



การหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล โดยใช้
หลักการออกแบบการทดลอง

โดย

นางสาวน้ำคำ ตำนไทยวัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล โดยใช้
หลักการออกแบบการทดลอง

โดย

นางสาวน้ำคำ ต่านไทยวัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



OPTIMIZATION OF PEEL BACK FORCE'S FACTOR SETTING FOR
SEALING TRACK WITH DESIGN OF EXPERIMENT

BY

MISS NAMKHAM DANTHAIWATTANA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL
DEVELOPMENT

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2015

COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวน้ำคำ ด่านไทยวัฒนา

เรื่อง

การหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล โดยใช้หลักการออกแบบการ
ทดลอง

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

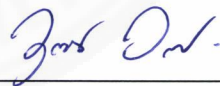
เมื่อวันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร. เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทชัย กานตานันทะ)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร. ประภัสสร วังศกาญจน์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง
ชื่อผู้เขียน	นางสาวน้ำคำ ด่านไทยวัฒนา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ กล่าวถึงการหาจุดเหมาะสมของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ของอุตสาหกรรมบรรจุรวม โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง เนื่องจากค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดยังไม่ผ่านตามข้อกำหนด และค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการยังไม่ผ่านข้อกำหนดของบริษัทกรณีศึกษา จากการวิเคราะห์ด้วยตารางวิเคราะห์เหตุและผล และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต จึงได้สมมติฐานว่ามี 7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด การทดลองจึงถูกแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน การทดลองขั้นตอนแรกทำเพื่อคัดทิ้งปัจจัยโดยใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) เพื่อให้ได้ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดัน เวลาที่ใช้ในการขีด และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก การทดลองขั้นตอนที่สองจะนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญไปทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) และทำการหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจาก 4 วิธี ซึ่งได้เลือกวิธีที่ให้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด หลังจากนั้นได้ทำการปรับปรุงกระบวนการของพนักงาน โดยกำหนดให้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยเป็นมาตรฐานการทำงาน และจัดโปรแกรมฝึกอบรมและควบคุมพนักงานให้ปฏิบัติตามมาตรฐานนั้น ซึ่งสามารถเพิ่มค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดได้เท่ากับ 1.98 และผ่านข้อกำหนดของบริษัทซึ่งต้องมากกว่า 1.67 ได้

คำสำคัญ: ค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการ การออกแบบการทดลอง ค่าแรงดึงย้อนกลับ

Thesis Title	OPTIMIZATION OF PEEL BACK FORCE'S FACTOR SETTING FOR SEALING TRACK WITH DESIGN OF EXPERIMENT
Author	Miss Namkham Danthaiwattana
Degree	Master Degree of Engineering
Department/Faculty/University	Industrial Development Faculty of Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wuthichai Wongthatsaneorn
Academic Years	2015

ABSTRACT

This research aims to find optimal setting of peel back force from seal track in integrated circuit industry by using the principles of design of experiment. Due to current process capability (C_{pk}) of peel back force was still out of specification and it had not passed requirements of the company. The analysis of parameters was performed using cause and effect matrix and failure mode and effects analysis. It was hypothesized that seven factors would influence to peel back force. Therefore, the experiments consisted of two steps. The first step of the experiment was screening to find the significant factors with fractional factorial design (2^{7-1}). The second step was to use significant factors to determine appropriate operating setting by performing (2^4) full factorials design. And optimizing of Peel back force's factor setting for sealing track from four methods then select the method that most likely target. Work procedures were adjusted according to new appropriate parameter settings of each factor to establish new working standard along with setting training program. The result found that the C_{pk} increased to 1.98 which was higher than company target at 1.67.

Keywords: Process capability (C_{pk}), Design of Experiment (DOE), Peel back force (PBF)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับคำแนะนำที่ดีจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ คือ รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร ซึ่งได้เสียสละเวลาในการให้คำแนะนำ คำสอนและให้ความช่วยเหลือในการชี้แนะแนวทางรวมถึงความรู้ต่างๆ ตลอดจนคุณอาจารย์ที่ร่วมเป็น กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.เสมอจิตร หอมรสสุคนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทชัย กานตานันทะ ซึ่งได้แนะนำข้อคิด แนวทางการ ปรับปรุงที่เป็นประโยชน์ และช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์และถูกต้องมากยิ่งขึ้น รวมไปถึง ถึงคุณชมพูนุช พิกุล เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยสนับสนุน และให้การช่วยเหลือในการตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งการอำนวยความสะดวกในเรื่องของการติดต่อประสานงานให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัททรนศึกษา ที่ให้โอกาสได้ทำการศึกษาค้นคว้า เก็บข้อมูล ทำการ ทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูล และทุกฝ่ายงานที่ให้ความร่วมมือพร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในการ ทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงขอขอบคุณ ครอบครัว รุ่นพี่ และเพื่อนๆ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ ตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินการวิจัยหวังว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการ การศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองหรือผู้ที่สนใจศึกษาในด้านนี้ และเป็นแนวทางในการศึกษา เพิ่มเติมต่อไป

นางสาวน้ำคำ ด่านไทย์วัฒนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(12)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	3
1.2 ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด	9
1.2.1 ปัญหาที่สามารถมองเห็นด้วยลักษณะทางกายภาพ	10
1.2.2 ปัญหาที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยลักษณะทางกายภาพ	11
1.3 วัตถุประสงค์	11
1.4 ขอบเขตการวิจัย	12
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	12
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินงาน	13
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	14
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
2.1 แผนภาพพาเรโต	15

2.1.1	ความเป็นมาเกี่ยวกับแผนภาพพาเรโต	16
2.1.2	ลำดับขั้นตอนในการสร้างแผนภาพพาเรโต	16
2.2	ความสามารถของกระบวนการ	18
2.2.1	ความหมายของตัวดัชนีชี้วัดความสามารถกระบวนการ	18
2.3	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัย	19
2.3.1	ขั้นตอนการทำแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัย	20
2.4	การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต	20
2.4.1	หน้าที่การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต	21
2.4.2	วัตถุประสงค์ของ FMEA	21
2.4.3	ประโยชน์ของ FMEA ในกระบวนการ	21
2.4.4	ประเภทของ FMEA	22
2.4.5	ขั้นตอนทั่วไปในการวิเคราะห์ FMEA	23
2.5	การทดสอบสมมติฐาน	25
2.5.1	ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน	26
2.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวน	27
2.7	การออกแบบการทดลอง	31
2.7.1	คำศัพท์พื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง	32
2.7.2	หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง	32
2.7.3	แนวทางในการออกแบบการทดลอง	33
2.8	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล	35
2.8.1	การทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1})	36
2.8.2	การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^k)	39
2.8.3	ปรากฏการณ์คู่แฝดแฝง	43
2.8.4	มิติของการออกแบบการทดลอง	44
2.9	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระบวนการ	45
2.9.1	จุดกึ่งกลาง	46
2.9.2	สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ	46
2.9.3	ทิศทางของความสัมพันธ์	47
2.10	วิธีการพื้นผิวตอบสนอง	48
2.11	วิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด	51

2.11.1	ขั้นตอนของวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชั้นที่สุด	53
2.12	ฟังก์ชันความพึงพอใจ	54
2.12.1	กรณีทีผลตอบทีใช้ในการพิจารณามีเพียงผลตอบเดียว	54
2.12.2	กรณีผลตอบทีใช้ในการพิจารณามีสองผลตอบ	55
2.13	การโปรแกรมเชิงเส้นตรง	57
2.13.1	รูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง	59
2.13.2	ขั้นตอนการดำเนินการของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง	60
2.14	กระบวนการประกอบไอซี	61
2.14.1	การผลิตไอซีส่วนหน้า	61
2.14.2	การผลิตไอซีส่วนหลัง	63
2.15	ความรู้เกี่ยวกับ Cover tape และ Carrier tape	66
2.15.1	Cover tape	67
2.15.2	Carrier tape	68
2.16	การทำงานของเครื่องจักรทีให้งานเคลื่อนทีเป็นวงกลมในแนวระนาบ ในส่วนของกรซีล	69
2.16.1	การบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape	69
2.16.2	การซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape	70
2.16.3	การเคลื่อนทีของ Carrier tape	71
2.17	งานวิจัยทีเกี่ยวข้อง	71
บทที 3 วิธีการวิจัย		74
3.1	ศึกษาสภาพปัญหาทีเกิดขึ้นและการดำเนินงานของบริษัทกรณีศึกษา	77
3.1.1	สภาพปัญหาทีเกิดขึ้น	77
3.1.2	สภาพการดำเนินงานของบริษัทกรณีศึกษา	79
3.1.3	ค่าใช้จ่ายในการนำงานทีเสียหายกลับมาทำการแก้ไข	81
3.2	การประเมินค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพ กระบวนการ (C_{pk}) ในสภาวะการทำงานปัจจุบัน	81
3.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยทีน่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ด้วย C&E matrix และ FMEA	83

3.4	ขั้นตอนการทำการทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1}) เพื่อทำการกรองปัจจัยให้เหลือแต่ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ	83
3.5	ขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น	84
3.6	ขั้นตอนการทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^k) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของกระบวนการ	84
3.7	ขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระบวนการ	84
3.8	ขั้นตอนการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด	85
3.9	ขั้นตอนการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล	85
3.10	ขั้นตอนการทำการเปรียบเทียบระหว่างสภาวะการทำงานเดิมกับสภาวะการทำงานใหม่	86
3.11	บทสรุป	86
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล		87
4.1	การวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด	87
4.1.1	แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล	87
4.1.2	การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต	91
4.2	การทำการทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1}) เพื่อทำการกรองปัจจัยให้เหลือแต่ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ	98
4.2.1	การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1})	99
4.2.2	ผลการทดลองจากการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1})	106
4.3	การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น จากการกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด	112
4.4	การทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของกระบวนการ	113
4.4.1	ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4)	114
4.4.2	ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4)	117
4.5	การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยการใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง	121
4.6	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย	124

4.6.1 อัตราการผลิตก่อนการปรับปรุง	125
4.6.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีลองผิดลองถูก	126
4.6.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการป็นลงด้วยทาง ที่ชั้นที่สุด	131
4.6.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น	140
4.6.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย วิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น	142
4.6.6 สรุปการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย	146
4.7 การทดลองเพื่อยืนยันผล	147
4.8 การกำหนดให้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยเป็น มาตรฐานการทำงาน	151
4.8.1 แผนการควบคุมปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการ	152
4.9 ดัชนีชี้วัดกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง	155
4.9.1 การประเมินค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าดัชนีวิเคราะห์ สมรรถภาพกระบวนการ (C_{pk}) หลังจากการปรับปรุง	155
4.9.2 จำนวน PPM และค่าใช้จ่ายในการนำงานกลับมาแก้ไขใหม่	156
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	158
5.1 สรุปผลการวิจัย	158
5.1.1 ขั้นตอนการกรองปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยช้ำอย่าง มีนัยสำคัญ	158
5.1.2 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ของกระบวนการ	160
5.1.3 ขั้นตอนการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด	160
5.1.4 ขั้นตอนการทดลองเพื่อยืนยันผล	161
5.1.5 ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ	161
5.1.6 สรุป	162
5.2 ข้อเสนอแนะ	164
รายการอ้างอิง	165

ภาคผนวก	169
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการวัดค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด	170
ภาคผนวก ข ตารางการแจกแจงแบบที (t Table)	172
ประวัติผู้เขียน	173



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สัดส่วนอาการของของเสียจากเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์	9
1.2 แผนการดำเนินงาน	13
2.1 ลำดับความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการตามค่าดัชนี (C_{pk})	18
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถกระบวนการและจำนวนของเสียในกระบวนการ	19
2.3 เกณฑ์การให้คะแนน FMEA	24
2.4 ผลการตัดสินใจการทดสอบสมมติฐาน	26
2.5 ผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง	28
2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table)	30
2.7 อัตราส่วนของผลจาก Main effect ต่อจำนวน Effect รวมทั้งหมดในการทดลอง	37
2.8 เศษส่วน 2^{k-1} ของการออกแบบ 2^3 ทั้งสองแบบ	38
2.9 โครงสร้างคู่แฝดแฝงของ 4 Factor	44
3.1 ลักษณะอาการของปัญหาจากการซีล	77
3.2 ข้อกำหนดของค่าพารามิเตอร์และค่าแรงดึงย้อนกลับของ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร	79
3.3 Parameter check sheet ของ Carrier tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร (ก่อนการปรับปรุง)	80
3.4 ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (C_{pk}) ในสภาวะการทำงานปัจจุบัน (ก่อนการปรับปรุง)	82
4.1 แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล	88
4.2 การวิเคราะห์ความถี่ของโอกาสที่จะเกิดขึ้นของปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับ ไม่ผ่านข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม	93
4.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการตรวจสอบของปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับ ไม่ผ่านข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม	94
4.4 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต	95
4.5 ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลและระดับของปัจจัยที่ ใช้ในการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1})	99

4.6 ลำดับของการทดลองและผลของค่าแรงดึงแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจากการ ออกแบบทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1})	101
4.7 ผลจากการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ (2^{7-1})	111
4.8 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (2^4)	114
4.9 ลำดับของการทดลองและผลของค่าแรงดึงแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากการ ออกแบบทดลองแบบเต็มรูป (2^4)	116
4.10 เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของกริด (ก่อนการปรับปรุง)	126
4.11 การปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก	128
4.12 เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของกริด (จากวิธีการลองผิดลองถูก)	131
4.13 การกำหนดการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยและสถานะที่จะเคลื่อนที่ของแต่ละ ปัจจัย	134
4.14 ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลอง	136
4.15 ผลการทดลองจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการป็นลง ด้วยทางที่ชันที่สุด	137
4.16 เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของกริด (วิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด)	139
4.17 เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของกริด (จากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น)	142
4.18 เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของกริด (จากวิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น)	145
4.19 เปรียบเทียบการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยทั้ง 4 วิธี	147
4.20 การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง (n=30)	148
4.21 ข้อกำหนดในการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับเครื่องจักรที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลม ในแนวระนาบสำหรับ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร	152
4.22 แผนการควบคุมปัจจัยและค่าพารามิเตอร์เพื่อควบคุมค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด	152
4.23 Parameter check sheet ของ Carrier tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร (หลังการปรับปรุง)	154
4.24 เปรียบเทียบความสามารถกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง	156
5.1 ระดับปัจจัยที่เหมาะสม	161
5.2 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง	162

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ตัวไอซี	2
1.2 กระบวนการผลิตตัวไอซี	3
1.3 Flow งานของกระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจนถึงคลังสินค้า	4
1.4 ปริมาณความต้องการผลิตภัณฑ์ตัวไอซี	5
1.5 ตัวอย่าง NCR	6
1.6 แผนภูมิพาเรโตของสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียในกระบวนการบรรจุภัณฑ์แยกโดย จำนวน NCR	6
1.7 เปรียบเทียบลักษณะเครื่องจักรในกระบวนการบรรจุภัณฑ์	7
1.8 แผนภูมิพาเรโตแสดงอาการของของเสีย จากเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลม ในแนวระนาบ ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ แยกโดยจำนวน PPM	8
1.9 ปัญหาที่สามารถมองเห็นด้วยลักษณะทางกายภาพ	10
1.10 ตัวอย่าง Carrier Tape ความกว้าง 16 mm มีค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านข้อกำหนด	11
2.1 หลักการพาเรโตในการวิเคราะห์ลูกค้ำและปริมาณยอดขาย	15
2.2 แผนภาพพาเรโตในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการจัดหา	17
2.3 ประเภทของ FMEA	23
2.4 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ	31
2.5 รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย	39
2.6 รูปแบบการทดลองแบบ 2^2 Factorial Design	41
2.7 รูปแบบการทดลองแบบ 2^3 Factorial Design	42
2.8 ระดับมิติของการออกแบบการทดลองที่เป็นไปได้ เมื่อกำหนด Run และ จำนวน Factor	45
2.9 สหสัมพันธ์ทางบวก	47
2.10 สหสัมพันธ์ทางลบ	48
2.11 สหสัมพันธ์เป็นศูนย์	48
2.12 พื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ	50
2.13 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง	50
2.14 การกำหนดน้ำหนักของผลตอบ กรณีมีผลตอบเดียว	55

2.15 การกำหนดน้ำหนักของผลตอบ กรณีมีผลตอบ 2 ตัว	56
2.16 ลำดับขั้นการผลิตไอซี	61
2.17 การผลิตไอซีส่วนหน้า	62
2.18 ตำแหน่งการติดกาวอีพอกซี	63
2.19 การผลิตไอซีส่วนหลัง	64
2.20 ตำแหน่งการฉีตสารคอมพาวด์ลงไปไนโด	64
2.21 ลักษณะของบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์	65
2.22 ชนิดของวัสดุในการบรรจุภัณฑ์ลักษณะ Tape & Reel	66
2.23 ลักษณะของ Cover tape	67
2.24 โครงสร้างของ Cover tape	68
2.25 ลักษณะของ Carrier tape	68
2.26 การบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape	70
2.27 การซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape	70
3.1 ลำดับขั้นตอนการทำการวิจัย	76
3.2 เปอร์เซนต์ PPM ของแต่ละอาการของปัญหาจากการซีล	78
3.3 จำนวน PPM ของค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีลที่ไม่ผ่านข้อกำหนดบริษัทกรณีศึกษา	79
3.4 ค่าใช้จ่ายในการนำงานกลับมาแก้ไขใหม่	82
3.5 กราฟการกระจายของค่าแรงดิ่งย้อนกลับของ Carrier tape และ Cover tape	74
4.1 แผนภาพพาเรโตจากแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล	91
4.2 แผนภาพพาเรโตจากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต	97
4.3 แผนการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ (2^{7-1})	100
4.4 Residual plots ของค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีล จากการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ (2^{7-1})	107
4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1})	109
4.6 กราฟของผลหลักที่ส่งผลต่อค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีล	110
4.7 กราฟของอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่อค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีล	112
4.8 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (2^4)	115
4.9 Residual plots ของค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีล จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4)	118

4.10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (2^4)	120
4.11 Matrix plot ระหว่างปัจจัยแต่ละปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ และค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด	121
4.12 Residual plots ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง	122
4.13 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง	123
4.14 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยด้วยกราฟ Surface plot	124
4.15 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากคำแนะนำของโปรแกรม Minitab version 15	127
4.16 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการปรับค่าของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีลองผิดลองถูก	130
4.17 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (ไม่วิเคราะห์อิทธิพลร่วม)	132
4.18 ค่าเฉลี่ยของการทดลองในแต่ละช่วง จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด	138
4.19 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (วิเคราะห์อิทธิพลร่วม)	143
4.20 ผลของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจากการทดลองเพื่อยืนยันผล	150
4.21 กราฟ Histogram ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจากการทดลองเพื่อยืนยันผล	151
4.22 ขั้นตอนการปฏิบัติงานและวิธีการแก้ไขหากพบปัจจัยนำเข้าไม่เป็นไปตามข้อกำหนด	153
4.23 กราฟการกระจายของค่าแรงดึงย้อนกลับของ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 mm หลังการปรับปรุง	155
4.24 ของเสียที่เกิดจากค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ได้มาตรฐานเทียบกับล้านชิ้น ก่อนและหลังควบคุมกระบวนการ	156
4.25 สรุปค่าใช้จ่ายในการนำงานกลับมาแก้ไขใหม่ ก่อนและหลังควบคุมกระบวนการ	157
5.1 ผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด	159

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
ANOVA	Analysis of Variance
AQL	Acceptable Quality Limit
C&E matrix	Cause and Effect Matrix
C_{pk}	Process Capability Index
DOE	Design and Analysis of Experiment
FIFO	First In First Out
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
IC	Integrated Circuit
LP	Linear Programming
NCR	Nonconformance Report
OQA	Outgoing Quality Assurance
PBF	Peel Back Force
PCB	Print Circuit Board
PPM	Part Per Million
QA	Quality Assurance
RFID	Radio Frequency Identification
RPN	Risk Priority
RSM	Response Surface Methodology

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เพราะเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ทำให้เกิดการแข่งขันกันมากยิ่งขึ้น ทั้งในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก อุตสาหกรรมขนาดกลาง ไปจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ทำให้ทุกๆ องค์กรต้องมีการพัฒนาองค์กรของตนเองในด้านต่างๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันและความอยู่รอดขององค์กร เช่น การพัฒนาเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ การใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย และการนำชิปส์ ชิปมา หรือเทคนิคต่างๆ เช่น การออกแบบการทดลองเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและประสิทธิผลของการผลิตซึ่งเป็นการเพิ่มคุณภาพสินค้าหรือบริการไปพร้อมๆ กับการลดต้นทุนในการผลิต เป็นต้น

อุตสาหกรรมวงจรรวมหรืออุตสาหกรรมการผลิตตัวไอซี (Integrated circuit; IC) ก็เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ประเภทหนึ่งที่มีการแข่งขันสูง และมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว การผลิตสินค้าที่มีคุณภาพและมีเทคโนโลยีที่ทันสมัยนั้น จะสามารถแข่งขันและตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ดีที่สุด ดังนั้น จึงต้องมีการพัฒนาศักยภาพการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เท่าทันกับเทคโนโลยีที่เติบโตขึ้น ซึ่งตัวไอซีเป็นชิ้นงานขนาดเล็ก ดังภาพที่ 1.1 ในกระบวนการผลิตนั้นจึงต้องใช้เทคโนโลยีและความละเอียดสูงเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพออกมา นอกจากนี้ ตัวไอซียังเป็นชิ้นส่วนสำคัญในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ หลายชนิด และทำหน้าที่ควบคุม ประมวลผล รับส่งรายงานข้อมูลจากแผงวงจรรอบๆ เครื่องรับส่ง ตามหน้าที่การใช้งานของตัวไอซีแต่ละชนิดหรือตามประเภทของการใช้งานที่มีความหลากหลายในการประยุกต์ใช้ของลูกค้า จากอดีตจนถึงปัจจุบันวิวัฒนาการของการผลิตตัวไอซีและการทดสอบนั้นได้มีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า ในหลายๆ ด้าน เช่น ข้อมูลที่รวดเร็ว ของเสียน้อย สินค้ามีความทนทานในทุกสภาพการใช้งาน ขนาดมีความบางและเล็กลงไปเรื่อยๆ ในระดับนาโนเมตร ซึ่งส่งผลโดยตรงกับบริษัทผู้ผลิตตัวไอซีเพราะต้องผลิตด้วยต้นทุนที่สามารถแข่งขันได้

ทั้งนี้ ตัวไอซีมีการผลิตขึ้นเพื่อตอบสนองความหลากหลายในการใช้งาน จำแนกได้เป็นลักษณะของบรรจุภัณฑ์ ดังนี้

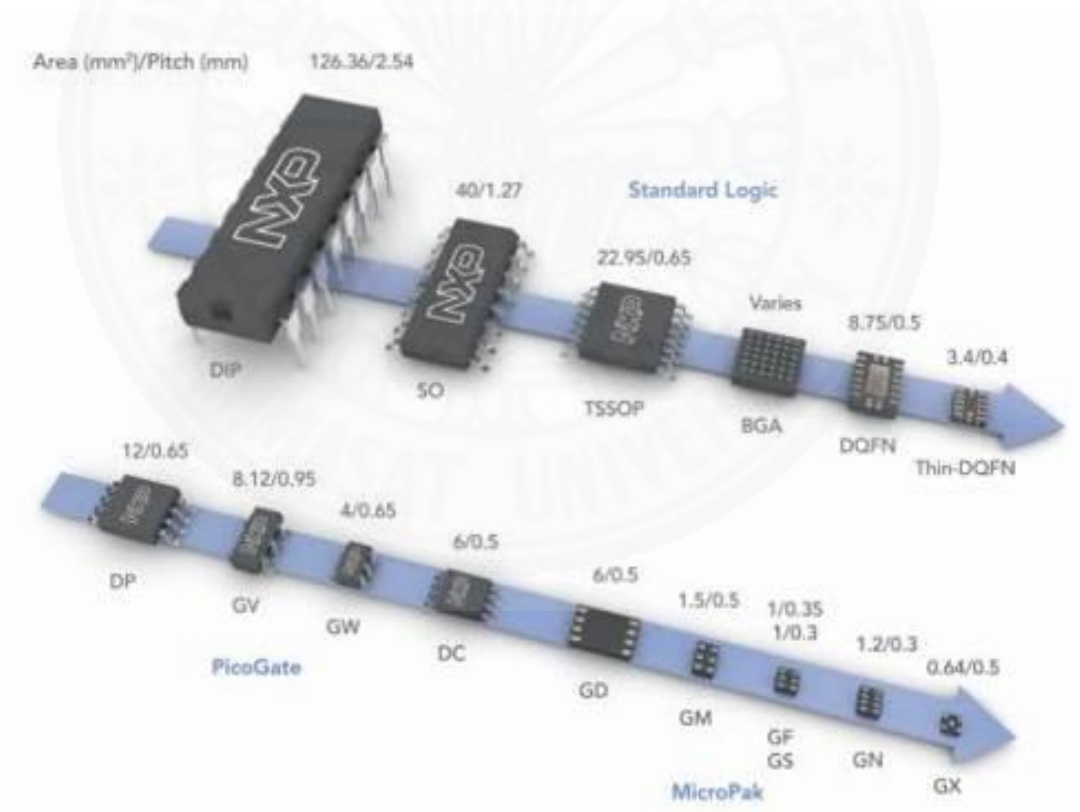
1. ตัวไอซีที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ ลักษณะทั่วไปจะมีขายื่นออกมาภายนอกหุ้มด้วยวัสดุที่เป็นยางคอมพาวนด์ (Compound rubber) ภายในที่เคลือบไว้จะมีตัวตายและถูกเชื่อมโยงวงจรรไว้ด้วย

ขดลวดทองแดง หรือทองคำบริสุทธิ์ รูปร่างมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าประมาณ 5-10 มิลลิเมตรและหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร

2. ตัวไอซีที่ประกอบในสินค้าประเภทเซ็นเซอร์ภายในรถยนต์ เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับแรงดันในรถยนต์ ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในวิทยุรถยนต์ และระบบนำร่องค้นหาเส้นทางผ่านดาวเทียม

3. ตัวไอซีที่อยู่ในสินค้าประเภทอ่านข้อมูลแบบไร้สัมผัส เช่น บัตรอัจฉริยะ (Smart card) บัตรโดยสารรถไฟอิเล็กทรอนิกส์ หนังสือเดินทางอิเล็กทรอนิกส์ บัตรเครดิต บัตรติดตามตัวสัตว์เลี้ยง บัตรประชาชนอิเล็กทรอนิกส์ โดยส่วนมากจะใช้เป็นระบบ อาร์ เอฟ ไอ ดี (Radio frequency identification; RFID)

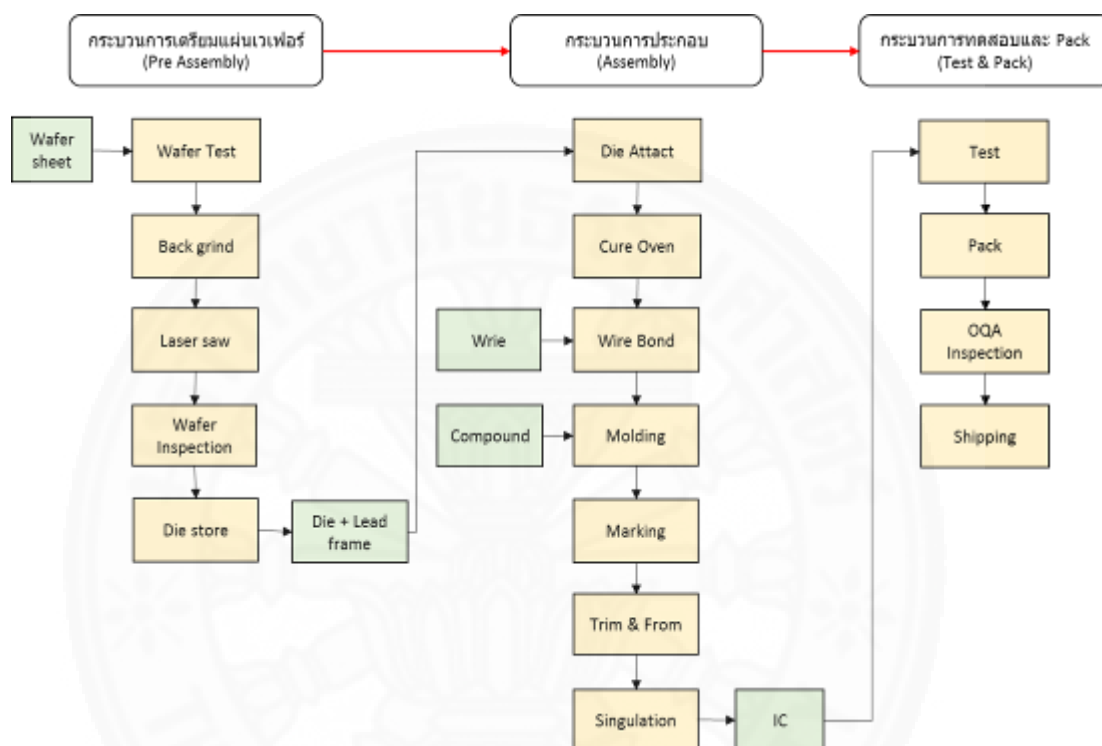
4. ตัวไอซีที่อยู่ในสินค้าประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน รวมถึงเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ให้ความบันเทิง อุปกรณ์ขยายเสียงในโทรศัพท์มือถือ



ภาพที่ 1.1 ตัวไอซี

ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีสึกษา (2558)

เทคโนโลยีการผลิตไอซีในปัจจุบัน ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการผลิตโดยการผลิตทุกขั้นตอนจะใช้เครื่องจักรกลอัตโนมัติผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงตรงตามคุณสมบัติที่ทางลูกค้าต้องการ ซึ่งกระบวนการผลิตตัวไอซี ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ดังภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.2 กระบวนการผลิตตัวไอซี
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีสึกษา (2558)

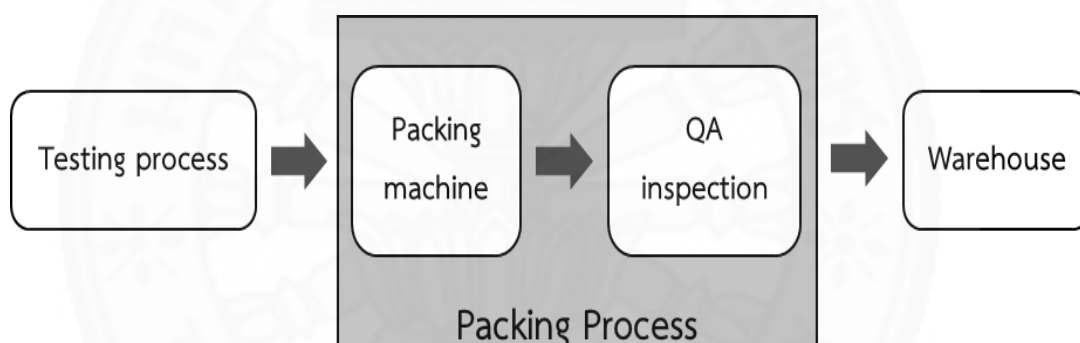
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันบริษัทผลิตตัวไอซีมีชาวต่างชาติเข้ามาร่วมทุนในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก อีกทั้งในประเทศไทยมีบริษัทผลิตตัวไอซีเป็นจำนวนมากด้วยเช่นกัน จึงทำให้มีการแข่งขันสูง การผลิตสินค้าที่มีคุณภาพและต้นทุนต่ำมีเทคโนโลยีที่ทันสมัยนั้นจะสามารถแข่งขันและตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ดีที่สุด ดังนั้น ในกระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องหาวิธีที่จะผลิตสินค้าให้มีของเสียน้อยที่สุด

จากบริษัทกรณีสึกษา ในปัจจุบันนี้กำลังประสบกับปัญหาเรื่องผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบ ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการตรวจสอบสาเหตุ

และดำเนินการแก้ไข เพราะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น และหากมีผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพถูกส่งออกไปยังลูกค้าจะทำให้ลูกค้าขาดความเชื่อถือได้ ซึ่งปัจจุบันกระบวนการบรรจุภัณฑ์เป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่ประสบปัญหาด้านคุณภาพเช่นกัน ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิต หากประสบปัญหาด้านคุณภาพจะส่งผลถึงการส่งมอบสินค้าให้ลูกค้าล่าช้าไปด้วย

สำหรับกระบวนการบรรจุภัณฑ์ (Packing process) ของบริษัทกรณีศึกษา จะมีการรับงานจากกระบวนการก่อนหน้า คือ กระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Testing process) และหลังผ่านกระบวนการบรรจุภัณฑ์แล้วจะมีการส่งงานให้กระบวนการถัดไปคือฝ่ายรับประกันคุณภาพ (Quality assurance) เพื่อทำการตรวจสอบคุณภาพ (Inspection) ของตัวไอซี การบรรจุภัณฑ์ และเอกสารกำกับให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด หากงานผ่านข้อกำหนดสินค้าจะส่งงานไปเก็บที่คลังสินค้า (Warehouse) เพื่อส่งขายให้กับลูกค้าต่อไป ดังภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 Flow งานของกระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจนถึงคลังสินค้า
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษา (2558)

ในปัจจุบันบริษัทกรณีศึกษาได้มีกำลังการผลิตเพิ่มสูงขึ้นทุกๆ ปี และมีแนวโน้มความต้องการเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงภาพที่ 1.4 หากมีการผลิตงานในจำนวนมากจะทำให้มีโอกาสเสี่ยงที่จะเกิดของเสียเพิ่มมากขึ้นจากกระบวนการบรรจุภัณฑ์ด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 1.4 ปริมาณความต้องการผลิตภัณฑ์ตัวไอซี
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีสึกษา (2555-2558)

สำหรับปัญหาด้านคุณภาพของกระบวนการบรรจุภัณฑ์จะสามารถถูกตรวจจับได้จากกระบวนการตรวจสอบของพนักงานฝ่ายคุณภาพ และจะมีการบันทึกข้อมูลต่างๆ ของของเสียในใบรายงานผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด หรือ NCR

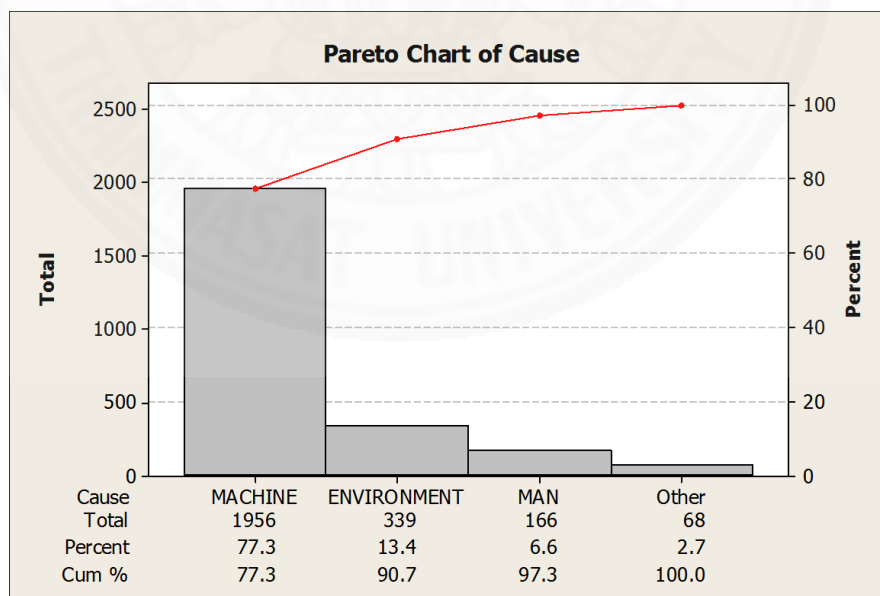
สำหรับใบรายงานผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในบริษัทกรณีสึกษา หรือ NCR (Nonconformance report) จะอยู่ในรูปแบบแอปพลิเคชันโปรแกรมบนระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบภายในองค์กร ซึ่งจะถูกรายงานเมื่อพบของเสียหรือคุณภาพของตัวไอซี การบรรจุภัณฑ์ และเอกสารกำกับไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด และจะมีการลงข้อมูลต่างๆ เช่น ปัญหาที่พบ เครื่องจักรที่ทำให้เกิดปัญหา รุ่นของตัวไอซี และข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องใน NCR ดังตัวอย่างใน ภาพที่ 1.5

หลังจากนั้นวิศวกรฝ่ายกระบวนการและวิศวกรฝ่ายซ่อมบำรุง จะทำการวิเคราะห์ถึงสาเหตุและวิธีการแก้ไขเบื้องต้นและบันทึกใน NCR ฉบับเดิม

NXP MANUFACTURING THAILAND		NCR INSPECTION REJECTION REPORT			Form : B Spec# : JZV-FZ-850-0081 DATE : 08-05-22	
IRR No. Minicompany Process SubProcess Week Date Shift Previous IRR					QA Rejected	
0905649 TSSOP PACK T/R 0918 2009-05-01 A 0						
Lot Id	12NC	Product Description	Assy CG (PKG)	BL Name	M/C #	Operator ID #
155793118	935261978118	74AHCT541PW	TSSOP20-04	MMS-LOG ASM004	10645	16268
Lot Size	17500	Sample Size	2500			
Reject Name	Reject Detail	Reject Category	Reject QTY	Reference Specification	NCRB Need	Suggested Rework Instructions
CHIP OUT PACKAGE	REEL1	MACHINE	2	SNW-FQ-612B	NO	
<u>Root Cause by line maintenance</u>						
<u>Preliminary Corrective Action</u>						

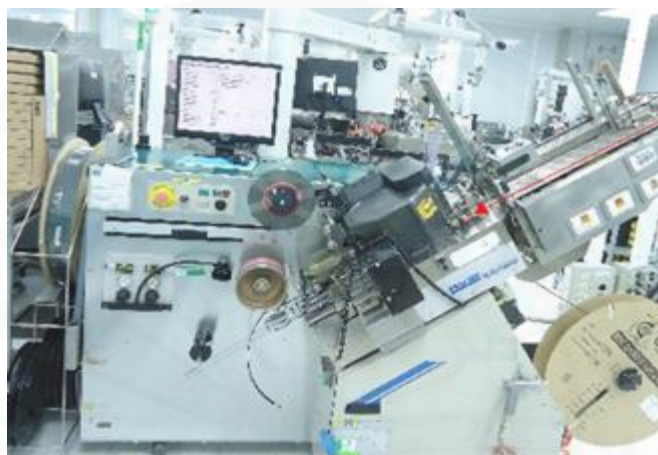
ภาพที่ 1.5 ตัวอย่าง NCR ที่มา: ข้อมูลจากบริษัททรณีศึกษา (2558)

ผู้วิจัยจึงได้มีการสำรวจข้อมูลการเกิดของเสียจากกระบวนการบรรจุภัณฑ์ในปี 2557 และปี 2558 (มกราคม - กันยายน) โดยแยกจากสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสีย ดังภาพที่ 1.6



ภาพที่ 1.6 แผนภูมิพาร์โตของสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียในกระบวนการบรรจุภัณฑ์แยกโดยจำนวน NCR ที่มา: ข้อมูลจากบริษัททรณีศึกษา เดือนมกราคม 2557 - กันยายน 2558

จากข้อมูลสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาจากระบวนการบรรจุภัณฑ์นั้น พบว่าสาเหตุที่มากที่สุดคือเครื่องจักร เนื่องจากกระบวนการนี้จะใช้เครื่องจักรในการบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีเครื่องจักรอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ เครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่ด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity machine) และเครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ (Turret machine) ดังภาพที่ 1.7 ทั้งนี้เครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่ด้วยแรงโน้มถ่วงเป็นเครื่องจักรรุ่นเก่าที่บริษัท ทรนศึกษา กำลังจะยกเลิกใช้งานภายในปี 2559



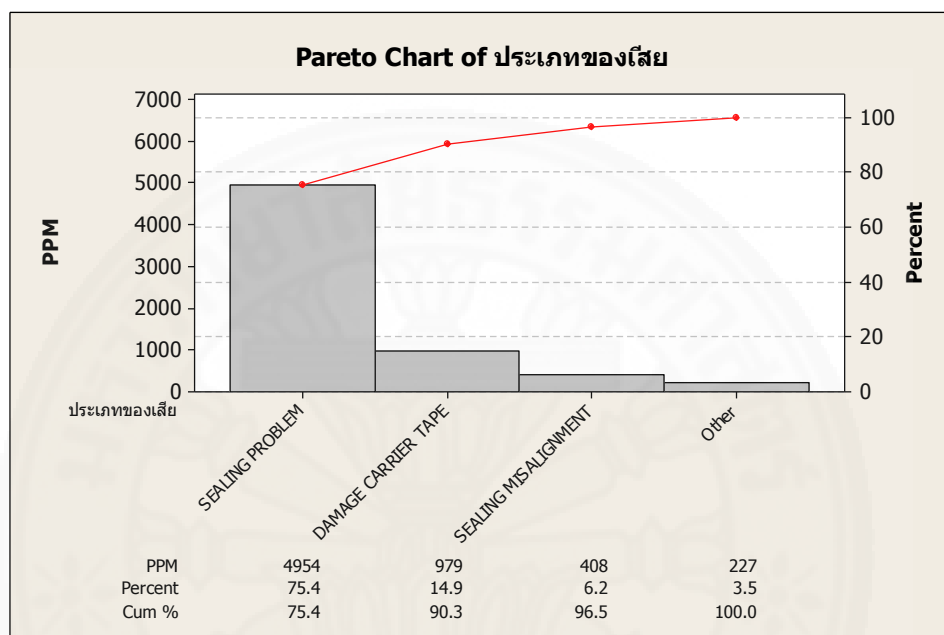
เครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่ด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity machine)



เครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ (Turret machine)

ภาพที่ 1.7 เปรียบเทียบลักษณะเครื่องจักรในกระบวนการบรรจุภัณฑ์
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัท ทรนศึกษา (2558)

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะศึกษาของเสียที่มาจากเครื่องจักรที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลม ในแนวระนาบในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ และได้พิจารณาจำนวน PPM (Part per million) ของของเสียที่เกิดจากเครื่องจักรชนิดนี้โดยแยกจากลักษณะอาการของของเสีย ซึ่งจากข้อมูลในเดือนมกราคม 2557 – กันยายน 2558 จะได้ดังภาพที่ 1.8 และตารางที่ 1.1



ภาพที่ 1.8 แผนภูมิพาเรโตแสดงอาการของของเสีย จากเครื่องจักรที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลม ในแนวระนาบ ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ แยกโดยจำนวน PPM
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษาเดือนมกราคม 2557 – กันยายน 2558

ข้อมูลจำนวน PPM จากแผนภาพพาเรโตพบว่า 75.42 เปอร์เซ็นต์ของของเสียที่เกิดจากเครื่องจักรที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ คือ ปัญหาจากการซีล (Sealing problem) ซึ่งเกิดจากกระบวนการซีล อันได้แก่ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนด รอยซีลไม่สมบูรณ์ หรือรอยซีลไม่ติด เป็นต้น

ตารางที่ 1.1

สัดส่วนอาการของของเสียจากเครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์

ประเภทของเสีย	จำนวน NCR	จำนวนจุดหรือตัวไอซีที่เสียหาย	PPM	สัดส่วนของปัญหา	เปอร์เซ็นต์สะสม	Rework cost
SEALING PROBLEM	334	1,972,500	495.36	75.42	75.42	42,606
DAMAGE CARRIER TAPE	145	390,000	97.94	14.91	90.33	8,424
SEALING MISALIGNMENT	47	162,500	40.81	6.21	96.54	3,510
DAMAGE COVER TAPE	23	80,000	20.09	3.06	99.60	1,728
SHORT LEADER	3	7,500	1.88	0.29	99.89	162
COVER TAPE DAMAGE	1	2,500	0.63	0.10	99.98	54
LEAD COPLANARITY	98	256	0.06	0.01	99.99	5.53
CHIP OUT PACKAGE	67	89	0.02	0.00	99.99	1.92
BLANK POCKET	59	63	0.02	0.00	100	1.36
SCRATCHES PACKAGE	21	21	0.01	0.00	100	0.45
CONTAMINATION LEAD	3	21	0.01	0.00	100	0.45
DOUBLE PARTS IN POCKET	9	12	0.00	0.00	100	0.26
MISORIENTATION DEVICE IN TAPE	5	12	0.00	0.00	100	0.26
CONTAMINATION PACKAGE	8	8	0.00	0.00	100	0.17
CONTAM IN POCKET TAPE	3	6	0.00	0.00	100	0.13
EXTRA DEVICE IN TAPE	5	5	0.00	0.00	100	0.11
UPSIDE DOWN IN POCKET	2	2	0.00	0.00	100	0.04
CONTAMINATION IN POCKET	1	1	0.00	0.00	100	0.02

ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณิศศึกษาเดือนมกราคม 2557 – กันยายน 2558

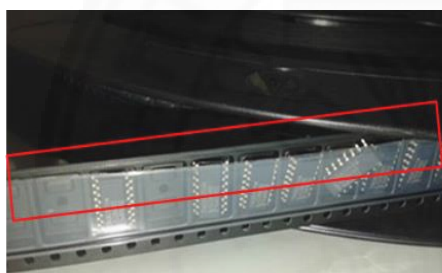
1.2 ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล (Peel back force) คือ แรงยึดเหนี่ยวของชั้นกาวระหว่าง Cover tape และ Carrier tape ของรอยซีล โดยใช้เครื่องมือในการทดสอบแรงดึง ดัง

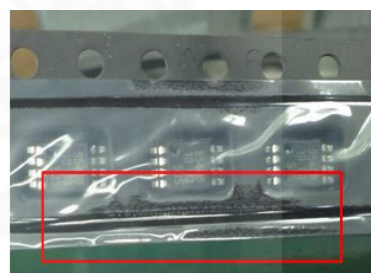
ภาคผนวก ก และค่าของแรงดึงย้อนกลับที่ได้จะออกมาในหน่วยกรัม ซึ่งหากค่าแรงดึงย้อนกลับของ รอยซีลไม่เป็นไปตามข้อกำหนด จะส่งผลให้เกิดปัญหา ดังต่อไปนี้

1.2.1 ปัญหาที่สามารถมองเห็นด้วยลักษณะทางกายภาพ

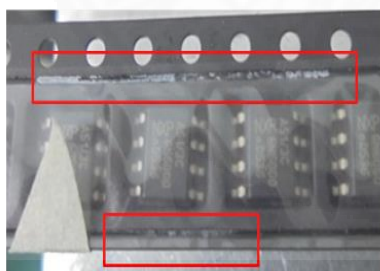
ปัญหาที่สามารถมองเห็นด้วยลักษณะทางกายภาพ เป็นลักษณะที่มองเห็นด้วยตาเปล่าได้ชัดเจนและง่ายต่อการตรวจสอบ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ในแผนกถัดไป คือ แผนก QA ซึ่ง จะเกิดจาก Cover tape ไม่ติดกับ Carrier tape บริเวณรอยซีล (Seal trace) หรือรอยซีลติดในลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ หรือรอยซีลติดแน่นจนเกินไป ดังภาพที่ 1.9 ซึ่งหากนำปัญหาที่สามารถมองเห็น ได้จากลักษณะทางกายภาพไปทำการทดสอบค่าแรงดึงย้อนกลับ ผลที่ได้จะไม่ผ่านข้อกำหนดของ บริษัททุกกรณี



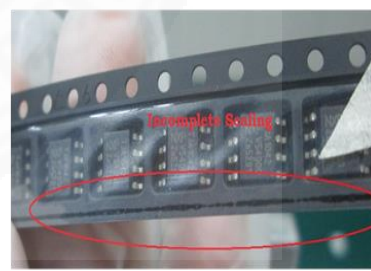
Peeling off sealing



Tightly of sealing



Peeling off the layers of glue



Incomplete sealing

ภาพที่ 1.9 ปัญหาที่สามารถมองเห็นด้วยลักษณะทางกายภาพ

ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษา (2558)

1.2.2 ปัญหาที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยลักษณะทางกายภาพ

ปัญหาที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยลักษณะทางกายภาพ จะมีลักษณะรอยขีดที่ปกติ แต่หากนำไปทดสอบค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดแล้วค่าที่ได้จะไม่ผ่านข้อกำหนด ดังภาพที่ 1.10 หรือมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเป้าหมาย ซึ่งปัญหานี้จะถูกตรวจพบหลังจากการผลิตงานไปเป็นจำนวนมากแล้ว ซึ่งจะส่งผลอยู่ 2 ลักษณะ คือ

- (1) รอยขีดเพื่อยอภายหลังจากการขีด อันเนื่องมาจากการขนส่งหรือสภาพแวดล้อม และตัวงานในบรรจุภัณฑ์อาจจะหลุดร่วงเมื่อลูกค้านำไปใช้งานได้
- (2) รอยขีดอาจจะติดแน่นเกินไปทำให้ลูกค้าไม่สามารถนำไปใช้งานได้



ภาพที่ 1.10 ตัวอย่าง Carrier Tape ความกว้าง 16 mm ที่มีค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านข้อกำหนด
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณิศศึกษา (2558)

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อปรับปรุงค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด โดยหาระดับของปัจจัยที่ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

1.3.2 เพื่อเพิ่มค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดของ Cover tape และ Carrier tape ที่มีความกว้าง 16 มิลลิเมตร ให้ผ่านข้อกำหนดของบริษัท ซึ่งได้มีข้อกำหนดของค่าดัชนีสมรรถภาพ คือ ต้องมากกว่า 1.67

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงกระบวนการเฉพาะกระบวนการบรรจุภัณฑ์จากเครื่องจักรที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบเท่านั้น

1.4.2 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะกระบวนการบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ขนาดความกว้างของ Cover tape และ Carrier tape ที่มีความกว้าง 16 มิลลิเมตรเท่านั้น เนื่องจากเป็นขนาดที่มีปริมาณการผลิตสูงที่สุด

1.4.3 งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อลดปัญหาของค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนดและไม่เหมาะสมจากกระบวนการซีล โดยมีดัชนีชี้วัด คือ ค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดึงย้อนกลับ

1.4.4 ในการวัดค่าแรงดึงย้อนกลับจะใช้เครื่องมือวัดเพียงเครื่องเดียวตลอดงานวิจัยเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด

1.4.5 เครื่องมือวัดค่าแรงดึงย้อนกลับและเครื่องจักรที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์จะมีการสอบเทียบเพื่อให้ใช้งานได้ตามมาตรฐานที่กำหนด (Calibration) ตามระยะเวลาที่กำหนด

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการศึกษาวิจัย มีดังนี้

1.5.1 ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัย

1.5.2 ศึกษารายละเอียดของกระบวนการบรรจุภัณฑ์ และการทำงานของเครื่องจักรที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ

1.5.3 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลทั่วไปที่เกี่ยวกับสภาพของปัญหาที่เกิดจากการปิดผนึก

