

การปรับปรุงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี
ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยวิธีซิกซ์ ซิกมา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WEIGHT-LOSS PERCENTAGE IMPROVEMENT OF PVC ARTIFICIAL LEATHER PRODUCT IN
AUTOMOTIVE PART INDUSTRY BY SIX SIGMA



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยวิธีซิกซ์ ซิกมา
โดย	น.ส.รัตนพร เล่ห์รักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์จรัสวัฒน์ เงามะเสถียรวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูเวช ชานูสง่าเวช)

รัตนพร เล่ห์รักษ์ : การปรับปรุงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยวิธีซิกซ์ ซิกมา. (WEIGHT-LOSS PERCENTAGE IMPROVEMENT OF PVC ARTIFICIAL LEATHER PRODUCT IN AUTOMOTIVE PART INDUSTRY BY SIX SIGMA) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ปารเมศ ชูติมา

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC sponge leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ซึ่งถูกผลิตจากกระบวนการเคลือบผิว จากการตรวจสอบคุณภาพของหนังเทียมพีวีซี พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายมีค่าเกิน 5% ซึ่งไม่ผ่านข้อกำหนดของค่ายรถยนต์ (Original equipment manufacturer, OEM) ดังนั้นจึงได้นำวิธีการซิกซ์ ซิกมา หรือขั้นตอน DMAIC มาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยแก้ไขปัญหาลดและปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยจะใช้แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagrams) และการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) เพื่อระบุปัจจัยที่คาดว่าจะผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี สำหรับการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) จะถูกใช้เพื่อกำหนดปัจจัยที่มีนัยสำคัญและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาแบบเดิมซ้ำอีก

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติและผลการทดสอบผลิตภัณฑ์หลังจากการใช้พารามิเตอร์ใหม่พบว่าค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการในระยะยาว (Ppk) เพิ่มขึ้นจาก 0.41 เป็น 6.52 ความผันแปรของกระบวนการผลิตลดลงจาก 99.6% เหลือเพียง 4.6% และค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีโดยเฉลี่ยลดลงเหลือเพียง 0.901% เท่านั้น ซึ่งผ่านตามข้อกำหนดของค่ายรถยนต์หลังจากที่มีการใช้ค่าพารามิเตอร์ใหม่

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6270231521 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Automotive part, Calendering process, PVC leather, Six sigma

Ruttanaporn Leruk : WEIGHT-LOSS PERCENTAGE IMPROVEMENT OF PVC ARTIFICIAL LEATHER PRODUCT IN AUTOMOTIVE PART INDUSTRY BY SIX SIGMA. Advisor: Prof. PARAMES CHUTIMA, Ph.D.

The purpose of this research was to improve the weight-loss percentage of PVC artificial leather products PVC sponge leather type thickness 1.00 ± 0.02 mm. and manufactured by the calendering process. It was noticed that the weight-loss percentage was greater than 5% which did not pass the specification given by the original equipment manufacturer (OEM). Hence, the DMAIC Six Sigma methodology was applied to improve the situation. The cause-and-effect matrix and the failure mode and effects analysis (FMEA) were adopted to identify the potential factors that affect the quality of the products. After that, the design of experiments (DOE) was used to determine significant factors and optimal parameter settings for the production process to prevent a recurrence.

The result showed that the long-term actual capability (Ppk) increased from 0.41 to 6.52, the variation of production decreased from 99.6% to 4.6% and the average weight-loss percentage was reduced to only 0.901%, which passed OEM specification after applying new parameter settings.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง "การปรับปรุงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย(%Weight-loss)ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์" ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือ การสนับสนุน และคำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดีจากบุคคลที่เกี่ยวข้องหลายท่าน และโรงงานกรณีศึกษาที่อำนวยความสะดวกในการทดลองและดำเนินงานวิจัย ทางผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณทุกท่าน และทุกหน่วยงานเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาช่วยชี้แนะแนวทาง และให้ความรู้เป็นอย่างดีมาโดยตลอดที่ดำเนินงานวิจัย เพื่อให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์.จิรพัฒน์ เกาประเสริฐวงศ์ ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ชูเวช ชชาญสง่าเวช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอก ที่ได้ให้ความกรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ามารับฟังการนำเสนองานวิจัย และให้คำปรึกษาคำแนะนำต่างๆ ในการแก้ปัญหา ยิ่งไปกว่านั้นยังช่วยตรวจสอบข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณโรงงานกรณีศึกษาที่ให้สถานที่การทำวิจัยให้ข้อมูลต่างๆ รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนหัวหน้าหน่วยงานคุณกัญญา บุญยืนวิทย์และเพื่อนร่วมงานที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่เป็นผู้สนับสนุนหลักในทุกๆด้านของชีวิต เป็นผู้ให้ปัญหา เป็นผู้ให้ความรัก และเป็นผู้ให้กำลังใจที่ยิ่งใหญ่เสมอมา

ขอขอบพระคุณกัลยาณมิตรที่เป็นแรงผลักดัน ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน เป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา และทุกท่านที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นหรือไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้เป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รัตนพร เล่ห์รักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติความเป็นมาและรายละเอียดของบริษัทกรณีศึกษา	1
1.1.1 ข้อมูลทั่วไปของบริษัท.....	1
1.1.2 กระบวนการผลิต	2
1.2 ที่มาและความสำคัญ.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ดัชนีชี้วัดงานวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	6
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	6
1.8 แผนการดำเนินงานวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 เครื่องมือคุณภาพ (Quality tools).....	8
2.1.1 ชิکش ชิกมา (Six Sigma Methodology).....	8
2.1.2 วิธีการดำเนินงานของชิکش ชิกมา (Six Sigma Methodology).....	9

2.1.2.1	ขั้นตอนการระบุปัญหา (Define Phase, D).....	9
2.1.2.2	ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา (Measure Phase, M)	11
2.1.2.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase, A)	13
2.1.2.4	ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve Phase, I)	15
2.1.2.5	ขั้นตอนการควบคุม (Control Phase, C)	16
2.2	แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram).....	17
2.3	การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)18	
2.3.1)	คำนิยามที่เกี่ยวข้อง	18
2.4.1)	ขั้นตอนการศึกษาความเที่ยงของระบบการวัด (GR&R).....	21
2.4.2)	การวิเคราะห์ความเที่ยงของระบบการวัดโดย Minitab	22
2.4.3)	การประเมินความเที่ยงของระบบการวัด.....	25
2.4.4)	คำนิยามที่เกี่ยวข้อง	26
2.5	การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE).....	27
2.5.1)	หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง.....	28
2.5.2)	การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design).....	29
2.5.3)	การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^{k-p} Fractional Factorial Designs).....	30
2.6	วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM).....	30
2.6.1)	การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design).....	32
2.6.2)	การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF (Face-Centered Central Composite Design)	33
2.6.3)	การออกแบบการทดลองสำหรับการพิตแบบจำลองกำลังสอง (Second-Order Model).....	33
2.7	ผลิตภัณฑ์พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride Product).....	34

2.7.1) ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride Product Composition)	34
2.7.2) พอลิไวนิลคลอไรด์เรซิน (Polyvinyl Chloride Resin)	35
2.7.3) พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer).....	35
2.7.3.1) ชนิดของพลาสติไซเซอร์ (Type of plasticizer)	36
2.7.4) ฟิลเลอร์ (Filler)	37
2.7.5) สารเติมแต่ง (Additive).....	37
2.8 งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 ขั้นตอนการระบุปัญหา (Define Phase)	43
3.1 ศึกษากระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซี.....	43
3.2 สร้างสัญญาโครงการ (Project Charter).....	44
บทที่ 4 ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา (Measurement Phase).....	48
4.1 วิธีการวัด (Measurement method).....	48
4.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA).....	50
4.2.1) การเก็บข้อมูล (Data Collection).....	50
4.2.2) ประเมินระบบการวัดด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)	51
4.2.3) การวิเคราะห์และสรุปผลความแม่นยำของระบบการวัด	51
บทที่ 5 ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase)	57
5.1 การวิเคราะห์แผนภูมิควบคุมของกระบวนการ (Xbar - R Chart)	57
5.2 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis).....	59
5.3 การวิเคราะห์แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagrams).....	61
5.3.1 การค้นหาปัจจัย.....	61
5.3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลของการออกแบบผลิตภัณฑ์.....	61

5.3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลของกระบวนการผลิต.....	64
5.3.2 การพิจารณาคัดเลือกปัจจัย	66
5.4 การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)70	
5.5 สรุปปัจจัยที่คัดเลือกมาดำเนินการออกแบบการทดลอง	74
บทที่ 6 ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve Phase).....	77
6.1 การเลือกการออกแบบการทดลอง (Design selection)	77
6.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments).....	80
6.3 การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (The optimal parameter setting).....	91
บทที่ 7 ขั้นตอนการควบคุม (Control Phase).....	93
7.1 ประสิทธิภาพหลังการปรับปรุง.....	93
7.2 การติดตามผลการทดลอง	95
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	96
8.1 ขั้นตอนการระบุปัญหา (Define Phase).....	96
8.2 ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา (Measure Phase).....	97
8.2.1 วิธีการวัด (Measurement method).....	97
8.2.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA)	97
8.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase).....	97
8.4 ขั้นตอนการปรับปรุง (Improve Phase).....	98
8.5 ขั้นตอนการควบคุม (Control Phase).....	99
4.6 ข้อเสนอแนะ	100
บรรณานุกรม.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	105

