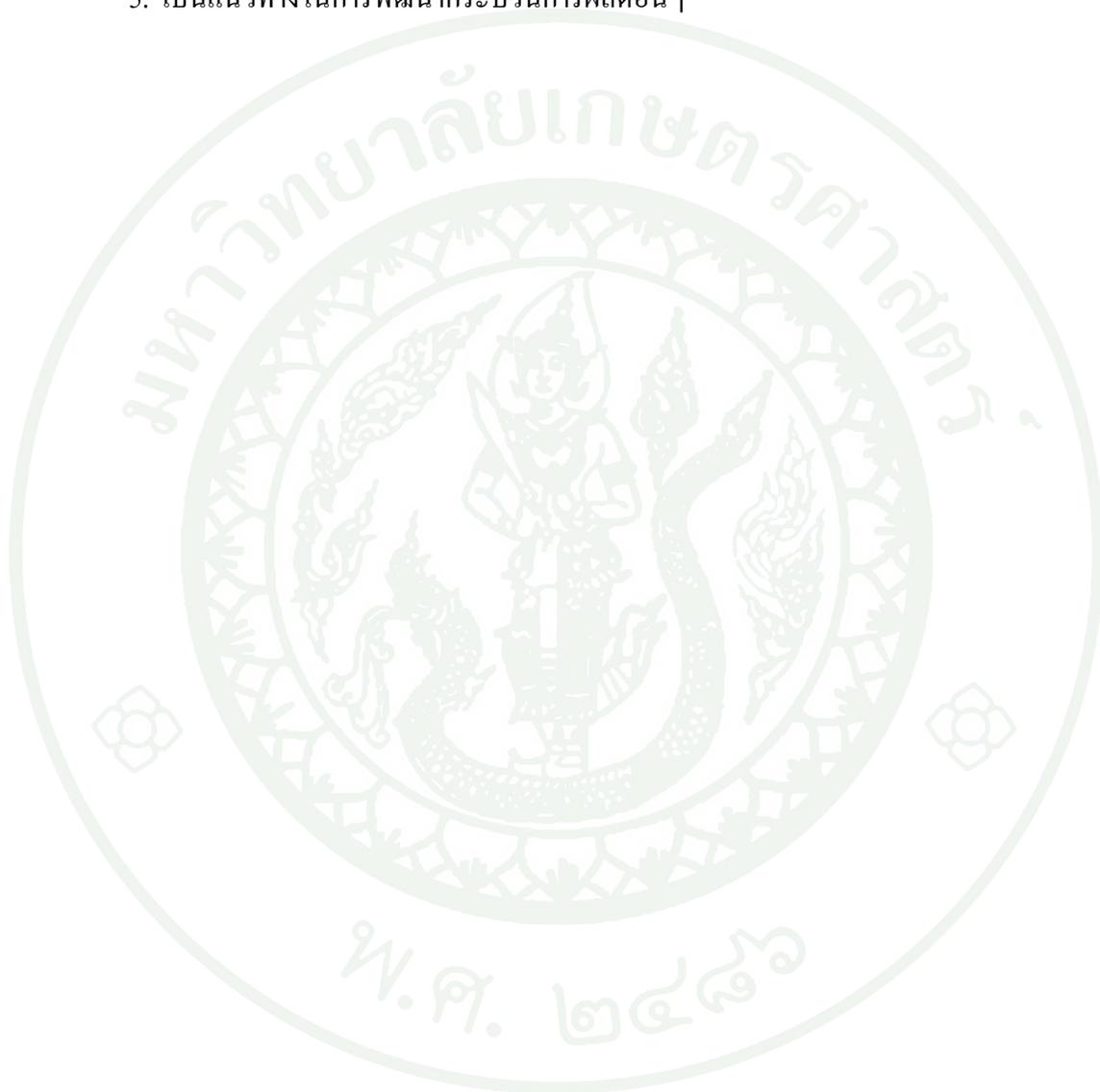
งานวิจัยฉบับนี้มีขอบเขตงานวิจัยดังนี้ คือ

1. ศึกษากระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ในเครื่อง Disc Pack Machine
2. ศึกษาค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกในบรรจุภัณฑ์รูปทรงถ้วย (Disc pack) ของถุงยางอนามัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความบกพร่องขณะทำการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์
2. ทำให้ต้นทุนในการผลิตลดต่ำลง และลดโอกาสการเกิดของเสียจากปัญหาหอรอยปิดผนึกไม่แข็งแรง

3. ทำให้สามารถผลิตได้ตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า
4. เป็นการปรับปรุงกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
5. เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตอื่นๆ



การตรวจเอกสาร

การดำเนินงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์โดยวิธีการออกแบบการทดลอง ได้อาศัยข้อมูลและทฤษฎีต่อไปนี้เป็นพื้นฐานในการดำเนินงานวิจัย

1. ประวัติของภาชนะบรรจุพลาสติก
2. ภาชนะบรรจุและเทคโนโลยีภาชนะบรรจุ
3. วัสดุพลาสติก
4. การขึ้นรูปแผ่นพลาสติกโดยเทคนิคเทอร์โมฟอร์ม
5. การปิดผนึกฟิล์ม
6. การทดสอบรอยปิดผนึก
7. การออกแบบการทดลอง
8. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล
9. การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ
10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ประวัติของภาชนะบรรจุพลาสติก

พลาสติก เป็นวัสดุภาชนะบรรจุชนิดใหม่ที่ถูกค้นพบ โดยนายจอห์น เวสลีย์ ไฮแอตต์ (John Wesley Hyatt) ชาวพิมพ์ชาวสหรัฐอเมริกา พลาสติกชนิดแรกที่ถูกค้นพบ คือ เซลลูลอยด์ (Celluloid หรือ Cellulose Nitrate) ในปี ค.ศ. 1868 โดยการนำเอาไพโรกซีลีน (Pyroxylin) ซึ่งเป็นสารที่ทำมาจากฝ้ายกับกรดไนตริก ผสมกับการบูร (Solid Camphor) ใช้ทำลูกบิลเลียด แทนงาช้าง นอกจากนั้นยังสามารถนำไปตัดแปดแปลงเป็นผลิตภัณฑ์อย่างอื่น ๆ ได้ เช่น เหมือกฟันปลอม แทนการใช้งาช้าง หลังจากนั้นมีการพัฒนาไปใช้ทำกระจกรถยนต์ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1882 บริษัท Eastman ได้นำพลาสติกไปประดิษฐ์เป็นฟิล์มภาพยนตร์

การคิดค้นพลาสติกได้หยุดชะงักไปชั่วระยะหนึ่ง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1909 นายลีโอ เฮนดริก เบเคอแลนด์ (Dr. Leo Hendrik Baekeland) ได้ค้นพบพลาสติกชื่อ ฟีนอลิก (Phenolic) โดยการสังเคราะห์สารฟีนอล (Phenol) กับสารฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เข้าด้วยกันพลาสติกชนิดนี้

รู้จักกันดีในชื่อของ Bakelite ใช้ทำอุปกรณ์ไฟฟ้า หูหม้อ ค้ำกระทะ เมื่อวิวัฒนาการค้นพบพลาสติกชนิดต่างๆ เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งกรรมวิธีการผลิตด้วย จึงทำให้อุตสาหกรรมพลาสติกขยายตัวอย่างรวดเร็วและนำไปสู่การผลิตเป็นภาชนะต่างๆ ตามตารางที่ 1 ถึงแม้ว่าพลาสติกจะเป็นวัสดุสังเคราะห์ แต่ก็มีน้ำหนักเบา และได้รับการพัฒนาขึ้นมาหลายชนิด ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน และสามารถนำไปผลิตเป็นภาชนะบรรจุได้ในปริมาณมาก และรวดเร็ว จึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ ราคาของภาชนะบรรจุพลาสติกจึงถูกกว่าภาชนะบรรจุจากวัสดุอื่น นอกจากนั้นยังมีน้ำหนักเบา สะดวกในการขนย้ายอีกด้วย

ตารางที่ 1 แสดงปีกำเนิดของพลาสติกที่ใช้ทำภาชนะบรรจุ

| ค.ศ. | ชื่อพลาสติก | ประเภทผลิตภัณฑ์ |
|------|----------------------------|--|
| 1868 | Cellulose Nitrate | กรอบแว่นตา, ลูกบิลเลียด, พลาสติกบรรจุของ, วัสดุใช้ทำพื้นปloom(ปัจจุบันใช้อะคริลิกแทน) และลูกปิงปอง |
| 1909 | Phenol-Formaldehyde | ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ไฟฟ้า, ค้ำมือจับหม้อกระทะ (ชนิดสีเข้ม) และโฟม |
| 1909 | Cold Molded | ปุ่มจับ และมือถือ |
| 1919 | Casein | กระดุม, เครื่องประดับ และกาว |
| 1926 | Alkyd | ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ไฟฟ้า, น้ำยาเคลือบผิว และสีน้ำมัน |
| 1926 | Aniline-Formaldehyde | อุปกรณ์ไฟฟ้า |
| 1927 | Cellulose Acetate | ฟิล์มถ่ายรูป และพลาสติกบรรจุของ |
| 1927 | Polyvinyl Chloride (PVC) | ผ้ายาง, กระเบื้องยาง, ท่อยาง, สายไฟ และขวดบรรจุของเหลว เช่น ขวดน้ำมันพืช ขวดแชมพูสระผม |
| 1929 | Urea-Formaldehyde | ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ไฟฟ้า, กาวไม้อัด |
| 1936 | Ethyl Cellulose | ผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ไฟฟ้า |
| 1936 | Acrylic | ป้ายโฆษณา, เลนส์, หลังกาโปรงใส และของชำร่วย |
| 1936 | Polyvinyl Acetate | ยางประกบข้อต่อ และกาว |
| 1938 | Cellulose Acetate Butyrate | พลาสติกบรรจุของ, ค้ำเครื่องมือ และพวงมาลัยรถยนต์ |
| 1938 | Polystyrene(PS) | ผนังด้านในตู้เย็น, ถังเบตเตอรี, กล่องบรรจุชนิดใสและทึบ, ตู้วิทยุ, หน้ากากโทรทัศน์ ตลับเทป และโฟม (สีขาว) |
| 1938 | Nylon (Polyamide) | เส้นใย, เสื้อผ้า และเกียร์ ส่วนรับน้ำหนักและเสียดสี |

ตารางที่ 1 (ต่อ)

| ค.ศ. | ชื่อพลาสติก | ประเภทผลิตภัณฑ์ |
|------|---------------------------------------|--|
| 1938 | Polyvinyl Acetal | กระจกแว่นตาใช้ในโรงงาน |
| 1939 | Polyvinylidene Chloride | พลาสติกหุ้มเบาะรถยนต์ (บางชนิด) |
| 1939 | Melamine-Formaldehyde | ถ้วยชาม และภาชนะบรรจุอาหาร |
| 1942 | Polyester (Unsaturated) | ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส เช่น เรือ รถยนต์ อ่างอาบน้ำ ถังน้ำ ผลิตภัณฑ์พลาสติกหล่อ |
| 1942 | Polyethylene (PE) | ขวด, ถุงพลาสติก, ถังพลาสติก และดอกไม้พลาสติก |
| 1943 | Fluorocarbon (Terflon) | วาล์ว, ส่วนรับน้ำหนัก, แผ่นกั้นระหว่างรอยต่อในเครื่องจักรกล และวัสดุเคลือบหม้อกระทะ |
| 1943 | Silicone | แผ่นฉนวนกันความร้อนในเครื่องจักร, แม่แบบยางในอุตสาหกรรมพลาสติกหล่อ และกาวเชื่อมกระจกในตู้ปลา |
| 1945 | Cellulose Propionate | พลาสติกบรรจุของ และปากกา |
| 1947 | Epoxy | ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสชนิดดี, น้ำยาเคลือบผิว, กาว, เครื่องมือและอุปกรณ์ |
| 1948 | Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) | เครื่องรับโทรทัศน์, กระจาปใส่เสื้อผ้า, หมวกกันน็อกชนิดดี และตัวโครงเครื่องใช้ไฟฟ้า |
| 1949 | Allylic | อุปกรณ์ไฟฟ้า |
| 1954 | Polyurethane | ฟองน้ำ, หนังสือพิมพ์, วัสดุเคลือบผิว และไม้แกะสลักเทียม |
| 1956 | Acetal | เกียร์ ส่วนรับน้ำหนักและเสียดสี |
| 1957 | Polypropylene (PP) | หมวกกันน็อก, ผนังด้านในตู้เย็น, ถังแบตเตอรี่, ถุงพลาสติก, ถังพลาสติกและภาชนะพลาสติกอื่นๆ |
| 1957 | Polycarbonate | กระจกหน้าหมวกของนักบินอวกาศ, โคมไฟสาธารณะ และขวดนมเด็กชนิดดี |
| 1959 | Chlorinated Polyether | วาล์ว |
| 1962 | Phenoxy | ขวด |
| 1962 | Polyallomer | เครื่องพิมพ์ดีด |
| 1964 | Ionomer | พลาสติกบรรจุเครื่องมือหรือของมีคม และลูกกอล์ฟ |

ตารางที่ 1 (ต่อ)

| ค.ศ. | ชื่อพลาสติก | ประเภทผลิตภัณฑ์ |
|------|---------------------------|--|
| 1964 | Polyphenylene Oxide | ถังแบตเตอรี่ |
| 1964 | Polyimide | ส่วนรับน้ำหนัก และชิ้นส่วนอุปกรณ์มอเตอร์วัดน้ำ |
| 1964 | Ethylene-Vinyl Acetate | ฝ้ายางพลาสติกชนิดหนา |
| 1965 | Parylene | น้ำยาเคลือบผิว |
| 1965 | Polysulfone | ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าชนิดทนความร้อนสูง |
| 1970 | Polyester (Thermoplastic) | ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์, เส้นใย และฟิล์มไมลาร์ |
| 1973 | Polybutylene | ท่อน้ำ |
| 1975 | Nitrile Resins | ภาชนะบรรจุ |

ที่มา: Barid and David (1982)

2. ภาชนะบรรจุและเทคโนโลยีภาชนะบรรจุ

ภาชนะบรรจุ (Packaging) หมายถึง วัตถุหรือวัสดุ ที่ใช้บรรจุสินค้าหรือสิ่งของ ด้วยวิธีการใส่หรือห่อ หรือด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ที่ทำให้สินค้าหรือสิ่งของที่อยู่ภายในถูกปกปิดมิดชิด โดยที่วัตถุหรือวัสดุที่ใช้บรรจุสินค้าและสิ่งของนั้น ต้องมีหน้าที่ปกป้องคุ้มครองสินค้า หรือสิ่งของที่อยู่ภายใน ให้มีความปลอดภัย สะดวกในการใช้งาน สะดวกในการขนส่งเคลื่อนย้าย และช่วยในการส่งเสริมการจำหน่ายสินค้าที่อยู่ภายใน

เทคโนโลยีภาชนะบรรจุ (Packaging Technology) หมายถึง การประยุกต์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์กับความรู้ทางด้านศิลปะ เพื่อสร้างเป็นภาชนะหรือวัตถุ สำหรับบรรจุหรือห่อสินค้า และภาชนะบรรจุที่เกิดจากกระบวนการประยุกต์ความรู้ดังกล่าว จะต้องมีความสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับสินค้า และเอื้ออำนวยความสะดวกในการขนส่ง การเคลื่อนย้าย การรวมหน่วยสินค้า ไปจนกระทั่งถึงการออกแบบเพื่อให้ถูกใจผู้ซื้อหรือผู้บริโภค

2.1 ความสำคัญของภาชนะบรรจุ

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า ภาชนะบรรจุสินค้ามีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าตัวสินค้า จนแทบจะเรียกได้ว่าตัวสินค้า และภาชนะบรรจุต้องเป็นสิ่งที่จะต้องอยู่คู่กัน เนื่องจากภาชนะบรรจุเป็นตัวแปรอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อสินค้าของผู้บริโภค และจากความหมายของภาชนะบรรจุ จะเห็นได้ว่าภาชนะบรรจุมีความสำคัญในหลายด้าน ได้แก่

2.1.1 ด้านการปกป้องคุ้มครองสินค้า

ในด้านการปกป้องคุ้มครองสินค้า ภาชนะบรรจุมีความสำคัญมากในการปกป้องสินค้าที่อยู่ภายในให้ปลอดภัยจากแรงกระแทก และแรงกดทับที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการขนส่ง การเก็บรักษาในโกดัง และการเก็บรักษาในร้านค้าปลีก รวมถึงการคุ้มครองการลักขโมย แสงแดด ความชื้น และความร้อน จนกระทั่งสินค้าถึงมือผู้บริโภคอย่างปลอดภัย

2.1.2 ด้านการรองรับ รวบรวม และห่อหุ้มสินค้า

ในด้านการรองรับ รวบรวม และห่อหุ้มสินค้า ภาชนะบรรจุมีความสำคัญในการรองรับสินค้า และรวบรวมสินค้า เพื่อทำให้เกิดความสะดวกในการขนส่งสินค้าจากผู้ผลิตไปยังผู้บริโภค

2.1.3 ด้านการให้ข้อมูลเกี่ยวกับสินค้า

ในด้านการให้ข้อมูลเกี่ยวกับสินค้า ภาชนะบรรจุมีความสำคัญในการแสดงให้ผู้บริโภคเห็นตัวสินค้า หรือบ่งบอกว่าสินค้าที่บรรจุอยู่ภายในคืออะไร ใครเป็นผู้ผลิต มีวิธีการใช้ และการเก็บรักษาอย่างไร ผลิตและหมดอายุเมื่อใด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าสินค้าข้างในเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทยา หรืออาหาร เวลาหมดอายุ เป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง

2.1.4 ด้านให้ความสะดวกกับผู้ผลิตและผู้บริโภค

ในด้านการให้ความสะดวกกับผู้ผลิตและผู้บริโภค ภาชนะบรรจุมีความสำคัญในการอำนวยความสะดวกในการบรรจุสินค้าลงไป อำนวยความสะดวกในระหว่างการเก็บรักษา การ

ขนส่ง และเมื่อถึงมือผู้บริโภค ภาชนะบรรจุควรจะอำนวยความสะดวกในการจับถือ พกพาสะดวก รวมทั้งควรที่จะเปิดและนำสินค้าออกมาใช้ได้โดยสะดวก ถ้าใช้ไม่หมดสามารถปิดฝาเก็บไว้ใช้ในครั้งต่อไปได้อีก หรือภาชนะบรรจุหลังจากใช้งานแล้วสามารถนำกลับไปใช้ใหม่หรือนำไปใช้งานอย่างอื่นได้ เช่น ขวดแก้วบรรจุแยม เมื่อใช้เสร็จแล้ว สามารถนำไปทำเป็นแก้วสำหรับน้ำดื่มได้ เป็นต้น

2.2 หน้าที่ของภาชนะบรรจุ

ภาชนะบรรจุ (Packaging) มีหน้าที่หลากหลายแปรเปลี่ยนไปตามยุคตามสมัยจากประวัติการพัฒนาภาชนะบรรจุ แสดงให้เห็นว่า หน้าที่เริ่มแรกของภาชนะบรรจุสินค้า คือ การรวมหน่วยสินค้า และช่วยในการขนส่งลำเลียงสินค้า ต่อมาได้รับการพัฒนาและเพิ่มหน้าที่การปกป้องรักษาคุณภาพสินค้า จนกระทั่งถึงปัจจุบันภาชนะบรรจุสินค้าต้องมีหน้าที่อำนวยความสะดวกในการบริโภค และโฆษณาสินค้าไปในตัวด้วย นอกจากนี้ภาชนะบรรจุยังมีส่วนสำคัญในการช่วยรักษาสภาพสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นภาชนะบรรจุสินค้าในปัจจุบันสามารถจำแนกได้เป็น 3 ด้าน คือ ด้านหน้าที่หลัก ด้านการตลาด และด้านหน้าที่อื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการจำแนกหน้าที่ของภาชนะบรรจุสินค้าตามด้านต่างๆ

| ด้านหน้าที่หลัก | ด้านการตลาด | ด้านหน้าที่อื่นๆ |
|---|-------------------------------------|--|
| 1. การปกป้องคุ้มครอง สินค้าที่อยู่ภายใน ให้อยู่ในสภาพดี | 1. การส่งเสริมการขาย | 1. สะดวกในการใช้สินค้า หรือผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายใน |
| 2. การหีบห่อสะดวกต่อการขนส่ง ลำเลียง จับ ถือ พกพา | 2. การแสดงข้อมูลรายละเอียดของสินค้า | 2. สามารถตั้งวางโชว์สินค้าได้สะดวกทั้งผู้ขายและผู้ซื้อ |
| 3. การให้ข้อมูลเกี่ยวกับสินค้า เพื่อให้ลูกค้าทราบ | 3. การตั้งราคาขายได้สูงขึ้น | 3. แสดงขนาดหรือลักษณะของสินค้าให้ลูกค้าทราบ เพื่อจะได้ตัดสินใจซื้อได้ถูกต้อง |
| 4. ดึงดูดให้ลูกค้าเกิดความสนใจอยากซื้อ เช่น รูปทรง สีสัน สี และกราฟิก | 4. การเพิ่มปริมาณขาย | 4. ช่วยให้ลูกค้าสามารถบริการตนเอง เป็นการลดภาระของผู้ขาย |
| | 5. ให้ความถูกต้องรวดเร็วในการขาย | 5. การซื้อขายปลอดภัย ถูกอนามัย ไม่เลอะเทอะ เปราะเปื้อนมือ |

ตารางที่ 2 (ต่อ)

| ด้านหน้าที่หลัก | ด้านการตลาด | ด้านหน้าที่อื่นๆ |
|-----------------|---|-----------------------------------|
| | 6. การรณรงค์ในเรื่องต่างๆ เช่น สัญลักษณ์รีไซเคิล ฉลากเขียว กินของไทยใช้ของไทย | 6. ช่วยให้ขายสินค้าได้ราคาสูงขึ้น |

ที่มา: ดวงฤทัย (2550)

จากตารางที่ 2 หน้าที่ของภาชนะบรรจุสินค้า สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

2.2.1 การปกป้องคุ้มครองสินค้า (Protection) ภาชนะบรรจุจะต้องได้รับการออกแบบให้สามารถคุ้มครองสินค้าภายในให้ปลอดภัยจากความเสียหายเนื่องจากการขนส่ง ป้องกันการเน่าเสีย ป้องกันแมลง-สัตว์กัดแทะ เพื่อไม่ให้สินค้าที่บรรจุอยู่ภายในแตกหัก เสียหาย เสื่อมสภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าสินค้าที่อยู่ภายในภาชนะบรรจุเป็นอาหาร ซึ่งเป็นสินค้าที่เน่าเสียได้ง่าย ผู้บริโภคจึงไม่ต้องการที่จะได้รับอันตรายจากอาหารเป็นผิติดอันเนื่องมาจากความบกพร่องของภาชนะบรรจุไม่เรียบร้อยสมบูรณ์

2.2.2 การหีบห่อสะดวกต่อการขนส่ง ลำเลียง จับถือ พกพา (Portability) ภาชนะบรรจุจะต้องอำนวยความสะดวกต่อการขนส่ง การขนย้าย ลำเลียง การเก็บรักษาในคลังสินค้า และต้องมีความมั่นคงแข็งแรง สามารถที่จะวางซ้อนทับกันได้หลายชั้น เพื่อประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บ ในระดับการขยปลีก ภาชนะบรรจุควรจะมีขนาดรูปร่างที่ลงตัว (Fitness size) ง่าย และสะดวกต่อการเรียงซ้อนในชั้นวางของ หรือชั้นแสดงโชว์สินค้า ในส่วนที่เกี่ยวกับผู้บริโภค ภาชนะบรรจุควรจะมีอำนวยความสะดวกในแง่ของการนำผลิตภัณฑ์ หรือสินค้าที่บรรจุอยู่ภายในไปใช้สอยตามชนิดของสินค้า หรือผลิตภัณฑ์ที่อยู่ภายใน ภาชนะบรรจุแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน และการเก็บรักษาเมื่อสินค้าถึงมือผู้บริโภค

2.2.3 การให้ข้อมูลเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ (Presentation) ภาชนะบรรจุควรแสดงให้เห็นตัวสินค้า หรือบ่งบอกว่าสินค้าที่บรรจุอยู่ภายในคืออะไร ใครเป็นผู้ผลิต มีวิธีการใช้และการเก็บรักษา

อย่างไร ผลิตภัณฑ์และหมวดอายุเมื่อใด โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าสินค้าข้างในเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทยา หรืออาหาร เวลาหมวดอายุเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง

2.2.4 ดึงดูดให้ลูกค้าเกิดความสนใจอยากซื้อ (Promotion) ภาชนะบรรจุควรได้รับการออกแบบให้ดึงดูดความสนใจของลูกค้า ทั้งรูปทรงสีฐาน และสีสันทันของภาชนะบรรจุ เพราะผู้บริโภคต้องการภาชนะบรรจุที่มีรูปทรงเด่นชัด สวยงาม สะดุดตา มองหาได้ง่าย สีที่ใช้ควรให้เด่นหรือแตกต่างจากสินค้าประเภทอื่น หรือสินค้าของคู่แข่ง เพราะจะทำให้ง่ายต่อการจดจำและยังช่วยลดความผิดพลาดในการหยิบฉวยสินค้าที่ไม่ต้องการได้อีกด้วย

2.2.5 ทำให้ตั้งราคาขายได้สูงขึ้น เนื่องจากภาชนะบรรจุเพื่อการขายปลีกที่มีความสวยงาม จะสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่สินค้า การสร้างความนิยมในสินค้า ตรา และเครื่องหมายการค้า ทำให้ลูกค้าเกิดความภักดี (Loyalty) ในตัวสินค้า ส่งผลให้ขายได้ในราคาที่สูงขึ้น หรือเราเรียกว่าสินค้าแบรนด์เนม (Brandname)

2.2.6 การเพิ่มปริมาณขาย ภาชนะบรรจุสามารถเพิ่มปริมาณการขายได้โดยการรวมหน่วยสินค้าในภาชนะบรรจุ เช่น นมกล่อง 1 โหล ถ้านำมาบรรจุในกล่องกระดาษลูกฟูกที่มีหูหิ้ว จะทำให้สามารถขายได้ที่ละ 12 กล่อง หรือการขายน้ำยารีดผ้าเรียบ พร้อมกับซองน้ำยารีดผ้าเรียบที่ใช้เดิม โดยการใช้ฟิล์มหดรัดสินค้าไว้รวมกันเพื่อขายคู่กัน เป็นต้น