1.5.4 วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับ

1.5.5 ออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับและหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

1.5.6 ตรวจสอบ และทำการประเมินค่าของค่าแรงดึงย้อนกลับเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า

1.5.7 สรุปผลการวิจัยและจัดทำข้อเสนอแนะ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับและระดับของปัจจัยที่ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

1.7.2 เพิ่มค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดึงย้อนกลับให้ผ่านข้อกำหนดของบริษัทให้มากกว่า 1.67 ได้

1.7.3 สามารถลดค่าใช้จ่ายและลดต้นทุนจากการนำงานกลับมาแก้ไขใหม่ (Rework cost) อันเนื่องมาจากปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านข้อกำหนดลง 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในด้านเวลาและแรงงานคนที่ต้องสูญเสียไปจากการตรวจสอบซ้ำหลังจากการนำงานกลับมาแก้ไขด้วย

1.7.4 สามารถเพิ่มอัตราการผลิต (Productivity) ของเครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบได้

1.7.5 สร้างมาตรฐานในการปฏิบัติงาน เพื่อให้ค่าแรงดึงย้อนกลับเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

1.7.6 สนับสนุนความต้องการของลูกค้า และสร้างความพึงพอใจในสินค้าที่มีคุณภาพ

1.7.7 ลูกค้าให้ความเชื่อมั่นกับผลิตภัณฑ์ของบริษัท

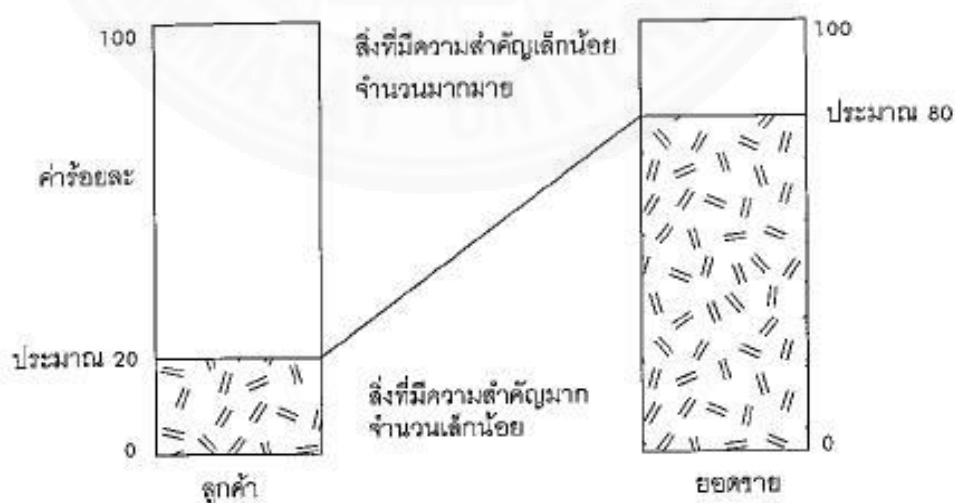
บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้รวบรวมทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษาวิจัยสำหรับการหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง และการปรับปรุ ค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง มีดังต่อไปนี้

2.1 แผนภาพพาเรโต

วันวิสา เสระแสง (2554) ได้กล่าวว่า แผนภาพพาเรโตเป็นเครื่องมือทางสถิติอีกตัวหนึ่งที่มีการประยุกต์ใช้กันมากในทางวิศวกรรม สำหรับการตรวจสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูลแบบหลายพวก ตลอดจนใช้ในการพิจารณาถึงการจำแนกประเภทของข้อมูล เพื่อประกอบการวิเคราะห์ โดยมีประเด็นสำคัญ คือ ถ้าหากมีการตรวจสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูลแล้ว จะต้องทำการรวบรวมข้อมูลในรูปค่าสะสมตามเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเสมอ โดยแผนภาพดังกล่าวนี้ จะอาศัยหลักการพาเรโต (Pareto principle) ที่ระบุไว้ถึง สิ่งที่มีความสำคัญมากจำนวนเล็กน้อย (The vital few) และสิ่งที่มีความสำคัญเพียงเล็กน้อยจำนวนมากมาย (The trivial many) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 หลักการพาเรโตในการวิเคราะห์ลูกค้าและปริมาณยอดขาย
ที่มา: กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1 (2540)

2.1.1 ความเป็นมาเกี่ยวกับแผนภาพพारेโต

(1) การศึกษาเกี่ยวกับ ปราภฏการณัของ “สิ่งที่มีควมสำคัญมากจำนวนเล็กน้อย” และ “สิ่งที่มีควมสำคัญเพียงเล็กน้อยจำนวนมากมาย” ซึ่งได้รับบัญญัติโดย Juran (1992) ผู้คิดค้นแผนภาพพारेโต

(2) Vilfre do Paret (1848-1923) นักเศรษฐศาสตร์ชาวอิตาเลียนได้ประยุกต์ปราภฏการณัดังกล่าวกับการศึกษาถึงการกระจายรายได้ (Distribution of wealth) ซึ่งพบว่ารายได้ส่วนมากขึ้นกับบุคคลจำนวนเล็กน้อย ในขณะที่บุคคลอีกมากมายมีรายได้เพียงเล็กน้อย

(3) M.O. Lorenz ได้ใช้กราฟสะสมในการแสดงถึงการกระจายรายได้ ในวารสาร American statistical association publication ภายใต้หัวข้อที่เรียกว่า “Method of measuring the concentration of wealth”

(4) Juran (1992) เป็นบุคคลแรกที่แสดงให้เห็นว่าปราภฏการณัดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างสากลกับปัญหาในทุกๆสาขา โดยศึกษาอย่างจริงจังเกี่ยวกับปัญหาทางคุณภาพ

(5) Juran (1992) เรียกกฎเกณฑ์แทนปราภฏการณันี้ว่า “หลักการพारेโต” และได้ประยุกต์ใช้เส้นโค้งสะสมของ Lorenz กับหลักการดังกล่าว เพื่อแสดงในรูปของกราฟ และเรียกว่า “แผนภาพพारेโต”

ตัวเลขหยาบๆ ที่ Juran (1992) แนะนำให้ใช้กับการตัดสินใจหลักการพारेโตคือ “80-20” ซึ่งหมายความว่า” ปัญหาที่มีความสำคัญมาก จำนวนประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ มักจะมีสาเหตุมาจากประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของสาเหตุทั้งหมด “ ในขณะที่จำนวนสาเหตุที่เหลืออีกประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ จะมีผลต่อปัญหาที่มีความสำคัญเพียงเล็กน้อยอีกประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของปัญหานั้น โดยในควมสำคัญของปัญหานี้ Juran (1992) แนะนำให้ใช้ค่าใช้จ่ยในรูปตัวเลขเป็นหน่วยวัด อย่างไรก็ตาม ในระยะหลังอาจมีการใช้ค่าอื่นๆ ในการวัดควมสำคัญของปัญหาได้ เช่น การใช้ควมถี่ของการเกิดปัญหาแต่ละอาการ เป็นต้น

2.1.2 ลำดับขั้นตอนในการสร้างแผนภาพพारेโต

(1) บ่งชี้ลักษณะสมบัติของกระบวนการที่จะใช้ในการสร้างแผนภาพ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของปัญหาที่ต้องการตัดสินใจ

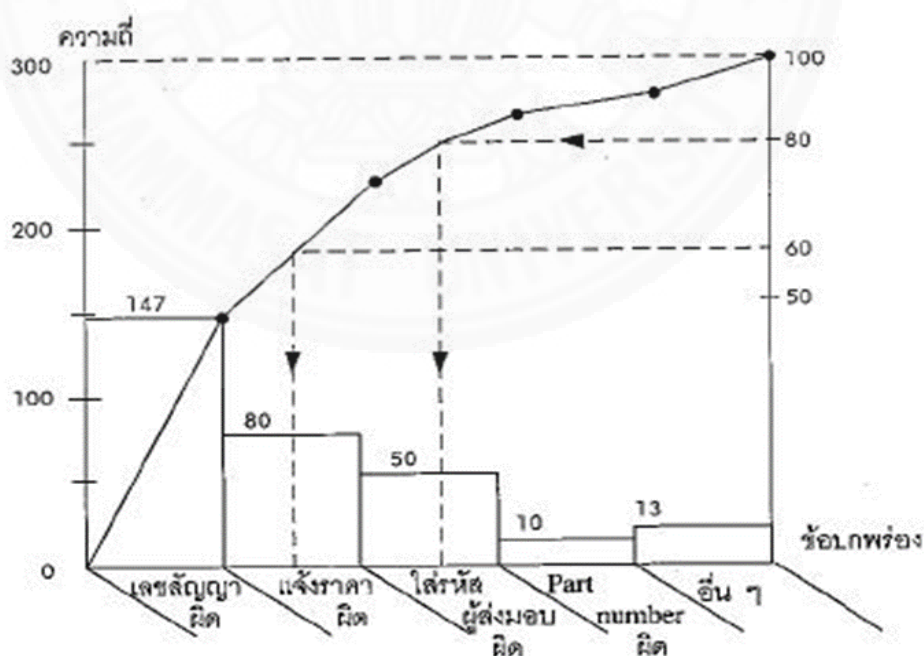
(2) กำหนดช่วงเวลาที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูล (ในกรณีวิเคราะห์ควมเสถียร แต่ถ้าต้องการพิจารณาการจําแนกข้อมูล จะต้องกำหนดแนวความคิดการจําแนกก่อนการรวบรวมข้อมูลเสมอ) และการกำหนดช่วงเวลาควรเป็นไปภายหลังจากการศึกษาธรรมชาติของปัญหาอย่างดีแล้ว เนื่องจาก

การเปรียบเทียบก่อนและหลังการแก้ปัญหาด้วยแผนภูมิพาเรโตนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องทำการเปรียบเทียบภายใต้ช่วงเวลาเดียวกัน

(3) ทำการกำหนดสเกล X และ Y สำหรับการเขียนกราฟ ซึ่งโดยปกติแล้วสเกลของ Y จะหมายถึง ผลลัพธ์ที่ระบุอาการปัญหา ตัวอย่างเช่น ลักษณะคุณภาพ (ข้อบกพร่อง ข้อร้องเรียน ปริมาณงานที่ต้องนำกลับมาทำใหม่ เป็นต้น) ค่าใช้จ่าย (ความสูญเสีย ค่าเสียหาย ต้นทุน วัสดุุดิบ) ความปลอดภัย (จำนวนอุบัติเหตุ จำนวนผู้ได้รับอุบัติเหตุ) หรือขวัญกำลังใจของพนักงาน เป็นต้น สำหรับสเกลของ X จะหมายถึง สาเหตุการจำแนกสาเหตุและผล ตัวอย่างเช่น การจำแนกโดยสาเหตุ ได้แก่ การจำแนกตามพนักงาน วัสดุดิบ เป็นต้น และการจำแนกโดยผล ได้แก่ ประเภทของตำหนิ เป็นต้น

(4) ทำการลากกราฟแท่งและกราฟสะสม ซึ่ง Karatsu and Ikeda (1987) แนะนำว่า การเขียนแผนภูมิพาเรโต ควรให้มีกราฟแท่งที่ใช้จำแนกประมาณ 6-10 แท่ง โดยต้องให้แท่งสำหรับหัวข้ออื่นๆ อยู่แท่งสุดท้าย และควรมีความสำคัญไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมด นำแผนภูมิพาเรโตไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการจัดการ

ตัวอย่างแผนภูมิพาเรโตในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการจัดหา แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แผนภูมิพาเรโตในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการจัดหา
ที่มา: กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1 (2540)

2.2 ความสามารถของกระบวนการ

ความสามารถของกระบวนการ (Process capability) คือ สมรรถภาพการแสดงความสามารถของกระบวนการตามข้อกำหนดของลูกค้า ซึ่งคำนึงความผันแปรของกระบวนการเทียบกับค่าเป้าหมาย โดยดัชนีชี้วัดความสามารถกระบวนการ 2 ตัว คือ วัดความสามารถกระบวนการระยะสั้น C_p , C_{pk} และวัดความสามารถกระบวนการระยะยาว P_p , P_{pk}

2.2.1 ความหมายของตัวดัชนีชี้วัดความสามารถกระบวนการ

(1) C_p คือ ตัววัดความสามารถกระบวนการระยะสั้น ซึ่งแสดงศักยภาพของกระบวนการโดยดูการกระจายข้อมูลจริงเทียบกับค่าเป้าหมาย

(2) P_p คือ ตัววัดความสามารถกระบวนการระยะยาว ซึ่งแสดงศักยภาพของกระบวนการโดยดูการกระจายข้อมูลจริงเทียบกับค่าเป้าหมาย

(3) C_{pk} คือ ตัววัดความสามารถกระบวนการระยะสั้น ซึ่งแสดงประสิทธิภาพของกระบวนการโดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและการกระจายข้อมูลเข้ากับค่าเป้าหมาย

(4) P_{pk} คือ ตัววัดความสามารถกระบวนการระยะยาว ซึ่งแสดงประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและการกระจายข้อมูลเข้ากับค่าเป้าหมาย โดยลำดับความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการตามค่าดัชนี C_{pk} แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

ลำดับความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการตามค่าดัชนี (C_{pk})

ค่าดัชนี	ลำดับความสามารถของกระบวนการ
$2.00 \leq C_{pk}$	ดีเหลือเชื่อ
$1.67 \leq C_{pk} < 2.00$	ดีเลิศ
$1.33 \leq C_{pk} < 1.67$	ดี
$1.00 \leq C_{pk} < 1.33$	พอใช้
$0.67 \leq C_{pk} < 1.00$	แย่มาก
$C_{pk} < 0.67$	แย่มาก

ทั้งนี้ความสามารถกระบวนการยังสามารถบอกได้ถึงจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการเทียบกับล้านชิ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถกระบวนการและจำนวนของเสียในกระบวนการ

C_{pk}	จำนวนของเสียของกราฟพระซัง 1 ด้าน	จำนวนของเสียของกราฟพระซัง 2 ด้าน
0.25	226,628	453,255
0.50	66,807	133,614
0.60	35,931	71,861
0.70	17,865	35,729
0.80	8,198	16,395
0.90	3,467	6,934
1.00	1,350	2,700
1.10	484	967
1.20	159	318
1.30	48	96
1.40	14	27
1.50	4	7
1.60	1	2
1.70	0.17	0.34
1.80	0.03	0.06
2.00	0.0009	0.0018

ที่มา: Douglas C. Montgomery, Introduction to Statistical Quality Control. (2002)

2.3 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัย

กิตติศักดิ์ พลอยพาณิชย์เจริญ (2540), วราวุฒิ แก้วอ่อน (2556) ได้กล่าวว่า แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัย (Cause and effect matrix; C&E matrix) คือเครื่องมือแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุหรือปัจจัยนำเข้า ที่ได้ผ่านการวิเคราะห์มาจากแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองที่เราศึกษา (Response) แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัยจะถูกนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง โดยทำการวิเคราะห์ระดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองจากทีมร่วมระดมความคิด ผลที่ได้จากการจัดระดับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและ

ตัวแปรตอบสนอง คือ การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองโดยแผนภาพพาเรโต (Pareto chart) ซึ่งจะช่วยให้สามารถเลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองสูงมาทำการแก้ไขก่อน

2.3.1 ขั้นตอนการทำแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัย

ขั้นตอนการทำแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัย มีดังนี้

(1) ระบุตัวแปรตอบสนองที่ต้องการทำการศึกษา โดยตัวแปรตอบสนองนี้ อาจเลือกมาจากสิ่งที่ลูกค้าต้องการหรือเป็นความพึงพอใจของลูกค้า

(2) ระบุรายละเอียดปัจจัยนำเข้าไปที่คาดว่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจ โดยปัจจัยนำเข้าไปที่เลือกมาแสดงในตารางความสัมพันธ์นี้ มาจากปัจจัยที่ได้มาจากการระดมความคิดในแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัย

(3) ให้คะแนนความสำคัญระหว่างปัจจัยนำเข้าไปและตัวแปรตอบสนองโดยคะแนนมีสเกล 0-10 ดังนี้

0 คือ ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าไปและตัวแปรตอบสนอง

1 คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าไปและตัวแปรตอบสนองน้อย

5 คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าไปและตัวแปรตอบสนองปานกลาง

10 คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าไปและตัวแปรตอบสนองมาก

(4) ผู้วิเคราะห์ให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าไปและตัวแปรตอบสนอง ทั้งนี้การให้คะแนนขึ้นอยู่กับความรู้และประสบการณ์ของผู้วิเคราะห์

(5) รวบรวมคะแนนที่ได้ในแต่ละปัจจัยนำเข้าไป แล้วนำไปจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าไปที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองโดยแผนภาพพาเรโต (Pareto chart)

2.4 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต

สมภพ ตลับแก้ว (2551) ได้กล่าวว่า การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต (Failure mode and effect analysis; FMEA) เป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะของความเสียหายและผลกระทบที่ตามมา ซึ่งในปัจจุบันหลักการการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต ได้ถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงวิธีการทำงานตั้งแต่การออกแบบ การผลิต การบริการ เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต จะมุ่งเน้นที่การชี้ให้เห็นถึงคุณลักษณะของความเสียหายหรือสาเหตุที่จะนำไปสู่ความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการออกแบบ การ

ผลิต หรือการบริการ จากนั้นจึงจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบของความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น และสุดท้ายเพื่อการนำไปสู่การหาวิธีป้องกันการเกิดความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

2.4.1 หน้าที่การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต

- (1) ระบุถึงแหล่งหรือต้นตอของความเสียหายในกระบวนการผลิต
- (2) ประเมินผลกระทบความเสียหายที่มีผลต่อลูกค้า
- (3) ระบุสาเหตุของความเสียหายจากการผลิตและประกอบ
- (4) ระบุตัวแปรที่มีความสำคัญ
- (5) กำหนดการแก้ไข
- (6) ควบคุมป้องกันและตรวจสอบความเสียหาย

2.4.2 วัตถุประสงค์ของ FMEA

- (1) ทำให้ทราบปัญหาความล้มเหลวตั้งแต่เริ่มต้น
- (2) เพื่อจะได้ออกแบบและวางแผนควบคุมได้อย่างถูกต้อง
- (3) เพื่อลดความเสี่ยงในการผลิต เช่น ผลิตไม่ได้ เกิดของเสียมาก เกิดอันตรายในระหว่างการผลิต ใช้แล้วมีปัญหาด้านความปลอดภัย ใช้งานแล้วพังง่ายเกินไป ไม่ทนทาน เป็นต้น
- (4) เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และช่วยเหลือในการทำแผนภูมิควบคุม

2.4.3 ประโยชน์ของ FMEA ในกระบวนการ

- (1) ช่วยในการวิเคราะห์กระบวนการผลิต และกระบวนการประกอบใหม่
- (2) ลดเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และต้นทุน
- (3) เพิ่มความต้องการในการพิจารณาลักษณะของข้อบกพร่อง ที่มีสาเหตุจากการผลิตหรือกระบวนการประกอบ
- (4) บ่งชี้ความไม่ถูกต้องของกระบวนการ เพื่อให้วิศวกรได้มุ่งเน้นการควบคุมเพื่อลดโอกาส (Occurrence) ของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่บกพร่อง หรือเป็นวิธีในการเพิ่มความสามารถในการตรวจจับ (Detect) ผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องจากการผลิตหรือบริการ

2.4.4 ประเภทของ FMEA

เจษฎา นันทนาท (2551) ได้กล่าวว่า ประเภทของ FMEA มีอยู่ 4 ประเภท ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและการประยุกต์ใช้ของแต่ละองค์กร ได้แก่

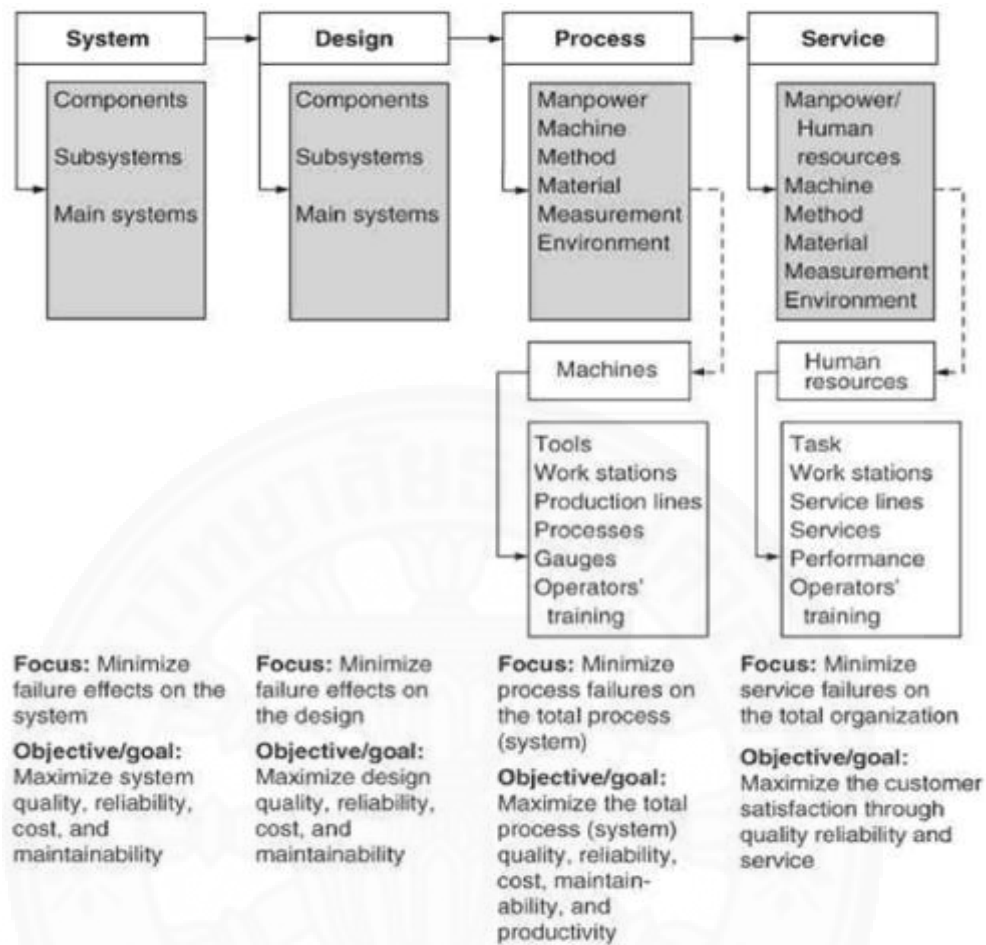
(1) FMEA ในงานระบบ (System FMEA) ซึ่งใช้ในงานประเภทการวิเคราะห์ระบบ โดยจะเน้นที่การวิเคราะห์หาข้อบกพร่อง และแนวโน้มที่เกิดกับการทำงานของระบบ อันเนื่องมาจากความไม่มีประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งรวมถึงการศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างระบบกับองค์ประกอบต่างๆ ของระบบด้วย

(2) FMEA ในการออกแบบ (Design FMEA) ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในขั้นตอนการออกแบบก่อนที่จะให้ฝ่ายผลิตดำเนินการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป โดย FMEA ประเภทนี้จะเน้นถึงข้อบกพร่องอันเนื่องมาจากความไม่มีประสิทธิภาพในการออกแบบ

(3) FMEA ในกระบวนการผลิต (Process FMEA) ใช้ในการวิเคราะห์การผลิต โดย FMEA ประเภทนี้จะเน้นถึงข้อบกพร่องอันเนื่องมาจากความไม่มีประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ซึ่ง FMEA ในกระบวนการผลิตจะถูกนำไปใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

(4) FMEA ในการบริการ (Service FMEA) ใช้ในการวิเคราะห์ถึงกระบวนการบริการ โดย FMEA ประเภทนี้จะเน้นถึงข้อบกพร่อง ความผิดพลาด หรือความคลาดเคลื่อน อันเนื่องมาจากความไม่มีประสิทธิภาพของระบบและกระบวนการ

ซึ่งประเภทของ FMEA สามารถสรุปได้ ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ประเภทของ FMEA ที่มา: D.H. Stamatis (2003)

2.4.5 ขั้นตอนทั่วไปในการวิเคราะห์ FMEA มีดังต่อไปนี้

- (1) ระบุผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบของระบบ หรือส่วนของกระบวนการ
- (2) ทำรายการ Mode ของความล้มเหลวแต่ละส่วนนั้น
- (3) กำหนดผลที่แต่ละ Mode ของความล้มเหลวจะมีผลต่อส่วนต่างๆ ในข้อ (1)
- (4) ทำรายการสาเหตุที่เป็นไปได้ของแต่ละ Mode ของความล้มเหลว
- (5) ให้ประเมิน Mode ของความล้มเหลวเป็นตัวเลข มีสเกล 1-10 เรียงลำดับ

จากมากไปหาน้อย โดยคะแนนที่นำมาประเมินนั้นอาจจะใช้ประสบการณ์หรือใช้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือร่วมกับวิจารณ์ญาณ เพื่อกำหนดค่าดังกล่าว ดังนี้

- ความร้ายแรงหรือความวิกฤตของความล้มเหลว (Severity; S) หรือ ความรุนแรง คือ การประเมินผลกระทบที่เกิดจากการขัดข้อง ซึ่งอาจทำให้สูญเสียลูกค้า ส่งผลให้เกิดความรู้สึกทางลบต่อลูกค้า

- โอกาสในการเกิดความล้มเหลว (Occurrence; O) หรือความถี่ของโอกาสที่จะเกิดขึ้น คือ การศึกษาความเชื่อมั่นตามหลักสถิติของการเกิดเหตุการณ์ที่ผิดพลาด โดยใช้ข้อมูลในอดีตแปลงเป็นสารสนเทศของแนวโน้มการเกิด

- ประสิทธิภาพในการค้นพบความเสียหายนั้นก่อนจะถึงมือลูกค้า (Detection; D) หรือความสามารถในการตรวจสอบ คือ การประเมินโอกาสที่จะสามารถสืบค้นหรือตรวจสอบข้อผิดพลาดได้ก่อนที่จะเกิดความเสียหายแก่ระบบงาน

ซึ่งหลักเกณฑ์การให้คะแนนความรุนแรง ความถี่ของโอกาสที่จะเกิดขึ้น และความสามารถในการตรวจสอบ ดังตารางที่ 2.3

(6) คำนวณผลคูณของ $S \times O \times D$ ซึ่งจะเรียกค่านี้ว่า RPN (Risk priority) ให้ทำการคำนวณทุก Mode ของความล้มเหลว ค่า RPN จะแสดงถึงความเร่งด่วนเมื่อเทียบกับ Mode อื่นๆ

(7) ให้ระบุการดำเนินการแก้ไข โดยจัดลำดับความสำคัญตามค่า RPN ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตเพื่อลดปริมาณของเสียนี้ เทคนิคหนึ่งที่จะนำมาใช้ คือ เทคนิคของ Process FMEA ซึ่งจะเข้ามาช่วยเป็นเครื่องมือที่จะนำไปชี้ถึงปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น หรืออาจจะเกิดขึ้น และการเตรียมการเพื่อรองรับเหตุการณ์ต่างๆ หรือป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นอีก

ตารางที่ 2.3

เกณฑ์การให้คะแนน FMEA

1. เกณฑ์การให้คะแนน ความรุนแรง (S – Severity)	
ระดับคะแนน	เกณฑ์
1	ลักษณะของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไม่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ ลูกค้าไม่สามารถจะตรวจสอบได้
2-3	ลักษณะของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ ลูกค้าอาจจะสังเกตเห็นถึงความเบี่ยงเบนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้
4-6	ลักษณะของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ เป็นเหตุให้ลูกค้าไม่พอใจ ซึ่งอาจจะนำไปสู่การ Degrade ผลิตภัณฑ์ได้
7-8	ลักษณะของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์เป็นเหตุให้ลูกค้าไม่พอใจอย่างมาก ซึ่งอาจจะนำไปสู่กระบวนการผลิตที่หยุดชะงักได้ อย่างไรก็ตามในระดับนี้จะไม่มีความกระทบต่อความปลอดภัย และกฎหมายข้อบังคับของรัฐบาล
9-10	ลักษณะของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ และมีผลกระทบต่อความปลอดภัยและกฎหมายข้อบังคับของรัฐบาล

ตารางที่ 2.3

เกณฑ์การให้คะแนน FMEA (ต่อ)

2. เกณฑ์การให้คะแนน ความถี่ของโอกาสที่จะเกิดขึ้น (O – Occurance)	
ระดับคะแนน	เกณฑ์
1	แทบจะไม่มีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้น หรือโอกาสที่จะเกิดขึ้นมีเพียง 1 ใน 1,000,000 เท่านั้น
2	โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้น อยู่ในระดับน้อยมาก คือ จะอยู่ในช่วง 1 ใน 20,000
3	โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้น อยู่ในระดับน้อย คือ จะอยู่ในช่วง 1 ใน 4,000
4-6	โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้น อยู่ในระดับปานกลาง คือ จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ใน 1,000 ถึง 1 ใน 80
7-8	โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นอยู่ในระดับสูง คือ จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ใน 40 ถึง 1 ใน 20
9-10	โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้น อยู่ในระดับสูงมาก คือ สูงกว่า 1 ใน 20
3. เกณฑ์การให้คะแนน ความสามารถในการตรวจสอบ (D – Detection)	
ระดับคะแนน	เกณฑ์
1	ความสามารถในการตรวจสอบอยู่ในระดับสูงมาก คือ ระบบการควบคุมที่มีอยู่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดได้อย่างชัดเจน
2-5	ความสามารถในการตรวจสอบอยู่ในระดับสูง คือ ระบบการควบคุมที่มีอยู่มีโอกาสที่จะตรวจสอบหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้
6-8	ความสามารถในการตรวจสอบอยู่ในระดับปานกลาง คือ ระบบการควบคุมที่มีอยู่ มีโอกาสที่จะสามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดได้ในบางส่วน
9	ความสามารถในการตรวจสอบมีน้อย คือ ระบบการควบคุมที่มีอยู่ ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดได้เลย
10	ความสามารถในการตรวจสอบมีน้อยมาก คือ ระบบการควบคุมที่มีอยู่ ไม่มีโอกาสที่จะสามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดได้เลย

ที่มา: D.H. Stamatis (2003)

2.5 การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) คือ วิธีการทดสอบสมมติฐานโดยการตั้งสมมติฐานและพยายามหาหลักฐานที่มีอยู่มาใช้ในการตัดสินใจ ดังนั้น หากมีหลักฐานไม่เพียงพอที่จะนำไปหักล้างสมมติฐานที่ตั้งขึ้นได้ นั่นคือ ยอมรับสมมติฐานนั้น ซึ่งเป็นการทดสอบที่ไม่มีนัยสำคัญ แต่ถ้าหลักฐานที่ได้มามีมากพอที่จะนำไปหักล้างข้อสมมติฐานนั้น จะปฏิเสธสมมติฐานและ

ถือว่าผลการทดสอบนั้นมีนัยสำคัญ ในการทดสอบสมมติฐานนั้นจะกำหนดสมมติฐานขึ้นมา 2 สมมติฐาน ดังนี้

- สมมติฐานหลัก (Null hypothesis) ใช้ชื่อย่อ H_0 เป็นสมมติฐานที่ต้องการทดสอบซึ่งแสดงถึงความเท่ากันหรือความไม่ต่างกันระหว่างค่าพารามิเตอร์ (μ, σ^2)

- สมมติฐานรอง (Alternative hypothesis) ใช้ชื่อย่อ H_1 เป็นสมมติฐานที่มีลักษณะตรงกันข้ามกับสมมติฐานหลักที่จะทดสอบ โดยจะแสดงถึงความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ในการตัดสินใจการทดสอบสมมติฐาน ผลการตัดสินใจ แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4

ผลการตัดสินใจการทดสอบสมมติฐาน

การตัดสินใจ	ข้อเท็จจริง	
	H_0 เป็นจริง	H_0 เป็นเท็จ
ปฏิเสธ H_0	ความผิดพลาดประเภทที่ 1	ตัดสินใจถูก
ยอมรับ H_0	ตัดสินใจถูก	ความผิดพลาดประเภทที่ 2

2.5.1 ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน

สำหรับขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน มีดังต่อไปนี้

(1) ตั้งสมมติฐานหลัก (H_0) และสมมติฐานรอง (H_1) ให้มีความหมายตรงข้ามกัน

เสมอ

(2) กำหนดระดับนัยสำคัญ α

(3) เลือกตัวสถิติทดสอบที่เหมาะสมแล้วหาจุดวิกฤตเพื่อกำหนดบริเวณปฏิเสธ

H_0 ให้สอดคล้องกับ H_1 และ α

(4) คำนวณค่าสถิติที่ใช้ทดสอบจากตัวอย่างขนาด n ที่สุ่มมา

(5) ตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธ H_0 โดยพิจารณาจากค่าสถิติทดสอบ ที่ตกอยู่ในบริเวณยอมรับ จะตัดสินใจยอมรับ H_0 แต่หากค่าสถิติทดสอบตกอยู่ในบริเวณปฏิเสธ จะตัดสินใจปฏิเสธ H_0 และยอมรับสมมติฐาน H_1 แทน

(6) สรุปผล

2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

วุฒิชัย วงษ์ทัศน์กร (2557) ได้กล่าวว่า สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว เป็นการทดสอบโดยพิจารณาเลือกเพียงปัจจัยเดียวจากหลายๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองมากที่สุด แล้วนำมาทำการทดสอบที่วิธีการทดสอบ (Treatment) ที่ต่างกัน แล้วพิจารณาว่าปัจจัยที่นำมาพิจารณานั้นมีผลต่อการทดลองหรือไม่ ซึ่งการทดสอบแบบทางเดียวจะมีคุณสมบัติ ดังนี้

- สนใจปัจจัยเดียว
- ทำการศึกษาที่ a ระดับที่แตกต่างกัน (Treatments)
- ศึกษาว่าระดับที่แตกต่างของปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของประชากรหรือ

ค่าเฉลี่ยของค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

- มีการทดลองซ้ำของแต่ละปัจจัย

อดุลย์ จิตรอารี (2555) ได้กล่าวว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากรที่มีจำนวนประชากรมากกว่า 2 ชุด แนวความคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ ให้หาค่าความแตกต่างของข้อมูลทั้งหมดในรูปค่าความแปรปรวน แล้วพิจารณาว่าผลเป็นอย่างไร ถ้าค่าความแปรปรวนเป็นศูนย์ แสดงว่าปัจจัยที่ได้รับการควบคุมไม่มีผลต่อค่าปัจจัย ถ้าหากว่าค่าความแปรปรวนไม่ได้เป็นศูนย์แล้ว เป็นไปได้ที่ผลมาจากปัจจัยที่ได้รับการควบคุมและสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม

หลักการสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ การหาความแปรปรวนโดยรวมแล้ว แยกออกเป็นความแปรปรวนเนื่องจากทรีตเมนต์ และความแปรปรวนเนื่องจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม ซึ่งหมายถึง รีพีทอะบิลิตี แล้วพิจารณาเทอมความแปรปรวนเนื่องจากทรีตเมนต์ว่ามีปริมาณมากหรือไม่ เมื่อเทียบจากผลของสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างเงื่อนไขของการทดลอง หรือ รีโพรดิวซิเบิล การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการสนใจศึกษาปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวซึ่งจำนวนระดับที่สนใจศึกษาของปัจจัยนี้เท่ากับ a ระดับ เพื่อดูว่าระดับที่แตกต่างกันของแต่ละปัจจัยนั้น จะมีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Y) อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่อย่างไร ซึ่งมีลักษณะข้อมูลดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5

ผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง

ลำดับที่	วิธีปฏิบัติ						
	1	2	3	4	...i....	a	
1	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	Y_{41}	... Y_{i1} ...	Y_{a1}	
2	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	Y_{42}	... Y_{i2} ...	Y_{a2}	
3	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}	Y_{43}	... Y_{i3} ...	Y_{a3}	
.	
.	
.	
j	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	Y_{4j}	... Y_{ij} ...	Y_{aj}	
.	
.	
.	
n	Y_{1n}	Y_{2n}	Y_{3n}	Y_{4n}	... Y_{in} ...	Y_{an}	
ผลรวม (T_i)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_i	T_a	T_{ij}
ผลรวม (T_i^2)	$(T_1)^2$	$(T_2)^2$	$(T_3)^2$	$(T_4)^2$	$(T_i)^2$	$(T_a)^2$	

ที่มา: อุดุลย์ จิตรอารี (2555)

เมื่อ T_i คือ ผลรวมของข้อมูลจากวิธีปฏิบัติที่ i ; $i = 1, 2, \dots, a$ $\sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}; n_i$ คือ จำนวนข้อมูลในวิธีปฏิบัติที่ i T_{ij} คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด = $\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a Y_{ij}$ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด = $\sum_{i=1}^a n_i$

คำจำกัดความต่างๆ ใน ANOVA

1. Sample Size: $n_1, n_2, n_3, \dots, n_k$ 2. Sample Means: $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_k$ 3. Sample Variation: $S_1^2, S_2^2, S_3^2, \dots, S_k^2$ 4. Total Sample Size: $n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_k$

5. Grand average: $\bar{x} =$ Average of all n responses

คำว่า Grand average คือ ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยอีกที ซึ่งก็คือ การให้ค่าน้ำหนักหรืออัตราส่วนของ Sample size เทียบกับ Total sample size และค่าเฉลี่ยแต่ละค่าตามสมการนี้

$$\bar{x} = \left(\frac{n_1}{n}\right)\bar{x}_1 + \left(\frac{n_2}{n}\right)\bar{x}_2 + \left(\frac{n_3}{n}\right)\bar{x}_3 + \dots + \left(\frac{n_k}{n}\right)\bar{x}_k$$

และสามารถหาค่า Between Samples Variation จากสมการ

$$SSTr = n_1(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + n_3(\bar{x}_3 - \bar{x})^2 + \dots + n_k(\bar{x}_k - \bar{x})^2$$

เนื่องจากสมการเป็นการบวกกันของพจน์กำลังสอง จึงเรียกอีกอย่างว่า “Treatment sum of squares” และเราสามารถหาค่า Within-Samples variation จากสมการ

$$SSE = \sum_{j=1}^{n_1} (x_{1j} - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=1}^{n_2} (x_{2j} - \bar{x}_2)^2 + \sum_{j=1}^{n_3} (x_{3j} - \bar{x}_3)^2 + \dots + \sum_{j=1}^{n_k} (x_{kj} - \bar{x}_k)^2$$

สุดท้ายแล้วสมการนี้จะมีค่าเท่ากับสมการต่อไปนี้

$$SSE = (n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2 + (n_3 - 1)S_3^2 + \dots + (n_k - 1)S_k^2$$

เนื่องจากในการใช้ ANOVA นั้น ค่า Variation จะเป็นค่าที่แสดงถึงขนาดของความคลาดเคลื่อนออกจากค่าเฉลี่ยของบรรดาข้อมูลใดๆ จึงเรียกว่า Error แทนคำว่า Variation และจากสมการข้างบนนั้นเป็นการหาค่าผลบวกของพจน์กำลังสองของ Variation (Error) จึงเรียกค่านี้อีกว่า Sum square of error และเมื่อนำ SSTr มารวมกันกับ SSE จึงเรียกว่า Sum square total ดังนั้น

$$SST = SSTr + SSE$$

จากคำว่า Between - Samples หรือ Within - Sample จากที่กล่าวมานั้น Sample จะหมายถึง Level หรือ Treatment นั้นเอง ถ้า Between จะหมายถึง ระหว่าง Level (Treatment)

ส่วน Within จะหมายถึง ระหว่างข้อมูลในแต่ละ Level (Treatment) และสามารถหาค่า Degree of freedom (df) ได้ดังนี้

เมื่อ SST คือ ผลรวมทั้งหมด ดังนั้น $df = n-1$ โดยที่ n คือ ผลรวมของจำนวนตัวอย่าง (ข้อมูล) ทั้งหมดจากทุกๆ Level นั้นเอง

SSTr คือ ผลรวมระหว่าง Level ดังนั้น $df = k-1$ โดยที่ k คือจำนวน Level นั้นเอง

SSE คือ ผลรวมที่เกิดจาก ทุกๆ ข้อมูลของทุก Level ดังนั้น $df = n-k$ ซึ่งจุดประสงค์ที่ต้องหาค่า Degree of freedom เนื่องจากต้องการหาค่าเฉลี่ยของแต่ละพจน์ในสมการ

$$MSTr = \frac{SSTr}{k-1}$$

$$MSE = \frac{SSE}{n-k}$$

เมื่อ MSTr: Mean square for treatments (Between – Sample)

MSE: Mean square error (Within – Sample)

อัตราส่วนระหว่าง MSTr กับ MSE คือ ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบ ANOVA (Test statistic) ซึ่งเรียกย่อๆ ว่า F เพื่อให้มองเห็นภาพรวมของ ANOVA จึงได้มีการสรุปในรูปแบบตาราง ซึ่งเรียกว่า ANOVA Table ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6

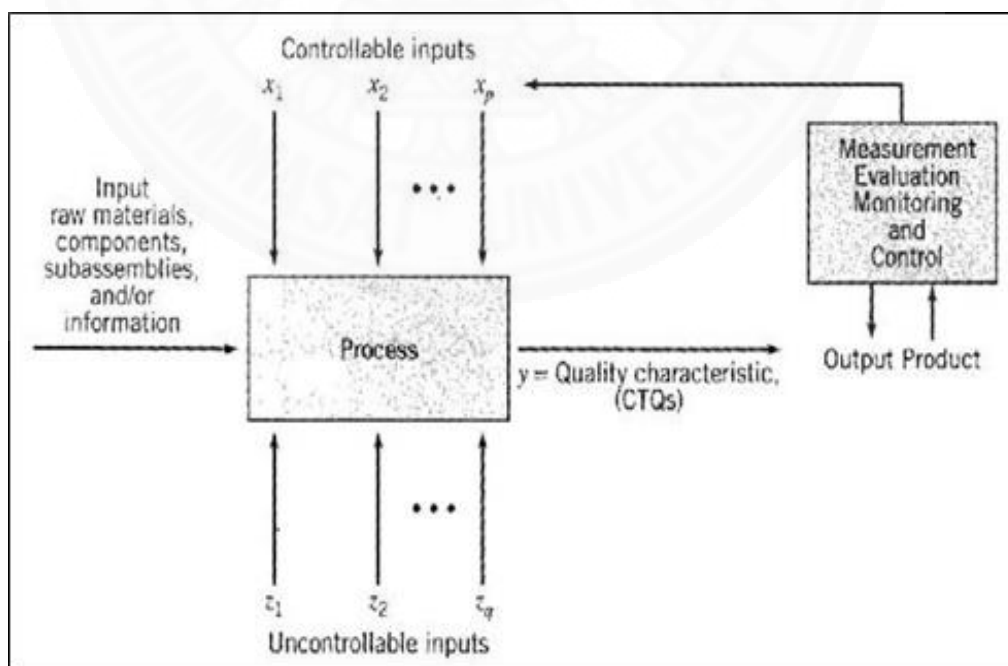
การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table)

Source of variation	Degree of freedom (df)	Sum of square (SS)	Mean square (MS)	F Test
Between sample (Treatments)	k-1	SSTr	MSTr = SSTr/k-1	MSTr/MSE
Within sample (Error)	n-k	SSE	MSE = SSE/n-k	
ผลรวม	n-1	SSTr		

ที่มา: อุดุลย์ จิตรอารี (2555)

2.7 การออกแบบการทดลอง

เยวานาฏ ศรีวิชัย (2554) และกานดา พูนลาภทวี (2539) ได้กล่าวว่า การออกแบบการทดลอง (Design and analysis of experiment; DOE) คือ ชุดของการทดสอบสิ่งที่เราต้องการศึกษา กล่าวคือ การที่ตั้งใจเปลี่ยนแปลงปัจจัยนำเข้า จะมีผลต่อผลตอบที่เราสนใจอย่างไร การออกแบบการทดลอง เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่เราต้องการ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ให้ผลที่มีความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ ข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการออกแบบการทดลองแบบ ลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า โดยทั่วไปแล้วการออกแบบการทดลองแบบนี้จะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่เราต้องการช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมาก และยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของผลกระทบร่วม (Interaction effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเอง โดยปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบ สามารถแทนที่ด้วยแบบจำลอง ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ ที่มา: Montgomery (2005)

จากภาพที่ 2.4 จะเป็นที่ได้ว่ากระบวนการ คือ การรวมเอาคน งาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนปัจจัยนำเข้าไปสู่ปัจจัยนำออกที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่า ซึ่งเราสามารถเห็นได้จากตัวแปรกระบวนการบางชนิด $1, 2, \dots, x$ เป็นตัวแปรที่เราสามารถควบคุมได้ในขณะที่ตัวแปรบางตัว $1, 2, \dots, z$ เป็นตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจเกี่ยวข้องกับ

- การหาปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ y
- การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ค่า y ได้ตามค่าที่ต้องการ
- การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ค่า y น้อยที่สุด
- การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อผลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ $1, 2, \dots, z$ มีผลกระทบน้อยที่สุด

โดยจุดประสงค์ของการออกแบบการทดลอง คือ การบ่งชี้ว่าปัจจัยใด (X) มีผลกระทบต่อผลตอบในกระบวนการ (Y) เฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัย

2.7.1 คำศัพท์พื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

คำศัพท์พื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองที่ควรทราบ มีดังต่อไปนี้

- (1) ตัวแปรตอบสนอง (Response) คือ ตัวแปรผลลัพธ์ (Output) หรือลักษณะทางคุณภาพ (Quality characteristic) ที่ต้องการควบคุมให้เป็นมาตรฐานตามที่ต้องการ
- (2) ปัจจัย (Factors) คือ ตัวแปรนำเข้า (Inputs) ที่ใช้ในกระบวนการหรือกระบวนการซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้
- (3) ระดับปัจจัย (Level of factor) คือ จำนวนระดับของปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดลองหนึ่ง
- (4) วิธีปฏิบัติ (Treatment) คือ ข้อกำหนดสำหรับทุกปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองนั้นๆ ซึ่งจำนวนวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้จะเท่ากับผลคูณของระดับของทุกปัจจัยในการทดลอง
- (5) จำนวนครั้งที่ทดลอง (Runs or experiment runs) คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อหนึ่งแผนการทดลองมีค่าเท่ากับผลคูณของวิธีปฏิบัติกับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ

2.7.2 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง

หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลองประกอบด้วยหลัก 3 ประการ เพื่อช่วยให้ผลการทดลองมีความถูกต้อง เที่ยงตรง และแม่นยำมากยิ่งขึ้น

(1) การทดลองซ้ำ (Replication) คือ การทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกันมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการทดลองเพิ่มมากขึ้น และยังทำการทดลองเพิ่มมากขึ้นเท่าใด จะได้ข้อมูลจากการทดลองเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการทดลองและเพิ่มความเที่ยงตรง แม่นยำของข้อมูลมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้การวิเคราะห์และผลการสรุปจากการทดลอง มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยการทดลองซ้ำมีประโยชน์คือช่วยให้ผู้ทดลองสามารถประมาณค่าความผิดพลาดในการทดลองได้ ซึ่งใช้สำหรับเปรียบเทียบกับผลของปัจจัยที่สนใจศึกษาได้

(2) การสุ่ม (Randomization) คือ การจัดลำดับในการทดลองให้เป็นแบบสุ่ม โดยการสุ่มสามารถช่วยลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งการสุ่มจะช่วยกระจายความผิดพลาดในการทดลองที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ไปสู่ทุกๆ การทดลองด้วยโอกาส และขนาดเท่าๆ กัน เพื่อให้ความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลเกิดขึ้นน้อยที่สุด

(3) การควบคุม (Blocking หรือ Control) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงแม่นยำในการทดลอง โดยป้องกันการรบกวนจากปัจจัยภายนอก (Noise, Nuisance, Factors) และลดความผิดพลาดในการทดลอง โดยบล็อกเดียวกัน หมายถึง การควบคุมสภาพในการทดลองให้มีสภาพใกล้เคียงกันมากที่สุด เช่น วัสดุที่ใช้ทดลองควรมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันใช้เครื่องจักรเครื่องเดียวกัน ผู้ทดลองคนเดียวกัน วิธีการทดลองเดียวกัน ในช่วงเวลาทดลองใกล้เคียงกัน โดยเปลี่ยนแปลงเฉพาะเงื่อนไขของปัจจัยที่สนใจศึกษาเท่านั้น

2.7.3 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้เกี่ยวข้องในการทดลองจะต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ว่ากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ ดังต่อไปนี้

(1) ทำความเข้าใจถึงปัญหา ในขั้นตอนนี้ผู้ทดลองจะต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และจะต้องหาข้อมูลนำเข้าไปจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนวิศวกรรม แผนประกันคุณภาพ แผนการผลิต แผนการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้า และแผนบุคคล ปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับผลวิเคราะห์คำตอบของปัญหานั้นๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรมีการทำงานเป็นทีม

(2) เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนด

ระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดให้อย่างไร และจะวัดผลตอบโต้ได้อย่างไร

ดังนั้น ในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ซึ่งความรู้นี้อาจจะได้อาจมาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎีมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดนี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ การกรองปัจจัย (Screening) ดังนั้น จึงควรที่จะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็จะมีมีความสำคัญเช่นกัน

ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัย เราควรที่จะเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึง ขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงมาได้

(3) เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบ ผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

(4) เลือกการออกแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะง่ายขึ้นอย่างมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนการทำซ้ำ) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การสุ่มอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่

ในการเลือกการออกแบบจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนมากจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้น จะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

(5) ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองผู้ทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้น การวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

(6) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ การนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้น จะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูก

ออกแบบไว้เป็นอย่างดี และทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน

ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติ คือ ทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามารถนำมาใช้ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

(7) สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติ และแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น นอกจากนี้แล้วการทำ การทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation testing) ควรจะเพิ่มขึ้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของ ข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.8 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

ปารเมศ ชูติมา (2545) ได้กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลอง นั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 ครั้ง (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล สามารถกล่าวได้ว่า ปัจจัยเหล่านี้ มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (2^k) ที่มี n replicate จะเกี่ยวกับการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ แล้ววิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residue) เพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การขัดเกลาแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง เนื่องจากพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดให้ นั้นไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง เพื่อจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟและผลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) ขึ้น โดยที่

- ผลหลัก (Main effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น

- อิทธิพลร่วมหรือผลอันตรรกิริยา (Interaction effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยอื่น

2.8.1 การทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1})

การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{k-1} Fractional factorial design) เป็นวิธีที่ผู้วิจัยใช้ในการคัดกรองปัจจัย (Screening factor) ต่างๆ ให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลมีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจริงๆ เท่านั้น ซึ่งสามารถศึกษาถึงผลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดอย่างมีนัยสำคัญ

