การหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง

Optimization of peel back force's factor setting for sealing track with design of experiment

น้ำคำ ด่านไทยวัฒนา[1*] และ วุฒิชัย วงษ์ทัศนีย์กร[2]

[1,2]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: namkham.danthaiwattana@nxp.com*

Namkham Danthaiwattana[1*] and Wuthichai Wongthatsanekorn[2]

[1,2]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

บทคัดย่อ

บทความนี้ กล่าวถึงการหาจุดเหมาะสมของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ของอุตสาหกรรมวงจรรวม โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง เนื่องจากค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลและค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการยังไม่ผ่านข้อกำหนดของบริษัทกรณีศึกษา จากการวิเคราะห์ด้วยตารางวิเคราะห์เหตุและผลและการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต จึงได้สมมติฐานว่ามี 7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล การทดลองจึงถูกแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ซึ่งการทดลองขั้นตอนแรกทำเพื่อคัดทิ้งปัจจัยโดยใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) เพื่อให้ได้ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ แรงดัน เวลาที่ใช้ในการซีล และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก การทดลองขั้นตอนที่สองจะนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญไปทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) และทำการหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจาก 4 วิธี ซึ่งได้เลือกวิธีที่ให้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด หลังจากนั้นได้ทำการปรับปรุงกระบวนการของพนักงาน โดยกำหนดให้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยเป็นมาตรฐานการทำงานและจัดโปรแกรมฝึกอบรมและควบคุมพนักงานให้ปฏิบัติตามมาตรฐานนั้น ซึ่งสามารถเพิ่มค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลได้เท่ากับ 1.98 และผ่านข้อกำหนดของบริษัทซึ่งต้องมากกว่า 1.67 ได้

คำหลัก: ค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการ การออกแบบการทดลอง ค่าแรงดึงย้อนกลับ

Abstract

This article 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 optimization 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 (Cpk), Design of Experiment (DOE), Peel back force (PBF)

1. บทนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมวงจรรวมเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เพราะเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีการแข่งขันที่สูง ดังนั้น การผลิตสินค้าที่มีคุณภาพ ต้นทุนต่ำ และมีเทคโนโลยีที่ทันสมัยจึงจะสามารถแข่งขันและตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ดีที่สุด ซึ่งในกระบวนการผลิตก็จำเป็นจะต้องหาวิธีที่จะผลิตสินค้าให้มีของเสียน้อยให้ที่สุดด้วยเช่นกัน

ในปัจจุบันนี้ บริษัทกรณีศึกษากำลังประสบกับปัญหาเรื่องผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบ ซึ่งกระบวนการบรรจุภัณฑ์ก็เป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่ประสบปัญหาด้านคุณภาพเช่นกัน และกระบวนการนี้เป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิต หากประสบปัญหาด้านคุณภาพก็จะส่งผลถึงการส่งมอบสินค้าให้ลูกค้าล่าช้าไปด้วย

จากข้อมูลจำนวน PPM (Part Per Million) ของของเสียในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ ปี 2557 ถึงปี 2558 (มกราคม–กันยายน) พบว่า 75.42% ของของเสียที่เกิดจากเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ คือ ปัญหาจากการซีล (Sealing problem) ซึ่งเกิดจากกระบวนการซีล อันได้แก่ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนด รอยซีลไม่สมบูรณ์ รอยซีลไม่ติด เป็นต้น

จากการสุ่มตรวจข้อมูลค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล (Peel back force) ณ บริษัทกรณีศึกษาในช่วงเดือนกันยายน 2558 ถึง กุมภาพันธ์ 2559 และนำมาวิเคราะห์หาค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ พบว่าค่าดัชนีสมรรถภาพกระบวนการของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล (Process Capability Index, C_{pk}) ของ Carrier tape ที่มีขนาดความกว้าง 16 mm มีค่าเท่ากับ 0.93 และยังไม่ผ่านผ่านข้อกำหนดของบริษัทกรณีศึกษาที่ 1.67

ดังนั้น ผู้ทำการวิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลและทำการหาจุดเหมาะสมของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง เพื่อให้ปัญหาจากการซีลที่เกิดจากค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนดลดลง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัย

กิติศักดิ์[1] และ วราวุฒิ[2] กล่าวว่า แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและปัจจัย (C&E matrix) จะถูกนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง โดยทำการวิเคราะห์ระดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองจากการร่วมระดมความคิดของทีมงาน ผลที่ได้จากการจัดระดับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง คือ การจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองโดยแผนภาพพาเรโต ซึ่งจะสามารถทำให้เลือกปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองที่สูงมาทำการแก้ไขก่อนได้

2.2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต

สมภพ[3] กล่าวว่า การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต (FMEA) คือ การวิเคราะห์คุณลักษณะของความเสียหายและผลกระทบที่ตามมา ซึ่งในปัจจุบันหลักการการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต ได้ถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงวิธีการทำงานตั้งแต่การออกแบบ การผลิต และการบริการ เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต จะมุ่งเน้นการชี้ให้เห็นถึงคุณลักษณะของความเสียหายหรือสาเหตุที่จะนำไปสู่ความความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการออกแบบ การผลิต หรือการบริการ จากนั้นจึงจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบของความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเพื่อการนำไปสู่การหาวิธีป้องกันการเกิดความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นนั้น

2.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

เยาวนาฏ[4] และ กานดา[5] กล่าวว่า การออกแบบการทดลอง เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่เราต้องการ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ให้ผลที่มีความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ

ปารเมศ[6] กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 ครั้ง (Replicate) จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล สามารถกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้ มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มี n replicate จะเกี่ยวกับการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ แล้ววิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residue) เพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การขัดเกลาแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง เนื่องจากพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดนั้นไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง เพื่อจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟและผลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) ขึ้น