2.2.7 การรณรงค์ในเรื่องต่างๆ ภาชนะบรรจุที่มีบทบาทมากในการช่วยรณรงค์ในเรื่องต่างๆ เช่น สัญลักษณ์รีไซเคิล ฉลากเขียว กินของไทยใช้ของไทย สัญลักษณ์ผลิตภัณฑ์สินค้าไทย หรือการรักษาสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

2.3 ประเภทของภาชนะบรรจุพลาสติก

ภาชนะบรรจุพลาสติกเพื่อการบรรจุหรือการหีบห่อ สามารถจำแนกประเภทออกได้หลายวิธี ซึ่งพอจะแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 3 กลุ่ม ตามคุณสมบัติ รูปร่าง และประเภทของการใช้งาน ดังนี้

2.3.1 การจำแนกตามคุณสมบัติของภาชนะบรรจุ

การจำแนกประเภทของภาชนะบรรจุพลาสติก ตามคุณสมบัติของภาชนะบรรจุ นั้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

ก. ภาชนะบรรจุพลาสติกชนิดอ่อนตัวได้ (Flexible) หมายถึง ภาชนะบรรจุที่ทำจากแผ่นพลาสติกชนิดเดียวกัน หรือหลายชนิดรวมกัน และสามารถเปลี่ยนรูปทรงได้ เช่น ถุงพลาสติก ฟิล์มพลาสติก เป็นต้น

ข. ภาชนะบรรจุพลาสติกชนิดกึ่งอ่อนกึ่งแข็ง (Semi-rigid) หมายถึง ภาชนะบรรจุที่มีการขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุแล้ว แต่ภาชนะบรรจุที่ไม่ได้มีลักษณะแข็ง คือ สามารถยืดหยุ่นได้แต่คงรูป เช่น ถ้วยโฟม ถาดโฟม หลอดบีบ

ค. ภาชนะบรรจุพลาสติกชนิดคงรูป (Rigid) หมายถึง ภาชนะบรรจุที่มีการขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุรูปแบบต่างๆ ที่มีลักษณะแข็ง และคงรูป เช่น ขวด กล่อง ลัง ถาด ถ้วย

2.3.2 การจำแนกตามรูปทรงของภาชนะบรรจุ

การจำแนกประเภทของภาชนะบรรจุพลาสติก ตามรูปทรงของภาชนะบรรจุ สามารถแบ่งรูปทรงออกได้เป็น 6 แบบ คือ

ก. รูปทรงถุง ได้แก่ ถุงพลาสติกที่มีขนาดเล็กไปจนถึงถุงขนาดใหญ่ ขึ้นกับลักษณะการใช้งาน

ข. รูปทรงขวด ได้แก่ ขวดพลาสติกรูปทรงต่างๆ ที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เหมาะสมกับสินค้า สภาพการใช้งานหรือสภาพการบรรจุ

ค. รูปทรงหลอดบีบ สินค้าที่นิยมบรรจุในหลอดบีบจะมีลักษณะขุ่นหนืด เช่น ยาสีฟัน ยารักษาโรคที่มีลักษณะเป็นครีมข้น รูปทรงแบบนี้จะสะดวกในการนำสินค้าที่บรรจุอยู่ภายในมาใช้ และการเก็บรักษาสินค้าเมื่อถูกเปิดใช้แล้ว

ง. รูปทรงกล่องตั้ง ใช้สำหรับบรรจุสินค้าที่มีน้ำหนักมาก เช่น ผลผลิตทางการเกษตร ขวดย่ำอัดลม ขวดเบียร์

จ. รูปทรงตามสินค้าที่บรรจุอยู่ภายใน ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) ประเภทรัดรูปสินค้า คือ จะเป็นภาชนะบรรจุเพื่อการหีบห่อที่ทำมาจากแผ่นฟิล์มหด (Shrink Film) ที่นำมาห่อสินค้า แล้วผ่านความร้อน แผ่นฟิล์ม ก็จะหดรัดสินค้า ข้อดีของภาชนะบรรจุสินค้านี้คือ จะเห็นสินค้าที่อยู่ภายในชัดเจน

2) ประเภทบลิสเตอร์แพ็คเกจ (Blister Package) คือ จะเป็นภาชนะบรรจุที่นำแผ่นฟิล์มพลาสติกมาขึ้นรูป ให้มีลักษณะตามแบบของสินค้าที่จะบรรจุ แล้วจึงนำสินค้าที่จะบรรจุลงไปวางในช่องของแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปแล้ว ปิดด้านหลังด้วยกระดาษ นิยมใช้บรรจุสินค้าประเภทของเล่นเด็ก ยารักษาโรค อุปกรณ์เครื่องมือช่าง ภาชนะบรรจุแบบนี้มีข้อดี คือ มีความแข็งแรง สามารถคุ้มครองสินค้าได้ และทำให้เห็นสินค้าที่อยู่ภายในชัดเจน

ฉ. รูปทรงถ้วยและถาด จะนิยมใช้บรรจุสินค้าพร้อมบริโภค เช่น บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปที่สามารถเปิดฝาและเติมน้ำร้อนลงในภาชนะบรรจุก็สามารถรับประทานได้ทันที กล่องบรรจุขนมปังกรอบ ถาดบรรจุผัก-อาหารสด และยังสามารถทำด้วยบรรจุผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีก เช่น ถ้วยบรรจุถุงยางอนามัย เป็นต้น

2.3.3 การจำแนกตามการใช้งานของภาชนะบรรจุ

การจำแนกประเภทของภาชนะบรรจุพลาสติก ตามลักษณะการใช้งาน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

ก. ภาชนะบรรจุพลาสติกเพื่ออุตสาหกรรม (Industrial Plastic Packaging) เป็นภาชนะบรรจุที่จะนำมาบรรจุหรือหีบห่อสินค้าที่ละมากๆ เพื่อใช้ในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

ข. ภาชนะบรรจุพลาสติกสำหรับผู้บริโภคทั่วไป (Consumers' Plastic Packaging) เป็นภาชนะบรรจุที่ใช้บรรจุสินค้าให้แก่ผู้บริโภค ซึ่งลักษณะของภาชนะบรรจุประเภทนี้จะต้องมีความสวยงาม มีความสะดวกในการบรรจุการขนย้ายสินค้า และมีความสะดวกในการใช้งาน

ค. ภาชนะบรรจุที่ใช้เฉพาะงาน จะเป็นภาชนะบรรจุที่ทำขึ้นมาเป็นพิเศษให้เหมาะกับงานที่จะใช้บรรจุ ภาชนะบรรจุประเภทนี้จะมีราคาสูง ได้แก่ ถุงบรรจุสุญญากาศ ถุง Retort Pouch ถุงขนาดใหญ่พิเศษสำหรับการบรรจุสินค้าทางการเกษตรเพื่อการขนส่ง หรือกล่องพลาสติกที่ใช้กับเตาไมโครเวฟ หรือนำไปนั่งผ่านความร้อนได้

3. วัสดุพลาสติก

พลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมภาชนะบรรจุเพื่อการหีบห่อ และการบรรจุสินค้า พลาสติกเป็นสารสังเคราะห์ที่มนุษย์คิดค้นขึ้นมา ประเภทพอลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน คลอรีน เป็นต้น ที่ได้มาจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการเชื่อมโยงโมเลกุลของสารที่มีขนาดเล็ก (Monomer) หลายๆ โมเลกุล จนกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เรียกว่าพอลิเมอร์และปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในการเชื่อมโยงนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization)

สมาคมวิศวกรพลาสติก (SPE) และสมาคมอุตสาหกรรมพลาสติก (SPI) แห่งสหรัฐอเมริกา ได้ให้คำจำกัดความของพลาสติกว่า พลาสติก คือวัสดุที่ประกอบด้วยสารหลายอย่าง มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คงรูปเมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิต ลักษณะอ่อนตัวเมื่อทำการผลิต ซึ่งโดยมากใช้กรรมวิธีการผลิตด้วยความร้อน หรือแรงอัด หรือทั้งสองอย่าง

สุรพล (2530) ได้กล่าวไว้ในรายงานการสัมมนาเรื่อง การบรรจุหีบห่อด้วยฟิล์มพลาสติกว่า พลาสติก หมายถึง พอลิเมอร์หรือสารประกอบที่มีจำพวกสารพลาสติกไฮเบอร์อยู่ด้วย หรือจำพวก สารสเตปิลไลเซอร์ หรือสารเติมแต่งอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย

ภาชนะบรรจุพลาสติกที่ใช้ในการบรรจุการหีบห่อสินค้า ในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่ใช้ทำภาชนะบรรจุ พลาสติกที่นิยมใช้ในการทำภาชนะบรรจุเพื่อการบรรจุหรือการหีบห่อสินค้า เช่น โพลีโพรพิลีน (Polypropylene), โพลีเอทิลีน (Polyethylene), ไนลอน (Nylon), โพลีเอสเตอร์ (Polyester) เป็นต้น และในส่วนของโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติที่ดีหลายอย่าง คือ มีราคาถูก น้ำหนักเบา เป็นมันเงามาก/ใส, โปรงแสง ความแข็งแรงสูง ต้มฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ กั้นการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ทนต่อกรดและด่างได้ดีมาก ขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุง่าย ดังนั้นโพลีโพรพิลีนจึงเป็นที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

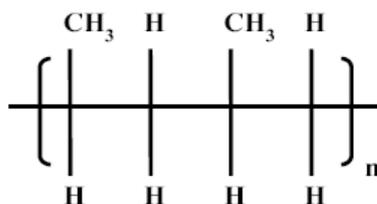
3.1 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene; PP)

โพลีโพรพิลีน (Brydson, 1995) เป็นพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง มีความไม่อิมิตัวน้อยมาก โครงสร้างของโพลีโพรพิลีนมีหมู่เมทิลบริเวณสายโซ่หลัก ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติของ โพลีโพรพิลีน โดยโพลีโพรพิลีนมี 3 โครงสร้างคือ ไอโซแทกติก (Isotactic) ซินดีโอแทกติก (Syndiotactic) และอะแทกติก (Atactic) ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้มีการจัดเรียงหมู่เมทิลแตกต่างกัน

โครงสร้างของไอโซแทกติกจะมีความเป็นระเบียบ หมู่เมทิลจะอยู่ด้านเดียวกันหมด ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวแบบเกลียวทำให้มีความเป็นผลึกสูง ส่วนมากในทางการค้าโพลีโพรพิลีนจะมีโครงสร้างแบบไอโซแทกติกสูงถึง 90-95 % ซินดีโอแทกติกจะมีการจัดเรียงตัวของหมู่เมทิลแบบซิกแซกอย่างเป็นระเบียบ จึงมีความเป็นผลึกสูง ซึ่งซินดีโอแทกติกจะเกิดเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์กับ ไอโซแทกติก และโครงสร้างอะแทกติกจะไม่เกิดการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์เนื่องจากหมู่เมทิลที่มีการวางตัวไม่เป็นระเบียบทำให้ความเป็นผลึกลดลง

ไอโซแทกติกโพลีโพรพิลีน มีคุณสมบัติคล้ายกับโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง แต่ความหนาแน่นต่ำกว่า อุณหภูมิการอ่อนตัวสูงกว่า ทำให้มีอุณหภูมิการใช้งานที่สูงกว่า มีจุดหลอมละลายสูงกว่า โดยคุณสมบัติทางกล และทางความร้อนของโพลีโพรพิลีนขึ้นกับไอโซแทกติกซิตี (Isotacticity) น้ำหนักโมเลกุล และลักษณะโครงสร้าง เมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นโพลีโพรพิลีนจะมีความแข็งแรงในการดึง ความแข็ง และจุดหลอมละลายลดลง แต่มีความแข็งแรงในการกระแทกสูงขึ้น ในด้านคุณสมบัติทางความร้อน โพลีโพรพิลีนมีค่าความจุความร้อนต่ำกว่าโพลีเอทิลีน แต่สูงกว่าโพลีสไตรีน

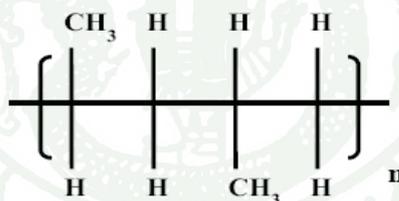
โพลีโพรพิลีนจะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีมากกว่าโพลีเอทิลีน เพราะว่ามีคาร์บอนตติยภูมิอยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายเช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชัน โครงสร้างของไอโซแทกติกโพลีโพรพิลีนแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของไอโซแทกติกโพลีโพรพิลีน

ที่มา: มาลินี (2540)

อะแทกติกเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดร่วมกับกระบวนการสังเคราะห์ไอโซแทกติก ซึ่งมีความเป็นอสัณฐาน อยู่ในสภาวะระหว่างยางและบิพูเมน สามารถบวมตัวเมื่อละลายในอะลิฟาติก และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ในยุโรปมักนำไปใช้ในการทำหลังคา สารกันซึมและใช้ในการทำถนน และซินดีโอแทกติกโพลีโพรพิลีนแสดงดังภาพที่ 2 เริ่มสังเคราะห์เมื่อ ค.ศ. 1990 มีความโปร่งแสงทนความร้อน แต่มีความเหนียวต่ำเมื่อเทียบกับไอโซแทกติก ทำการสังเคราะห์จาก Metallocene



ภาพที่ 2 โครงสร้างของซินดีโอแทกติกโพลีโพรพิลีน

ที่มา: มาลินี (2540)

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของโพลีโพรพิลีน

| ลักษณะทางกายภาพ | Unmodified | Copolymer | Impact Type |
|----------------------------------|------------|-----------|-------------|
| ความถ่วงจำเพาะ | 0.904 | 0.9 | 0.91 |
| ปริมาตร (ลูกบาศก์นิ้ว/ปอนด์) | 30.6 | 31.0 | 30.5 |
| ทนแรงดึง (ปอนด์/ตารางนิ้ว) | 5500 | 4500 | 4400 |
| ทนต่อแรงอัด (ปอนด์/ตารางนิ้ว) | 8000 | 7000 | 6000 |
| ทนแรงกระทบ (ปอนด์/ตารางนิ้ว) | 1.5 | 10 | 15 |
| ทนความร้อนโดยปกติ (องศาเซลเซียส) | 135 | 104.44 | 102.2 |
| ความใส | โปร่งใส | โปร่งใส | ทึบแสง |
| ทนแสงแดด | พอใช้ | พอใช้ | พอใช้ |
| ทนกรดอ่อน | ได้ | ได้ | ได้ |
| ทนกรดแก่ | ไม่ได้ | ไม่ได้ | ไม่ได้ |
| ทนด่าง | ได้ | ได้ | ได้ |
| ทนสารละลาย (องศาเซลเซียส) | < 79.44 | < 79.44 | ไม่ได้ |

ที่มา: พิชิต (2542)

การนำไปใช้ประโยชน์ของโพลีโพรพิลีนสามารถใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมาย เช่น ถังบรรจุอาหารร้อน พลาสติกหุ้มของบุหรี เชือกปอพลาสติก แล็บพลาสติกมัดของ ริปบิน สายไฟฟ้า สายเคเบิล ถังแบตเตอรี่ ถังตักน้ำ ฝาปิดโถส้วม หมวกกันน็อค กระเป๋าใส่ของ ฯลฯ จะเห็นได้ว่าพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีนได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย ทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีโพรพิลีนแสดงดังตารางที่ 3

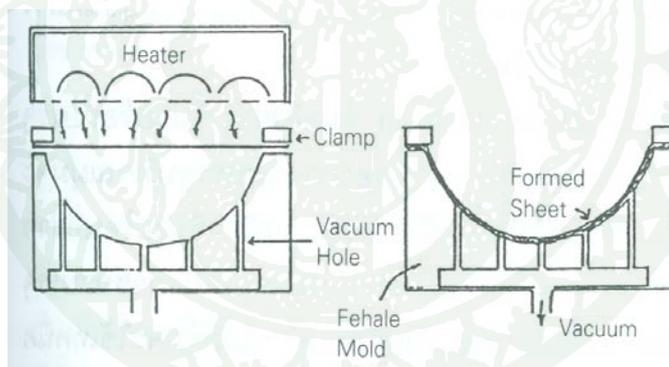
4. การขึ้นรูปแผ่นพลาสติกโดยเทคนิคเทอร์โมฟอร์ม (Sheet Thermoforming Processes)

หลักการสำคัญในการขึ้นรูปพลาสติกวิธีนี้ คือ การนำแผ่นเทอร์โมพลาสติกไปลงไฟจนอ่อนตัว แล้วนำไปอัดขึ้นรูป ทิ้งไว้ให้เย็น พลาสติกก็จะคงรูปตามแม่แบบที่ต้องการ กรรมวิธีแบบนี้เหมาะกับการผลิตชิ้นงานในจำนวนไม่มากนัก บางครั้งจะใช้กับงานออกแบบผลิตภัณฑ์ทดสอบ (Phototype) ซึ่งสามารถสร้างแม่แบบได้รวดเร็ว และใช้ผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้ เปรียบเทียบกับการผลิตด้วยกรรมวิธีแบบฉีด (Injection Moulding) จะต้องลงทุนทำแม่แบบแพง ใช้

เวลาเตรียมการนาน และบางครั้งไม่มีเครื่องจักรขนาดใหญ่พอกับขนาดของชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปผนังด้านในของตู้เย็น หากจำแนกการอัดตามกรรมวิธีนี้ สามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ

4.1 การอัดด้วยแม่แบบ (Mechanical Thermoforming) เป็นการอัดขึ้นรูปแผ่นพลาสติกที่ถูกยึดเข้ากับกรอบยึด (Frame หรือ Yoke) แล้วลนแผ่นพลาสติกให้ร้อนจนอ่อนตัวโดยใช้อุณหภูมิในช่วง 275-400 องศาฟาเรนไฮต์ กดอัดแผ่นพลาสติกที่อ่อนตัวแล้วในแบบกับแม่พิมพ์ ทิ้งไว้ให้เย็น จึงถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ วิธีการนี้นิยมนำมาใช้ทำภาชนะบรรจุพลาสติกแบบ Blister Pack

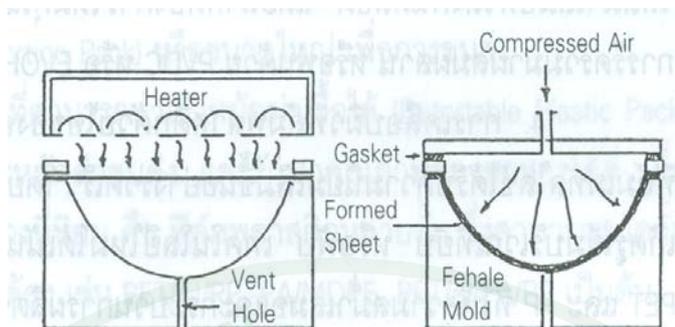
4.2 การอัดด้วยสุญญากาศ (Vacuum Thermoforming) เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด กรรมวิธีการผลิตภาชนะบรรจุสินค้าที่ทำจากวิธีนี้ ทำโดยการยึดแผ่นพลาสติกกับกรอบยึด แล้วลนไปจนแผ่นพลาสติกร้อนอ่อนตัว หลังจากนั้นจึงกดกรอบลงแนบกับแม่พิมพ์ แล้วดูดอากาศออกจากช่องว่าง ระหว่างแผ่นพลาสติกกับแม่พิมพ์ แผ่นพลาสติกจะแนบสนิทกับแม่พิมพ์ ปลดปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นจนแข็งตัว จึงถอดเอาชิ้นงานออก แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การอัดด้วยสุญญากาศ

ที่มา: ดวงฤทัย (2550)

4.3 การอัดลม (Air หรือ Blow Thermoforming) เป็นการอัดขึ้นรูปแผ่นพลาสติกที่ตรงกันข้ามกับการอัดด้วยสุญญากาศ คือ แทนที่จะดูดอากาศออกกลับอัดอากาศเข้าไปแทน ขั้นตอนการขึ้นรูปวิธีนี้จะทำการยึดแผ่นพลาสติกเข้ากับกรอบยึด ลนไปจนแผ่นพลาสติกร้อนอ่อนตัว แล้วจึงอัดอากาศเข้าไปให้แผ่นพลาสติกแนบกับแม่พิมพ์ ทิ้งไว้ให้เย็นจนแข็งตัวแล้วจึงเอาชิ้นงานออก แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การอัดลม

ที่มา: ดวงฤทัย (2550)

พลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติก สามารถใช้กับกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปนี้ได้ ที่นิยมมากได้แก่ PVC, Polystyrene, Cellulosics & Acrylics และพลาสติกแผ่น (PP-Sheet) ที่ใช้มักจะเป็นพลาสติกแผ่นที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตแบบรีด (Extrusion) มากกว่าแบบอื่น ทั้งนี้เพราะราคาถูกกว่าและยึดตัวได้มากกว่า ชิ้นงานที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตแบบนี้มีมากมาย เช่น ป้ายโฆษณา ป้ายชื่อร้าน ผนังชั้นในของตู้เย็น บรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น

5. การปิดผนึกฟิล์ม (Sealing of film)

การปิดผนึก (Sealing) หมายถึงการทำให้เกิดพันธะระหว่างแผ่นฟิล์มพลาสติก ซึ่งจะมีความหมายแตกต่างจากการเชื่อม (Welding) ที่หมายถึงการทำให้เกิดพันธะระหว่างแผ่นซีท การทำให้เกิดพันธะระหว่างแผ่นฟิล์มหรือแผ่นซีทนั้นจะมีอยู่หลายวิธีที่ต้องอาศัยปัจจัยต่างๆ ที่จะทำให้เกิดพันธะหรือการเชื่อมแน่นขึ้นได้คือ การใช้แรงทางกล การใช้ความร้อน การใช้ไฟฟ้าความถี่สูง (High frequency current) การใช้อุลตราโซนิก และการใช้กาว การใช้ความร้อนในการปิดผนึกหรือการเชื่อมนี้เป็นวิธีหนึ่งที่มีความสำคัญและนิยมใช้กันมากสำหรับเทอร์โมพลาสติก โดยความร้อนที่แก่เทอร์โมพลาสติกอาจเป็นการให้ความร้อนโดยตรงหรือโดยทางอ้อมก็ได้ เมื่อกกล่าวถึงการปิดผนึกด้วยความร้อนมักจะหมายถึงการให้ความร้อนโดยตรงต่อเทอร์โมพลาสติก แต่การปิดผนึกด้วยแรงทางกล ไฟฟ้าความถี่สูง อุลตราโซนิกหรือการใช้กาวนั้นมักจะมีความร้อนโดยทางอ้อมเข้าไปเป็นส่วนร่วมด้วยเสมอ เช่น การใช้อุลตราโซนิกจะเป็นวิธีที่ทำให้เกิดความร้อนโดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานการสั่นทางกลที่ส่งไปยังผิวสัมผัสของแผ่นฟิล์มทั้งสอง ทำให้ผิวทั้งสองเกิด

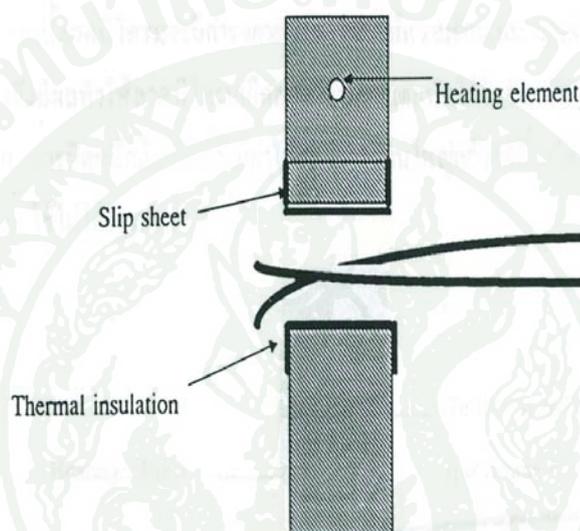
การสั้นแล้วเปลี่ยนแรงทางกลนี้ให้เป็นความร้อนที่จะหลอมแผ่นฟิล์มให้เกิดการเชื่อมติดกันได้ จะเห็นว่าการใช้อุลตราโซนิกก็เป็นการปิดผนึกด้วยความร้อนเช่นกันแต่เป็นการให้ความร้อนโดยทางอ้อม

5.1 การปิดผนึกด้วยความร้อน (Heat sealing)

เป็นการปิดผนึกโดยการให้ความร้อนโดยตรงต่อฟิล์มเทอร์โมพลาสติก โดยวิธีการให้ความร้อนนี้จะมีอยู่ 2 แบบ คือ การให้ความร้อนแบบต่อเนื่องซึ่งจะเรียกว่า (Thermal heat sealing) และการให้ความร้อนแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งจะเรียกว่า (Impulse sealing)

5.1.1 การให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง (Thermal heat sealing) เป็นการปิดผนึกด้วยความร้อนที่ให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องและอุณหภูมิคงที่ แหล่งให้ความร้อนอาจมาจากไอน้ำ อากาศร้อน น้ำร้อน น้ำมันร้อน และไฟฟ้า จะให้ความร้อนต่อเครื่องมือปิดผนึก (Sealing tool) ที่จะนำความร้อนไปสู่ฟิล์มพลาสติกที่ต้องการปิดผนึก เครื่องมือปิดผนึกอาจมีลักษณะเป็นแท่ง (Bar or Jaw) เป็นเส้นลวด เป็นแท่งปิดผนึกที่หมุนรอบได้ (Rotary-type bar) หรือเป็นแถบยาง (Band) ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน โดยที่แท่งปิดผนึกอาจสลับเป็นลวดลายเพื่อให้ได้รอยผนึกที่แข็งแรงขึ้น การปิดผนึกเริ่มจากการนำแผ่นฟิล์มทั้งสองมาประกบกันภายใต้ความดัน ณ เวลานั้นแผ่นฟิล์มจะได้รับความร้อนโดยตรงจากแท่งปิดผนึกซึ่งอาจจะมีแหล่งให้ความร้อนเพียงด้านเดียวหรือทั้งสองด้านก็ได้ ความร้อนจะเคลื่อนผ่านผิวแผ่นฟิล์มเข้าไปสู่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นฟิล์มทั้งสอง ทำให้ผิวสัมผัสเกิดการหลอมและสร้างพันธะต่อขึ้น หลังจากนั้นจึงนำความดันออกปล่อยให้รอยผนึกเย็นตัวลงดังภาพที่ 5 ในภาพจะเห็นว่าแท่งปิดผนึกบนจะถูกครอบด้วยแผ่นหล่อลื่น (Slip sheet) ซึ่งครอบเพื่อป้องกันการเหนียวติดของฟิล์มพลาสติกกับแท่งปิดผนึกที่อุณหภูมิสูง แผ่นหล่อลื่นที่ใสมักจะเป็นเทฟลอน (Teflon) หรือยางซิลิโคน ส่วนแท่งปิดผนึกล่างจะถูกครอบด้วยฉนวนความร้อน (Thermal insulation) ซึ่งมักจะใช้ยางซิลิโคน ทั้งนี้เพราะยางซิลิโคนมีสมบัติในการทนต่อความร้อนสูงและมีสมบัติการหล่อลื่น นอกจากนี้ยางซิลิโคนยังมีความยืดหยุ่นช่วยให้ได้ความดันในการปิดผนึกสม่ำเสมอ การปิดผนึกโดยวิธีนี้จะใช้ในการปิดผนึกแผ่นฟิล์มพลาสติกที่มีความบาง แต่ถ้าเป็นแผ่นฟิล์มที่หนาอาจต้องใช้เครื่องมือให้ความร้อน ณ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นฟิล์มทั้งสองเพิ่มปัจจัย 3 ประการที่ต้องควบคุมในขณะที่ทำการปิดผนึกเพื่อให้ได้รอยผนึกที่ดี คือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาของการปิดผนึก เพราะถ้าหากปัจจัยทั้ง 3 นี้มีค่าน้อยเกินไป จะทำให้รอยผนึกเกิดการแยกออกจากกันได้ แต่ถ้าปัจจัยทั้ง 3 นี้มากเกินไปพลาสติกอาจเกิดเสีรูปและเกิดฟองอากาศขึ้นได้ การควบคุมปัจจัยทั้ง 3 นี้จะต้องมีความสอดคล้องกัน เช่นถ้าใช้ความดันสูงมากก็ควรใช้เวลา