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	7
ตารางที่ 2.1 ขนาดตัวอย่างในการเก็บข้อมูลเพื่อประเมินคุณสมบัติด้านความเที่ยงของระบบการวัด	21
ตารางที่ 2.2 การออกแบบการทดลองสำหรับการพิตแบบจำลองกำลังสอง	33
ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ	47
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลผลการวัดค่า%Weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีหลังจากทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส (°C) เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	50
ตารางที่ 4.2 เกณฑ์การตัดสินใจยอมรับอ้างอิงจาก AIAG.....	56
ตารางที่ 5.1 สรุปคะแนนการประเมินสาเหตุและผลของตัวแปรนำเข้า (Input variable).....	67
ตารางที่ 5.2 เกณฑ์การประเมินสาเหตุและผล.....	68
ตารางที่ 5.3 การจัดอันดับของตัวแปรนำเข้าตามกฎ 80/20 ของพาเรโต (Pareto principle).....	69
ตารางที่ 5.4 การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของการออกแบบผลิตภัณฑ์ (DFMEA).....	70
ตารางที่ 5.5 เกณฑ์ประเมินการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของการออกแบบ (DFMEA)	71
ตารางที่ 5.6 การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของกระบวนการผลิต (PFMEA).....	72
ตารางที่ 5.7 เกณฑ์ประเมินการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของกระบวนการผลิต (PFMEA).....	73
ตารางที่ 6.1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF	78
ตารางที่ 6.2 ขนาดตัวอย่างและรีโซลูชันของการออกแบบการทดลองสำหรับพิตแบบจำลองกำลังสอง	79
ตารางที่ 6.3 การออกแบบการทดลองของ %Weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี.....	79
ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับพารามิเตอร์ปรับค่า.....	92

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี	1
รูปที่ 1.2 กระบวนการเคลนเดอร์ (Calendering process) (Thai Nam Plastic (Public) Co., 2017)	2
รูปที่ 1.3 ผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 mm (สินค้ารุ่น A ที่พบปัญหาเบาแตก).....	3
รูปที่ 1.4 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี	4
รูปที่ 1.5 ขั้นตอนก่อนและหลังการทดสอบ (ผิปกติ).....	4
รูปที่ 2.1 กระบวนการ DMAIC (Shankar, 2009).....	9
รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์มาตรฐานที่ใช้เขียนแผนผังการไหลของกระบวนการผลิต	12
รูปที่ 2.3 แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)	17
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหาคูณภาพของผลิตภัณฑ์โดยประยุกต์ใช้วิธี FMEA (สมภาพ ตลับแก้ว, 2551)	19
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนผังสาเหตุและผลร่วมกับ FMEA (สมภาพ ตลับแก้ว, 2551)	20
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างรูปแบบการป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม Minitab (Thomas & Paul, 2018).....	22
รูปที่ 2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางกับอิทธิพลร่วม (Thomas & Paul, 2018).....	23
รูปที่ 2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางโดยไม่มีอิทธิพลร่วม (Thomas & Paul, 2018)	23
รูปที่ 2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Thomas & Paul, 2018).....	24
รูปที่ 2.10 การวิเคราะห์การกระจาย (Analysis of spreads) (Thomas & Paul, 2018).....	25
รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์เชิงกราฟของความแปรปรวน (Thomas & Paul, 2018).....	25
รูปที่ 2.12 รีพีทหะบิลิตี้ (Repeatability) (Thomas & Paul, 2018)	26
รูปที่ 2.13 รีโพรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) (Thomas & Paul, 2018)	27
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีต่อกระบวนการใดๆ (Montgomery, 2017)	27

รูปที่ 2.15 มิติของพื้นผิวผลตอบสนอง (Montgomery, 2017).....	31
รูปที่ 2.16 เส้นระดับพื้นผิวผลตอบสนอง (Montgomery, 2017).....	31
รูปที่ 2.17 ขั้นตอนการทำพื้นผิวผลตอบสนอง (Montgomery, 2017)	32
รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์ของพลาสติกรีไซเคิล (Symbol of recycled plastic).....	34
รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์พีวีซี	35
รูปที่ 2.20 ปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิไวนิลคลอไรด์เรซิน (กรรมธิการ์ บุตรเอก, 2555).....	35
รูปที่ 3.1 แผนผังการไหลของกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท LS (Detailed Process Map)	44
รูปที่ 4.1 เครื่องชั่ง (Analytical balance).....	49
รูปที่ 4.2 เครื่องดูดความชื้น (Desiccator).....	49
รูปที่ 4.3 เครื่องอบทดสอบเร่งสภาวะอายุของชิ้นงาน (Geer oven aging tester).....	49
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด.....	51
รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางกับอิทธิพลร่วม (With Interaction).....	53
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางโดยไม่มีอิทธิพลร่วม (without Interaction)	53
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของความแปรปรวน (Variance Components)	54
รูปที่ 4.8 การประเมินระบบการวัด (Gage Evaluation).....	55
รูปที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุม (Control chart).....	58
รูปที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ.....	60
รูปที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการด้วยวิธี Johnson Transformation	60
รูปที่ 5.4 แผนผังสาเหตุและผลของการออกแบบผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม.	63
รูปที่ 5.5 แผนผังสาเหตุและผลของกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม.	66
รูปที่ 5.6 แผนภูมิพาเรโตของการจัดอันดับลำดับคะแนนการประเมินสาเหตุและผลของตัวแปรนำเข้า	68

รูปที่ 5.7 พทาเลต (Phthalate).....	75
รูปที่ 5.8 พทาเลตสายโซ่ตรง (Linear phthalate).....	75
รูปที่ 5.9 ไตรเมลลิเตต (Trimellitate).....	76
รูปที่ 5.10 ตำแหน่งลูกกลิ้ง (Roll) ของเครื่องคาเลนเดอร์.....	76
รูปที่ 6.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่มีอยู่ (Available factorial designs).....	78
รูปที่ 6.2 แผนภาพเศษเหลือ (Residual plots) ของการออกแบบการทดลอง.....	80
รูปที่ 6.3 ผลการทดลอง ANOVA ของการออกแบบการทดลอง.....	81
รูปที่ 6.4 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.1 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss.....	83
รูปที่ 6.5 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองระหว่าง Plasticizer และ Temp.1 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss.....	84
รูปที่ 6.6 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.2 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss.....	85
รูปที่ 6.7 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองระหว่าง Plasticizer และ Temp.2 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss.....	86
รูปที่ 6.8 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.3 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss.....	87
รูปที่ 6.9 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองระหว่าง Plasticizer และ Temp.3 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss.....	88
รูปที่ 6.10 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่าง Temp.2 และ Temp.4 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss.....	89
รูปที่ 6.11 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองระหว่าง Temp.2 และ Temp.4 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss.....	90
รูปที่ 6.12 สมการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดของค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย.....	91
รูปที่ 6.13 การตั้งค่าที่เหมาะสมสำหรับ %weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีที่น้อยที่สุด....	92
รูปที่ 7.1 เปรียบเทียบความสามารถของกระบวนการ (Ppk) ก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ....	94
รูปที่ 7.2 เปรียบเทียบการติดตามผลการทดลองก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ.....	95

บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันค่ายรถยนต์ (Original Equipment Manufacturer, OEM) มีความต้องการนำหนังเทียมพีวีซี (PVC Artificial Leather) มาใช้หุ้มชิ้นส่วนภายในรถยนต์แทนหนังแท้ (Genuine leather) และหนังเทียมพียู (PU Artificial Leather) มากขึ้น ถึงแม้ว่าหนังเทียมพีวีซีจะมีคุณสมบัติบางประการดีกว่า เช่น ความสามารถในการระบายอากาศได้ดี และความยืดหยุ่นที่หุ้มสัมผัสนุ่มมือ เป็นต้น แต่เนื่องจากหนังเทียมพีวีซีมีต้นทุนในการผลิตต่ำ จึงทำให้มีราคาถูกกว่าหนังแท้และหนังเทียมพียูเป็นอย่างมาก ซึ่งทางค่ายรถยนต์มีข้อกำหนด (Specification) ที่ควบคุมและวิธีการทดสอบ (Test method) ให้ผู้ผลิต เพื่อผลิตหนังเทียมพีวีซีให้มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการ

1.1 ประวัติความเป็นมาและรายละเอียดของบริษัทกรณีศึกษา

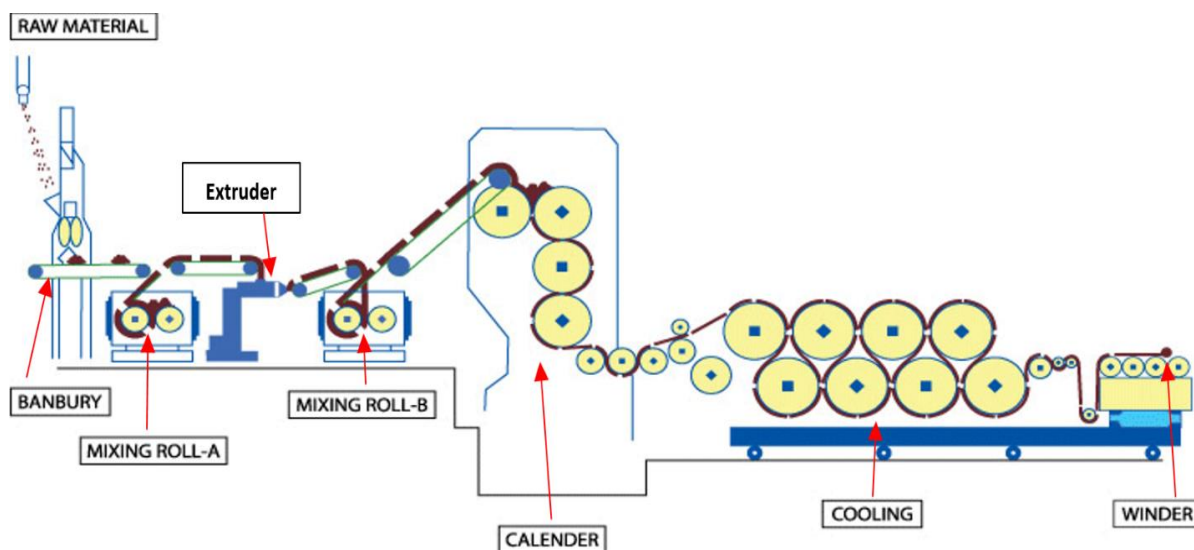
1.1.1. ข้อมูลทั่วไปของบริษัท

บริษัทกรณีศึกษานี้เป็นบริษัทผลิตหนังเทียมพีวีซี (PVC Artificial Leather) ซึ่งเป็นผู้ผลิตและจัดจำหน่ายหนังเทียมพีวีซีสำหรับหุ้มชิ้นส่วนภายในรถยนต์ (Interior Automotive Part) ทั้งในประเทศและต่างประเทศ เช่น หุ้มเบาะรถยนต์ (Seat cover), หุ้มม่านบังแดด (Sun visor), หุ้มแผงประตู (Door trim panel), หุ้มเกียร์ (Gear cover), หุ้มที่พักแขน (Arm rest), หุ้มที่พักศีรษะ (Head rest) และพรมปูพื้นรถยนต์ (Car mat) เป็นต้น ดังรูปที่ 1.1 โดยผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีที่ถูกผลิตขึ้นนั้นมีหลากหลายความหนาขึ้นอยู่กับข้อกำหนดตามที่ค่ายรถยนต์ต้องการ