2.4 วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง

โสภิดา[7] กล่าวว่า วิธีการพื้นผิวตอบสนอง เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง และต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลการตอบสนองนั้น

2.5 การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

สำหรับการหาจุดเหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ในงานวิจัยนี้จะมีอยู่ทั้งหมด 4 วิธีด้วยกัน คือ

2.5.1 วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error method) โดยการใช้ฟังก์ชัน Response optimizer ของโปรแกรม Minitab version 15 ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่เหมาะที่สุดของแต่ละปัจจัย และเป็นฟังก์ชันที่ใช้วัดความพึงพอใจ โดยรวมของผลตอบสนอง (Composite Desirability: D) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 และหากค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองเท่ากับ 1 หมายถึงผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์

2.5.2 วิธีการปีนขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest descent method) เป็นวิธีการที่นำเสนอโดย Box และ Wilson มีจุดประสงค์ที่จะทำการทดลองไปตามเส้นทาง เพื่อที่จะให้ผลตอบสนอง (Response) เคลื่อนสู่จุดที่เหมาะสม (Optimum) หรือมีการเพิ่มของผลตอบสนองเร็วที่สุด ในทางตรงกันข้าม กรณีสมการเป้าหมายต่ำที่สุดจะเรียกว่า วิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด โดยวิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุดตั้งอยู่บนสมมติฐานของรูปแบบสมการกำลังหนึ่ง (First order model)

2.5.3 วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming) คือ วิธีการหาค่าที่เหมาะที่สุด (ค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุด) ของเป้าหมายที่กำหนดภายใต้เงื่อนไขบางประการ โดยเป้าหมายจะต้องแสดงอยู่ในรูปสมการเส้นตรง สำหรับเงื่อนไขอาจอยู่ในรูปสมการหรืออสมการเส้นตรงก็ได้

2.5.4 วิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear programming) คือ วิธีการหาค่าที่เหมาะที่สุด โดยฟังก์ชันของเป้าหมายและเงื่อนไขสามารถเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น

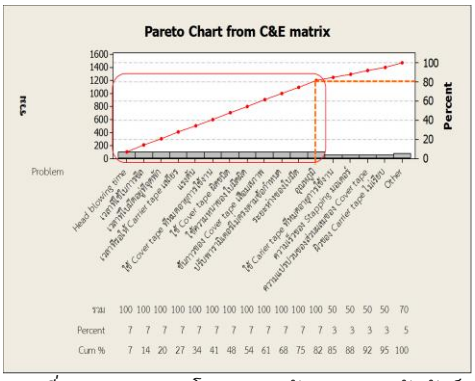
3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้จะเริ่มจากการวิเคราะห์ปัจจัยที่น่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล โดยการระดมสมองจากหัวหน้าแผนกและวิศวกรของโรงงาน หลังจากนั้นจึงได้นำปัจจัยทั้งหมดจากการระดมสมอง

มาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลตามรายละเอียดในตารางที่ 1 และกรองให้เหลือปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่สูง ด้วยแผนภาพพาเรโต ดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 แผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

Rating of Process Input			10	รวม
Matrix scoring 10 = สูง 5 = ปานกลาง 1 = ต่ำ 0 = ไม่มีความสัมพันธ์			PBF out of spec	
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 Carier tape ที่หมดอายุการใช้งาน	5	50
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 เครื่องจักรในตำแหน่งการซีลไม่	11	ระยะห่างของใบมีด	10	100
	12	ระยะห่างของ Sealing track	5	50
	13	ความเร็วของ Stapping มอเตอร์	5	50
	14	ระยะหห่างของ 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	ความแปรปวนของส่วนผสมของ Carrier tape	1	10
Cover tape ไม่เหมาะสม	18	ชั้นกาวของ Cover tape เสื่อมสภาพ	10	100
	19	ความแปรปวนของส่วนผสมของ Cover tape	5	50



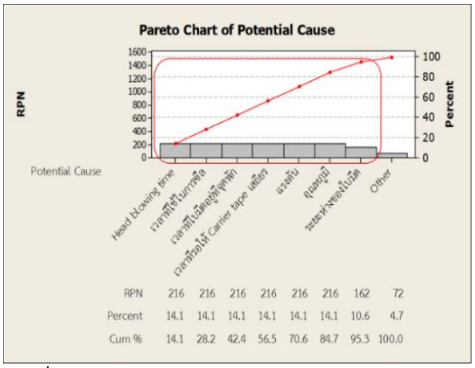
รูปที่ 1 แผนภาพพาเรโตจากแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

หลังจากการกรองปัจจัยจากแผนผังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล จะได้สาเหตุที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสมทั้งหมด 12ปัจจัย ดังนั้นจึงได้นำปัจจัยเหล่านั้นมาวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต ตามรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต

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
คน	ใช้ Part ผิด	ค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนด	6	ใช้ความหนาของใบมีดผิด	1	ไม่สามารถประกอบชุดซีลได้	1	6
	ใช้วัตถุดิบผิด	ค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนด	6	ใช้ Cover tape ผิดชนิด	1	สามารถแยกด้วยสีของ Cover tape	2	12
			6	ใช้ Cover tape ที่หมดอายุการใช้งาน	1	มีการควบคุมการจ่ายแบบ FIFO และมีการตรวจสอบวันหมดอายุก่อนการเบิกจ่าย	2	12
เครื่องจักร	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการซีลไม่เหมาะสม	ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม	6	อุณหภูมิ	4	มีการควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนดของบริษัท แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้น	9	216
			6	แรงดัน	4		9	216
			6	เวลาที่ใช้ในการซีล	4		9	216
			6	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	4		9	216
			6	Head blowing time	4		9	216
	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการซีลไม่เหมาะสม	ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม	6	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	4	มีการควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนดของเครื่องจักร แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้น	9	216
	การ Setting เครื่องจักรในตำแหน่งการซีลไม่เหมาะสม	ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม	6	ระยะห่างของใบมีด	3	การควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนดของเครื่องจักร แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้น	9	162
วิธีการ	ไม่ทำตามข้อกำหนด	ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านตามข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม	6	ปรับพารามิเตอร์ไม่ตรงตามข้อกำหนด	1	มีการตรวจสอบพารามิเตอร์ทุกต้นกะให้ตรงตามข้อกำหนด	2	12
วัตถุดิบ	Cover tape	ค่าแรงดึงย้อนกลับไม่ผ่านตามข้อกำหนด	6	ชั้นกาวของ Cover tape เสื่อมสภาพ	1	มีการสุ่มตรวจจากแผนก SQE มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในการจัดเก็บ	5	30