น้อยลง ส่วนอุณหภูมิที่จะขึ้นอยู่กับฟิล์มพลาสติกที่ใช้ ฟิล์มพลาสติกที่ใช้มากในการปิดผนึกโดยวิธีนี้คือพอลิเอทิลีนและไวนิล โดยพอลิเอทิลีนจะตั้งที่อุณหภูมิประมาณ 121 องศาเซลเซียส และไวนิลจะตั้งที่อุณหภูมิประมาณ 185 องศาเซลเซียส ข้อดีของวิธีนี้คือราคาถูก ง่าย และรวดเร็ว ส่วนข้อเสียคือในการปิดผนึกมิได้ปล่อยให้รอยผนึกเย็นตัวลงภายใต้ความดันทำให้รอยผนึกไม่แข็งแรง เนื่องจากอาจจะมีบางส่วนของฟิล์มที่หลอมเหลวอยู่ขณะเปิดแท่งปิดผนึก ดังนั้นวิธีที่จะกล่าวต่อไปจะเป็นวิธีที่มีการเย็นตัวของรอยผนึกภายใต้ความดัน

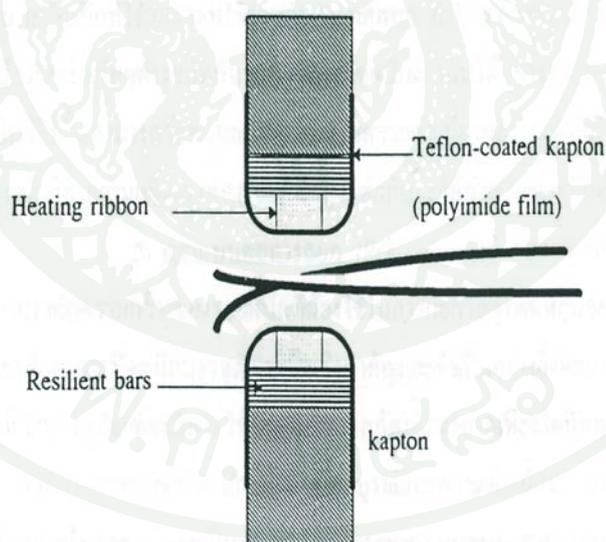


ภาพที่ 5 การปิดผนึกด้วยการให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง

ที่มา: สำนักบริการวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2539)

5.1.2 การให้ความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง (Impulse sealing) เป็นการปิดผนึกด้วยความร้อนที่เหมือนกับวิธีแรก ตรงที่ต้องการความร้อนจากภายนอกเข้ามาหลอมฟิล์มเทอร์โมพลาสติก แต่จะต่างจากวิธีแรก ตรงที่จะมีแท่งให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิไม่คงที่และให้ความร้อนเป็นจังหวะ โดยอุณหภูมิของแท่งปิดผนึกจะสูงขึ้นเมื่ออยู่ในช่วงให้ความร้อนและจะลดลงเมื่อปล่อยให้รอยผนึกเย็นตัวลงภายใต้ความดัน ดังนั้นแท่งปิดผนึกจะมีค่าความจุความร้อนต่ำ เพื่อสามารถทำให้ร้อนและเย็นตัวลงได้อย่างรวดเร็ว ส่วนประกอบของวิธีนี้แสดงดังภาพที่ 6 แท่งปิดผนึกแต่ละแท่งจะถูกครอบด้วยผิวที่ยืดหยุ่น (Resilient surface) ของยางซิลิโคนแล้ว ลวดนิโครมจะวางอยู่เหนือผิวที่ยืดหยุ่นนี้ และถูกครอบด้วยฉนวนไฟฟ้าของวัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้า เช่นยางซิลิโคนเคลือบเส้นใยแก้ว เทฟลอนเคลือบเส้นใยแก้ว หรือเทฟลอนเคลือบแคปตัน (Kapton) เมื่อวางแผ่นฟิล์มระหว่างแท่ง

ปิดผนึกทั้งสอง แอ่งปิดผนึกจะปิดลงภายใต้ความดันแล้วจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดนิโครมในระยะเวลาสั้นๆ ความต้านทานของลวดนิโครมจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นความร้อนใช้ในการหลอมแผ่นฟิล์มให้ผนึกติดกัน หลังจากนั้นความร้อนก็จะถูกนำออกโดยน้ำหรืออากาศที่อยู่ภายในแอ่งปิดผนึกและลวดนิโครมก็จะถูกทำให้เย็นตัวลงด้วย รอยผนึกก็จะถูกทำให้เย็นตัวลงภายใต้ความดันที่ยังกดทับอยู่ เมื่อรอยผนึกเย็นตัวลงแล้วจึงค่อยเปิดแอ่งปิดผนึก การทำให้รอยผนึกเย็นตัวภายใต้ความดันนี้จะทำให้ได้รอยผนึกที่แข็งแรง เนื่องจากรอยผนึกถูกทำให้เย็นตัวลงก่อนที่จะถูกแรงภายนอกมากระทำหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงโมเลกุล ทำให้ได้รอยผนึกที่ดีไม่ยับป้างัยที่ต้องควบคุมในการปิดผนึกนี้ คือ อุณหภูมิ ความดันและเวลา โดยที่การตั้งเวลาจะขึ้นอยู่กับความหนาและชนิดของฟิล์มพลาสติกที่ใช้ รอยผนึกที่กว้างนั้นต้องการความดันที่สูงขึ้น และเมื่อไรก็ตามที่เพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนแล้วจะต้องมีการเพิ่มอัตราการเย็นตัวด้วย จะเห็นว่าการปิดผนึกด้วยวิธีนี้จะมีอัตราการเย็นตัวเข้าไปเกี่ยวข้องด้วยทำให้อัตราเร็วของการปิดผนึกวิธีนี้ช้ากว่าวิธีแรก นอกจากนี้ลวดนิโครมจะมีการขยายตัวในขณะที่ให้ความร้อนและจะหดตัวกลับในขณะที่ทำให้เย็นตัวลง จึงมีผลทำให้ลวดนิโครมเกิดความล้าและแตกหักได้ ในที่สุดจึงต้องมีการเปลี่ยนลวดนิโครมบ่อยๆ การปิดผนึกด้วยวิธีนี้จึงมีค่าใช้จ่ายสูง



ภาพที่ 6 การปิดผนึกด้วยการให้ความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง

ที่มา: สำนักบริการวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2539)

6. การทดสอบรอยปิดผนึก

6.1 ความแข็งแรงของรอยปิดผนึก หมายถึง แรงที่ใช้ในการแยกรอยผนึกออกจากกันต่อความกว้างของรอยผนึก มักจะรายงานในหน่วยของนิวตัน/เซนติเมตร แรงที่ใช้ในการแยกรอยผนึกในที่นี้จะหมายถึง แรงที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสระหว่างสารปิดผนึก (Sealant) ที่นำมาประกบกัน ผิวสัมผัสนี้จะเกิดการสูญเสียความเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากสารปิดผนึกจะเกิดการหลอมเข้าด้วยกัน ในขณะที่ทำการปิดผนึก ดังนั้นในบางครั้งการขาดอาจเกิดที่วัสดุหลักก็ได้ เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงของรอยผนึกจะมีรูปแบบของการขาด (mode of failure) ได้ใน 3 ลักษณะคือ การลอก (peel) การแยกประกบ (delamination) การขาดที่ฟิล์ม (film break) ถ้าสารปิดผนึกมีแรงยึดระหว่างกันต่ำ ตัวอย่างเช่นซีเมนต์ การขาดของรอยผนึกจะอยู่ที่ผิวสัมผัสของสารปิดผนึกซึ่งจะเข้าไปไม่ถึงสารปิดผนึก การขาดในลักษณะนี้เรียกว่า การลอก ในบางครั้งสารปิดผนึกจะเกิดการแตกใกล้ๆ กับรอยปิดผนึก และจะเกิดการลอกออกจากโครงสร้างที่สมดุลของฟิล์ม ในกรณีนี้แรงที่ทำให้สารปิดผนึกเกิดการแตกจนทำให้เกิดการลอกออกจากวัสดุหลักนี้จะมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงพันธะที่ใช้ยึดระหว่างสารปิดผนึกกับวัสดุหลัก นั่นคือแรงที่ทำให้สารปิดผนึกแยกออกจากวัสดุหลักเรียกลักษณะการแยกของสารปิดผนึกออกจากวัสดุหลักนี้ว่าเป็น การขาดแบบแยกประกบ และในบางโครงสร้างทั้งหมดของฟิล์มอาจเกิดการขาดในลักษณะฉีกดึงแยกออกจากกัน (tensile mode) โดยไม่เกิดการขาดที่ตำแหน่งรอยผนึก แต่จะเกิดการขาดที่ฟิล์มแทน เรียกลักษณะการขาดนี้ว่า การขาดที่ฟิล์ม ซึ่งการขาดในลักษณะนี้เกิดขึ้น เนื่องจากความแข็งแรงของรอยผนึกมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มนั่นเอง การทดสอบความแข็งแรงของรอยผนึกสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน ASTM F88 ซึ่งจะเป็นการทดสอบรอยปิดผนึกด้วยความร้อนที่อธิบายถึงขั้นตอนการทดสอบ เครื่องมือที่ใช้และวิธีที่ใช้ร่วมกับการทดสอบ ทำให้สามารถเปรียบเทียบความแข็งแรงของรอยผนึกระหว่างวัสดุต่างชนิดกันหรือวิธีปิดผนึกต่างกันได้ การทดสอบความแข็งแรงของรอยผนึกเป็นวิธีที่ไม่สามารถวัดความสม่ำเสมอหรือความต่อเนื่องของรอยผนึกได้ ในบางกรณีพบว่าหากรอยผนึกมีค่าความแข็งแรงสูงแต่กลับจะให้ค่าความต่อเนื่องของรอยผนึกต่ำ

6.2 ความทนต่อการลอก หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงต่อความกว้างของรอยผนึกที่ต้องใช้ในการแยกวัสดุที่ยึดหุ่ยออกจากวัสดุแข็งหรือออกจากวัสดุอ่อน การปิดผนึกบรรจุภัณฑ์เป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งต่อการป้องกันผลิตภัณฑ์ เพราะถึงแม้ว่าบรรจุภัณฑ์จะมีการใช้วัสดุที่มีการสกัดกันสูงมากเพียงใดก็ตาม แต่ก็จะไม่มีความหมายเลย หากปราศจากรอยปิดผนึกที่มีความสมบูรณ์และต่อเนื่อง การมีรูรั่วหรือช่องว่างเพียงเล็กน้อยภายในรอยผนึกจะเป็นสาเหตุทำให้บรรยากาศภายนอกสามารถทะลุผ่านบรรจุภัณฑ์เข้าทำลายผลิตภัณฑ์ภายในได้ พบว่ารอยผนึกที่ลอกได้ (peel

able seal) สามารถควบคุมความต่อเนื่องของบรรจุภัณฑ์ได้ ดังนั้นจึงมีการวัดค่าความทนต่อการลอก เพื่อใช้ในการบ่งบอกถึงความต่อเนื่องของรอยผนึก ซึ่งสามารถวัดได้ตามมาตรฐาน ASTM D1876 ส่วนในการทดสอบหาความแข็งแรงของรอยผนึกจะดูค่าความต่อเนื่องของรอยผนึกได้ที่รูปแบบของการขาดของรอยผนึกขณะทำการทดสอบ นอกจากนี้การหาค่าความต่อเนื่องของรอยผนึกอาจวัดได้โดยการใช้ถุงที่มีการปิดผนึกทั้ง 4 ด้านวางในอ่างสุญญากาศภายใต้ น้ำ นำอากาศในอ่างออกโดยปั๊มสุญญากาศ ซึ่งจะมีผลทำให้ความดันภายในถุงเพิ่มขึ้น การเกิดฟองอากาศจะเป็นจุดบ่งบอกถึงการมีรอยร้าวเกิดขึ้นบนรอยผนึก

6.3 Hot tack หมายถึง ความต้านทานต่อการแยกของฟิล์มปิดผนึกทันทีที่นำความดันและอุณหภูมิในการปิดผนึกออก ส่วนมากจึงมีค่า Hot tack ต่ำ แต่ฟิล์ม โคพอลิเมอร์ของเอทิลีน โดยเฉพาะ ไอโอ โนเมอร์ ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนชนิดหนึ่งจะมีค่า Hot tack สูง

7. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

กนกวรรณ (2545) ได้ศึกษาแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลและแบบสปลิตพล็อต ที่มีผู้ศึกษาและพัฒนาไว้จากบทความในระหว่างปี ค.ศ. 1999-2001 รวมทั้งได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลและแผนการทดลองแบบสปลิตพล็อต โดยพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Relative Efficiency) สรุปผลได้ว่า แผนการทดลองแบบสปลิตพล็อตมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล

ปรเมศ (2545) ได้กล่าวไว้ว่า การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ แต่ละระดับมีการทำซ้ำ 1 ครั้ง จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล จะกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลมีรูปแบบทั่วไป คือ $A*B*C*...แฟคทอเรียล$ รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่

1. 2^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับ เท่านั้น ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย

2. 3^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับ ใน ปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย

วิลยา (2549) ได้ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนการทดลอง 4 แบบ คือ แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสมบูรณ์ แบบแฟรคชันนอลแฟคทอเรียล แบบสปลิทพล็อต แฟคทอเรียล และแบบสปลิทพล็อตแฟรคชันนอลแฟคทอเรียล โดยพิจารณาจากเกณฑ์เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ 3 วิธี คือ ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Relative Efficiency) อัตราส่วนประสิทธิภาพ (E) และอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V. Ratio) สรุปผลได้ว่าแผนการทดลองแฟคทอเรียล มีประสิทธิภาพสูงสุดของทุกเกณฑ์การเปรียบเทียบ

Fisher (1953) คิดค้นการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองขึ้น โดยเป็นผู้พัฒนาและเป็นบุคคลแรกที่น่าเอาการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง เพื่อใช้ในการด้านการเกษตร ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นและสายพันธุ์มีความคงทนมากขึ้น

Sudasna-na-Ayudthya (1992) ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการทากูชิและแผนการทดลอง CCD โดยได้ใช้ข้อมูลของเทอร์เพื่อหาตัวแบบกำลังสองของความแปรปรวน และมีตัววัดประสิทธิภาพทางสถิติคือ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง ค่าความลำเอียง และค่าความแปรปรวน ซึ่งจะได้ผลสรุปจากการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวิธีจากการใช้ปัญหาทดสอบ โพลีโนเมียล แบบต่างๆ 8 ตัวแบบ ซึ่ง 4 ตัวแบบมีความสัมพันธ์เป็นแบบบวก อีก 4 ตัวแบบมีความเป็นแบบคูณ พบว่าแผนการทดลอง CCD ใช้จำนวนการทดลองต่ำกว่าวิธีการทากูชิถึง 61.11% (28 ต่อ 72 การทดลอง) และโดยสรุปคือแผนการทดลอง CCD มีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธีการทากูชิกับทุกตัวแบบทดสอบที่นำมาศึกษา

Youssef *et al.* (1997) งานวิจัยฉบับนี้ได้เสนอการเปรียบเทียบแผนการทดลองระหว่าง แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบและแผนการทดลองแบบทากูชิในเรื่องของปัจจัยที่ใช้ในการทำการทดลอง สรุปผลได้ว่าแผนการทดลองแบบทากูชิสามารถประหยัดการทดลองได้มากกว่า

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ดังนั้นจึงสามารถลดเวลาในการทดลองและลดค่าใช้จ่ายได้มาก

Li *et al.* (2000) ได้เสนอรูปแบบแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลกรณีพิจารณาแผนการทดลองที่มีจำนวนปัจจัย 4-10 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับและจำนวนรันเท่ากับ 8 12 และ 16 เท่านั้น โดยนำหลักการ Robust มาช่วยพิจารณาหารูปแบบแผนการทดลองที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำมาพิจารณาการวางแผนการทดลอง ที่สามารถศึกษาอิทธิพลหลักของปัจจัย และอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย จำนวน g ปัจจัย แต่วิธีการของ Li และ Nachtsheim มีข้อจำกัดตรงที่ผู้ทดลองต้องทราบล่วงหน้าว่าต้องการศึกษาอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัยใด โดยที่อิทธิพลร่วมอื่นๆ ผู้ทดลองจะไม่ให้ความสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผู้ทดลองส่วนใหญ่ไม่ต้องการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยรวมทั้งหมดทุกปัจจัย แต่ต้องการศึกษาเพียงอิทธิพลหลักของปัจจัยทุกปัจจัย และอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัยบางปัจจัยเท่านั้น วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ช่วยให้ได้แผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับหลายๆ สถานการณ์

Doolana *et al.* (2001) ได้ทำการศึกษาโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองที่แตกต่างกัน 2 วิธี ได้แก่ (1) มีการทำการทดลองซ้ำที่ระดับพารามิเตอร์ต่างๆ กัน (Replicated DOE Method) และ (2) ไม่มี การทำการทดลองซ้ำที่ระดับพารามิเตอร์ต่างๆ กัน (Nonreplicated DOE Method) ซึ่งทั้ง 2 วิธีสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้โดยมองจากความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่ได้ และจากตัวชี้ความผันแปรในกระบวนการ จากการทดลองพบว่าทั้งสองวิธีนี้ให้ผลเหมือนกันมาก แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่มีการทำซ้ำถึงจะมีความแม่นยำแต่การทำซ้ำเป็นจำนวนมากๆ จะทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายสูง ส่วนวิธีการที่ไม่มีการทำซ้ำนั้นจะประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถให้ผลลัพธ์ที่เพียงพอในระยะเวลาช่วงสั้นๆ

Borror and Montgomery (2002) ทำการหาแผนการทดลองที่เหมาะสม เมื่อในระบบมีทั้ง ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Control Factor) และปัจจัยรบกวน (Noise Factor) ซึ่งได้กล่าวอ้างอิงถึงแผนการทดลองต่างๆ เช่น Response Surface Methodology ซึ่งกลายมาเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการ สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่มีความไวต่อปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และคุณสมบัติบางประการของวัตถุดิบ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ ตามปกติปัจจัยรบกวน (Noise Factor) อาจเป็นความผันแปรเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม กระบวนการหรือปัจจัยอื่นๆ ภายนอกกระบวนการ ซึ่งจะสมมติว่าปัจจัยรบกวน (Noise Factor) เหล่านี้สามารถควบคุมได้ นอกจากนั้นยังได้กล่าวถึงวิธีการของ Taguchi ซึ่งประกอบไปด้วยการสร้างเมตริกซ์การออกแบบของปัจจัยที่ควบคุมได้ (Inner Array) และเมตริกซ์การออกแบบของปัจจัยรบกวน (Outer Array) จากนั้นนำเมตริกซ์ทั้งสองมาไขว้กันเพื่อคำนวณหาค่า

ผลตอบสนอง แต่จริงๆ แล้วแผนการทดลองที่รวมเอาทั้งปัจจัยที่ควบคุมได้ (Control Factor) และปัจจัยรบกวน (Noise Factor) ไว้ด้วยกันนั้น เป็นที่รู้จักกันในชื่อของ Combine Array Design ซึ่งทั้งปัจจัยที่ควบคุมได้ (Control Factor) และปัจจัยรบกวน (Noise Factor) จะถูกกำหนดเช่นเดียวกับ Central Composite Design ซึ่งใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าวิธีการของ Taguchi แต่ก็มีข้อเสียคือไม่มีวิธีการที่จะทำนายค่าผลตอบสนองสำหรับกระบวนการที่มีความไวต่อปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

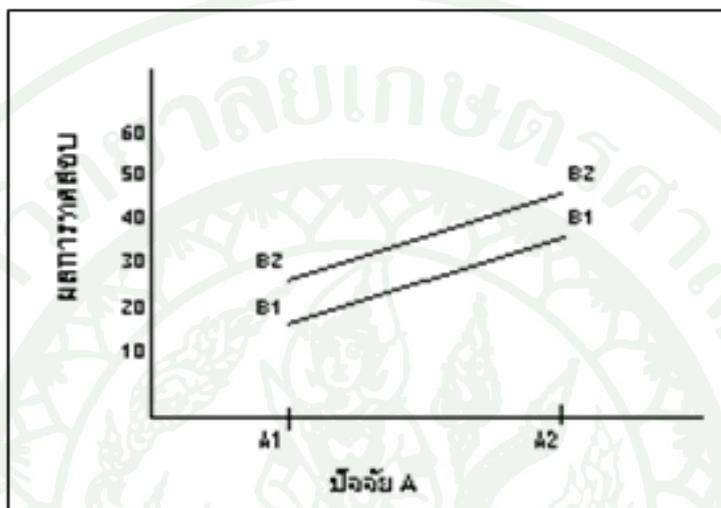
Montgomery (2005) ได้กล่าวไว้ว่า ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ” หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำได้หาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ ถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมาย จากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการ เพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการ สำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองคือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

8. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย (Multiple factor experiment) ซึ่งเราต้องการที่จะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อมกัน โดยให้ความสนใจที่อิทธิพลร่วมของปัจจัย ซึ่งเป็นอิทธิพลที่ส่งผลให้กับตัวแปรตอบสนอง ที่เกิดจากปัจจัยเหล่านั้น โดยทั่วไปแล้วอาจกล่าวได้ว่า การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปซึ่งเรียกว่า ทริทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment combination) และเนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction effect) ได้ด้วย

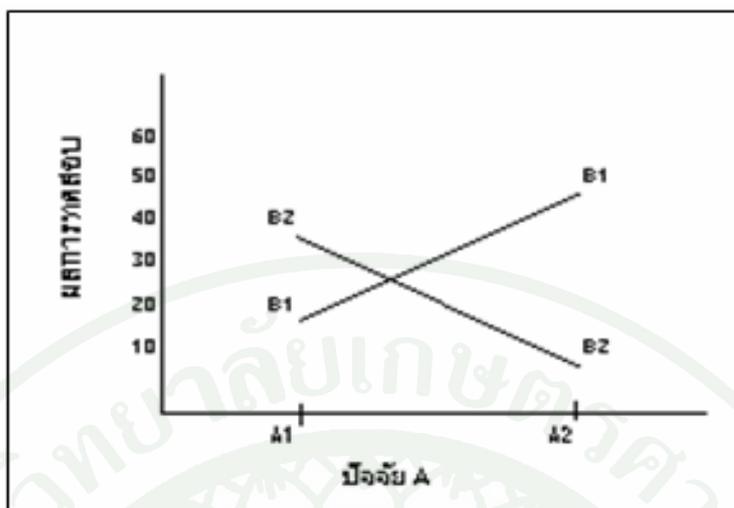
อิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น

อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน ดังตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ แสดงดังภาพด้านล่าง เมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 7 และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 8 โดย A และ B คือปัจจัย 2 ปัจจัย



ภาพที่ 7 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล)

ที่มา: ปารเมศ (2545)



ภาพที่ 8 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล)

ที่มา: ปารเมศ (2545)

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลทั่วไปมีรูปแบบต่างๆ ไป คือ $A \times B \times C \times \dots$ แฟคทอเรียล เช่น $3 \times 2 \times 2$ แฟคทอเรียล รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญ อันได้แก่ 2^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้นในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย เช่น 2^2 แฟคทอเรียล และ 3^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับเท่านั้นใน k ปัจจัย เช่น 3^2 แฟคทอเรียล

เนื่องจากการออกแบบ 2^k แฟคทอเรียล เหมาะสมกับรูปแบบที่มีความเป็นเส้นตรง จึงจะมีความถูกต้องในการตีความหมายข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นหากว่าอิทธิพลของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองมีความเป็นเส้นตรงไม่ดีแล้ว ควรจะหันมาใช้ในการออกแบบ 3^k แฟคทอเรียลแทนจะเหมาะสมมากกว่า

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ และเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลยังเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมเกิดขึ้น ซึ่งในกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ นอกจากนั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

8.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จะใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับเท่านั้น ระดับเหล่านี้จะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วหรือเวลาเป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงานเป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยเหล่านั้น และจะแทนระดับทั้งสองด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” ตามลำดับ ในข้อมูล 1 เพลทเคดที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล

แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลหลัก k ชนิด, อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย, อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย, . . . , และ 1 อันตรกิริยาของ k ปัจจัย ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ 2^k มีดังต่อไปนี้ในขั้นตอนแรกจะต้องประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่เกิดขึ้น ข้อมูลเช่นนี้จะทำให้ผู้ทดลองทราบโดยเบื้องต้นว่า ปัจจัยและอันตรกิริยาตัวใดมีความสำคัญ และปัจจัยเหล่านี้ควรถูกปรับให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบ (Estimate Factor Effects) ขั้นตอนที่สองสร้างแบบจำลองเริ่มต้นควรจะเลือกแบบจำลองเต็มรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยผลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมด (Form Initial Model) ขั้นตอนที่สามจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา (Perform Statistical Testing) ขั้นตอนที่จะเป็นการขัดเกลาแบบจำลอง ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกี่ยวกับการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ (Refine Model) ขั้นตอนที่จะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น (Analyze Residual) ในขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นที่หกจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟของผลหลักและอันตรกิริยาขึ้น (Interpret Results)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบการทดลองชนิดนี้จะทำให้สามารถรองรับปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงได้ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^k (Analysis of Variance for 2^k)

| แหล่งความผันแปร | ผลบวกกำลังสอง (SS) | องศาเสรี (d.f.) |
|---------------------------|--------------------|-----------------|
| K Main Effects | | |
| A | SS_A | 1 |
| B | SS_B | 1 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| K | SS_K | 1 |
| Two-Factor Interactions | | |
| AB | SS_{AB} | 1 |
| AC | SS_{AC} | 1 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| JK | SS_{JK} | 1 |
| Three-Factor Interactions | | |
| ABC | SS_{ABC} | 1 |
| ABD | SS_{ABD} | 1 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| IJK | SS_{IJK} | 1 |
| . | . | . |
| . | . | . |
| K-Factor Interactions | | |
| ABC ... K | $SS_{ABC...K}$ | 1 |
| Error | SS_E | $2^k(n - 1)$ |
| Total | SS_T | $n2^k - 1$ |

ที่มา: ปารเมศ (2545)

9. การออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ

แนวคิดของวิธีทาคุชิ (Taguchi Method) เป็นแนวคิดที่จะรวมคุณภาพให้อยู่ในผลิตภัณฑ์ แทนที่จะใช้การสุ่มตรวจสอบคุณภาพที่ขบวนการสุดท้ายที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการสุ่มตรวจสอบแบบทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพจะถูกแยกออกแต่คุณภาพของกระบวนการยังคงเหมือนเดิม อันที่จริงแล้วขบวนการต่างหากที่ก่อให้เกิดคุณภาพและสำคัญกว่าการสุ่มตัวอย่างมากมายนัก วิธีของทาคุชิได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสร้างคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์ วิธีนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมญี่ปุ่น โดยทั่วไปแล้วคุณภาพจะลดลงโดยการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนของสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวิธีการของทาคุชิพยายามทำให้ขบวนการทำงานได้ตามที่ถูกออกแบบโดยมีภูมิคุ้มกันต่อสิ่งรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน

Taguchi (1986) ได้เสนอแนะว่า ผู้ผลิตควรทำการตรวจสอบและประเมินความสูญเสียทั้งหมดของผลิตภัณฑ์อันเกิดจากองค์ประกอบต่างๆ ที่ผันแปรไปจากคุณภาพตามเป้าหมายและหาว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตเป็นอย่างไร เพื่อความแน่ใจว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะตรงตามเป้าหมาย รวมถึงไปถึงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทนต่อสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆ ที่อยู่นอกการควบคุม และได้จำแนกตัวแปรออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Signal Variable) เป็นตัวแปรที่เกิดภายในกระบวนการผลิตและเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้
2. ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Noise Variable) เป็นตัวแปรที่โดยทั่วไปเกิดภายนอกกระบวนการและยากที่จะควบคุมในระหว่างการผลิต เช่น ความแปรปรวนของสิ่งแวดล้อมต่างๆนอกจากนี้ทาคุชิยังได้เสนอแนวความคิดที่ว่า การที่ผู้ผลิตจะสามารถก้าวสู่คุณภาพตามอุดมคติได้นั้น ควรทำการตรวจสอบและประเมินความสูญเสียทั้งหมดของผลิตภัณฑ์อันเกิดจากองค์ประกอบต่างๆ ว่าแปรผันไปจากคุณภาพตามเป้าหมายเท่าไร

และนอกจากนั้นจะได้ทำการแสดงฟังก์ชันความสัมพันธ์ของความสูญเสียในรูปของสมการควอดราติก ดังนี้คือ

$$L(Y) = k(Y - \tau)^2 \dots\dots\dots (1)$$

โดยที่ $L(Y)$ คือ ความสูญเสีย

Y คือ ค่าคุณลักษณะเฉพาะตัวที่ได้จากการวัดอย่างต่อเนื่อง

k คือ ค่าคงที่ที่เหมาะสม

τ คือ ค่าคุณลักษณะตามเป้าหมาย

วัตถุประสงค์ของวิธีการทากูจิ คือการทำให้ฟังก์ชันของความสูญเสียดังกล่าวมีค่าน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาฟังก์ชันความสูญเสียที่คาดหวัง พบว่าสามารถแยกผลกระทบออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ผลกระทบที่มีต่อตำแหน่งของกระบวนการ (Location Effect) และผลกระทบที่มีต่อการกระจาย (Dispersion Effect)

$$E[L(Y)] = kE[(Y - \tau)]^2 = \sigma_y^2 + [E(Y) - \tau]^2 \dots\dots\dots (2)$$

แผนการทดลองของวิธีการทากูจิจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Orthogonal Array ในการหาผลกระทบของปัจจัย โดยแยกเป็น Inner Array และ Outer Array เพื่อเป็นเมตริกซ์การออกแบบของปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ตามลำดับ จากนั้นจะนำเมตริกซ์ทั้งสองมาไขว้กัน (Cross) เพื่อคำนวณหาค่าผลตอบแทน โดยค่า Performance Statistics ที่เรียกว่า อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N Ratio) ซึ่งมีอยู่ 3 ประเภท เนื่องจากว่าลักษณะทางคุณภาพที่สนใจอาจไม่ได้มีเป้าหมายแบบเดียว ทากูจิจึงสร้าง S/N Ratio ขึ้นมาเพื่อให้สอดคล้องและครอบคลุมเป้าหมายทางคุณภาพทุกชนิดที่เป็นไปได้ ดังนี้

9.1 Small The Better คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เช่น ต้องการให้เกิดข้อบกพร่องน้อยที่สุดในการผลิตคอมพิวเตอร์เวเฟอร์ ต้องการให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุดจากโรงงานและต้องการให้เกิดการรั่วของกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด เป็นต้น

$$S / N_S = -10 \log \left\{ \sum \frac{y_i^2}{n} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

9.2 Target The Better คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับค่าที่ได้กำหนดไว้หรือเป็นค่าที่จำกัดไว้ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของงานเจาะ ปริมาตรบรรจุแป้งเด็ก และค่าความต้านทานแรงดึงของใยผ้า เป็นต้น

$$S/N_T = 10 \log \left\{ \frac{\bar{y}^2}{S^2} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

9.3 Larger The Better คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดจะต้องมีค่าให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น ต้องการให้ความแข็งแรงของสายไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดมีค่าให้มากที่สุด หรืออีกตัวอย่างหนึ่งคือ ต้องการให้น้ำมันของรถบรรทุกของสามารถขับเคลื่อนรถบรรทุกได้จำนวนไมล์มากที่สุด เป็นต้น

$$S/N_L = -10 \log \left\{ \sum_{i=1}^n [1/y_i^2] / n \right\} \dots\dots\dots (5)$$

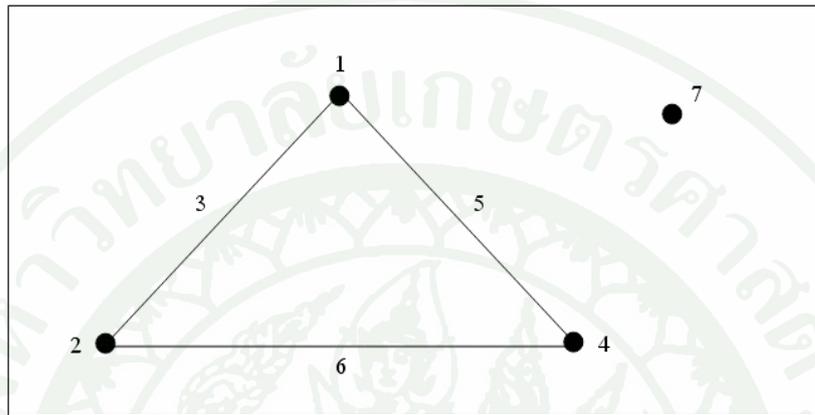
โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวิธีการทางสถิติเป็นการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ ด้วยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หลายชุดการทดลอง เพื่อทำการกำหนดค่า (Setting) ระดับของปัจจัยที่ดีที่สุด โดยเลือกกำหนดจากชุดการทดลองที่ให้ ค่า S/N Ratio สูงสุด และในกรณีที่ไม่มีพิจารณาตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ การวิเคราะห์จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองปกติ (Classical DOE) คือ ใช้หลักการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM: Analysis of Mean) ตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ข้อดีของแผนการทดลองนี้ คือ มีตารางสำเร็จรูปให้เลือกใช้สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกแบบแผนการทดลอง คือ $L_A B^C$ เช่นเดียวกับ Orthogonal Array ที่พัฒนาขึ้นโดย Sir. R.A.Fisher โดยที่

A คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อแผน (ไม่รวมการทำซ้ำ)

B คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา

C คือ จำนวนปัจจัยสูงสุดที่มีได้ในการทดลอง (จำนวนปัจจัยหลัก + จำนวนปัจจัยอันตรกิริยา)

การทดลองของทฤษฎีนั้นการกำหนดปัจจัยในสดมภ์ต่างๆ จะอาศัยเครื่องมือในรูปเชิงเส้นที่เรียกว่า “Linear Graph” ในภาพที่ 9 แสดงตัวอย่าง $L_8 2^7$ โดยจุดที่มุมใน Linear Graph แทนปัจจัยหลัก (Main Factor) และเส้นตรงแทนผลกระทบรวมของปัจจัย และแสดงตัวอย่างตารางการออกแบบการทดลองแบบทฤษฎี $L_8 2^7$ ดังตารางที่ 5



ภาพที่ 9 Linear Graph

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

ตารางที่ 5 การออกแบบการทดลองทฤษฎีแบบ $L_8 2^7$

| ลำดับ | $L_8 2^7$ | | | | | | |
|-------|-----------|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

ที่มา: ประไพศรี และ พงศ์ชนัน (2551)

10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิชัย (2540) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพและควบคุมการผลิตในแผนกบรรจุภัณฑ์ของโรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์แห่งหนึ่ง ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงเทป โดยการวิเคราะห์ข้อมูลใช้ทฤษฎีการทดลองแบบแฟคทอเรียล และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับสร้างแบบจำลองพร้อมทั้งทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหลาย ผลการวิจัยพบว่าความหนาใบมีด, ความดันหรือแรงกดใบมีด และอุณหภูมิ มีความสัมพันธ์กับแรงดึงเทปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ปณักรณ (2545) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงในแนวตะเข็บและความเบี่ยงเบนมาตรฐานในกระบวนการผลิตถุงพลาสติกหิ้วรูปตัวยู โดยพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทนแรงดึงในแนวตะเข็บ โดยใช้แผนภูมิเหตุและผล สามารถเลือกปัจจัยได้ 4 ปัจจัย คือ ความเร็วป้อนฟิล์ม อุณหภูมิบาร์กดบน อุณหภูมิบาร์กดล่าง และการปรับระยะกด โดยใช้แผนการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียลพบว่า อุณหภูมิบาร์กดล่างและการปรับระยะการกดมีนัยสำคัญต่อผลค่าเฉลี่ยการทนแรงดึงในแนวตะเข็บ จากนั้นได้นำไปทำการทดลองต่อโดยใช้แผนการทดลองแบบ 3^k แฟคทอเรียล เพื่อหาจุดที่เหมาะสมจากผลการวิจัยพบว่า ค่าของการทนแรงดึงเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น 50.7 % ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลง 52.12 ดัชนีความสามารถในการผลิตเพิ่มขึ้น 101.14 % สามารถลดสัดส่วนของเสียได้ 7.68 % คิดเป็นเงินที่สามารถประหยัดได้ประมาณ 1,880,064 บาท/ปี

เจษฎา (2546) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการบรรจุและปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ในการผลิตซอสผลไม้โดยเพิ่มความแข็งแรงของรอยปิดผนึก หากรอยปิดผนึกมีโอกาสเกิดรอยรั่วจะทำให้ผลิตภัณฑ์เสี่ยงต่ออันตรายจากจุลินทรีย์ และปัจจัยที่ทำการทดลอง คือ การปรับระยะกด, อุณหภูมิแกนกดแนวนอน, ความเร็วในการป้อนฟิล์ม และอุณหภูมิของซอสขณะบรรจุ โดยนำปัจจัยดังกล่าวมาออกแบบการทดลองเบื้องต้นด้วย 2^4 แฟคทอเรียล พบว่า อุณหภูมิแกนกดแนวนอน, ความเร็วในการป้อนฟิล์ม และอุณหภูมิซอสขณะบรรจุมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของรอยปิดผนึกอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) จากนั้นนำ 3 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญมาออกแบบการทดลอง 3^3 แฟคทอเรียล และวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) พบว่าระดับอุณหภูมิแกนกดแนวนอน 142 องศาเซลเซียส, ความเร็วในการป้อนฟิล์ม 18 รอบต่อนาที และอุณหภูมิซอสขณะบรรจุ 79 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความแข็งแรงรอยปิดผนึกทั้งด้านบนและด้านล่างใกล้เคียงกันและสูงสุดเป็น 56.75 นิวตัน ทั้งนี้สัดส่วนของเสียจากสาเหตุรอยปิดผนึกไม่แข็งแรงลดลง 94.07 % โดยประหยัดค่าใช้จ่ายได้ประมาณ 690,150 บาทต่อปี

นวัตน์ (2548) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของแรงเหวี่ยงลูกบอลในกระบวนการเชื่อมวงจรของโรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์แห่งหนึ่ง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดเหมาะสมที่สุดของกระบวนการ เพื่อให้ค่าแรงเหวี่ยงลูกบอลในขั้นตอนการเชื่อมวงจรมีค่าสูงที่สุดภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ และปรับปรุงค่า C_{pk} ให้เพิ่มขึ้น รวมทั้งลดความผันแปรในกระบวนการผลิต โดยนำเอาหลักการทางสถิติต่างๆ เช่น การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์การถดถอย และการควบคุมกระบวนการทางสถิติ มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบผลของการออกแบบการทดลอง 2 วิธี คือแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตหรือ CCD และวิธีการของทากูชิไปพร้อมกัน พบว่าทั้งสองแผนการทดลองสามารถเพิ่มค่าเฉลี่ยของแรงเหวี่ยงลูกบอล ลดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเพิ่มค่า C_{pk} ได้ทั้งคู่ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีและอยู่ภายใต้ข้อกำหนด นอกจากนี้ยังพบว่าแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิตนั้นให้ค่าเฉลี่ยของแรงเหวี่ยงลูกบอลสูงกว่าวิธีการของทากูชิ (4.39%) และค่า C_{pk} สูงกว่า (11.16%) แต่ให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า (1.58%) และใช้ขนาดตัวอย่างในการทดลองน้อยกว่า (42.59%) (เซ็นทรัลคอมโพสิต: ทากูชิ = 31: 54 ตัวอย่าง สำหรับการทดลอง 4 ปัจจัย)

โสภิตา (2550) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตพลาสติกพีวีซีแผ่น โดยมีปริมาณของเสียประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ 54.66 % ของปัญหาของเสียทั้งหมด ซึ่งคิดเป็นมูลค่าประมาณ 1,561,716 บาทต่อปี ทำให้เกิดการเก็บผลิตภัณฑ์เข้าคลังเพื่อรอการนำกลับมาผลิตใหม่ ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มมากขึ้น จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ที่อุณหภูมิในการหลอมพีวีซีคอมปาวด์ที่มิกซิ่งโรล 180 องศาเซลเซียส และปริมาณเศษพีวีซีแผ่นที่นำกลับมาหลอมใหม่ที่มิกซิ่งโรล 30 กิโลกรัม/ชุด จะทำให้ค่าจำนวนจุดบกพร่องประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ 1 ตารางเมตร อยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ไม่เกิน 10 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งทำให้สามารถลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ลงได้ 73.08 %

Kackar (1998) ได้แนะนำแนวความคิดของการควบคุมคุณภาพนอกสายการผลิต และวิธีการทากูชิ ที่เป็นขั้นตอนในส่วนของการออกแบบพารามิเตอร์ในการควบคุมคุณภาพเพื่อกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง และกล่าวถึงวิธีการควบคุมคุณภาพนอกสายการผลิตเป็นการ

ควบคุมคุณภาพและต้นทุนโดยการเข้าไปควบคุมในระหว่างการผลิตโดยตรง วิธีนี้เริ่มจากการทำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ใหม่และกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่อาจจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดบนชิ้นงานตลอดจนการเก็บรวบรวมข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาวิธีลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการผลิตและลดต้นทุนต่างๆ นอกจากนี้ Kackar ยังได้กล่าวถึงตัวอย่างในโรงงานผลิตกระเบื้องที่มีปัญหาในเรื่องขนาดของแผ่นกระเบื้อง ซึ่งสามารถระบุถึงสาเหตุได้ว่า มาจากความผันแปรของอุณหภูมิในเตาเผา วิธีการที่จะควบคุมคุณภาพในกระบวนการ โดยวางแผนที่จะให้ควบคุมอุณหภูมินั้นจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก ซึ่งทางโรงงานต้องการที่จะลดขนาดของความผันแปรนี้โดยไม่เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย ดังนั้นแทนที่จะทำการควบคุมอุณหภูมิซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง แต่ทางโรงงานได้พยายามแปลงการผลิตของกระเบื้องให้เป็นระบบ เพื่อลดผลกระทบของการให้อุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอในเตาเผาเดียวกัน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองของทากูชิ เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ พบว่า การเพิ่มส่วนผสมของการใส่ปูนขาวในเตาเผาจาก 1% เป็น 5% จะช่วยลดความผันแปรของขนาดกระเบื้องได้ ซึ่งถือเป็นการค้นพบที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตกระเบื้อง

Chowdhury and Gopal (2000) ได้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพโดยใช้การออกแบบการทดลองในขั้นตอนการบัดกรีของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และมีปัจจัยในการทดลองทั้งหมด 7 ปัจจัย โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้แผนการทดลองแบบทากูชิ $L_{18}(2^1.3^7)$ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ จากการศึกษาพบว่าสามารถลดจำนวนจุดบกพร่องลงได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี และจากการยืนยันผลการทดลองโดยใช้ระยะเวลา 45 วัน พบว่าจุดบกพร่องลดลงไปเฉลี่ยต่ำกว่า 2,000 จุด

Whitcomb (2000) ได้ทำการออกแบบการทดลองสำหรับการหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวที่น้อยที่สุดในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยนำปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวอย่างมีนัยสำคัญมาออกแบบการทดลองและใช้แผนการทดลองแบบ 2^k แฟลททอเรียลเพื่อลดเวลาในการทดลองและเก็บข้อมูล จากผลการทดลองพบว่าความดันในการฉีดพลาสติกและระยะเวลาในการฉีดพลาสติกเป็นปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติก และพบอีกว่าความชื้นในอากาศเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง ถ้าควบคุมความชื้นให้อยู่ในระดับต่ำก็สามารถลดอัตราการหดตัวของพลาสติกได้แม้ว่าจะเปลี่ยนค่าของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้ค้นพบจากการทดลองนี้มีคุณค่าต่อการนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่อไป

Rao and Joseph (2001) ได้ศึกษาเพื่อหาทางลดเวลาในการปฏิบัติงานในกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลอง จากปัญหาในการผลิตเส้นใยผ้าสังเคราะห์ พบว่าต้องมีขั้นตอนใน

การผลิตหลายขั้นตอนและแต่ละขั้นตอนจะต้องมีการควบคุมที่ซับซ้อนและใช้เวลาที่ต่างกัน โดยมีกิจกรรม 3 กิจกรรมที่ต้องใช้ระยะเวลาานที่สุดคือ Sheet Drying, Refluxing และ Residual Drying จึงทำการปรับปรุงกระบวนการโดยใช้แผนการทดลองแบบ 2^k แฟคทอเรียล และการทดลองนี้ใช้นักเคมีและเครื่องจักรเครื่องเดียวกันตลอดการทดลอง จากการศึกษาพบว่าสามารถลดเวลาในกิจกรรมทั้ง 3 กิจกรรมได้ และผลจากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงทำให้สามารถลดเวลาทำงานลงไปได้ 1 ชั่วโมงโดยไม่มีการลงทุนเพิ่ม

Peterson *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาค่าความต้านทานแรงดึงของการขึ้นรูปในพลาสติกแผ่น และปัจจัยที่ทำการทดลอง คือ อุณหภูมิที่แทนพิมพ์ ความดันที่แทนพิมพ์ เวลาในการขึ้นรูป และอุณหภูมิขึ้นงาน โดยนำปัจจัยดังกล่าวมาทำการออกแบบการทดลอง 2 ระดับ 4 ปัจจัย ซึ่งได้ผลดังนี้ คือ อุณหภูมิที่แทนพิมพ์ 210 องศาเซลเซียส ความดันที่แทนพิมพ์ 0.5 MPa เวลาในการขึ้นรูป 3 นาที และอุณหภูมิขึ้นงานให้ความร้อนที่ 160 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น

Rocak *et al.* (2002) ใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการศึกษาถึงผลกระทบของส่วนผสมต่างๆ ในเซรามิกที่ใช้สำหรับหล่อเทปซึ่งใช้ในการผลิตชิพที่มีต่อลักษณะของเทป ซึ่งส่วนผสมนี้ประกอบไปด้วยออกไซด์ ตัวทำละลาย เช่น น้ำ ตัวประสานและสารที่ใช้ทำพลาสติกต่างๆ ทำให้ทราบถึงประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง คือช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและเป็นวิธีที่มีความแม่นยำ นอกจากนี้ยังใช้ Factorial Plot เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของแต่ละปัจจัยและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยอีกด้วย ซึ่งเป็นการบอกถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี

Pazur (2004) ได้ทำการศึกษาระบวนการผลิตและสูตรการผลิตที่มีอิทธิพลต่อการเกิดเจล (Gel) ในการอัดรีดขึ้นรูปพีวีซี (PVC) ที่อ่อนตัวลงโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ พบว่าปัจจัยในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปพีวีซี (PVC) ที่อ่อนตัวที่ทำให้เกิดปัญหาเจล (Gel) ได้แก่ ลักษณะเม็ดพีวีซี (PVC) ความเร็วรอบสกรู อัตราส่วนการอัดแน่นสกรู และอุณหภูมิภายนอก รวมถึงการปนเปื้อนในขั้นตอนของการผสม Dry Blend และพีวีซีเรซิน

Shad (2004) ได้นำการออกแบบการทดลอง ไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องฉีดเรซิน ซึ่ง Shad ต้องการนำการออกแบบการทดลองเข้ามาแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยการต้องลดระยะเวลาในการทำงานของกระบวนการ โดยเลือกปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัย

ได้แก่ ความดันในการฉีดเรซิน ความเร็วในการฉีดเรซิน อุณหภูมิในการอบ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิการหลอมเหลวของเรซิน และจำนวนเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมของเรซิน โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k เพื่อคัดเลือกหาปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาในการทำงานของกระบวนการ ซึ่งปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ จำนวนเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมของเรซิน ความดันในการฉีดเรซิน ความเร็วในการฉีดเรซิน และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ หลังจากนั้นจึงนำปัจจัยที่มีผลกระทบทั้ง 4 ปัจจัยไปทำการหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยอีกครั้งซึ่ง Shad ได้สรุปว่าการออกแบบการทดลองสามารถเข้ามาแก้ไขปัญหา และลดระยะเวลาการทำงานของกระบวนการฉีดพลาสติกได้ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำ

Wenja (2005) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดและรูปร่างของชิ้นงานในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k และจากผลการทดลองที่ได้แสดงว่าค่าความดันของแม่พิมพ์และอุณหภูมิของแม่พิมพ์มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน โดยที่ค่าความดันของแม่พิมพ์ที่มากขึ้นทำให้ขนาดชิ้นงานเพิ่มตามไปด้วย และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ขนาดชิ้นงานมีขนาดที่ลดลง

Yueyu *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการออกซิเดชันเกี่ยวกับการแยกของเหลวโดยใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับการป้องกันการกร่อนของโลหะผสมแมกนีเซียม AM50 โดยการออกแบบการทดลองประกอบด้วยปัจจัย 4 ปัจจัย คือ เวลา ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของ KOH และความเข้มข้นของ NaAlO_2 ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่อง Disc Pack Machine 1 เครื่อง
2. ม้วน Polypropylene Sheet 1 ม้วน
3. ม้วน Laminate Film 1 ม้วน
4. เครื่องทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง 1 เครื่อง
5. เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
6. โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab รุ่น 15.0

วิธีการ

1. ศึกษากระบวนการผลิตรวมและกำหนดหัวข้อปัญหา

ทำการศึกษากระบวนการต่างๆ ในการผลิตถุงยางอนามัย และเลือกกระบวนการที่น่าสนใจ มาทำการศึกษา โดยขั้นตอนกระบวนการผลิตถุงยางอนามัยแสดงดังภาพที่ 10 มีดังนี้

1.1 การเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material) เป็นการเตรียมน้ำยางมาทำการแยกตะกอนและลด ปริมาณน้ำในน้ำยาง เพื่อให้ได้น้ำยางที่ขึ้น ปราศจากสิ่งเจือปน

1.2 การผสมสูตรน้ำยางและสี (Compounding) เป็นการผสมน้ำยางกับสารเคมีต่างๆ ตาม สูตร เพื่อให้ได้น้ำยางที่ดีมีคุณภาพ

1.3 การขึ้นรูปถุงยาง (Dipping) เป็นการขึ้นรูปถุงยางโดยการนำหลอดแก้วมาจุ่มลงในน้ำ ยาง และถอดออกมาเป็นถุงยางเปียก

1.4 การซักล้างผสมแป้ง (Washing) เป็นการนำถุงยางเปียกมาใส่ในตู้ และนำน้ำแป้งที่ผสม แล้วมาซักเพื่อไม่ให้ถุงยางติดกัน