จาตุรนต์ จันทร์ดี (2554) ได้กล่าวว่า การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ (2^{k-1}) เป็นวิธีการทดลองที่ไม่ต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไข การเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัยเนื่องจากจะมีจำนวนปัจจัยที่ใช้ดำเนินการ (Run) มากจนเกินไป จนไม่สามารถดำเนินการได้ และอาจมีข้อจำกัดบางประการ ซึ่งในเชิงทฤษฎีความแม่นยำของวิธีการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{k-1}) จะไม่เท่ากับการใช้การทดลองด้วยวิธีเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป ตามหัวข้อที่ 2.8.2 แต่ในทางปฏิบัติการทดลองด้วยวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (Full factorial) อาจจะได้ผลที่แย่กว่าการทดลองแบบเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียลก็ได้ เนื่องจากยังมีปัจจัยจำนวนมาก และยังมีจำนวนการทดลองมาก จะทำให้ยากต่อการควบคุมการทดลอง ความผิดพลาดจะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น จึงไม่มีประโยชน์ที่จะใช้การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ เมื่อมีปัจจัยหลายตัว นักสถิติประยุกต์ในยุคแรกๆ ได้ค้นพบว่าในความเป็นจริงเมื่อเราดำเนินการทดลองจะมีเพียงบาง Main effect และบาง Interaction เท่านั้นที่มีความสำคัญ ยิ่งลำดับของ Interaction สูงขึ้นยิ่งมีโอกาสจะมีนัยสำคัญน้อยลง จึงได้นำเอาหลักการนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อลดขนาดของการทดลองลง

จากตารางที่ 2.7 จะพบว่าสัดส่วนของ Main effect ต่อ Effect ทั้งหมดจะยิ่งลดลงเรื่อยๆ เมื่อการทดลองนั้นมีปัจจัยมากขึ้น เช่น หากการทดลองนั้นมี 6 ปัจจัย สัดส่วนผลที่มาจาก Main effect จะมีเพียงแค่ 9.5 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวน effect รวม ที่เหลืออีก 90.5 เปอร์เซ็นต์ เป็น Interaction effect ซึ่งส่วนใหญ่ก็จะมีนัยสำคัญเชิงสถิติต่อการทดลองนั้นด้วย และจะพบว่าสัดส่วนของปัจจัยหลักต่อปัจจัยทั้งหมดจะยิ่งลดลงเรื่อยๆ เมื่อการทดลองนั้นมีปัจจัยมากขึ้น

ตารางที่ 2.7

อัตราส่วนของผลจาก Main effect ต่อจำนวน Effect รวมทั้งหมดในการทดลอง

จำนวน Main effect	จำนวน Interaction effect	จำนวนรวม effect	อัตราร้อยละของ Main effect
1	0	1	100
2	1	3	66.7
3	4	7	42.9
4	11	15	26.7
5	26	31	16.1
6	57	63	9.5
7	120	127	5.5
8	247	255	3.1
9	502	511	1.8
10	1013	1023	1

ที่มา: http://www.geocities.ws/chalong_sri/Fract_DOE.htm

การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลถูกนำมาใช้มากในการกรอง เพื่อหาปัจจัยที่มีผล กล่าวคือ ในการทดลองหนึ่ง อาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจ จะใช้การออกแบบการทดลองเช่นนี้ เพื่อค้นหาว่าปัจจัยตัวใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นโครงการ เนื่องจากโดยมากแล้วในขณะนั้นจะมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไปที่จะตามมาในอนาคต ความสำเร็จของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลขึ้นอยู่กับแนวคิดที่สำคัญ 3 ประการ คือ

(1) มีปัจจัยจำนวนน้อยที่มีผลเมื่อมีตัวแปรหลายตัว การดำเนินการต่างๆ ของระบบหรือกระบวนการมีแนวโน้มที่จะถูกกำหนด โดยปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมขั้นต่ำเพียงบางตัวเท่านั้น

(2) คุณสมบัติการฉายการออกแบบ การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสามารถถูกฉายไปสู่การออกแบบที่ดีกว่า ในเซตย่อยของปัจจัยที่มีผล

(3) การทดลองต่อเนื่อง เป็นไปได้ที่จะรวมการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล 2 การทดลองหรือมากกว่าเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะทำให้เกิดการทดลองอย่างต่อเนื่องที่มีการออกแบบที่ใหญ่กว่า และสามารถประมาณผลของปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมที่อยู่ในความสนใจได้ดียิ่งขึ้น

การทดลองแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล ความหมายคือ เมื่อออกแบบเสร็จจะได้จำนวนดำเนินการเท่ากับการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ เมื่อจำนวนปัจจัยน้อยกว่าอยู่ 1 ตัว ($k-1$) หรือจำนวนดำเนินการจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ นั่นเอง หลักการนี้ยังอันดับปัจจัยร่วมสูงเท่าใดก็จะมีค่าน้อยเท่านั้น และจะเอาปัจจัยหลักบางตัวเข้าแทนที่ปัจจัยร่วมดังกล่าว ตัวอย่างหนึ่งมีปัจจัย 4 ตัวคือ A, B, C, D ถ้าออกแบบโดยใช้วิธีการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k) จะมีจำนวนรอบการทดลองหรือดำเนินการทั้งหมด $2^4 = 16$ การทดลอง แต่ถ้าใช้แบบ 2^{k-1} จะเหลือแผนการทดลองเพียง $2^{4-1} = 8$ การทดลองเท่านั้น

การออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1}) ที่มีมิติสูงสุด อาจจะสามารถสร้างได้จากการเขียนการออกแบบเบื้องต้น (Basic design) ซึ่งประกอบไปด้วยแฟกทอเรียลแบบบริบูรณ์ของ 2^{k-1} แล้วเติมปัจจัยตัวที่ k ลงไป โดยกำหนดให้เครื่องหมายบวกและลบของปัจจัยที่ k นี้มีค่าเหมือนกันกับเครื่องหมายของอิทธิพลร่วมขั้นสูงสุด ABC...(k-1) ดังนั้น เศษส่วนแฟกทอเรียลแบบ 2^{3-1} จะหาได้จากการเขียนแฟกทอเรียลแบบ 2^2 ให้เป็นการออกแบบเบื้องต้น และหาค่า C จากอิทธิพลร่วม AB เศษส่วนอีกชุดหนึ่งหาได้โดยให้ C เท่ากับ $-AB$ วิธีนี้แสดงไว้ ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8

เศษส่วน 2^{k-1} ของการออกแบบ 2^3 ทั้งสองแบบ

Run	Full 2^2 Factorial		2^{3-1} III = ABC			2^{3-1} III = ABC		
	(Basic Design)		A	B	C=AB	A	B	C=-AB
1	-	-	-	-	+	-	-	-
2	+	-	+	-	-	+	-	+
3	-	+	-	+	-	-	+	+
4	+	+	+	+	+	+	+	-

ที่มา: จาตุรนต์ จันทร์ดี (2554)

จากตารางที่ 2.8 สามารถสังเกตได้ว่า การออกแบบเบื้องต้นจะมีจำนวนการทดลองร่วมปัจจัย (แถว) ที่ครบถูกต้อง แต่จะขาดอยู่ 1 คอลัมน์ โดยจะใช้ $I = ABC\dots k$ ในการหาคอลัมน์ที่ k ขาดหายไป ดังนั้น เราจะใช้ $k = ABC\dots(k-1)$ ในการกำหนดเครื่องหมายบวกและลบที่จะใช้กับปัจจัยตัวที่ k

และผลของอิทธิพลร่วมตัวใดๆ สามารถมาใช้ในการสร้างคอลัมน์สำหรับปัจจัยตัวที่ k ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าใช้ผลของอิทธิพลร่วมตัวอื่นๆ นอกเหนือจาก $ABC\dots(k-1)$ แล้ว การออกแบบนี้จะไม่ก่อให้เกิดการออกแบบที่มีมิติสูงสุดที่เป็นไปได้ อีกวิธีหนึ่งในการสร้างการออกแบบเศษส่วน 2^{k-1} คือ แบ่งการทดลองทั้งหมดเป็น 2 บล็อกโดยใช้ $ABC\dots k$ เป็นตัวคอนฟาวด์ ซึ่งในแต่ละบล็อก คือ การออกแบบเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1}) ซึ่งมีมิติสูงสุด

2.8.2 การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^k)

การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^k Full factorial design) คือ วิธีการทดลองที่ผู้ทำการทดลองจะต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย และเป็นการออกแบบที่กำหนดให้มีการทดสอบทุกๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ (Combinations) ของปัจจัยทั้งหมดและเพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงหรือเชิงเส้นโค้ง เนื่องจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลายๆแฟกเตอร์พร้อมๆ กัน

รูปแบบทั่วไปของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ปัจจัยสามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 2.5 โดยกำหนดให้ y_{ijk} คือ ผลตอบสนองที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และ ปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับเรปลิเคตที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$)

		ปัจจัย B			
		1	2	...	b
ปัจจัย A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$...	$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$...	$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	a	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$...	$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$

ภาพที่ 2.5 รูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ที่มา: นิพนธ์ พิระประวิตร (2551)

ข้อมูลของการทดลอง สามารถเขียนในรูปของแบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) ได้ดังนี้

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad ; \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{array}$$

โดยที่	μ	คือ	ค่าเฉลี่ยรวมของทุกประชากร
	τ_i	คือ	ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของปัจจัย A
	β_j	คือ	ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของปัจจัย B
	$(\tau\beta)_{ij}$	คือ	ผลที่เกิดจากอิทธิพลร่วมระหว่าง τ_i และ β_j
	ε_{ij}	คือ	ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม

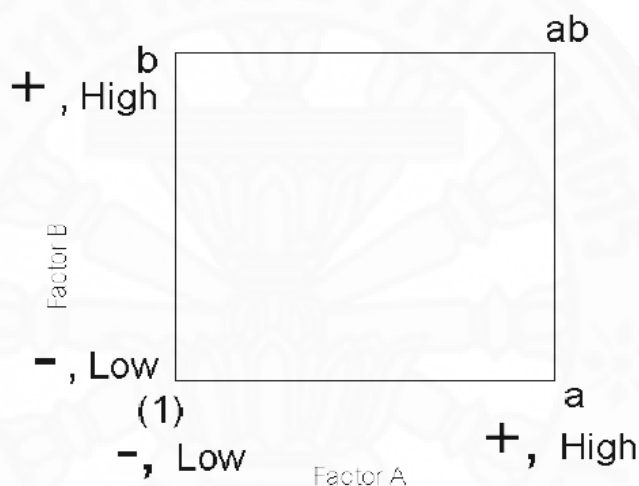
บรรหาร ลีลา ได้กล่าวว่า สิ่งสำคัญในการทำการทดลองตามทีออกแบบควรทำการทดลองแต่ละครั้งตามลำดับการสุ่ม จากกระบวนการสุ่มที่เหมาะสม มิฉะนั้นอาจส่งผลให้ผลการทดลองที่ได้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์และนำไปใช้ได้ที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากสมมติฐานของเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติไม่เป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติผู้ทำการทดลองสามารถสร้างลำดับการทดลองแบบสุ่มโดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติเช่น Minitab เป็นต้น

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น อาจขยายไปสู่กรณีทั่วไปได้ ในกรณีที่ปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไปเช่นนี้เรื่อยๆ และทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในลักษณะของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้น จะมีข้อมูลในการทดลองทั้งหมดเท่ากับ $abc\dots n$ และจะต้องมีเรพลีเคตอย่างน้อย 2 เรพลีเคต เพื่อที่จะสามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ซึ่งรูปแบบของแผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่

(1) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) ใช้สำหรับการทดลองที่มีหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยไว้ 2 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย โดยระดับเหล่านี้ อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เมื่อมีจำนวนปัจจัยที่พิจารณาจำนวน k ปัจจัย แต่ละปัจจัยสามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 ระดับ เรียกว่าระดับสูง (High level) แทนด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำ (Low level) แทนด้วยเครื่องหมาย “-” เช่น ถ้ามีปัจจัยที่สนใจ 2 ปัจจัยคือ A และ B ระดับสูงและระดับต่ำ

ของปัจจัย A จะแทนได้ด้วย A+ และ A- ตามลำดับ และระดับสูงและระดับต่ำของปัจจัย B จะแทนได้ด้วย B+ และ B- ตามลำดับ แบบการทดลองที่ง่ายที่สุดสำหรับกรณีนี้คือ $k = 2$ หรือ มี 2 ปัจจัย ซึ่งเรียกว่า 2^2 Factorial design รูปแบบการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ซึ่งจะประกอบด้วย 4 Combinations หรือ Runs คือ

- A Low, B Low หรือ A-, B- แทนด้วย (1)
- A High, B Low หรือ A+, B- แทนด้วย a
- A Low, B High หรือ A-, B+ แทนด้วย b
- A High, B High หรือ A+, B+ แทนด้วย ab



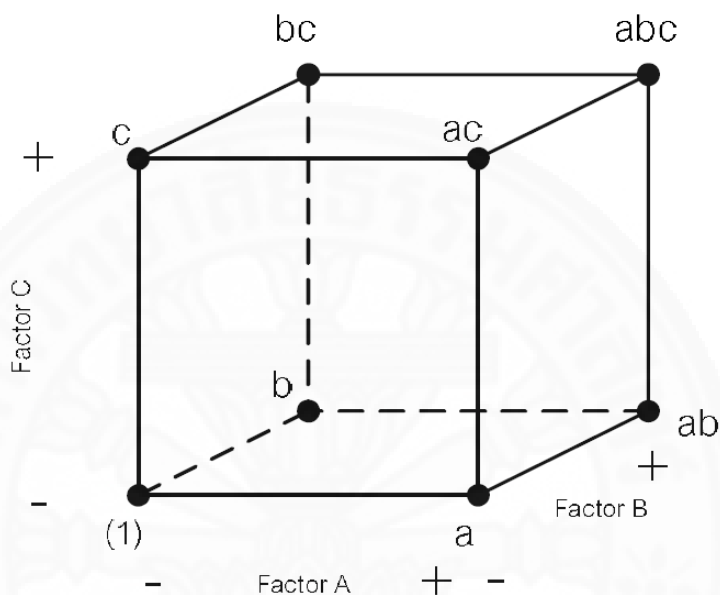
ภาพที่ 2.6 รูปแบบการทดลองแบบ 2^2 Factorial design ที่มา: บรรหาร ลิลา

<http://www.eng.buu.ac.th/~banhan/DOE/4.%BA%B7%B7%D5%E8%2011%20DOE.pdf>

(2) การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป กรณีที่มีปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัยขึ้นไป หรือ $k \geq 3$ การทดลองและการวิเคราะห์จะมีความซับซ้อนมากขึ้น โดยในกรณีของแฟกทอเรียลซึ่งพิจารณาเพียง 2 ระดับของแต่ละปัจจัย เช่น $k = 3$ รูปแบบการทดลองจะแทนได้ด้วยรูปทรงลูกบาศก์ ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ประกอบด้วยการทดลอง 8 Combinations (หรือ 8 runs) ดังนี้

- A Low, B Low, C Low หรือ A⁻, B⁻, C⁻ แทนด้วย (1)
- A High, B Low, C Low หรือ A⁺, B⁻, C⁻ แทนด้วย a
- A Low, B High, C Low หรือ A⁻, B⁺, C⁻ แทนด้วย b
- A High, B High, C Low หรือ A⁺, B⁺, C⁻ แทนด้วย ab

- A Low, B Low, C High หรือ A^-, B^-, C^+ แทนด้วย c
- A High, B Low, C High หรือ A^+, B^-, C^+ แทนด้วย ac
- A Low, B High, C High หรือ A^-, B^+, C^+ แทนด้วย bc
- A High, B High, C High หรือ A^+, B^+, C^+ แทนด้วย abc



ภาพที่ 2.7 รูปแบบการทดลองแบบ 2^3 Factorial design ที่มา: บรรหาร ลีลา

<http://www.eng.buu.ac.th/~banhan/DOE/4.%BA%B7%B7%D5%E8%2011%20DOE.pdf>

ในการทดลองแบบ 2^3 Factorial design เป็นการทดสอบอิทธิพลหลัก (Main effects) คือ A, B และ C อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (2 Ways interaction) คือ AB, AC และ BC และอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย (3 Ways interaction) คือ ABC ซึ่งเป็นผล การทดลองที่แต่ละมุมของรูปทรงลูกบาศก์ในภาพที่ 2.7

(3) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับเต็มรูป (3^k Factorial design) ใช้สำหรับการทดลองที่มีหลายปัจจัย ที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับ ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย โดย 3 ระดับจะแทนระดับ “ต่ำ” หรือ “ปานกลาง” และ “สูง” ของปัจจัยหนึ่งๆ และใน 1 เวกเตอร์ที่สมบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $3 \times 3 \times 3 \times \dots \times 3 = 3^k$ ข้อมูล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับเหมาะสมกับรูปแบบที่มีความเป็นเส้นตรง ซึ่งจะทำให้สามารถตีความข้อมูลได้อย่างถูกต้อง แต่ถ้าหากผลตอบสนองมีลักษณะเป็นเส้นโค้งการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับจะเหมาะสมกว่า

(4) ข้อดีและข้อด้อยของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป

- ข้อดีของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป คือ ไม่มีการเกิด Alias และสามารถวิเคราะห์ Main factor และ Interaction ได้ทั้งหมด

- ข้อด้อยของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป คือ ต้องทำการทดลองให้ครบทุก Run ทำให้ต้องสิ้นเปลืองทรัพยากรเป็นจำนวนมาก ใช้เวลาในการทดลองนาน และเมื่อจำนวน Run มากๆ อาจประสบปัญหาในการป้องกันความคลาดเคลื่อนจากการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยใดๆ ได้

2.8.3 ปรากฏการณ์คู่แฝดแฝง

จาคูรนต์ จันท์ดี (2554) ได้กล่าวว่า ในกรณีที่ทำการทดลองเศษส่วนแฟกทอเรียล เป็นการทดลองไม่ครบ (Not full) จะมีปรากฏการณ์หนึ่งเกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเราจะเรียกว่า อิทธิพลร่วมของคู่แฝดแฝง (Aliases) หรือตำราบางตำราเรียกว่า คอนฟาวด์ (Confound) แปลว่า ปนกันหรือติดกันจนแยกไม่ออก ซึ่งจะมีผลให้ Effect ที่ได้เป็นค่าที่ปนกัน หรือเรียกว่า โครงสร้างคู่แฝดแฝง (Aliases structure) เมื่อเลือกใช้วิธีการทดลองแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล ประโยชน์ที่ได้คือจำนวน Run ที่ลดลงได้น้อยครั้งหนึ่ง แต่ความถูกต้องอาจจะไม่เหมือนกับการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ จากตารางที่ 4 จะพบว่า $D=ABC$ นั่นคือ ถ้าพบว่า D เป็น Main effect ที่มีนัยสำคัญทางสถิติหลังจากการวิเคราะห์แล้ว แต่จะไม่สามารถแยกได้ว่าเป็น Interaction ของตัวปัจจัย ABC หรือว่า D กรณีเช่นนี้เรียกว่า D มี Aliases คือ ABC หรืออีกนัยหนึ่ง ABC คือ Aliases ของ D ได้เช่นกัน กรณีเช่นนี้เราจะเรียกว่า D และ ABC เกิด Confound กันด้วยเช่นกัน

หากทำการทดลองตามตารางที่ 4 แล้ว จะมี Alias เกิดขึ้นหลายคู่ตาม Alias structure ดังตารางที่ 2.9 คือคู่ Aliases ที่เกิดขึ้น และสามารถเขียนโครงสร้างคู่แฝดแฝง ได้ดังนี้

$$A=BCD$$

$$B=ACD$$

$$C=ABD$$

$$D=ABC$$

$$AB=CD$$

$$AC=BD$$

$$AD=BC$$

$$I = ABCD$$

ตารางที่ 2.9

โครงสร้างคู่แฝดแฝงของ 4 Factor

A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ที่มา: http://www.geocities.ws/chalong_sri/Fract_DOE.htm

2.8.4 มิติของการออกแบบการทดลอง

ฉลอง สีแก้วสีว (2552) ได้กล่าวว่า มิติของการออกแบบการทดลอง (Resolution) คือ ระดับความละเอียดในผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ หาได้จากความยาวของ Aliases ที่สั้นที่สุดจาก Defining relation หมายความว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากเพียงใด โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2 (II) จนถึง 5 (V) ตัวอย่างเช่น

$I = ACG = ABCE = BEG = ABDFG = CDEFG$ ได้ III เพราะ Aliases สั้นที่สุด คือ 3 Main effect interaction

$I = ABCEG = BCDF = ABDG$ ได้ IV เพราะ Aliases สั้นที่สุด คือ 4

มิติของการออกแบบการทดลองมากกว่าย่อมให้ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์มากกว่า นั่นเพราะจะได้เฉพาะ Interaction ระดับสูงๆ แทน Main effect ในการออกแบบ ทำให้โอกาสที่ Confound ที่พบในการวิเคราะห์มีโอกาสเป็นของ Main effect มากกว่า Interaction นั่นเอง การเลือกระดับ มิติของการออกแบบการทดลองต่ำหมายความว่าคนออกแบบใช้ค่า p ที่มาก เข้าใกล้ k มาก ทำให้ลดจำนวน Run ลงได้มาก และต้องใช้ Interaction ระดับต่ำในการแทน Main effects บางตัว ซึ่งระดับมิติของการออกแบบการทดลองที่เป็นไปได้ เมื่อกำหนด Run และจำนวน Factor จากโปรแกรม Minitab version 15 แสดง ดังภาพที่ 2.8 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

(1) III เป็นระดับที่ต่ำที่สุดที่คนออกแบบจะเลือกใช้ เหมาะสำหรับการเริ่มต้น (Screening) กรณีที่มีจำนวน Factor มากๆ ไม่ควรนำ Model ใดๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ และจะต้องมีการคัดกรองเอา Main effect ที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติบางตัวออก และควรมีการออกแบบการทดลองอีกรอบ ที่มีมิติของการออกแบบการทดลองมากกว่า III

(2) IV เป็นระดับที่ดีปานกลางที่คนออกแบบควรจะใช้ สามารถนำ Model ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ในการพยากรณ์ หรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการตามผลการวิเคราะห์ได้

(3) V เป็นระดับที่ดีที่สุดที่คนออกแบบควรจะใช้ แต่ก็ต้องใช้ทรัพยากรมากกว่าระดับอื่นๆ ทั้งนี้เพราะ จะมีจำนวน Run มาก นั่นเอง

	Factors													
Runs	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Full	III												
8		Full	IV	III	III	III								
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

ภาพที่ 2.8 ระดับมิติของการออกแบบการทดลองที่เป็นไปได้ เมื่อกำหนด Run และจำนวน Factor
ที่มา: Minitab version 15

2.9 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระบวนการ

เนื่องจากผู้วิจัยต้องการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) เพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงหรือเชิงเส้นโค้ง หลังจากได้ผลการทดลองและนำไปวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ จะทำให้สามารถสรุปความสัมพันธ์ของกระบวนการหรือความสัมพันธ์ของปัจจัยและผลตอบสนองได้ โดยใช้หลักการในการวิเคราะห์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.9.1 จุดกึ่งกลาง

ในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ เป็นการทดสอบปัจจัยที่มีเพียง 2 ระดับ ผู้วิจัยจะเพิ่มจุดกึ่งกลาง (Center point) อีก 1 ระดับ (Level) ของแต่ละปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ซึ่งวัตถุประสงค์ของการเพิ่มจุดศูนย์กลาง มีดังนี้

(1) เพื่อทำการทดสอบเชิงเส้น (Curvature) ของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลตอบสนอง

(2) เพื่อประมาณค่าของความผิดพลาด (Error term) ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความสำคัญของอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้ (คำนวณ P-value ได้)

โดยที่จุดกึ่งกลาง คือ การทดลองในลักษณะซ้ำๆ กัน (Replicate) โดยที่ค่าระดับของปัจจัยนั้นจะตั้งอยู่ที่ค่ากลางระหว่างระดับต่ำและระดับสูง

2.9.2 สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

ในสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) มาจากตัวแปรอิสระเพียง 1 ตัวแต่ในสมการถดถอยเชิงเส้นพหุที่มีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว แล้วค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะถูกรเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับตัวแปรอิสระหลายตัว (Coefficient of multiple determination) หรือ R^2 ซึ่งยังคงเป็นการวัดสัดส่วนของความแปรผันทั้งหมดของตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้โดยการใช้ตัวแปรอิสระในสมการถดถอยสามารถแสดงได้ ดังสมการ

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

ค่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 หรือ $0 \leq R^2 \leq 1$ โดยที่กำหนดว่าค่า R^2 เท่ากับ 0 เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยทุกตัวมีค่าเป็น 0 และมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อค่าของตัวแปรตามทุกค่ามีค่าเท่ากับค่าพยากรณ์หรือ $Y_i = \hat{Y}_i$ สำหรับข้อมูลทั้ง n ค่า

เนื่องจากค่า R^2 ได้มาจากการใช้ข้อมูลในการคำนวณ ดังนั้น ช่วงพิสัยของตัวแปรอิสระจะมีผลต่อค่า R^2 การที่ค่า R^2 มีค่าสูงนั้น มิได้หมายความว่าสมการถดถอยนั้นเหมาะสมกับทุกช่วงค่าของตัวแปรอิสระ หากพยากรณ์นอกช่วงค่าของตัวแปรอิสระที่เก็บข้อมูลมา (Extrapolation) แล้วสมการถดถอยอาจไม่เหมาะสมก็ได้ นั่นคือ ค่าพยากรณ์ที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนได้

การเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระเข้าไปในสมการอาจทำให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นเนื่องจากค่า SSE อาจมีค่าลดลงได้แต่ค่า SST มีค่าเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลงโดยที่ตัวแปรอิสระที่เพิ่มเข้าไปนั้นอาจไม่

มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามก็ได้ ดังนั้น จึงมีการปรับค่า R^2 โดยการหารค่า SSE และ SST ด้วยองศาเสรีของมันเรียกค่า R^2 นี้ว่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้วสำหรับตัวแปรอิสระหลายตัว (Adjusted coefficient of multiple determination) หรือ R_{adj}^2 สามารถแสดงได้โดยสมการ ดังนี้

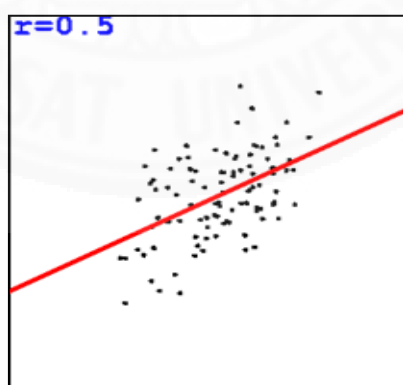
$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{\frac{SSE}{n-p}}{\frac{SST}{n-1}} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \frac{SSE}{SST}$$

ค่า R_{adj}^2 จะไม่เพิ่มขึ้นหากตัวแปรอิสระที่เพิ่มเข้าไปไม่มีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรตาม แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มตัวแปรอิสระที่ไม่มีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรตามเข้าไปในสมการเนื่องจาก SSE อาจลดลงมากกว่าค่าองศาเสรีของมัน

2.9.3 ทิศทางของความสัมพันธ์

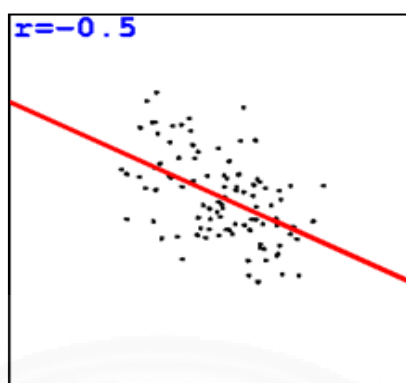
ในการหาลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นเราสามารถสร้างแผนภาพกระจัดกระจาย (Scatterplot) เพื่อดูทิศทางของความสัมพันธ์ (Direction of the relationship) ได้ โดยลักษณะความสัมพันธ์จะมีทั้งหมด 3 แบบ คือ

(1) สหสัมพันธ์ทางบวก (Positive correlations) ซึ่งหมายความว่าเมื่อตัวแปรตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดลงอีกตัวหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย ดังภาพที่ 2.9



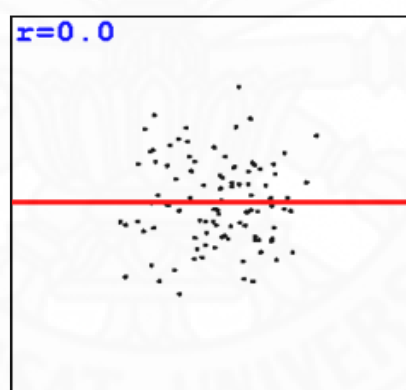
ภาพที่ 2.9 สหสัมพันธ์ทางบวก

(2) สหสัมพันธ์ทางลบ (Negative correlations) หมายถึงเมื่อตัวแปรตัวหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอีกตัวหนึ่งจะมีค่าเพิ่มหรือลดลงตรงข้ามเสมอ ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 สหสัมพันธ์ทางลบ

(3) สหสัมพันธ์เป็นศูนย์ (Zero correlations) หมายถึงตัวแปรสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 สหสัมพันธ์เป็นศูนย์

2.10 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

โสภิตา ท่วมมี (2550) ได้กล่าวว่า วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology; RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ตัว และต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลการตอบสนองเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น สมมติว่ามีวิศวกรเคมีคนหนึ่งมีความต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (x_1) และความดัน (x_2) ที่จะส่งผลให้ผลผลิตของ

กระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$$

โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดให้ $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ ดังนี้

$$\eta = f(x_1, x_2)$$

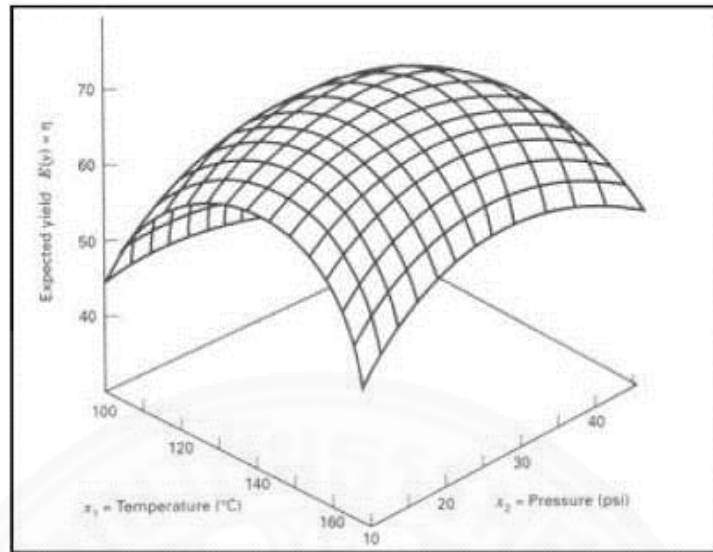
ซึ่งเรียกว่า พื้นผิวตอบสนอง (Response surface) โดยมากแล้วจะทำการแสดงพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ ดังภาพที่ 2.12 โดยที่ η จะถูกพล็อตกับ ระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้เรามองรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ส่วนใหญ่แล้วจะทำการพล็อตเป็นเส้นโครงร่าง (Contour plot) ของพื้นผิวตอบสนอง ดังภาพที่ 2.13 ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 ซึ่งเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบสนองที่เท่ากันอยู่ค่าหนึ่ง

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองส่วนมาก จะไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง และตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรก คือ ต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ คือ แบบจำลองกำลังหนึ่ง

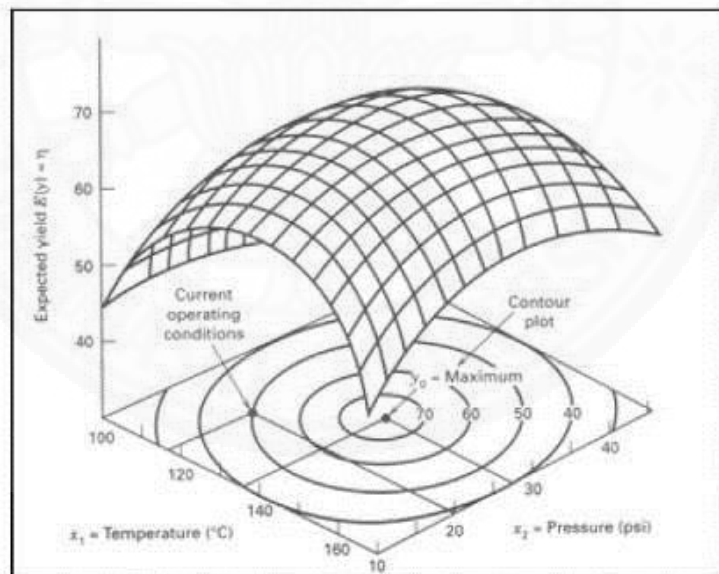
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_j x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$



ภาพที่ 2.12 พื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ
ที่มา: โสภิตา ท้วมมี (2550)



ภาพที่ 2.13 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง
ที่มา: โสภิตา ท้วมมี (2550)

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนองส่วนใหญ่ จะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งแน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามดังกล่าวเหล่านี้ จะไม่สามารถใช้ประมาณค่าความสัมพันธ์

ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่พื้นผิวที่สนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็ก แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบสนองได้เป็นอย่างดีเพียงพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้ จะสามารถประมาณค่าได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณค่าได้เป็นอย่างดี ถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface design)

2.11 วิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด

วันวิสา เสระแสง (2554) ได้กล่าวว่า วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest descent method) เป็นวิธีการที่นำเสนอโดย Box และ Wilson มีจุดประสงค์ที่จะทำการทดลองไปตามเส้นทาง เพื่อที่จะให้ผลตอบสนอง (Response) เคลื่อนสู่จุดที่เหมาะสม (Optimum) หรือมีการเพิ่มของผลตอบสนองเร็วที่สุด ในทางตรงกันข้ามกรณีสมการเป้าหมายต่ำสุดจะเรียกว่า วิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด โดยวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุดตั้งอยู่บนสมมติฐานของรูปแบบสมการกำลังหนึ่ง (First order model)

ในการวิเคราะห์หาตัวแบบความสัมพันธ์ของปัจจัย และผลตอบสนองชนิดพหุคูณ ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ควรได้รับการทดสอบสมมติฐาน เพื่อวัดความเหมาะสมของตัวแบบ โดยหลักการในการทดสอบสามารถปรับปรุงได้จากกรณีความสัมพันธ์เชิงเส้นเชิงเดียว โดยมีข้อสมมติฐานคือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการสังเกตและตัวแบบความสัมพันธ์มีการแจกแจงแบบปกติ ค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนคงที่

การทดสอบความสัมพันธ์หรือความถดถอย เพื่อพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติของความสัมพันธ์ที่ได้รับจากตัวแบบ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับลักษณะของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจริงระหว่างผลตอบสนอง (y) และปัจจัยความสัมพันธ์ (x_1, \dots, x_k) ซึ่งสมมติฐานที่เกี่ยวข้องของเป็นดังนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่งค่า}$$

หากสมมติฐานหลักไม่สามารถปฏิเสธได้หรือเป็นจริง สามารถบ่งชี้ได้ว่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรนั้นๆ สามารถตัดทิ้งออกจากตัวแบบความสัมพันธ์ที่ได้รับก่อนหน้านี้ โดยมีข้อสมมุติของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตและค่าพยากรณ์จากตัวแบบ หรือค่าความผิดพลาด ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการทดลองเหมือนเช่นเดิมหรือกล่าวคือ ข้อมูลความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนคงที่

โดยทั่วไปสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของระบบในช่วงเริ่มต้น จะอยู่ห่างจากสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงของระบบ ดังนั้น เป้าหมายของผู้ทำการทดลอง คือ การเคลื่อนที่เข้าไปใกล้บริเวณของสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงของระบบ อย่างรวดเร็วและถูกต้อง โดยใช้วิธีการทดลองที่ไม่ยุ่งยาก ประหยัด และมีประสิทธิภาพ ซึ่งในขณะที่สภาวะการทำงานในช่วงเริ่มต้นอยู่ห่างจากสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงของระบบ จะสามารถใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 1 ในการประมาณพื้นผิวที่แท้จริง (True surface) ในช่วงของ x ที่ไม่กว้างนัก

วิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด เป็นวิธีการเคลื่อนที่อย่างเป็นลำดับไปในทิศทางที่มีการลดลงมากที่สุดของผลตอบสนอง (Maximal decrease in the response)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon$$

โดยทิศทางที่มีการลงมากที่สุดของผลตอบสนอง (Direction of steepest descent) คือทิศทางที่ค่า y ลดลงมากที่สุด โดยทิศทางนี้จะขนานกับเส้นตั้งฉากของพื้นผิวตอบสนอง โดยทั่วไปทิศทางของการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด คือ เส้นทางซึ่งผ่านจุดศูนย์กลางของบริเวณที่สนใจและตั้งฉากกับพื้นผิวตอบสนอง โดยขนาดของช่วงในการเคลื่อนที่ในเส้นทางของการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุดจะเป็นสัดส่วนกับสัมประสิทธิ์ของการวิเคราะห์การถดถอย (Regression coefficient; β_i) โดยขนาดช่วงในการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดโดยผู้ทำการทดลอง ซึ่งขึ้นอยู่กับความรู้ในกระบวนการผลิตและความสะดวก

การทดลองจะดำเนินต่อไปในเส้นทางของการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด จนกระทั่งไม่มีการลดลงของผลตอบสนอง จากนั้นจะใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 1 ในการประมาณพื้นผิวตอบสนองใหม่และหาเส้นทางของการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุดใหม่ ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนกระทั่งสามารถเคลื่อนที่เข้าใกล้บริเวณของสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของระบบ ซึ่งใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของรูปแบบสมการลำดับที่ 1

2.11.1 ขั้นตอนของวิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด

(1) การกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญของวิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด โดยพื้นที่ผิวของผลตอบสนอง (Response surface) หรือระยะห่างของจุดรอบจุดกึ่งกลางจากจุดกึ่งกลางของแพททอเรียล เพื่อจะหาจุดพิกัดของแต่ละระดับปัจจัยของวิธีการแพททอเรียล ซึ่งมีจำนวนเท่ากับ 2^k โดยที่ k คือ จำนวนปัจจัยในสมการ ส่วนขนาดในการเคลื่อนที่ (Step) ไปตามเส้นทางปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุดจากจุดกึ่งกลางใหม่ โดยขนาดในการเคลื่อนที่ (Step) คือ สัดส่วนจากสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงถดถอยเชิงเส้น (β) ในสมการ ซึ่งการออกแบบการทดลองเชิงแพททอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) จะถูกนำมาใช้ในการหาสัมประสิทธิ์ดังกล่าว

(2) กำหนดจุดเริ่มต้นหรือค่าที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งใช้เป็นจุดกึ่งกลางสำหรับวิธีการแพททอเรียล

(3) ทำการหาค่าผลตอบสนอง (y) ในแต่ละพิกัดของแพททอเรียลรอบจุดกึ่งกลาง และจุดโดยรอบ จากสมการจุดมุ่งหมายที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น

(4) พื้นผิว (Hyper - Plane) จะถูกสร้างขึ้นจากผลของ 2^k แพททอเรียลรอบจุดกึ่งกลาง ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดในปัจจุบัน ผ่านวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares) โดยพื้นผิวจะถูกกำหนดโดยรูปแบบระนาบ หรือรูปแบบสมการลำดับที่หนึ่ง (First order model)

(5) กรณีสมการที่หาได้ในข้างต้นไม่มีความเหมาะสม เนื่องจากมีสิ่งรบกวนระบบให้ทำการทดลองใหม่ จากนั้นทำการสร้างสมการกำลังหนึ่งและพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย

(6) กรณีรูปแบบสมการกำลังหนึ่งที่สร้างขึ้นมามีความเหมาะสม ให้ทำการเคลื่อนจุดกึ่งกลาง (x_1, \dots, x_k) ไปยังจุดกึ่งกลางใหม่ ($x_1^T, x_2^T, \dots, x_k^T$) ตามเส้นทางของการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด โดยมีขนาดในการเคลื่อนที่ (Step length) เป็นระยะที่กำหนดขึ้นด้วยพารามิเตอร์ ซึ่งจุดกึ่งกลางใหม่ ($x_1^T, x_2^T, \dots, x_k^T$) จะหาได้จาก

$$x_i^T = \left[x_i - a \left[\frac{\hat{\beta}_i}{\sqrt{\hat{\beta}_1^2 + \dots + \hat{\beta}_k^2}} \right] \right]$$

(7) ทำการหาผลตอบสนองจากวิธีการแพททอเรียลรอบจุดกึ่งกลางไม่ซ้ำเหมือนข้อ (5)

(8) ทำการหยุดเมื่อผลตอบสนองของจุดกึ่งกลางใหม่ที่ได้มีค่าลดลงจากจุดกึ่งกลางเดิม

2.12 ฟังก์ชันความพึงพอใจ

อภินันท์ แต่ตระกูล (2553) ได้กล่าวว่า ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการพิจารณาสถานะของผลตอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรอิสระ โดยค่าความพึงพอใจในของผลตอบนั้น (Desirability; d) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 เมื่อค่า d เท่ากับศูนย์ หมายความว่า ผลตอบนั้นอยู่นอกขอบเขตของการยอมรับ แต่ถ้า d มีค่าเพิ่มขึ้นค่าความพึงพอใจก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อค่า d เท่ากับหนึ่ง หมายความว่า ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบหาได้จากสมการต่างๆ ดังนี้

2.12.1 กรณีที่ผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีเพียงผลตอบเดียว

กรณีที่ผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีเพียงผลตอบเดียว ค่าความพึงพอใจหาได้จากสมการ โดย

ถ้าต้องการผลตอบสูงสุด (Maximum) หาได้จากสมการ

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

และถ้าต้องการผลตอบต่ำสุด (Minimum) หาได้จากสมการ

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

เมื่อ d คือ ความพึงพอใจของผลตอบ

y คือ ค่าของผลตอบ

T คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ (Target)

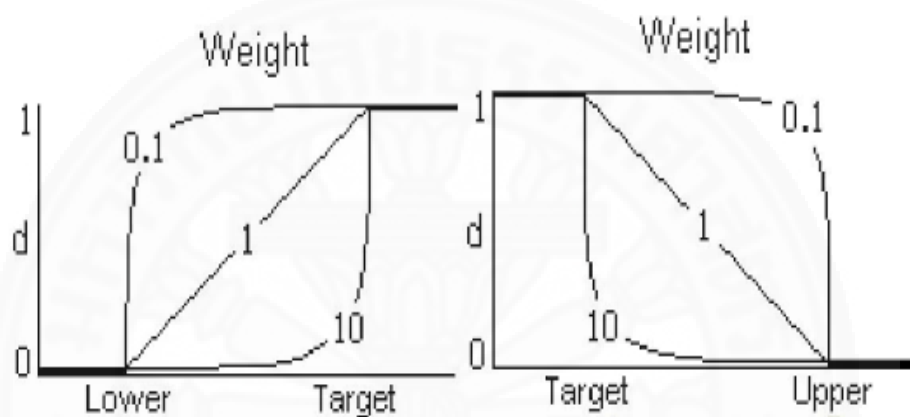
L คือ ค่าในระดับต่ำของผลตอบ

U คือ ค่าในระดับสูงของผลตอบ

r คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบ (Weight)

ซึ่งการกำหนดค่าน้ำหนักของผลตอบนี้ สามารถเลือกกำหนดค่าของน้ำหนักได้

ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การกำหนดน้ำหนักของผลตอบ กรณีมีผลตอบเดียว

ที่มา: อภินันท์ แต่ตระกูล (2553)

2.12.2 กรณีผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีสองผลตอบ

กรณีผลตอบที่ใช้ในการพิจารณามีสองผลตอบ ค่าความพึงพอใจของแต่ละผลตอบหาได้จากสมการ

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r1} & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r2} & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases}$$

เมื่อ d คือ ความพึงพอใจของผลตอบ

y คือ ค่าของผลตอบ

T คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบ (Target)

L คือ ค่าในระดับต่ำของผลตอบ

U คือ ค่าในระดับสูงของผลตอบ

r_1 คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบตัวที่ 1 (Weight 1)

r_2 คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบตัวที่ 2 (Weight 2)

ซึ่งการกำหนดค่าน้ำหนักของผลตอบทั้งสองนี้ สามารถเลือกกำหนดค่าของน้ำหนักได้ ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 การกำหนดน้ำหนักของผลตอบ กรณีมีผลตอบ 2 ตัว
ที่มา: อภินันท์ แต่ตระกูล (2553)

เมื่อค่าความพึงพอใจของผลตอบมีหลายค่า จะต้องทำการหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability; D) จากสมการดังนี้

$$D = (d_1 * d_2 * d_3 * \dots * d_m)^{1/m}$$

เมื่อ D คือ ความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability)

d คือ ความพึงพอใจของแต่ละผลตอบ (Desirability)

m คือ จำนวนของผลตอบ

และเมื่อความพึงพอใจของผลตอบมีเพียงค่าเดียว ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ จะมีค่าเท่ากับค่าความพึงพอใจของผลตอบนั้น

2.13 การโปรแกรมเชิงเส้นตรง

โปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming; LP) เป็นเทคนิคที่สำคัญและนิยมใช้กันมากในโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ โปรแกรมเชิงเส้นจะถูกนำมาช่วยในการแก้ปัญหาที่ไม่สามารถแก้ได้ด้วยตัวเอง เพราะเสียเวลานาน และยุ่งยากเกินไป ซึ่งอาจจะทำให้ผิดพลาดได้ง่าย โปรแกรมเชิงเส้นตรงจะมีประโยชน์ในการแก้ปัญหาที่มีทางเลือกมากมาย แต่การเกิดขึ้นของทางเลือกเหล่านั้นอยู่ภายใต้สภาวะที่แน่นอน การใช้เทคนิคโปรแกรมเชิงเส้นตรง จึงจำเป็นต้องเรียนรู้ถึงลักษณะปัญหาที่ใช้ และวิธีการแก้ปัญหานั้นเพื่อให้ได้ทางเลือกที่ดีที่สุด

การวางแผนและการตัดสินใจเป็นกิจกรรมสำคัญอย่างหนึ่งของผู้บริหาร ปัญหาที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นปัญหาทางด้านธุรกิจ ปัญหาทางด้านอุตสาหกรรมหรือองค์กรของรัฐก็ตามเป็นหน้าที่ของผู้รับผิดชอบที่จะต้องศึกษาลักษณะของปัญหานั้นๆ แล้วนำมาวิเคราะห์หาคำตอบเพื่อเลือกวิถีทางปฏิบัติที่ดีที่สุดในการบรรเทาทางเลือกที่ได้ เป็นคำตอบต่อปัญหาที่จะนำเสนอต่อผู้บริหารระดับสูงต่อไป หากผู้บริหารยอมรับทางเลือกนี้ คำตอบที่ได้ก็จะเป็นการวางแผนและการตัดสินใจเกี่ยวกับปัญหาที่ประสบอยู่ ในสมัยก่อนผู้บริหารมักจะวางแผนและตัดสินใจโดยอาศัยความชำนาญใช้หลักเหตุผลและผลประกอบกับประสบการณ์ในงานนั้นๆ เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจ โดยขาดข้อมูลหรือการวิเคราะห์อย่างละเอียด เป็นผลให้การวางแผนหรือการตัดสินใจนั้น อาจจะไม่ใช่วิธีทางเลือกหรือวิถีทางปฏิบัติที่ดีที่สุดก็ได้ เนื่องจากคำตอบที่ได้มานั้นขึ้นอยู่กับตัวบุคคลผู้ตัดสินใจจึงไม่มี ในระยะเวลาต่อมาปริมาณงาน ปริมาณข้อมูลและระบบต่างๆ ได้ขยายกว้างขวางและสลับซับซ้อนยิ่งขึ้น จึงเป็นการยากที่ผู้บริหารจะวางแผนหรือตัดสินใจโดยอาศัยแต่เพียงความชำนาญหรือประสบการณ์ ในปัจจุบันปัญหาที่สลับซับซ้อนเหล่านี้ สามารถแก้ได้โดยอาศัยการโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical programming) และใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ให้ผลลัพธ์อย่างรวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำกว่า วิธีการหนึ่งอันเป็นที่รู้จักกันดีและใช้กันแพร่หลายมากในบรรดาเทคนิคการโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ ก็คือ การโปรแกรมเชิงเส้น ซึ่งจะถูกนำมาช่วยในการแก้ปัญหาที่เราไม่สามารถแก้ได้ด้วยตัวเองเพราะเสียเวลานาน และอาจมองข้ามปัญหาปลีกย่อยบางอย่างไป

โปรแกรมเชิงเส้นตรงจะมีประโยชน์ในการแก้ปัญหาที่มีทางเลือกมากมาย แต่การเกิดขึ้นของทางเลือกเหล่านั้นอยู่ภายใต้สภาวะการที่แน่นอนเพียงแต่ไม่ทราบแน่ชัดว่า ทางเลือกใดจะดีที่สุด โปรแกรมเชิงเส้นตรงใช้กับปัญหาซึ่งความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรทั้งหมดเป็นแบบเชิงเส้น นั่นหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงแต่ละหน่วยของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณของตัวแปรอื่นๆ ที่มีความสัมพันธ์กันเปลี่ยนแปลงไปด้วยในอัตราส่วนที่คงที่

ปัจจุบันประเทศที่มีความเจริญทางวิชาการ นิยมใช้โปรแกรมเชิงเส้นตรงกับปัญหาทางด้านธุรกิจ อุตสาหกรรม และองค์กรของรัฐอย่างกว้างขวาง เช่น ปัญหาเกี่ยวกับการขนส่ง การคมนาคม การวางแผนเกี่ยวกับการผลิตและสต็อกสินค้า การวางแผนพัฒนาการเกษตร การทหาร การจัดการทางด้านโภชนาการ การจัดงบประมาณ การให้บริการชุมชน เป็นต้น ปัญหาเหล่านี้มีการจำกัดของทรัพยากร ผู้วิเคราะห์หรือผู้รับผิดชอบจะต้องศึกษาลักษณะของปัญหาและข้อจำกัด แล้วนำมาวิเคราะห์เพื่อแสวงหาคำตอบที่ดีที่สุดต่อปัญหา ให้บรรลุถึงเป้าหมายที่วางไว้

การโปรแกรมเชิงเส้นตรง เป็นเทคนิคที่รู้จักกันแพร่หลายในส่วนของงานของการวิจัยดำเนินงาน ทั้งนี้เพราะว่าในหลายๆ แห่่งงานได้นำวิธีการนี้ออกใช้และประสบความสำเร็จมาแล้วอย่างมากมาย นักบริหาร วิศวกรหรือนักวิทยาศาสตร์ในหลายๆ หน่วยงานได้ประยุกต์ใช้วิธีการทางการโปรแกรมเชิงเส้นตรง ในการแก้ปัญหาทางการจัดสรรปัจจัยหรือทรัพยากร ปัจจัยหรือทรัพยากรมีความหมายรวมถึงวัตถุดิบ กำลังคน เครื่องจักร เวลา สถานที่ เงินตรา หรือความรู้ความสามารถต่างๆ ปัญหาการจัดสรรปัจจัยและทรัพยากรเกิดขึ้นเมื่อเราต้องการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดทั้งขนาด ปริมาณ และขอบเขตของการใช้งาน เพื่อให้เกิดประโยชน์แก่การตัดสินใจให้เกิดผลการดำเนินงานสูงสุดของระบบ องค์กรหรือโครงการ การจัดสรรปัจจัยให้เกิดผลดังกล่าวอาจทำได้หลายๆ ทาง และหลายๆ รูปแบบ ซึ่งมักจะให้ผลลัพธ์ออกมาเหมือนกัน