หลังจากนั้นจึงนำคะแนนรวม RPN จากการคำนวณผลคูณของ S x O x D ของปัจจัยทั้ง 12 ปัจจัยไปจัดลำดับความสำคัญด้วยแผนภาพพาเรโตดังรูปที่2



รูปที่ 2 แผนภาพพาเรโตจากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิต

จากแผนภาพพาเรโตจะได้สาเหตุหรือปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลไม่ผ่านข้อกำหนดหรือไม่เหมาะสม ทั้งหมด 7 ปัจจัยที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

ปัจจัย	ข้อกำหนดของบริษัท / เครื่องจักร	หน่วย
อุณหภูมิ	200 ± 10	°C
แรงดัน	2.0 ± 0.5	bar
เวลาที่ใช้ในการซีล	50 ± 20	ms
ระยะห่างของใบมีด	0.5 - 1	mm
Head blowing time	45 ± 20	ms
เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	50 ± 20	ms
เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	175 ± 125	ms

3.1การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล

เมื่อได้ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล จึงได้นำปัจจัยทั้ง 7 ปัจจัย มาทำการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล 2^{7-1} (Fractional factorial design)โดยมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 64 การทดลอง และมีการทำซ้ำ 2 ครั้ง รวม 128 การทดลอง โดยระดับปัจจัยที่ใช้ในการ

ทดลองจะเป็นค่าต่ำที่สุด และสูงที่สุดจากข้อกำหนดของบริษัทหรือข้อกำหนดของเครื่องจักร ดังตารางที่ 4

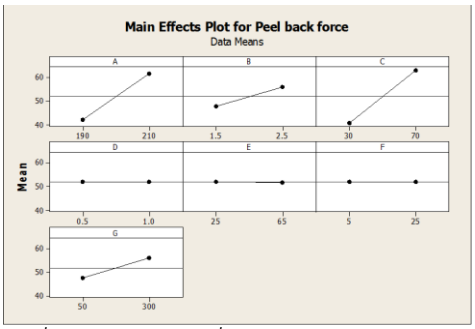
การทดลองนี้จะมีจุดมุ่งหมายเพื่อกลั่นกรองปัจจัยต่าง ๆ (Screening factors) ที่สงสัยจากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการผลิตออกไปก่อน เพื่อให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจริง ๆ เท่านั้น และผู้วิจัยต้องการที่จะศึกษาถึงผลหลักและอิทธิพลร่วมด้วย

ตารางที่ 4 ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1})

ปัจจัย	Symbol	ระดับปกติของเครื่องจักร	ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	
			ต่ำ	สูง
อุณหภูมิ	A	190 - 210	190	210
แรงดัน	B	1.5 - 2.5	1.5	2.5
เวลาที่ใช้ในการซีล	C	50 - 70	30	70
ระยะห่างของใบมีด	D	0.5 - 1	0.5	1
Head blowing time	E	45	25	65
เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	F	15	5	25
เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	G	150	50	300

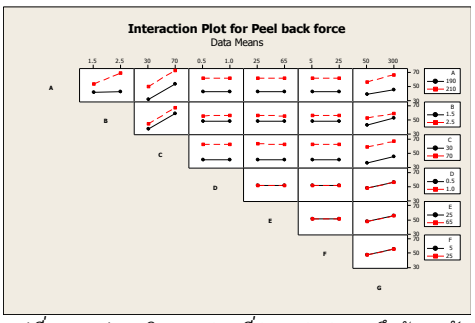
จากผลการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) สามารถสรุปได้ว่า

3.1.1 จากการวิเคราะห์ด้วยกราฟของผลหลักที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ด้วยโปรแกรม Minitab version 15 ดังรูปที่ 3 พบว่าเส้นกราฟของปัจจัย A, B, C และ G จะมีลักษณะชันลง ซึ่งหมายความว่า เมื่อระดับปัจจัยมีค่าต่ำจะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลต่ำ ในทางกลับกัน หากระดับปัจจัยมีค่าสูงก็จะส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลสูงไปด้วย ซึ่งจะเห็นความแตกต่างของกราฟระหว่างจุดต่ำสุดและจุดสูงสุดอย่างชัดเจนและจะพบว่าเส้นกราฟของปัจจัย D, E และ F ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างจุดต่ำสุดและจุดสูงสุด ซึ่งหมายความว่า เมื่อเปลี่ยนระดับของปัจจัยก็ไม่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล



รูปที่ 3 กราฟของผลหลักที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

3.3.2 การวิเคราะห์กราฟของอิทธิพลที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ด้วยโปรแกรม Minitab version 15 ดังรูปที่ 4 พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง (2 Way interaction effect) คือ A*B, A*C, A*D, A*G, B*C, B*G และ C*G มีผลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเส้นกราฟมีลักษณะไม่ขนานกัน 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 เนื่องจากเส้นกราฟมีลักษณะขนานกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 4 กราฟของอิทธพลร่วมที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

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%

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (27-1)

จากผลการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (2^{7-1}) ดังรูปที่ 5 สามารถสรุปได้ว่า