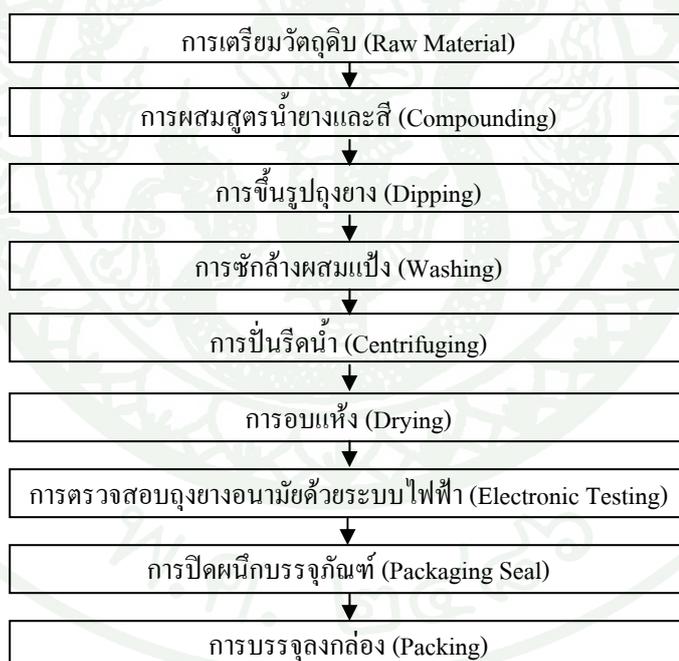
1.5 การปั่นรีดน้ำ (Centrifuging) เป็นการนำถุงยางมาปั่นรีดน้ำ ให้ถุงยางหมด

1.6 การอบแห้ง (Drying) เป็นการนำถุงยางหมดมาอบให้แห้ง

1.7 การตรวจสอบถุงยางอนามัยด้วยระบบไฟฟ้า (Electronic Testing) เป็นการตรวจสอบว่าถุงยางรั่วหรือไม่ โดยใช้ระบบไฟฟ้าเพื่อทำการคัดแยกของเสีย

1.8 การปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ (Packaging Seal) เป็นการนำถุงยางที่ผ่านการตรวจสอบแล้วมาบรรจุลงในซองหรือถ้วยโดยมีการเติมกลิ่น รสชาติ และสารหล่อลื่น

1.9 การบรรจุลงในกล่อง (Packing) เป็นการนำถุงยางที่ใส่ซองหรือถ้วยแล้วมาตรวจสอบความบกพร่องของรอยปิดผนึก ตรวจสอบจำนวน และบรรจุลงในกล่องเพื่อส่งจำหน่ายต่อไป



ภาพที่ 10 แสดงกระบวนการผลิตถุงยางอนามัย

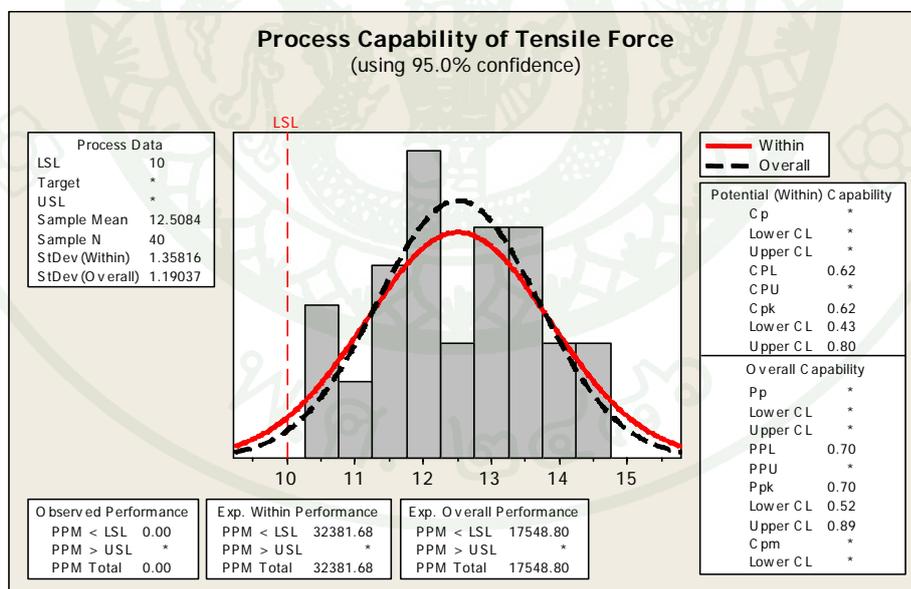
2. ระบุปัญหาและศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจ

จากการเข้าไปศึกษาสภาพปัญหากระบวนการต่างๆ ในการผลิตถุงยางอนามัยของโรงงานกรณีศึกษา พบว่ากระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์เป็นกระบวนการที่น่าสนใจ และมีปัญหาที่สำคัญ

คือ ผลลัพธ์ภายในเกิดความเสียหาย เนื่องจากมีค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกที่ต่ำกว่ามาตรฐาน ส่งผลให้รอยปิดผนึกไม่แข็งแรง และก่อนทำการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึง ผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างบรรจุภัณฑ์นำมาทำการทดสอบเพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการผลิตมีปัญหาจริง และต้องการการแก้ไขปรับปรุง โดยเก็บข้อมูลทั้งหมด 10 ชุด ชุดละ 4 ตัวอย่าง ใช้จำนวนตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 40 ตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงดังตารางภาคผนวกที่ ก โดยนำข้อมูลมาคำนวณค่าสถิติต่างๆ และวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ แสดงดังตารางที่ 6 และภาพที่ 11

ตารางที่ 6 ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองก่อนการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึง

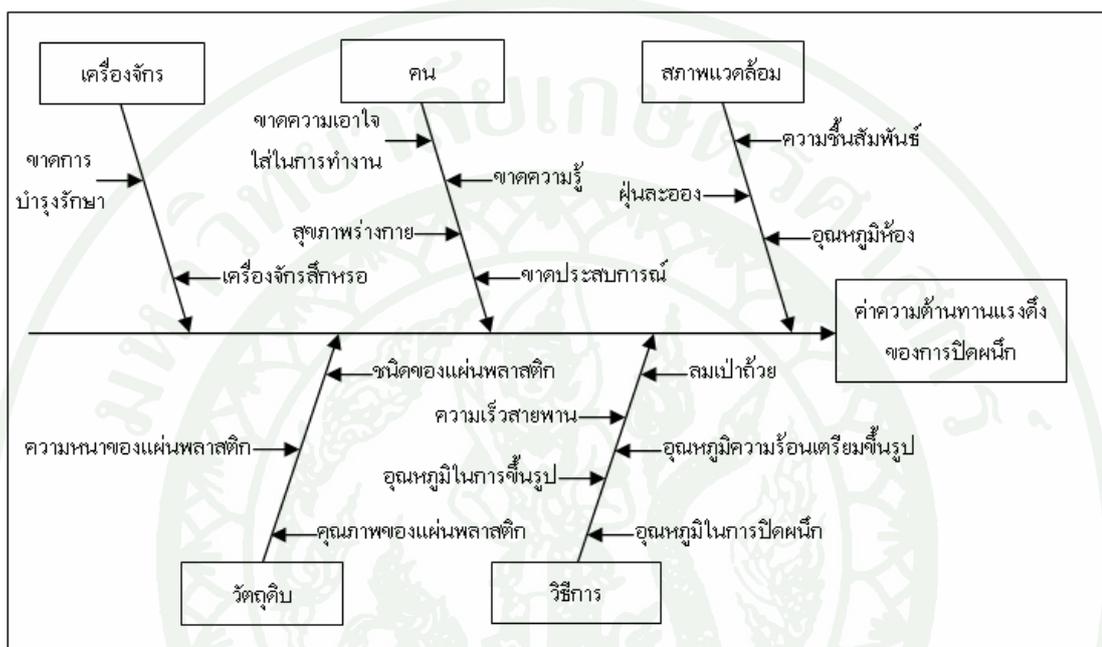
| ค่าทางสถิติ | ก่อนการปรับปรุง |
|---|-----------------|
| ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (นิวตัน) | 12.51 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (นิวตัน) | 1.19 |
| ขอบเขตล่างค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% (นิวตัน) | 12.19 |



ภาพที่ 11 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการผลิตก่อนการปรับปรุง

จากภาพที่ 11 แสดงว่าสมรรถภาพกระบวนการผลิตก่อนการปรับปรุงไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีค่า $Cpk = 0.62$ ซึ่งค่า $Cpk < 1.33$ ดังนั้นเป้าหมาย คือ ทำการปรับปรุงค่าความต้านทาน

แรงดึงของการปิดผนึกโดยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) เพื่อให้สามารถลดปัญหาการสูญเสียต้นทุนในการผลิต และลดโอกาสการเกิดของเสียจากปัญหาการปิดผนึกไม่แข็งแรง และสาเหตุของปัญหาค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกสามารถแยกพิจารณาได้จากผังแสดงเหตุและผล ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แผนผังเหตุและผลจากสาเหตุของปัญหาค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

3. กำหนดตัวแปรหรือปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ศึกษาและรวบรวมปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่อง โดยแบ่งตัวแปรหรือปัจจัยออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้คือ

3.1 ตัวแปรผลตอบสนอง (Response Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามค่าของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งตัวแปรผลตอบสนองนี้เป็นตัวแปรที่สนใจจะวิเคราะห์ โดยในที่นี้คือ ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Force) แทนด้วย Y (นิวตัน)

3.2 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Control Factors) หมายถึง ปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้ค่าของตัวแปรผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในที่นี้มีปัจจัยควบคุมที่ทำการศึกษา 4 ปัจจัย ดังนี้คือ

3.2.1 Speed หมายถึง ความเร็วสายพาน แทนด้วย A (วินาที) เหตุผลในการเลือกปัจจัยนี้มาทำการศึกษาคือ เพราะว่า ถ้าปรับค่าความเร็วสายพานเร็วจนเกินไป เวลาในการปิดผนึกก็จะมีเวลาน้อย ส่งผลให้สารปิดผนึกจะยังไม่ละลายมาเชื่อมที่รอยปิดผนึก หรือถ้าปรับค่าความเร็วสายพานช้าจนเกินไป เวลาในการปิดผนึกก็จะมีเวลามาก ส่งผลให้สารปิดผนึกละลายออกนอกรอยปิดผนึก และจากเหตุผลนี้ทำให้รอยปิดผนึกไม่สมบูรณ์นั่นเอง

3.2.2 Pre-heat Temperature หมายถึง อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป แทนด้วย B ($^{\circ}\text{C}$) เหตุผลในการเลือกปัจจัยนี้มาทำการศึกษาคือ เพราะว่า ถ้าปรับค่าอุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูปสูงจนเกินไป แผ่นพลาสติกจะอ่อนตัวจนเสียรูป ส่งผลให้เวลาทำการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์รอยปิดผนึกจะไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปรับค่าอุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูปต่ำจนเกินไป แผ่นพลาสติกจะไม่สามารถขึ้นรูปออกมาเป็นถ้วยบรรจุภัณฑ์ได้นั่นเอง

3.2.3 Forming Temperature หมายถึง อุณหภูมิในการขึ้นรูป แทนด้วย C ($^{\circ}\text{C}$) เหตุผลในการเลือกปัจจัยนี้มาทำการศึกษาคือ เพราะว่า ถ้าปรับค่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปสูงจนเกินไป แผ่นพลาสติกจะอ่อนตัวจนเสียรูป ส่งผลให้เวลาทำการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์รอยปิดผนึกจะไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปรับค่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำจนเกินไป แผ่นพลาสติกจะไม่สามารถขึ้นรูปออกมาเป็นถ้วยบรรจุภัณฑ์ได้นั่นเอง

3.2.4 Sealing Temperature หมายถึง อุณหภูมิในการปิดผนึก แทนด้วย D ($^{\circ}\text{C}$) เหตุผลในการเลือกปัจจัยนี้มาทำการศึกษาคือ เพราะว่า ถ้าปรับค่าอุณหภูมิในการปิดผนึกสูงจนเกินไป ส่งผลให้สารปิดผนึกละลายออกนอกรอยปิดผนึก หรือถ้าปรับค่าอุณหภูมิในการปิดผนึกต่ำจนเกินไป ส่งผลให้สารปิดผนึกจะยังไม่ละลายมาเชื่อมที่รอยปิดผนึก และจากเหตุผลนี้ทำให้รอยปิดผนึกไม่สมบูรณ์นั่นเอง

4. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

ซึ่งขั้นตอนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k มีดังนี้

4.1 ออกแบบการทดลอง การทดลองประกอบไปด้วยปัจจัยควบคุมที่ทำการศึกษา 4 ปัจจัย ซึ่งทำการศึกษาก่อนที่ระดับ 2 ระดับ คือ ที่ระดับต่ำและสูง แต่ระดับมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง เก็บตัวอย่างการทดลองๆละ 4 ตัวอย่าง ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น $2^4 \times 2 \times 4 = 128$ ตัวอย่าง

4.2 ทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริง ตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

4.3 ส่งตัวอย่างทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง และบันทึกข้อมูล

4.4 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อเป็นการยืนยันว่าข้อมูลที่เก็บมาได้ มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ได้จริง

4.5 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง

4.6 นำปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง มาพล็อตกราฟแสดงอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น ตามมาตรฐานที่กำหนด

4.7 ทำการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแผนการทดลอง 2^k แฟกทอเรียล ไปใช้จริงในกระบวนการผลิต จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณค่าสถิติต่างๆ

5. การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ จะให้ความสำคัญกับการออกแบบที่ทำให้สภาวะของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ที่สุด ภายใต้ความไว้น้อยที่สุดต่อสาเหตุที่ทำให้เกิดความผันแปรต่างๆ ซึ่งขั้นตอนการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการของทากูชิ มีดังนี้

5.1 ออกแบบการทดลอง โดยในที่นี้ได้มีการแบ่งตัวแปรออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

5.1.1 ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Design Variable Space) ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงตามผลที่ได้จากการวิเคราะห์แผนการทดลอง 2^4 แฟกทอเรียล และแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ระดับคือ ระดับต่ำและสูง เพื่อสร้างเป็นเมตริกซ์การออกแบบของปัจจัยที่ควบคุมได้ (Design Matrix) โดยใช้แผนการทดลองแบบ $L_8 2^7$

5.1.2 ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Noise Space) ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกิดขึ้นภายนอกกระบวนการและยากที่จะควบคุมในระหว่างการผลิต คือ อุณหภูมิห้อง ($^{\circ}\text{C}$) แทนด้วย T, ความชื้นสัมพัทธ์ (%) แทนด้วย H และความหนาของแผ่นพลาสติก (mm) แทนด้วย THK โดยแบ่งออกเป็น 2 ระดับคือ ระดับต่ำและสูง เพื่อสร้างเป็นเมตริกซ์การออกแบบของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Noise Matrix) โดยใช้แผนการทดลองแบบ L_42^3

5.2 ทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริง ตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

5.3 สั่งตัวอย่างทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง และบันทึกข้อมูล

5.4 หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด โดยเลือกจากระดับของตัวแปรที่ควบคุมได้ที่ทำให้ค่า S/N Ratio (กรณี Larger The Better) สูงที่สุด

5.5 ทำการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแผนการทดลองแบบทากูชิ ไปใช้จริงในกระบวนการผลิต จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณค่าสถิติต่างๆ

6. สรุปผลการทดลอง

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการยืนยันผลของแผนการทดลอง 2^k แฟกทอเรียลกับแผนการทดลองแบบทากูชิเพื่อทำการเปรียบเทียบการยืนยันผลวิเคราะห์ข้อมูลของทั้งสองแผนการทดลอง และทำการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต

ผลและวิจารณ์

เมื่อทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริง ตามรูปแบบการทดลองที่ได้ทำการออกแบบไว้ จากนั้นส่งตัวอย่างทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง และบันทึกข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ที่ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

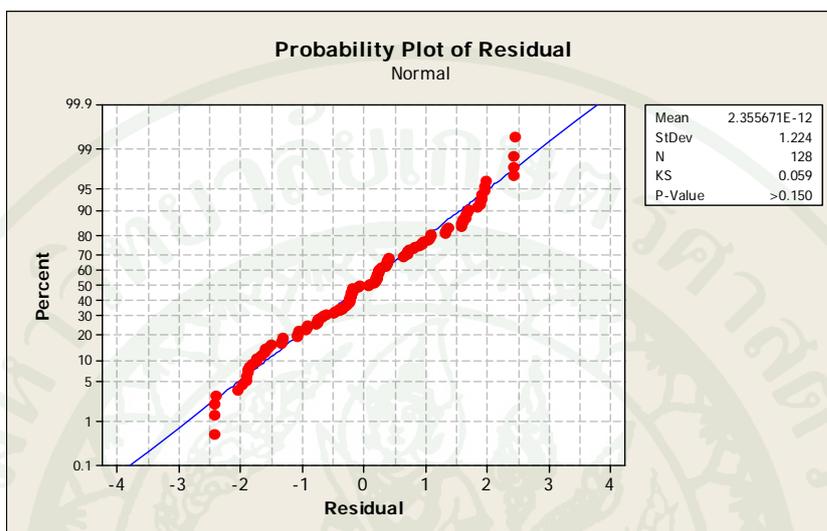
ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยใช้แผนการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 128 ตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงดังตารางภาคผนวกที่ ข การทดลองประกอบไปด้วยปัจจัยควบคุม 4 ปัจจัย ซึ่งทำการศึกษาปัจจัยละ 2 ระดับ คือ ที่ระดับต่ำและสูง แต่แต่ละระดับมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง เก็บตัวอย่างการทดลองๆละ 4 ตัวอย่าง โดยชิ้นงานทดสอบมีพื้นที่ในการรับแรงดึง $3 \times 3 \text{ cm}^2$ และระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ได้มาจากการระดมสมองระหว่างผู้วิจัยกับผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ การรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การพิจารณาตามเอกสารคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่องจักร และการปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่ผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์เคยทำการศึกษาและทดลองไว้ แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^4

| ปัจจัยที่ทำการศึกษา | ระดับ | |
|--|-------|-----|
| | ต่ำ | สูง |
| ความเร็วสายพาน A (ชิ้น/นาที) | 44 | 48 |
| อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป B ($^{\circ}\text{C}$) | 150 | 165 |
| อุณหภูมิในการขึ้นรูป C ($^{\circ}\text{C}$) | 165 | 170 |
| อุณหภูมิในการปิดผนึก D ($^{\circ}\text{C}$) | 133 | 140 |

1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.1.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 13 Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล

จากการทดสอบของ Kolmogorov - Smirnov โดยมีสมมติฐานคือ

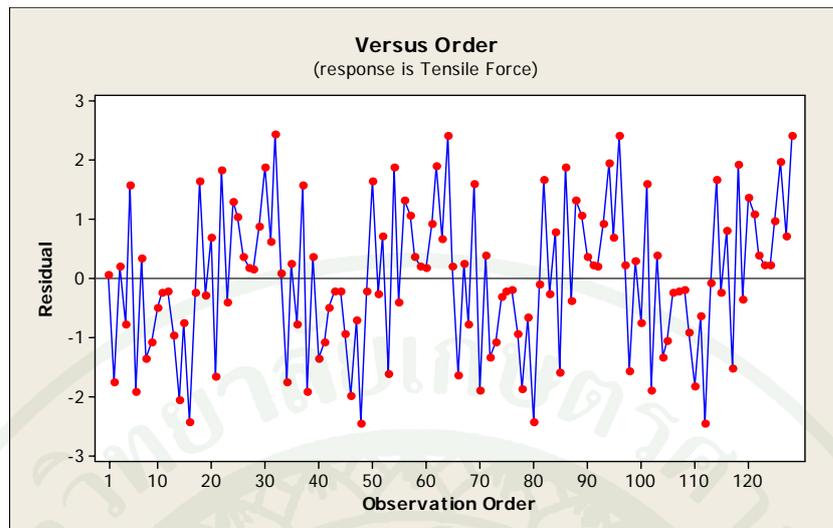
H_0 : ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ค่าคลาดเคลื่อนไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

จากภาพที่ 13 พบว่าค่า P-Value มากกว่า 0.15 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

1.1.2 การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล

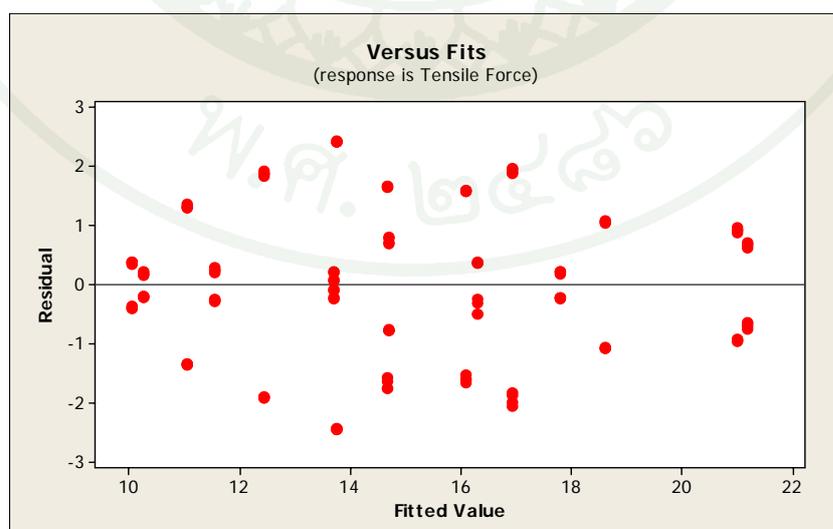
จากภาพที่ 14 จะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกน และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าคลาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกันและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้



ภาพที่ 14 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล สำหรับการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล

1.1.3 การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์

จากภาพที่ 15 จะเห็นได้ว่าข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกน และไม่มีรูปแบบ แสดงว่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้



ภาพที่ 15 กราฟของค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ สำหรับการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล

1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

1.2.1 กำหนดรูปแบบจำลอง ดังนี้

$$Y_{ijklm} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\delta)_{il} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + (\tau\beta\delta)_{ijl} + (\tau\gamma\delta)_{ikl} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl} + \varepsilon_{ijklm}$$

โดยที่ $i = 1, 2; j = 1, 2; k = 1, 2; l = 1, 2; m = 1, 2$

| | | |
|-------|-----------------------|---|
| เมื่อ | Y_{ijklm} | = ค่าสังเกตจากรอบทำซ้ำที่ m ปัจจัย A ระดับที่ i ปัจจัย B ระดับที่ j ปัจจัย C ระดับที่ k ปัจจัย D ระดับที่ l |
| | μ | = ค่าเฉลี่ยรวม |
| | τ_i | = อิทธิพลของปัจจัย A ระดับที่ i |
| | β_j | = อิทธิพลของปัจจัย B ระดับที่ j |
| | γ_k | = อิทธิพลของปัจจัย C ระดับที่ k |
| | δ_l | = อิทธิพลของปัจจัย D ระดับที่ l |
| | $(\tau\beta)_{ij}$ | = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่ i และปัจจัย B ระดับที่ j |
| | $(\tau\gamma)_{ik}$ | = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่ i และปัจจัย C ระดับที่ k |
| | $(\tau\delta)_{il}$ | = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่ i และปัจจัย D ระดับที่ l |
| | $(\beta\gamma)_{jk}$ | = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย B ระดับที่ j และปัจจัย C ระดับที่ k |
| | $(\beta\delta)_{jl}$ | = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย B ระดับที่ j และปัจจัย D ระดับที่ l |
| | $(\gamma\delta)_{kl}$ | = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย C ระดับที่ k และปัจจัย D ระดับที่ l |

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่ i, ปัจจัย B ระดับที่ j และปัจจัย C ระดับที่ k

$(\tau\beta\delta)_{ijl}$ = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่ i, ปัจจัย B ระดับที่ j และปัจจัย D ระดับที่ l

$(\tau\gamma\delta)_{ikl}$ = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่ i, ปัจจัย C ระดับที่ k และปัจจัย D ระดับที่ l

$(\beta\gamma\delta)_{jkl}$ = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย B ระดับที่ j, ปัจจัย C ระดับที่ k และปัจจัย D ระดับที่ l

$(\tau\beta\gamma\delta)_{ijkl}$ = อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่ i, ปัจจัย B ระดับที่ j, ปัจจัย C ระดับที่ k และปัจจัย D ระดับที่ l

ε_{ijklm} = ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลอง

1.2.2 สมมติฐานของการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล มีดังนี้

ก. สมมติฐานปัจจัยหลัก

H_0 : ปัจจัยหลักไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

H_1 : ปัจจัยหลักมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

ข. สมมติฐานปัจจัยอันตรกิริยา

H_0 : ปัจจัยอันตรกิริยาไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

H_1 : ปัจจัยอันตรกิริยามีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

1.2.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล

| แหล่งความ ผันแปร | องศาเสรี (d.f.) | ผลบวกกำลังสอง (SS) | ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (MS) | ค่าสถิติ F | ค่า P-Value |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------|------------|----------------|
| A | 1 | 196.95 | 196.95 | 115.85 | 0.000 |
| B | 1 | 188.86 | 188.86 | 111.09 | 0.000 |
| C | 1 | 12.14 | 12.14 | 7.14 | 0.009 |
| D | 1 | 497.36 | 497.36 | 292.56 | 0.000 |
| AB | 1 | 1.50 | 1.50 | 0.88 | 0.349 |
| AC | 1 | 35.58 | 35.58 | 20.93 | 0.000 |
| AD | 1 | 260.51 | 260.51 | 153.24 | 0.000 |
| BC | 1 | 1.06 | 1.06 | 0.62 | 0.433 |
| BD | 1 | 0.06 | 0.06 | 0.03 | 0.853 |
| CD | 1 | 110.08 | 110.08 | 64.75 | 0.000 |
| ABC | 1 | 9.39 | 9.39 | 5.52 | 0.021 |
| ABD | 1 | 118.60 | 118.60 | 69.76 | 0.000 |
| ACD | 1 | 13.48 | 13.48 | 7.93 | 0.006 |
| BCD | 1 | 41.50 | 41.50 | 24.41 | 0.000 |
| ABCD | 1 | 0.18 | 0.18 | 0.10 | 0.748 |
| ความคลาด เคลื่อน ทั้งหมด | 112 127 | 190.40 1677.63 | 1.70 | | |

หมายเหตุ S = 1.30385, R-Sq = 88.65%, R-Sq(adj) = 87.13%

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียลข้างต้น ดังตารางที่ 8 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แบ่งออกเป็นอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย โดยอิทธิพลหลัก คือ อุณหภูมิ ความร้อนเตรียมขึ้นรูป (B) และอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย คือ ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการขึ้นรูป (AC) ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก (AD) อุณหภูมิในการขึ้นรูปและ