การโปรแกรมเชิงเส้นตรง เป็นเทคนิคในการแก้ไขปัญหาทางการจัดสรรปัจจัยและทรัพยากรที่มีลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเป็นเชิงเส้นตรงทั้งสิ้น โดยมีจุดหมายเพื่อแก้ปัญหา และตัดสินใจให้เกิดผลตามแนวทางการดำเนินงานที่ดีที่สุด เช่น กำไรสูงสุด ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และแนวทางการดำเนินงานอื่นๆ ที่ให้ผลประโยชน์มากที่สุดต่อระบบนั้นๆ โดยมีเงื่อนไขที่กำหนดให้เช่น สภาวะตลาด การขาดแคลนวัตถุดิบ กำลังคน เครื่องจักร เงินทุน สถานที่ ความรู้ข้อกำหนดของกฎหมายและระเบียบต่างๆ ของสังคม นโยบายของฝ่ายบริหาร ขอบข่ายของธุรกิจที่ดำเนินอยู่และอื่นๆ ตัวอย่างเช่น การใช้เทคนิคทางการโปรแกรมเชิงเส้นตรงที่ใช้กับการแก้ปัญหาทางการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งจะต้องเกี่ยวข้องโดยตรงกับวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผลิต ชนิดของเครื่องจักรที่มีสมรรถภาพและกำลังการผลิตต่างๆ กัน กำลังคนที่มีความสามารถและจำนวนที่ต้องการของเงินทุนหมุนเวียนและทุนกิจการ สถานที่ที่เกี่ยวข้อง ความรู้และวิธีการผลิต ราคาขาย และการตลาด โดยมีเงื่อนไขต่างๆ เช่น ขนาดขีดความสามารถในการผลิตของเครื่องจักรและแรงงาน ปริมาณความต้องการของตลาด ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานอื่นๆ ในการผลิตเช่น น้ำ น้ำมัน ไฟฟ้า มีอยู่ในจำนวนจำกัด และเงินทุนจำกัด

เทคนิคทางการโปรแกรมเชิงเส้นตรง ในการวิจัยดำเนินงานนี้พัฒนามาจากผลความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งมีนักคิดชาวคณิตศาสตร์และนักวิทยาศาสตร์หลายๆ ท่าน เช่น

ฟอน นิวแมน เริ่มใช้ทฤษฎี สูงสุด - ต่ำสุด ในทฤษฎีของเกมในปี 1928 และถูกพัฒนานำไปใช้ในปัญหาทางการขนส่งในปี 1941

ในปี 1945 โดยจอร์จ สติคเลอร์ ได้นำเทคนิคดังกล่าวนำไปใช้ในการแก้ปัญหาทางการโภชนาการ

อย่างไรก็ตาม โปรแกรมเชิงเส้นตรงเริ่มเป็นเรื่องเป็นราวในปี 1947 โดย จอร์จ บี แคนซิก มาแชล วูด และเพื่อนร่วมงานในกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกาได้ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ และใช้แก้ปัญหาทางการวางแผนโครงการในกองทัพ โดยเริ่มจัดรูปองค์การทั้งหมดให้มีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นลักษณะเชิงเส้นตรง แล้วใช้วิธีทางคณิตศาสตร์แก้ปัญหาต่างๆ ผลงานที่ปรากฏได้รับความสำเร็จอย่างงดงาม ทำให้เกิดวิธีการที่เรียกว่า Simplex method ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาทางโปรแกรมเชิงเส้นตรงที่มีประสิทธิภาพมาก เทคนิคนี้สามารถที่จะเข้าใจและใช้ได้ง่ายในการแก้ปัญหาที่มีลักษณะเดียวกัน

2.13.1 รูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง

รูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear programming model) มีโครงสร้างดังนี้

(1) มีสมการกำหนดเป้าหมาย (Objective function) คือสมการแสดงความสัมพันธ์ของต้นทุน กำไร ฯลฯ เพื่อให้กำหนดเป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุด

(2) มีสมการแสดงของข้อจำกัด (Constraints) ซึ่งแสดงความจำกัดของปัจจัยหรือทรัพยากรในรูปสมการหรืออสมการ

(3) ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการต่างๆ ของรูปแบบแทนระบบต้องมีลักษณะเชิงเส้นตรง (Linear form) คือตัวแปรทุกตัวในสมการเป้าหมายและสมการหรืออสมการของข้อจำกัดจะต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเป็นกำลังเดียวกัน

(4) ตัวแปรทุกตัวต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ (All positive value) จากรูปแบบของโปรแกรมเชิงเส้นตรงนี้ จะเห็นได้ว่าตัวค่าวัดผลการดำเนินงานจะได้จากสมการกำหนดเป้าหมายซึ่งเราจะต้องพยายามหาค่าเป็นไปตามเป้าหมายโดยเทคนิคที่มีอยู่ ตัวแปรต่างๆ จะเป็นตัวแทนจำนวนปริมาณหรือค่าของปัจจัยที่มีอยู่จำกัดโดยการกำหนดของสมการหรืออสมการ ในข้อจำกัดของปัญหา ผลการวิเคราะห์จะได้เป็นค่าตัวแปรที่จะนำไปตัดสินใจเพื่อดำเนินการให้ได้ตามเป้าหมาย

รูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง เพื่อให้หาค่าของตัวแปร เช่น x_1, x_2, \dots, x_n ซึ่งเขียนเป็นสมการหรืออสมการเชิงเส้น ตัวแบบของปัญหาเขียนได้ ดังนี้

หาค่าสูงสุด (หรือหาค่าต่ำสุด) $Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

โดยมีข้อจำกัด

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \{ \leq, \geq, = \} b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \{ \leq, \geq, = \} b_2$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \{ \leq, \geq, = \} b_m$$

และ $x_j (j = 1, 2, \dots, n) \geq 0$

โดยมี

$Z = F(x_i)$ เป็นสมการเป้าหมาย

x_i เป็นค่าตัวแปรที่แทนค่าของปัจจัย

a_{ij}, c_j เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีค่าคงที่

b_j เป็นปริมาณทรัพยากรที่จะนำมาใช้ในแต่ละกิจการ ซึ่งมีค่าคงที่

2.13.2 ขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรมเชิงเส้นตรง

เพื่อช่วยให้เข้าใจลักษณะปัญหา และวิธีการใช้เทคนิคทางการโปรแกรมเชิงเส้นตรงในการแก้ปัญหาต่างๆ สรุปลขั้นตอนการดำเนินงาน ได้ดังนี้

(1) การจัดตั้งรูปแบบแทนระบบของปัญหา

- สมการกำหนดเป้าหมาย

- สมการหรืออสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรภายใต้ข้อบ่งชี้

ต่างๆที่มีอยู่

- ให้แน่ใจว่าสมการหรืออสมการต่างๆ ที่ตั้งขึ้นแล้วเป็นไปในลักษณะของสมการเชิงเส้นตรงและมีค่าของตัวแปรทุกตัวเป็นค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

(2) การหาผลลัพธ์ของรูปแบบแทนระบบของปัญหา เมื่อสามารถจัดปัญหาเข้ารูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรงเรียบร้อยแล้ว สามารถหาผลลัพธ์จากรูปแบบแทนระบบด้วยวิธีการต่างๆ ได้ดังนี้

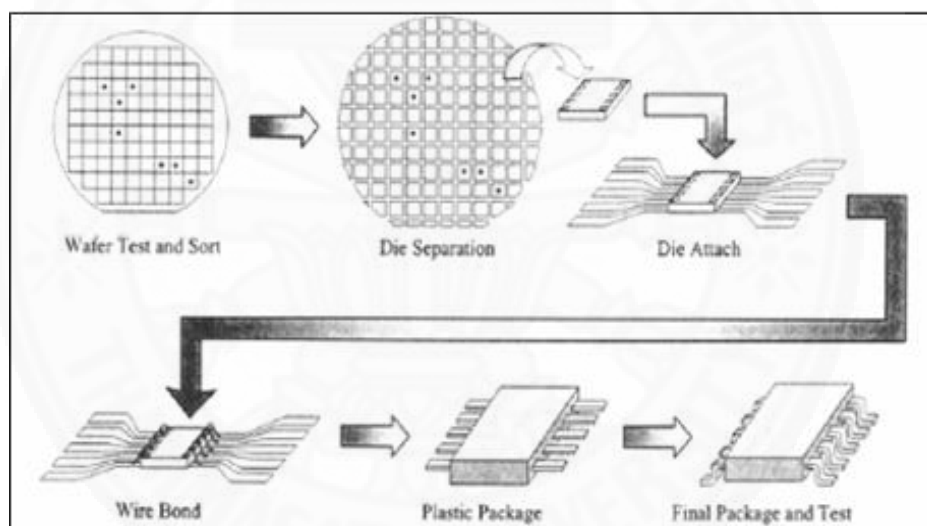
- ในกรณีที่เป็นปัญหาที่มีตัวแปรเป็น 2 ตัว อาจใช้วิธีการกำจัดข้อบ่งชี้ของคำตอบ วิธีอนุมาณทางคณิตศาสตร์ และวิธีกราฟ

- ในกรณีที่เป็นปัญหาที่มีตัวแปรมากกว่า 2 ตัว อาจใช้วิธีทางพีชคณิตต่างๆ

ไป และวิธี Simplex method

2.14 กระบวนการประกอบไอซี

ในโลกของเทคโนโลยีการผลิตไอซีในปัจจุบันใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการผลิต โดยการผลิตทุกขั้นตอนจะใช้เครื่องจักรกลอัตโนมัติ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงตรงตามคุณสมบัติที่ลูกค้าต้องการ ซึ่งเทคโนโลยีการผลิตไอซีในอนาคตมีการผลิตไอซีที่มีขนาดเล็ก ความหนาของตัวไอซีน้อย จำนวนขาไอซีมากโดยได้มีการพัฒนาจากกระบวนการผลิตไอซีที่ใช้ขา (Thru-Hole technology) ไปเป็นเทคโนโลยีการผลิตไอซีแบบใช้ลูกบอล (Ball grid array) แทนไอซีแบบใช้ขาซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวจะลดขั้นตอนการซุบขาไอซีด้วยสารเคมีและสารตะกั่ว เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อมภายในโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชน ให้ปราศจากมลพิษที่อาจจะเกิดอันตรายได้ สำหรับลำดับขั้นตอนการผลิตไอซีแสดงดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ลำดับขั้นตอนการผลิตไอซี

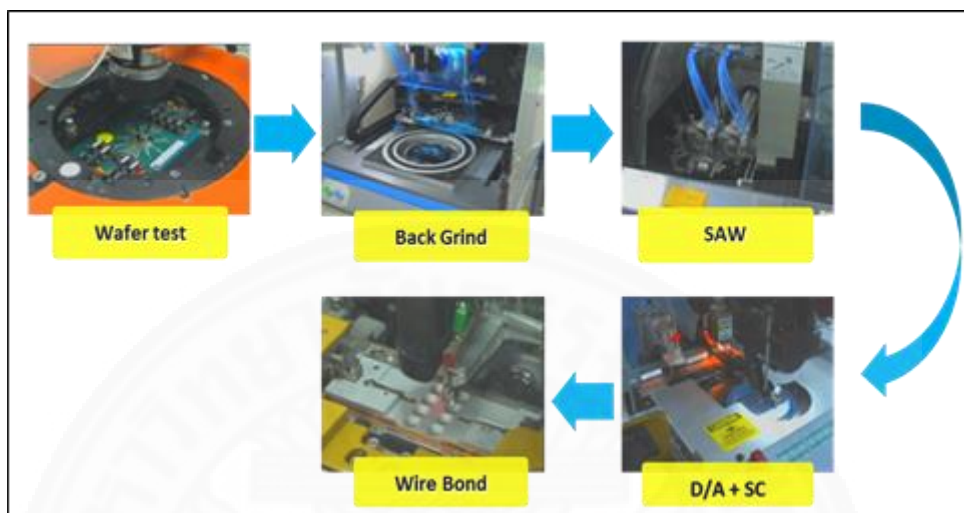
ที่มา: <http://sanong2003.tripod.com/icm1-04.htm>

กระบวนการประกอบตัวไอซี (IC assembly) ของบริษัทกรณีศึกษา สามารถแบ่งการทำงานเป็นสองส่วน ได้แก่

2.14.1 การผลิตไอซีส่วนหน้า

การผลิตไอซีส่วนหน้า (Front – end) เป็นกระบวนการผลิตตั้งแต่กระบวนการทดสอบแผ่นเวเฟอร์ (Wafer test) นำแผ่นเวเฟอร์ไปวัดความหนาและเจียรระโนด้านหลังแผ่นให้ได้

ขนาดความหนาตามต้องการ ไปจนถึงกระบวนการเชื่อมลวดทอง (Wire bond) ลงระหว่างได (Die) กับขาไอซี ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 การผลิตไอซีส่วนหน้า

ที่มา: ข้อมูลส่วนของการผลิตไอซีส่วนหน้า (Front – End) จากบริษัทกรณีศึกษา (ปี 2558)

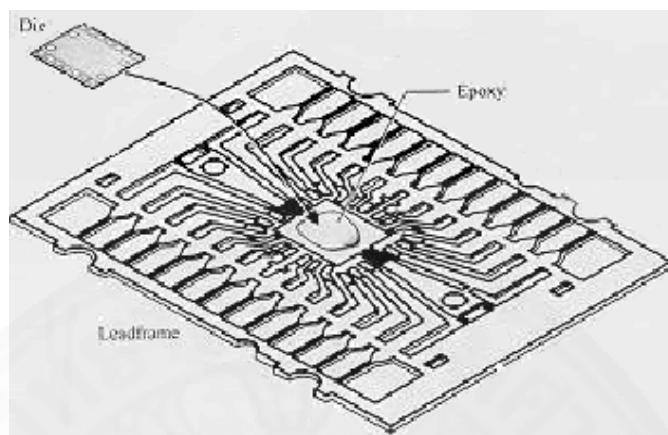
(1) กระบวนการทดสอบแผ่นเวเฟอร์ (Wafer test) เป็นการทดสอบแผ่นเวเฟอร์ เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าแต่ละอย่างว่ามีคุณสมบัติและมีประสิทธิภาพในการทำงานตามที่ต้องการหรือไม่ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการทดสอบจะใช้กระบวนการในการทดสอบแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับว่าจะทดสอบคุณสมบัติในด้านใด เมื่อพบว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้น ชิ้นส่วนหรือได (Die) นั้นก็จะถูกทำเครื่องหมายไว้

(2) กระบวนการเจียรระนาด้านหลังของแผ่นเวเฟอร์ (Back grinding) เป็นกระบวนการเจียรระนาด้านหลังของแผ่นเวเฟอร์ให้มีขนาดบางลงตามมาตรฐานโรงงานผลิตตัวไอซี เนื่องจากโรงงานผลิตแผ่นเวเฟอร์ต้องเพิ่มความหนาของแผ่นเวเฟอร์ เพื่อสะดวกในการขนส่งเพราะแผ่นเวเฟอร์ที่มีความบางมากจะเกิดการแตกหักระหว่างการขนส่งได้

(3) กระบวนการตัดแยกแผ่นเวเฟอร์ออกเป็นตัวได (Saw) สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เครื่องเลื่อยแผ่นเวเฟอร์ (Diamond bladedicing saw) ใบเลื่อยที่ใช้ตัดแผ่นเวเฟอร์จะทำจากกากเพชร สำหรับบริษัทกรณีศึกษาจะใช้แสงเลเซอร์ในการตัดแยกแผ่นเวเฟอร์

(4) กระบวนการไดแอตแทค (Die attach) เป็นกระบวนการนำแผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านการตัดแล้วมาผ่านกระบวนการแยกไดไปติดบนลีดเฟรม (Lead frame) ด้วยกาวอีพอกซีเงิน

(Silver epoxy) จุดที่นำไปติดกับลิตเฟรมนี้เรียกว่าเดป (DAP) เมื่อติดได้เสร็จแล้วก็จะนำไปอบด้วยเครื่องอบให้กาวอีพอกซีแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 2.18



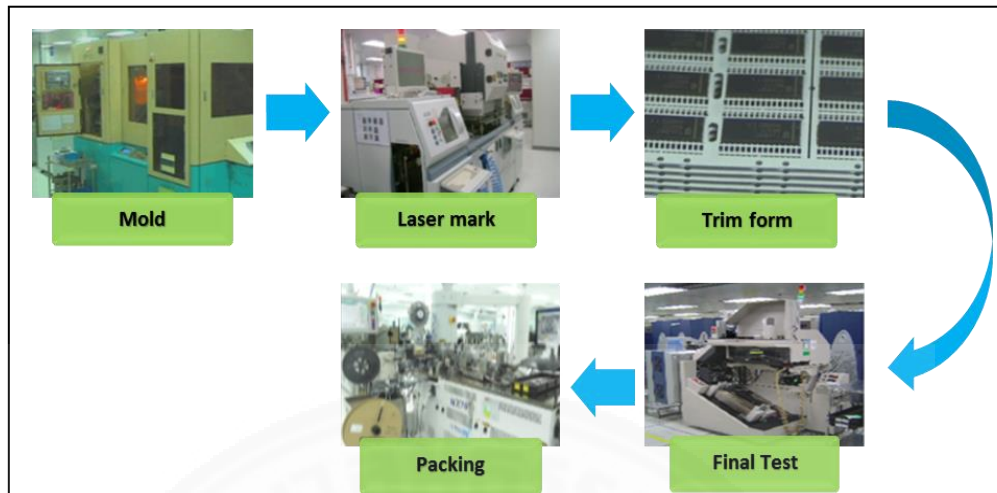
ภาพที่ 2.18 ตำแหน่งการติดกาวอีพอกซี

ที่มา: <http://sanong2003.tripod.com/icm1-04.htm>

(5) กระบวนการ Wire bond เป็นกระบวนการเชื่อมลวดทองหรือลวดทองแดงระหว่างไดกับซิลิคอนเฟรม โดยการเชื่อมลวดทองจะมีการเชื่อมต่อกันตามไดอะแกรมที่ทางโรงงานกำหนด (Bonding diagram)

2.14.2 การผลิตไอซีส่วนหลัง

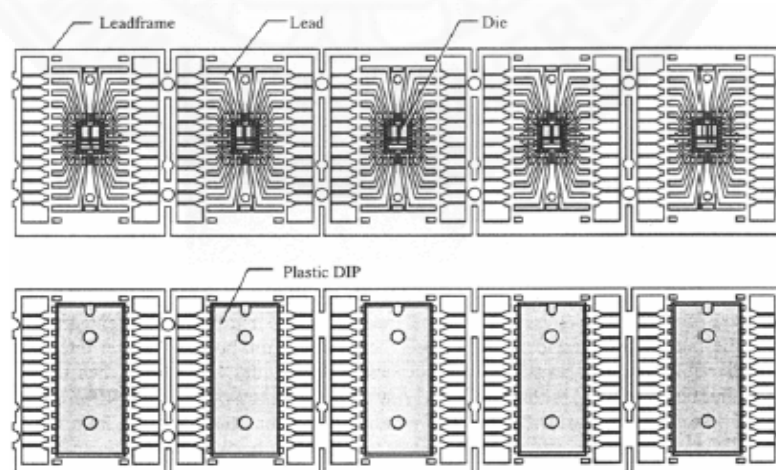
การผลิตไอซีส่วนหลัง (Back – end) เป็นกระบวนการสุดท้ายของการประกอบไอซีเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องควบคุมคุณภาพผลิตที่ส่งลูกค้าของทางบริษัท ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่กระบวนการโมลด์ (Mold) จนถึงกระบวนการบรรจุภัณฑ์ ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 การผลิตไอซีส่วนหลัง

ที่มา: ข้อมูลส่วนของการผลิตไอซีส่วนหลัง (Back – end) จากบริษัททรณศึกษา (ปี 2558)

(1) กระบวนการโม่ลด์ (Mold) เป็นขั้นตอนที่ทำการฉีดสารคอมพาวด์ (Compound) หรือวัสดุที่จะฉีดเข้าไปในโม่ลด์ เช่น พลาสติก เซรามิก เป็นต้น สารคอมพาวด์จะไปคลุมหน้าไดในลิตเฟรม เพื่อจะได้รูปร่างของตัวไอซีแต่ละรูปแบบตามข้อกำหนดของทางบริษัท แสดงดังภาพที่ 2.20 หลังจากกระบวนการฉีดโม่ลด์แล้วจะนำไอซีไปอบ เรียกระบวนการนี้ว่า Post mold cure เพื่อให้สารคอมพาวด์แข็งตัว



ภาพที่ 2.20 ตำแหน่งการฉีดสารคอมพาวด์ลงไปเป็นได

ที่มา: <http://sanong2003.tripod.com/icm1-04.htm>

(2) กระบวนการ Laser marking คือกระบวนการทำตราสัญลักษณ์และระบุรายละเอียดของชิ้นงาน โดยการใช้แสงเลเซอร์

(3) กระบวนการขึ้นรูปของงาน (Trim form) มีขั้นตอนการผลิตดังนี้

- De flash คือ การตัดสารคอมพาวด์ส่วนที่เกินมาออกจากตัวไอซี
- Trim คือ การตัดปลายขา Lead และบริเวณ Dam bar
- Form คือ การพับขางานให้ขึ้นรูปตามที่ต้องการ
- Singulation คือ การตัดตัวงานออกจากลีดเฟรม

(4) กระบวนการ Final test คือ การทดสอบคุณภาพของชิ้นงาน หลังจากที่ทำ การประกอบเสร็จ จะทำการทดสอบตัวงานด้วยเครื่องทดสอบ โดยจะมีการทดสอบคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าต่างๆ เช่น การทดสอบตามฟังก์ชันการทำงาน (Functional test) การทดสอบพารามิเตอร์ ทางด้านไฟตรง (DC Parameter test) การทดสอบพารามิเตอร์ทางด้านไฟสลับ (AC Parameter test) เป็นต้น

(5) กระบวนการบรรจุภัณฑ์ คือ กระบวนการที่บรรจุตัวไอซีลงในบรรจุภัณฑ์ ตามที่ลูกค้าต้องการ สำหรับบริษัทกรณีศึกษาจะมีบรรจุภัณฑ์อยู่ 3 ลักษณะ ดังภาพที่ 2.21 ซึ่ง 90 เปอร์เซ็นต์ของบริษัทกรณีศึกษาจะเป็นบรรจุภัณฑ์ลักษณะ Tape & Reel



ภาพที่ 2.21 ลักษณะของบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์

ที่มา: ข้อมูลลักษณะของบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ จากบริษัทกรณีศึกษา (ปี 2558)

ในกระบวนการนี้จะใช้เครื่องจักรในการหยิบ (Pick) และวางตัวไอซี (Place) ลงในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งก่อนที่จะวางงานลงไปบรรจุภัณฑ์นั้น จะมีการตรวจสอบคุณภาพของตัวงาน ภายนอก คือ Marking, Body และ Lead ด้วย Vision เพื่อแยกงานเสียออกจากงานดีก่อน

หลังจากงานผ่านกระบวนการบรรจุภัณฑ์แล้ว จะถูกส่งไปที่แผนกคุณภาพ (QA) เพื่อทำการตรวจสอบ ซึ่งจะมีการตรวจสอบอยู่ 3 ขั้นตอนดังนี้

- การสุ่มตรวจสอบตัวงานตาม AQL (Acceptable quality limit) โดยจะตรวจสอบคุณภาพของตัวงานภายนอก คือ Marking, Body และ Lead ได้คุณภาพตรงตามข้อกำหนดหรือไม่

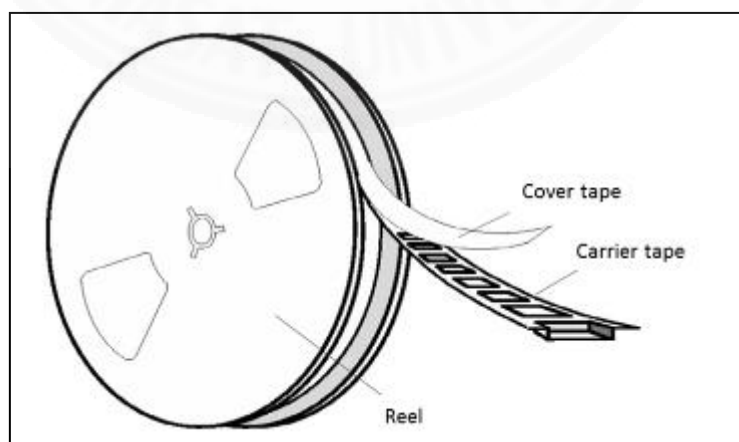
- การตรวจสอบ Material ในการบรรจุภัณฑ์โดยจะตรวจสอบว่า Material ได้คุณภาพตรงตามข้อกำหนดหรือไม่

- การตรวจการบรรจุภัณฑ์ว่าถูกต้องตามที่ลูกค้าต้องการและข้อมูลใน Label ถูกต้องและครบถ้วนหรือไม่

หากผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามข้อกำหนด แผนกคุณภาพก็จะทำการออกใบรายงานผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด หรือ NCR (Nonconformance report) เพื่อให้ทางผู้เกี่ยวข้องทำการแก้ไขต่อไป

2.15 ความรู้เกี่ยวกับ Cover tape และ Carrier tape

เนื่องจากกระบวนการบรรจุภัณฑ์ของบริษัทกรณีศึกษา ส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะ Tape & Reel ดังแสดงในภาพที่ 2.22 ซึ่งจะมีการใช้วัสดุในการบรรจุภัณฑ์อยู่ทั้งหมด 3 ชนิด คือ Cover taper, Carrier tape และ Reel แต่วัสดุที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลมีเพียง 2 ชนิด เท่านั้น คือ Cover tape และ Carrier tape



ภาพที่ 2.22 ชนิดของวัสดุในการบรรจุภัณฑ์ลักษณะ Tape & Reel
ที่มา: ข้อมูลชนิดของวัสดุในการบรรจุภัณฑ์ลักษณะ Tape & Reel จากบริษัทกรณีศึกษา (2558)

2.15.1 Cover tape

คือ แผ่นพลาสติกที่ใช้สำหรับการปิดผนึก เป็นฟิล์มชนิดโพลีเอสเตอร์โปร่งใส ซึ่งเป็นวัสดุประเภท Static dissipative ทั้งสองด้าน และปิดผนึกความร้อนในช่วงกว้างของอุณหภูมิ ดังภาพที่ 2.23 ซึ่งวัสดุที่เป็นประเภท Static dissipative จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ระหว่าง ฉนวนและตัวนำ อิเล็กตรอนสามารถไหลไปตามพื้นผิวหรือวิ่งผ่านเนื้อในวัสดุประเภท Dissipative ได้ เช่นเดียวกับฉนวนหรือตัวนำ วัสดุประเภท Dissipative สามารถเกิดประจุแบบ ไทโรโบอิเล็กทริกได้ เช่นกัน

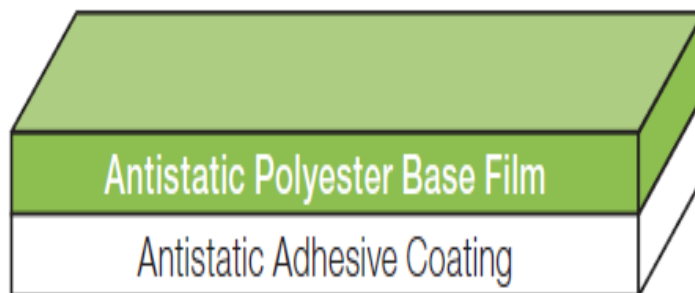
อย่างไรก็ตามวัสดุประเภท Dissipative มีความเหมือนวัสดุประเภทตัวนำ เนื่องจากมันสามารถปล่อยให้มีการเคลื่อนย้ายประจุจากวัสดุนั้นลงดิน หรือวัสดุที่เป็นตัวนำอื่นได้ แต่ การเคลื่อนย้ายประจุของวัสดุที่เป็นประเภท Dissipative จะใช้เวลานานกว่าวัสดุประเภทตัวนำ หากมีขนาดเท่ากัน การเคลื่อนย้ายประจุจากวัสดุประเภท Dissipative จะทำได้รวดเร็วกว่าฉนวนมาก แต่ ช้ากว่าตัวนำ (ที่มา: http://www.acccorporate.com/Tha/New_2_6.html)



ภาพที่ 2.23 ลักษณะของ Cover tape

ที่มา: ภาพ Cover tape จากบริษัทกรณีศึกษา (2558)

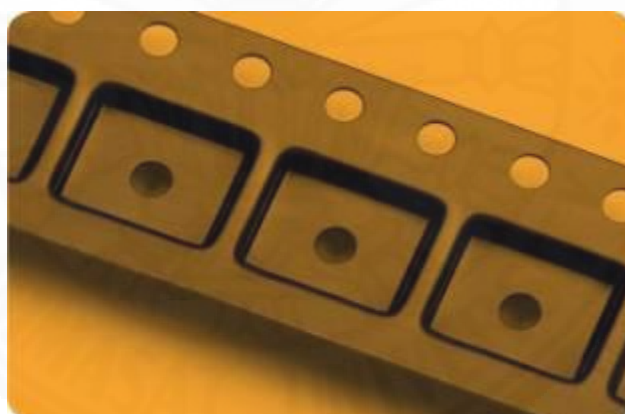
(1) โครงสร้างของ Cover tape ดังภาพที่ 2.24 จะส่วนประกอบอยู่ 2 ชั้นด้วยกัน คือ ชั้นพอลิเอสเตอร์ (Antistatic polyester base film) ที่ถูกปกคลุมด้วยชั้นเคลือบการวร้อน (Antistatic adhesive coating) ทั้งสองเป็นชั้นวัสดุประเภทที่ป้องกันไฟฟ้าสถิต



ภาพที่ 2.24 โครงสร้างของ Cover tape
ที่มา: โครงสร้างของ Cover tape จากบริษัททรณีศึกษา (2558)

2.15.2 Carrier tape

คือ วัสดุเป็นพลาสติกที่ถูกเคลือบด้วย Carbon และนำไปขึ้นรูป (Forming) ตามที่ต้องการ ดังภาพที่ 2.25 การขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับลักษณะ รูปร่าง และขนาดของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 2.25 ลักษณะของ Carrier tape
ที่มา: ภาพ Carrier tape จากบริษัททรณีศึกษา (2558)

(1) ส่วนผสมของเนื้อ Carrier tape หลักๆ จะประกอบไปด้วย

- พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) มีลักษณะโปร่งใส เปราะ ทนต่อกรดและด่าง ใอน้ำและอากาศซึมผ่านได้พอควร ใช้ทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้สำนักงาน เป็นต้น พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นมาจากสไตรีนมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปิโตรเลียม ถูกผลิตออกขายครั้งแรกในช่วงปี 1930-1939 ช่วงแรกสไตรีนที่

ผลิตขึ้นมาถูกนำไปใช้ในสงครามโลก ครั้งที่ 2 เป็นหลัก หลังจากสงครามจบลงจึงเปลี่ยนมาผลิตเป็นพลาสติกพอลิสไตรีนออกขายแทน ในการผลิตพอลิสไตรีนยังมีวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ใช้ร่วมด้วย ได้แก่ เบนซีน เอทิลีนและบิวทาไดอิน พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือ หลอมเป็นของเหลวได้ โดยที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสถานะของแข็ง แต่จะหลอมละลายเมื่อทำให้ร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง พอลิสไตรีนแข็งที่บริสุทธิ์จะใส ไม่มีสี แต่สามารถทำเป็นสีต่างๆ ได้ และยืดหยุ่นได้จำกัด

- พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate; PC) มีลักษณะโปร่งใส แข็ง ทนแรง ยืดและแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนสูง ทนกรด แต่ไม่ทนด่าง สามารถขึ้นรูปเพื่อทำเป็น ถ้วย จาน ชาม ขวดนมเด็ก ขวดบรรจุอาหารเด็ก เป็นต้น

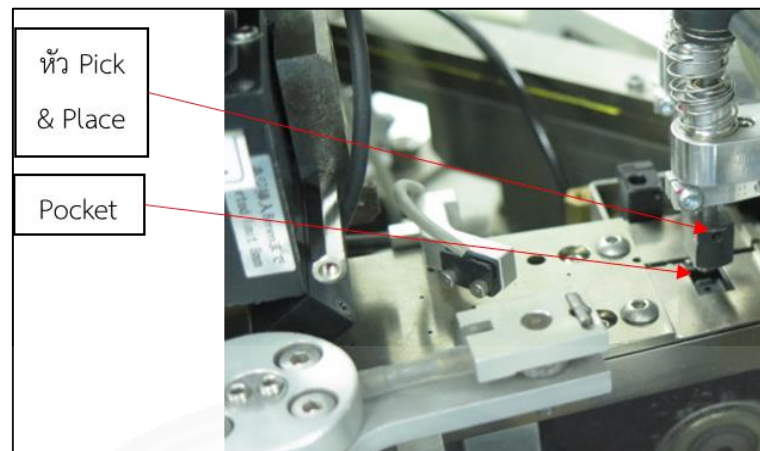
- โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate) หรือที่เรียกกันโดยย่อว่า “เพท” (PET) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก (หลอมที่อุณหภูมิสูงและแข็งตัวเมื่อเย็น) ที่ผลิตขึ้นได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับไดเมทิลเทเรฟทาเลต หรือระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับกรดเทเรฟทาลิก แต่ในปัจจุบันนิยมใช้ไดเมทิลเทเรฟทาเลต ในการทดลองกับสัตว์ พบว่าเป็นสารก่อมะเร็ง ก่อการกลายพันธุ์ และเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ นอกจากนี้ ยังมีการใช้สารเร่งปฏิกิริยาเคมีเช่น แอนติโมนีไตรออกไซด์ หรือแอนติโมนีไตรแอซีเตต พลาสติกเพทนี้แบ่งเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่มีเนื้อใส (A-PET) และกลุ่มที่เป็นผลึกสีขาว (C-PET) เพทมีคุณสมบัติที่สามารถทำเป็นพลาสติกที่มีลักษณะกึ่งแข็งไปจนถึงเป็นของแข็งได้โดยการปรับความหนาและมีน้ำหนักเบา

2.16 การทำงานของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบในส่วนของกรรซิล

การทำงานของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ คือ ส่วนของกรรซิล (Taping and sealing modual) ซึ่งจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ด้วยกัน คือ การบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape, การซิล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape, การเคลื่อนที่ของ Carrier tape ซึ่งในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.16.1 การบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape

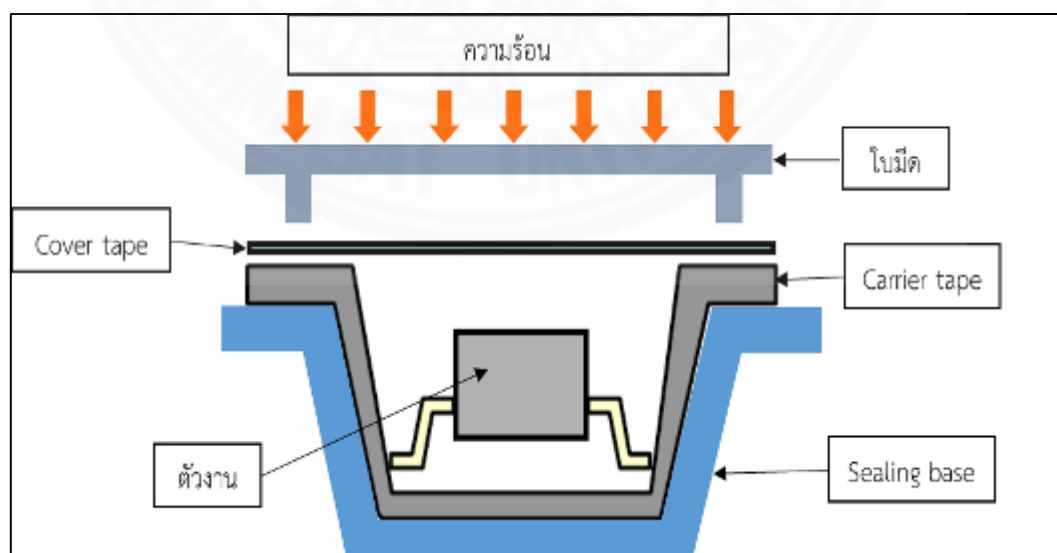
หลักการทำงานของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบในส่วนการบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape คือ การหยิบ (Pick) ตัวไอซีจาก Track และวาง (Place) ลงใน Pocket ของ Carrier tape โดยหัว Pick & Place ซึ่งเป็นยาง ดูด-จับ แบบสูญญากาศ ดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 การบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape

2.16.2 การซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape

หลักการการทำงานของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบใน ส่วนของการซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape จะใช้หลักการ การให้ความร้อนแกไบมีด และ เมื่อไบมีดถูกกดลงบน Cover tape ชั้นกาวด้านใต้ของ Cover tape ที่ถูกไบมีดกดก็ จะละลายและ เชื่อมติดกับ Carrier tape จนสนิททำให้อากาศไม่สามารถผ่านเข้าไปภายในได้ และในทางกลับกันตัว ไอซีที่อยู่ภายใน Pocket ของ Carrier tape ก็ไม่สามารถออกมาภายนอกได้เช่นกัน ดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 การซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape

ที่มา: ข้อมูลการซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape จากบริษัทกรณีศึกษา (2558)

2.16.3 การเคลื่อนที่ของ Carrier tape

หลักการการทำงานของเครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบใน ส่วนของการเคลื่อนที่ของ Carrier tape (Carrier tape index) จะเป็นการสั่งให้ Carrier tape เคลื่อนที่ไปด้านหลัง หลังจากการซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape เสร็จเรียบร้อยแล้ว เพื่อเตรียมการบรรจุตัวไอซีลงใน Pocket ถัดไป

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหานั้น ได้มีการใช้กันอย่าง แพร่หลาย โดยมีผู้วิจัยหลายท่านได้นำหลักการออกแบบการทดลอง เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมใน การแก้ไขปัญหาในอุตสาหกรรมการผลิต ลดของเสีย การปรับปรุงกระบวนการ และการเพิ่ม ประสิทธิภาพการผลิต เป็นต้น

สำหรับตัวอย่างงานวิจัยสำหรับการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) ได้แก่ ศนิรัช ทับทิมทอง (2551) ได้ทำการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 Factorial Design ในการลดปัญหาการโค้งงอของการผลิตแผงวงจรแบบอ่อน สามารถลดค่าใช้จ่ายใน การแก้ปัญหาได้ 2,691,889 บาทต่อปี นิพนธ์ พีระประวิตร (2551) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับความ ทนทานต่อแรงเฉือนของแขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ โดยใช้การออกแบบการ ทดลองแบบ 2^4 Factorial design ผลจากการทดลองพบว่า ค่าความทนทานต่อแรงเฉือนของแขนจับ หัวอ่านเขียนข้อมูลมีค่าเพิ่มมากขึ้นประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากสภาวะการ ทำงานปัจจุบัน โดยเพิ่มจาก 0.518 kgf เป็น 0.611 kgf นอกจากนั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอย เชื่อม และความลึกของรอยเชื่อมของแขนจับหัวอ่านเขียนข้อมูลยังคงมีค่าอยู่ในข้อกำหนดของ ลูกค้า ปริญา คุณมี (2554) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำตะกรันเหล็กกลับมาใช้เป็นส่วนผสมใน คอนกรีตเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดที่สูง โดยทดลองหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตที่ กำลังอัด 240-260 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 Factorial design ผลจากการทดลองพบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมจะใช้ตะกรันเหล็กรวมเท่ากับ 207 กิโลกรัม และ ทำให้คอนกรีตที่ได้มีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถลดค่าใช้จ่าย ในการกำจัดตะกรันเหล็กประมาณ 255 บาทต่อการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร และลดต้นทุนการ ผลิตคอนกรีตลงได้ร้อยละ 5 วันวิสา เสระแสง (2554) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของระยะห่างใน การตัดจากจุดกึ่งกลางของช่องในการตัดแต่ละเส้นของกระบวนการตัดแผ่นเวเฟอร์ออกเป็นตัวยาว โดยใช้แสงเลเซอร์ โดยมีค่าเป้าหมายตามข้อกำหนดของลูกค้า คือ ศูนย์ และมีค่าไม่เกิน 5 ไมครอน

โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^5 Factorial design ผลจากการทดลองพบว่า สามารถลดค่าเฉลี่ยระยะห่างในการตัดจากจุดกึ่งกลางของช่องสำหรับตัดจาก 5.93 ไมครอน เป็น 3.10 ไมครอน รวมทั้งให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าการวิเคราะห์สมรรถภาพของกระบวนการที่เหมาะสมยิ่งขึ้น และ Dowlatsai Shad (2547) ได้นำการออกแบบการทดลองไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดเรซิน ในกระบวนการฉีดพลาสติก (Plastic injection molding) เนื่องจากต้องการลดระยะเวลาในการทำงานของกระบวนการ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^6 Factorial design เพื่อคัดเลือกหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระยะเวลาในการทำงานของกระบวนการ โดยสามารถหาปัจจัยที่มีผล ได้แก่

1. จำนวนเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมของเรซิน (The percentage of regrind material to be used)
2. ความดันในการฉีดเรซิน (Injection pressure)
3. ความเร็วในการฉีดเรซิน (Injection velocity)
4. อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold temperature) และพบว่าปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบ ได้แก่ 1. อุณหภูมิการหลอมเหลวของเรซิน (Resin melting point) 2. อุณหภูมิในการอบ (Cure time) หลังจากนั้นจึงนำปัจจัยที่มีผลกระทบทั้งสี่ปัจจัยไปทำการหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยอีกครั้ง ซึ่งสรุปได้ว่าการใช้การออกแบบการทดลองสามารถแก้ไขปัญหาและลดระยะเวลาการทำงาน of กระบวนการฉีดพลาสติกได้ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำ

สำหรับการวิจัยที่ใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial design) ได้มีตัวอย่างงานวิจัยอยู่หลากหลาย เช่น ญัฐกานต์ รสดี (2555) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการขัดเลนส์ด้วยการออกแบบการทดลอง โดยพบว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดของเสีย คือ แรงกดในการเจียรเลนส์และความเร็วรอบของล้อหินขัดเพชร จึงนำปัจจัยทั้ง 2 มาทำการออกแบบการทดลองแบบ 3^2 Factorial design เพื่อมาใช้ประยุกต์หาสภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมเครื่องขัดหยาบเลนส์ และพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปัญหาเลนส์บิ่นโดยระดับที่ส่งผลให้เกิดชิ้นงานเสียน้อยที่สุด คือ แรงกดในการเจียรเลนส์ที่ 10 กิโลกรัม และค่าความเร็วรอบของล้อหินขัดเพชรที่ 16,000 รอบต่อนาที และสามารถลดจำนวนของเสียจากของเดิมได้ถึง 55.6 เปอร์เซ็นต์ กรวิชญ์ จุฬะวะนะพันธ์ (2555) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐานจากกระบวนการตัดและปิดผนึกถุงพลาสติกบรรจุภัณฑ์ โดยพบว่าผลิตภัณฑ์ที่มาจากเม็ดพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีอัตราการผลิตสูงที่สุด และปัญหารอยปิดผนึกกันถุงยึดเป็นปัญหาที่พบมากที่สุดในการบวนการผลิต ซึ่งคิดเป็น 78.2 เปอร์เซ็นต์ของการเกิดของเสียที่กระบวนการตัดและปิดผนึกถุงพลาสติก และพบว่าปัจจัยหลัก ได้แก่ ความเร็วในการป้อนแผ่นพลาสติก และอุณหภูมิของบาร์กด์ จึงนำทั้ง 2 ปัจจัยมาทำการออกแบบการทดลองแบบ 3^2 Factorial design ผลจากการทดลองพบว่า ระดับของปัจจัยที่เหมาะสม คือ ความเร็วในการป้อนแผ่นพลาสติก อยู่ที่ระดับ 35 ขึ้นต่อนาทีและอุณหภูมิของบาร์กด์เท่ากับ 255 °F ซึ่งสามารถลดสัดส่วนของเสียลงได้

3.5 เปอร์เซ็นต์ และคิดเป็นเงินที่สามารถลดของเสียลงได้ประมาณ 55,000 บาทต่อเดือน บันลือศักดิ์ จำהל (2554) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบความโค้งกระจกและการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อภาพบิดเบือนของกระจกที่ไม่ได้มาตรฐาน อีกทั้งหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบความโค้งกระจก ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ 3^3 Factorial design พบว่าปัจจัยหลัก คือ อุณหภูมิการอบกระจก ความเร็วสายพาน และความดันสูญญากาศในการดูดกระจก ผลการทดลองพบว่า ปัจจัยทั้ง 3 มีผลต่อภาพบิดเบือนของกระจกอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าเฉลี่ยหลังจากตั้งระดับปัจจัยที่เหมาะสมมีค่าอยู่ที่ 3.61 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ของลูกค้าที่กำหนดไว้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ยังมีการวิจัยที่ใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{k-1} Fractional factorial design) มาประยุกต์ใช้ในการผลิตหลายประเภท เช่น จาตุรนต์ จันทรดี (2554) ได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการลดสัดส่วนปัญหาคุณภาพในการเจาะแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Print circuit board; PCB) ซึ่งปัญหาที่พบมากที่สุด คือ การเจาะสล็อตสั้นรูปร่างเบี้ยวผิดไปจากข้อกำหนด จึงได้ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองแบบ 2^{4-1} Fractional factorial design ผลการดำเนินงานพบว่า ระดับปัจจัยในการเจาะที่เหมาะสม คือ ดอกเจาะสล็อตควรใช้ความยาวเกลียวส่วน 7 มิลลิเมตร วิธีกำหนดตำแหน่งการเจาะแบบ In-line ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ 10 นิ้วต่อนาที และความเร็วในการหมุนของดอกเจาะ 20,000 รอบต่อนาที โดยสามารถลดสัดส่วนปัญหาคุณภาพการเจาะแผ่น PCB ที่เกิดจากโปรแกรมเจาะลง 54 เปอร์เซ็นต์, ปิ่นทซ์ชนิด เต็มตุ้ม (2551) ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^{5-1} Fractional factorial design ในการลดอัตราของเสียจากการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในการแก้ไข ทำให้ไม่พบปัญหา Slider หลุดจาก Suspension อีก พิเชษฐ์ บุญญาลัย (2554) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการล้างแขนจับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยการทดลองแบบ 2^{6-1} Fractional factorial design ผลการวิจัยสามารถทำให้จำนวนสิ่งปนเปื้อนบริเวณแขนจับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์มีจำนวนน้อยกว่าค่าที่บริษัทกำหนด คือ 1,000 จุดต่อตารางเซนติเมตร

จากการสืบค้นงานวิจัยที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่า การแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการออกแบบการทดลองสามารถดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหาได้อย่างรวดเร็ว สามารถให้ผลของความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดิงย้อนกลับของรอยซีล เพื่อลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบ เพิ่มค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดิงย้อนกลับให้ผ่านข้อกำหนดของบริษัทให้มากกว่า 1.67 ลดค่าใช้จ่ายจากการนำงานกลับมาแก้ไข และเพิ่มผลผลิตจากเครื่องจักรที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบได้ ดังนั้น การวิจัยนี้จึงได้แบ่งส่วนของการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

1. การค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดิงย้อนกลับของรอยซีล โดยงานวิจัยนี้ จะเริ่มจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่น่าจะส่งผลต่อค่าแรงดิงย้อนกลับของรอยซีล โดยการระดมสมองจากหัวหน้าแผนกและวิศวกรของโรงงาน ด้วยตารางวิเคราะห์เหตุและผล และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิตซึ่งจะได้ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดิงย้อนกลับของรอยซีล หลังจากนั้นจะทำการกรองปัจจัย (Screening factors) ด้วยเทคนิคการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{k-1} Fractional factorial design) เพื่อลดปัจจัยที่ไม่มีความสำคัญออกไป และนำปัจจัยที่มีความสำคัญไปทำการศึกษาต่อ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในส่วนถัดไป

2. การทดลองเพื่อค้นหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (2^k Factorial design) เพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงหรือเชิงเส้นโค้ง หากผลจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบพบว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นโค้ง จะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) เพื่อค้นหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

1. ศึกษาสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นและการดำเนินงานของบริษัทกรณีศึกษา
2. ประเมินค่าเฉลี่ย (Average) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (C_{pk}) ของค่าแรงดิงย้อนกลับของรอยซีลในสภาวะการทำงานปัจจุบัน

3. วิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่น่าจะส่งผลต่อค่าแรงดิงย้อนกลับของรอยซีลจากการระดมสมองจากหัวหน้าแผนกและวิศวกรของโรงงาน โดยใช้เทคนิคตารางวิเคราะห์เหตุและผล (Cause and effect matrix) และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต (FMEA)

4. ทำการกรองปัจจัยด้วยเทคนิคการทดลองที่ละปัจจัยเพื่อลดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออกไป

5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น

6. ทำการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k เพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงหรือเชิงเส้นโค้ง

7. หากพบว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นโค้ง ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพินิจตรวจสอบ

8. ใช้เทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด

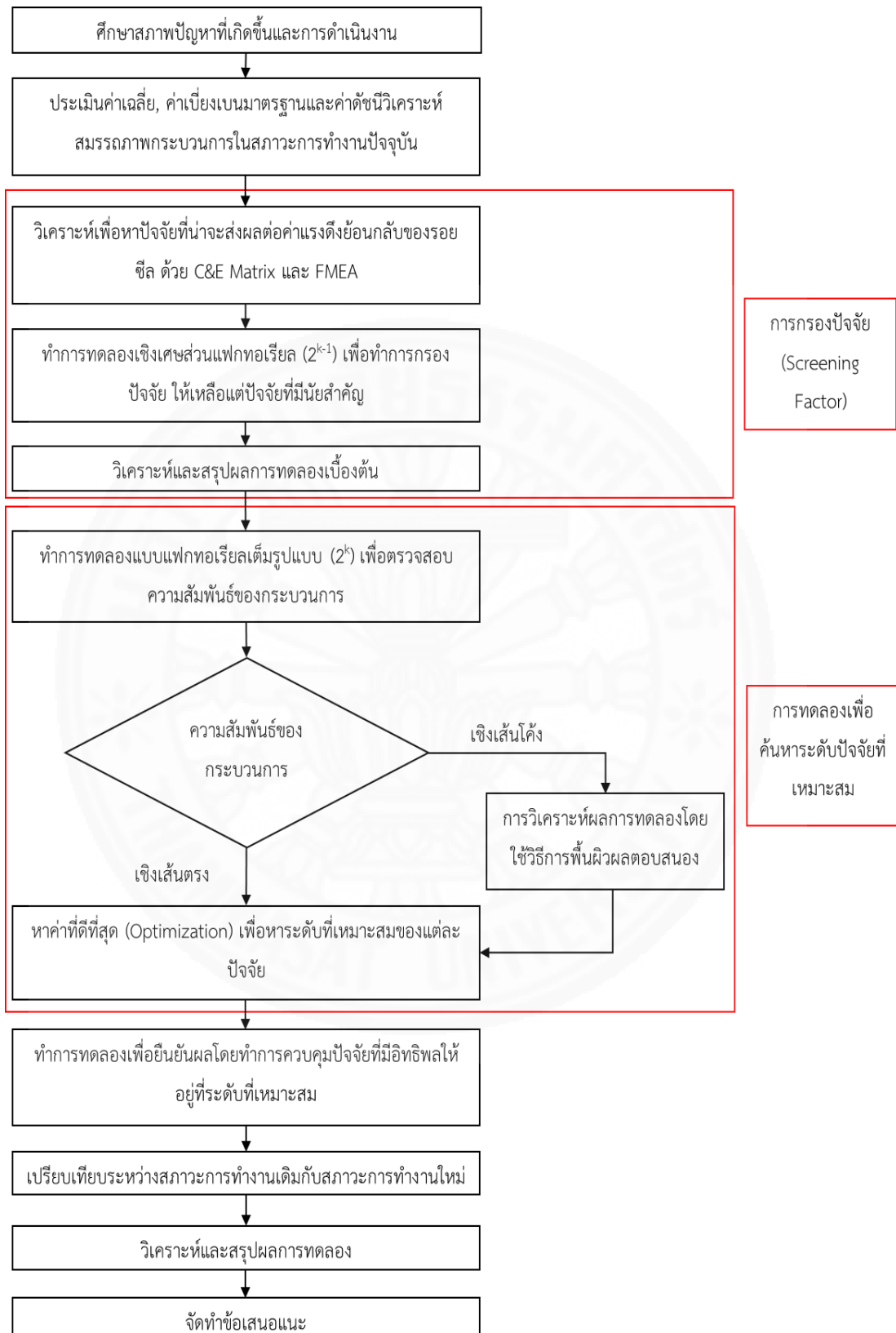
9. ทำการทดลองเพื่อยืนยันผล โดยทำการควบคุมปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดให้อยู่ที่ระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย

10. ทำการเปรียบเทียบระหว่างสภาวะการทำงานเดิมกับสภาวะการทำงานใหม่

11. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

12. จัดทำข้อเสนอแนะ

จากขั้นตอนต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถอธิบายเป็นแผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนการทำการวิจัย

3.1 การศึกษาสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นและการดำเนินงานของบริษัทกรณีศึกษา

3.1.1 สภาพปัญหาที่เกิดขึ้น

จากบทที่ 1 ข้อมูลจำนวน PPM (Part per million) จากแผนภาพพาราโดพบว่ามีค่า 75.42 เปอร์เซ็นต์ ของของเสียที่เกิดจากเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ คือ ปัญหาจากการซีล (Sealing problem) ซึ่งเกิดจากกระบวนการซีล สำหรับปัญหาจากการซีลจะมีลักษณะอาการแตกต่างกัน ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถแยกได้เป็น 5 อาการหลัก ได้แก่

1. ค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนด (Peel back force out of spec.)
2. รอยซีลไม่ติดหรือ Cover tape ฝอยออก (Peeling off)
3. รอยซีลไม่สมบูรณ์ (Incomplete sealing)
4. รอยซีลเป็นคราบขาว (Peeling off the layers of glue)
5. รอยซีลเป็นกาวเหนียว (Tightly)

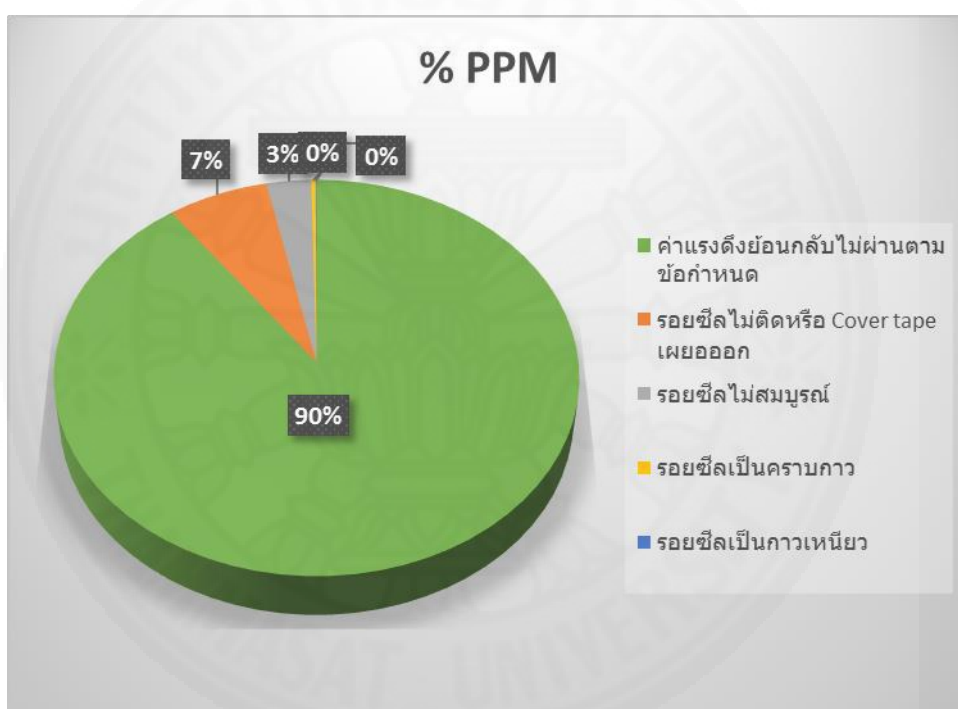
ตารางที่ 3.1

ลักษณะอาการของปัญหาจากการซีล

Defect symptom	ค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนด	รอยซีลไม่ติดหรือ Cover tape ฝอยออก	รอยซีลไม่สมบูรณ์	รอยซีลเป็นคราบขาว	รอยซีลเป็นกาวเหนียว	Total
จำนวน NCR	29	185	57	51	12	334
จำนวนจุดหรือตัวไอซีที่เสียหาย	1775000	131900	58688	5750	1162	1972500
PPM (Point)	446	33	15	1	0	495
% PPM	90%	7%	3%	0%	0%	100%

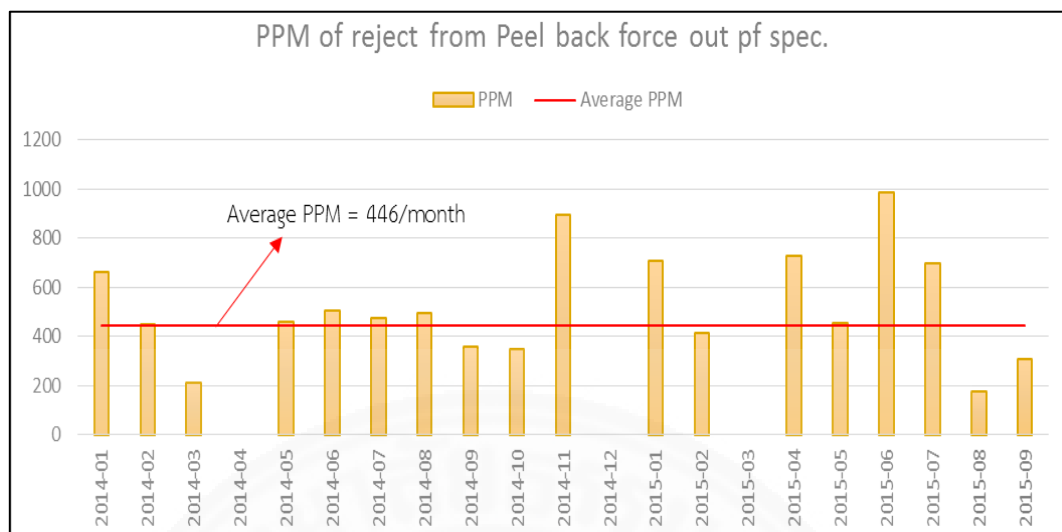
ที่มา: ข้อมูลลักษณะอาการของปัญหาจากการซีล จากบริษัทกรณีศึกษาเดือนมกราคม 2557 – กันยายน 2558

หากพิจารณาเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ PPM จะได้ ดังภาพที่ 3.2 ซึ่งจากภาพจะพบว่า เปอร์เซ็นต์ PPM จากปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนดสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ อันเนื่องมาจากปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนด และไม่สามารถมองเห็นได้จากลักษณะทางกายภาพ ซึ่งจะถูกรวบรวมโดยการสุ่มตรวจตามเวลาที่กำหนดในแต่ละวัน ดังนั้น การพบปัญหาจึงเกิดหลังจากการผลิตงานไปเป็นจำนวนมากแล้ว จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายของงานจำนวนมาก และเสียค่าใช้จ่ายในการนำงานกลับมาทำการแก้ไข (Rework) เป็นจำนวนมากเช่นกัน ซึ่งหากค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม จะส่งผลให้เกิดปัญหาอื่นๆ เช่น รอยซีลพ่นออกหลังจากการซีลหรือรอยซีลติดแน่นเกินไปทำให้ลูกค้าไม่สามารถนำไปใช้งานได้



ภาพที่ 3.2 เปอร์เซ็นต์ PPM ของแต่ละอาการของปัญหาจากการซีล (Sealing problem)
ที่มา: ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ PPM ของแต่ละอาการของปัญหาจากการซีล จากบริษัทกรณีศึกษา เดือนมกราคม 2557 – กันยายน 2558

สำหรับจำนวน PPM ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่ไม่ผ่านข้อกำหนดบริษัทกรณีศึกษาแสดง ดังภาพที่ 3.3 ซึ่งเป็นข้อมูลตั้งแต่ เดือนมกราคม 2557 – กันยายน 2558 และมีค่าเฉลี่ยของจำนวน PPM ต่อเดือนอยู่ที่ 446 PPM



ภาพที่ 3.3 จำนวน PPM ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่ไม่ผ่านข้อกำหนดบริษัททรนศึกษา
ที่มา: ข้อมูลจำนวน PPM ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล จากบริษัททรนศึกษา เดือนมกราคม
2557 – กันยายน 2558

3.1.2 สภาพการดำเนินงานของบริษัททรนศึกษา

เมื่อผู้วิจัยทำการศึกษาการซีลงานของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ พบว่าเครื่องจักรแต่ละเครื่องจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน แต่ยังคงทำการควบคุมให้เป็นไปตามข้อกำหนด ซึ่งข้อกำหนดของของ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร ถูกควบคุมไว้ แสดงดังตารางที่ 3.2 และวิธีการแก้ปัญหาของบริษัททรนศึกษายังเป็นวิธีการที่ไม่ถูกต้อง กล่าวคือ มีการปรับค่าพารามิเตอร์ตามของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง และใช้ประสบการณ์หรือการประมาณการในการปรับค่าพารามิเตอร์ เป็นต้น แต่จะมีวิธีการควบคุมพนักงานให้ปฏิบัติตามมาตรฐานจาก Parameter check sheet ดังตารางที่ 3.3 เป็นการควบคุมพารามิเตอร์ก่อนการปรับปรุงซึ่งมีอยู่ 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ แรงดันและเวลาที่ใช้ในการซีล

ตารางที่ 3.2

ข้อกำหนดของค่าพารามิเตอร์และค่าแรงดึงย้อนกลับของ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร

ข้อกำหนดของค่าแรงดึงย้อนกลับ	อุณหภูมิ	แรงดัน	เวลาที่ใช้ในการซีล
60 ± 30 gram	200 ± 10 °C	2.0 ± 0.5 bar	50 ± 20 ms

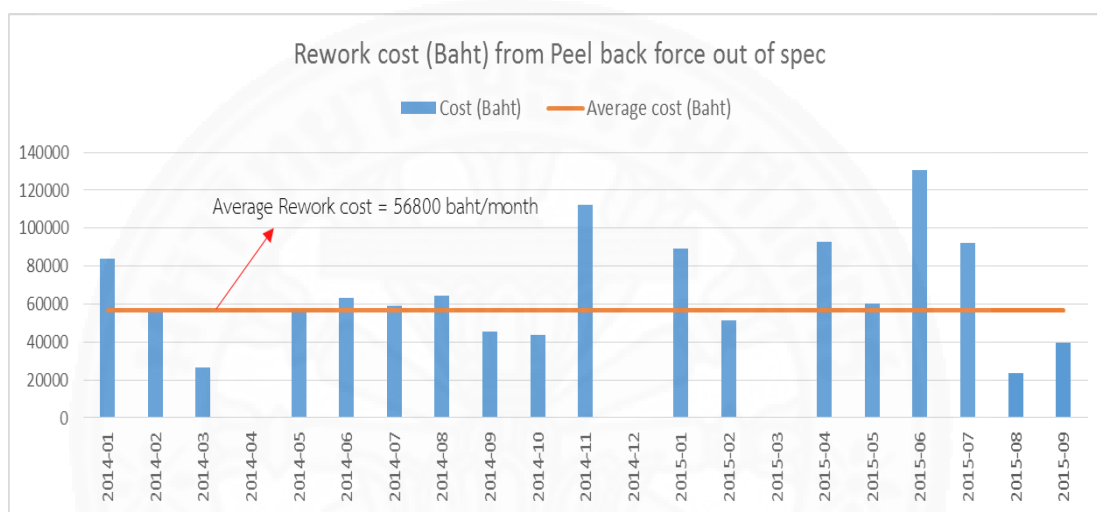
ตารางที่ 3.3

Parameter check sheet ของ Carrier tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร (ก่อนการปรับปรุง)

NXP SEMICONDUCTORS (THAILAND)		Parameter check sheet of Carrier tape width 16 mm					Form: A2 Spec: 700-0055
		Machine No: PKINX006		Peel back force Spec.		60 ± 30 gram	
Date	Shift	Assy CG.	Lot ID	พารามิเตอร์ที่ตรวจสอบ /ข้อกำหนด			Peel back force ที่วัดได้ (gram)
				อุณหภูมิ (Temperature)	แรงดัน (Pressure)	เวลาที่ใช้ในการ ซีล (Seal time)	
				190-200 °C	1.5-2.5 bar	50-70 ms	
12/20/2015	D	SO8-12	NF328140	190	1.9	50	45.98
	N	SO8-12	NF30YV20	190	1.9	50	42.97
12/21/2015	D	SO8-12	NF31T490	190	1.9	50	47.43
	N	SO8-12	NF31EX30	190	1.9	50	41.75
12/22/2015	D	SO8-12	NF31S290	190	1.9	50	40.93
	N	SO8-12	NF30TQ90	205	2.05	50	78.16
12/23/2015	D	SO8-12	NF34BL00	205	2.05	50	76.80
	N	SO8-12	NF32CHK0	205	2.05	50	79.48
12/24/2015	D	SO8-12	NF34TH90	205	2.05	50	82.27
	N	SO8-12	NF33AS80	205	2.05	50	78.23
12/25/2015	D	SO8-12	NF33ZZ10	205	2.05	50	73.76
	N	SO8-12	NF34KU80	205	2.05	50	75.67
12/26/2015	D	SO8-12	NF33UV10	205	2.05	50	71.49
	N	SO8-12	NF32CMZ0	205	2.05	50	78.09
12/27/2015	D	SO8-12	NF33G220	205	2.05	50	74.05
	N	SO8-12	NF35L210	205	2.05	50	75.21
12/28/2015	D	SO8-12	NF343950	205	2.05	50	72.14
	N	SO8-12	NF35FX70	205	2.05	50	77.33
12/29/2015	D	SO8-12	NF34S570	205	2.05	50	79.10
	N	SO8-12	NF31EU20	205	2	50	64.43
12/30/2015	D	SO8-12	NF30ARH0	205	2	50	69.37
	N	SO8-12	NF32QS10	205	2	50	63.90
12/31/2015	D	SO8-12	NF31M260	205	2	50	64.84
	N	SO8-12	NF32ALJ0	205	2	50	67.52

3.1.3 ค่าใช้จ่ายในการนำงานที่เสียหายมาทำการแก้ไข

จากหัวข้อที่ 3.1.1 จะพบว่าปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านข้อกำหนด เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายของงานจำนวนมาก และเสียค่าใช้จ่ายในการนำงานกลับมาทำการแก้ไข (Rework cost) เป็นจำนวนมากเช่นกัน เมื่อทำการประมาณการค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการแก้ไขงาน ดังภาพที่ 3.4 พบว่ามีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นเฉลี่ย 56,800 บาทต่อเดือน หรือ 681,600 บาทต่อปี หากสามารถลดปัญหานี้ได้ จะทำให้บริษัทกรณีศึกษาประหยัดค่าใช้จ่ายจากการนำงานมาแก้ไขได้



ภาพที่ 3.4 ค่าใช้จ่ายในการนำงานที่เสียหายมาทำการแก้ไข จากค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านข้อกำหนด
ที่มา: ข้อมูลค่าใช้จ่ายในการนำงานที่เสียหายมาทำการแก้ไข จากบริษัทกรณีศึกษา เดือนมกราคม 2557 – กันยายน 2558

3.2 การประเมินค่าเฉลี่ย, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (C_{pk}) ในสภาวะการทำงานปัจจุบัน

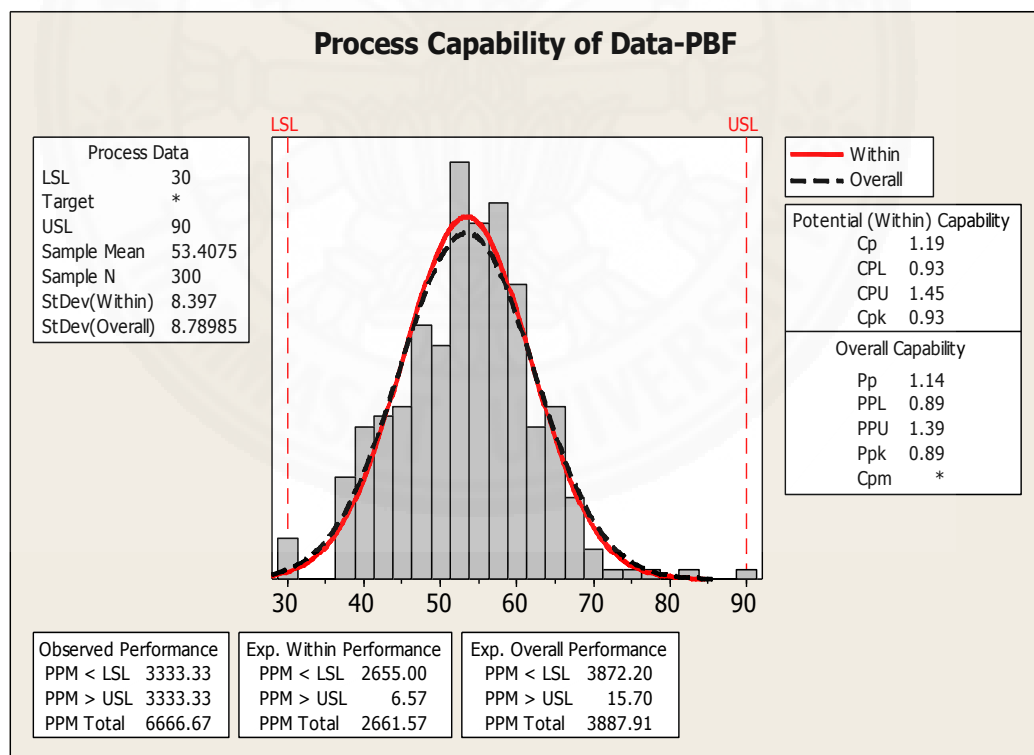
จากการสุ่มตรวจข้อมูลค่าแรงดึงย้อนกลับ (Peel back force) ณ บริษัทกรณีศึกษา ในช่วงเดือนกันยายน 2558 ถึง กุมภาพันธ์ 2559 ซึ่งข้อมูลจากการสุ่มตรวจได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าเฉลี่ย (Average) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (Process capability index; C_{pk}) ซึ่งผลที่ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 และกราฟแสดงการกระจายของค่าแรงดึงย้อนกลับได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 3.5

ตารางที่ 3.4

ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (C_{pk}) ในสภาวะการทำงานปัจจุบัน (ก่อนการปรับปรุง)

ข้อกำหนดของค่าแรงดึงย้อนกลับ	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ
60 ± 30 gram	53.4075	8.78985	0.93

จากตารางที่ 3.4 และภาพที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าในสภาวะการทำงานปัจจุบันค่าแรงดึงย้อนกลับของ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 53.4075 gram ซึ่งยังมีค่าเฉลี่ยของน้อยกว่าค่าเป้าหมายที่ 60 gram และค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการมีค่าเท่ากับ 0.93 ซึ่งยังมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดของบริษัทที่ตั้งไว้โดยต้องมีค่ามากกว่า 1.67



ภาพที่ 3.5 กราฟการกระจายของค่าแรงดึงย้อนกลับของ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 mm ในสภาวะการทำงานปัจจุบัน ช่วงเดือนกันยายน 2558 – กุมภาพันธ์ 2559

ที่มา: Minitab version 15

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นเพื่อทำการวิเคราะห์และแก้ปัญหาของเสีย ที่เกิดขึ้นจากการซีลในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ โดยผู้วิจัยจะมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการนำหลักการทางสถิติมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล เพื่อหาระดับของปัจจัยที่ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด และเพื่อเพิ่มค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการของ Cover tape และ Carrier tape ที่มีความกว้าง 16 มิลลิเมตร ให้ผ่านข้อกำหนดของบริษัทโดยต้องมีค่ามากกว่า 1.67 โดยอาศัยการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติและการออกแบบการทดลอง

3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่น่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ด้วย C&E matrix และ FMEA

ในขั้นตอนนี้ จะเป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนด โดยทำการระดมความคิดเห็นของทีมงาน ซึ่งเป็นผู้ที่มีประสบการณ์และมีความเชี่ยวชาญในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ของบริษัทกรณีศึกษา จากนั้นจะนำเอาเครื่องมือทางสถิติที่เรียกว่า แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล (C&E matrix) และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต (FMEA) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์หาสาเหตุที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดในเบื้องต้น เพื่อกำหนดให้เป็นปัจจัยที่จะนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลอง และเพื่อใช้ในการกำหนดระดับปัจจัยที่จะใช้ในการออกแบบการทดลองด้วย

3.4 ขั้นตอนการทำการทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1}) เพื่อทำการกรองปัจจัยให้เหลือแต่ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

เมื่อได้ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจากหัวข้อที่ 3.3 แล้ว ในขั้นตอนนี้จะเป็นการค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญทั้งปัจจัยที่มีผลทางตรง (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1} Fractional factorial design) ซึ่งการทดลองนี้จะมีจุดมุ่งหมายเพื่อกลั่นกรองปัจจัยต่างๆ (Screening factors) ที่สงสัยจากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิตออกไปก่อน เพื่อให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจริงๆ เท่านั้น

เมื่อได้ทำการออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1}) เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การดำเนินการทดลองตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น

เมื่อได้ผลการทดลองครบถ้วนจากการออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1}) แล้ว จึงนำผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab version 15 และสรุปผล ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ใช้วิธีการสถิติเชิงวิศวกรรม เพื่อให้ได้ผลการทดลองและข้อสรุปจากการทดลอง ซึ่งจะทำได้ข้อสรุปว่า ปัจจัยใดที่มีนัยสำคัญต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด

3.6 ขั้นตอนการทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^k) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของกระบวนการ

หลังจากที่ได้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดอย่างมีนัยสำคัญจากการกรองปัจจัยแล้ว ในขั้นตอนนี้จะนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญมาทำการทดลอง เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของกระบวนการ จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (2^k Full factorial design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป คือ การออกแบบที่ประกอบไปด้วย k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 2 ระดับ ระดับของปัจจัยแต่ละตัวอยู่ที่ “ต่ำ” และ “สูง” ซึ่งจะต้องทำการทดลองทั้งหมด $2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$ การทดลอง เมื่อได้ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (2^k) เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การดำเนินการทดลองตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

3.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระบวนการ

เมื่อได้ผลการทดลองครบถ้วนจากการทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^k) แล้ว จึงนำผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab version 15 และสรุปผล ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ใช้วิธีการสถิติเชิงวิศวกรรมเพื่อให้ได้ผลการทดลองและข้อสรุปจากการ

ทดลอง ซึ่งจะทำให้ได้ข้อสรุปว่าความสัมพันธ์ของกระบวนการเป็นเชิงเส้นตรงหรือเชิงเส้นโค้ง โดยพิจารณา ดังนี้

1. หากความสัมพันธ์ของกระบวนการเป็นเชิงเส้นตรง จะทำการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยโดยใช้การวิเคราะห์จากผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k)
2. หากความสัมพันธ์ของกระบวนการเป็นเชิงเส้นโค้ง จะทำการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยใช้การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

3.8 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

ในขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย (Optimization) ที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยอยู่ทั้งหมด 4 วิธี เพื่อเปรียบเทียบผลของค่าแรงดึงย้อนกลับ หากพบวิธีการใดที่ให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด จะเลือกค่าพารามิเตอร์จากวิธีนั้นๆ มาใช้ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ที่เครื่องจักรที่โรงงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

3.8.1 วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error method) โดยการใช้ฟังก์ชัน Response optimizer ของโปรแกรม Minitab version 15

3.8.2 วิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest descent method)

3.8.3 วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming)

3.8.4 วิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear programming)

หลังจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีดังกล่าว หากพบว่าวิธีการใดให้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ 60 gram มากที่สุด ผู้วิจัยจะเลือกค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยจากวิธีการนั้น มาเป็นข้อกำหนดในการปฏิบัติงาน

3.9 ขั้นตอนการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล

หลังจากได้ระดับของค่าพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยจากหัวข้อที่ 3.8 ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล เพื่อพิสูจน์ว่าค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจากการทำงานจริงจะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยหรือไม่ โดยจะทำการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) เพื่อทำการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด และตัวสถิติทดสอบที่เหมาะสมแล้วหาจุดวิกฤตเพื่อกำหนดบริเวณปฏิเสธ H_0 ให้สอดคล้องกับ H_1 คือ

1 sample T และทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้ง ($n=30$) ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) เมื่อได้ผลการทดลองแล้ว จะทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab version 15 หากไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ นั่นคือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจากการทดลองในเครื่องจักรที่โรงงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดมีความถูกต้องและแม่นยำ

3.10 ขั้นตอนการทำการเปรียบเทียบระหว่างสภาวะการทำงานเดิมกับสภาวะการทำงานใหม่

ในขั้นตอนนี้ จะเป็นการสรุปผลการดำเนินงานทั้งหมดที่ผ่านมา ซึ่งผู้วิจัยจะต้องนำระดับพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการหาค่าที่ดีที่สุด ไปใช้ในสภาพการปฏิบัติงานจริงของการผลิต และเป็นมาตรฐานการทำงาน หลังจากนั้นจะทำการปรับปรุงกระบวนการของพนักงาน จัดโปรแกรมฝึกอบรมและควบคุมพนักงานให้ปฏิบัติตามมาตรฐานนั้น และทำการเก็บข้อมูลเพื่อมาประเมินค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (C_{pk}) หลังจากการปรับปรุงเพื่อเปรียบเทียบระหว่างสภาวะการทำงานเดิมกับสภาวะการทำงานใหม่

3.11 บทสรุป

การวิจัยในครั้งนี้ ได้แบ่งส่วนออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกจะเป็นการค้นหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด ซึ่งเป็นวิธีการกรองปัจจัย (Screening factor) ด้วยแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล FMEA และการออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{k-1}) เพื่อทำการกรองปัจจัยที่เหลือแต่ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ สำหรับส่วนที่สอง คือ การทดลองเพื่อค้นหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^k) และทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 4 วิธี และเลือกวิธีที่ให้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด ซึ่งจะทำให้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่ผู้วิจัยได้ตั้งไว้ คือ สามารถหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด และสามารถเพิ่มค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการให้ผ่านข้อกำหนดของบริษัท คือ ต้องมากกว่า 1.67

จากขั้นตอนที่กล่าวถึงในบทนี้ เป็นการแสดงให้เห็นถึงลำดับขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาได้อย่างเป็นระบบ และมีความถูกต้อง ตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ซึ่งจะมีการแสดงให้เห็นผลของการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากขั้นตอนวิธีการวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่างๆ ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ และได้มีการบันทึกผลการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่างๆ สำหรับในบทนี้ แสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงานตามขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 3 สามารถแสดงรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยและผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัย ได้ดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

ในการระดมสมองจากหลายแผนกที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ วิศวกรฝ่ายกระบวนการ (Process engineer) วิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ (Quality engineer) วิศวกรฝ่ายผลิตภัณฑ์ (Product engineer) ทำให้ได้สาเหตุที่จะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม คือ

1. ใช้ Part ผิด
2. ใช้วัสดุดิบผิด
3. ไม่ทำตามข้อกำหนด
4. การ Setting เครื่องจักรในตำแหน่งการซีลไม่เหมาะสม
5. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการซีลไม่เหมาะสม
6. Carrier tape ไม่เหมาะสม
7. Cover tape ไม่เหมาะสม

4.1.1 แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

หลังจากได้สาเหตุที่จะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม จึงได้นำมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล (Cause and effect matrix; C&E matrix) ดังนี้

(1) ขั้นตอนการวิเคราะห์ C&E matrix

- ระบุตัวแปรตอบสนอง

- ระบุรายละเอียดปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม โดยพิจารณาจากปัจจัย 4 ด้าน คือ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วิธีการ (Method) และวัตถุดิบ (Material) และให้คะแนนความสำคัญระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง โดยคะแนนมีสเกล 0-10 ดังนี้

0 คือ ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง

1 คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองน้อย

5 คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองปานกลาง

10 คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองมาก

- รวบรวมคะแนนที่ได้ในแต่ละปัจจัยนำเข้า แล้วนำไปจัดลำดับความสำคัญปัจจัยนำเข้าที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองโดยแผนภาพพารेटโต

(2) ผลจากการวิเคราะห์ C&E matrix ของปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะได้ปัจจัยที่มีผลทั้งหมด 19 ปัจจัย

ตารางที่ 4.1

แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

Rating of Process Input			10	รวม
Matrix scoring 10 = สูง 5 = ปานกลาง 1 = ต่ำ 0 = ไม่มีความสัมพันธ์			ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนด หรือไม่เหมาะสม (รอยซีลยังมีลักษณะปกติ)	
คน (Man)				
ใช้ Part ผิด	1	ใช้ความหนาของใบมีดผิด	10	100
ใช้วัตถุดิบผิด	2	ใช้ Cover tape ผิดชนิด	10	100
	3	ใช้ Cover tape ที่หมดอายุการใช้งาน	10	100
	4	ใช้ Carrier tape ที่หมดอายุการใช้งาน	5	50

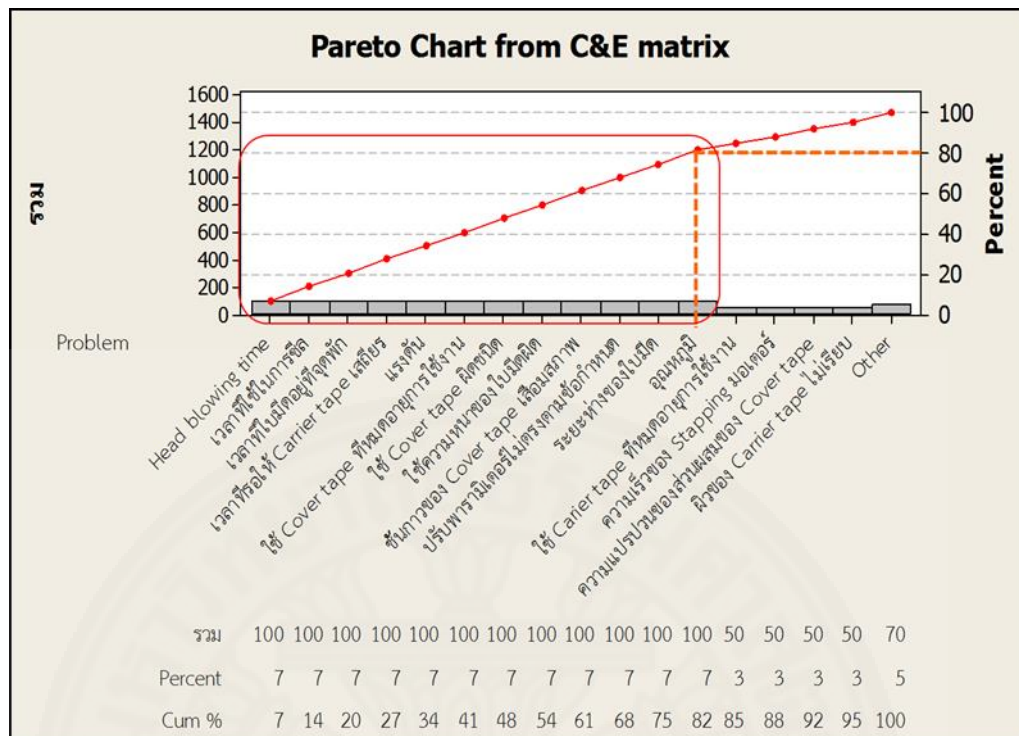
ตารางที่ 4.1

แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล (ต่อ)

Rating of Process Input		10	รวม	
Matrix scoring 10 = สูง 5 = ปานกลาง 1 = ต่ำ 0 = ไม่มีความสัมพันธ์		ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนด หรือไม่เหมาะสม (รอยซีลยังมีลักษณะปกติ)		
เครื่องจักร (Machine)				
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการซีลไม่เหมาะสม	5	อุณหภูมิ	10	100
	6	แรงดัน	10	100
	7	เวลาที่ใช้ในการซีล	10	100
	8	Head blowing time	10	100
	9	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	10	100
	10	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	10	100
การ Setting เครื่องจักรในตำแหน่งการซีลไม่เหมาะสม	11	ระยะห่างของใบมีด	10	100
	12	ระยะห่างของ Sealing track	5	50
	13	ความเร็วของ Stapping มอเตอร์	5	50
	14	ระยะห่างของ Supply Cover tape	1	10
วิธีการ (Method)				
ไม่ทำตามข้อกำหนด	15	ปรับพารามิเตอร์ไม่ตรงตามข้อกำหนด	10	100
วัตถุดิบ (Material)				
Carrier tape ไม่เหมาะสม	16	ผิวของ Carrier tape ไม่เรียบ	5	50
	17	ความแปรปรวนของส่วนผสมของ Carrier tape	1	10
Cover tape ไม่เหมาะสม	18	ชั้นกาวของ Cover tape เสื่อมสภาพ	10	100
	19	ความแปรปรวนของส่วนผสมของ Cover tape	5	50

หลังจากนั้นจึงนำคะแนนรวมที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองของปัจจัยทั้ง 19 ปัจจัยไปจัดลำดับความสำคัญตามหลักพาเรโต 80 เปอร์เซ็นต์ ตามภาพที่ 4.1 ซึ่งจากแผนภาพพาเรโต จะเหลือปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม ทั้งหมด 12 ปัจจัยที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อดังนี้

- (1) ใช้ความหนาของใบมีดผิด
- (2) ใช้ Cover tape ผิดชนิด
- (3) ใช้ Cover tape ที่หมดอายุการใช้งาน
- (4) Head blowing time
- (5) เวลาที่ใช้ในการซีล
- (6) เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก
- (7) เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร
- (8) แรงดัน
- (9) อุณหภูมิ
- (10) ระยะห่างของใบมีด
- (11) ปรับพารามิเตอร์ไม่ตรงตามข้อกำหนด
- (12) ชั้นกาวของ Cover tape เสื่อมสภาพ



ภาพที่ 4.1 แผนภาพพาเรโตจากแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล
ที่มา: Minitab version 15

4.1.2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต

หลังจากการกรองปัจจัยจากแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล จะได้สาเหตุที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสมทั้งหมด 12 ปัจจัย ดังนั้น จึงได้นำปัจจัยเหล่านั้นมาวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต (Failure mode and effect analysis; FMEA) ดังนี้

(1) ขั้นตอนการวิเคราะห์ FMEA โดยการประเมิน Mode ของ FMEA จากการระดมสมองจากทีมงานและพิจารณาจาก ความรุนแรง (Severity: S) ความถี่ของโอกาสที่จะเกิดขึ้น (Occurrence: O) ความสามารถในการตรวจสอบ (Detection: D) ซึ่งการประเมิน Mode ของความล้มเหลวนั้นเป็นตัวเลข มีสเกล 1-10 เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย

(2) แนวคิดและวิธีการวิเคราะห์ จากตารางที่ 2.3 เกณฑ์การให้คะแนน FMEA ได้นำมาวิเคราะห์ FMEA ของปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสมและโดยแนวคิดและวิธีการวิเคราะห์จากการระดมสมองของทีมงานมี ดังนี้

- ความรุนแรงจากปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสมนั้น จะส่งผลให้เกิด Customer complaint และลูกค้าไม่พึงพอใจในผลิตภัณฑ์ได้ ดังนี้

หากค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซึลน้อยกว่าค่ามาตรฐาน อาจส่งผลให้รอยซึลเผยอขึ้นในภายหลังจากการซึล อันเนื่องมาจากการขนส่ง หรือสภาพแวดล้อม เป็นต้น

หากค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซึลมากกว่าค่ามาตรฐาน อาจจะทำให้รอยซึลติดแน่นจนเกินไป ส่งผลให้ลูกค้าไม่สามารถเปิดฝักเพื่อนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานได้ เป็นต้น

จากความรุนแรงนี้อาจจะนำไปสู่การ Degrade ผลิตภัณฑ์ได้ แต่ผลกระทบดังกล่าว ยังไม่ส่งผลต่อความปลอดภัยและกฎหมายข้อบังคับของรัฐบาล ดังนั้น คณะกรรมการจึงอยู่ที่ 6 คะแนน

- ความถี่ของโอกาสที่จะเกิดขึ้นของปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนดจากข้อมูลใน NCR ทั้ง 29 ฉบับ พบว่าไม่สามารถหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาได้ ซึ่งสาเหตุจะเป็นเพียงข้อสันนิษฐาน (Potential Root Cause) ว่าเกิดจากการปรับตั้งพารามิเตอร์และระยะห่างของใบมีดไม่เหมาะสม ซึ่งใน NCR ได้ระบุวิธีการแก้ไขปัญหา (Action) เพื่อให้ได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซึลอยู่ในข้อกำหนดเหมือนเดิม โดยจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ และปรับตั้งค่าเครื่องจักรอยู่ 4 ปัจจัย ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 การปรับค่าพารามิเตอร์ของ 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาที่ใช้ในการซึล โดยอาจจะปรับเพียงปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง หรือทั้ง 3 ปัจจัยไปพร้อมๆกัน

กรณีที่ 2 การปรับระยะห่างของใบมีดไปพร้อมๆ กับการปรับค่าพารามิเตอร์ของ 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาที่ใช้ในการซึล ซึ่งในกรณีนี้จะมีการปรับระยะห่างของใบมีด และค่าพารามิเตอร์พร้อมกันเสมอ และการปรับค่าพารามิเตอร์และระยะห่างของใบมีด จะปรับตามลักษณะและอาการของของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง และใช้ประสบการณ์หรือการประมาณการในการปรับ ดังนั้น จึงสามารถสรุปคะแนนของความถี่ของโอกาสที่จะเกิดขึ้นของปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนดได้ ดังตารางที่ 4.2

- ความสามารถในการตรวจสอบ หากพิจารณาเกณฑ์การให้คะแนน FMEA จากตารางที่ 2.3 จะได้คะแนนในแต่ละหัวข้อ แสดงดังตารางที่ 4.3

(3) ผลจากการวิเคราะห์ FMEA ของปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซึลไม่ผ่านข้อกำหนดและไม่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.2

การวิเคราะห์ความถี่ของโอกาสที่จะเกิดขึ้นของปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านข้อกำหนดหรือไม่
เหมาะสม

Potential Cause from FMEA		จำนวนจุด หรือตัวไอซี ที่เสียหาย	Potential Cause from NCR (%)	Potential Cause from NCR (PPM)	Occur Score
ใช้ Part ผิด	ใช้ความหนาของใบมีด ผิด	0	0	0	1
ใช้วัสดุติดผิด	ใช้ Cover tape ผิด ชนิด	0	0	0	1
	ใช้ Cover tape ที่ หมดอายุการใช้งาน	0	0	0	1
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการซีล ไม่เหมาะสม	อุณหภูมิ	1418500	0.04	356.23	4
	แรงดัน				4
	เวลาที่ใช้ในการซีล				4
	Head blowing time				4
	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร				4
	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก				4
การ Setting เครื่องจักรใน ตำแหน่งการซีลไม่ เหมาะสม	ระยะห่างของใบมีด	356500	0.01	89.53	3
ไม่ทำตามข้อกำหนด	ปรับพารามิเตอร์ไม่ตรง ตามข้อกำหนด	0	0	0	1
Cover tape ไม่เหมาะสม	ชั้นกาวของ Cover tape เสื่อมสภาพ	0	0	0	1

ที่มา: NCR จากค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนด จากบริษัทกรณีศึกษาเดือนมกราคม 2557 –
กันยายน 2558

ตารางที่ 4.3

การวิเคราะห์ความสามารถในการตรวจสอบของปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านข้อกำหนดหรือไม่
เหมาะสม

Potential Cause from FMEA		Detect score	หมายเหตุ
ใช้ Part ผิด	ใช้ความหนาของใบมีด ผิด	1	ไม่สามารถประกอบชุดซีลได้จึงสามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดได้อย่างชัดเจน
ใช้วัสดุติดผิด	ใช้ Cover tape ผิดชนิด	2	สามารถแยกด้วยสีของ Cover tape จึงสามารถตรวจสอบหาความผิดพลาดได้
	ใช้ Cover tape ที่หมดอายุการใช้งาน	2	มีการควบคุมการจ่ายแบบ FIFO และมีการตรวจสอบวันหมดอายุก่อนการเบิกจ่าย จึงสามารถตรวจสอบหาความผิดพลาดได้
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการซีลไม่เหมาะสม	อุณหภูมิ	9	มีการควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนดของบริษัท แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้นได้เลย
	แรงดัน	9	
	เวลาที่ใช้ในการซีล	9	
	Head blowing time	9	มีการควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนดของเครื่องจักร แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้นได้เลย
	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	9	
เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	9		
การ Setting เครื่องจักรในตำแหน่งการซีลไม่เหมาะสม	ระยะห่างของใบมีด	9	มีการควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนดของเครื่องจักร แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้นได้เลย
ไม่ทำตามข้อกำหนด	ปรับพารามิเตอร์ไม่ตรงตามข้อกำหนด	2	มีการตรวจสอบพารามิเตอร์ทุกต้นกะให้ตรงตามข้อกำหนด จึงสามารถตรวจสอบหาความผิดพลาดได้
Cover tape ไม่เหมาะสม	ชั้นกาวของ Cover tape เสื่อมสภาพ	5	มีการสุ่มตรวจจากแผนก SQE มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในการจัดเก็บ จึงสามารถตรวจสอบหาความผิดพลาดได้

ที่มา: บริษัทกรณีสึกษา 2558

ตารางที่ 4.4

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต

Process Description/ Function	Potential Failure Mode	Potential Effect (s) of Failure	S E V	Potential Cause(s)/ Mechanism (s) of Failure	O c c u r	Current Process Controls Prevention	D e t e c t	RPN
คน (Man)	ใช้ Part ผิด	ค่าแรงตั้ง ย้อนกลับไม่ ผ่านตาม ข้อกำหนด	6	ใช้ความหนา ของใบมีดผิด	1	ไม่สามารถ ประกอบชุดซีลได้	1	6
	ใช้วัสดุติดผิด	ค่าแรงตั้ง ย้อนกลับไม่ ผ่านตาม ข้อกำหนด	6	ใช้ Cover tape ผิดชนิด	1	สามารถแยกด้วยสี ของ Cover tape	2	12
			6	ใช้ Cover tape ที่ หมดอายุการ ใช้งาน	1	มีการควบคุมการ จ่ายแบบ FIFO และมีการ ตรวจสอบวัน หมดอายุก่อนการ เบิกจ่าย	2	12
เครื่องจักร (Machine)	พารามิเตอร์ที่ ใช้ในการซีลไม่ เหมาะสม	ค่าแรงตั้ง ย้อนกลับ ของรอยซีล ไม่ผ่านตาม ข้อกำหนด หรือไม่ เหมาะสม	6	อุณหภูมิ	4	มีการควบคุมค่า ของพารามิเตอร์ จากข้อกำหนดของ บริษัท แต่ไม่ สามารถตรวจสอบ หาผลกระทบที่ เกิดขึ้น	9	216
			6	แรงดัน	4		9	216
			6	เวลาที่ใช้ใน การซีล	4		9	216
			6	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	4		9	216
			6	Head blowing time	4		9	216

ตารางที่ 4.4

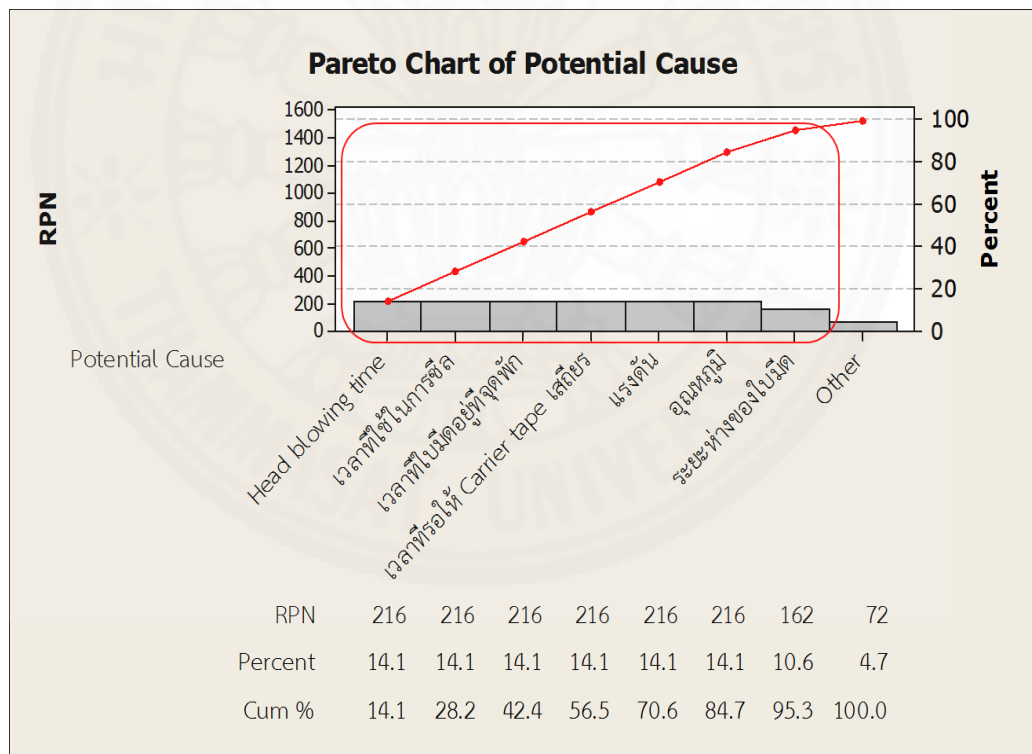
การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต (ต่อ)

Process Description/ Function	Potential Failure Mode	Potential Effect (s) of Failure	S	Potential Cause(s)/ Mechanism(s) of Failure	O	Current Process Controls Prevention	D	RPN
เครื่องจักร (Machine)	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการซีลไม่เหมาะสม	ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม	6	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	4	มีการควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนดของเครื่องจักร แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้น	9	216
	การ Setting เครื่องจักร ในตำแหน่งการซีลไม่เหมาะสม	ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม	6	ระยะห่างของใบมีด	3	การควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนดของเครื่องจักร แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้น	9	162
วิธีการ (Method)	ไม่ทำตามข้อกำหนด	ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม	6	ปรับพารามิเตอร์ไม่ตรงตามข้อกำหนด	1	มีการตรวจสอบพารามิเตอร์ทุกต้นกะให้ตรงตามข้อกำหนด	2	12
วัตถุดิบ (Material)	Cover tape	ค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนด	6	ชั้นกาวของ Cover tape เสื่อมสภาพ	1	มีการสุ่มตรวจจากแผนก SOE มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในการจัดเก็บ	5	30

ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา 2558

หลังจากนั้นจึงนำคะแนนรวม RPN จากการคำนวณผลคูณของ S x O x D ของปัจจัย ทั้ง 12 ปัจจัยไปจัดลำดับความสำคัญตามหลักการพาเรโต 80 เปอร์เซ็นต์ ตามภาพที่ 4.2 จากแผนภาพพาเรโตจะได้สาเหตุหรือปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม ทั้งหมด 7 ปัจจัยที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อ ดังนี้

- (1) อุณหภูมิ
- (2) แรงดัน
- (3) เวลาที่ใช้ในการซีล
- (4) ระยะห่างของใบมีด
- (5) Head blowing time
- (6) เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร
- (7) เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก



ภาพที่ 4.2 แผนภาพพาเรโตจากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต
ที่มา: Minitab version 15

4.2 การทำการทดลองเชิงเศษส่วนแฟกทอเรียล (2^{7-1}) เพื่อทำการกรองปัจจัยให้เหลือแต่ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

เมื่อได้ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จึงได้นำปัจจัยเหล่านั้นมาทำการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional factorial design) แบบ (2^{7-1}) ซึ่งการทดลองนี้จะมีจุดมุ่งหมายเพื่อกลั่นกรองปัจจัยต่างๆ (Screening factors) ที่สงสัยจากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิตออกไปก่อน เพื่อให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจริงๆ เท่านั้น และผู้วิจัยต้องการที่จะศึกษาถึงผลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ในแบบ 2 ปัจจัยจนถึงอิทธิพลร่วมทั้ง 7 ปัจจัยด้วย

สำหรับรายละเอียดของปัจจัยแต่ละตัวที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดมีทั้งหมด 7 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 4.5 ดังนี้

1. ปัจจัยที่ได้จากแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต ซึ่งประกอบไปด้วย 7 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ แรงดัน เวลาที่ใช้ในการขีด ระยะห่างของใบมีด Head blowing time เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก ซึ่งเป็นปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด และเป็นปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{k-1})

2. สัญลักษณ์ของแต่ละปัจจัย เป็นการกำหนดขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab version 15

3. ข้อกำหนดของบริษัท/ข้อกำหนดของเครื่องจักร สำหรับปัจจัยที่เป็นข้อกำหนดของบริษัท ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการขีด แรงดัน และอุณหภูมิ ซึ่งได้กำหนดมาจากการทำการทดลองของวิศวกรก่อนหน้า สำหรับปัจจัยที่เป็นข้อกำหนดของเครื่องจักร ได้แก่ Head blowing time เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร และระยะห่างของใบมีด ได้กำหนดมาจากผู้ผลิตเครื่องจักรชนิดที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบที่ใช้ในบริษัทกรณีศึกษา