1. ปัจจัยที่มีผลโดยตรง (Main effect) ต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล คือ A, B, C และ G

2. ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม 2 ทาง (2 Way interaction effect) คือ A*B, A*C, A*D, A*G, B*C, B*G และ C*G

3. 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 ดังนั้นผู้วิจัยจึงตัดอิทธิพลร่วม 3 ทางของปัจจัย D*E*F ออกไป

ดังนั้นมีเพียง 4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งทางตรงและอิทธิพลร่วม คือ A, B, C และ G และมี P-value < 0.05 ดังตารางที่ 5 สำหรับปัจจัยที่เหลืออีก 3 ปัจจัย คือ D, E และ F ไม่มีผลใดๆ ต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

ตารางที่ 5 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

3.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป

เมื่อได้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญจากการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล สำหรับการดำเนินการทดลองนี้ จะใช้เทคนิคจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป 2^4 (Full factorial design) โดยการทำซ้ำ 2 ครั้ง รวม 32 การทดลอง และเพิ่มการทดลองตรงจุดศูนย์กลาง (Center point) อีก 4 การทดลอง เพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงหรือเชิงเส้นโค้ง ดังนั้นจะมีการทดลองรวมจำนวนทั้งสิ้น 36 การทดลอง โดยปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	Symbol	ระดับปกติของเครื่องจักร	ระดับปัจจัย	
			ต่ำ	สูง
อุณหภูมิ	A	190 - 210	190	210
แรงดัน	B	1.5 - 2.5	1.5	2.5
เวลาที่ใช้ในการซีล	C	50 - 70	30	70
เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	G	150	50	300

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลด้วยโปรแกรม Minitab จะได้ผลดังรูปที่ 6 และจะพบว่า Curvature มีค่า P-value เท่ากับ 0.002 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นโค้งอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองในผลการทดลองนี้

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(adj) = 99.77%

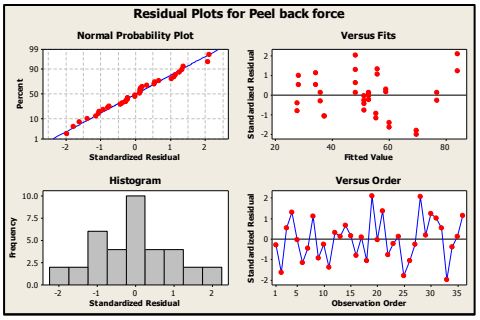
Analysis of Variance for Peel back force (coded units)

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				

รูปที่ 6 ผลจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูป

3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยการใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลนำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง แสดงผลความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟวิเคราะห์ส่วนตกค้างของข้อมูล

หากพิจารณาจากรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) พบว่ามีการกระจายแบบปกติ ลักษณะจุดของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันโดยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง มีความเป็นอิสระต่อกัน และข้อมูลมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความอิสระ จึงสามารถสรุปได้ว่า ในการทดลองนี้มีความถูกต้อง และเชื่อถือได้ จากข้อมูลการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองด้วยโปรแกรม Minitab ดังรูปที่ 8 พบว่าปัจจัยหลักทั้ง 4 ปัจจัย ต่างมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และมีปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม คือ ปัจจัย A และ B ซึ่งมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญด้วยเช่นกัน

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

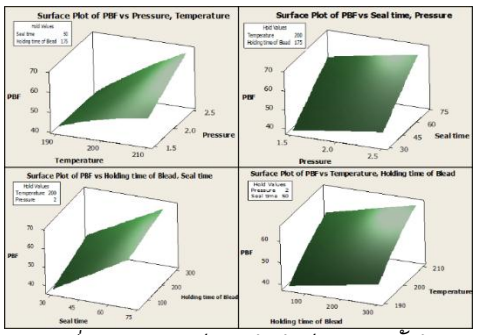
S = 3.13992 PRESS = 549.102
R-Sq = 97.18% R-Sq(pred) = 93.45% R-Sq(adj) = 95.89%

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				

รูปที่ 8 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 9 เป็นกราฟที่แสดงพื้นที่ความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัย คือ ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิเวลาที่ใช้ในการซีลกับแรงดัน เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักกับเวลาที่ใช้ในการซีล และอุณหภูมิกับเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก เมื่อปัจจัยทั้ง 4 มีการเปลี่ยนแปลงจะมีผลโดยตรงกับค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างชัดเจน



รูปที่ 9 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย

3.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

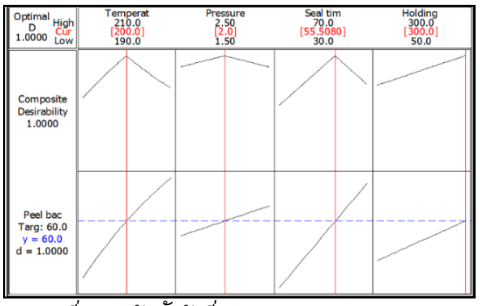
เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษามีข้อกำหนดของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลของ Carrier tape และ Cover tape ความกว้าง 16 มิลลิเมตร อยู่ที่ 60 ± 30 gram ซึ่งค่าเป้าหมายหรือค่าที่ดีที่สุดของค่าแรงดึงย้อนกลับที่จะไม่ทำให้เกิดปัญหาต่อรอยซีลอยู่ที่ค่าเป้าหมาย คือ 60 gram และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยต้องคำนึงถึงอัตราการผลิต (Productivity) ที่จะได้จากการทำงานของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบด้วย ดังนั้นผู้วิจัยได้กำหนดเป้าหมายเพื่อให้งานวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์ ดังต่อไปนี้

1. ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายให้มากที่สุด คือ 60 gram ซึ่งจะเป็นเป้าหมายหลัก