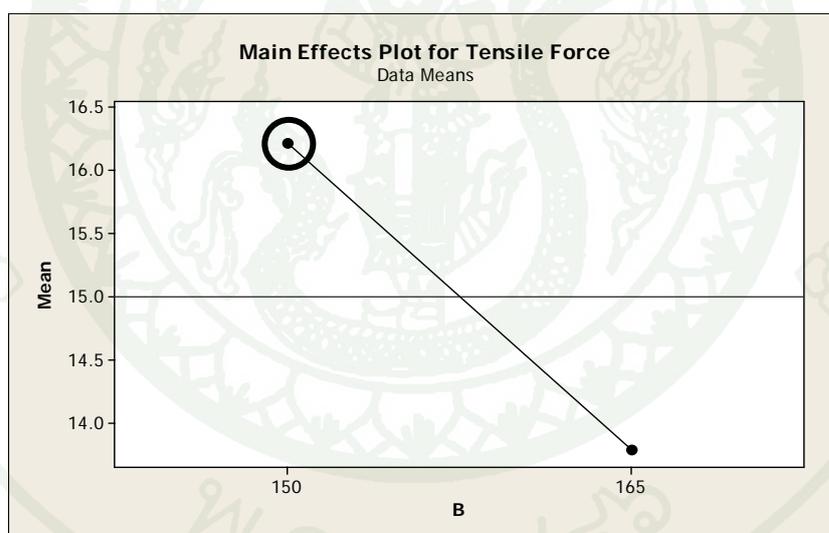
อุณหภูมิในการปิดผนึก (CD) โดยที่จะไม่พิจารณาอิทธิพลอันตรกิริยาดั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป และมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) เท่ากับ 88.65%

1.3 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียลข้างต้น ดังตารางที่ 8 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงทั้งหมด มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและค่าความต้านทานแรงดึง ได้ผลดังนี้

1.3.1 อิทธิพลหลัก

ก. อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป (B)

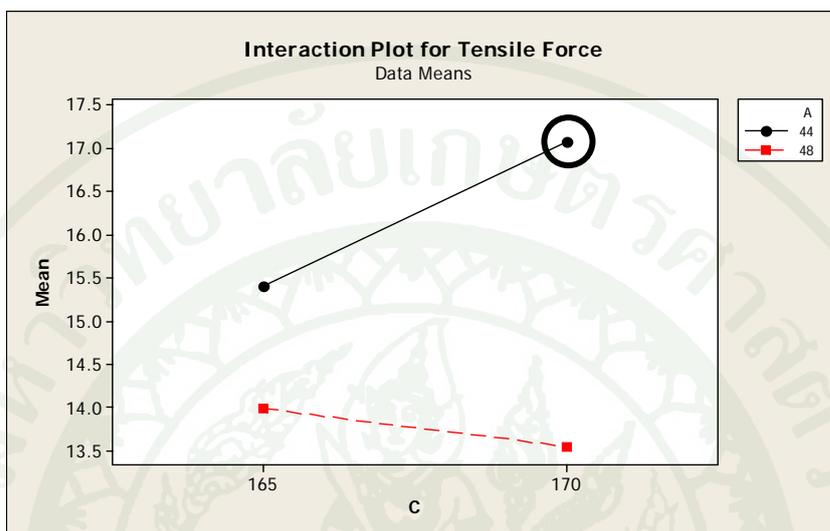


ภาพที่ 16 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของอุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป

จากภาพที่ 16 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย B ควรอยู่ที่ระดับต่ำ (อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูปเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส) จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น

1.3.2 อิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย

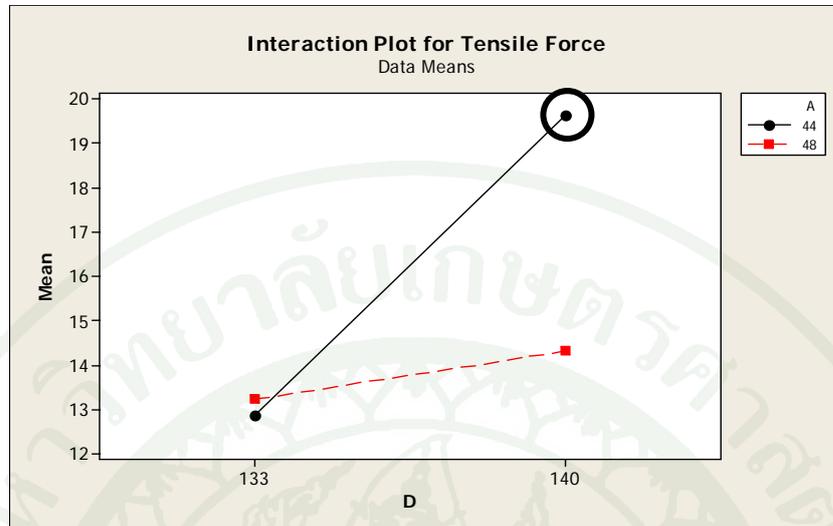
ก. ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการขึ้นรูป (AC)



ภาพที่ 17 กราฟแสดงอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการขึ้นรูป

จากภาพที่ 17 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย A ควรอยู่ที่ระดับต่ำ (ความเร็วสายพานเท่ากับ 44 ชั้น/นาที) และกำหนดค่าของปัจจัย C ควรอยู่ที่ระดับสูง (อุณหภูมิในการขึ้นรูปเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส) จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น

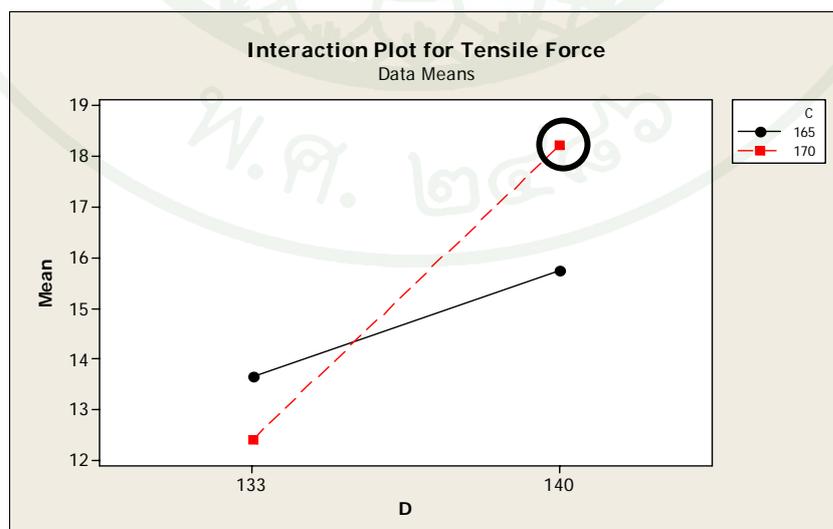
ข. ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก (AD)



ภาพที่ 18 กราฟแสดงอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก

จากภาพที่ 18 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย A ควรอยู่ที่ระดับต่ำ (ความเร็วสายพานเท่ากับ 44 ซิน/นาที) และกำหนดค่าของปัจจัย D ควรอยู่ที่ระดับสูง (อุณหภูมิในการปิดผนึกเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส) จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น

ค. อุณหภูมิในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการปิดผนึก (CD)



ภาพที่ 19 กราฟแสดงอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการปิดผนึก

จากภาพที่ 19 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย C ควรอยู่ที่ระดับสูง (อุณหภูมิในการขึ้นรูปเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส) และกำหนดค่าของปัจจัย D ควรอยู่ที่ระดับสูง (อุณหภูมิในการปิดผนึกเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส) จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น

โดยสามารถสรุปผลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและค่าความต้านทานแรงดึง โดยพิจารณาจากระดับของปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล คือ

ปัจจัย A (ความเร็วสายพาน) มีค่าเท่ากับ 44 ชั้น/นาที

ปัจจัย B (อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป) มีค่าเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส

ปัจจัย C (อุณหภูมิในการขึ้นรูป) มีค่าเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส

ปัจจัย D (อุณหภูมิในการปิดผนึก) มีค่าเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส

1.4 ยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล

ทำการยืนยันผลโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียลไปทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริง โดยทำการทดลองเก็บข้อมูลทั้งหมด 2 ครั้ง ครั้งละ 5 ชุด ชุดละ 4 ตัวอย่าง ใช้จำนวนตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 40 ตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงดังตารางภาคผนวกที่ ค1

1.4.1 การคำนวณค่าสถิติต่างๆ

จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียลในภาคผนวกที่ ค1 นำข้อมูลทั้งหมด 40 ตัวอย่าง มาคำนวณค่าสถิติต่างๆ ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และขอบเขตล่างของค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล

| ค่าทางสถิติ | ข้อมูลยืนยันผลของแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล |
|--|---|
| ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (นิวตัน) | 17.84 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (นิวตัน) | 1.28 |
| ขอบเขตล่างค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95% (นิวตัน) | 17.49 |

1.4.2 การทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน

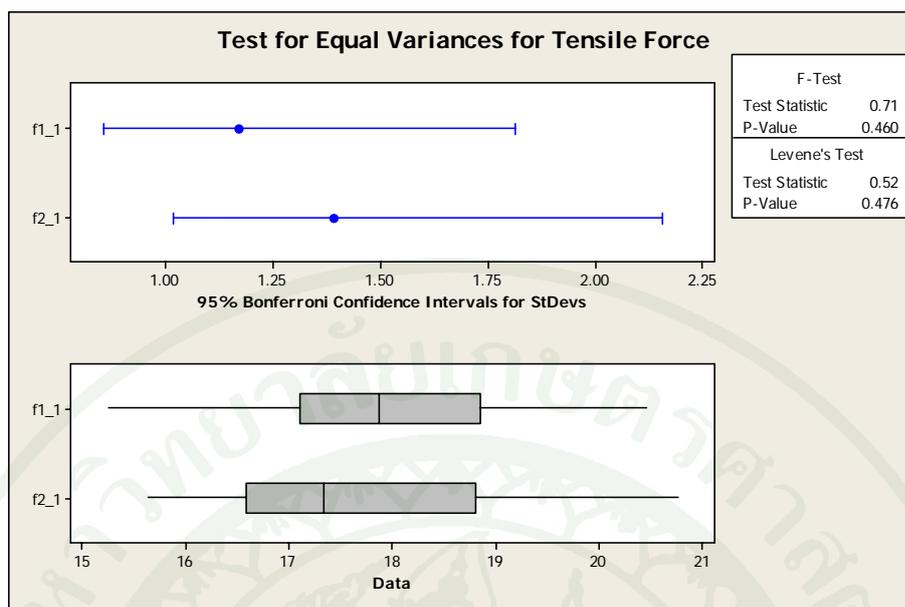
ก. การทดสอบความแปรปรวน ในการทดลองเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานแรงดึงจากการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง ว่าค่าความแปรปรวนของทั้งสองครั้งนี้มีค่าเท่ากันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

โดยทดสอบว่า

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

จะได้ผลการทดสอบความแปรปรวน ดังนี้



ภาพที่ 20 กราฟแสดงผลการทดสอบความแปรปรวนของการยื่นยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลอง 2^4 แฟลทอเรียล

จากภาพที่ 20 สามารถสรุปได้ว่าค่า P-Value = 0.460 > ค่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก แสดงว่าไม่มีหลักฐานแน่ชัดที่จะบ่งชี้ว่าค่าความแปรปรวนของค่าความต้านทานแรงดึงทั้งสองครั้งนี้ไม่เท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข. การทดสอบค่าเฉลี่ย ในการทดลองเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานแรงดึงจากการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง ว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองครั้งนี้มีค่าเท่ากันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

โดยทดสอบว่า

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

จะได้ผลการทดสอบค่าเฉลี่ย ดังนี้

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการขึ้นยืนผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล

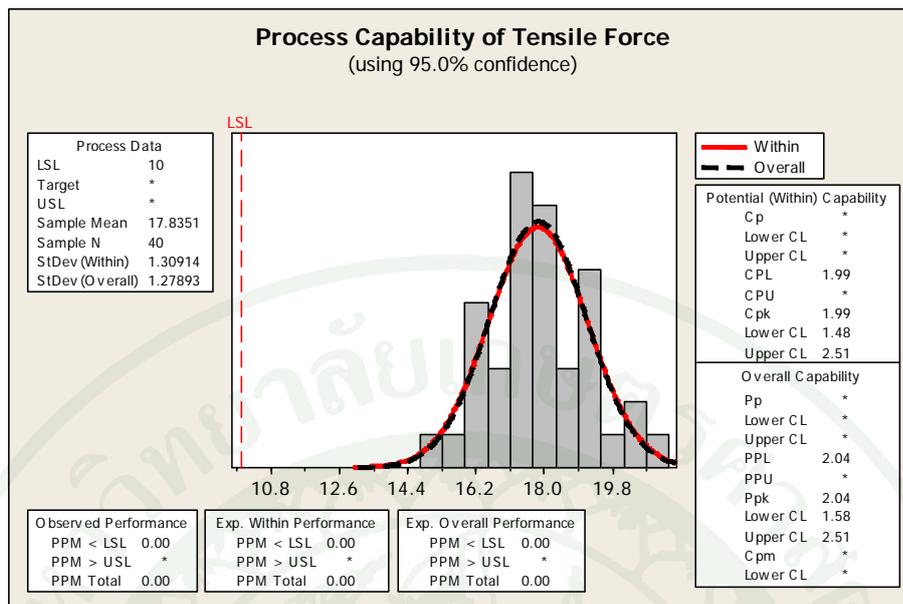
| แหล่งที่มา | ค่า T-Value | องศาเสรี(d.f.) | ค่า P-Value |
|---------------------------------------|-------------|----------------|-------------|
| ค่าความต้านทานแรงดึง ของการปิดผนึก | 0.36 | 38.00 | 0.723 |

จากตารางที่ 10 สามารถสรุปได้ว่าค่า P-Value = 0.723 > ค่าระดับนัยสำคัญ
ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงดึงทั้งสอง
ครั้งนี้ไม่ต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

1.4.3 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ

จากข้อมูลการขึ้นยืนผลรวมทั้งหมด 40 ตัวอย่างในตารางผนวกที่ ค1 นำมา
วิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ และคำนวณค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการต่างๆ ได้ผล
ดังนี้

จากภาพที่ 21 พบว่า ผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากข้อมูล
ของการขึ้นยืนผลการวิเคราะห์ข้อมูลแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล มีข้อกำหนดด้านล่าง (LSL)
เพียงด้านเดียว คือ ค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 10 นิวตัน มีค่า C_{pk} เท่ากับ 1.99 แสดงว่า
กระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดี และจากการขึ้นยืนผลไม่พบของเสียเลย โดยช่วงความเชื่อมั่นของ
กระบวนการเท่ากับ $1.48 \leq C_{pk} \leq 2.51$

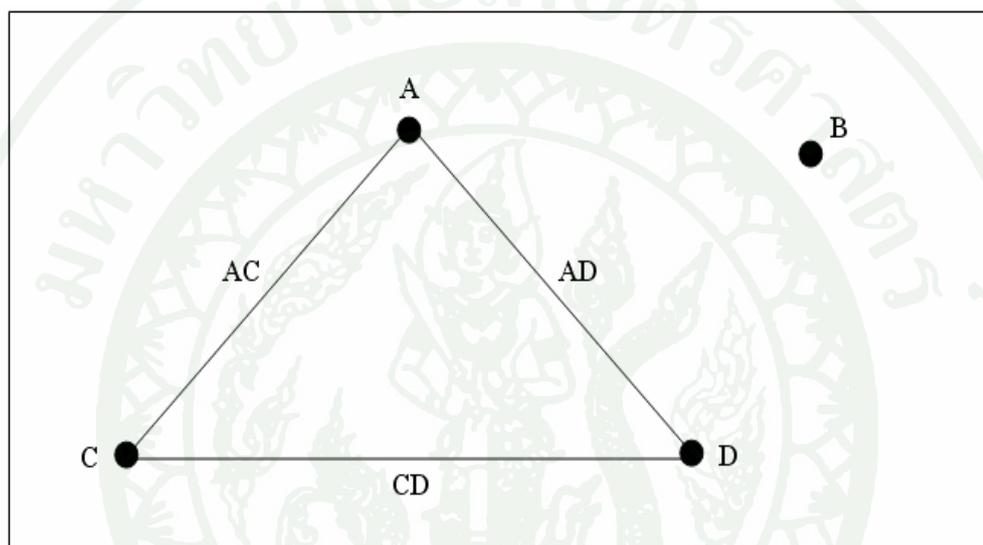


ภาพที่ 21 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของการขึ้นชิ้นผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล

2. ผลการวิเคราะห์โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

เนื่องจากผู้วิจัยต้องการศึกษาว่าถ้าปรับค่าระดับของปัจจัยต่างๆ ให้ออกนอกช่วงที่เคยทำการทดลองจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล แล้วค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกจะมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร แต่เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาโรงงานผลิตถุงยางอนามัยมีงบประมาณในการทดลองที่จำกัดและต้องการลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้แผนการทดลองแบบทากูชิมาทำการทดลองเพราะว่าแผนการทดลองนี้มีข้อดีตรงที่ประหยัดจำนวนการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถลดเวลาในการทดลองและลดค่าใช้จ่ายได้มาก โดยการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ นั้นประกอบไปด้วยปัจจัยควบคุมที่ทดสอบสมมติฐานแล้วว่ามีนัยสำคัญทางสถิติ คือ มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลของแผนการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ได้แก่ อิทธิพลหลัก คือ ความเร็วสายพาน (A) อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป (B) อุณหภูมิในการขึ้นรูป (C) อุณหภูมิในการปิดผนึก (D) และอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย คือ ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการขึ้นรูป (AC) ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก (AD) อุณหภูมิในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการปิดผนึก (CD) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกิดจากภายนอกกระบวนการและยากที่จะควบคุมในระหว่างการผลิต คือ อุณหภูมิห้อง ($^{\circ}\text{C}$) ความชื้นสัมพัทธ์ (%) และความหนาของแผ่นพลาสติก (mm) และเนื่องจากผลการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล พบว่าควร

กำหนดค่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ ความเร็วสายพานกับอุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูปไว้ที่ระดับต่ำ และอุณหภูมิในการขึ้นรูปกับอุณหภูมิในการปิดผนึกไว้ที่ระดับสูง จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น ดังนั้นในการกำหนดระดับในการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ จึงได้มีการปรับค่าระดับของปัจจัยต่างๆ ให้ออกนอกช่วงที่เคยทำการทดลองและผลิตจริงเล็กน้อย เพราะถ้าปรับค่าพารามิเตอร์มากเกินไป อาจทำให้งานที่ได้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น แต่ด้วยชิ้นงานก็มีรอยบวมและทะลุได้



ภาพที่ 22 กราฟเส้นตรงสำหรับการออกแบบการทดลองแบบทากูชิของ $L_8 2^7$

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ เมื่อกำหนดให้ Design Matrix ใช้แผนการทดลอง $L_8 2^7$ รูปแบบสามเหลี่ยมแสดงดังภาพที่ 22 และ Noise Matrix ใช้แผนการทดลอง $L_4 2^3$ เก็บตัวอย่างการทดลองๆละ 4 ตัวอย่าง จากนั้นจึงนำเมตริกซ์ทั้งสองมาไขว้กัน จะใช้จำนวนตัวอย่างรวมทั้งสิ้น $8 \times 4 \times 4 = 128$ ตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงดังตารางภาคผนวกที่ 11 และระดับของปัจจัยต่างๆ สำหรับแผนการทดลองแบบทากูชิ แสดงดังตารางที่ 11 สำหรับปัจจัยที่ควบคุมได้ และตารางที่ 12 สำหรับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

ตารางที่ 11 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองทางสถิติสำหรับปัจจัยที่ควบคุมได้

| ปัจจัยที่ควบคุมได้ | ระดับ | |
|--------------------------------------|-------|-----|
| | ต่ำ | สูง |
| ความเร็วสายพาน A (ชิ้น/นาทีก) | 40 | 44 |
| อุณหภูมิความร้อนเตรียมชิ้นรูป B (°C) | 145 | 150 |
| อุณหภูมิในการขึ้นรูป C (°C) | 170 | 175 |
| อุณหภูมิในการปิดผนึก D (°C) | 140 | 142 |

ตารางที่ 12 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองทางสถิติสำหรับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

| ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ | ระดับ | |
|--------------------------------|-----------|-----------|
| | ต่ำ | สูง |
| อุณหภูมิห้อง T (°C) | 25.1-25.4 | 25.5-25.8 |
| ความชื้นสัมพัทธ์ H (%) | 59.1-59.9 | 60.0-60.9 |
| ความหนาของแผ่นพลาสติก THK (mm) | 0.40-0.44 | 0.45-0.49 |

2.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยพิจารณาจากตารางค่า S/N Ratio (กรณี Larger The Better)

ตารางที่ 13 ค่า S/N Ratio กรณี Larger The Better ณ ระดับต่างๆ ของปัจจัย

| Level | A | B | C | D | AC | AD | CD |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 24.86 | 25.02 | 25.20 | 25.56 | 25.57 | 24.90 | 25.49 |
| 2 | 26.10 | 25.93 | 25.76 | 25.40 | 25.39 | 26.05 | 25.46 |
| Delta | 1.24 | 0.91 | 0.56 | 0.17 | 0.18 | 1.15 | 0.03 |
| Rank | 1 | 3 | 4 | 6 | 5 | 2 | 7 |

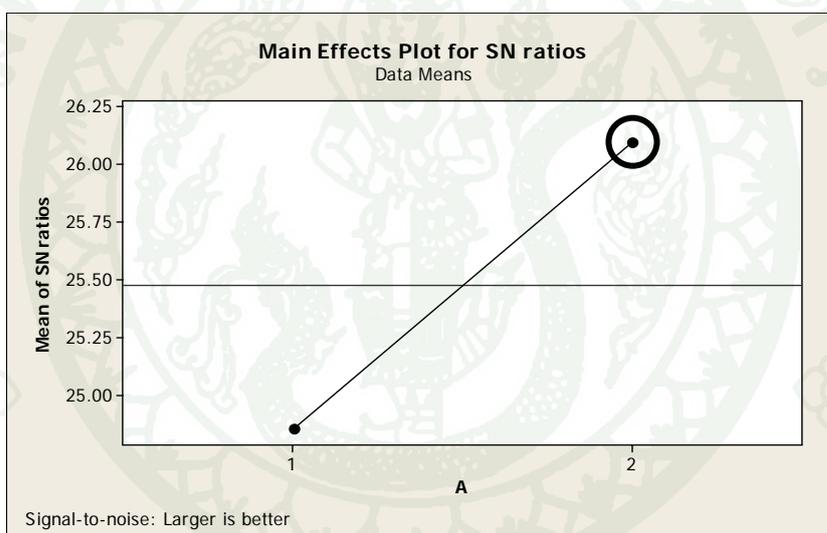
จากตารางที่ 13 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง เรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ ปัจจัย A, AD, B และ C (ค่าผลกระทบของ D, AC และ CD แตกต่างจาก C เกิน 3 เท่า)

2.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยพิจารณาจากกราฟของปัจจัยที่ควบคุมได้ (กรณี Larger The Better)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลองแบบทากูชิ ดังตารางที่ 13 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงทั้งหมด มาสร้างกราฟของปัจจัยที่ควบคุมได้ โดยสามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม ณ จุดที่ให้ค่า S/N Ratio สูงที่สุด ได้ผลดังนี้

2.2.1 อิทธิพลหลัก

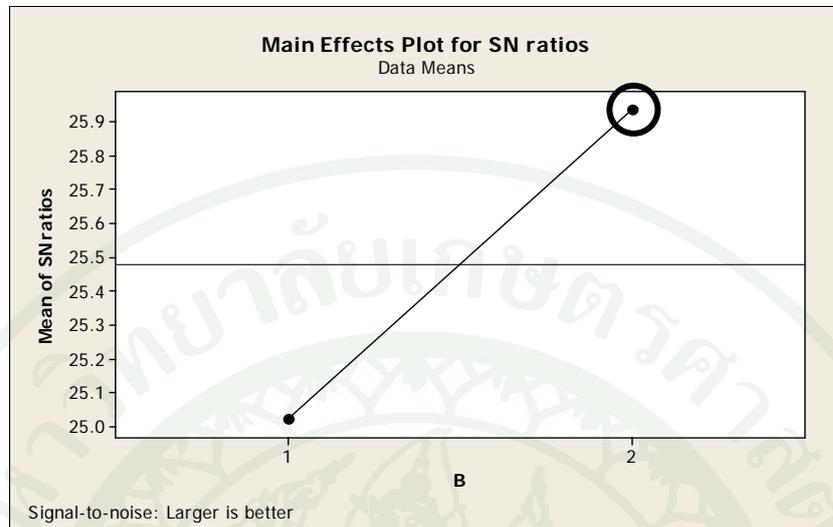
ก. ความเร็วสายพาน (A)



ภาพที่ 23 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของความเร็วสายพาน

จากภาพที่ 23 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย A ควรอยู่ที่ระดับสูง (ความเร็วสายพาน 44 ชั้น/นาที) จะให้ค่า S/N Ratio สูงที่สุด

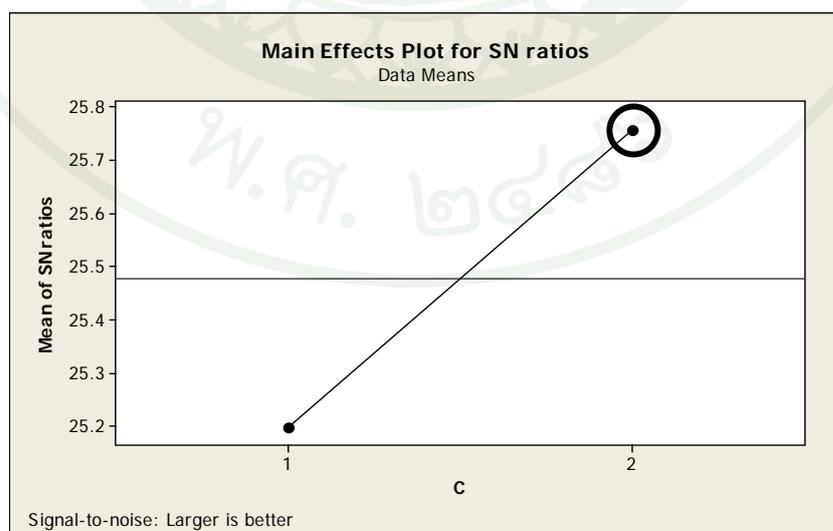
ข. อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป (B)