4. ระดับปกติของเครื่องจักร คือ ระดับที่ใช้ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ เฉพาะเครื่องจักรชนิดที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ โดยแต่ละเครื่องจักรจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันอยู่ 4 ปัจจัย คือ เวลาที่ใช้ในการขีด แรงดัน อุณหภูมิ และระยะห่างของใบมีด สำหรับปัจจัยอื่นๆ อีก 3 ปัจจัย คือ Head blowing time เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักจะถูกตั้งค่าให้มีค่าเท่ากันทั้งหมดทุกเครื่อง

5. ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยจะยึดระดับต่ำสุดและระดับสูงสุด จากข้อกำหนดของบริษัทและข้อกำหนดของเครื่องจักร

6. หน่วยวัดของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 4.5

ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบ
เศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1})

ปัจจัย	สัญลักษณ์ ของปัจจัย	ข้อกำหนดของ บริษัท/ ข้อกำหนดของ เครื่องจักร	ระดับปกติ ของ เครื่องจักร	ระดับปัจจัยที่ใช้ใน การออกแบบ ทดลอง		หน่วย
				ระดับ ต่ำ (-1)	ระดับ สูง (1)	
อุณหภูมิ	A	200 ± 10	190-210	190	210	°C
แรงดัน	B	2.0 ± 0.5	1.5-2.5	1.5	2.5	bar
เวลาที่ใช้ในการขีด	C	50 ± 20	50-70	30	70	ms
ระยะห่างของใบมีด	D	0.5 - 1	0.5-1	0.5	1	mm
Head blowing time	E	45 ± 20	45	25	65	ms
เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	F	50 ± 20	15	5	25	ms
เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	G	175 ± 125	150	50	300	ms

4.2.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1})

(1) กำหนดระดับของปัจจัยที่จะใช้ในการออกแบบการทดลอง ดังตารางที่ 4.5 โดยการกำหนดระดับของปัจจัยที่จะพิจารณาจากข้อกำหนดของบริษัท และข้อกำหนดของเครื่องจักรที่ใช้ในสภาวะการทำงานปัจจุบัน

(2) กำหนดการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ (2^{7-1}) ซึ่งจะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 64 การทดลอง และมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ดังนั้น การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจะมีการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 128 การทดลอง ซึ่งจะใช้โปรแกรม Minitab version 15 ช่วยในการจัดลำดับและขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง ซึ่งจะได้แผนการทดลอง ดังภาพที่ 4.3 และแผนการทดลองตามตารางที่ 4.6

จากภาพที่ 4.3 เมื่อใช้โปรแกรม Minitab version 15 ออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) จะเกิดคู่แฝดแฝง (Aliases) ของแต่ละปัจจัย เพราะการออกแบบที่ไม่เต็มรูปแบบจะต้องพิจารณาคู่แฝดแฝงควบคู่กันด้วย

Fractional Factorial Design			
Factors:	7	Base Design:	7, 64
Resolution:			VII
Runs:	128	Replicates:	2
Fraction:			1/2
Blocks:	1	Center pts (total):	0
Design Generators: G = ABCDEF			
Alias Structure			
I + ABCDEFG	BE + ACDFG	ABF + CDEG	BDE + ACFG
A + BCDEFG	BF + ACDEG	ABG + CDEF	BDF + ACEG
B + ACDEFG	BG + ACDEF	ACD + BEFG	BDG + ACEF
C + ABDEFG	CD + ABEFG	ACE + BDFG	BEF + ACDG
D + ABCEFG	CE + ABDFG	ACF + BDEG	BEG + ACDF
E + ABCDFG	CF + ABDEG	ACG + BDEF	BFG + ACDE
F + ABCDEG	CG + ABDEF	ADE + BCFG	CDE + ABFG
G + ABCDEF	DE + ABCFG	ADF + BCEG	CDF + ABEG
AB + CDEFG	DF + ABCEG	ADG + BCEF	CDG + ABEF
AC + BDEFG	DG + ABCEF	AEF + BCDG	CEF + ABDG
AD + BCEFG	EF + ABCDG	AEG + BCDF	CEG + ABDF
AE + BCDFG	EG + ABCDF	AFG + BCDE	CFG + ABDE
AF + BCDEG	FG + ABCDE	BCD + AEFG	DEF + ABCG
AG + BCDEF	ABC + DEFG	BCE + ADFG	DEG + ABCF
BC + ADEFG	ABD + CEFG	BCF + ADEG	DFG + ABCE
BD + ACEFG	ABE + CDFG	BCG + ADEF	EFG + ABCD

ภาพที่ 4.3 แผนการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ (2^{7-1})

ที่มา: Minitab version 15

(3) กำหนดพารามิเตอร์ที่สนใจหรือตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด

(4) ทำการทดลองโดยตั้งค่าตามตารางที่ 4.6 โดยที่ลำดับของการทดลองเป็นไปแบบสุ่ม และเรียงลำดับการทดลองในคอลัมน์ Run order เพื่อลดผลของสิ่งรบกวน (Experimental error or residuals) ที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างทำการทดลอง

ตารางที่ 4.6

ลำดับของการทดลองและผลของค่าแรงดึงแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากการออกแบบทดลองแบบ
เศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1})

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	F	G	Peel back force
23	1	1	1	190	2.5	70	0.5	65	5	50	50.78
125	2	1	1	190	1.5	70	1	65	25	300	58.25
1	3	1	1	190	1.5	30	0.5	25	5	300	33.23
8	4	1	1	210	2.5	70	0.5	25	5	50	77.83
72	5	1	1	210	2.5	70	0.5	25	5	50	76.39
134	6	0	1	200	2	50	0.75	45	15	175	53.89
33	7	1	1	190	1.5	30	0.5	25	25	50	25.23
106	8	1	1	210	1.5	30	1	25	25	50	36.89
44	9	1	1	210	2.5	30	1	25	25	300	59.1
42	10	1	1	210	1.5	30	1	25	25	50	36
67	11	1	1	190	2.5	30	0.5	25	5	50	30.26
103	12	1	1	190	2.5	70	0.5	25	25	50	50.54
32	13	1	1	210	2.5	70	1	65	5	50	77.69
48	14	1	1	210	2.5	70	1	25	25	50	77.29
78	15	1	1	210	1.5	70	1	25	5	50	59.82
28	16	1	1	210	2.5	30	1	65	5	300	58.23
20	17	1	1	210	2.5	30	0.5	65	5	50	52.45
117	18	1	1	190	1.5	70	0.5	65	25	50	50.23
38	19	1	1	210	1.5	70	0.5	25	25	50	59.36
130	20	0	1	200	2	50	0.75	45	15	175	53.78
108	21	1	1	210	2.5	30	1	25	25	300	59.02
65	22	1	1	190	1.5	30	0.5	25	5	300	34.83
129	23	0	1	200	2	50	0.75	45	15	175	52.57
126	24	1	1	210	1.5	70	1	65	25	50	58.26
4	25	1	1	210	2.5	30	0.5	25	5	300	58.38
15	26	1	1	190	2.5	70	1	25	5	50	50.12

ตารางที่ 4.6

ลำดับของการทดลองและผลของค่าแรงดึงแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากการออกแบบทดลองแบบ
เศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	F	G	Peel back force
77	27	1	1	190	1.5	70	1	25	5	300	59.56
45	28	1	1	190	1.5	70	1	25	25	50	49.51
37	29	1	1	190	1.5	70	0.5	25	25	300	59.21
66	30	1	1	210	1.5	30	0.5	25	5	50	36.24
113	31	1	1	190	1.5	30	0.5	65	25	300	33.66
40	32	1	1	210	2.5	70	0.5	25	25	300	89.39
87	33	1	1	190	2.5	70	0.5	65	5	50	50.89
92	34	1	1	210	2.5	30	1	65	5	300	58.15
18	35	1	1	210	1.5	30	0.5	65	5	300	53.95
95	36	1	1	190	2.5	70	1	65	5	300	52.89
46	37	1	1	210	1.5	70	1	25	25	300	65.34
122	38	1	1	210	1.5	30	1	65	25	300	52.85
86	39	1	1	210	1.5	70	0.5	65	5	50	60.9
81	40	1	1	190	1.5	30	0.5	65	5	50	25.56
118	41	1	1	210	1.5	70	0.5	65	25	300	66.59
56	42	1	1	210	2.5	70	0.5	65	25	50	76.46
30	43	1	1	210	1.5	70	1	65	5	300	65.85
128	44	1	1	210	2.5	70	1	65	25	300	88.45
133	45	0	1	200	2	50	0.75	45	15	175	53.24
97	46	1	1	190	1.5	30	0.5	25	25	50	25.86
36	47	1	1	210	2.5	30	0.5	25	25	50	51.9
16	48	1	1	210	2.5	70	1	25	5	300	90.23
57	49	1	1	190	1.5	30	1	65	25	50	26.22
127	50	1	1	190	2.5	70	1	65	25	50	50.23
2	51	1	1	210	1.5	30	0.5	25	5	50	35.55
61	52	1	1	190	1.5	70	1	65	25	300	59.4

ตารางที่ 4.6

ลำดับของการทดลองและผลของค่าแรงดึงแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากการออกแบบทดลองแบบ
เศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	F	G	Peel back force
93	53	1	1	190	1.5	70	1	65	5	50	50.22
123	54	1	1	190	2.5	30	1	65	25	300	35.78
109	55	1	1	190	1.5	70	1	25	25	50	50.59
110	56	1	1	210	1.5	70	1	25	25	300	65.9
22	57	1	1	210	1.5	70	0.5	65	5	50	59.43
60	58	1	1	210	2.5	30	1	65	25	50	52.92
116	59	1	1	210	2.5	30	0.5	65	25	300	58.55
29	60	1	1	190	1.5	70	1	65	5	50	50.23
94	61	1	1	210	1.5	70	1	65	5	300	65.42
135	62	0	1	200	2	50	0.75	45	15	175	53.09
101	63	1	1	190	1.5	70	0.5	25	25	300	58.73
90	64	1	1	210	1.5	30	1	65	5	50	35.31
7	65	1	1	190	2.5	70	0.5	25	5	300	53.98
96	66	1	1	210	2.5	70	1	65	5	50	76.64
74	67	1	1	210	1.5	30	1	25	5	300	53.56
49	68	1	1	190	1.5	30	0.5	65	25	300	33.87
124	69	1	1	210	2.5	30	1	65	25	50	52.63
107	70	1	1	190	2.5	30	1	25	25	50	29.81
80	71	1	1	210	2.5	70	1	25	5	300	89.6
10	72	1	1	210	1.5	30	1	25	5	300	52.32
34	73	1	1	210	1.5	30	0.5	25	25	300	53.78
104	74	1	1	210	2.5	70	0.5	25	25	300	89.45
12	75	1	1	210	2.5	30	1	25	5	50	51.85
98	76	1	1	210	1.5	30	0.5	25	25	300	53.95
68	77	1	1	210	2.5	30	0.5	25	5	300	59.4
89	78	1	1	190	1.5	30	1	65	5	300	33.72

ตารางที่ 4.6

ลำดับของการทดลองและผลของค่าแรงดึงแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากการออกแบบทดลองแบบ
เศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	F	G	Peel back force
63	79	1	1	190	2.5	70	1	65	25	50	50.43
73	80	1	1	190	1.5	30	1	25	5	50	25.11
111	81	1	1	190	2.5	70	1	25	25	300	53.12
5	82	1	1	190	1.5	70	0.5	25	5	50	49.77
54	83	1	1	210	1.5	70	0.5	65	25	300	66.06
52	84	1	1	210	2.5	30	0.5	65	25	300	58.96
39	85	1	1	190	2.5	70	0.5	25	25	50	50.76
21	86	1	1	190	1.5	70	0.5	65	5	300	59.1
79	87	1	1	190	2.5	70	1	25	5	50	50.11
55	88	1	1	190	2.5	70	0.5	65	25	300	53.78
43	89	1	1	190	2.5	30	1	25	25	50	30.35
51	90	1	1	190	2.5	30	0.5	65	25	50	29.45
84	91	1	1	210	2.5	30	0.5	65	5	50	52.43
11	92	1	1	190	2.5	30	1	25	5	300	36.89
6	93	1	1	210	1.5	70	0.5	25	5	300	65.34
76	94	1	1	210	2.5	30	1	25	5	50	51.37
9	95	1	1	190	1.5	30	1	25	5	50	26.54
3	96	1	1	190	2.5	30	0.5	25	5	50	30.57
105	97	1	1	190	1.5	30	1	25	25	300	34.06
14	98	1	1	210	1.5	70	1	25	5	50	60.5
102	99	1	1	210	1.5	70	0.5	25	25	50	60.45
132	100	0	1	200	2	50	0.75	45	15	175	53.35
131	101	0	1	200	2	50	0.75	45	15	175	52.25
50	102	1	1	210	1.5	30	0.5	65	25	50	35.48
99	103	1	1	190	2.5	30	0.5	25	25	300	35.38
13	104	1	1	190	1.5	70	1	25	5	300	59.39

ตารางที่ 4.6

ลำดับของการทดลองและผลของค่าแรงดึงแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากการออกแบบทดลองแบบ
เศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	F	G	Peel back force
62	105	1	1	210	1.5	70	1	65	25	50	59.6
35	106	1	1	190	2.5	30	0.5	25	25	300	35.9
112	107	1	1	210	2.5	70	1	25	25	50	77.94
120	108	1	1	210	2.5	70	0.5	65	25	50	77.33
41	109	1	1	190	1.5	30	1	25	25	300	33.76
83	110	1	1	190	2.5	30	0.5	65	5	300	35.26
75	111	1	1	190	2.5	30	1	25	5	300	36.06
70	112	1	1	210	1.5	70	0.5	25	5	300	66.3
47	113	1	1	190	2.5	70	1	25	25	300	53.68
64	114	1	1	210	2.5	70	1	65	25	300	90.28
53	115	1	1	190	1.5	70	0.5	65	25	50	49.56
85	116	1	1	190	1.5	70	0.5	65	5	300	58.39
26	117	1	1	210	1.5	30	1	65	5	50	35.08
24	118	1	1	210	2.5	70	0.5	65	5	300	89.36
58	119	1	1	210	1.5	30	1	65	25	300	53.37
27	120	1	1	190	2.5	30	1	65	5	50	29.56
114	121	1	1	210	1.5	30	0.5	65	25	50	36.94
19	122	1	1	190	2.5	30	0.5	65	5	300	35.24
59	123	1	1	190	2.5	30	1	65	25	300	35.9
100	124	1	1	210	2.5	30	0.5	25	25	50	51.94
17	125	1	1	190	1.5	30	0.5	65	5	50	25.09
115	126	1	1	190	2.5	30	0.5	65	25	50	30.34
91	127	1	1	190	2.5	30	1	65	5	50	30.87
71	128	1	1	190	2.5	70	0.5	25	5	300	53.34
69	129	1	1	190	1.5	70	0.5	25	5	50	50.32
82	130	1	1	210	1.5	30	0.5	65	5	300	53.24

ตารางที่ 4.6

ลำดับของการทดลองและผลของค่าแรงดึงแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล จากการออกแบบทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	F	G	Peel back force
119	131	1	1	190	2.5	70	0.5	65	25	300	52.67
25	132	1	1	190	1.5	30	1	65	5	300	33.4
31	133	1	1	190	2.5	70	1	65	5	300	53.23
88	134	1	1	210	2.5	70	0.5	65	5	300	88.29
121	135	1	1	190	1.5	30	1	65	25	50	25.44

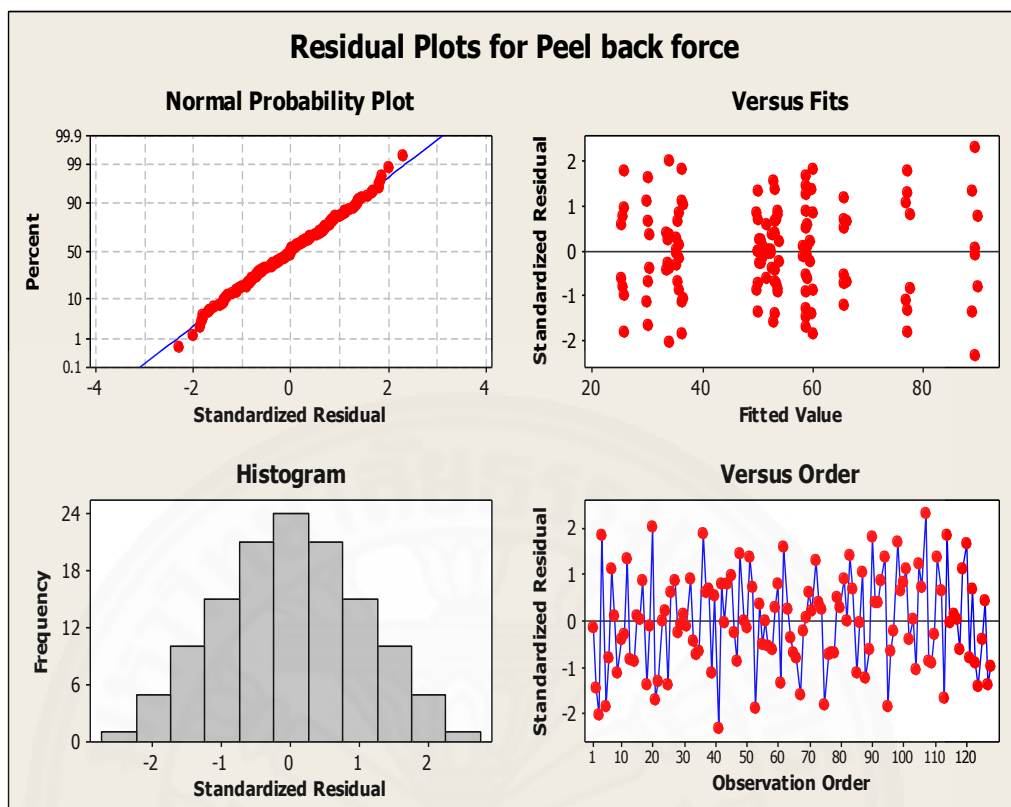
ที่มา: Minitab version 15

(5) หลังจากทำการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำ Carrier tape ไปวัดค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ซึ่งแสดงวิธีการวัดไว้ในภาคผนวก ก และจะได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลหรือค่าผลตอบสนอง จากการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) หลังจากนั้น ได้นำค่าผลตอบสนองที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) โดยจะวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab version 15

4.2.2 ผลการทดลองจากการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1})

ผลการทดลองจากการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) โดยใช้โปรแกรม Minitab version 15 ในการวิเคราะห์ สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model adequacy checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งผลการตรวจสอบ แสดงดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 Residual plots ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล จากการออกแบบการทดลองแบบ
เศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ (2^{7-1}) ที่มา: Minitab version 15

จากภาพที่ 4.4 ทำให้สามารถสรุปได้ว่า

- การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ
- การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่อิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่า ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน
- การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance stability) ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Fitted value พบว่า σ^2 ของค่าส่วนตกค้าง ในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสรุปว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลของการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ และสามารถนำข้อมูลนี้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้

(2) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่า ไม่มีความผิดปกติของการทดลองเกิดขึ้นและข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จึงได้นำข้อมูลจากโปรแกรม Minitab version 15 ดังภาพที่ 4.5 มาทำการวิเคราะห์โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) สามารถสรุปได้ว่า

- ปัจจัยที่มีผลโดยตรง (Main effect) ต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด คือ A, B, C และ G และปัจจัยที่ไม่มีผลโดยตรงต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด คือ D, E และ F

- ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง (2 Way interaction effect) คือ A^*B , A^*C , A^*D , A^*G , B^*C , B^*G และ C^*G และปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง คือ A^*D , A^*E , A^*F , B^*D , B^*E , B^*F , C^*D , C^*E , C^*F , D^*E , D^*F , D^*G , E^*F , E^*G และ F^*G

- ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 3 ทาง (3 Way Interaction Effect) คือ A^*B^*C , A^*B^*G , A^*C^*G , B^*C^*G และ D^*E^*F ซึ่ง D^*E^*F เป็นคู่แฝดแฝง (Aliases) ของ $A^*B^*C^*G$ ซึ่ง A, B, C และ G เป็นปัจจัยที่มีผลโดยตรง (Main effect) ทั้งหมด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงตัดอิทธิพลร่วม 3 ทางของปัจจัย D^*E^*F ออกไป และปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลร่วม 3 ทาง คือ A^*B^*D , A^*C^*D , A^*B^*E , A^*C^*E , A^*D^*E , A^*B^*F , A^*C^*F , A^*D^*F , A^*E^*F , A^*D^*G , A^*E^*G , A^*F^*G , B^*C^*D , B^*C^*E , B^*D^*E , B^*C^*F , B^*D^*F , B^*E^*F , B^*D^*G , B^*E^*G , B^*F^*G , C^*D^*E , C^*D^*F , C^*E^*F , C^*D^*G , C^*E^*G , C^*F^*G , D^*E^*G , D^*F^*G และ E^*F^*G

Factorial Fit: Peel back force versus A, B, C, D, E, F, G						
Estimated Effects and Coefficients for Peel back force (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		51.920	0.049	1050.750	0.000	
A	19.271	9.635	0.049	195.000	0.000	
B	7.975	3.988	0.049	80.700	0.000	
C	22.434	11.217	0.049	227.010	0.000	
D	-0.031	-0.015	0.049	-0.310	0.758	
E	-0.190	-0.095	0.049	-1.920	0.059	
F	0.039	0.020	0.049	0.400	0.692	
G	8.483	4.241	0.049	85.840	0.000	
A*B	7.658	3.829	0.049	77.500	0.000	
A*C	0.565	0.282	0.049	5.710	0.000	
A*D	-0.113	-0.057	0.049	-1.150	0.255	
A*E	0.027	0.013	0.049	0.270	0.789	
A*F	0.127	0.064	0.049	1.290	0.203	
A*G	2.073	1.037	0.049	20.980	0.000	
B*C	0.950	0.475	0.049	9.610	0.000	
B*D	0.117	0.059	0.049	1.190	0.240	
B*E	0.008	0.004	0.049	0.080	0.937	
B*F	0.004	0.002	0.049	0.040	0.967	
B*G	-1.676	-0.838	0.049	-16.960	0.000	
C*D	-0.007	-0.004	0.049	-0.070	0.942	
C*E	-0.028	-0.014	0.049	-0.280	0.779	
C*F	-0.135	-0.068	0.049	-1.370	0.176	
C*G	-0.971	-0.485	0.049	-9.820	0.000	
D*E	-0.088	-0.044	0.049	-0.890	0.378	
D*F	0.050	0.025	0.049	0.500	0.617	
D*G	0.006	0.003	0.049	0.060	0.955	
E*F	0.057	0.029	0.049	0.580	0.565	
E*G	-0.124	-0.062	0.049	-1.250	0.215	
F*G	0.025	0.013	0.049	0.250	0.801	
A*B*C	3.886	1.943	0.049	39.320	0.000	
A*B*D	0.207	0.103	0.049	2.090	0.140	
A*C*D	0.144	0.072	0.049	1.450	0.151	
A*B*E	0.014	0.007	0.049	0.150	0.885	
A*C*E	-0.091	-0.046	0.049	-0.920	0.359	
A*D*E	-0.124	-0.062	0.049	-1.250	0.215	
A*B*F	0.037	0.018	0.049	0.370	0.710	
A*C*F	-0.121	-0.061	0.049	-1.230	0.224	
A*D*F	0.048	0.024	0.049	0.480	0.632	
A*E*F	-0.079	-0.040	0.049	-0.800	0.425	
A*B*G	0.482	0.241	0.049	4.870	0.000	
A*C*G	-0.463	-0.231	0.049	-4.680	0.000	
A*D*G	-0.069	-0.035	0.049	-0.700	0.487	
A*E*G	0.071	0.036	0.049	0.720	0.475	
A*F*G	0.022	0.011	0.049	0.220	0.823	
B*C*D	-0.036	-0.018	0.049	-0.370	0.715	
B*C*E	-0.063	-0.032	0.049	-0.640	0.525	
B*D*E	0.104	0.052	0.049	1.050	0.298	
B*C*F	0.119	0.059	0.049	1.200	0.234	
B*D*F	0.122	0.061	0.049	1.230	0.222	
B*E*F	0.037	0.018	0.049	0.370	0.710	
B*C*G	1.683	0.842	0.049	17.030	0.000	
B*D*G	0.113	0.056	0.049	1.140	0.258	
B*E*G	-0.188	-0.094	0.049	-1.900	0.062	
B*F*G	-0.013	-0.007	0.049	-0.140	0.892	
C*D*E	-0.046	-0.023	0.049	-0.470	0.641	
C*D*F	-0.156	-0.078	0.049	-1.570	0.120	
C*E*F	-0.069	-0.035	0.049	-0.700	0.485	
C*D*G	0.070	0.035	0.049	0.710	0.479	
C*E*G	0.057	0.029	0.049	0.580	0.565	
C*F*G	0.073	0.036	0.049	0.740	0.464	
D*E*F	2.574	1.287	0.049	26.040	0.000	
D*E*G	0.000	0.000	0.049	0.000	0.997	
D*F*G	-0.129	-0.065	0.049	-1.310	0.196	
E*F*G	0.172	0.086	0.049	1.740	0.086	

S = 0.559032 PRESS = 80.0044
R-Sq = 99.94% R-Sq(pred) = 99.77% R-Sq(adj) = 99.89%

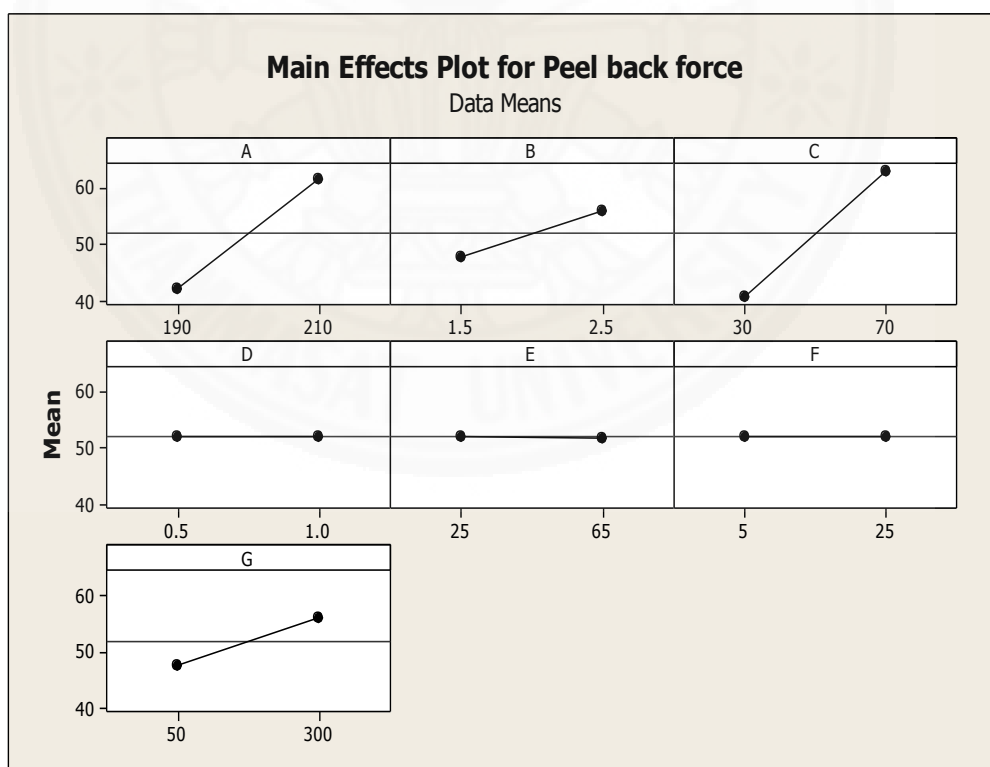
ภาพที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอ

เรียล (2^{7-1}) ที่มา: Minitab version 15

(3) การวิเคราะห์กราฟของผลหลัก (Main effect) ที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดด้วยโปรแกรม Minitab version 15 สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) และแสดงเป็นแผนภาพของอิทธิพลจากปัจจัยหลัก (Main effect) ต่างๆ ที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด ได้ดังภาพที่ 4.6

จากภาพที่ 4.6 จะพบว่าเส้นกราฟของปัจจัย A (อุณหภูมิ), B (แรงดัน), C (เวลาที่ใช้ในการขีด) และ G (เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก) จะมีลักษณะชันลง ซึ่งหมายความว่า เมื่อระดับปัจจัยมีค่าต่ำจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดต่ำ ในทางกลับกัน หากระดับปัจจัยมีค่าสูงก็จะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดสูงไปด้วย ซึ่งจะเห็นความแตกต่างของกราฟระหว่างจุดต่ำสุดและจุดสูงสุดอย่างชัดเจน

และจากภาพที่ 4.6 จะพบว่าเส้นกราฟของปัจจัย D (ระยะห่างของใบมีด), E (Head blowing time) และ F (เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างจุดต่ำสุดและจุดสูงสุด ซึ่งหมายความว่า เมื่อเปลี่ยนระดับของปัจจัยก็ไม่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด



ภาพที่ 4.6 กราฟของผลหลักที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด

ที่มา: Minitab version 15

จากข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปผลการทดลองของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) ได้ว่า ปัจจัยที่มีผลโดยตรงและปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 และ 3 ทางต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) มีอยู่เพียง 4 ปัจจัยเท่านั้น คือ A (อุณหภูมิ), B (แรงดัน), C (เวลาที่ใช้ในการซีล) และ G (เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก) สำหรับปัจจัยที่เหลืออีก 3 ปัจจัย คือ D (ระยะห่างของใบมีด), E (Head blowing time) และ F (เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร) ไม่มีผลใดๆ ต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7

ผลจากการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ (2^{7-1})

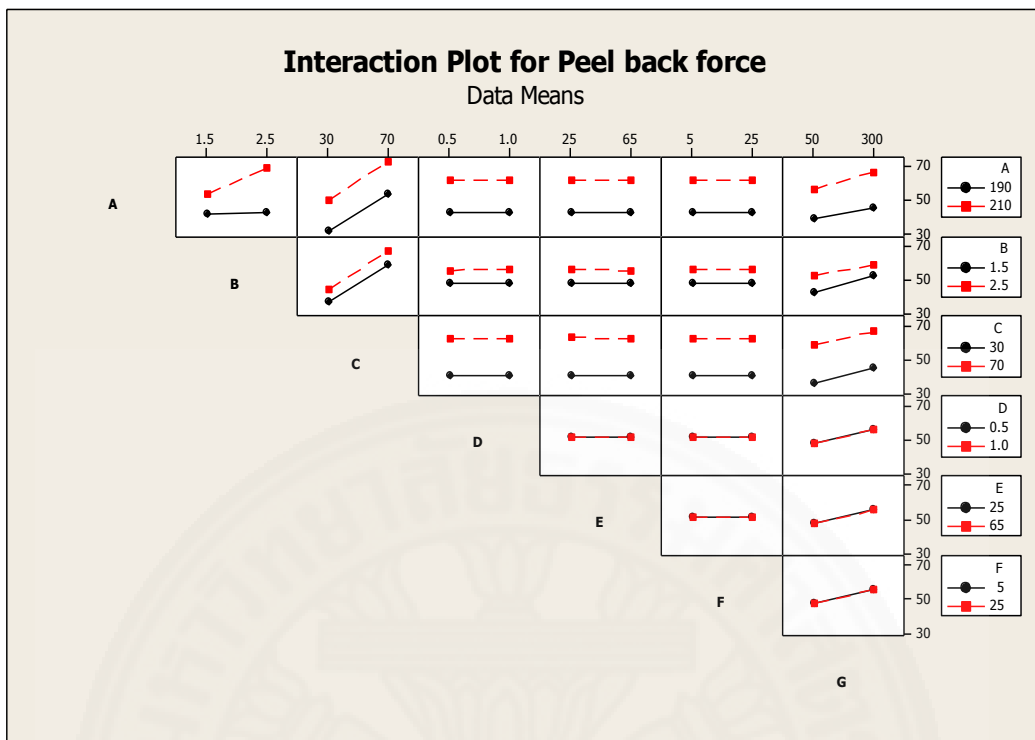
ปัจจัยหลัก	สัญลักษณ์ของปัจจัย	P-value	ผล
อุณหภูมิ	A	0.000	Significant
แรงดัน	B	0.000	Significant
เวลาที่ใช้ในการซีล	C	0.000	Significant
ระยะห่างของใบมีด	D	0.758	Not Significant
Head blowing time	E	0.059	Not Significant
เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	F	0.692	Not Significant
เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	G	0.000	Significant

(4) การวิเคราะห์กราฟของอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล จากผลการทดลองของการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) ด้วยโปรแกรม Minitab version 15 สามารถแสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัยต่อค่าแรงดึงย้อนกลับ ได้ดังภาพที่ 4.7 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง (2 Way interaction effect) คือ $A*B$, $A*C$, $A*D$, $A*G$, $B*C$, $B*G$ และ $C*G$ มีผลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเส้นกราฟมีลักษณะไม่ขนานกัน

- ปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง คือ $A*D$, $A*E$, $A*F$, $B*D$, $B*E$, $B*F$, $C*D$, $C*E$, $C*F$, $D*E$, $D*F$, $D*G$, $E*F$, $E*G$ และ $F*G$ เนื่องจากเส้นกราฟมีลักษณะขนานกันอย่างชัดเจน

ซึ่งการวิเคราะห์กราฟของอิทธิพลร่วมมีผลตรงกันกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ในหัวข้อที่ 4.2.2 และภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.7 กราฟของอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล
ที่มา: Minitab version 15

4.3 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น จากการกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่น่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลด้วย C&E matrix ในหัวข้อที่ 4.1.1 จะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้การระดมสมองและความคิดเห็นของทีมงานซึ่งเป็นผู้ที่มีประสบการณ์ และมีความเชี่ยวชาญในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ของบริษัทกรณีศึกษา และจะเหลือปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสมทั้งหมด 12 ปัจจัย

หลังจากนั้น จึงนำทั้ง 12 ปัจจัยจากการวิเคราะห์ด้วย C&E matrix มาทำการวิเคราะห์ด้วย FMEA ในหัวข้อที่ 4.1.2 ซึ่งจะพิจารณาถึง ความรุนแรง (Severity; S) ความถี่ของโอกาสที่จะเกิดขึ้น (Occurrence; O) ความสามารถในการตรวจสอบ (Detection; D) ตามหลักการในการประเมิน Mode ของความล้มเหลว ในตารางที่ 2.3 โดยใช้การระดมสมองและความคิดเห็นของทีมงาน และใช้ข้อมูลในอดีตแปลงเป็นสารสนเทศของแนวโน้มการเกิดของความถี่ของโอกาสที่จะ

เกิดขึ้น มาใช้การวิเคราะห์หาสาเหตุที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนด ซึ่งจะเหลือปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลอยู่ทั้งหมด 7 ปัจจัย

ขั้นตอนสุดท้ายของการกรองปัจจัย คือ การนำปัจจัยทั้ง 7 ปัจจัยจากการวิเคราะห์ด้วย FMEA มาทำการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งปัจจัยที่มีผลทางตรง (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ซึ่งมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 64 การทดลอง และมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง ดังนั้น การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) จะมีการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 128 การทดลอง หลังจากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการสถิติเชิงวิศวกรรม พบว่ามีเพียง 4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ทั้งทางตรงและอิทธิพลร่วมคือ A (อุณหภูมิ), B (แรงดัน), C (เวลาที่ใช้ในการซีล) และ G (เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก) สำหรับปัจจัยที่เหลืออีก 3 ปัจจัย คือ D (ระยะห่างของใบมีด), E (Head blowing time) และ F (เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร) ไม่มีผลใดๆ ต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลเลย

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ทำการกรองปัจจัย (Screening factor) จากการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) และได้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญแล้ว จึงได้นำปัจจัยเหล่านั้นไปทำการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^4) เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลต่อไป

4.4 การทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^4) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของกระบวนการ

จากผลของการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล พบว่ามีอยู่ทั้งหมด 4 ปัจจัยด้วยกัน คือ A (อุณหภูมิ), B (แรงดัน), C (เวลาที่ใช้ในการซีล) และ G (เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก) ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ จึงได้นำปัจจัยเหล่านั้นมาทำการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^4) เนื่องจากผู้วิจัยยังต้องการตรวจสอบว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงหรือเชิงเส้นโค้ง เพื่อที่จะเลือกวิธีในการวิเคราะห์และหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

สำหรับรายละเอียดของระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (2^4) แสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งประกอบด้วย

1. ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ที่จะใช้ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^4)

2. สัญลักษณ์ของแต่ละปัจจัย เป็นการกำหนดขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab version 15

3. ข้อกำหนดของบริษัท/ข้อกำหนดของเครื่องจักร สำหรับปัจจัยที่เป็นข้อกำหนดของบริษัท ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาที่ใช้ในการซีล ซึ่งได้กำหนดมาจากการทำการทดลองของวิศวกรก่อนหน้านี้ สำหรับปัจจัยที่เป็นข้อกำหนดของเครื่องจักร ได้แก่ เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก ได้กำหนดมาจากผู้ผลิตเครื่องจักรชนิดที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบที่ใช้ในบริษัทกรณีศึกษา

4. ระดับปกติของเครื่องจักร คือ ระดับที่ใช้ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ เฉพาะเครื่องจักรชนิดที่ใช้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ

5. ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยจะยึดระดับต่ำสุด ระดับกลาง และระดับสูงสุดจากข้อกำหนดของบริษัทและข้อกำหนดของเครื่องจักร

6. หน่วยวัดของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 4.8

ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (2^4)

ปัจจัย	สัญลักษณ์ของปัจจัย	ข้อกำหนดของบริษัท/ข้อกำหนดของเครื่องจักร	ระดับปกติของเครื่องจักร	ระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบทดลอง			หน่วย
				ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (1)	
อุณหภูมิ	A	200 ± 10	190-210	190	200	210	°C
แรงดัน	B	2.0 ± 0.5	1.5-2.5	1.5	2.0	2.5	bar
เวลาที่ใช้ในการซีล	C	50 ± 20	50-70	30	50	70	ms
เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	G	175 ± 125	150	50	175	300	ms

4.4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4)

(1) กำหนดระดับของปัจจัยที่จะใช้ในการออกแบบการทดลอง ดังตารางที่ 4.8 โดยการกำหนดระดับของปัจจัยจะพิจารณาจากข้อกำหนดของบริษัท และข้อกำหนดของเครื่องจักรที่ใช้ในสภาวะการทำงานปัจจุบัน

(2) กำหนดการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) ซึ่งจะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ $2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ การทดลอง โดยการวิจัยนี้จะมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง รวมการ

ทดลองเท่ากับ 32 การทดลอง และเพิ่มการทดลองตรงจุดศูนย์กลาง (Center point) อีก 4 การทดลองตามจำนวนของปัจจัย ดังนั้น จึงมีการทดลองรวมจำนวนทั้งสิ้น 36 การทดลอง และเป็นการไม่สิ้นเปลืองวัสดุดิบ เวลา และแรงงานมากเกินไป ซึ่งจะใช้โปรแกรม Minitab version 15 ช่วยในจัดลำดับและขั้นตอนในการออกแบบการทดลองจะได้แผนการทดลอง ดังภาพที่ 4.8 และแผนการทดลองตามตารางที่ 4.9

Full Factorial Design			
Factors:	4	Base Design:	4, 16
Runs:	36	Replicates:	2
Blocks:	1	Center pts (total):	4
All terms are free from aliasing.			

ภาพที่ 4.8 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (2⁴)

ที่มา: Minitab version 15

(3) กำหนดพารามิเตอร์ที่สนใจหรือตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

(4) ทำการทดลองโดยตั้งค่าตามตารางที่ 4.9 โดยที่ลำดับของการทดลองเป็นไปแบบสุ่ม และเรียงลำดับการทดลองในคอลัมน์ Run Order เพื่อลดผลของสิ่งรบกวน (Experimental error or residuals) ที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างทำการทดลอง

(5) หลังจากทำการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำ Carrier tape ไปวัดค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ซึ่งแสดงวิธีการวัดไว้ในภาคผนวก ก และจะได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลหรือค่าผลตอบสนอง จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (2⁴)

(6) นำผลที่ได้หรือค่าผลตอบสนองจากการทดลองไปคำนวณโดย Minitab version 15 และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ตามหลักของการออกแบบการทดลองเพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล และตรวจสอบความสัมพันธ์ของกระบวนการ

ตารางที่ 4.9

ลำดับของการทดลองและผลของค่าแรงดึงแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากการออกแบบทดลองแบบเต็มรูป (2^4)

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	G	Peel back force
18	1	1	1	210	1.5	30	50	35.26
28	2	1	1	210	2.5	30	300	56.14
11	3	1	1	190	2.5	30	300	35.57
10	4	1	1	210	1.5	30	300	51.75
36	5	0	1	200	2	50	175	52.86
31	6	1	1	190	2.5	70	300	52.53
23	7	1	1	190	2.5	70	50	50.16
29	8	1	1	190	1.5	70	300	58.74
15	9	1	1	190	2.5	70	300	53.07
20	10	1	1	210	2.5	30	50	50.62
12	11	1	1	210	2.5	30	300	56.73
6	12	1	1	210	1.5	70	50	59.84
33	13	0	1	200	2	50	175	53.31
21	14	1	1	190	1.5	70	50	50.00
2	15	1	1	210	1.5	30	50	36.37
1	16	1	1	190	1.5	30	50	25.80
34	17	0	1	200	2	50	175	53.23
9	18	1	1	190	1.5	30	300	34.59
16	19	1	1	210	2.5	70	300	89.45
4	20	1	1	210	2.5	30	50	51.25
13	21	1	1	190	1.5	70	300	59.39
7	22	1	1	190	2.5	70	50	49.30
35	23	0	1	200	2	50	175	52.33
24	24	1	1	210	2.5	70	50	77.29
30	25	1	1	210	1.5	70	300	65.06
25	26	1	1	190	1.5	30	300	34.64
8	27	1	1	210	2.5	70	50	76.34

ตารางที่ 4.9

ลำดับของการทดลองและผลของค่าแรงดึงแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากการออกแบบทดลองแบบเต็มรูป (2^4) (ต่อ)

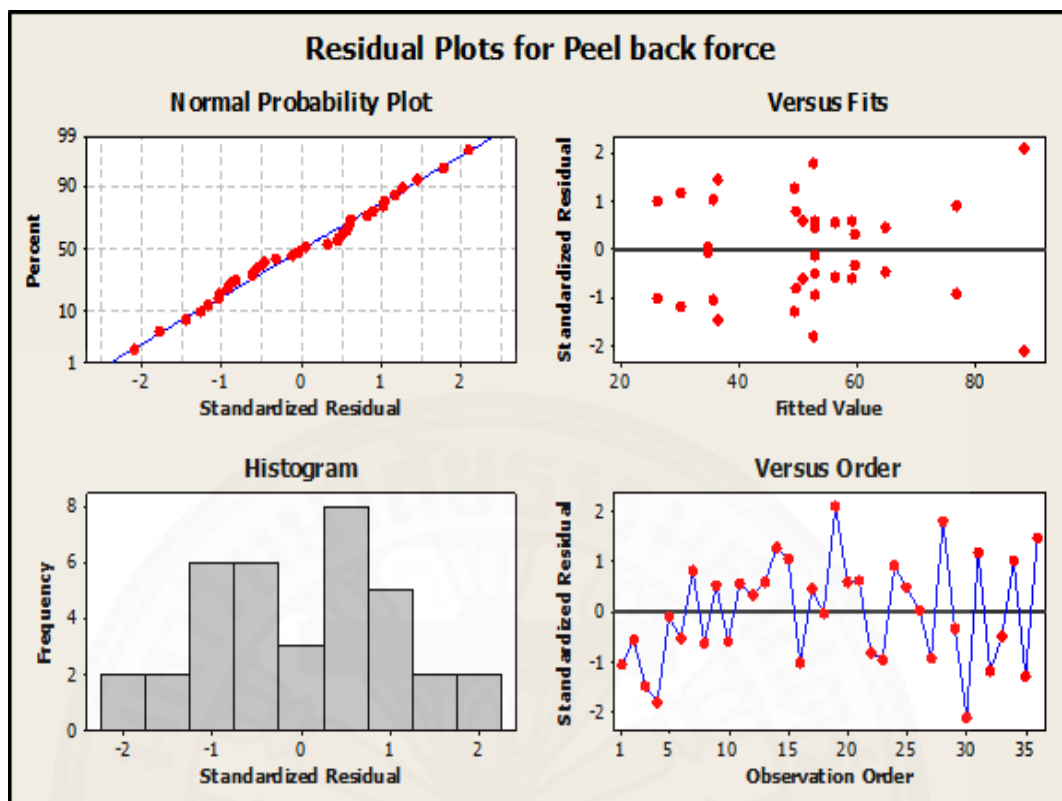
StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	G	Peel back force
26	28	1	1	210	1.5	30	300	53.63
22	29	1	1	210	1.5	70	50	59.50
32	30	1	1	210	2.5	70	300	87.24
3	31	1	1	190	2.5	30	50	30.79
19	32	1	1	190	2.5	30	50	29.55
14	33	1	1	210	1.5	70	300	64.56
17	34	1	1	190	1.5	30	50	26.88
5	35	1	1	190	1.5	70	50	48.66
27	36	1	1	190	2.5	30	300	37.11

ที่มา: Minitab version 15

4.4.2 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4)

ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) โดยใช้โปรแกรม Minitab version 15 ในการวิเคราะห์ สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model adequacy checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลการตรวจสอบ แสดงดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 Residual plots ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) ที่มา: Minitab version 15

จากภาพที่ 4.8 จะทำให้สามารถสรุปได้ว่า

- การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ
- การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่อิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่า ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน
- การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance stability) ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Fitted value พบว่า σ^2 ของค่าส่วนตกค้าง ในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสรุปว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูลนี้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้

(2) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) จากผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) โดยใช้โปรแกรม Minitab version 15 ดังภาพที่ 4.10 สามารถสรุปได้ดังนี้

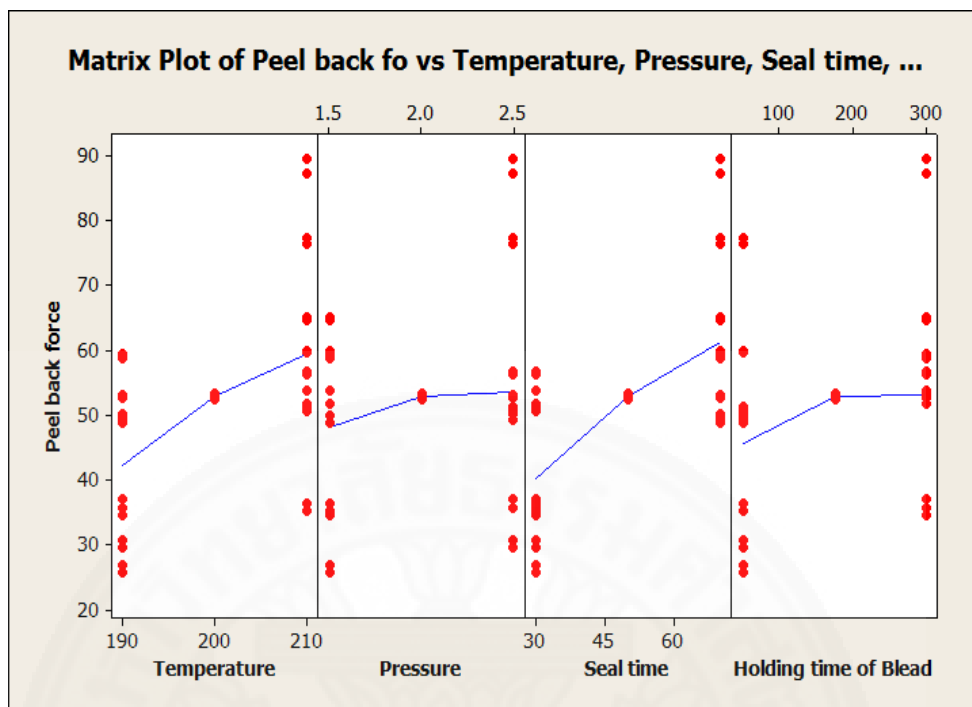
- เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 จากภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงระดับความสัมพันธ์กันของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งแต่ละปัจจัยมีความสัมพันธ์กันดีมากในระดับ 99.87 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาที่ค่า R^2_{adj} แสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันในระดับ 99.77 เปอร์เซ็นต์

- เมื่อมีการเพิ่มจุดกึ่งกลาง (Center point) อีก 1 ระดับ (Level) ของแต่ละปัจจัยที่มีนัยสำคัญ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และผลตอบสนองไม่มีลักษณะของความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง หรือกระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นโค้งอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-value ของ Curvature มีค่าเท่ากับ $0.002 < \alpha = 0.05$ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology; RSM) มาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลแทน

Factorial Fit: Peel back force versus A, B, C, G						
Estimated Effects and Coefficients for Peel back force (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		51.4941	0.1320	390.09	0.000	
A	18.3906	9.1953	0.1320	69.66	0.000	
B	7.4044	3.7022	0.1320	28.05	0.000	
C	22.1531	11.0766	0.1320	83.91	0.000	
G	8.2869	4.1434	0.1320	31.39	0.000	
A*B	7.4819	3.7409	0.1320	28.34	0.000	
A*C	1.2881	0.6441	0.1320	4.88	0.000	
A*G	1.4744	0.7372	0.1320	5.58	0.000	
B*C	1.2994	0.6497	0.1320	4.92	0.000	
B*G	-1.7194	-0.8597	0.1320	-6.51	0.000	
C*G	-0.9181	-0.4591	0.1320	-3.48	0.003	
A*B*C	4.1544	2.0772	0.1320	15.74	0.000	
A*B*G	0.4731	0.2366	0.1320	1.79	0.089	
A*C*G	-0.5081	-0.2541	0.1320	-1.92	0.069	
B*C*G	1.6506	0.8253	0.1320	6.25	0.000	
A*B*C*G	2.7906	1.3953	0.1320	10.57	0.000	
Ct Pt		1.4384	0.3960	3.63	0.002	
S = 0.746741 PRESS = 49.4397						
R-Sq = 99.87% R-Sq(pred) = 99.41% R-Sq(adi) = 99.77%						
Analysis of Variance for Peel back force (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	7619.78	7619.78	1904.95	3416.19	0.000
A	1	2705.72	2705.72	2705.72	4852.25	0.000
B	1	438.6	438.6	438.6	786.55	0.000
C	1	3926.09	3926.09	3926.09	7040.76	0.000
G	1	549.38	549.38	549.38	985.22	0.000
2-Way Interactions	6	522.39	522.39	87.07	156.14	0.000
A*B	1	447.83	447.83	447.83	803.1	0.000
A*C	1	13.27	13.27	13.27	23.8	0.000
A*G	1	17.39	17.39	17.39	31.19	0.000
B*C	1	13.51	13.51	13.51	24.22	0.000
B*G	1	23.65	23.65	23.65	42.41	0.000
C*G	1	6.74	6.74	6.74	12.09	0.003
3-Way Interactions	4	163.72	163.72	40.93	73.4	0.000
A*B*C	1	138.07	138.07	138.07	247.61	0.000
A*B*G	1	1.79	1.79	1.79	3.21	0.089
A*C*G	1	2.07	2.07	2.07	3.7	0.069
B*C*G	1	21.8	21.8	21.8	39.09	0.000
4-Way Interactions	1	62.3	62.3	62.3	111.73	0.000
A*B*C*G	1	62.3	62.3	62.3	111.73	0.000
Curvature	1	7.36	7.36	7.36	13.19	0.002
Residual Error	19	10.59	10.59	0.56		
Pure Error	19	10.59	10.59	0.56		
Total	35	8386.15				