รูปที่ 1.1 ผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี

1.1.2. กระบวนการผลิต

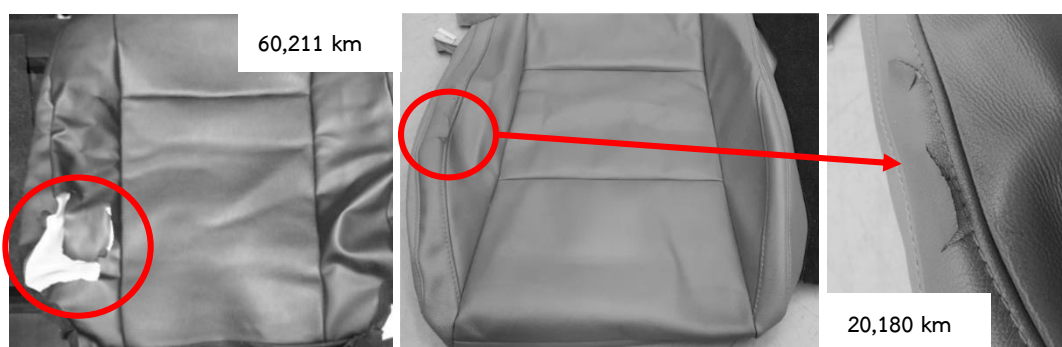


รูปที่ 1.2 กระบวนการคาเลนเดอร์ (Calendering process) (Thai Nam Plastic (Public) Co., 2017)

จากรูปที่ 1.2 วัตถุดิบ (Raw material) ทั้งหมดเช่น ผงพีวีซี (PVC Resin), พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer), สารตัวเติม (Filler) และสารเติมแต่ง (Additive) ถูกนำมาผสมและคลุกเคล้าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) จากนั้นวัตถุดิบถูกส่งไปยังเครื่องแบนบูรี (Banbury mixer) เพื่อหลอมเหลวและนวดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เรียกว่า พีวีซีคอมพาวด์ (PVC Compound) แล้วลำเลียงต่อไปยังเครื่องบดผสมเอ (Mixing roll A) และเครื่องเอ็กซ์ทรูด (Extruder) ตามลำดับ เพื่อนวดและหลอมเหลวอีกครั้ง โดยอาศัยความร้อน (Heat) แรงเฉือน (Shear force) และความดัน (Pressure) พร้อมกับกรองสิ่งปนเปื้อนก่อนถูกส่งไปยังเครื่องบดผสมบี (Mixing roll B) เพื่อให้ได้เนื้อที่ละเอียดมากขึ้น จากนั้นรีดพีวีซีคอมพาวด์ออกมาให้เป็นแผ่นตามขนาดที่ต้องการ เรียกว่า พีวีซีชีท (PVC sheet) ด้วยเครื่องคาเลนเดอร์ (Calendering machine) หรือเรียกโดยย่อว่า CA และส่งผ่านไปยังกระบวนการหล่อเย็น (Cooling) เพื่อให้ชิ้นงานคงตัว ก่อนเก็บเข้าม้วนด้วยเครื่องม้วน (Winder) ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ผลิตชั้นผิว (Skin layer) และชั้นฟองน้ำ (Foam layer) ก่อนประกบผ้า (Fabric)

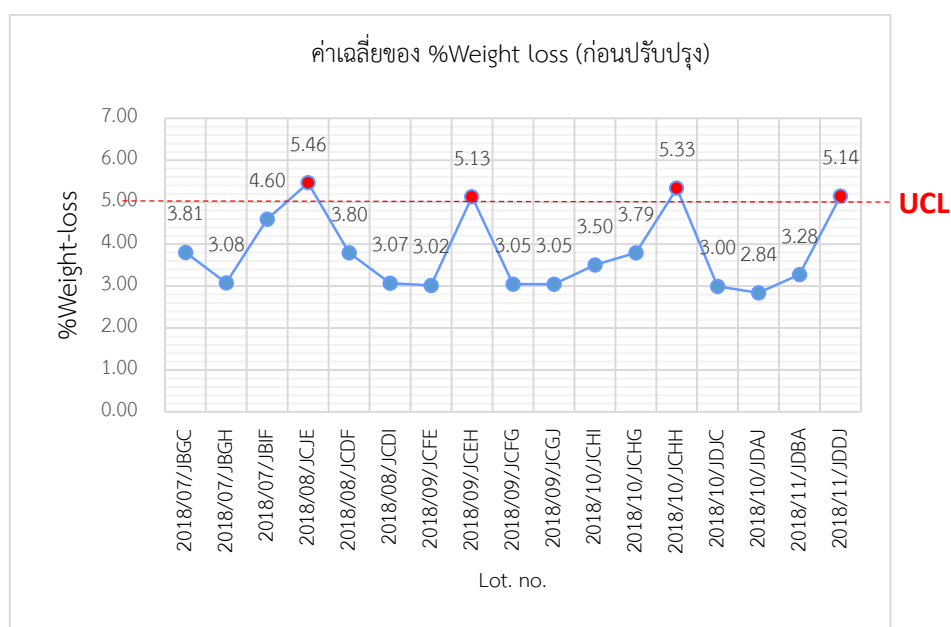
1.2 ที่มาและความสำคัญ

สืบเนื่องจากผู้ใช้งานรถยนต์ (End user) พบปัญหาระหว่างการใช้งานของสินค้ารุ่น A คือ เบาะรถยนต์แตก (Seat crack) หลังจากการใช้งานในระยะ 100,000 กิโลเมตร ดังรูปที่ 1.3 ซึ่งอยู่ในระยะการประกันภัยสินค้าของค่ายรถยนต์ โดยสินค้ารุ่น A ที่พบปัญหาเป็นผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท “PVC Sponge Leather” หรือเรียกโดยย่อว่า LS มีความหนาอยู่ที่ 1.00 ± 0.02 มิลลิเมตร ทำให้กลางปี 2018 ทางค่ายรถยนต์ (OEM) ได้ร้องเรียน (Complain) และเรียกร้อง (Claim) มายังบริษัท เพื่อต้องการทราบถึงสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น พร้อมกับชะลอการสั่งซื้อสินค้ารุ่น A และทำการสั่งซื้อสินค้าจากผู้ผลิตสำรอง (Second source) แทนไปก่อน ซึ่งทำให้กระทบต่อยอดขายของบริษัทโดยตรงเนื่องจากสินค้ารุ่น A มียอดการสั่งซื้อโดยประมาณคิดเป็นร้อยละ 20 ของยอดขายทั้งหมดต่อปี ถ้าหากทางบริษัทไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้อาจส่งผลให้การขายของสินค้ารุ่น A ลื่นสุดลง และอาจจะรวมถึงโอกาสในการขายสินค้ารุ่นใหม่ (New model) ของบริษัทในอนาคตจะเป็นไปได้ยากขึ้น ทางบริษัทจึงต้องทำการวิเคราะห์หาสาเหตุและหาแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว หลังจากที่ได้วิเคราะห์และตรวจสอบหาสาเหตุ จนพบความผิดปกติในเรื่องของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี หลังผ่านการทดสอบความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ตามวิธีการทดสอบ (Test method) ของค่ายรถยนต์พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีที่ผลิตจากกระบวนการคาเลนเดอร์ (Calendering process) มีค่าสูงเกินข้อกำหนด (Specification) ของค่ายรถยนต์ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ (Spec. ≤ 5) ดังรูปที่ 1.4 ดังนั้นทางบริษัทจึงต้องแก้ไขปัญหาร่วมกับปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น



รูปที่ 1.3 ผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 mm (สินค้ารุ่น A ที่พบปัญหาเบาะแตก)

จากการสุ่มตรวจสินค้ารุ่น A จำนวน 17 รายการ พบว่าผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี หลังผ่านการทดสอบความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส (°C) เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ไม่ผ่านตามข้อกำหนดของค่าयरยन्द โดยจากกราฟจะเห็นว่ามึบางล็อต (Lot.) ของสินค้ารุ่น A มีค่า %Weight-loss เกิน 5% ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 1.4 สำหรับตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบแสดงดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี



ชิ้นงานก่อนทดสอบ



ชิ้นงานหลังทดสอบ

รูปที่ 1.5 ชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบ (ผิปกติ)