ภาพที่ 24 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของอุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป

จากภาพที่ 24 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย B ควรอยู่ที่ระดับสูง (อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป 150 องศาเซลเซียส) จะให้ค่า S/N Ratio สูงที่สุด

ค. อุณหภูมิในการขึ้นรูป (C)

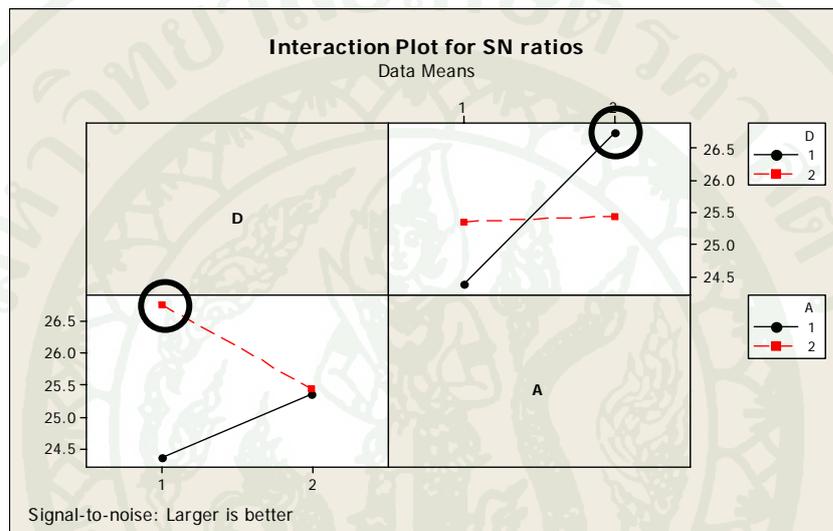


ภาพที่ 25 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของอุณหภูมิในการขึ้นรูป

จากภาพที่ 25 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย C ควรอยู่ที่ระดับสูง (อุณหภูมิในการขึ้นรูป 175 องศาเซลเซียส) จะให้ค่า S/N Ratio สูงที่สุด

2.2.2 อิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย

ก. ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก (AD)



ภาพที่ 26 กราฟแสดงอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก

จากภาพที่ 26 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย A ควรอยู่ที่ระดับสูง (ความเร็วสายพานเท่ากับ 44 ชั้น/นาที) และกำหนดค่าของปัจจัย D ควรอยู่ที่ระดับต่ำ (อุณหภูมิในการปิดผนึกเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส) จะให้ค่า S/N Ratio สูงที่สุด

2.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยพิจารณาจากตารางค่าผลกระทบของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (กรณี Larger The Better)

ตารางที่ 14 ค่าผลกระทบของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

| Level | THK | H | T |
|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 18.74 | 18.96 | 18.90 |
| 2 | 19.16 | 18.93 | 19.00 |
| Delta | 0.42 | 0.02 | 0.10 |
| Rank | 1 | 3 | 2 |

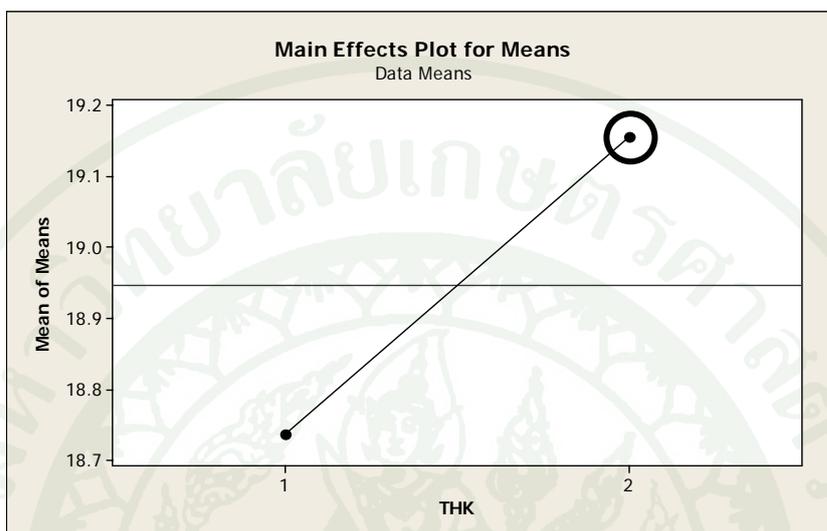
จากตารางที่ 14 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ได้แก่ ปัจจัย THK (ค่าผลกระทบหลักของ T และ H แตกต่างจาก THK เกิน 3 เท่า)

2.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยพิจารณาจากกราฟของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (กรณี Larger The Better)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลองแบบทากูชิ ดังตารางที่ 14 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง มาสร้างกราฟของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ โดยสามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม ณ จุดที่ให้ค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ได้ผลดังนี้

2.4.1 อิทธิพลหลัก

ความหนาของแผ่นพลาสติก (THK)



ภาพที่ 27 กราฟแสดงอิทธิพลหลักของความหนาของแผ่นพลาสติก

จากภาพที่ 27 พบว่า การกำหนดค่าของปัจจัย THK ควรอยู่ที่ระดับสูง (ความหนาของแผ่นพลาสติก 0.45-0.49 มิลลิเมตร) จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น

2.5 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการออกแบบการทดลองแบบทากูจิ

โดยสามารถสรุปได้ว่าควรกำหนดค่าปัจจัย A, B และ C ไว้ที่ระดับสูง และกำหนดค่าปัจจัย D ไว้ที่ระดับต่ำ เพื่อให้ได้ค่า S/N Ratio สูงที่สุด (กรณี Larger The Better) ดังนี้

ปัจจัย A (ความเร็วสายพาน) มีค่าเท่ากับ 44 ชั้น/นาที

ปัจจัย B (อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป) มีค่าเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส

ปัจจัย C (อุณหภูมิในการขึ้นรูป) มีค่าเท่ากับ 175 องศาเซลเซียส

ปัจจัย D (อุณหภูมิในการปิดผนึก) มีค่าเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส

และนอกจากนี้ ยังสามารถสรุปผลเกี่ยวกับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ คือ ควรกำหนดค่าของปัจจัย THK (ความหนาของแผ่นพลาสติก) เท่ากับ 0.45-0.49 มิลลิเมตร

2.5.1 สมการพยากรณ์ความสัมพันธ์ สามารถประมาณได้จากตัวแบบ

$$Y = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha_i\sigma_l) + \varepsilon$$

$$\hat{\mu}_y = \hat{y} = \hat{\mu} + \hat{\alpha}_i + \hat{\beta}_j + \hat{\gamma}_k + (\hat{\alpha}_i\hat{\sigma}_l)$$

เมื่อกำหนดให้ α_i คือ อิทธิพลของปัจจัย A ระดับที่ i
 β_j คือ อิทธิพลของปัจจัย B ระดับที่ j
 γ_k คือ อิทธิพลของปัจจัย C ระดับที่ k
 $\alpha_i\sigma_l$ คือ อิทธิพลอันตรกิริยาของปัจจัย A ระดับที่ i และ
 ปัจจัย D ระดับที่ l

จากสรุปผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะได้ค่าที่เหมาะสม คือ ปัจจัย A, B, C อยู่ที่
 ระดับ 2 และปัจจัย D อยู่ที่ระดับ 1 โดยมีผลดังนี้

$$\begin{aligned} \therefore \hat{\mu}_y &= \bar{T} + \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 + \hat{\gamma}_2 + (\hat{\alpha}_2\hat{\sigma}_1) \\ &= \bar{T} + (\bar{A}_2 - \bar{T}) + (\bar{B}_2 - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) + (\bar{A}_2\bar{D}_1 - \bar{T} - \hat{\alpha}_2 - \hat{\sigma}_1) \\ &= \bar{T} + (\bar{A}_2 - \bar{T}) + (\bar{B}_2 - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) + (\bar{A}_2\bar{D}_1 - \bar{T}) - (\bar{A}_2 - \bar{T}) - (\bar{D}_1 - \bar{T}) \\ &= \bar{T} + (\bar{B}_2 - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) + (\bar{A}_2\bar{D}_1 - \bar{T}) - (\bar{D}_1 - \bar{T}) \\ &= \bar{B}_2 + \bar{C}_2 + \bar{A}_2\bar{D}_1 - \bar{D}_1 - \bar{T} \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการจะได้ ค่า S/N Ratio เท่ากับ 27.4100

ค่าความต้านทานแรงดึง เท่ากับ 23.0453 นิวตัน

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.636936 นิวตัน

2.6 ยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลองแบบทากูชิ

ทำการยืนยันผลโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลของ
 การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ไปทำการทดลองกับกระบวนการผลิตจริง โดยทำการทดลอง
 เก็บข้อมูลทั้งหมด 2 ครั้ง ครั้งละ 5 ชุด ชุดละ 4 ตัวอย่าง ใช้จำนวนตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 40 ตัวอย่าง
 ผลการทดลองแสดงดังตารางภาคผนวกที่ จ1

2.6.1 การคำนวณค่าสถิติต่างๆ

จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลของการออกแบบการทดลองแบบทาคูชิ ในภาคผนวกที่ จ นำข้อมูลทั้งหมด 40 ตัวอย่าง มาคำนวณค่าสถิติต่างๆ ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และขอบเขตล่างของค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลองแบบทาคูชิ

| ค่าทางสถิติ | ข้อมูลยืนยันผลของ แผนการทดลองแบบทาคูชิ |
|--|---|
| ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (นิวตัน) | 20.79 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (นิวตัน) | 1.27 |
| ขอบเขตล่างค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95% (นิวตัน) | 20.45 |

2.6.2 การทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน

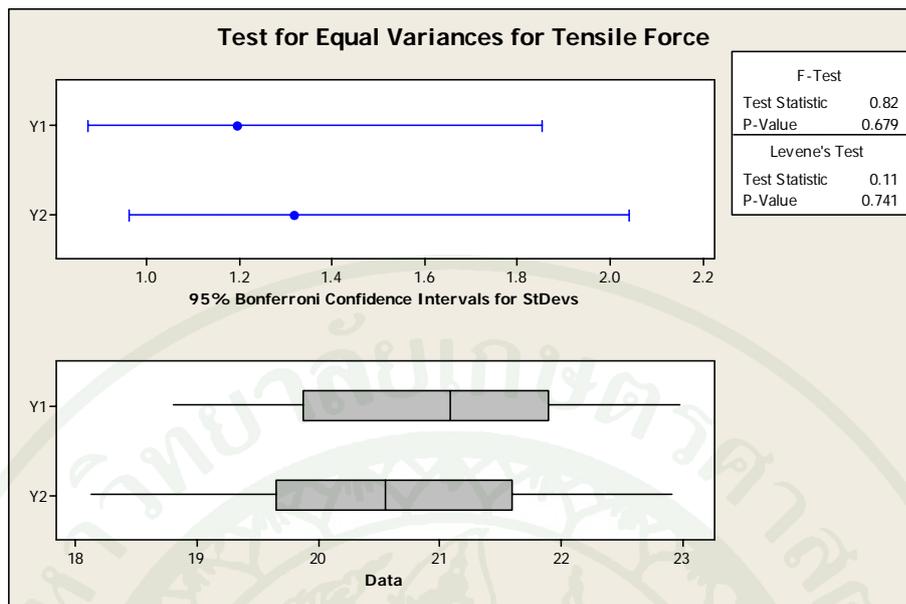
ก. การทดสอบความแปรปรวน ในการทดลองเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานแรงดึงจากการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง ว่าค่าความแปรปรวนของทั้งสองครั้งนี้มีค่าเท่ากันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

โดยทดสอบว่า

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

จะได้ผลการทดสอบความแปรปรวน ดังนี้



ภาพที่ 28 กราฟแสดงผลการทดสอบความแปรปรวนของการยื่นย่นผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลองแบบทากูชิ

จากภาพที่ 28 สามารถสรุปได้ว่าค่า P-Value = 0.679 > ค่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก แสดงว่าไม่มีหลักฐานแน่ชัดที่จะบ่งชี้ว่าค่าความแปรปรวนของค่าความต้านทานแรงดึงทั้งสองครั้งนี้ไม่เท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข. การทดสอบค่าเฉลี่ย ในการทดลองเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานแรงดึงจากการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง ว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองครั้งนี้มีค่าเท่ากันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

โดยทดสอบว่า

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

จะได้ผลการทดสอบค่าเฉลี่ย ดังนี้

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลองแบบ
ทากูชิ

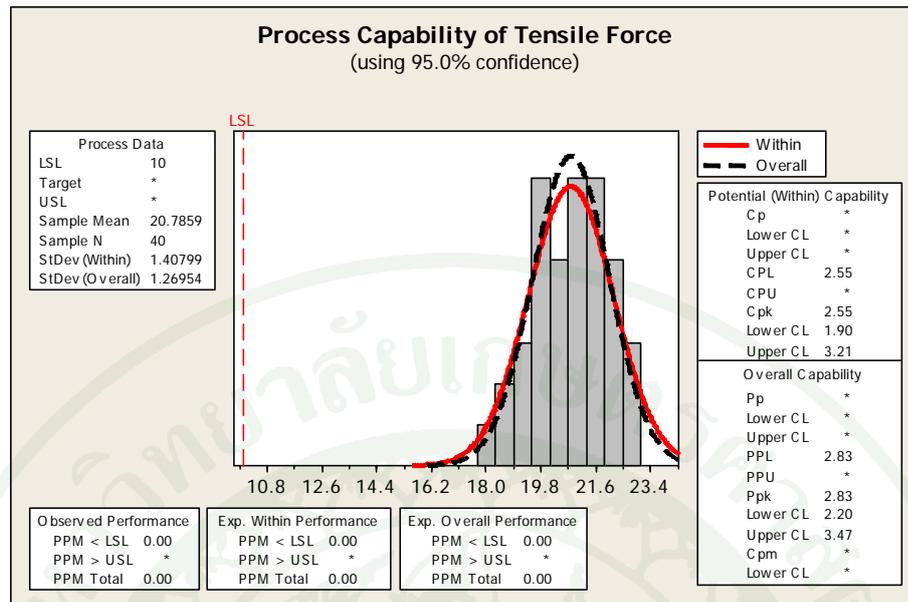
| แหล่งที่มา | ค่า T-Value | องศาเสรี(d.f.) | ค่า P-Value |
|---------------------------------------|-------------|----------------|-------------|
| ค่าความต้านทานแรงดึง ของการปิดผนึก | 1.15 | 38.00 | 0.258 |

จากตารางที่ 16 สามารถสรุปได้ว่าค่า P-Value = 0.258 > ค่าระดับนัยสำคัญ
ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงดึงทั้งสอง
ครั้งนี้ไม่ต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2.6.3 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ

จากข้อมูลการยืนยันผลรวมทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ในตารางผนวกที่ จ1 นำมา
วิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ และคำนวณค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการต่างๆ ได้ผล
ดังนี้

จากภาพที่ 29 พบว่า ผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากข้อมูล
ของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล มีข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) เพียงด้านเดียว คือ ค่าความ
ต้านทานแรงดึงเท่ากับ 10 นิวตัน มีค่า C_{pk} เท่ากับ 2.55 แสดงว่ากระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดีมาก และ
จากการยืนยันผลไม่พบของเสียเลย โดยช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการเท่ากับ $1.90 \leq C_{pk} \leq 3.21$



ภาพที่ 29 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของการขึ้นชิ้นผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแผนการทดลองแบบทากูชิ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยที่มุ่งเน้นในการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ให้มีค่าสูงขึ้นภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ และอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด โดยปัจจัยและระดับต่างๆที่ได้นำมาศึกษา ได้มาจากการระดมสมองระหว่างผู้วิจัยกับผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ การรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การพิจารณาตามเอกสารคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่องจักร และการปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่ผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์เคยทำการศึกษาและทดลองไว้ พบว่ามีทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ (1) ความเร็วสายพาน เหตุผลในการเลือกปัจจัยนี้มาทำการศึกษาเพราะว่า ถ้าปรับค่าความเร็วสายพานเร็วจนเกินไป เวลาในการปิดผนึกก็จะมีเวลาน้อย ส่งผลให้สารปิดผนึกจะยังไม่ละลายมาเชื่อมที่รอยปิดผนึก หรือถ้าปรับค่าความเร็วสายพานช้าจนเกินไป เวลาในการปิดผนึกก็จะมีเวลามาก ส่งผลให้สารปิดผนึกละลายออกนอกรอยปิดผนึก และจากเหตุผลนี้ทำให้รอยปิดผนึกไม่สมบูรณ์นั่นเอง (2) อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป เหตุผลในการเลือกปัจจัยนี้มาทำการศึกษาเพราะว่า ถ้าปรับค่าอุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูปสูงจนเกินไป แผ่นพลาสติกจะอ่อนตัวจนเสียรูป ส่งผลให้เวลาทำการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์รอยปิดผนึกจะไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปรับค่าอุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูปต่ำจนเกินไป แผ่นพลาสติกจะไม่สามารถขึ้นรูปออกมาเป็นถ้วยบรรจุภัณฑ์ได้นั่นเอง (3) อุณหภูมิในการขึ้นรูป เหตุผลในการเลือกปัจจัยนี้มาทำการศึกษาเพราะว่า ถ้าปรับค่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปสูงจนเกินไป แผ่นพลาสติกจะอ่อนตัวจนเสียรูป ส่งผลให้เวลาทำการปิดผนึกบรรจุภัณฑ์รอยปิดผนึกจะไม่สมบูรณ์ หรือถ้าปรับค่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำจนเกินไป แผ่นพลาสติกจะไม่สามารถขึ้นรูปออกมาเป็นถ้วยบรรจุภัณฑ์ได้นั่นเอง (4) อุณหภูมิในการปิดผนึก เหตุผลในการเลือกปัจจัยนี้มาทำการศึกษาเพราะว่า ถ้าปรับค่าอุณหภูมิในการปิดผนึกสูงจนเกินไป ส่งผลให้สารปิดผนึกละลายออกนอกรอยปิดผนึก หรือถ้าปรับค่าอุณหภูมิในการปิดผนึกต่ำจนเกินไป ส่งผลให้สารปิดผนึกจะยังไม่ละลายมาเชื่อมที่รอยปิดผนึก และจากเหตุผลนี้ทำให้รอยปิดผนึกไม่สมบูรณ์นั่นเอง

จากการวิเคราะห์โดยใช้แผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงแบ่งออกเป็นอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป (B) ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการขึ้นรูป (AC) ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก (AD) อุณหภูมิในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการปิดผนึก (CD) และสามารถ

สรุปผลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและค่าความต้านทานแรงดึง โดยพิจารณาจากระดับของปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ปัจจัยและระดับที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล

| ปัจจัย | ระดับที่เหมาะสม |
|--|-----------------|
| ความเร็วสายพาน A (ชิ้น/นาที) | 44 |
| อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป B ($^{\circ}\text{C}$) | 150 |
| อุณหภูมิในการขึ้นรูป C ($^{\circ}\text{C}$) | 170 |
| อุณหภูมิในการปิดผนึก D ($^{\circ}\text{C}$) | 140 |

ทำการยืนยันผลโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง พบว่าขอบเขตล่างค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95% หลังการปรับปรุงมีค่าไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน คือ 10 นิวตัน และจากการยืนยันผลไม่พบของเสียเลย อีกทั้งยังเพิ่มค่า C_{pk} ให้กับกระบวนการ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีอยู่ภายใต้ข้อกำหนด เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของค่าความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยได้คิดเป็น 42.61% และในส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพิ่มขึ้น แต่สามารถยอมรับได้ในช่วงความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ค่าสถิติต่างๆ ก่อนและหลังการปรับปรุงจากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล

| ค่า C_{pk} และค่าทางสถิติ | ก่อนการปรับปรุง | หลังการปรับปรุง |
|--|------------------------------|------------------------------|
| ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (นิวตัน) | 12.51 | 17.84 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (นิวตัน) | 1.19 | 1.28 |
| ขอบเขตล่างค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95% (นิวตัน) | 12.19 | 17.49 |
| ค่า C_{pk} | 0.62 | 1.99 |
| ช่วงความเชื่อมั่น C_{pk} | $0.43 \leq C_{pk} \leq 0.80$ | $1.48 \leq C_{pk} \leq 2.51$ |

โดยแผนการทดลองแบบทากูชินั้นประกอบไปด้วยปัจจัยควบคุมได้ที่ทดสอบสมมติฐานแล้วว่า มีนัยสำคัญทางสถิติ คือ มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงซึ่งได้จากการวิเคราะห์ผลของแผนการทดลอง 2^4 แฟกทอเรียล ได้แก่ อิทธิพลหลัก คือ ความเร็วสายพาน (A) อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป (B) อุณหภูมิในการขึ้นรูป (C) อุณหภูมิในการปิดผนึก (D) และอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย คือ ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการขึ้นรูป (AC) ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก (AD) อุณหภูมิในการขึ้นรูปและอุณหภูมิในการปิดผนึก (CD) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกิดจากภายนอกกระบวนการและยากที่จะควบคุมในระหว่างการผลิต คือ อุณหภูมิห้อง ($^{\circ}\text{C}$) ความชื้นสัมพัทธ์ (%) และความหนาของแผ่นพลาสติก (mm) และจากการวิเคราะห์โดยใช้แผนการทดลองแบบทากูชิ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงแบ่งออกเป็นอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วสายพาน (A) อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป (B) อุณหภูมิในการขึ้นรูป (C) ความเร็วสายพานและอุณหภูมิในการปิดผนึก (AD) โดยสามารถสรุปได้ว่าควรกำหนดปัจจัย A, B และ C ไว้ที่ระดับสูง และกำหนดปัจจัย D ไว้ที่ระดับต่ำ เพื่อให้ได้ค่า S/N Ratio สูงที่สุด (กรณี Larger The Better) แสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ปัจจัยและระดับที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตจากแผนการทดลองแบบทากูชิ

| ปัจจัย | ระดับที่เหมาะสม |
|--|-----------------|
| ความเร็วสายพาน A (ชิ้น/นาที) | 44 |
| อุณหภูมิความร้อนเตรียมขึ้นรูป B ($^{\circ}\text{C}$) | 150 |
| อุณหภูมิในการขึ้นรูป C ($^{\circ}\text{C}$) | 175 |
| อุณหภูมิในการปิดผนึก D ($^{\circ}\text{C}$) | 140 |

และนอกจากนี้ยังสามารถสรุปผลเกี่ยวกับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้คือ ควรกำหนดระดับปัจจัย THK (ความหนาของแผ่นพลาสติก) = 0.45-0.49 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น

ทำการยืนยันผลโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแผนการทดลองแบบทากูชิ ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง พบว่าขอบเขตล่างค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95% หลังการปรับปรุงมีค่าไม่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน คือ 10 นิวตัน และจากการยืนยันผลไม่พบของเสียเลย อีกทั้งยังเพิ่มค่า C_{pk} ให้กับกระบวนการ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพคืออยู่ภายใต้ข้อกำหนด เมื่อทำการ

เปรียบเทียบผลการทดลองของค่าความต้านทานแรงดึงก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยได้คิดเป็น 66.19% และในส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพิ่มขึ้นแต่สามารถยอมรับได้ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่าสถิติต่างๆ ก่อนและหลังการปรับปรุงจากแผนการทดลองแบบทากูชิ

| ค่า C_{pk} และค่าทางสถิติ | ก่อนการปรับปรุง | หลังการปรับปรุง |
|---|------------------------------|------------------------------|
| ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (นิวตัน) | 12.51 | 20.79 |
| ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (นิวตัน) | 1.19 | 1.27 |
| ขอบเขตล่างค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% (นิวตัน) | 12.19 | 20.45 |
| ค่า C_{pk} | 0.62 | 2.55 |
| ช่วงความเชื่อมั่น C_{pk} | $0.43 \leq C_{pk} \leq 0.80$ | $1.90 \leq C_{pk} \leq 3.21$ |

ตารางที่ 21 ค่าสถิติต่างๆ ซึ่งคำนวณได้จากข้อมูลที่ทำให้การยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

| แผนการทดลอง | ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (นิวตัน) | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (นิวตัน) | ค่า C_{pk} |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------|
| 2^k แฟคทอเรียล | 17.84 | 1.28 | 1.99 |
| ทากูชิ | 20.79 | 1.27 | 2.55 |

จากตารางที่ 21 ได้ทำการเปรียบเทียบการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลอง 2^k แฟคทอเรียลและแผนการทดลองแบบทากูชิ พบว่าแผนการทดลองแบบทากูชิจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย และค่า C_{pk} สูงกว่าแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียลที่ 18.94% และ 28.14% ตามลำดับ แต่ให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าที่ 0.79% และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบระดับที่เหมาะสมของแผนการทดลองทั้งสอง พบว่ามีเพียงปัจจัยเดียวที่แตกต่างกัน คือ ปัจจัยอุณหภูมิในการขึ้นรูป (C) โดยแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล = 170 °C และแผนการทดลองแบบทากูชิ = 175 °C ถึงแม้ว่าแผนการทดลองแบบทากูชิจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย และค่า C_{pk} ที่สูงกว่า และให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่า แต่ในกระบวนการผลิตจริงผลการทดลองที่ได้จากแผนการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล ก็มีค่าที่ดีเพียงพอที่จะนำไปใช้กับกระบวนการผลิตจริงได้ ทั้งยังสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตโดยการปรับอุณหภูมิในการขึ้นรูปลงได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากปัจจัยควบคุมไม่ได้ คือความหนาแผ่นพลาสติก มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก เกิดจากสาเหตุแผ่นพลาสติกที่ทำการสั่งซื้อจากแหล่งผลิตภายนอกไม่ได้มาตรฐาน โดยมีความหนาของแผ่นพลาสติกไม่เท่ากันตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นจึงควรทำการควบคุมผู้ผลิตจากภายนอกผลิตงานให้มีคุณภาพและได้ตามมาตรฐานด้วย และควรมีการตรวจสอบเครื่องสำหรับวัดค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึกตามระยะเวลาที่กำหนดเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่า และนอกจากนั้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ เพื่อพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้ตรงตามมาตรฐานที่กำหนด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กนกวรรณ กนกกุลชัย. 2545. พัฒนาการของการวางแผนการตลาด กรณีศึกษาแผนการตลาดแบบแฟคทอเรียลและสปลิทพล็อต ปี ค.ศ. 1999-2001. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- เจษฎา ทิพย์มณฑิธร. 2547. การประยุกต์ใช้การออกแบบการตลาดเพื่อการปรับปรุงคุณภาพกระบวนการบรรจุและปิดผนึกบรรจุภัณฑ์ในการผลิตขอสผลไม้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- เจริญ นาคะสรรค์. 2547. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์โพธิ์เพชร, กรุงเทพฯ.
- ดวงฤทัย ชำรงโชติ. 2550. เทคโนโลยีภาชนะบรรจุ. โอ. เอส. พรินติ้ง เฮาส์, กรุงเทพฯ.
- นวิรัตน์ จันทร์กระเวน. 2548. การออกแบบการตลาดเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเดือนลูกบอลในกระบวนการเชื่อมวงจร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและการวิเคราะห์การตลาด. บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ปณัยกรณ์ อังกรานันท์. 2545. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทนแรงดึงในแนวตะเข็บในกระบวนการผลิตถุงพลาสติกหิ้วรูปตัวยู. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการตลาดทางวิศวกรรม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. 2542. พลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 15. ห.จ.ก. ป. สัมพันธ์พาณิชย์, กรุงเทพฯ.

มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์. 2540. เคมีพอลิเมอร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

วิชัย รวิพันธ์. 2540. การออกแบบแผนการทดลอง และการควบคุมการผลิตในแผนกบรรจุภัณฑ์ : กรณีศึกษา บริษัท ฟิลิปส์ เซมิคอนดักเตอร์ (ประเทศไทย) จำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วัลยา กล้าศึก. 2549. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผนการทดลอง 4 แบบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุรพล โชติวรรณ. 2530. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคุณสมบัติทั่วไปของเม็ดพลาสติก, น. 3-5. ใน การบรรจุหีบห่อด้วยฟิล์มพลาสติก. ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

โสภิตา ท่วมมี. 2550. การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา บริษัทในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

_____. 2539. การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของรอยปิดผนึกด้วยความร้อน สำหรับบรรจุภัณฑ์พลาสติก. สำนักบริการวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Barid, R. J. and T. David. 1982. **Industrial Plastics**. The Goodheart-Willcox Company, Illinois.

Borror, C. M. and D. C. Montgomery. 2002. Evaluation of statistical designs for experiments involving noise variable. **Journal of Quality Technology** 34: 54-69.

Brydson, J. A. 1995. **Plastic Materials**. Butterworth-Heinemann Ltd., Jordan Hill, Oxford.

Chowdhury, K. K. and E. V. Gopal. 2000. Quality improvement through design of experiments: a case study. **Journal of Quality Engineering** 12: 407-416.

- Doolana, M. C., S. Kalyanasundaram, P. Hodgson and M. C. Hall. 2001. Identifying variation in sheet metal stamping. **Journal of Materials Processing Technology** 115: 142–146.
- Kackar, R. N. 1998. Off-line quality control, parameter design and the taguchi method. **Journal of Quality Technology** 17: 176-188.
- Li, W., J. Christopher and Nachtsheim. 2000. Model-robust factorial designs. **Journal of Technometrics** 42: 345-352.
- Montgomery, D. C. 2005. **Design and Analysis of Experiments**. 6th ed. John Wiley & Sons, Inc., United States of America.
- _____. 2009. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6th ed. John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd., Asia.
- Pazur, A. S. 2004. Processing and formulation effects on gel levels in flexible PVC extrusions. **Journal of Vinyl and Additive Technology** 3: 126-131.
- Peterson, S., K. Jayaraman and D. Bhattacharyya. 2002. Forming performance and biodegradability of woodfibre-Biopol composites. **Journal of Applied Science and Manufacturing** 1: 1123-1134.
- Rao, K. G. and V. R. Joseph. 2001. Reduction of testing of chemical parameter using design of experiments. **Journal of Quality Engineering** 14: 301-305.
- Rocak, D., M. Kosec and A. Degen. 2002. Ceramic suspension optimization using factorial design of experiments. **Journal of the European Ceramic Society** 22: 391–395.
- Shad, D. 2004. An application of design of experiments for optimization of plastic injection molding processes. **Journal of Manufacturing Technology Management** 15: 445-454.

Sudasna-na-Ayudhya, P. 1992. **Comparison of Response Surface Model and Taguchi Methodology for Robust Design**. Ph.D. Thesis, Oregon State University.

Taguchi, G. 1986. **Introduction to Quality Engineering: Design Quality into Products and Processes**. Asian Productivity Organization, Tokyo.

Wenja, J. T. 2005. Statistical analysis of process parameters influencing dimensional control in ceramic injection molding. **Journal of Quality Technology** 2: 23-37.

Whitcomb, P. J. 2000. Make breakthrough improvements with design of experiments. **Journal of Quality Technology** 30: 1-9.

Youssef, A. Y., B. Yves and T. Marc. 1997. Comparison of a full factorial designs and taguchi designs in a lathe dry turning operation. **Journal of Computers & Industrial Engineering** 27: 59-62.

Yueyu, M., H. Henry, A. Northwood and T. Nie. 2007. Optimization of the electrolytic plasma oxidation processes for corrosion protection of magnesium alloy AM50 using the Taguchi method. **Journal of Materials Processing Technology** 182: 58-64.



ภาคผนวก

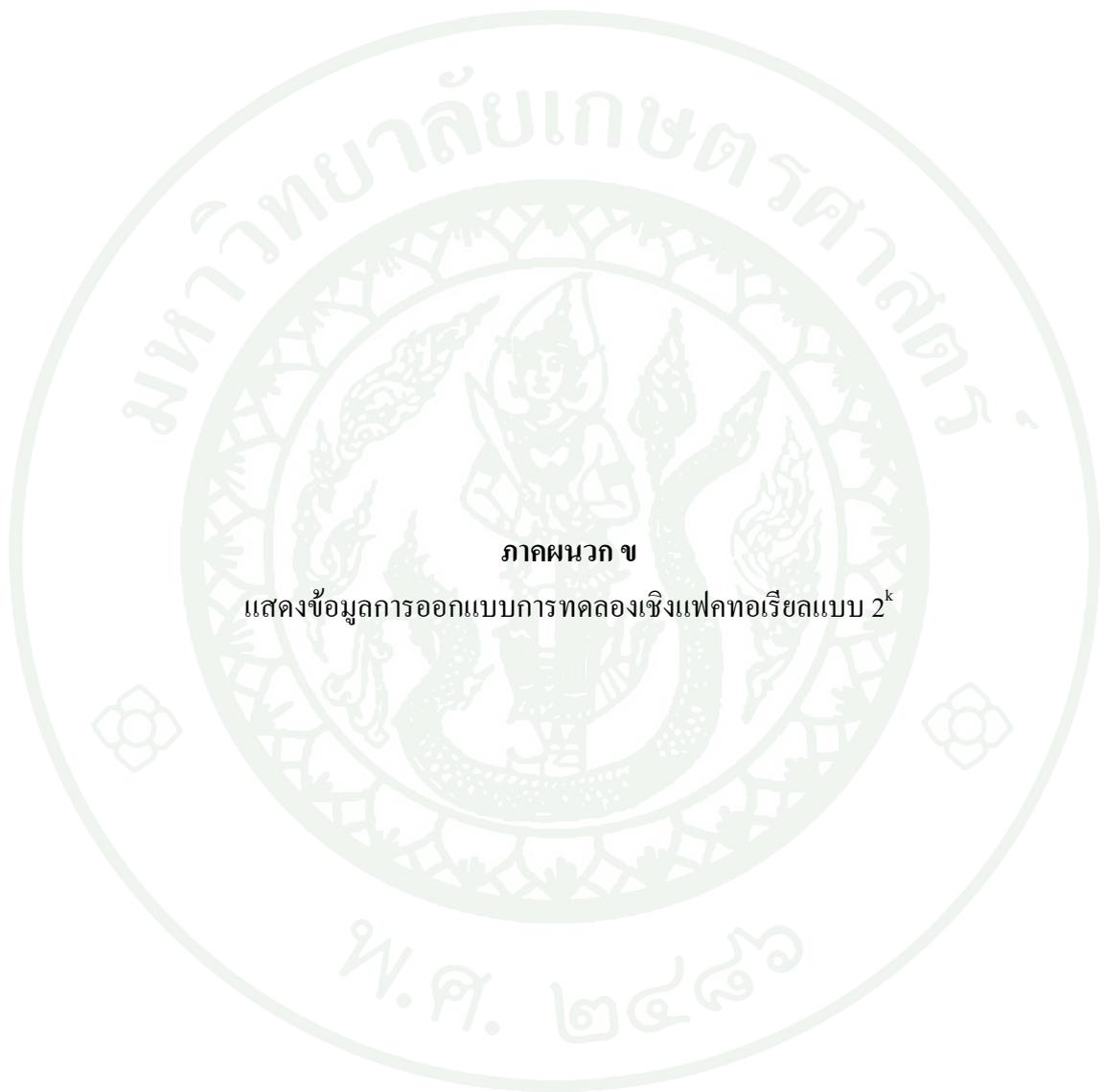


ภาคผนวก ก

แสดงข้อมูลก่อนการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลก่อนการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

| ชุดที่ | ค่าสังเกตของค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก ณ ตำแหน่งที่ (นิวตัน) | | | |
|--------|---|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 10.943 | 12.921 | 14.185 | 12.134 |
| 2 | 11.254 | 13.518 | 11.823 | 13.212 |
| 3 | 14.421 | 12.221 | 12.865 | 10.541 |
| 4 | 13.442 | 11.633 | 13.647 | 11.667 |
| 5 | 12.483 | 12.621 | 10.432 | 14.631 |
| 6 | 12.195 | 14.105 | 12.935 | 10.737 |
| 7 | 12.209 | 10.304 | 12.704 | 14.301 |
| 8 | 11.942 | 13.096 | 13.592 | 11.432 |
| 9 | 14.046 | 12.992 | 12.037 | 10.876 |
| 10 | 11.703 | 13.284 | 11.823 | 13.428 |



ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

| ลำดับการ ทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึง ของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|----------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 44 | 150 | 165 | 133 | 13.760 |
| 2 | 48 | 150 | 165 | 133 | 12.924 |
| 3 | 44 | 165 | 165 | 133 | 11.756 |
| 4 | 48 | 165 | 165 | 133 | 13.928 |
| 5 | 44 | 150 | 170 | 133 | 17.672 |
| 6 | 48 | 150 | 170 | 133 | 10.532 |
| 7 | 44 | 165 | 170 | 133 | 10.418 |
| 8 | 48 | 165 | 170 | 133 | 9.704 |
| 9 | 44 | 150 | 165 | 140 | 17.541 |
| 10 | 48 | 150 | 165 | 140 | 15.814 |
| 11 | 44 | 165 | 165 | 140 | 17.570 |
| 12 | 48 | 165 | 165 | 140 | 10.040 |
| 13 | 44 | 150 | 170 | 140 | 20.048 |
| 14 | 48 | 150 | 170 | 140 | 14.876 |
| 15 | 44 | 165 | 170 | 140 | 20.420 |
| 16 | 48 | 165 | 170 | 140 | 11.336 |

ตารางผนวกที่ ข2 ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

| ลำดับการ ทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึง ของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|----------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 44 | 150 | 165 | 133 | 13.796 |
| 2 | 48 | 150 | 165 | 133 | 12.941 |
| 3 | 44 | 165 | 165 | 133 | 11.780 |
| 4 | 48 | 165 | 165 | 133 | 13.940 |
| 5 | 44 | 150 | 170 | 133 | 17.678 |
| 6 | 48 | 150 | 170 | 133 | 10.539 |
| 7 | 44 | 165 | 170 | 133 | 10.436 |
| 8 | 48 | 165 | 170 | 133 | 9.716 |
| 9 | 44 | 150 | 165 | 140 | 17.543 |
| 10 | 48 | 150 | 165 | 140 | 15.806 |
| 11 | 44 | 165 | 165 | 140 | 17.576 |
| 12 | 48 | 165 | 165 | 140 | 10.057 |
| 13 | 44 | 150 | 170 | 140 | 20.064 |
| 14 | 48 | 150 | 170 | 140 | 14.960 |
| 15 | 44 | 165 | 170 | 140 | 20.468 |
| 16 | 48 | 165 | 170 | 140 | 11.312 |

ตารางผนวกที่ ข3 ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำที่ 1 ตำแหน่งที่ 3

| ลำดับการ ทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึง ของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|----------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 44 | 150 | 165 | 133 | 13.892 |
| 2 | 48 | 150 | 165 | 133 | 13.056 |
| 3 | 44 | 165 | 165 | 133 | 11.802 |
| 4 | 48 | 165 | 165 | 133 | 13.940 |
| 5 | 44 | 150 | 170 | 133 | 17.702 |
| 6 | 48 | 150 | 170 | 133 | 10.556 |
| 7 | 44 | 165 | 170 | 133 | 10.448 |
| 8 | 48 | 165 | 170 | 133 | 9.728 |
| 9 | 44 | 150 | 165 | 140 | 17.552 |
| 10 | 48 | 150 | 165 | 140 | 15.992 |
| 11 | 44 | 165 | 165 | 140 | 17.588 |
| 12 | 48 | 165 | 165 | 140 | 10.064 |
| 13 | 44 | 150 | 170 | 140 | 20.071 |
| 14 | 48 | 150 | 170 | 140 | 15.080 |
| 15 | 44 | 165 | 170 | 140 | 20.504 |
| 16 | 48 | 165 | 170 | 140 | 11.324 |

ตารางผนวกที่ ข4 ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำที่ 1 ตำแหน่งที่ 4

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 44 | 150 | 165 | 133 | 13.916 |
| 2 | 48 | 150 | 165 | 133 | 13.118 |
| 3 | 44 | 165 | 165 | 133 | 11.828 |
| 4 | 48 | 165 | 165 | 133 | 13.952 |
| 5 | 44 | 150 | 170 | 133 | 17.702 |
| 6 | 48 | 150 | 170 | 133 | 10.562 |
| 7 | 44 | 165 | 170 | 133 | 10.464 |
| 8 | 48 | 165 | 170 | 133 | 9.740 |
| 9 | 44 | 150 | 165 | 140 | 17.564 |
| 10 | 48 | 150 | 165 | 140 | 16.063 |
| 11 | 44 | 165 | 165 | 140 | 17.588 |
| 12 | 48 | 165 | 165 | 140 | 10.075 |
| 13 | 44 | 150 | 170 | 140 | 20.084 |
| 14 | 48 | 150 | 170 | 140 | 15.128 |
| 15 | 44 | 165 | 170 | 140 | 20.540 |
| 16 | 48 | 165 | 170 | 140 | 11.312 |

ตารางผนวกที่ ข5 ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

| ลำดับการ ทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึง ของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|----------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 44 | 150 | 165 | 133 | 13.460 |
| 2 | 48 | 150 | 165 | 133 | 16.328 |
| 3 | 44 | 165 | 165 | 133 | 11.252 |
| 4 | 48 | 165 | 165 | 133 | 15.410 |
| 5 | 44 | 150 | 170 | 133 | 14.432 |
| 6 | 48 | 150 | 170 | 133 | 14.282 |
| 7 | 44 | 165 | 170 | 133 | 9.656 |
| 8 | 48 | 165 | 170 | 133 | 12.368 |
| 9 | 44 | 150 | 165 | 140 | 19.652 |
| 10 | 48 | 150 | 165 | 140 | 16.658 |
| 11 | 44 | 165 | 165 | 140 | 17.984 |
| 12 | 48 | 165 | 165 | 140 | 10.412 |
| 13 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.896 |
| 14 | 48 | 150 | 170 | 140 | 18.812 |
| 15 | 44 | 165 | 170 | 140 | 21.794 |
| 16 | 48 | 165 | 170 | 140 | 16.184 |

ตารางผนวกที่ ข6 ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

| ลำดับการ ทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึง ของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|----------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 44 | 150 | 165 | 133 | 13.496 |
| 2 | 48 | 150 | 165 | 133 | 16.334 |
| 3 | 44 | 165 | 165 | 133 | 11.276 |
| 4 | 48 | 165 | 165 | 133 | 15.428 |
| 5 | 44 | 150 | 170 | 133 | 14.492 |
| 6 | 48 | 150 | 170 | 133 | 14.324 |
| 7 | 44 | 165 | 170 | 133 | 9.668 |
| 8 | 48 | 165 | 170 | 133 | 12.380 |
| 9 | 44 | 150 | 165 | 140 | 19.676 |
| 10 | 48 | 150 | 165 | 140 | 16.664 |
| 11 | 44 | 165 | 165 | 140 | 17.996 |
| 12 | 48 | 165 | 165 | 140 | 10.436 |
| 13 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.932 |
| 14 | 48 | 150 | 170 | 140 | 18.836 |
| 15 | 44 | 165 | 170 | 140 | 21.824 |
| 16 | 48 | 165 | 170 | 140 | 16.172 |

ตารางผนวกที่ ข7 ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำที่ 2 ตำแหน่งที่ 3

| ลำดับการ ทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึง ของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|----------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 44 | 150 | 165 | 133 | 13.604 |
| 2 | 48 | 150 | 165 | 133 | 16.352 |
| 3 | 44 | 165 | 165 | 133 | 11.288 |
| 4 | 48 | 165 | 165 | 133 | 15.500 |
| 5 | 44 | 150 | 170 | 133 | 14.504 |
| 6 | 48 | 150 | 170 | 133 | 14.336 |
| 7 | 44 | 165 | 170 | 133 | 9.700 |
| 8 | 48 | 165 | 170 | 133 | 12.392 |
| 9 | 44 | 150 | 165 | 140 | 19.688 |
| 10 | 48 | 150 | 165 | 140 | 16.676 |
| 11 | 44 | 165 | 165 | 140 | 18.020 |
| 12 | 48 | 165 | 165 | 140 | 10.472 |
| 13 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.944 |
| 14 | 48 | 150 | 170 | 140 | 18.884 |
| 15 | 44 | 165 | 170 | 140 | 21.860 |
| 16 | 48 | 165 | 170 | 140 | 16.172 |

ตารางผนวกที่ ข8 ข้อมูลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k รอบทำซ้ำที่ 2 ตำแหน่งที่ 4

| ลำดับการ ทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึง ของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|----------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 44 | 150 | 165 | 133 | 13.628 |
| 2 | 48 | 150 | 165 | 133 | 16.364 |
| 3 | 44 | 165 | 165 | 133 | 11.300 |
| 4 | 48 | 165 | 165 | 133 | 15.530 |
| 5 | 44 | 150 | 170 | 133 | 14.577 |
| 6 | 48 | 150 | 170 | 133 | 14.384 |
| 7 | 44 | 165 | 170 | 133 | 9.716 |
| 8 | 48 | 165 | 170 | 133 | 12.428 |
| 9 | 44 | 150 | 165 | 140 | 19.700 |
| 10 | 48 | 150 | 165 | 140 | 16.688 |
| 11 | 44 | 165 | 165 | 140 | 18.032 |
| 12 | 48 | 165 | 165 | 140 | 10.496 |
| 13 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.968 |
| 14 | 48 | 150 | 170 | 140 | 18.908 |
| 15 | 44 | 165 | 170 | 140 | 21.872 |
| 16 | 48 | 165 | 170 | 140 | 16.160 |



ภาคผนวก ค

แสดงข้อมูลการยืนยันผลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k

ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลการยืนยันผลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k

| ครั้งที่ | ชุดที่ | ค่าสังเกตของค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก ณ ตำแหน่งที่ (นิวตัน) | | | |
|----------|--------|---|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 17.101 | 19.224 | 20.454 | 17.823 |
| | 2 | 18.952 | 17.823 | 18.513 | 16.998 |
| | 3 | 17.925 | 18.981 | 19.432 | 17.102 |
| | 4 | 18.303 | 15.259 | 16.412 | 17.543 |
| | 5 | 17.943 | 18.011 | 17.421 | 16.932 |
| 2 | 1 | 16.264 | 17.045 | 20.151 | 16.442 |
| | 2 | 17.339 | 18.423 | 17.319 | 18.932 |
| | 3 | 19.632 | 18.012 | 16.314 | 17.342 |
| | 4 | 17.201 | 18.089 | 15.642 | 17.321 |
| | 5 | 19.032 | 20.762 | 17.892 | 16.097 |



ภาคผนวก ง
แสดงข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทฤษฎี

ตารางผนวกที่ ๑1 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทาคูชิ ตำแหน่งที่ 1 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 16.007 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 20.876 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 19.769 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 17.837 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 17.026 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 20.989 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 17.319 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 20.711 |

ตารางผนวกที่ ๑2 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทาคูชิ ตำแหน่งที่ 2 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 15.283 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.961 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 18.024 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 18.020 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 16.936 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 20.827 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 16.979 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 19.865 |

ตารางผนวกที่ 3 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทาคูชิ ตำแหน่งที่ 3 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 15.819 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.827 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 18.106 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 17.917 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 17.321 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 21.264 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 16.882 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 19.908 |

ตารางผนวกที่ 4 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทาคูชิ ตำแหน่งที่ 4 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 15.459 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 20.919 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 19.501 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 18.092 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 17.529 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 21.341 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 17.212 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 20.825 |

ตารางผนวกที่ 5 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 1 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 15.479 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.949 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 18.558 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 16.202 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 18.727 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 21.897 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 18.882 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 19.693 |

ตารางผนวกที่ 6 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 2 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 14.316 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 22.381 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 19.557 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 15.981 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 17.891 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 20.932 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 18.655 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 20.648 |

ตารางผนวกที่ 7 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 3 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 14.498 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 22.271 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 19.923 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 16.413 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 18.578 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 21.562 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 17.949 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 20.464 |

ตารางผนวกที่ 8 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 4 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับต่ำ)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 15.396 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.528 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 18.948 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 15.993 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 17.031 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 20.935 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 17.846 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 19.714 |

ตารางผนวกที่ 9 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 1 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับสูง)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 16.012 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 22.814 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 19.547 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 16.943 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 18.021 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 22.954 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 18.813 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 21.172 |

ตารางผนวกที่ 10 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 2 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับสูง)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 15.932 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 22.784 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 18.976 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 16.861 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 18.147 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 21.156 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 17.972 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 20.663 |

ตารางผนวกที่ 11 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 3 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับสูง)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 16.154 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.965 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 19.643 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 17.017 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 17.832 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 22.643 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 18.524 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 20.632 |

ตารางผนวกที่ 12 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 4 (T อยู่ที่ระดับสูง H อยู่ที่ระดับต่ำ และ THK อยู่ที่ระดับสูง)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 15.997 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.875 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 18.851 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 17.125 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 17.721 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 21.297 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 17.866 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 21.068 |

ตารางผนวกที่ 13 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 1 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับสูง)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 14.839 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.912 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 18.161 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 16.231 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 17.821 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 21.053 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 17.901 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 20.954 |

ตารางผนวกที่ 14 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 2 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับสูง)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 15.202 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 22.884 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 19.876 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 17.912 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 17.883 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 22.386 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 18.974 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 21.153 |

ตารางผนวกที่ 15 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 3 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับสูง)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 14.902 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 21.956 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 18.212 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 16.165 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 18.174 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 21.142 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 18.832 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 20.873 |

ตารางผนวกที่ 16 ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ตำแหน่งที่ 4 (T อยู่ที่ระดับต่ำ H อยู่ที่ระดับสูง และ THK อยู่ที่ระดับสูง)

| ลำดับการทดลองที่ | ปัจจัย | | | | ค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก(นิวตัน) |
|------------------|--------|-----|-----|-----|---|
| | A | B | C | D | |
| 1 | 40 | 145 | 170 | 140 | 15.101 |
| 2 | 44 | 150 | 170 | 140 | 22.904 |
| 3 | 40 | 150 | 170 | 142 | 19.756 |
| 4 | 44 | 145 | 170 | 142 | 17.842 |
| 5 | 40 | 150 | 175 | 140 | 18.132 |
| 6 | 44 | 145 | 175 | 140 | 22.251 |
| 7 | 40 | 145 | 175 | 142 | 17.765 |
| 8 | 44 | 150 | 175 | 142 | 21.886 |



ตารางผนวกที่ จ1 ข้อมูลการยืนยันผลของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

| ครั้งที่ | ชุดที่ | ค่าสังเกตของค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก ณ ตำแหน่งที่ (นิวตัน) | | | |
|----------|--------|---|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 21.957 | 22.753 | 18.804 | 21.906 |
| | 2 | 19.243 | 19.875 | 21.276 | 21.807 |
| | 3 | 20.774 | 22.454 | 21.834 | 19.534 |
| | 4 | 21.486 | 20.615 | 19.876 | 21.665 |
| | 5 | 20.736 | 20.883 | 19.834 | 22.965 |
| 2 | 1 | 20.432 | 18.131 | 22.908 | 20.667 |
| | 2 | 20.274 | 22.476 | 18.567 | 20.845 |
| | 3 | 18.912 | 20.137 | 20.945 | 22.156 |
| | 4 | 21.887 | 21.263 | 19.878 | 19.264 |
| | 5 | 19.643 | 21.621 | 19.665 | 21.488 |



ภาคผนวก ฉ
แสดงวิธีการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

วิธีการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

1. เตรียมตัวอย่างชิ้นงาน ดังภาพผนวกที่ ฉ1 ที่ทำการบรรจุถุงยางอนามัยและปิดผนึกเรียบร้อยแล้วจากเครื่อง Disc Pack Machine ดังภาพผนวกที่ ฉ2 มาทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก



ภาพผนวกที่ ฉ1 ตัวอย่างชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ของถุงยางอนามัย



ภาพผนวกที่ ฉ2 เครื่อง Disc Pack Machine

2. นำตัวอย่างชิ้นงานมาทำการตัดขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ ดังภาพผนวกที่ ๓ แล้วนำไปทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก



ภาพผนวกที่ ๓ ตัวอย่างชิ้นงานก่อนทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

3. บันทึกข้อมูลที่ได้จากเครื่องทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก ดังภาพผนวกที่ ๔ เพื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติต่อไป



ภาพผนวกที่ ๔ ตัวอย่างชิ้นงานขณะทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของการปิดผนึก

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ นายนิภาส ลินะธรรม
 เกิดวันที่ 25 กรกฎาคม 2528
 สถานที่เกิด จังหวัดสุราษฎร์ธานี
 ประวัติการศึกษา วศ.บ. (เทคโนโลยีวิศวกรรมกรรมการทำความเย็นและปรับอากาศ)
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 ตำแหน่งปัจจุบัน —
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน —
 ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ —
 ทุนการศึกษาที่ได้รับ ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 (พ.ศ. 2552)