2. อัตราการผลิตหลังจากการปรับปรุงจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอัตราการผลิตก่อนการปรับปรุง ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการซีลจะต้องไม่เกิน 70 ms และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักจะต้องไม่เกิน 150 ms ซึ่งจะเป็นเป้าหมายรอง

3.4.1 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีลองผิดลองถูก

วิธีการลองผิดลองถูก โดยการใช้ฟังก์ชัน Response optimizer ของโปรแกรม Minitab version 15 ซึ่งตามข้อกำหนดของบริษัทกรณีศึกษา ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลของ Carrier tape ที่มีขนาดความกว้าง 16 mm อยู่ที่ 60 ± 30 gram แต่หากต้องการหาจุดเหมาะสมของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่ดีที่สุด คือ ค่าที่เท่ากับค่าเป้าหมายที่ 60 gram จะได้ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab และมีค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองเท่ากับ 1 ดังรูปที่ 10 คือ อุณหภูมิ = 200 °C แรงดัน = 2.0 bar เวลาที่ใช้ในการซีล = 55.508 ms และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก = 300 ms



รูปที่ 10 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab

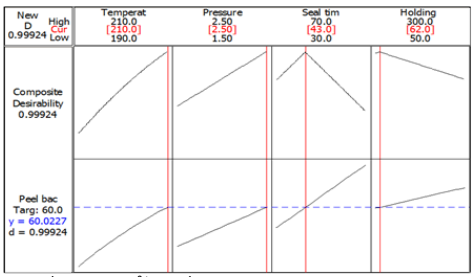
หากพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลานั่นคือ เวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก จากค่าแนะนำของโปรแกรม Minitab จะพบว่าใช้เวลารวมสูงถึง 355.508 ms ซึ่งจะมากกว่าเวลาที่ใช้ก่อนการปรับปรุงของปัจจัยทั้ง 2 คือ ประมาณ 220 ms และเวลาดังกล่าวไม่สามารถปฏิบัติได้จริงในกระบวนการผลิต เนื่องจากจะส่งผลต่ออัตราการผลิตได้ นั่นคือ จะทำให้จำนวนงานที่ผ่านกระบวนการบรรจุภัณฑ์ในส่วนของการซีล ต่อ 1 วันลดลงเหลือเพียง 243,032 ตัว จากปกติ คือ 467,027 ตัว

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย เพื่อให้ได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ 60 gram ให้มากที่สุด และใช้เวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักให้น้อยลงด้วยวิธีการลองผิดลองถูก ซึ่งแสดงวิธีการ

ปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีการลองผิดลองถูก จากฟังก์ชัน Response optimizer ของโปรแกรม Minitab version 15 ดังตารางที่ 7 ซึ่งพบว่าการปรับในครั้งที่ 20 จะได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ 60 gram คือ 60.0227 gram และมีค่าความพึงพอใจของผลตอบใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด คือ 0.99924 รวมถึงมีเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักอยู่ที่ 105 ms และมีจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ดังรูปที่ 11 คือ อุณหภูมิ = 210 °C แรงดัน = 2.5 bar เวลาที่ใช้ในการซีล = 43 ms และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก = 62 ms

ตารางที่ 7 การปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก

Trial and error method		Factor				(d)	PBF	Difference from Target of PBF	หมายเหตุ	เวลารวม	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	เวลารวมดีที่สุด
	2	195	1.75	30	50	0.06533	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 ต่อๆ สูงขึ้น	90	เวลารวมต่อๆ เพิ่มขึ้น
	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	ค่า PBF สูงกว่าค่าเป้าหมาย	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



รูปที่ 11 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการปรับค่าของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีลองผิดลองถูก

3.4.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด

ในขั้นตอนแรกของการหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest descent method) จากสมการตัวแบบความสัมพันธ์การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Regression analysis) เป็นการสร้างแบบจำลองกำลังหนึ่งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนอง และสามารถใช้ข้อมูลจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) ดังรูปที่ 12