จากรูปที่ 1.5 ชิ้นงานหนังเทียมพีวีซี หลังผ่านการทดสอบความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส (°C) เป็นเวลา 100 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีลักษณะแข็งกระด้างและงอเมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนทดสอบ โดยทีมวิศวกรฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคนิคได้พุ่งประเด็นไปที่พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นอันดับแรก เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์เป็นวัตถุดิบที่มีสถานะเป็นของเหลวที่ใส่ลงไปในส่วนผสมในปริมาณมากที่สุดและใส่เพื่อให้ความอ่อนนุ่มแก่ผลิตภัณฑ์ สำหรับประเด็นที่สองมองไปที่กระบวนการผลิตคือ กระบวนการคาเลนเดอร์ ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่าพลาสติกไซเซอร์หาย (Loss) ออกไปมากอาจเป็นเพราะอุณหภูมิในการผลิตไม่เหมาะสม ถ้าหากอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้พลาสติกไซเซอร์แสดงประสิทธิภาพของตัวเองออกมาได้ไม่เพียงพอเนื่องจากการผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับวัตถุดิบอื่นๆ ยังไม่สมบูรณ์ หรือถ้าหากอุณหภูมิในการผลิตสูงเกินไปทำให้พลาสติกไซเซอร์สลายตัว (Degradation)

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อปรับปรุงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มิลลิเมตร หลังผ่านการทดสอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ให้ผ่านตามข้อกำหนดของค่าयरยन्दคือ ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ (Spec. $\leq 5\%$)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นกรณีศึกษาของบริษัทผลิตหนังเทียมพีวีซีหุ้มชิ้นส่วนภายในรถยนต์ด้วยกระบวนการคาเลนเดอร์ โดยจะทำการศึกษาครอปคลุมเฉพาะเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มิลลิเมตร หลังจากการทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมงแล้วไม่ผ่านข้อกำหนดของค่าयरยन्द (เกิน 5%) เท่านั้น โดยจะประยุกต์ใช้เทคนิคซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) เข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

1.5 ดัชนีชี้วัดงานวิจัย

ดัชนีชี้วัดงานวิจัยคือ ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี หลังจากการทดสอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ต้องผ่านข้อกำหนดของค่าयरยन्दคือ ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ($\leq 5\%$)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. คุณภาพของสินค้ารุ่น A ผ่านข้อกำหนดของค่าयरณต์ (< 5%)
2. ทางค่าयरณต์ พึงพอใจกับผลที่ได้
3. การซื้อ-ขายของสินค้ารุ่น A กลับมาเป็นปกติ
4. โอกาสในการขายสินค้ารุ่นใหม่ (New model) ในอนาคตมีขึ้นเรื่อยๆ

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะดำเนินงานตามขั้นตอนของเทคนิคซิกซ์ ซิกมา (DMAIC) ซึ่งจะมีขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้

- 1) ศึกษาสูตร กระบวนการผลิต วิธีการทดสอบ และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นของการผลิตหนังเทียมพีวีซี
- 2) กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำวิจัยพร้อมกับกำหนดแนวทางการดำเนินงาน
- 3) ศึกษาหลักการทางซิกซ์ ซิกมา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 4) ระบุปัญหาที่มีความสำคัญโดยใช้เทคนิคซิกซ์ ซิกมาคือ ขั้นตอนการระบุปัญหา (Define Phase)
- 5) ดำเนินการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคซิกซ์ ซิกมา ซึ่งแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้
 - ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา (Measure phase)
 - ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze phase)
 - ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve phase)
 - ขั้นตอนการควบคุม (Control phase)
- 6) สรุปผลของกรณีศึกษา และข้อเสนอแนะ
- 7) จัดทำรูปเล่ม และนำเสนอวิทยานิพนธ์

1.8 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินงานปี 2563									
	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	
1. ศึกษาสูตร กระบวนการผลิต วิธีการทดสอบ และค้นหาปัญหาที่เกิดขึ้นของการผลิตหนึ่งเทียมพีวีซี										
2. กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำวิจัยพร้อมกับกำหนดแนวทางการดำเนินงาน										
3. ศึกษาหลักการทางซิกซ์ ซิกมา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
4. ระบุปัญหาที่มีความสำคัญโดยใช้เทคนิคซิกซ์ ซิกมา - ขั้นตอนการระบุปัญหา (Define phase)										
5. ดำเนินการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคซิกซ์ ซิกมา ซึ่งแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ - ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา (Measure phase) - ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze phase) - ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve phase) - ขั้นตอนการควบคุม (Control phase)										
6. สรุปผลของกรณีศึกษา และข้อเสนอแนะ										
7. จัดทำรูปเล่ม และนำเสนอวิทยานิพนธ์										

บทที่ 2

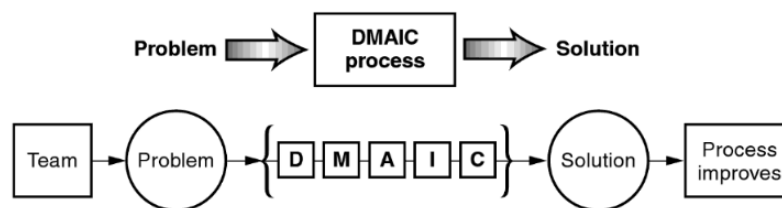
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะประกอบด้วยทฤษฎี วิธีการและงานวิจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยการปรับปรุงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยนำการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการระบุปัญหา ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา การขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา และขั้นตอนการควบคุม (Define-Measure-Analyze-Improve-Control, DMAIC) มาประยุกต์ในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีด้วยเครื่องแคลนเดอร์ (Calendering machine) เพื่อตรวจสอบวิธีวัด ระบุปัจจัยที่มีผลค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีที่เกินข้อกำหนดของค่ายรถยนต์ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้แผนผังสาเหตุและผล จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์และลำดับความสำคัญของปัจจัยจากการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) เลือกปัจจัยที่สำคัญที่สุด เพื่อนำไปดำเนินการออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE) และตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีให้ผ่านข้อกำหนดของค่ายรถยนต์

2.1 เครื่องมือคุณภาพ (Quality tools)

2.1.1 ซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma Methodology)

ซิกซ์ ซิกมา คือการนำหลักการและเทคนิคด้านคุณภาพมาใช้และมีประสิทธิภาพสูง การรวมองค์ประกอบจากการทำงานของผู้ริเริ่มคุณภาพจำนวนมาก จะเห็นว่า ซิกซ์ ซิกมามีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ปราศจากข้อผิดพลาดในการดำเนินธุรกิจ ซึ่งซิกมา “ σ ” เป็นตัวอักษรในภาษากรีกที่ถูกนำมาใช้โดยนักสถิติเพื่อวัดความแปรปรวนในกระบวนการต่างๆ โดยเครื่องมือจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบการปรับปรุงประสิทธิภาพอย่างง่าย ดังรูปที่ 2.1 เรียกว่า ขั้นตอนการระบุปัญหา ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา และขั้นตอนการควบคุม (Define-Measure-Analyze-Improve-Control, DMAIC) (Thomas & Paul, 2018)



รูปที่ 2.1 กระบวนการ DMAIC (Shankar, 2009)

2.1.2 วิธีการดำเนินงานของซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma Methodology)

2.1.2.1 ขั้นตอนการระบุปัญหา (Define Phase, D)

ในขั้นตอนการระบุปัญหาต้องศึกษาและอธิบายสภาพปัญหาให้ชัดเจน จากนั้นทำการสรุปออกมาเป็นเอกสารที่เรียกว่า สัญญาโครงการ (Project Charter) (Thomas & Paul, 2018) ซึ่งต้องมีรายละเอียดดังนี้

1) คำอธิบายสภาพปัญหา (Problem Statement)

คำอธิบายสภาพปัญหาที่ชัดเจนต้องอธิบายว่าปัญหาที่จะปรับปรุงเป็นปัญหาในเรื่องอะไร (What) เกิดขึ้นที่ใด (Where) ตั้งแต่เมื่อใด (When) และมีผลกระทบเท่าใด

2) วัตถุประสงค์ของโครงการ (Objective Statement)

วัตถุประสงค์ของโครงการ เป็นการบอกว่าโครงการนั้นต้องการบรรลุวัตถุประสงค์ในเรื่องใดมีค่าเป้าหมายเท่าใด และต้องการบรรลุผลภายในเมื่อใด

3) ขอบเขตของโครงการ (Project Scope)

ขอบเขตของโครงการมักจะกำหนดเกี่ยวกับเวลาเริ่มและสิ้นสุดของการทำโครงการ หรือพื้นที่และกระบวนการที่จะทำการปรับปรุง

4) ตัวชี้วัดของโครงการ (Project Metrics)

ตัวชี้วัดของโครงการ มีหลายด้าน ได้แก่

- 4.1) ตัวชี้วัดทางธุรกิจ (Business metric) เป็นตัวชี้วัดระดับองค์กร เช่น จำนวนร้องเรียนของลูกค้า หรือระดับคุณภาพ เป็นต้น

4.2) ตัวชี้วัดหลัก (Primary metric)

ตัวชี้วัดหลักเป็นตัวชี้วัดสำหรับการวัดความสำเร็จของโครงการซึ่งมีความสอดคล้องกับปัญหาและวัตถุประสงค์ในการทำโครงการ อีกทั้งตัวชี้วัดนี้ยังนำมาใช้ในการติดตามความคืบหน้าของการทำโครงการได้ ตัวอย่างเช่น สัดส่วนของเสีย, ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (Process capability analysis, Cpk) และ อัตราผลผลิตดี (Yield) เป็นต้น

4.3) ตัวชี้วัดรอง (Secondary metric)

ตัวชี้วัดรองเป็นตัวชี้วัดที่อาจได้รับผลกระทบในเชิงบวกเมื่อมีการปรับปรุงงานเพื่อให้บรรลุผลลัพธ์ตามที่กำหนดในตัวชี้วัดหลัก ตัวอย่างเช่น ถ้าตัวชี้วัดหลักคือ สัดส่วนของเสีย ตัวชี้วัดรองคือพื้นที่ว่างที่สามารถใช้ประโยชน์ได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากไม่ต้องใช้พื้นที่จัดเก็บของเสียแล้ว