ภาพที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (2⁴) ที่มา: Minitab version 15

- เมื่อพิจารณาลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญและค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด โดยการสร้างแผนภาพ Matrix plot เพื่อดูทิศทางของความสัมพันธ์ (Direction of the relationship) พบว่าทุกปัจจัยมีสหสัมพันธ์ทางบวก (Positive correlations) ต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด ซึ่งหมายความว่า เมื่อปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพิ่มหรือลดลง ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย ดังภาพที่ 4.11

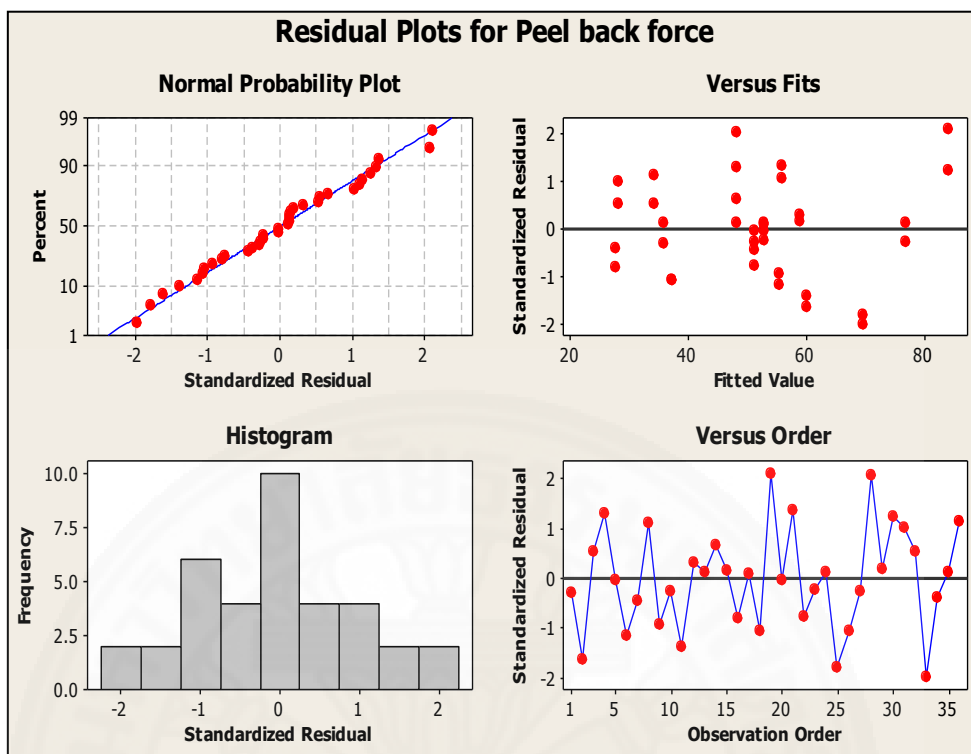


ภาพที่ 4.11 Matrix plot ระหว่างปัจจัยแต่ละปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ และค่าแรงดึงย้อนกลับ
ของรอยซีล ที่มา: Minitab version 15

4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

จากผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (2^4) ดังภาพที่ 4.10 พบว่า Curvature มีค่า P-value เท่ากับ $0.002 < \alpha = 0.05$ แสดงว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นโค้งอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองในผลการทดลองแทน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ และสรุปได้ดังนี้

(1) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model adequacy checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองซึ่งผลการตรวจสอบแสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 Residual plots ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิว
 ตอบสนอง ที่มา: Minitab version 15

จากภาพที่ 4.12 จะทำให้สามารถสรุปได้ว่า

- การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

- การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) พบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่อิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่า ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

- การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance stability) ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Fitted value พบว่า σ^2 ของค่าส่วนตกค้าง ในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสรุปว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูลนี้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้

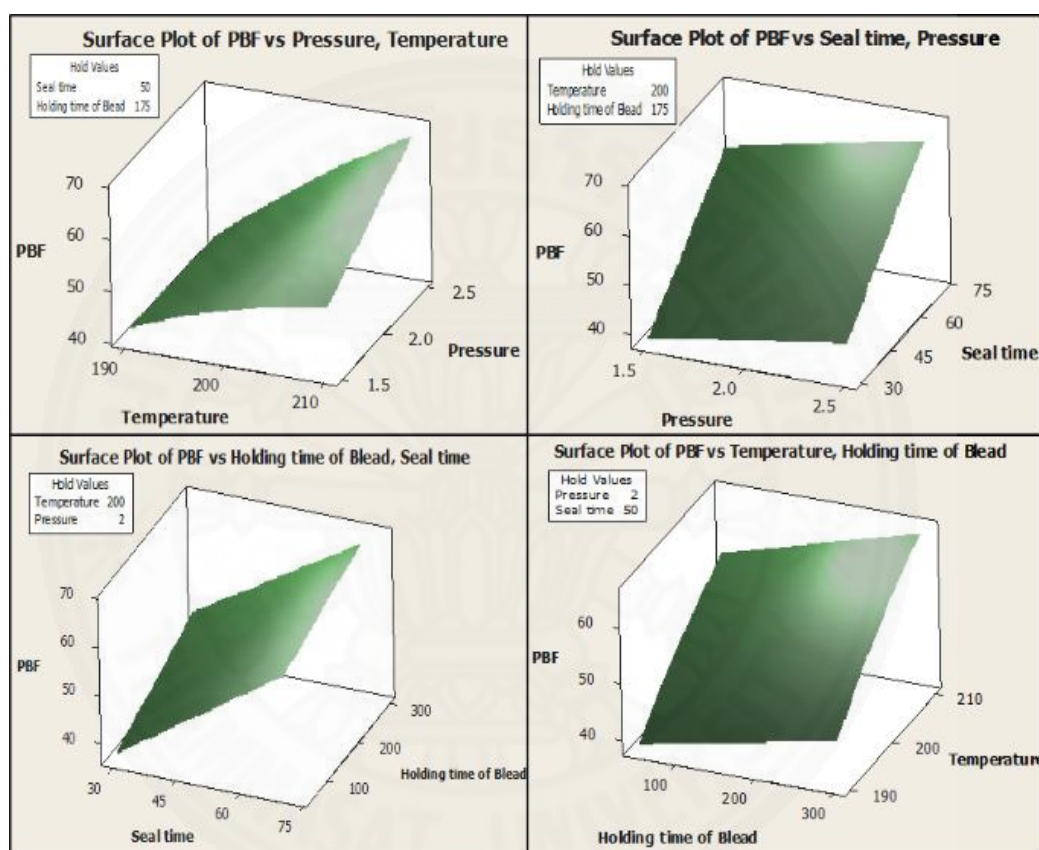
(2) การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองด้วยโปรแกรม Minitab version 15 ดังรูปที่ 4 พบว่า ปัจจัยหลัก (Main effect) ทั้ง 4 ปัจจัย ต่างมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และมีปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ระหว่าง อุณหภูมิและแรงดันที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญด้วยเช่นกัน โดยกำหนดระดับความ เชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) ดังภาพที่ 4.13

The analysis was done using coded units.						
Estimated Regression Coefficients for Peel back force						
Term	Coef	SE Coef	T	P		
Constant	52.9325	1.57	33.716	0.000		
A	9.1953	0.5551	16.566	0.000		
B	3.7022	0.5551	6.67	0.000		
C	11.0766	0.5551	19.955	0.000		
G	4.1434	0.5551	7.465	0.000		
A*A	-1.4384	1.6652	-0.864	0.396		
A*B	3.7409	0.5551	6.74	0.000		
A*C	0.6441	0.5551	1.16	0.257		
A*G	0.7372	0.5551	1.328	0.197		
B*C	0.6497	0.5551	1.17	0.253		
B*G	-0.8597	0.5551	-1.549	0.135		
C*G	-0.4591	0.5551	-0.827	0.416		
S = 3.13992 PRESS = 549.102						
R-Sq = 97.18% R-Sq(pred) = 93.45% R-Sq(adj) = 95.89%						
Analysis of Variance for Peel back force						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	11	8149.53	8149.53	740.87	75.15	0.000
Linear	4	7619.78	7619.78	1904.95	193.22	0.000
A	1	2705.72	2705.72	2705.72	274.44	0.000
B	1	438.6	438.6	438.6	44.49	0.000
C	1	3926.09	3926.09	3926.09	398.22	0.000
G	1	549.38	549.38	549.38	55.72	0.000
Square	1	7.36	7.36	7.36	0.75	0.396
A*A	1	7.36	7.36	7.36	0.75	0.396
Interaction	6	522.39	522.39	87.07	8.83	0.000
A*B	1	447.83	447.83	447.83	45.42	0.000
A*C	1	13.27	13.27	13.27	1.35	0.257
A*G	1	17.39	17.39	17.39	1.76	0.197
B*C	1	13.51	13.51	13.51	1.37	0.253
B*G	1	23.65	23.65	23.65	2.4	0.135
C*G	1	6.74	6.74	6.74	0.68	0.416
Residual Error	24	236.62	236.62	9.86		
Lack-of-Fit	5	226.02	226.02	45.2	81.07	0.000
Pure Error	19	10.59	10.59	0.56		
Total	35	8386.15				

ภาพที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

ที่มา: Minitab version 15

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยด้วยกราฟ Surface plot แสดงดังภาพที่ 4.14 เป็นกราฟที่แสดงพื้นที่ความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัย คือ ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการซีลกับแรงดัน เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักกับเวลาที่ใช้ในการซีล และอุณหภูมิกับเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก จากกราฟเมื่อปัจจัยทั้ง 4 มีการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัย จะมีผลโดยตรงกับค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.14 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยด้วยกราฟ Surface plot
ที่มา: Minitab version 15

4.6 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษามีข้อกำหนดของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลของ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร อยู่ที่ 60 ± 30 gram ซึ่งค่าเป้าหมายหรือค่าที่ดีที่สุดของค่าแรงดึงย้อนกลับที่จะไม่ทำให้เกิดปัญหาต่อรอยซีลอยู่ที่ค่าเป้าหมาย คือ 60 gram ซึ่ง

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยต้องคำนึงถึงอัตราการผลิต (Productivity) ที่จะได้จากการทำงานของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบด้วย

ดังนั้น การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ผู้วิจัยได้มีข้อกำหนดเพื่อให้ งานวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์ ดังต่อไปนี้

(1) ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซิลจะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายให้มากที่สุด คือ 60 gram ซึ่งจะเป็นเป้าหมายหลัก

(2) อัตราการผลิต (Productivity) หลังจากการปรับปรุงจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอัตราการผลิตก่อนการปรับปรุง ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการซิลจะต้องไม่เกิน 70 ms และ เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักจะต้องไม่เกิน 150 ms ซึ่งจะเป็นเป้าหมายรอง

4.6.1 อัตราการผลิตก่อนการปรับปรุง

ในงานวิจัยนี้จะให้นิยามของอัตราการผลิต (Productivity) เป็นปริมาณที่ผลิตเทียบกับเวลา นั่นคือ จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน จากกระบวนการบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะมาจากการทำงานของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ ในส่วนของการซิลเท่านั้น

สำหรับการทำงานของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบใน ส่วนของการซิล จากหัวข้อ 2.15 ในบทที่ 2 จะมีการทำงานอยู่ 3 ส่วนหลักๆ ซึ่งแต่ละส่วนจะมีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องและสามารถสรุปได้ ดังตาราง 4.10

จากตารางที่ 4.10 หากต้องการทราบอัตราการผลิต (Productivity) ของจำนวน งาน (ตัว) ต่อ 1 วัน ที่ผ่านกระบวนการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของการซิล จะสามารถคำนวณ ได้ดังนี้

$$\text{จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน} = \frac{\text{เวลาทั้งหมดใน 1 วัน}}{\text{เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของการซิล}}$$

ดังนั้น อัตราการผลิตในกระบวนการบรรจุภัณฑ์จากเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่ เป็นวงกลมในแนวระนาบก่อนการปรับปรุง จะมีดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน} &= \frac{24 \times 60 \times 60 \times 1000 \text{ ms}}{185 \text{ ms}} \\ &= 467,027 \text{ ตัวต่อ 1 วัน} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.10

เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของการซีล (ก่อนการปรับปรุง)

เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์	ปัจจัย/เวลาที่ใช้	*เวลาก่อนการปรับปรุง (ต่อจำนวนไอซี 4 ตัว)	หน่วย
การบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape	เวลาจากการวางตัวงานลง Pocket	360	ms
การเคลื่อนที่ของ Carrier tape	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ Carrier tape	145	ms
	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	15	ms
การซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape	เวลาที่ใช้ในการซีล	**70	ms
	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	150	ms
รวมเวลาต่อจำนวนไอซี 4 ตัว		740	ms
เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ ต่อ ไอซี 1 ตัว		185	ms

หมายเหตุ: * ในการซีล 1 รอบ (Cycle) จะสามารถซีลตัวไอซีได้ 4 ตัว

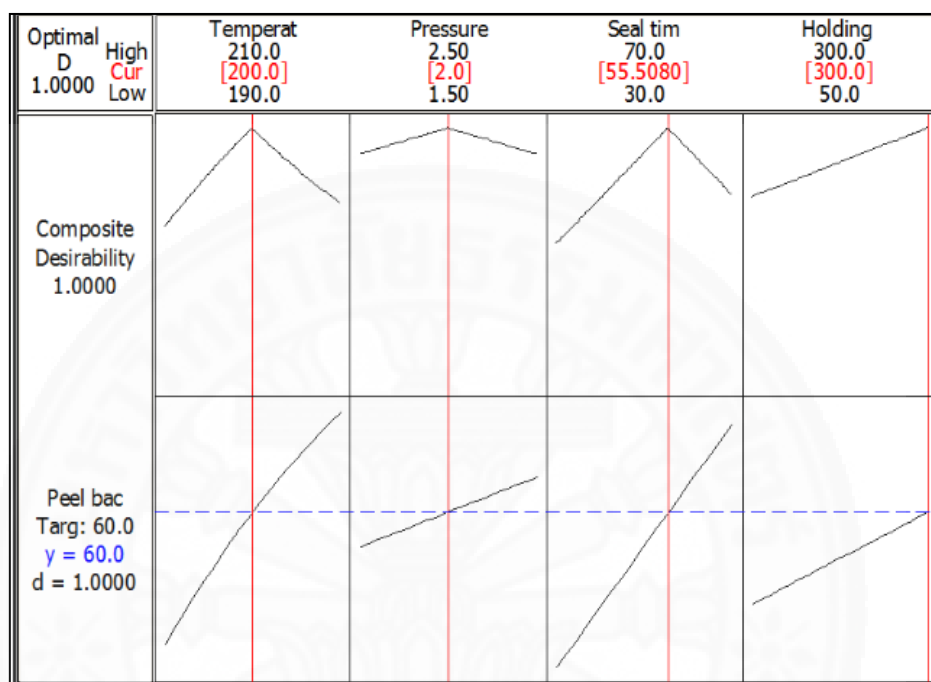
** เวลาที่ใช้ในการซีลจะมีการปรับค่าตลอดเวลาระหว่าง 30-70 ms ดังนั้น จึงใช้ค่าที่มากที่สุดในการคำนวณ

4.6.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีลองผิดลองถูก

วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error method) โดยการใช้ฟังก์ชัน Response optimizer ของโปรแกรม Minitab version 15 ซึ่งค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่ค่าเป้าหมายนี้จะให้ค่าความพึงพอใจ (Desirability; d) ของผลตอบอยู่ระหว่าง 0-1 และหากค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้จะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ด้วย หากค่าพารามิเตอร์จากการแนะนำของโปรแกรม Minitab version 15 มีความไม่เหมาะสม หรือสามารถทำได้ยากในทางปฏิบัติ จะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่ให้เหมาะสม เพื่อให้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย

ตามข้อกำหนดของบริษัทการศึกษา ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลของ Carrier tape ที่มีขนาดความกว้าง 16 mm อยู่ที่ 60 ± 30 gram แต่หากต้องการหาจุดเหมาะสมของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่ดีที่สุด คือ ค่าที่เท่ากับค่าเป้าหมายที่ 60 gram จะได้ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละ

ระดับปัจจัยจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab version 15 และมีค่าความพึงพอใจของผลตอบสนอง เท่ากับ 1 ดังภาพที่ 4.15 คือ อุณหภูมิ = 200 °C แรงดัน = 2.0 bar เวลาที่ใช้ในการซีล = 55.508 ms และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก = 300 ms



ภาพที่ 4.15 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab

ที่มา: Minitab version 15

หากพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลา นั่นคือ เวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab จะพบว่าใช้เวลารวมสูงถึง 355.508 ms ซึ่งจะมากกว่าเวลาที่ใช้ก่อนการปรับปรุงของปัจจัยทั้ง 2 คือ ประมาณ 300 ms ซึ่งเวลาดังกล่าวไม่สามารถปฏิบัติได้จริงในกระบวนการผลิต เนื่องจากการใช้ค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab ส่งผลต่ออัตราการผลิตได้ นั่นคือจะทำให้จำนวนงานที่ผ่านกระบวนการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของการซีล ต่อ 1 วัน ลดลงเหลือเพียง 243,032 ตัว (เวลาทั้งหมดใน 1 วัน / 355.508 ms)

ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย เพื่อให้ได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ 60 gram ให้มากที่สุด และใช้เวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักให้น้อยลง ซึ่งแสดงวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11

การปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก

Trial and error method	Factor					(d)	PBF	Difference from Target of PBF	หมายเหตุ	เวลา รวม	หมายเหตุ
	อุณหภูมิ (°C)	แรงดัน (bar)	เวลาที่ใช้ในการซีล (ms)	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก (ms)							
ช่วงที่	การปรับครั้งที่	200	2	55.508	300	1	60	0	ค่าเป้าหมายจาก Minitab	355.5	เวลาจากค่าแนะนำจาก Minitab
1	1	190	1.5	30	50	0.00000	27.8297	32.1703	ค่า PBF ต่ำกว่าค่าเป้าหมาย	80	เวลารวมที่ดีที่สุด
	2	195	1.75	30	50	0.06553	31.9659	28.0341		80	
	3	200	2	30	50	0.24178	37.2543	22.7457		80	
	4	202	2.1	30	50	0.32303	39.6908	20.3092		80	
	5	204	2.2	30	50	0.41041	42.3123	17.6877		80	
	6	206	2.3	30	50	0.50394	45.1181	14.8819		80	
	7	208	2.4	30	50	0.60360	48.1080	11.8920		80	
	8	210	2.5	30	50	0.70941	51.2822	8.7178		80	
2	9	210	2.5	35	55	0.82214	54.6641	5.3359	ค่า PBF ค่อยๆสูงขึ้น	90	เวลารวมค่อยๆเพิ่มขึ้น
	10	210	2.5	40	60	0.93456	58.0369	1.9631		100	
	11	210	2.5	45	65	0.95332	61.4005	1.4005		110	
	12	210	2.5	50	60	0.85332	64.4332	4.4332		110	
	13	210	2.5	55	65	0.74041	67.7876	7.7876		120	
3	14	210	2.5	41	61	0.95701	58.7104	1.2896	ค่า PBF ต่ำกว่าค่าเป้าหมาย	102	-
	15	210	2.5	42	62	0.97945	59.3835	0.6165		104	
	16	210	2.5	43	63	0.99813	60.0562	0.0562		106	
	17	210	2.5	44	64	0.97572	60.7285	0.7285		108	
	18	210	2.5	45	65	0.95332	61.4005	1.4005		110	
4	19	210	2.5	42	63	0.98057	59.4171	0.5829	-	105	-
	20	210	2.5	43	62	0.99924	60.0227	0.0227	ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่สุด	105	เวลาต่ำกว่าค่าแนะนำจาก Minitab

จากตารางที่ 4.11 การปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยจากวิธีการลองผิดลองถูก โดยมีเป้าหมาย คือ อันดับแรกค่าแรงดึงย้อนกลับใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ 60 gram มากที่สุด และอันดับที่ 2 คือใช้เวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักให้น้อยลงจากเวลาก่อนปรับปรุง ซึ่งจะถูกแบ่งเป็น 4 ช่วงด้วยกัน คือ

- ช่วงที่ 1 เป็นการปรับค่าพารามิเตอร์โดยเลือกเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักให้น้อยที่สุด ซึ่งจะได้เวลารวมเท่ากับ 80 ms และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยอุณหภูมิและแรงดันจากต่ำที่สุดจนถึงสูงที่สุด เมื่อปรับปัจจัยอุณหภูมิและแรงดันจนถึงระดับสูงที่สุดในการปรับครั้งที่ 8 แล้ว พบว่า ค่าแรงดึงย้อนกลับยังห่างจากค่าเป้าหมายอยู่มาก

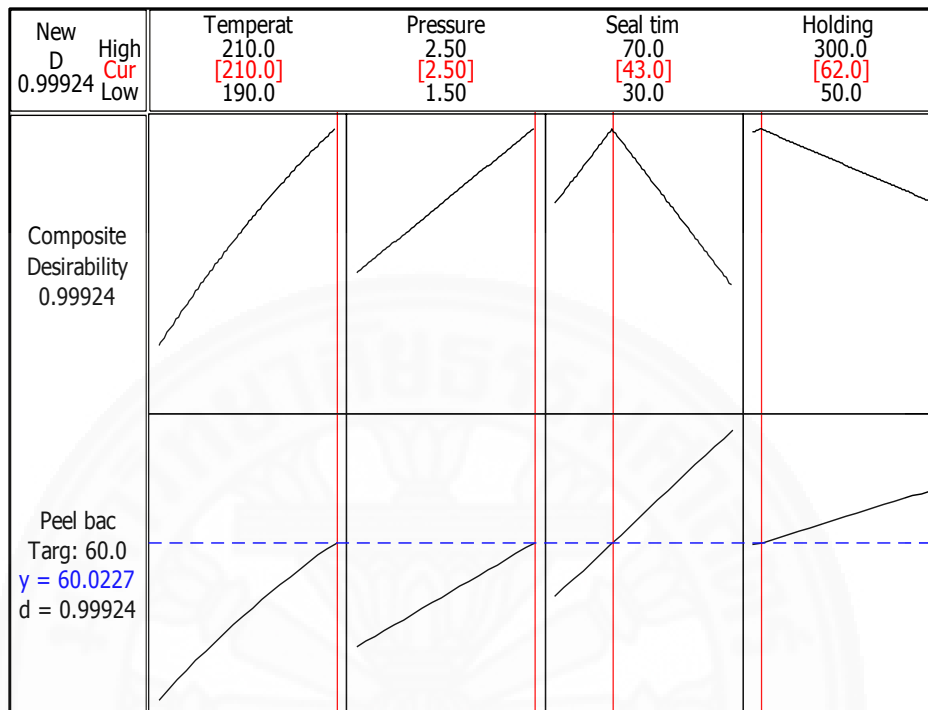
- ช่วงที่ 2 จากการปรับค่าพารามิเตอร์ในช่วงที่ 1 พบว่า หากเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักน้อยที่สุด จะไม่สามารถทำให้ค่าแรงดึงย้อนกลับใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย จึงทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก พบว่า ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่ค่าเป้าหมายที่ 60 gram อยู่ในช่วงของการปรับครั้งที่ 10 และ 11 คือ 58.0369 – 61.4005

- ช่วงที่ 3 เนื่องจากการปรับค่าพารามิเตอร์ในช่วงที่ 2 จะทำให้ได้ช่วงของพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัย ดังต่อไปนี้ อุณหภูมิ = 210 °C แรงดัน = 2.5 bar เวลาที่ใช้ในการซีลระหว่าง 40-45 ms และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก 60-65 ms ดังนั้น จึงมีการปรับค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักจากจุดต่ำสุด คือ 40 และ 60 ms ไปจนถึงจุดสูงสุด คือ 45 และ 60 ms พบว่าค่าเป้าหมายที่ 60 gram อยู่ในช่วงของการปรับครั้งที่ 15 และ 16 คือ 59.3835 – 60.0562

- ช่วงที่ 4 จากการปรับค่าพารามิเตอร์ในช่วงที่ 3 จึงได้ลองนำค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักมาทำการสลับไขว้กันอีกรอบ ซึ่งการปรับในครั้งนี้ นี้ ทำให้ได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ 60 gram คือ 60.0227 gram ทำให้มีค่าความพึงพอใจ (Desirability; d) ของผลตอบใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด คือ 0.99924 และมีค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลห่างจากเป้าหมายเท่ากับ 0.0227 รวมถึงมีเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักอยู่ที่ 105 ms และมีจุดที่เหมาะสมของปัจจัย ดังภาพที่ 4.16 ซึ่งมีดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิ = 210 °C
- แรงดัน = 2.5 bar
- เวลาที่ใช้ในการซีล = 43 ms

- เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก = 62 ms



ภาพที่ 4.16 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการปรับค่าของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีลองผิดลองถูก
ที่มา: Minitab version 15

ซึ่งค่าแรงดึงย้อนกลับที่ 60.0227 มีค่าห่างจากเป้าหมายเท่ากับ 0.0227 และมีเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักอยู่ที่ 105 ms ดังตารางที่ 4.12

และสามารถคำนวณอัตราการผลิตในกระบวนการบรรจุภัณฑ์จากเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบหรือ จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน จากวิธีลองผิดลองถูก ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน} &= \frac{24 \times 60 \times 60 \times 1000 \text{ ms}}{156.25 \text{ ms}} \\ &= 552,960 \text{ ตัวต่อ 1 วัน} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.12

เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของการซีล (จากวิธีสองผิวดองถูก)

เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์	ปัจจัย/เวลาที่ใช้	*เวลาก่อนการปรับปรุง (ต่อจำนวนไอซี 4 ตัว)	หน่วย
การบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape	เวลาจากการวางตัวงานลง Pocket	360	ms
การเคลื่อนที่ของ Carrier tape	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ Carrier tape	145	ms
	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	15	ms
การซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape	เวลาที่ใช้ในการซีล	43	ms
	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	62	ms
รวมเวลาต่อจำนวนไอซี 4 ตัว		625	ms
เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ ต่อ ไอซี 1 ตัว		156.25	ms

หมายเหตุ: * ในการซีล 1 รอบ (Cycle) จะสามารถซีลตัวไอซีได้ 4 ตัว

4.6.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด

ในขั้นตอนแรกของการหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest descent method) จากสมการตัวแบบความสัมพันธ์การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Regression analysis) เป็นการสร้างแบบจำลองกำลังหนึ่งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนอง และสามารถใช้อ้างอิงจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) จากหัวข้อ 4.4 ที่ผ่านมา ซึ่งจะพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล คือ อุณหภูมิ แรงดัน เวลาที่ใช้ในการซีล และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก จากนั้นจะทำการไต่ระดับจากสมการตัวแบบความสัมพันธ์ เพื่อหาระดับที่ดีที่สุด โดยใช้วิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest descent method) โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุจากภาพที่ 4.17 และจากสมการ ดังนี้

$$\text{Minimize } y = -181 + 0.920A + 7.40B + 0.554C + 0.0331G$$

โดยที่ y แทนค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด

A แทนปัจจัยอุณหภูมิ

B แทนปัจจัยแรงดัน

C แทนปัจจัยเวลาที่ใช้ในการขีด

G แทนปัจจัยเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก

Regression Analysis: Peel back force versus A, B, C, G

The regression equation is
 Peel back force = - 181 + 0.920 A + 7.40 B + 0.554 C + 0.0331 G

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-180.55	18.12	-9.96	0.000
A	0.91953	0.08789	10.46	0.000
B	7.404	1.758	4.21	0.000
C	0.55383	0.04395	12.60	0.000
G	0.033147	0.007032	4.71	0.000

S = 4.97208 R-Sq = 90.9% R-Sq(adj) = 89.7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	7619.8	1904.9	77.06	0.000
Residual Error	31	766.4	24.7		
Total	35	8386.2			

Source	DF	Seq SS
A	1	2705.7
B	1	438.6
C	1	3926.1
G	1	549.4

Unusual Observations

Obs	A	Peel back force	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
35	210	89.450	79.771	1.943	9.679	2.11R

R denotes an observation with a large standardized residual.

ภาพที่ 4.17 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (ไม่วิเคราะห์อิทธิพลร่วม)

ที่มา: Minitab version 15

การทำการไต่ระดับของวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด ก่อนอื่นต้องกำหนดจุดเริ่มต้นขึ้นมาก่อน แล้วเคลื่อนที่ตามทิศทางของการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด จากนั้น ทำการขยับค่าไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้ค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชันออกมา ซึ่งจากสมการการถดถอยเชิงพหุจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัย ดังนี้

$$A = 0.920$$

$$B = 7.40$$

$$C = 0.554$$

$$G = 0.0331$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยนั้น ได้ทำการกำหนดให้ X_2 คือ ปัจจัย B ก้าวทีละ 1 ก้าว ใน 1 ช่วง ดังนั้น จะสามารถหาการก้าวอย่างของปัจจัยที่เหลือใน 1 ช่วง จากค่าสัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยเชิงพหุ ได้ดังนี้

$$\Delta X_2 = \frac{7.40}{7.40} = 1 \text{ ก้าว} \quad ; \text{ ปัจจัย B}$$

$$\Delta X_1 = \frac{0.920}{7.40} = 0.1243 \text{ ก้าว} \quad ; \text{ ปัจจัย A}$$

$$\Delta X_3 = \frac{0.554}{7.40} = 0.0748 \text{ ก้าว} \quad ; \text{ ปัจจัย C}$$

$$\Delta X_4 = \frac{0.0331}{7.40} = 0.0044 \text{ ก้าว} \quad ; \text{ ปัจจัย G}$$

จากตารางที่ 4.13 ผู้วิจัยได้แบ่งระดับพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยเป็น 10 ช่วงด้วยกัน เริ่มตั้งแต่ค่าต่ำที่สุดไปยังค่าสูงสุด เพื่อให้สอดคล้องและครอบคลุมกับช่วงต่ำสุดและสูงสุดตามข้อกำหนดของบริษัทและเครื่องจักรของแต่ละปัจจัย ซึ่งทำการคำนวณหาการก้าวอย่างของปัจจัยในแต่ละช่วงโดยการเปลี่ยนให้กลับไปเป็นค่าจริงของการก้าวอย่างของแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 4.13

การกำหนดการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยและสภาวะที่จะเคลื่อนที่ของแต่ละปัจจัย

การกำหนดการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยแต่ละตัว					สภาวะที่จะเคลื่อน				
ปัจจัย	A	B	C	G	สัมประสิทธิ์ จากสมการ การถดถอย เชิงพหุ	0.92	7.4	0.554	0.0331
ค่าเริ่มต้น (ค่าที่ ต่ำที่สุด จาก ข้อกำหนด)	190	1.5	30	50	การ เปลี่ยนแปลง ของปัจจัย	ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3	ΔX_4
ค่าสิ้นสุด (ค่าที่ ใช้ใน กระบวนการ ปัจจุบัน)	210	2.5	70	150		0.1243	1	0.0748	0.0044
หน่วยของตัว แปรธรรมชาติ	2	0.1	4	10	ปัจจัย	A	B	C	G
ช่วงที่	0	0	0	0	การก้าวอย่าง ของปัจจัย	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	1	1	1		0.12	1.00	0.07	0.00
	2	2	2	2		0.25	2.00	0.15	0.01
	3	3	3	3		0.37	3.00	0.22	0.01
	4	4	4	4		0.50	4.00	0.30	0.02
	5	5	5	5		0.62	5.00	0.37	0.02
	6	6	6	6		0.75	6.00	0.45	0.03
	7	7	7	7		0.87	7.00	0.52	0.03
	8	8	8	8		0.99	8.00	0.60	0.04
	9	9	9	9		1.12	9.00	0.67	0.04
	10	10	10	10		1.24	10.00	0.75	0.04

จากตารางที่ 4.13 จะสามารถคำนวณสถานะที่จะเคลื่อนที่ เพื่อให้ได้ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองจากสมการ ดังนี้

$$\text{ปัจจัย } A = Y_A + 2\Delta X_1$$

$$\text{ปัจจัย } B = Y_B + 0.1\Delta X_2$$

$$\text{ปัจจัย } C = Y_C + 4\Delta X_3$$

$$\text{ปัจจัย } G = Y_G + 10\Delta X_4$$

เมื่อ Y คือ ระดับปัจจัยเริ่มต้น และระดับปัจจัยของช่วงก่อนหน้า

ในช่วงที่ 10 พบว่า ปัจจัย B มีค่าเท่ากับ 2.5 ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดตามข้อกำหนดของบริษัทและเครื่องจักรของแต่ละปัจจัยที่จะต้องอยู่ระหว่าง 1.5–2.5 bar ดังนั้น จึงไม่สามารถคำนวณระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองต่อจากนี้ได้

ซึ่งจะได้ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองทั้งหมด 11 ระดับ โดยรวมระดับต่ำที่สุดและระดับปัจจัยที่ได้จากการคำนวณทั้ง 10 ช่วง แต่เนื่องจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของปัจจัย A, C และ G สามารถปรับได้ครั้งละ 1 Digit ซึ่งทศนิยมต้องเป็น 0 ตำแหน่งและการปรับค่าพารามิเตอร์ของปัจจัย B สามารถปรับได้ครั้งละ 3 Digit ซึ่งทศนิยมต้องเป็น 2 ตำแหน่ง ดังนั้น จึงได้ทำการปิดเศษทศนิยมให้เป็นจำนวนเต็มสำหรับปัจจัย A, C และ G และปิดทศนิยมเป็น 2 ตำแหน่งสำหรับปัจจัย B ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14

ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลอง

ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลอง					ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลอง (พิเศษ)				
ปัจจัย	A	B	C	G	ปัจจัย	A	B	C	G
สมการ การ เคลื่อนที่ ของแต่ ละปัจจัย	$Y_A + 2 \Delta X_1$	$Y_B + 0.1 \Delta X_2$	$Y_C + 4 \Delta X_3$	$Y_G + 10 \Delta X_4$	สมการ การ เคลื่อนที่ ของแต่ ละปัจจัย	$Y_A + 2 \Delta X_1$	$Y_B + 0.1 \Delta X_2$	$Y_C + 4 \Delta X_3$	$Y_G + 10 \Delta X_4$
ระดับ ปัจจัยที่ จะใช้ใน การทดลอง	190.000	1.500	30.000	50.000	ระดับ ปัจจัยที่ จะใช้ใน การทดลอง	190	1.50	30	50
	190.249	1.600	30.299	50.045		190	1.60	30	50
	190.746	1.700	30.599	50.089		191	1.70	31	50
	191.492	1.800	30.898	50.134		191	1.80	31	50
	192.486	1.900	31.198	50.179		192	1.90	31	50
	193.730	2.000	31.497	50.224		194	2.00	31	50
	195.222	2.100	31.797	50.268		195	2.10	32	50
	196.962	2.200	32.096	50.313		197	2.20	32	50
	198.951	2.300	32.396	50.358		199	2.30	32	50
	201.189	2.400	32.695	50.403		201	2.40	33	50
	203.676	2.500	32.995	50.447		204	2.50	33	50

หลังจากได้ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองทั้ง 11 ระดับแล้ว จึงนำไปทำการทดลองที่เครื่องจักรที่โรงงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ เพื่อหาค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ซึ่งจะมีการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้งในแต่ละระดับ ($n=5$) และจะได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ดังตารางที่ 4.15 และค่าเฉลี่ยของการทดลองในแต่ละระดับ แสดงดังภาพที่ 4.18

ตารางที่ 4.15

ผลการทดลองจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด

ระดับ ที่	ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลอง				Peel back force					
	A	B	C	G	การทดลองครั้งที่					ค่าเฉลี่ย
					1	2	3	4	5	
1	190	1.50	30	50	27.97	27.82	26.91	27.34	27.93	27.59
2	190	1.60	30	50	27.86	28.39	27.93	28.20	29.49	28.37
3	191	1.70	31	50	29.56	29.32	30.03	29.50	29.37	29.56
4	191	1.80	31	50	29.90	30.23	30.73	31.21	29.93	30.40
5	192	1.90	31	50	31.44	31.93	32.8	31.26	30.53	31.59
6	194	2.00	31	50	32.64	31.20	32.85	33.09	32.54	32.46
7	195	2.10	32	50	34.53	34.91	34.65	35.98	34.43	34.90
8	197	2.20	32	50	36.05	37.93	38.59	38.41	37.44	37.68
9	199	2.30	32	50	39.32	40.09	39.91	39.12	38.93	39.47
10	201	2.40	33	50	43.75	43.26	43.32	44.12	45.32	43.95
11	204	2.50	33	50	48.92	47.71	47.4	47.39	48.41	47.97



ภาพที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยของการทดลองในแต่ละช่วง จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด

จากผลการทดลองของการคำนวณหาสภาวะที่จะเคลื่อนการทดลองไปจากจุดเริ่มต้นหรือจุดที่ต่ำที่สุดไปยังจุดสูงสุด จากข้อกำหนดของเครื่องจักรและข้อกำหนดของบริษัท ด้วยวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด พบว่า

(1) มีเพียงระดับปัจจัย B ที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับอย่างชัดเจน ส่วนปัจจัย A และ C มีการเปลี่ยนแปลงของระดับเพียงเล็กน้อย สำหรับปัจจัย G ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับ

(2) เมื่อเคลื่อนระดับปัจจัยไปยังจุดสูงสุด ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดยังไม่ถึงค่าเป้าหมายที่ 60 gram ซึ่งค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดที่ได้ค่ามากที่สุดคือ 47.97 gram และจะได้ระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่เป็นคำตอบ ดังนี้

- อุณหภูมิ = 204 °C
- แรงดัน = 2.5 bar
- เวลาที่ใช้ในการขีด = 33 ms
- เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก = 50 ms

สำหรับค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดที่ 47.97 gram มีค่าห่างจากเป้าหมายเท่ากับ 12.03 gram ซึ่งมีเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการขีดและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักอยู่ที่ 88 ms

ดังนั้น จากตารางที่ 4.16 สามารถคำนวณอัตราการผลิตในกระบวนการบรรจุภัณฑ์จากเครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ หรือ จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน จากวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน} &= \frac{24 \times 60 \times 60 \times 1000 \text{ ms}}{150.75 \text{ ms}} \\ &= 573,134 \text{ ตัวต่อ 1 วัน} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.16

เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของการซีล (วิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด)

เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์	ปัจจัย/เวลาที่ใช้	*เวลาก่อนการปรับปรุง (ต่อจำนวนไอซี 4 ตัว)	หน่วย
การบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape	เวลาจากการวางตัวงานลง Pocket	360	ms
การเคลื่อนที่ของ Carrier tape	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ Carrier tape	145	ms
	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	15	ms
การซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape	เวลาที่ใช้ในการซีล	33	ms
	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	50	ms
รวมเวลาต่อจำนวนไอซี 4 ตัว		603	ms
เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ ต่อ ไอซี 1 ตัว		150.75	ms

หมายเหตุ: * ในการซีล 1 รอบ (Cycle) จะสามารถซีลตัวไอซีได้ 4 ตัว

4.6.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น

ในการใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) เป็นแบบจำลองเชิงเส้นของตัวแปรผลตอบ คือ ค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีล ปัจจัยที่มีอิทธิพลจำเป็นต้องถูกสร้างขึ้น ซึ่งใช้ข้อมูลจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) จากหัวข้อ 4.4 ที่ผ่านมา และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุจากภาพที่ 4.17 ซึ่งจะได้สมการเกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด คือ

$$\text{Minimize } y = |60 - (-181 + 0.920A + 7.40B + 0.554C + 0.0331G)|$$

Minimize z

โดยที่ y แทนค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีล

A แทนปัจจัยอุณหภูมิ

B แทนปัจจัยแรงดัน

C แทนปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีล

G แทนปัจจัยเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก

Subject to;

$$Z \geq 60 - (-181 + 0.920A + 7.40B + 0.554C + 0.0331G)$$

$$Z \geq (-181 + 0.920A + 7.40B + 0.554C + 0.0331G) - 60$$

$$A \geq 190$$

$$B \geq 1.5$$

$$C \geq 30$$

$$G \geq 50$$

$$A \leq 210$$

$$B \leq 2.5$$

$$C \leq 70$$

$$G \leq 150$$

ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นที่สร้างขึ้นได้ถูกหาคำตอบด้วยการใช้ฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Microsoft excel version 2013 และจะได้ระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่เป็นคำตอบ ดังนี้

- อุณหภูมิ = 210 °C
- แรงดัน = 2.5 bar
- เวลาที่ใช้ในการซีล = 49 ms
- เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก = 65 ms

และเมื่อนำระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่หามาได้นี้ไปแทนค่าในแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น ซึ่งจะได้ค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Minimize } y &= -181 + 0.920(210) + 7.40(2.5) + 0.554(49) + 0.0331(65) \\ y &= 59.9975 \end{aligned}$$

ซึ่ง $y = 59.9975$ มีค่าห่างจากเป้าหมายเท่ากับ 0.0025 และมีเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักอยู่ที่ 114 ms

ดังนั้น จากตารางที่ 4.17 จะสามารถคำนวณอัตราการผลิตในกระบวนการบรรจุภัณฑ์จากเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ หรือ จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน จากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน} &= \frac{24 \times 60 \times 60 \times 1000 \text{ ms}}{158.5 \text{ ms}} \\ &= 545,110 \text{ ตัวต่อ 1 วัน} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.17

เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของการซีล (จากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น)

เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์	ปัจจัย/เวลาที่ใช้	*เวลาก่อนการปรับปรุง (ต่อจำนวนไอซี 4 ตัว)	หน่วย
การบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape	เวลาจากการวางตัวงานลง Pocket	360	ms
การเคลื่อนที่ของ Carrier tape	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ Carrier tape	145	ms
	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	15	ms
การซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape	เวลาที่ใช้ในการซีล	49	ms
	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	65	ms
รวมเวลาต่อจำนวนไอซี 4 ตัว		634	ms
เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ ต่อ ไอซี 1 ตัว		158.5	ms

หมายเหตุ: * ในการซีล 1 รอบ (Cycle) จะสามารถซีลตัวไอซีได้ 4 ตัว

4.6.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย วิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น

ในการใช้วิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear programming) เป็นแบบจำลองเชิงเส้นของตัวแปรผลตอบ คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ปัจจัยที่มีอิทธิพลจำเป็นต้องถูกสร้างขึ้น ซึ่งใช้ข้อมูลจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^4) จากหัวข้อ 4.4 ที่ผ่านมา แต่จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ โดยเพิ่มปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยการใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองในหัวข้อที่ 4.5 คือ อุณหภูมิ (A) และแรงดัน (B) ดังภาพที่ 4.19

Regression Analysis: Peel back force versus A, B, C, G, A*B

The regression equation is
 Peel back force = 119 - 0.577 A - 142 B + 0.554 C + 0.0331 G + 0.748 A*B

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	118.72	47.59	2.49	0.018
A	-0.5768	0.2375	-2.43	0.021
B	-142.23	23.07	-6.17	0.000
C	0.55383	0.02880	19.23	0.000
G	0.033148	0.004608	7.19	0.000
A*B	0.7482	0.1152	6.49	0.000

S = 3.25853 R-Sq = 96.2% R-Sq(adj) = 95.6%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	8067.6	1613.5	151.96	0.000
Residual Error	30	318.5	10.6		
Total	35	8386.2			

Source	DF	Seq SS
A	1	2705.7
B	1	438.6
C	1	3926.1
G	1	549.4
A*B	1	447.8

Unusual Observations

Obs	A	Peel back force	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
24	210	53.630	46.473	1.398	7.157	2.43R
35	210	89.450	83.512	1.398	5.938	2.02R

ภาพที่ 4.19 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (วิเคราะห์อิทธิพลร่วม) ที่มา: Minitab version 15

ซึ่งจะได้แบบจำลองของตัวแปรผลตอบทั้งผลหลักและผลอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่มีอิทธิพล และจะได้สมการ ดังนี้

$$\text{Minimize } y = |60 - (119 - 0.577 A - 142 B + 0.554 C + 0.0331 G + 0.748 A*B)|$$

Minimize z

โดยที่ y แทนค่าผลตอบแทน คือ ค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยขีด

A แทนปัจจัยอุณหภูมิ

B แทนปัจจัยแรงดัน

C แทนปัจจัยเวลาที่ใช้ในการขีด

G แทนปัจจัยเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก

A*B แทนปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิ (A) และแรงดัน (B)

Subject to;

$$Z \geq 60 - (119 - 0.577 A - 142 B + 0.554 C + 0.0331 G + 0.748 A*B)$$

$$Z \geq (119 - 0.577 A - 142 B + 0.554 C + 0.0331 G + 0.748 A*B) - 60$$

$$A \geq 190$$

$$B \geq 1.5$$

$$C \geq 30$$

$$G \geq 50$$

$$A \leq 210$$

$$B \leq 2.5$$

$$C \leq 70$$

$$G \leq 150$$

ปัญหาโปรแกรมไม่เชิงเส้นที่สร้างขึ้นได้ถูกหาคำตอบด้วยการใช้ฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Microsoft excel version 2013 และจะได้ระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่เป็นคำตอบ ดังนี้

- อุณหภูมิ = 208 °C
- แรงดัน = 2.5 bar
- เวลาที่ใช้ในการขีด = 40 ms
- เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก = 148 ms

และเมื่อนำระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่หามาได้นี้ไปแทนค่าในแบบจำลองโปรแกรมไม่เชิงเส้น ซึ่งจะได้ค่าผลตอบแทน คือ ค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยขีด ดังนี้

$$\text{Minimize } y = 119 - 0.577(208) - 142(2.5) + 0.554(40) + 0.0331(148) + 0.748(208 \times 2.5)$$

$$y = 60.0028$$

ซึ่ง $y = 60.0028$ มีค่าห่างจากเป้าหมายเท่ากับ 0.0028 และมีเวลารวมของ ปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักอยู่ที่ 188 ms ดังนั้น จากตารางที่ 4.18 จะสามารถคำนวณอัตราการผลิตในกระบวนการบรรจุภัณฑ์จากเครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่เป็นวงกลม ในแนวระนาบ หรือ จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน จากวิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น ได้ดังนี้

$$\text{จำนวนงาน (ตัว) ต่อ 1 วัน} = \frac{24 \times 60 \times 60 \times 1000 \text{ ms}}{177 \text{ ms}}$$

$$= 488,135 \text{ ตัวต่อ 1 วัน}$$

ตารางที่ 4.18

เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของการซีล (จากวิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น)

เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์	ปัจจัย/เวลาที่ใช้	*เวลาก่อนการปรับปรุง (ต่อจำนวนไอซี 4 ตัว)	หน่วย
การบรรจุตัวไอซีลงใน Carrier tape	เวลาจากการวางตัวงานลง Pocket	360	ms
การเคลื่อนที่ของ Carrier tape	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ Carrier tape	145	ms
	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	15	ms
การซีล Cover tape ให้ติดกับ Carrier tape	เวลาที่ใช้ในการซีล	40	ms
	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	148	ms
รวมเวลาต่อจำนวนไอซี 4 ตัว		708	ms
เวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ ต่อ ไอซี 1 ตัว		177	ms

หมายเหตุ: * ในการซีล 1 รอบ (Cycle) จะสามารถซีลตัวไอซีได้ 4 ตัว

4.6.6 สรุปการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

ในขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย (Optimization) เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีสที่ดีที่สุด ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยอยู่ทั้งหมด 4 วิธี คือ วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error Method) วิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest descent method) วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) และวิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear programming)

สำหรับวัตถุประสงค์ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยในแต่ละวิธีคือ เปรียบเทียบผลของค่าแรงดึงย้อนกลับที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง โดยมีเป้าหมายหลักคือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีสจะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายให้มากที่สุด คือ ที่ 60 gram และมีเป้าหมายรอง คือ อัตราการผลิตหลังการปรับปรุงจะต้องมีมากกว่าหรือเท่ากับอัตราการผลิตก่อนการปรับปรุง ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการซีสจะต้องไม่เกิน 70 ms และ เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักจะต้องไม่เกิน 150 ms ดังนั้น ผู้วิจัยจะพิจารณาถึงเป้าหมายหลักเป็นอันดับแรกในการเลือกกระดပ်ของแต่ละปัจจัย ซึ่งผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยทั้ง 4 วิธี แสดงดังตารางที่ 4.19

จากตารางที่ 4.19 จะพบว่า วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด ดังนั้น จึงเลือกกระดပ်พารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยจากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น มาใช้เป็นข้อกำหนดในการปฏิบัติงาน ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ที่เครื่องจักรที่โรงงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ ซึ่งมีดังนี้

- อุณหภูมิ = 210 °C
- แรงดัน = 2.5 bar
- เวลาที่ใช้ในการซีส = 49 ms
- เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก = 65 ms

หากพิจารณาถึงเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีสและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก ของวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น พบว่า ใช้เวลาน้อยลงจากกระบวนการก่อนปรับปรุง ถึง 106 ms (220 – 114) และสามารถเพิ่มจำนวนงานที่ Pack ได้ 78,083 ตัว ต่อ 1 วัน (545,110 - 467,027)

ซึ่งจะนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ไปทำการทดลองเพื่อยืนยันผล ในหัวข้อที่ 4.7

ต่อไป

ตารางที่ 4.19

เปรียบเทียบผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยทั้ง 4 วิธี

		ก่อนการปรับปรุง	วิธีการลองผิดลองถูก	วิธีการป็นลงด้วยทางที่สั้นที่สุด	วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น	วิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น	หน่วย
ระดับของปัจจัย	อุณหภูมิ	190-210	210	204	210	208	°C
	แรงดัน	1.5-2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	bar
	เวลาที่ใช้ในการซีล	50-70	43	33	49	40	ms
	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	150	62	50	65	148	ms
เป้าหมายหลัก	ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล	54.16	60.0227	47.97	59.9975	60.0028	gram
	ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่แตกต่างจากค่าเป้าหมาย (60 gram)	5.84	0.0227	12.03	0.0025	0.0028	gram
เป้าหมายรอง	เวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	220	105	83	114	188	ms
	จำนวนงานที่ Pack ได้ ต่อ 1 วัน	467,027	552,960	573,134	545,110	488,135	ตัว

4.7 การทดลองเพื่อยืนยันผล

หลังจากได้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมแล้ว จึงได้นำค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยจากการปรับระดับของแต่ละปัจจัยเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม ในหัวข้อที่ 4.6 ไปทำการทดลองเพื่อยืนยันผล เพื่อพิสูจน์ว่าค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจากการทำงานจริงจะมีค่าเท่ากับค่าที่คำนวณจากวิธีการ

โปรแกรมเชิงเส้นหรือไม่ ซึ่งค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่คำนวณจากโปรแกรมเชิงเส้น อยู่ที่ 59.9975 gram