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

          Peel back
Obs   A       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.
```

รูปที่ 12 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (ไม่วิเคราะห์อิทธิพลร่วม)

และจะได้สมการ ดังนี้

Minimize = -181 + 0.920A + 7.40B + 0.554C + 0.0331G

โดยที่ Y แทนค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

A แทนปัจจัยอุณหภูมิ

B แทนปัจจัยแรงดัน

C แทนปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีล

G แทนปัจจัยเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก

การทำการไต่ระดับของวิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด ต้องกำหนดจุดเริ่มต้นขึ้นมา แล้วเคลื่อนที่ตามทิศทางของการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด จากนั้น

ทำการขยับค่าไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชัน

จากตารางที่ 8 ผู้วิจัยได้แบ่งระดับพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยเป็น 10 ช่วงด้วยกัน เริ่มตั้งแต่ค่าต่ำที่สุดไปยังค่าสูงสุด เพื่อให้สอดคล้องและครอบคลุมกับช่วงต่ำสุดและสูงสุดตามข้อกำหนดของบริษัทและเครื่องจักรของแต่ละปัจจัย ซึ่งทำการคำนวณหาการก้าวย่างของปัจจัยในแต่ละช่วงโดยการเปลี่ยนให้กลับไปเป็นค่าจริงของการก้าวย่างของแต่ละปัจจัย

และสามารถคำนวณสภาวะที่จะเคลื่อนที่เพื่อให้ได้ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองจากสมการดังนี้

$$A = Y_A + 2\triangle X_1$$

$$B = Y_B + 0.1\triangle X_2$$

$$C = Y_c + 4\triangle X_3$$

$$G = Y_G + 10\triangle X_4$$

เมื่อ Y คือ ระดับปัจจัยเริ่มต้นและระดับปัจจัยของช่วงก่อนหน้า

ตารางที่ 8 การกำหนดการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยและสภาวะที่จะเคลื่อนที่ของแต่ละปัจจัย

การกำหนดการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยแต่ละตัว					สภาวะที่จะเคลื่อน				
ปัจจัย	A	B	C	G	สัมประสิทธิ์จากสมการการถดถอยเชิงพหุ	0.92	7.4	0.554	0.0331
ค่าเริ่มต้น (ค่าที่ต่ำที่สุด จากข้อกำหนด)	190	1.5	30	50	การเปลี่ยนแปลงของปัจจัย	$\triangle X_1$	$\triangle X_2$	$\triangle X_3$	$\triangle X_4$
ค่าสิ้นสุด (ค่าที่ใช้ในกระบวนการปัจจุบัน)	210	2.5	70	150		0.1243	1	0.0748	0.0044
หน่วยของตัวแปรธรรมชาติ	2	0.1	4	10	ปัจจัย	A	B	C	G
ช่วงที่	0	0	0	0	การก้าวย่างของปัจจัย	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

ในช่วงที่ 10 พบว่า ปัจจัย B มีค่าเท่ากับ 2.5 ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดตามข้อกำหนดของบริษัทและเครื่องจักรของแต่ละปัจจัยที่จะต้องอยู่ระหว่าง 1.5 - 2.5 bar ดังนั้น จึงไม่สามารถคำนวณระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองต่อจากนี้ได้ ดังนั้น จะได้ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองทั้งหมด 11 ระดับ โดยรวมระดับต่ำที่สุดและระดับปัจจัยที่ได้จากการคำนวณทั้ง 10 ช่วง แต่เนื่องจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของปัจจัย A, C และ G สามารถปรับได้ครั้งละ 1 Digit ซึ่งทศนิยมต้องเป็น 0 ตำแหน่งและการปรับค่าพารามิเตอร์ของปัจจัย B สามารถปรับได้ครั้งละ 3 Digit ซึ่งทศนิยมต้องเป็น 2 ตำแหน่ง ดังนั้น จึงได้ทำการปัดเศษทศนิยมให้เป็นจำนวนเต็มสำหรับปัจจัย A, C และ G และปัดทศนิยมเป็น 2 ตำแหน่งสำหรับปัจจัย B หลังจากได้ระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองทั้ง 11 ระดับแล้ว จึงนำไปทำการทดลองที่เครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ เพื่อหาค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ซึ่งจะมีการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้งในแต่ละระดับ (n=5) และจะได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการทดลองจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด

ระดับที่	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

จากผลการทดลอง พบว่า มีเพียงระดับปัจจัย B ที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับอย่างชัดเจน ส่วนปัจจัย A และ C มีการเปลี่ยนแปลงของระดับเพียงเล็กน้อย สำหรับปัจจัย G ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับ และเมื่อเคลื่อนระดับปัจจัยไปยังจุดสูงสุด ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลยังไม่ถึงค่าเป้าหมายที่ 60 gram ซึ่งค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่ได้ค่ามากที่สุดคือ 47.97 gram และจะได้ระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่เป็นคำตอบ คือ อุณหภูมิ = 204 °C แรงดัน = 2.5 bar เวลาที่ใช้ในการซีล = 33 ms และเวลาที่ใบมีด

อยู่ที่จุดพัก = 50 ms

3.4.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น

ในการใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น เป็นแบบจำลองเชิงเส้นของตัวแปรผลตอบ คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ปัจจัยที่มีอิทธิพลจำเป็นต้องถูกสร้างขึ้น ซึ่งใช้ข้อมูลจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุจากซึ่งจะได้สมการเดียวกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด คือ

Minimize y = |60 – (-181 + 0.920A + 7.40B + 0.554C + 0.0331G) | Minimize z

โดยที่ y แทนค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

A แทนปัจจัยอุณหภูมิ

B แทนปัจจัยแรงดัน

C แทนปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีล

G แทนปัจจัยเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก

Subject to;

Z ≥ 60 – (-181 + 0.920A + 7.40B + 0.554C + 0.0331G)

Z ≥ (-181 + 0.920A + 7.40B + 0.554C + 0.0331G) - 60

A ≥ 190, B ≥ 1.5, C ≥ 30, G ≥ 50, A ≤ 210, B ≤ 2.5, C ≤ 70, G ≤ 150

ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นที่สร้างขึ้นได้ถูกหาคำตอบด้วยการใช้ฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Microsoft excel version 2013 และจะได้ระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่เป็นคำตอบ คือ A = 210 °C, B = 2.5 bar, C = 49 ms และG = 65 ms

เมื่อนำระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่หามาได้นี้ ไปแทนค่าในแบบจำลองโปรแกรมเชิงเส้นซึ่งจะได้ค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ดังนี้

Minimize y = -181 + 0.920(210) + 7.40(2.5) + 0.554(49) + 0.0331(65)

= 59.9975