4.4) ตัวชี้วัดสืบเนื่อง (Consequential metric)

ตัวชี้วัดสืบเนื่องเป็นตัวชี้วัดที่อาจได้รับผลกระทบเชิงลบจากการปรับปรุงงานเพื่อให้บรรลุผลลัพธ์ตามที่กำหนดในตัวชี้วัดหลัก ตัวอย่างเช่น ถ้าตัวชี้วัดหลักเป็น สัดส่วนของเสีย จะมีตัวชี้วัดสืบเนื่องเป็นต้นทุนต่อหน่วย เนื่องจากหากปรับปรุงเพื่อลดสัดส่วนของเสีย วิธีการปรับปรุงนั้นอาจทำให้ต้นทุนต่อหน่วยเพิ่มขึ้น จึงต้องพิจารณาว่าตัวชี้วัดสืบเนื่องเหล่านี้เพิ่มขึ้นในระดับที่สามารถยอมรับได้หรือไม่

4.5) ตัวชี้วัดทางการเงิน (Financial metric) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

- ต้นทุนที่สามารถลดได้อย่างแท้จริง (Hard savings) ซึ่งเป็นต้นทุนที่อยู่ในรูปของตัวเงินที่สามารถลดลงได้จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทำโครงการ เช่น ต้นทุนของเสียที่ลดลงได้
- ต้นทุนที่สามารถอาจลดลงได้ (Soft savings) ซึ่งเป็นต้นทุนที่คาดว่าจะลดลงได้ในอนาคตหรือสิ่งทีอาจจะเป็นประโยชน์ได้จากการดำเนินโครงการ เช่น ค่าเงินลงทุนในการจัดหาพื้นที่ ที่สามารถประหยัดได้จากการใช้ประโยชน์พื้นที่ว่างเพิ่มขึ้นจากการจัดเก็บของเสียที่ลดลง

5) ข้อจำกัดของโครงการ (Project Constraints)

ข้อจำกัดของโครงการมักจะกล่าวถึงขีดจำกัดด้านทรัพยากรที่มีให้กับการทำโครงการ ยกตัวอย่างเช่น เวลาที่สมาชิกในทีมจะมีให้กับการทำโครงการได้ หรืองบประมาณที่มี เป็นต้น

6) สมาชิกในทีมงานและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง (Team Members, Stakeholders)

สมาชิกในทีมและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งหมดต้องมีความรู้และมีประสบการณ์อย่างสูงเกี่ยวกับปัญหาที่จะทำการปรับปรุงแก้ไข ซึ่งจะมาจากหลากหลายส่วนงานที่มีความเกี่ยวข้องกับปัญหาที่จะแก้ไข

7) ระยะเวลาในการดำเนินการโครงการ (Project Schedule)

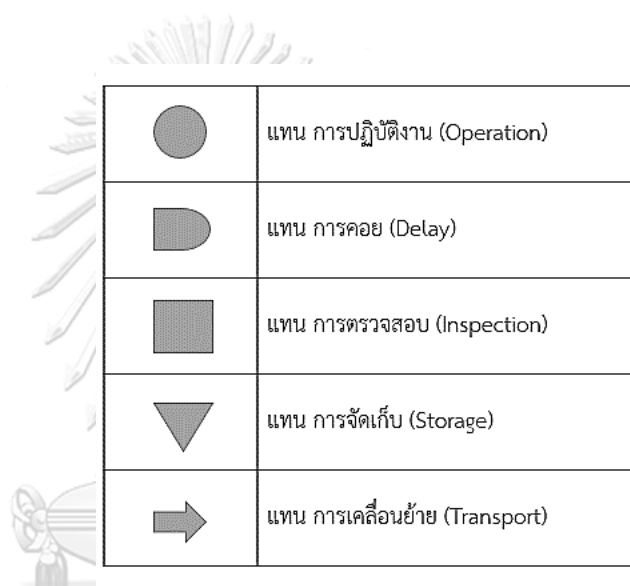
ในส่วนนี้เป็นการกำหนดระยะเวลาเพื่อให้ทราบว่าโครงการจะต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินการเท่าไร โดยทำการระบุวันเริ่มต้นโครงการและวันสิ้นสุดโครงการไว้ด้วย ซึ่งจะช่วยให้เป็นแนวทางให้แก่สมาชิกในทีมในการจัดสรรเวลาสำหรับการทำโครงการด้วย






2.1.2.2 ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา (Measure Phase, M)

ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหาของโครงการต้องทำการวัดสถานการณ์ปัจจุบันของการผลิตหนึ่งเทียมพีวีซีที่ผลิตจากกระบวนการคาเลนเดอร์ด้วย ดังนั้นจะใช้เครื่องมือทางสถิติ (Statistical tools) เช่น การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ และแผนภูมิควบคุม (Control chart) เป็นต้น สำหรับวิธีการวัด (Measurement method) ควรระบุและตรวจสอบให้ชัดเจน โดยใช้การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA) (Automotive Industry Action Group, 2010) เพื่อสังเกตและประเมินสถานการณ์ปัจจุบันของระบบการวัด นอกจากนั้นในขั้นตอนการวัดสภาพปัญหาจะมีการวางแผนการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการประเมินความสามารถของกระบวนการผลิตหนึ่งเทียมพีวีซีที่ผลิตจากเครื่องคาเลนเดอร์ และใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาต่อไป สำหรับขั้นตอนที่ต้องทำในการวัดสภาพปัญหาของโครงการ มีดังนี้

1) การสร้างแผนผังกระบวนการทำงานโดยละเอียด (Detailed Process map)

ในการแสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานโดยละเอียดสามารถแสดงได้โดยใช้แผนผังการไหลของกระบวนการผลิต (Process Flow Diagram) ซึ่งเป็นแผนผังที่แสดงถึงขั้นตอนการทำงานหรือขั้นตอนการไหลของงานและจะทำให้เห็นถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนต่างๆ ที่อาจจะส่งผลต่อปัญหาที่กำลังจะปรับปรุง และจะทำให้เห็นว่าควรเก็บข้อมูลในเรื่องใดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาต่อไป สำหรับการเขียนแผนผังการไหลของกระบวนการนั้นจะใช้สัญลักษณ์มาตรฐาน ดังรูปที่ 2.2



	แทน การปฏิบัติงาน (Operation)
	แทน การคอย (Delay)
	แทน การตรวจสอบ (Inspection)
	แทน การจัดเก็บ (Storage)
	แทน การเคลื่อนย้าย (Transport)

รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์มาตรฐานที่ใช้เขียนแผนผังการไหลของกระบวนการผลิต

2) การออกแบบแผนการเก็บข้อมูล

สำหรับการออกแบบแผนการเก็บข้อมูล โดยเริ่มต้นจะต้องกำหนดวิธีการวัดและวิธีการเก็บข้อมูลสำหรับกระบวนการผลิตหนึ่งเต็มพีวีซีที่ผลิตจากเครื่องคาเลนเดอร์ โดยทำการระบุสิ่งที่ต้องการวัด เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการวัด ออกแบบวิธีการวัดและจัดทำเอกสารในการบันทึกข้อมูลการวัด เพื่อให้ข้อมูลที่เก็บนั้นไม่เอนเอียง (Bias)

3) การวัดสถานการณ์ปัจจุบันของกระบวนการผลิต

เริ่มจากการสังเกตการวัดสถานการณ์ปัจจุบันของกระบวนการผลิตหนึ่ง เทียมพีวีซีที่ผลิตจากเครื่องคาเลนเดอร์ โดยทำการวางแผนการเก็บข้อมูลเพื่อนำไป วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการและแผนภูมิควบคุม (Control chart) เบื้องต้น

4) การตรวจสอบระบบการวัด

ในการตรวจสอบระบบการวัดจะใช้วิธีการวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) เพื่อให้แน่ใจว่าการเก็บข้อมูลมีความแม่นยำเพียงพอที่จะตัดสินใจทำการวิเคราะห์ งานวิจัยนี้ต่อไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะทำการประเมินโดยอ้างอิงเกณฑ์ของ กลุ่มปฏิบัติการอุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive Industry Action Group, AIAG) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของรีพีทะบิลิตี้ (Repeatability) และรีโพรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Gage R&R (Automotive Industry Action Group, 2010)

5) การเก็บข้อมูลสำหรับการวัด

การเก็บข้อมูลควรทำโดยการรวบรวมข้อมูลเพื่อระบุปัญหาเพิ่มเติม นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ควรเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่อาจเป็นไปได้ที่บ่งชี้ถึงวิธีการ และต้องทราบว่าปัญหาเกิดขึ้นเมื่อใดหรือที่ไหน ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้เครื่องมือทาง สถิติที่ถูกใช้สำหรับการเก็บข้อมูลเพื่อดูแนวโน้มหรือความผิดปกติของข้อมูลคือ แผนภูมิควบคุมและวิธีการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ

2.1.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase, A)

ในขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ต้องระบุสาเหตุของปัญหาที่อาจเป็นไปได้ ทั้งหมด จากนั้นกำหนดสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาโดยใช้แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) และทำการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) จากนั้นทำการเลือกปัจจัย (Factor) ที่มีอิทธิพลต่อปัญหา

มากที่สุด เพื่อดำเนินการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) ต่อไป ซึ่งขั้นตอนสำหรับการวิเคราะห์ปัญหามีดังนี้

1) การระดมความคิด (Brainstorming)