สำหรับวิธีการในการทดสอบ ได้ใช้การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) เพื่อทำการทดสอบค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล และตัวสถิติทดสอบที่เหมาะสมแล้วหาจุดวิกฤตเพื่อกำหนดบริเวณปฏิเสธ H_0 ให้สอดคล้องกับ H_1 คือ 1 sample T และทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้ง ($n=30$) และได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20

การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง ($n=30$)

การทดลอง ครั้งที่	Factor				Peel back force
	Temperature	Pressure	Seal time	Holding time of Blead	
1	210	2.5	49	65	58.27
2	210	2.5	49	65	59.90
3	210	2.5	49	65	59.39
4	210	2.5	49	65	59.85
5	210	2.5	49	65	59.43
6	210	2.5	49	65	61.24
7	210	2.5	49	65	57.13
8	210	2.5	49	65	59.20
9	210	2.5	49	65	57.84
10	210	2.5	49	65	58.58
11	210	2.5	49	65	61.95
12	210	2.5	49	65	61.73
13	210	2.5	49	65	58.49
14	210	2.5	49	65	62.60
15	210	2.5	49	65	60.32
16	210	2.5	49	65	58.15
17	210	2.5	49	65	58.99
18	210	2.5	49	65	64.69
19	210	2.5	49	65	57.46
20	210	2.5	49	65	61.17

ตารางที่ 4.20

การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง ($n=30$) (ต่อ)

การทดลอง ครั้งที่	Factor				Peel back force
	Temperature	Pressure	Seal time	Holding time of Blead	
21	210	2.5	49	65	59.97
22	210	2.5	49	65	61.23
23	210	2.5	49	65	56.80
24	210	2.5	49	65	58.08
25	210	2.5	49	65	56.75
26	210	2.5	49	65	60.04
27	210	2.5	49	65	59.34
28	210	2.5	49	65	63.81
29	210	2.5	49	65	62.53
30	210	2.5	49	65	58.66

หลังจากนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab version 15 โดยมีระดับ
นัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($\alpha = 0.05$) และมีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

1. พารามิเตอร์ที่สนใจคือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล
2. สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ

$$H_0: \mu = 59.9975 \text{ gram}$$

$$H_1: \mu \neq 59.9975 \text{ gram}$$

ต้องการทดสอบว่าปฏิเสธ H_0 หรือไม่ (เพื่อดูว่าค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอย
ซีล จากการทดลองยืนยันผลมีค่าไม่เท่ากับค่าของผลตอบสนอง (y) จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง
โปรแกรมเชิงเส้น ที่ 59.9975 gram)

3. กำหนดระดับนัยสำคัญ (α) = 0.05

4. ไม่ทราบค่า σ^2 และ $n = 30$ ดังนั้น $t_0 = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$

5. ปฏิเสธ $H_0: \mu = 59.9975 \text{ gram}$

$$\begin{aligned} \text{ถ้า } t_0 &> t_{\alpha/2, n-1} = t_{0.025, 29} = 2.04523 \\ t_0 &< -t_{\alpha/2, n-1} = -t_{0.025, 29} = -2.04523 \end{aligned}$$

โดย t_0 สามารถดูได้จากตารางการแจกแจงแบบที (t Table) ในภาคผนวก ข

6. คำนวณตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยโปรแกรม Minitab version 15 ตามภาพที่ 4.20 จะได้ $t_0 = -0.57$

One-Sample T: Peel back force							
Test of mu = 59.9975 vs not = 59.9975							
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Peel back force	30	59.786	2.024	0.370	(59.031, 60.542)	-0.57	0.572

ภาพที่ 4.20 ผลของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจากการทดลองเพื่อยืนยันผล
ที่มา: Minitab version 15

7. สรุปผลการทดลอง เนื่องจาก $-t_{0.025, 29} = -2.04523 < t_0 = -0.57 < t_{0.025, 29} = 2.04523$ และ $P\text{-value} = 0.572 > \alpha = 0.05$ ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจากการทดลองยืนยันผลในเครื่องจักรที่โรงงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น

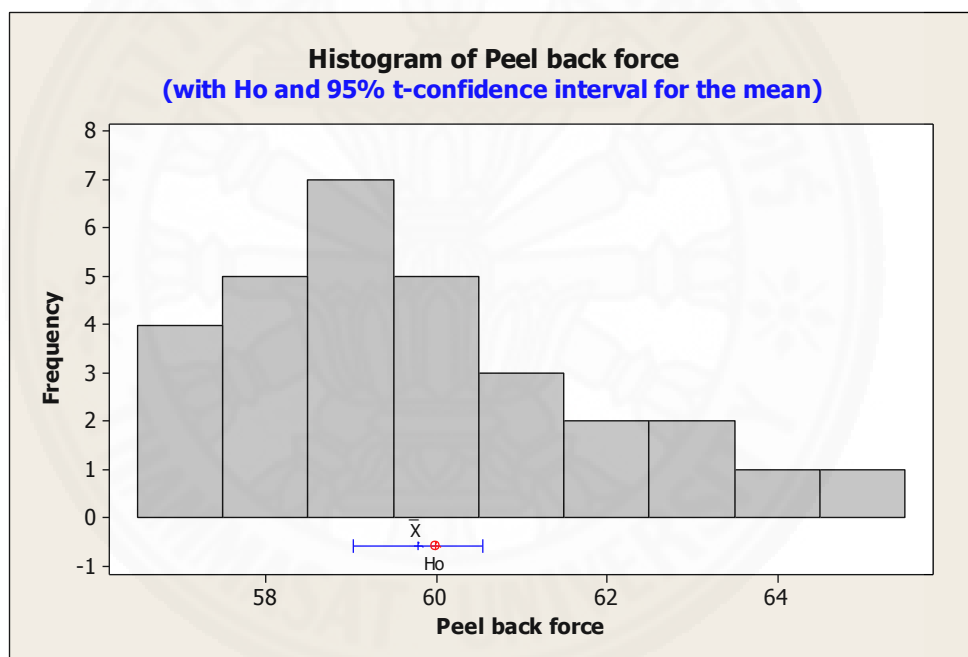
จากกราฟ Histogram ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจากการทดลองเพื่อยืนยันผล ในภาพที่ 4.21 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดที่คำนวณจากแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 59.9975 gram และค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจากการทดลองเพื่อยืนยันผลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 59.786 gram ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

หากพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น (Confidence interval) ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดจากการทดลองเพื่อยืนยันผล (\bar{x}) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 59.031 – 60.542 gram ซึ่งครอบคลุมค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดที่ได้จากแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้น (H_0) ที่ 59.9975 gram

ดังนั้น จากการทดลองเพื่อยืนยันผลสามารถสรุปได้ว่า

1. ขั้นตอนการกรองปัจจัย (Screening factor) โดยใช้ C&E matrix, FMEA และการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) สามารถคัดทิ้งปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับ ให้เหลือปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญได้ถูกต้องและแม่นยำ

2. ขั้นตอนทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) ให้ผลค่อนข้างแม่นยำ เนื่องจากไม่มีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลอิทธิพลร่วมต่อปัจจัยหลักทั้ง 4 หรือส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอีก และการหาจุดเหมาะสมที่สุดจากการหาระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยด้วยการสร้างแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นนั้นให้ผลค่อนข้างแม่นยำเช่นกัน เนื่องจากค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจากผลการทดลองเพื่อยืนยันผล มีค่าเท่ากับค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่คำนวณจากโปรแกรมเชิงเส้น



ภาพที่ 4.21 กราฟ Histogram ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจากการทดลองเพื่อยืนยันผล
ที่มา: Minitab version 15

4.8 การกำหนดให้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยเป็นมาตรฐานการทำงาน

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการควบคุมกระบวนการ โดยการนำค่าที่เหมาะสมซึ่งได้มาจากขั้นตอนการวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยในหัวข้อที่ 4.6 และเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่สุดตามข้อกำหนดของบริษัทกรณีศึกษาซึ่งอยู่ที่ 60 gram สำหรับ Carrier tape ที่มีขนาด

ความกว้าง 16 mm มาทำการติดตั้งที่กระบวนการบรรจุภัณฑ์ และทำการเฝ้าติดตามผลการปรับปรุง เพื่อยืนยันถึงผลการปรับปรุงว่าสามารถควบคุมค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลให้เป็นไปตามเป้าหมาย และเพิ่มความเชื่อมั่น ผลการปรับปรุงโดยพิจารณาความสามารถกระบวนการหลังการปรับปรุงยังสามารถดำเนินการได้ดี และจัดทำมาตรฐานการทำงานเพื่อคงกระบวนการให้ได้ตามเป้าหมายในระยะยาว สำหรับข้อกำหนดให้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยเป็นมาตรฐานการทำงาน ซึ่งมีแผนการควบคุมปัจจัยและระดับปัจจัยเพื่อควบคุมค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลให้อยู่ในข้อกำหนด ดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21

ข้อกำหนดในการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับเครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ สำหรับ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร

ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
อุณหภูมิ	210	°C
แรงดัน	2.5	bar
เวลาที่ใช้ในการซีล	49	ms
เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	65	ms

4.8.1 แผนการควบคุมปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการ

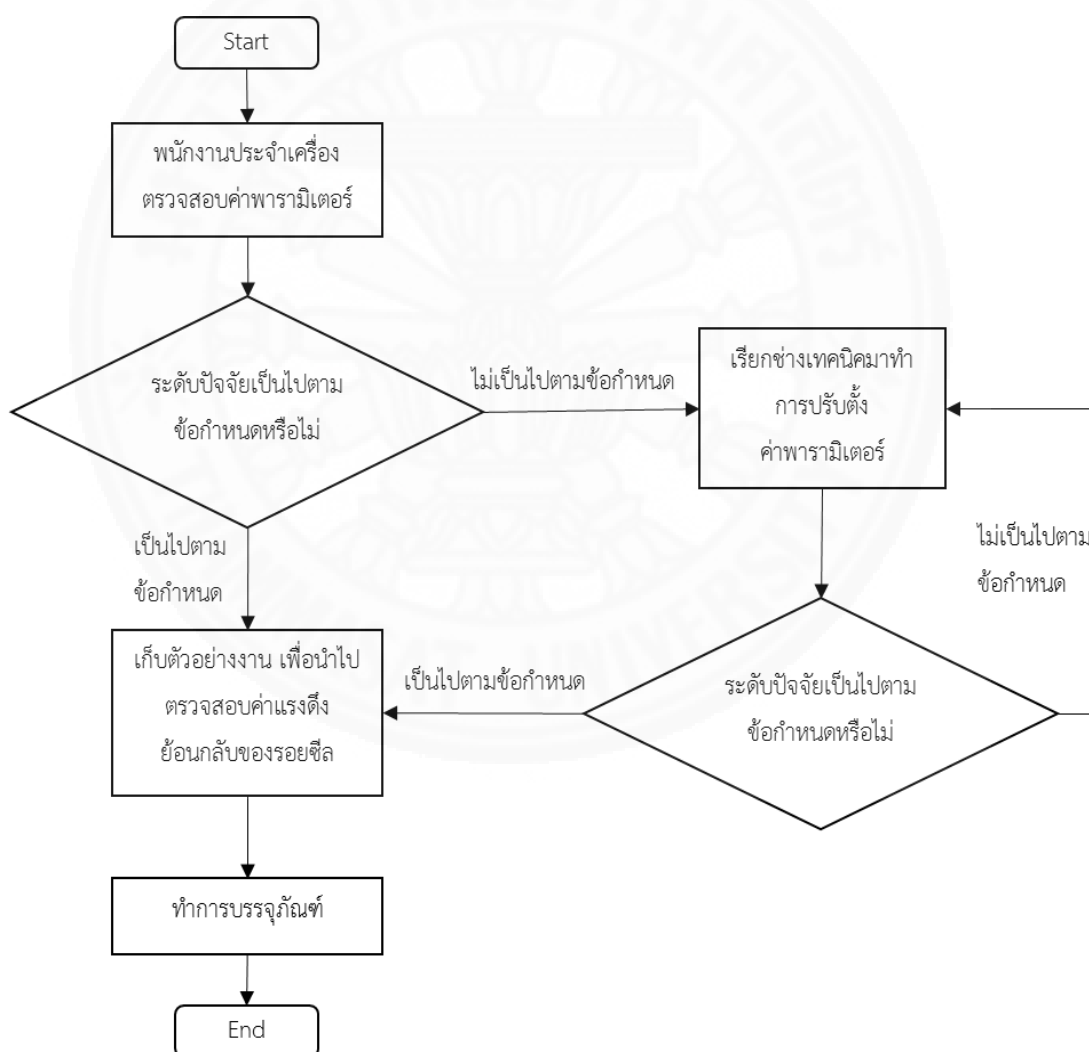
แผนการควบคุมปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการ เป็นการควบคุมเพื่อให้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลได้ตามข้อกำหนด แสดงดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22

แผนการควบคุมปัจจัยและค่าพารามิเตอร์เพื่อควบคุมค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

ปัจจัย	เครื่องมือที่ใช้ในการควบคุม	แผนการควบคุม		ข้อปฏิบัติเมื่อออกนอกการควบคุม
		เกณฑ์	ความถี่ในการตรวจสอบ	
อุณหภูมิ	Check sheet	210	ทุกต้นกะ	หยุดสายการผลิตชั่วคราวและทำการปรับตั้งค่าให้ถูกต้อง
แรงดัน		2.5		
เวลาที่ใช้ในการซีล		49		
เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก		65		

จากแผนการควบคุมปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ เพื่อควบคุมค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยเชื่อม ดังตารางที่ 4.22 ได้ถูกกำหนดให้เป็นข้อกำหนดในการปฏิบัติงาน โดยมีการตรวจสอบปัจจัยที่สำคัญเพื่อเป็นการควบคุมค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยเชื่อม และก่อนเริ่มปฏิบัติงานจริงจะมีการเตรียมความพร้อมของเครื่องจักรก่อนการผลิตงาน ซึ่งจะกำหนดให้มีการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยโดยพนักงานประจำเครื่อง หากพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ติดตั้งไม่เป็นไปตามข้อกำหนด พนักงานประจำเครื่องต้องทำการหยุดสายการผลิตชั่วคราว และทำการเรียกช่างเทคนิคมาทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ให้ถูกต้องตามข้อกำหนด และทำการตรวจสอบอีกครั้งก่อนเริ่มปฏิบัติงานในสายการผลิต โดยมีขั้นตอนการปฏิบัติงาน ดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 ขั้นตอนการปฏิบัติงานและวิธีการแก้ไขหากพบปัจจัยนำเข้าไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษา (2559)

จากข้อกำหนดการปฏิบัติงาน ดังภาพที่ 4.22 ผู้วิจัยได้มีการจัดโปรแกรมฝึกอบรมให้พนักงานเพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอนการทำงาน และขั้นตอนการตรวจเช็คพารามิเตอร์ ซึ่งจะมีการควบคุมพนักงานให้ปฏิบัติตามมาตรฐานจาก Parameter check sheet โดยผู้วิจัยได้ทำการแก้ไข Parameter check sheet จากเดิมที่มีการควบคุมพารามิเตอร์เพียง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ แรงดัน และเวลาที่ใช้ในการซีล เป็นการควบคุมพารามิเตอร์ 4 ปัจจัย ซึ่งได้มีการเพิ่มการควบคุมปัจจัยเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักด้วย ดังตารางที่ 4.23 และทำการกำหนดให้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยเป็นมาตรฐานการทำงาน

ตารางที่ 4.23

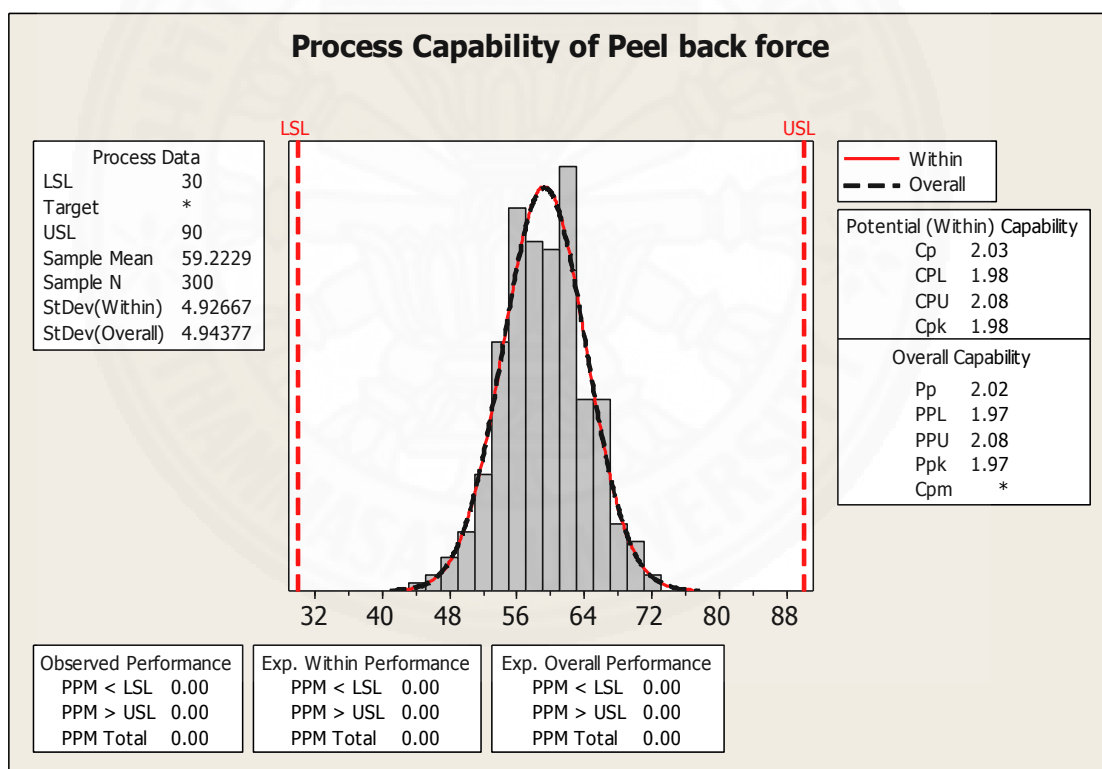
Parameter check sheet ของ Carrier tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร (หลังการปรับปรุง)

NXP		Parameter check sheet of Carrier tape width 16 mm						Form: A2
SEMICONDUCTORS (THAILAND)		Machine No: PKINX006		Peel back force Spec.		60 ± 30 gram	Spec: 700-0055	
Date	Shift	Assy CG.	Lot ID	พารามิเตอร์/ข้อกำหนด				Peel back force ที่วัดได้ (gram)
				อุณหภูมิ (Temperature)	แรงดัน (Pressure)	เวลาที่ใช้ในการซีล (Seal time)	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก (Holding time of Bleed)	
7/25/2016	D	SO8-12	NG264020	210 °C	2.5 bar	49 ms	65 ms	59.61
	N	SO8-12	NG264020					59.89
7/26/2016	D	SO8-12	NG26HG20					59.81
	N	SO8-12	NG26CVP0					60.34
7/27/2016	D	SO8-12	NG25ZB10					61.96
	N	SO8-12	NG26BKG0					58.39
7/28/2016	D	SO8-12	NG26SC20					60.85
	N	SO8-12	NG23NE70					60.39
7/29/2016	D	SO8-12	NG26UJ90					59.22
	N	SO8-12	NG26CVX0					58.42
7/30/2016	D	SO8-12	NG26BBY0					61.06
	N	SO8-12	NG26W420					59.15
7/31/2016	D	SO8-12	NG26ZH10					61.32
	N	SO8-12	NG27B800					61.43

4.9 ดัชนีชี้วัดกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง

4.9.1 การประเมินค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (C_{pk}) หลังจากการปรับปรุง

จากการปรับปรุงกระบวนการของพนักงาน โดยกำหนดให้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยเป็นมาตรฐานการทำงานตามหัวข้อที่ 4.8 จึงนำข้อมูลหลังจากการปรับปรุงมาทำการหาค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (Process capability index; C_{pk}) ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลหลังการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 1.98 และผ่านข้อกำหนดของบริษัทที่จะต้องมากกว่า 1.67 ได้ ดังภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.23 กราฟการกระจายของค่าแรงดึงย้อนกลับของ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 mm หลังการปรับปรุง ช่วงเดือนมิถุนายน 2559 ที่มา: Minitab version 15

และสามารถเปรียบเทียบความสามารถกระบวนการก่อนและหลังปรับปรุงได้ ดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24

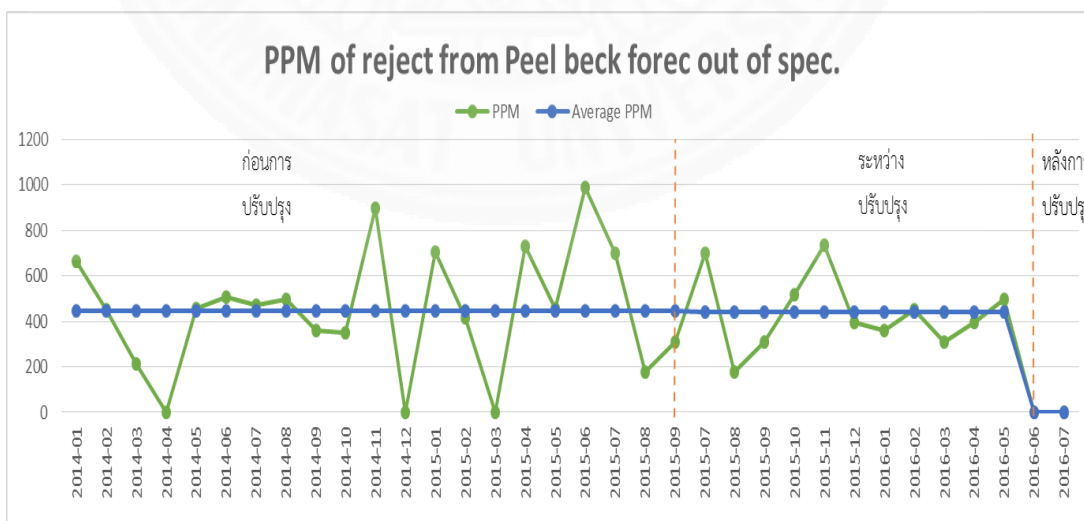
เปรียบเทียบความสามารถกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง

ข้อกำหนด ของค่าแรงดึง ย้อนกลับ	ก่อนการปรับปรุง			หลังการปรับปรุง		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าดัชนีวิเคราะห์ สมรรถภาพ กระบวนการ	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าดัชนีวิเคราะห์ สมรรถภาพ กระบวนการ
60 ± 30 gram	53.4075	8.78985	0.93	59.2229	4.94377	1.98

4.9.2 จำนวน PPM และค่าใช้จ่ายในการนำงานกลับมาแก้ไขใหม่

หลังจากได้ควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด และทำการเก็บข้อมูลของเสียที่เกิดจากค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านข้อกำหนดในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ ในเดือนมิถุนายน - กรกฎาคม 2559 ปรากฏว่า ยังไม่พบปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดไม่ผ่านตามข้อกำหนด

เมื่อเปรียบเทียบจำนวน PPM (Part per million) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ จากค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านข้อกำหนดก่อนและหลังการปรับปรุงจะได้ ดังภาพที่ 4.24 พบว่าจำนวน PPM ลดลงจาก 446 PPM เป็น 0 PPM



ภาพที่ 4.24 ของเสียที่เกิดจากค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนดเทียบต่อล้านชิ้น ก่อนและหลังควบคุมกระบวนการ ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2557-2559)

เมื่อไม่มีของเสียจากปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่ไม่ผ่านตามข้อกำหนด จะทำให้ไม่เสียค่าใช้จ่ายในการนำงานกลับมาแก้ไขใหม่ ซึ่งเป็นผลให้บริษัทกรณีศึกษาประหยัดค่าใช้จ่ายจากการแก้ไขงานใหม่เท่ากับ 56,800 บาทต่อเดือน หรือ 681,600 บาทต่อปี และสามารถสรุปได้ ดังภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 สรุปค่าใช้จ่ายในการนำงานกลับมาแก้ไขใหม่ ก่อนและหลังควบคุมกระบวนการ
ที่มา: บริษัทกรณีศึกษา (2557-2559)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ วิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลของ Cover tape และ Carrier tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร พร้อมทั้งหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ของอุตสาหกรรมวงจรรวม เพื่อให้ได้ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลตามข้อกำหนดที่บริษัท ทรูเน็กซ์ต้องการซึ่งจะต้องมากกว่า 1.67 โดยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง (Design and analysis of experiment) ในการศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ซึ่งผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่า การปรับระดับปัจจัยจะมีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล หากมีการศึกษาและควบคุมระดับปัจจัยให้ได้ในระดับที่เหมาะสม จะทำให้เกิดของเสียน้อยลง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบการทดลอง แล้วได้ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเชิงสถิติ ซึ่งสามารถแสดงถึงค่าระดับนัยสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลได้อย่างแม่นยำและน่าเชื่อถือ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยและอภิปรายผลที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล และการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละปัจจัย ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยและผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยได้ ดังต่อไปนี้

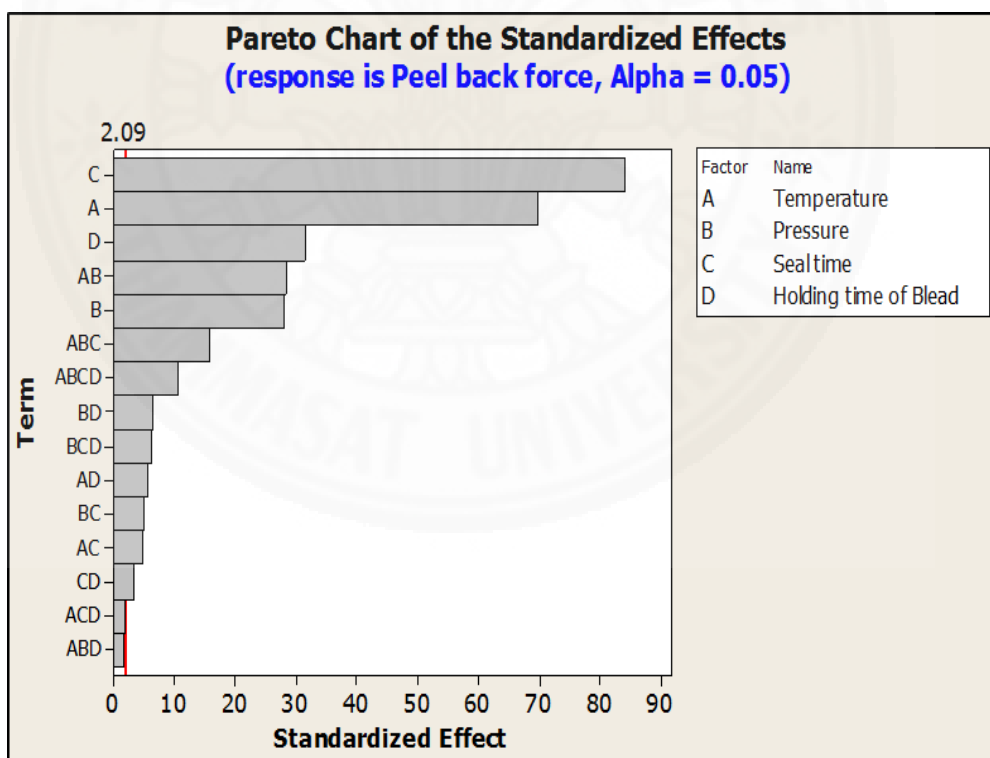
5.1.1 ขั้นตอนการกรองปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญ

(1) การกรองปัจจัย (Screening factor) เริ่มจากการระดมสมองจากหลายแผนกที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ วิศวกรฝ่ายกระบวนการ (Process engineer) วิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ (Quality Engineer) วิศวกรฝ่ายผลิตภัณฑ์ (Product engineer) ทำให้ได้สาเหตุเบื้องต้นที่จะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม หลังจากนั้นจึงนำปัจจัยเหล่านั้นไปทำการวิเคราะห์ด้วย C&E matrix และ FMEA ซึ่งจะทำให้ได้สมมติฐานว่ามี 7 ปัจจัย ที่คาดว่าจะมีผลต่อ

ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล คือ อุณหภูมิ แรงดัน เวลาที่ใช้ในการซีล ระยะห่างของใบมีด Head blowing time เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก

(2) ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการกรองปัจจัย คือ การนำปัจจัยที่ตั้งสมมติฐานไว้ทั้ง 7 ปัจจัยมาทำการออกแบบการทดลอง เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งปัจจัยที่มีผลทางตรง (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction effect) หลังจากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการทางสถิติเชิงวิศวกรรม พบว่ามีเพียง 4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) ทั้งทางตรงและอิทธิพลร่วม ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดัน เวลาที่ใช้ในการซีล และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก สำหรับปัจจัยที่เหลืออีก 3 ปัจจัย คือ ระยะห่างของใบมีด Head blowing time เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร ไม่มีผลใดๆ ต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

จากภาพที่ 5.1 แสดงผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ซึ่งพบว่า เวลาที่ใช้ในการซีลมีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลสูงที่สุด



ภาพที่ 5.1 ผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

ที่มา: Minitab version 15

5.1.2 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ของกระบวนการ

(1) ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^4) เพื่อค้นหาความสัมพันธ์ของกระบวนการ ซึ่งจากผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^4) โดยการเพิ่มจุดกึ่งกลาง (Center point) อีก 1 ระดับ (Level) ของแต่ละปัจจัยที่มีนัยสำคัญ พบว่า กระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นโค้งอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-value ของ Curvature จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (2^4) ในภาพที่ 4.10 มีค่าเท่ากับ $0.002 < \alpha = 0.05$ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology; RSM) ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดแทน

(2) จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง พบว่า ปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยต่างมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปัจจัยทั้ง 4 มีการเปลี่ยนแปลงจะมีผลโดยตรงกับค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดอย่างชัดเจน และมีปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม คือ อุณหภูมิและแรงดัน

5.1.3 ขั้นตอนการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย จะใช้วิธีการอยู่ทั้งหมด 4 วิธี ดังนี้

- (1) วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error method)
- (2) วิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest descent method)
- (3) วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming)
- (4) วิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear programming)

เพื่อให้ได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดที่จะต้องมีความใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายให้มากที่สุด คือ ที่ 60 gram ซึ่งพบว่า วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด ดังนั้น จึงเลือกระดับพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยจากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น มาใช้เป็นข้อกำหนดในการปฏิบัติงาน ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ที่เครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1

ระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ปัจจัย/ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล		ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่ คำนวณจากโปรแกรมเชิงเส้น	หน่วย
ปัจจัยที่มี นัยสำคัญ	อุณหภูมิ	210	°C
	แรงดัน	2.5	bar
	เวลาที่ใช้ในการซีล	49	ms
	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	65	ms
ปัจจัยที่ไม่ มีนัยสำคัญ	ระยะห่างของใบมีด	0.5-1	mm
	Head blowing time	45	ms
	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	15	ms

5.1.4 ขั้นตอนการทดลองเพื่อยืนยันผล

สำหรับการทดลองเพื่อยืนยันผล โดยใช้ระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยจากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ไปทำการปรับตั้งค่าที่เครื่องจักรที่โรงงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ และทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้ง ($n=30$) พบว่าค่าเฉลี่ยจากการทดลองมีค่าเท่ากับระดับปัจจัยจากการคำนวณด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ซึ่งแสดงว่า ขั้นตอนการกรองปัจจัย โดยใช้ C&E matrix, FMEA และการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) สามารถคัดทิ้งปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับ ให้เหลือปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญได้ถูกต้อง และขั้นตอนการทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) และหาจุดเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ให้ผลค่อนข้างแม่นยำและไม่มีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลอิทธิพลร่วมต่อปัจจัยหลักทั้ง 4 หรือส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอีก

5.1.5 ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ

ขั้นตอนการปรับปรุงเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการปรับปรุงกระบวนการ เพื่อให้ผลการปรับปรุงกระบวนการสามารถควบคุมได้ในระยะยาว จึงได้มีการควบคุมกระบวนการโดยใช้แผนภูมิควบคุม Xbar-R และ Parameter check sheet เพื่อติดตามและเฝ้าดูกระบวนการหลังการปรับปรุง หลังจากที่ได้เก็บข้อมูลหลังการปรับปรุง พบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลเพิ่มขึ้นจาก 53.4075 เป็น 59.2229 gram ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายของบริษัทกรณีศึกษา คือ 60 gram และพบว่าค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการเพิ่มขึ้นจาก 0.93 เป็น 1.98 ซึ่งเป็น

ความสามารถกระบวนการที่บรรลุเป้าหมายของบริษัทกรณีศึกษาที่จะต้องมากกว่า 1.67 ซึ่งจำนวนของเสียที่เกิดจากค่าแรงดิ่งย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนดเทียบต่อล้านชิ้นลดลงมาจาก 446 PPM เหลือ 0 PPM ดังนั้น ผลการปรับปรุงกระบวนการได้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการและสามารถลดค่าใช้จ่ายจากการนำงานกลับมาแก้ไข (Rework cost) เป็นจำนวนเงิน 681,600 บาทต่อปี ซึ่งตารางการเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุงแสดง ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2

การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง

ดัชนีชี้วัดกระบวนการ	ก่อนการปรับปรุง	เป้าหมาย	วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น	หลังการปรับปรุง	หน่วย
ค่าเฉลี่ยของค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีล	54.16	60	59.9975	59.2229	gram
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	8.59	-		4.94377	-
ค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ	0.93	≥ 1.67		1.98	-
PPM	446	-		0	-
Rework cost	681,600	-		0	Baht/year

5.1.6 สรุป

จากการดำเนินงานวิจัยนี้ สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้โดย

(1) สามารถปรับค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีลให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย คือ 60 gram ซึ่งค่าเฉลี่ยของค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีลจากกระบวนการบรรจุภัณฑ์ของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบหลังการปรับปรุง มีค่าเท่ากับ 59.2229 gram และห่างจากค่าเป้าหมาย ที่ 60 gram เท่ากับ 0.7771 gram

(2) สามารถทราบปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดิ่งย้อนกลับและหาระดับของปัจจัยที่ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังนี้

- อุณหภูมิ = 210 °C
- แรงดัน = 2.5 bar
- เวลาที่ใช้ในการซีล = 49 ms
- เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก = 65 ms

(3) สามารถเพิ่มค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีลของ Cover tape และ Carrier tape ที่มีความกว้าง 16 มิลลิเมตร ให้ผ่านข้อกำหนดของบริษัท ซึ่งได้มีข้อกำหนดของค่าดัชนีสมรรถภาพโดยต้องมากกว่า 1.67 ซึ่งสามารถเพิ่มค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการได้เท่ากับ 1.98 ซึ่งเพิ่มขึ้น 112.9 เปอร์เซ็นต์ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ increase } C_{pk} &= \frac{1.98 - 0.93}{0.93} \times 100 \\ &= 112.90\% \end{aligned}$$

(4) สามารถลดต้นทุนจากการนำงานกลับมาแก้ไขใหม่ (Rework cost) อันเนื่องมาจากปัญหาค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านข้อกำหนดลง 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากไม่พบปัญหาจากค่าแรงดิ่งย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านข้อกำหนดหลังการปรับปรุงกระบวนการอีกเลย (มิถุนายน 2559 - กรกฎาคม 2559) โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ reduce rework cost} &= \frac{681,600 - 0}{681,600} \times 100 \\ &= 100\% \end{aligned}$$

(5) สามารถเพิ่มอัตราการผลิต (Productivity) ของเครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบขึ้น 16.72 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสามารถลดเวลาที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ใน ส่วนของการซีลได้ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ increase productivity} &= \frac{545,110 - 467,027}{467,027} \times 100 \\ &= 16.72\% \end{aligned}$$

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะ Carrier tape ที่มีขนาดความกว้าง 16 mm และเครื่องจักรที่ทำงานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบเท่านั้น ทางบริษัทกรณีศึกษายังมี Carrier tape ขนาดความกว้างอื่นๆ และเครื่องจักรชนิดอื่นอีก ดังนั้น จึงควรทำการศึกษาปัจจัยและปรับปรุงเพิ่มเติมต่อไป

2. สำหรับบริษัทที่มีลักษณะผลิตภัณฑ์ และกระบวนการผลิตที่คล้ายคลึงกับบริษัทกรณีศึกษา สามารถนำหลักการแก้ไขปัญหาดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ได้ ซึ่งอาจจะต้องมีการเปลี่ยนปัจจัยและระดับของปัจจัยที่จะใช้ในการศึกษา เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตของบริษัท

3. สำหรับโรงงานกรณีศึกษา ยังมีปัญหาเรื่องการผลิตผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทอื่นๆ อีก ดังนั้น สามารถนำหลักการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาอื่นๆ ในกระบวนการผลิตได้ เช่น การแก้ปัญหาจาก Carrier tape หรือ Cover tape เสียหายจากกระบวนการบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น เพราะจะทำให้สามารถหาสาเหตุของปัญหาได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งจะดีกว่าการแก้ปัญหาโดยวิธีการลองผิดลองถูกในปัจจุบัน

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- กานดา พุนลาภทวี. (2539). สถิติเพื่อการวิจัย, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์. ภาควิชาครุศาสตร์เทคโนโลยี
- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2540). สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). พิมพ์ครั้งที่ 2
- ปารเมศ ชูติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 1
- Douglas C. Montgomery. (2002). Introduction to Statistical Quality Control. 4th Edition. The United States of America: John Wiley & Sons, INC.
- George C. Runger and Douglas C. Montgomery. (2002). Applied Statistics and Probability for Engineers. 3th Edition. The United States of America: John Wiley & Sons, INC.
- D.H. Stamatis. (2003). Failure Mode and Effect Analysis, FMEA from Theory to Execution. 2nd Edition
- Douglas C. Montgomery. (2005). Design and Analysis of Experiments. 6th Edition. The United States of America: John Wiley & Sons, INC.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร. (2557). การจัดการและการวิเคราะห์ข้อมูลทางอุตสาหกรรม. เอกสารคำสอน. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

บทความวารสาร

- A.N. Chatterjee, Sanjay Kumar, P. Saha, P.K. Mishra, and A.Roy Choundhury. (2003). An Experimental Design Approach to Selective Laser Sintering of Low Carbon Steel. Journal of Materials Processing Technology. Vol.136. Page.151–157.

- Shad Dowlatshahi. (2004). An application of design of experiments for optimization of plastic injection molding processes. *Journal of Manufacturing Technology Management* Vol. 15 Iss: 6. Page 445 – 454
- Lung Kwang Pan, Che Chung Wang, Shien Long Wei, and Hai Feng Sher. (2007). Optimizing Multiple Quality Characteristics via Taguchi, *Journal of Materials Processing Technology*. Vol.182. Page. 107–116.
- Luangpaiboon P. & Peeraprawit N. (2009). Nonlinear Constrained Steepest Ascent Method for a Laser Welding Process. *The Journal of Industrial Technology*, Vol. 5 No. 1, Page. 18-25.
- สมภพ ตลับแก้ว. (2551). การประยุกต์ใช้วิธีการ FMEA เพื่อการปรับปรุงความพึงพอใจของลูกค้า. *วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา* ปีที่ 21 ฉบับที่ 68
- น้ำคำ ด้านไทยวัฒนา และ วุฒิชัย วงษ์ทัศน์กร. (2559). การหาจุดเหมาะสมของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม. หน้า 92-99

วิทยานิพนธ์

- โสภิตา ท่วมมี. (2550). การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นโดยใช้วิธีการประยุกต์การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
- เจษฎา นันทนาท. (2551). ต้นทุนคุณภาพในการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ: กรณีศึกษากระบวนการผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
- ศนิรัช ทับทิมทอง. (2551). การปรับปรุงกระบวนการผลิตแผงวงจรแบบอ่อนเพื่อลดปัญหาการโค้งงอ. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
- นิพนธ์ พิระประวิตร. (2551). วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุดแบบไม่เชิงเส้นและมีข้อจำกัดสำหรับกระบวนการเชื่อมด้วยเลเซอร์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

- ปิ่นทนต์ เต็มตุ้ม. (2551). การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อลดอัตราของเสียจากการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
- อภิวัฒน์ แต่ตระกลู. (2553). การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทิก: กรณีศึกษาชิ้นส่วนเครื่องบิน. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
- วันวิสา เสระแสง. (2554). การปรับปรุงระยะห่างจากการตัดแผ่นเวเฟอร์โดยใช้แสงเลเซอร์ด้วยตัวแบบการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของผลตอบสนองที่มีข้อจำกัดเชิงเส้นตรงชนิดจำนวนเต็มผสม. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
- เยาวานา สุวีชัย. (2554). การลดผลิตภัณฑ์ที่มีตำหนิในการผลิตลวดตาข่ายโดยใช้เทคนิคซีจี ซีจีมา. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
- บันลือศักดิ์ จำהל. (2554). การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อลดปัญหาการจกบิตเป็อนของผลิตภัณฑ์กระจกมองข้างรถยนต์ โดยวิธีการออกแบบการทดลอง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม
- จาดูรณ์ จันท์ดี. (2554). การวิเคราะห์ปัจจัยในการเจาะแผ่นวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
- พิเชษฐ์ บุญญาลัย. (2554). การปรับปรุงกระบวนการในการล้างแขนจับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ กรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมการประกอบฮาร์ดดิสก์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม
- ปริญญา คุณมี. (2554). การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้ตะกัณเหล็กเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม
- จักริน ยิ้มย่อง. (2555). การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียโดยใช้หลักการซีจี ซีจีมา กรณีศึกษา บริษัท เล็นตัส เทคโนโลยีส์ (ไทย) จากัด. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม
- อดุลย์ จิตรอารี. (2555). การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสีรูบ ในการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นส่วนพลาสติก เอบีเอส. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

- ณัฐกานต์ รสดี. (2555). การพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการขัดเลนส์ ด้วยการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาโรงงานขัดและประกอบเลนส์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
- กรวิชัย จุฬะวงษ์พันธุ์. (2555). การลดความสูญเสียจากกระบวนการตัดและปิดผนึกถุงพลาสติกโดยวิธีการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาโรงงานผลิตถุงพลาสติกบรรจุภัณฑ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
- วรารุณี แก้วอ่อน. (2556). การลดของเสียจากข้อเสียบเปลี่ยนสีของแบตเตอรี่จักรยานยนต์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

- IC ASSEMBLY AND PACKAGING. คณะวิชาช่างไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์. สถาบันการอาชีวศึกษาภาคกลาง 3. วิทยาเขตเทคนิคสิงห์บุรีแห่งที่ 1.
<http://sanong2003.tripod.com/icm1-04.htm>
- วัสดุประเภท Static Dissipative. (2010). ACC Corporation Co., Ltd - All Rights Reserved.
http://www.acccorporate.com/Tha/New_2_6.html
- ฉลอง สีแก้วสีว. เว็บไซต์แห่งการเรียนรู้เกี่ยวกับสถิติเชิงประยุกต์. (2552). Fractional Factorial designs.
http://www.geocities.ws/chalong_sri/Fract_DOE.htm
- บรรหาญ ลิลา. การออกแบบการทดลองเบื้องต้น. มหาวิทยาลัยบูรพา. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ.
<http://www.docs-engine.com/pdf/1.html>
- NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. (2012). Adding centerpoints.
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri337.htm>



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการวัดค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด

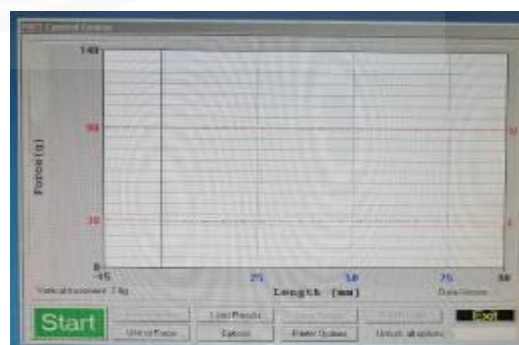
1. เครื่องมือและโปรแกรมที่ใช้ในการวัดค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด

1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด แสดงดังภาพที่ ก.1

1.2 สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด แสดงดังภาพที่ ก.2 ซึ่งตัวโปรแกรมจะมาพร้อมกับตัวเครื่องที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ ก.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีสึกษา (2558)



ภาพที่ ก.2 โปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีสึกษา (2558)

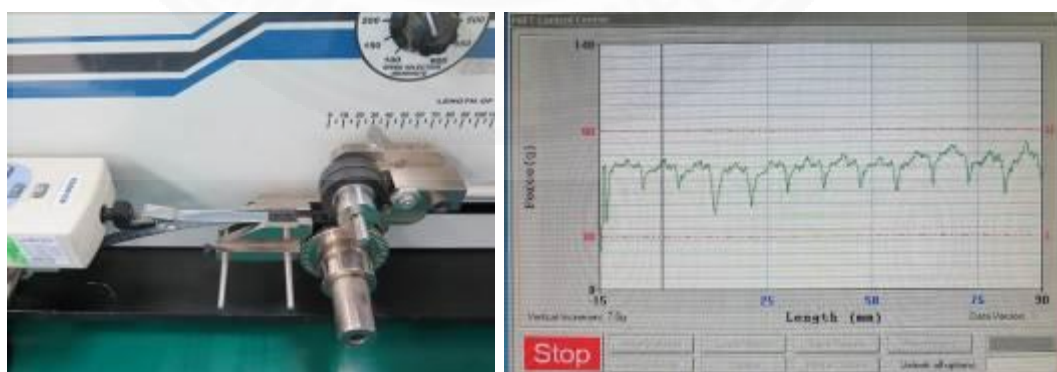
2. ขั้นตอนในการวัดค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด

2.1 ทำการทดลองโดยปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย และทำการขีดด้วยเครื่องจักรที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งเครื่องจักรจะมีฟังก์ชันการทำงานที่สามารถปรับความยาวของ Tape ให้ได้ตามความต้องการ ซึ่งจะได้ Tape ที่ขีดแล้ว ดังภาพที่ ก.3



ภาพที่ ก.3 ลักษณะของ Tape ที่ขีดแล้ว
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีสึกษา (2558)


2.2 นำ Tape ที่ได้จากข้อ 2.1 มาทำการทดสอบค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจะทำการดึง Cover Tape กับ Carrier Tape แยกออกจากกัน และโปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบจะแสดงกราฟของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีด หรือค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Carrier tape และ Cover tape ดังภาพที่ ก.4 ซึ่งค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยขีดทั้งหมด



ภาพที่ ก.4 ลักษณะของ Tape ที่ขีดแล้ว
ที่มา: ข้อมูลจากบริษัทกรณีสึกษา (2558)

ภาคผนวก ข
ตารางการแจกแจงแบบที (t Table)

Numbers in each row of the table are values on a *t*-distribution with (*df*) degrees of freedom for selected right-tail (greater-than) probabilities (*p*).



df/p	0.40	0.25	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.0005
1	0.324920	1.000000	3.077684	6.313752	12.70620	31.82052	63.65674	636.6192
2	0.288675	0.816497	1.885618	2.919986	4.30265	6.96456	9.92484	31.5991
3	0.276671	0.764892	1.637744	2.353363	3.18245	4.54070	5.84091	12.9240
4	0.270722	0.740697	1.533206	2.131847	2.77645	3.74695	4.60409	8.6103
5	0.267181	0.726687	1.475884	2.015048	2.57058	3.36493	4.03214	6.8688
6	0.264835	0.717558	1.439756	1.943180	2.44691	3.14267	3.70743	5.9588
7	0.263167	0.711142	1.414924	1.894579	2.36462	2.99795	3.49948	5.4079
8	0.261921	0.706387	1.396815	1.859548	2.30600	2.89646	3.35539	5.0413
9	0.260955	0.702722	1.383029	1.833113	2.26216	2.82144	3.24984	4.7809
10	0.260185	0.699812	1.372184	1.812461	2.22814	2.76377	3.16927	4.5869
11	0.259556	0.697445	1.363430	1.795885	2.20099	2.71808	3.10581	4.4370
12	0.259033	0.695483	1.356217	1.782288	2.17881	2.68100	3.05454	43178
13	0.258591	0.693829	1.350171	1.770933	2.16037	2.65031	3.01228	4.2208
14	0.258213	0.692417	1.345030	1.761310	2.14479	2.62449	2.97684	4.1405
15	0.257885	0.691197	1.340606	1.753050	2.13145	2.60248	2.94671	4.0728
16	0.257599	0.690132	1.336757	1.745884	2.11991	2.58349	2.92078	4.0150
17	0.257347	0.689195	1.333379	1.739607	2.10982	2.56693	2.89823	3.9651
18	0.257123	0.688364	1.330391	1.734064	2.10092	2.55238	2.87844	3.9216
19	0.256923	0.687621	1.327728	1.729133	2.09302	2.53948	2.86093	3.8834
20	0.256743	0.686954	1.325341	1.724718	2.08596	2.52798	2.84534	3.8495
21	0.256580	0.686352	1.323188	1.720743	2.07961	2.51765	2.83136	3.8193
22	0.256432	0.685805	1.321237	1.717144	2.07387	2.50832	2.81876	3.7921
23	0.256297	0.685306	1.319460	1.713872	2.06866	2.49987	2.80734	3.7676
24	0.256173	0.684850	1.317836	1.710882	2.06390	2.49216	2.79694	3.7454
25	0.256060	0.684430	1.316345	1.708141	2.05954	2.48511	2.78744	3.7251
26	0.255955	0.684043	1.314972	1.705618	2.05553	2.47863	2.77871	3.7066
27	0.255858	0.683685	1.313703	1.703288	2.05183	2.47266	2.77068	3.6896
28	0.255768	0.683353	1.312527	1.701131	2.04841	2.46714	2.76326	3.6739
29	0.255684	0.683044	1.311434	1.699127	2.04523	2.46202	2.75639	3.6594
30	0.255605	0.682756	1.310415	1.697261	2.04227	2.45726	2.75000	3.6460
z	0.253347	0.674490	1.281552	1.644854	1.95996	2.32635	2.57583	3.2905
CI	———	———	80%	90%	95%	98%	99%	99.9%

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวน้ำคำ ด่านไทยวัฒนา
วันเดือนปีเกิด	20 ธันวาคม 2526
ตำแหน่ง	วิศวกรควบคุมคุณภาพ
ทุนการศึกษา	2546: ทุนการศึกษา ไทยบริดจสโตน น้ำคำ ด่านไทยวัฒนา และ วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร.
ผลงานทางวิชาการ	(2559). การหาจุดเหมาะสมของค่าแรงดึงย้อนกลับของ รอยซีล โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง. การ ประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. คณะวิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม. หน้า 92-99
ประสบการณ์ทำงาน	2556: วิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ บริษัท NXP Manufacturing Co., Ltd. 2555: วิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ บริษัท Sony Technology Thailand Co., Ltd. 2553: วิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ บริษัท Toshiba Storage Device Thailand Co., Ltd. 2549: วิศวกรฝ่ายประเมินและทดสอบผลิตภัณฑ์ใหม่ บริษัท Fujitsu Thailand Co., Ltd.