ซึ่ง y = 59.9975 มีค่าห่างจากเป้าหมายเท่ากับ 0.0025 และมีเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักอยู่ที่ 114 ms

3.4.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยวิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น

ในการใช้วิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น เป็นแบบจำลองเชิงเส้นของตัวแปรผลตอบ คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ปัจจัยที่มีอิทธิพลจำเป็นต้องถูกสร้างขึ้น ซึ่งใช้ข้อมูลจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^4) แต่การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุจะเพิ่มปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม (Interaction effect) ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยการใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง คือ ปัจจัย A และปัจจัย B ดังรูปที่ 13

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			

รูปที่ 13 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (วิเคราะห์อิทธิพลร่วม)

ซึ่งจะได้แบบจำลองของตัวแปรผลตอบทั้งผลหลักและผลอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่มีอิทธิพล และจะได้สมการ ดังนี้

Minimize y = |60 – (119 - 0.577 A - 142 B + 0.554 C + 0.0331 G + 0.748 A*B) | Minimize z

โดยที่ y แทนค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

A แทนปัจจัยอุณหภูมิ

B แทนปัจจัยแรงดัน

C แทนปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีล

G แทนปัจจัยเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก

A*B แทนปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B

Subject to;

Z ≥ 60 – (119 - 0.577 A - 142 B + 0.554 C + 0.0331 G + 0.748 A*B)

Z ≥ (119 - 0.577 A - 142 B + 0.554 C +

0.0331 G + 0.748 A*B) - 60

A ≥ 190, B ≥ 1.5, C ≥ 30, G ≥ 50, A ≤ 210, B ≤ 2.5

C ≤ 70, G ≤ 150

ปัญหาโปรแกรมไม่เชิงเส้นที่สร้างขึ้นได้ถูกหาคำตอบด้วยการใช้ฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Microsoft excel version 2013 และจะได้ระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่เป็นคำตอบ คือ A = 208 °C, B = 2.5 bar, C= 40 ms และ G = 148 ms

เมื่อนำระดับของพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่หามาได้นี้ไปแทนค่าในแบบจำลองโปรแกรมไม่เชิงเส้น ซึ่งจะได้ค่าผลตอบสนอง คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล ดังนี้

Minimize y = 119 - 0.577(208) – 142(2.5) + 0.554(40) + 0.0331(148) + 0.748(208*2.5)

= 60.0028

ซึ่ง y = 60.0028 มีค่าห่างจากเป้าหมายเท่ากับ 0.0028 และมีเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักอยู่ที่ 188 ms

3.4.5 สรุปการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

สำหรับวัตถุประสงค์ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยในแต่ละวิธี คือ เปรียบเทียบผลของค่าแรงดึงย้อนกลับที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง โดยมีเป้าหมายหลัก คือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายให้มากที่สุด คือ ที่ 60 gram และมีเป้าหมายรอง คือ อัตราการผลิตหลังการปรับปรุงจะต้องมีมากกว่าหรือเท่ากับอัตราการผลิตก่อนการปรับปรุง ดังนั้น เวลาที่ใช้ในการซีลจะต้องไม่เกิน 70 ms และ เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพักจะต้องไม่เกิน 150 ms ดังนั้น ผู้วิจัยจะพิจารณาถึงเป้าหมายหลักเป็นอันดับแรกในการเลือกระดับของแต่ละปัจจัย ซึ่งผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยทั้ง 4 วิธี ดังตารางที่ 10 ซึ่งพบว่าวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด ดังนั้น จึงเลือกระดับพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยจากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น มาใช้เป็นข้อกำหนดในการปฏิบัติงาน ซึ่งมีระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ = 210 °C แรงดัน = 2.5 bar เวลาที่ใช้ในการซีล = 49 ms และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก = 65 ms

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ทั้ง 4 วิธี

		ก่อนการปรับปรุง	วิธีการลองผิดลองถูก	วิธีการปีนเขาด้วยการทีละขั้นที่สุด	**วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น**	วิธีการโปรแกรมไม่เชิงเส้น
ระดับของปัจจัย	อุณหภูมิ	190 - 210	210	204	**210**	208
	แรงดัน	1.5 - 2.5	2.5	2.5	**2.5**	2.5
	เวลาที่ใช้ในการซีล	50 - 70	43	33	**49**	40
	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	150	62	50	**65**	148
เป้าหมายหลัก	ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล	54.16	60.0227	47.97	**59.998**	60.0028
	ค่าแตกต่างจากเป้าหมาย (60 gram)	5.84	0.0227	12.03	**0.0025**	0.0028
เป้าหมายรอง	เวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	220	105	83	**114**	188
	จำนวนงานที่ Pack ได้ ต่อ 1 วัน	467,027	552,960	573134	**545,110**	488,135

หากพิจารณาถึงเวลารวมของปัจจัยเวลาที่ใช้ในการซีลและเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก ของวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น พบว่า ใช้เวลาน้อยลงจากกระบวนการก่อนปรับปรุงถึง 106 ms และสามารถเพิ่มจำนวนงานที่ Pack ได้ 78,083 ตัวต่อ 1 วัน

3.5 การทดลองเพื่อยืนยันผล

หลังจากได้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมแล้ว จึงได้นำค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยไปทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้ง เพื่อพิสูจน์ว่าค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจากการทำงานจริงจะมีค่าเท่ากับค่าที่คำนวณจากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นหรือไม่ โดยมีสมมติฐาน คือ

H_0: $\mu = 59.9975$

H_1: $\mu \neq 59.9975$

ที่ระดับนัยสำคัญ = 0.05

ผลที่ได้จากโปรแกรม Minitab พบว่าค่า P - value = 0.572 ซึ่งมากกว่า α = 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัย 0.05 ได้ นั่นคือ ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลจากการทดลองในเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่าที่คำนวณจากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ดังรูปที่ 14

One-Sample T: Peel back force

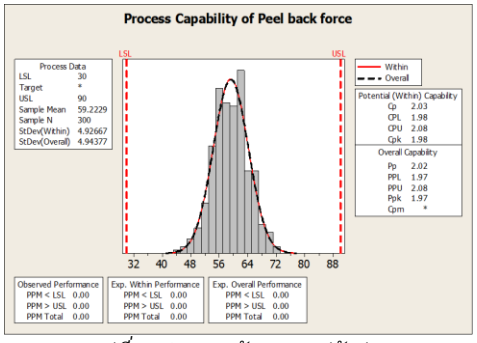
Test of mu = 59.9975 vs not = 59.9975

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