การระดมความคิดมีวัตถุประสงค์เพื่อระบุสาเหตุที่อาจเป็นไปได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือต่างๆ จากผู้ชำนาญด้านกระบวนการหรือสมาชิกของโครงการที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับกระบวนการผลิตหนึ่งเทียมพีวีซีที่ผลิตจากเครื่องคาเลนเดอร์ ซึ่งวิธีการหลากหลายเหล่านี้ได้ถูกนำมาใช้รวบรวมปัจจัยที่เป็นไปได้ทั้งหมดออกมาในรูปแบบของแผนผังสาเหตุและผล (Cause and effect diagram) หรือแผนผังอิชิกาวา (Ishikawa Diagram) และแผนผังนี้ยังสามารถเรียกอีกอย่างว่า แผนผังก้างปลา (Fishbone diagram) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มักจะถูกนำไปใช้ในการระดมความคิดที่เกี่ยวข้องกับปัญหาทั้งหมด (Thomas & Paul, 2018) โดยแจกแจงออกมาในรูปแบบของ 5M1E ซึ่งประกอบด้วย คน (Man), วัสดุ (Materials), วิธีการปฏิบัติงาน (Methods), เครื่องจักร (Machines), การวัดผล (Measurements) และสิ่งแวดล้อม (Environment)

2) การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis)

หลังจากที่ได้รวบรวมสาเหตุทั้งหมดที่ได้จากการระดมความคิดของผู้ชำนาญการด้านกระบวนการหรือสมาชิกของโครงการที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับกระบวนการผลิตหนึ่งเทียมพีวีซีที่ผลิตจากเครื่องคาเลนเดอร์ จากนั้นพิจารณาและทบทวนการปรับปรุงที่อาจเป็นไปได้สำหรับความเสี่ยงและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับกระบวนการ ได้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) เพื่อแก้ปัญหาที่แท้จริง โดยทำการสร้างความสัมพันธ์กับแผนผังสาเหตุและผลและนำมาวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) (สมภพ ตลับแก้ว, 2551) ซึ่งในงานวิจัยนี้ FMEA ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

- Design FMEA (DFMEA) คือการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบในงานออกแบบผลิตภัณฑ์
- Process FMEA (PFMEA) คือการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบในกระบวนการ

3) การเลือกปัจจัยมาทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

จากการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) ของแต่ละปัจจัยให้ออกมาเป็นค่าคะแนนตัวเลขลำดับความเสี่ยง (Risk Priority Number, RPN) และถ้าหากปัจจัยใดพบว่ามีค่า RPN มากกว่า 100 คะแนนขึ้นไป ปัจจัยเหล่านั้นจะถูกนำมาดำเนินการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) เพื่อหาแนวทางการแก้ไขที่เหมาะสมที่สุดและนำมาประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับกระบวนการต่อไป (Montgomery, 2017)

2.1.2.4 ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve Phase, I)

สำหรับขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหานี้จะได้สาเหตุที่แท้จริงของปัญหาจากการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) และถูกนำมาออกแบบการทดลอง (DOE) พร้อมกับประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (RSM) เพื่อปรับปรุงและแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพต่อไป

1) แนวทางการแก้ไขปัญหา

การปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการนั้นต้องระบุสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาให้ได้ก่อนที่จะนำข้อมูลต่างๆเหล่านั้นไปใช้ในขั้นตอนถัดไป ในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบการทดลอง (DOE) และประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (RSM) โดยวิธีดังกล่าวมักจะนิยมนำมาทำการวิเคราะห์และหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงกระบวนการ ซึ่งปัจจัยที่ถูกเลือกจากการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) จำเป็นต้องทำการปรับปรุงโดยการระดมความคิดเพื่อหาแนวทางแก้ไขที่อาจจะเป็นไปได้ เช่นจัดทำมาตรฐานการทำงานให้เหมาะสม เพื่อที่จะควบคุมและตรวจสอบโดยใช้วิธีการทางสถิติได้

2) การตรวจสอบประสิทธิภาพของการปรับปรุงกระบวนการ

หลังจากดำเนินการปรับปรุงกระบวนการทั้งหมดแล้ว ต้องนำมาตรวจสอบประสิทธิภาพโดยการใช้วิธีการทางสถิติด้วย เช่น การตรวจสอบความสามารถของกระบวนการเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการ ว่าให้ผลดีขึ้นหรือสามารถแก้ไขปัญหาทั้งหมดได้หรือไม่ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาเหล่านั้นซ้ำขึ้นอีกในอนาคต ดังนั้นการวางแผนการเก็บข้อมูลจำเป็นต้องถูกระบุไว้ให้ชัดเจนเพื่อควบคุมกระบวนการต่อไปเรื่อยๆ และเพื่อให้แน่ใจว่าการปรับปรุงกระบวนการที่ทำไปแล้วนั้นมันมีประสิทธิภาพที่ดี

2.1.2.5 ขั้นตอนการควบคุม (Control Phase, C)

ในขั้นตอนการควบคุมมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาหรือคงประสิทธิภาพของการปรับปรุงที่ได้ถูกดำเนินการไปแล้วในช่วงการปรับปรุงและต้องมีการดำเนินการแก้ไขที่เหมาะสมเพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการนั้นอยู่ในการควบคุมและป้องกันไม่ให้เกิดซ้ำได้อีก (Thomas & Paul, 2018) ดังนั้นเพื่อให้บรรลุเป้าหมายนี้ต้องทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การอัปเดตเอกสารที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ

เพื่อให้แน่ใจว่าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทั้งหมดได้ถูกอัปเดตไปพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงกระบวนการอันเนื่องมาจากการปรับปรุงได้ถูกดำเนินการไปแล้ว และเอกสารที่ต้องได้รับการปรับปรุงได้แก่ ขั้นตอนการปฏิบัติงาน (Standard Operating Procedure, SOP), การทบทวนการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA), วิธีการปฏิบัติงาน (Work Instructions, WI) และแผนการควบคุม (Control plan) เป็นต้น

2) การฝึกอบรม

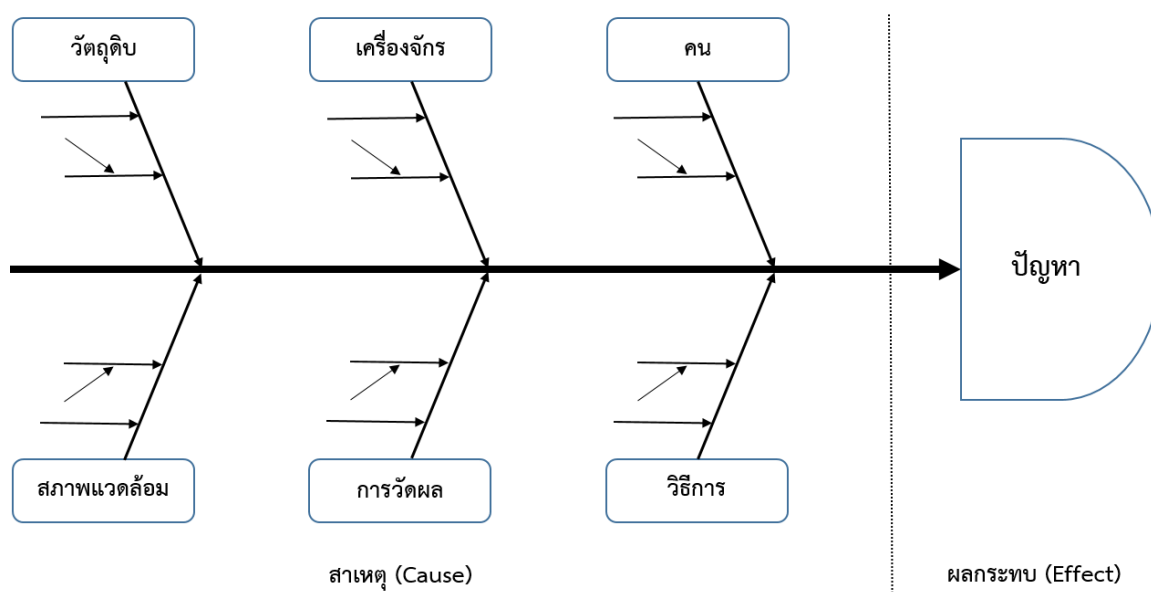
เพื่อให้แน่ใจว่าสมาชิกทุกคนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทุกขั้นตอนได้รับการฝึกฝนและเข้าใจกิจกรรมหรือขั้นตอนในการปรับปรุงเป็นอย่างดีแล้ว โดยบุคคลที่จะต้องได้รับการอบรม ได้แก่ ผู้ตรวจสอบ, พนักงาน หรือผู้ที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ซึ่งสมาชิกทุกคนควรได้รับการฝึกอบรมให้ได้ตามวัตถุประสงค์

3) การควบคุมกระบวนการทางสถิติ (Statistical Process Control, SPC)

การควบคุมกระบวนการทางสถิติหรือแผนภูมิควบคุม (Control chart) ซึ่งจำเป็นต้องใช้สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพและการติดตามผลของกระบวนการ โดยแผนภูมิควบคุมของกระบวนการสามารถแสดงให้เห็นว่าข้อมูลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีแนวโน้มอะไรที่อาจจะเกิดขึ้นได้

2.2 แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

แผนผังสาเหตุและผลเป็นแผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหากับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น ซึ่งอาจจะรู้จักในชื่อของแผนผังอิชิกาวา (Ishikawa Diagram) (Magar & Shinde, 2014) หรือแผนผังก้างปลา (Fishbone diagram) โดยแผนผังสาเหตุและผลเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวม และแสดงความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มปัญหาทั้งหมดให้ออกมาในรูปแบบของกราฟ ซึ่งแนวคิด 5M1E ก็เป็นหนึ่งในแนวคิดที่มักจะนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา โดยจะมองถึงสาเหตุหลักต่างๆ ที่เป็นปัจจัยสำคัญซึ่งนำมาเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยที่ปัจจัยสำคัญดังกล่าวจะประกอบไปด้วย คน (Man) วัตถุดิบ (Material) วิธีการ (Method) เครื่องจักร (Machine) การวัดผล (Measurement) และสภาพแวดล้อม (Environment) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