รูปที่ 14 ผลจากการทดลองเพื่อยืนยันผล

3.6 ค่า C_{pk} หลังจากการปรับปรุง

หลังจากนั้นจึงทำการปรับปรุงกระบวนการของพนักงานโดยกำหนดให้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยเป็นมาตรฐานการทำงานตามหัวข้อที่ 3.4 และจัดโปรแกรมฝึกอบรมและควบคุมพนักงานให้ปฏิบัติตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ และเก็บข้อมูลหลังจากการปรับปรุง พบว่าสามารถเพิ่มค่า C_{pk} ของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลได้เท่ากับ 1.98 และผ่านข้อกำหนดของบริษัทที่ 1.67 ได้ ดังรูปที่ 15

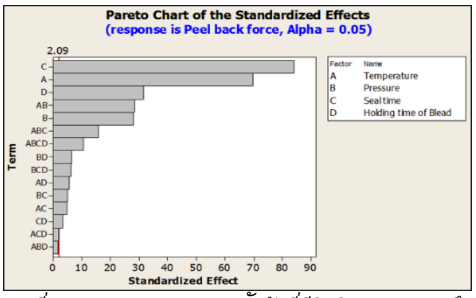


รูปที่ 15 ค่า C_{pk} หลังจากการปรับปรุง

4. สรุปผลการวิจัย

สามารถสรุปผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติได้ว่า

1. ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ, แรงดัน, เวลาที่ใช้ในการซีล และเวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก โดยเวลาที่ใช้ในการซีลมีผลจะมีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลมากที่สุด ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล

2. ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล พบว่ากระบวนการมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นโค้งอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น จึงวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองแทนและจากผลการวิเคราะห์พบว่าปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ต่างมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปัจจัยทั้ง 4 มีการเปลี่ยนแปลงจะมีผลโดยตรงกับค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอย่างชัดเจน และมีปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วม คือ อุณหภูมิและแรงดัน

3. เพื่อให้ได้ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลที่จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายให้มากที่สุด คือ ที่ 60 gram ซึ่งพบว่า วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด ดังนั้น จึงเลือกระดับพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยจากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น มาใช้เป็นข้อกำหนดในการปฏิบัติงาน ในกระบวนการบรรจุภัณฑ์ที่เครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ปัจจัย/ค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีล		Peel back Force จากโปรแกรมเชิงเส้น	หน่วย
ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ	อุณหภูมิ	210	°C
	แรงดัน	2.5	bar
	เวลาที่ใช้ในการซีล	49	ms
	เวลาที่ใบมีดอยู่ที่จุดพัก	65	ms
ปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ	ระยะห่างของใบมีด	0.5-1	mm
	Head blowing time	45	ms
	เวลาที่รอให้ Carrier tape เสถียร	15	ms

4. การทดลองเพื่อยืนยันผล โดยใช้ระดับพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยจากการปรับระดับ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมของเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบ พบว่าค่าเฉลี่ยจากการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่าที่คำนวณจากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นซึ่งแสดงว่า วิธีการวิเคราะเพื่อกรองปัจจัย และการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลให้ผลค่อนข้างแม่นยำ และไม่มีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลอิทธิพลร่วมต่อปัจจัยหลักทั้ง 4 หรือส่งผลต่อค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลอีก

5. หลังจากการปรับปรุงกระบวนการ พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าแรงดึงย้อนกลับของรอยซีลเพิ่มขึ้นจาก 53.4075 เป็น 59.2229 gram ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายของบริษัทกรณีศึกษา คือ 60 gram และพบว่าค่าดัชนีวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการเพิ่มขึ้นจาก 0.93 เป็น 1.98 ซึ่งเป็นความสามารถกระบวนการที่บรรลุเป้าหมายของบริษัทกรณีศึกษาที่จะต้องมากกว่า 1.67

5. ข้อเสนอแนะ

1. ในการวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะ Carrier tape ที่มีขนาดความกว้าง 16 mm และเครื่องจักรที่ให้งานเคลื่อนที่เป็นวงกลมในแนวระนาบเท่านั้น ทางบริษัทกรณีศึกษายังมี Carrier tape ขนาดความกว้างอื่นๆ และเครื่องจักรชนิดอื่นอีก ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาปัจจัยและปรับปรุงเพิ่มเติม

2. สำหรับบริษัทที่มีลักษณะผลิตภัณฑ์ และกระบวน การผลิตที่คล้ายคลึงกับบริษัทกรณีศึกษา สามารถนำหลักการแก้ไขปัญหาดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ได้ ซึ่งอาจจะต้องมีการเปลี่ยนปัจจัยและระดับของปัจจัยที่จะใช้ในการศึกษา เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตของบริษัท

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือตลอดจนคำแนะนำ และแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ของคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ รวมถึงบริษัทกรณีศึกษาคือ บริษัทเอ็นเอ็กซ์พี แมนูแฟคเจอริ่ง (ไทยแลนด์)

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจและอำนวยความสะดวกในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

[1] กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย–ญี่ปุ่น), พิมพ์ครั้งที่ 2, 2540

[2] วราวุฒิ แก้วอ่อน, การลดของเสียจากขั้วเสาเปลี่ยนสีของแบตเตอรี่รถจักรยานยนต์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556

[3] สมภพ ตลับแก้ว, การประยุกต์ใช้วิธีการ FMEA เพื่อการปรับปรุงความพึงพอใจของลูกค้า, วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา, ปีที่ 21 ฉบับที่ 68, 2551

[4] เยาวนาฏ ศรีวิชัย, การลดผลิตภัณฑ์มีตำหนิในการผลิตลวดตาข่ายโดยใช้เทคนิคซิกซ์ ซิกม่า, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554

[5] กานดา พูนลาภทวี, สถิติเพื่อการวิจัย, สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซนเตอร์, ภาควิชาครุศาสตร์เทคโนโลยี, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2539

[6] ปารเมศ ชุติมา, การออกแบบการทดลองทาง

วิศวกรรม, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2545

[7] โสภิดา ท้วมมี, การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่น โดยใช้วิธีการประยุกต์การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550