2.3 การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)

การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) คือเครื่องมือที่มุ่งเน้นชี้ให้เห็นถึงคุณลักษณะของความเสียหายหรือสาเหตุที่จะนำไปสู่ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการออกแบบ การผลิต หรือการบริการ จากนั้นจึงจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบของความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น เพื่อนำไปสู่การหาวิธีป้องกันการเกิดความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น สำหรับขั้นตอนในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยใช้หลักการ FMEA (สมภพ ตลับแก้ว, 2551) แสดงดังรูปที่ 2.4

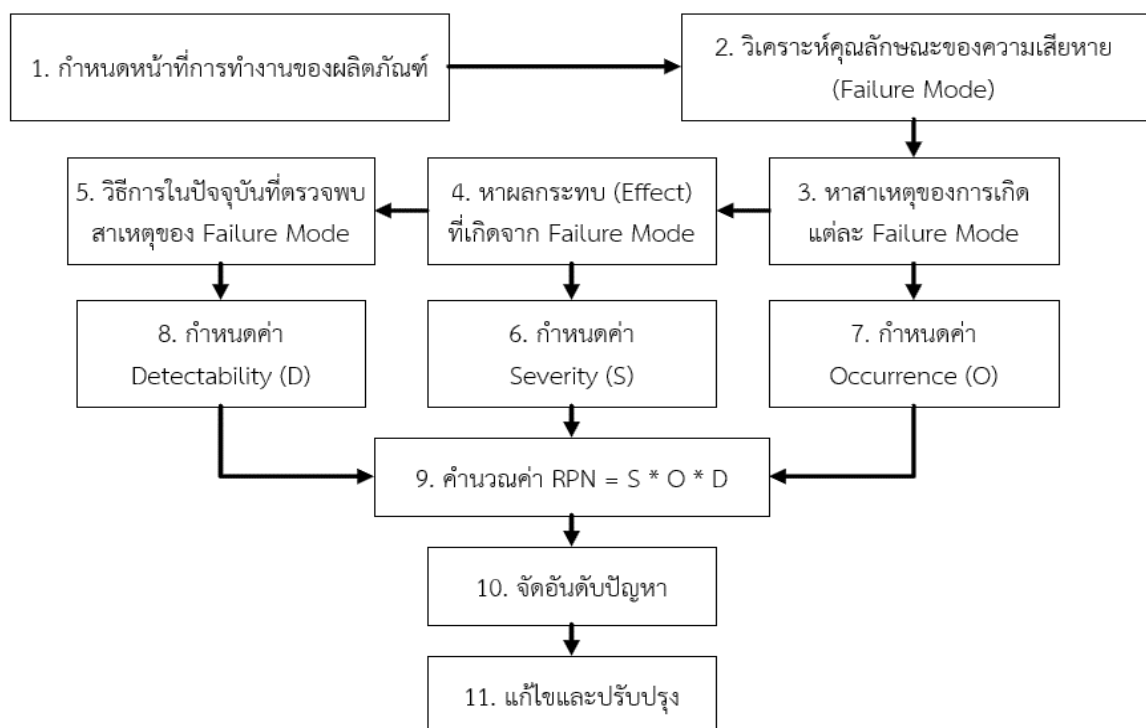
ปัจจุบันหลายๆบริษัทได้นำหลักการ FMEA ไปใช้ในการปรับปรุงวิธีการทำงานตั้งแต่ การออกแบบ การผลิต และการบริการ เป็นต้น ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการ FMEA ไปยังบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ชั้นนำของโลก ได้แก่ Ford, GM และ Chrysler หรือรู้จักกันในชื่อ BIG THREE (Big 3) โดยมาเป็นข้อกำหนดที่สำคัญของระบบ QS-9000 และในปัจจุบันนี้วิธีการ FMEA ได้กลายมาเป็นข้อกำหนดพื้นฐานของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ผู้ผลิตรถยนต์ทุกค่าย ตลอดจนผู้ผลิตชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ของยานยนต์ต้องปฏิบัติตามภายใต้ระบบคุณภาพ TS-16949 (Bluvband & Grabov, 2009) สำหรับรถยนต์จะมีการวิเคราะห์ห้อยู่ 2 ประเภท คือ

- การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบในงานออกแบบผลิตภัณฑ์ (Design Failure Mode and Effect Analysis, DFMEA) เป็นการป้องกันหรือลดข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ที่อาจเกิดขึ้นก่อนการออกแบบผลิตภัณฑ์ เช่น ด้านความปลอดภัย ด้านข้อ-กฎหมาย และด้านคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น
- การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบในกระบวนการ (Process Failure Mode and Effect Analysis, PFMEA) เป็นการป้องกันหรือลดข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นได้ก่อนการผลิต

2.3.1) คำนิยามที่เกี่ยวข้อง

- ค่าตัวเลขลำดับความเสี่ยง (Risk Priority Number, RPN) โดยจะพิจารณาจากระดับความรุนแรง (Severity) ของความเสียหายที่เกิดขึ้น ต่อมาจะพิจารณาจากโอกาสในการเกิด (Occurrence) ของคุณลักษณะความเสียหาย และสุดท้ายจะพิจารณาจากความสามารถในการตรวจพบ (Detection) ของคุณลักษณะของการเกิดความเสียหาย

- ความรุนแรง (Severity, S) จะถูกพิจารณาจากผลกระทบของลักษณะข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นแก่ลูกค้า
- โอกาสในการเกิด (Occurrence, O) เป็นลักษณะบกพร่องที่ถูกพิจารณาจากความเป็นไปได้ในการเกิดสาเหตุของข้อบกพร่อง
- ความสามารถในการตรวจพบ (Detection, D) โดยจะถูกพิจารณาจากคุณสมบัติด้านความสามารถของระบบควบคุมที่ใช้ในปัจจุบัน

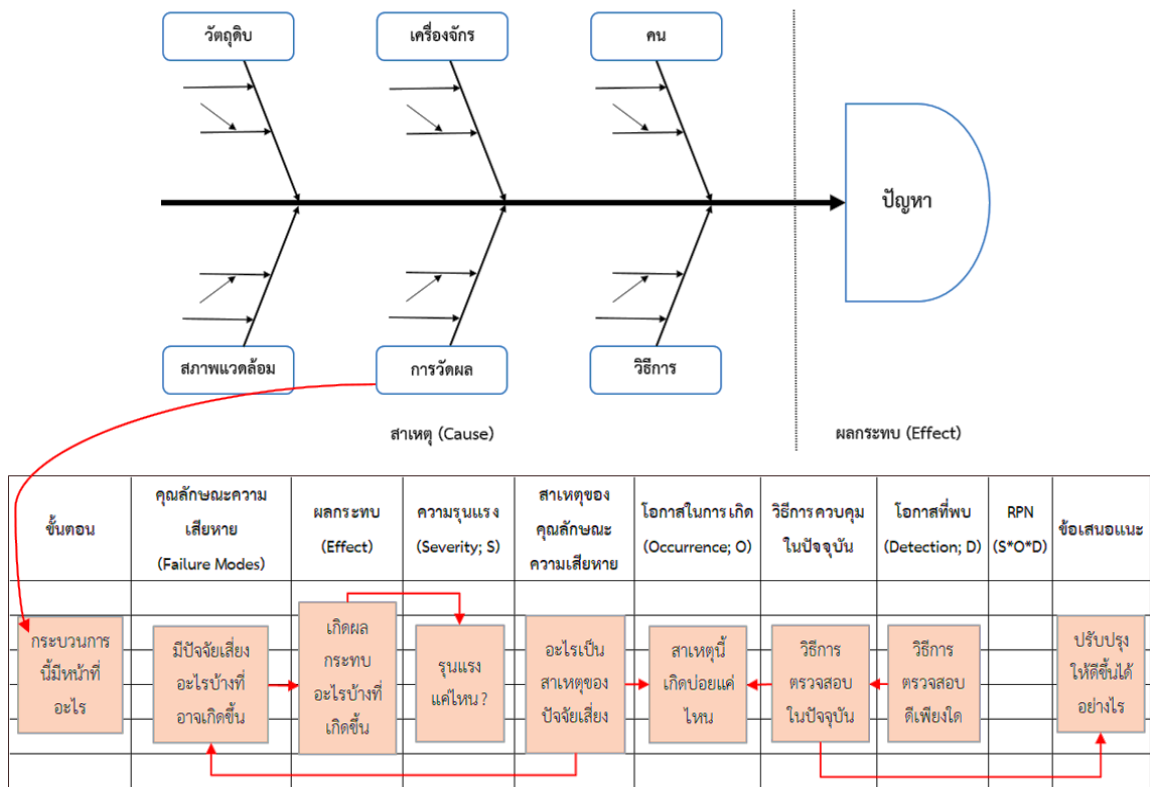


รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยประยุกต์ใช้วิธี FMEA (สมภาพ ตลับแก้ว, 2551)

2.3.2) ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ปัญหาด้วยแผนผังสาเหตุและผลกับ FMEA

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยใช้แผนผังสาเหตุและผลกับ FMEA ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะมีการกำหนดสาเหตุที่เป็นไปได้ (Possible Causes) ไว้ก่อนเพื่อเป็นกรอบแนวคิดในการแก้ไขปัญหา เพื่อนำไปสู่การเริ่มต้นแก้ไขปัญหาที่แท้จริง โดยทำการประยุกต์ใช้วิธี FMEA สำหรับการกำหนดสาเหตุที่เป็นไปได้นั้นจะมาจากทีมผู้มีส่วนประสมการณ์หรือผู้เชี่ยวชาญในสายงานหรือกระบวนการที่กำลังสนใจศึกษาเพื่อแก้ไขปัญหานั้นให้ตรงจุดซึ่งทีมผู้เชี่ยวชาญจะ

ทำการระดมความคิดและร่วมกันประเมินออกมาเป็นคะแนนเพื่อทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป (สมภาพ ตลับแก้ว, 2551)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนผังสาเหตุและผลร่วมกับ FMEA (สมภาพ ตลับแก้ว, 2551)

จากการวิเคราะห์โดยหลักการ FMEA (Morris, 2011) จะพบว่าในแต่ละสาเหตุของการเกิดคุณลักษณะของความเสียหายหรือปัจจัยเสี่ยง (Causes of Failure Mode) จะมีการคิดค่าตัวเลขลำดับความเสี่ยง (Risk Priority Number, RPN) ดังนั้นหากพบว่าสาเหตุใดมีค่า RPN สูงสุด สาเหตุนั้นจะต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน ส่วนสาเหตุที่ได้ค่า RPN รองลงมา สาเหตุนั้นก็อาจจะได้รับการแก้ไขในลำดับถัดไป ซึ่งหลักการ FMEA จะให้ผลที่ชัดเจนไม่เอนเอียง (Bias)

2.4 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA)

ในส่วนของการประเมินผลความเที่ยงของระบบการวัดจะพิจารณาความเที่ยงอยู่ 2 ประเด็นด้วยกัน ได้แก่ ความเที่ยงในส่วนรีพีทาทิบิลิตี้ (Repeatability) และความเที่ยงในส่วนรีโพรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) ซึ่งจะถูกเรียกว่า Gage Repeatability and Reproducibility Analysis (GR&R)

การประเมินความสามารถในเรื่องรีทีทอะบิลิตี้ และรีโปรดิวซิบิลิตี้นั้นจะต้องเก็บข้อมูลค่าวัดชิ้นงานหลาย ๆ ชิ้น (Automotive Industry Action Group, 2010)

2.4.1) ขั้นตอนการศึกษาความเที่ยงของระบบการวัด (GR&R)

- 1) ระบุจำนวนเครื่องมือที่จะตรวจสอบและจำนวนพนักงานวัดที่เคยใช้เครื่องมือวัดเป็นประจำ
- 2) กำหนดขนาดตัวอย่างในการเก็บข้อมูล โดยอ้างอิงขนาดตัวอย่างในตารางที่ 2.1
- 3) สร้างตารางบันทึกข้อมูล
- 4) ให้พนักงานวัดคนแรกวัดชิ้นงานทุกชิ้นในรอบแรก โดยมีลำดับของการวัดชิ้นงานอย่างสุ่มเพื่อลดความลำเอียงในการบอกค่าวัดของพนักงานวัด
- 5) ให้พนักงานวัดคนที่สองวัดชิ้นงานทุกชิ้นในรอบแรก โดยมีลำดับของการวัดชิ้นงานอย่างสุ่มและทำแบบนี้ต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบทุกคน จึงเสร็จสิ้นการวัดค่าครั้งแรกของพนักงานวัดทุกคน
- 6) ทำซ้ำขั้นตอนในข้อ 4 และ 5 จนกระทั่งครบจำนวนรอบการวัดซ้ำตามที่กำหนดไว้
- 7) วิเคราะห์ผลโดยใช้วิธีการประเมินความเที่ยงของระบบการวัดโดยโปรแกรม MINITAB
- 8) หากผลการประเมินเป็นผ่าน แสดงว่าระบบการวัดนั้นมีความเที่ยงเพียงพอ หากผลการประเมินไม่ผ่าน จำเป็นต้องปรับปรุงความเที่ยงของระบบการวัด ก่อนจะนำค่าวัดจากระบบการวัดไปใช้งานต่อไป

ตารางที่ 2.1 ขนาดตัวอย่างในการเก็บข้อมูลเพื่อประเมินคุณสมบัติด้านความเที่ยงของระบบการวัด

จำนวนผู้ทดสอบ	จำนวนอุปกรณ์	จำนวนชิ้นงานที่น้อยที่สุด	จำนวนการวัดซ้ำในแต่ละชิ้นงาน
1	1	10	5
1	2	15	3
2	1	15	3
2	2	10	2
1 หรือ 2	3 หรือมากกว่า	10	2
3 หรือมากกว่า	1 หรือ 2	10	2
3 หรือมากกว่า	3 หรือมากกว่า	10	2

2.4.2) การวิเคราะห์ความเที่ยงของระบบการวัดโดย Minitab

Minitab มีความสามารถในการทำงานและศึกษา Gage R&R เบื้องต้นข้อมูลจะต้องถูกจัดเรียงเข้าไปในรูปแบบของ Minitab ในคอลัมน์ C1-C4 เป็นข้อมูลที่ถูกเก็บมาเพื่อนำมาวิเคราะห์ ส่วนคอลัมน์ C5-C8 เป็นข้อมูลชุดเดียวกันกับคอลัมน์ C1-C4 แต่ถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบตามการวิเคราะห์ของโปรแกรม Minitab ดังรูปที่ 2.6

	C1	C2	C3	C4	C5	C6-T	C7	C8
	Part	Reading 1	Reading 2	Inspector	StackedData	Subscripts	Operator	PartNum
1	1	111.9	112.3	1	111.9	Reading 1	1	1
2	2	108.1	108.1	1	108.1	Reading 1	1	2
3	3	124.9	124.6	1	124.9	Reading 1	1	3
4	4	118.6	118.7	1	118.6	Reading 1	1	4
5	5	130	130.7	1	130	Reading 1	1	5
6	1	111.4	112.9	2	111.4	Reading 1	2	1
7	2	107.7	108.4	2	107.7	Reading 1	2	2
8	3	124.6	124.2	2	124.6	Reading 1	2	3
9	4	120	119.3	2	120	Reading 1	2	4
10	5	130.04	130.1	2	130.04	Reading 1	2	5
11					112.3	Reading 2	1	1
12					108.1	Reading 2	1	2
13					124.6	Reading 2	1	3
14					118.7	Reading 2	1	4
15					130.7	Reading 2	1	5
16					112.9	Reading 2	2	1
17					108.4	Reading 2	2	2
18					124.2	Reading 2	2	3
19					119.3	Reading 2	2	4
20					130.1	Reading 2	2	5

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างรูปแบบการป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม Minitab (Thomas & Paul, 2018)

หลังจากที่ Minitab ได้ประมวลผลออกมาแล้วจะแสดงผลลัพธ์การวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบของกราฟและตาราง สำหรับการศึกษารูปร่าง R&R นั้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 เมื่อพิจารณาที่ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางกับอิทธิพลร่วม (Interaction) จะเห็นว่าผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Mean square, MS) ของรีพีทเทบิลิตี (0.212) จะถูกใช้เป็นตัวหารซึ่งจะเรียกว่า Error term สำหรับการคำนวณอัตราส่วน F (F-Ratio) ของ Operator*PartNum

interaction ($0.269/0.212=1.27$) และ อัตราส่วน F ของ Operator effect จะใช้ Operator*PartNum interaction เป็นตัวส่วน ($0.061/0.269=0.22$) ซึ่งอัตราส่วน F จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า P-value ซึ่งจะแสดงถึงความน่าจะเป็นของความแปรปรวนที่สังเกตได้ โดย P-value จะต้องมิต่ำกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าวิกฤต (Critical value) ใช้สำหรับการตัดสินใจว่าที่มาของความแปรปรวนนั้นมีนัยสำคัญ (Significant) หรือไม่ เมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Operator เท่ากับ 0.66 และ Operator*PartNum เท่ากับ 0.34 ซึ่งมากกว่า 0.05 ($P>0.05$) สรุปได้ว่าไม่มีผลกระทบระหว่าง Operator และไม่มีผลกระทบร่วมระหว่าง Operator กับ PartNum แต่ถ้า Operator นั้น Significant ($P < 0.05$) จะสรุปได้ว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่าง Operator ซึ่งจะเป็นการกระตุ้นให้มีการตรวจสอบหาสาเหตุ และถ้า Interaction นั้น Significant จะสรุปว่า Operator ให้ผลแตกต่างกันบางส่วนแต่อาจจะไม่ทั้งหมด

พิจารณาการวิเคราะห์โดยไม่มีอิทธิพลร่วม (Without Interaction) จะเห็นว่าองศาอิสระ (Degree of Freedom, DF) ของรีพีทเทเบิลหรือ Error term เพิ่มขึ้นอีก 4 ระดับก็คือจาก 10 ระดับกลายเป็น 14 ระดับ ทำให้การทดสอบนั้นอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย ในบางกรณีการวิเคราะห์โดยตัด Interaction ออกอาจจะส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์ที่ผิดพลาด เช่น การวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ แต่ในตัวอย่างนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากเป็นข้อมูลขนาดเล็ก

Source	DF	SS	MS	F	P
PartNum	4	1301.18	325.294	1208.15	0
Operator	1	0.06	0.061	0.22	0.6602
Operator*PartNum	4	1.08	0.269	1.27	0.34317
Repeatability	10	2.12	0.212		
Total	19	1304.43			

รูปที่ 2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางกับอิทธิพลร่วม (Thomas & Paul, 2018)

Source	DF	SS	MS	F	P
PartNum	4	1301.18	325.294	1426.73	0
Operator	1	0.06	0.061	0.27	0.6145
Repeatability	14	3.19	0.228		
Total	19	1304.43			

รูปที่ 2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางโดยไม่มีอิทธิพลร่วม (Thomas & Paul, 2018)

นอกจากนี้โปรแกรม MINITAB ยังสามารถแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็น ส่วนๆ ได้ ดังรูปที่ 2.9 โดย VarComp จะแสดงถึงความแปรปรวนของแต่ละแหล่งที่มา ส่วน %VarComp จะแสดงถึงอัตราส่วนของความแปรปรวนทั้งหมดในแต่ละแหล่งที่มา ซึ่งการวิเคราะห์จะบ่งชี้ให้เห็นว่าค่าความแปรปรวนส่วนใหญ่อยู่ที่กระบวนการผลิต (Part-to-Part)

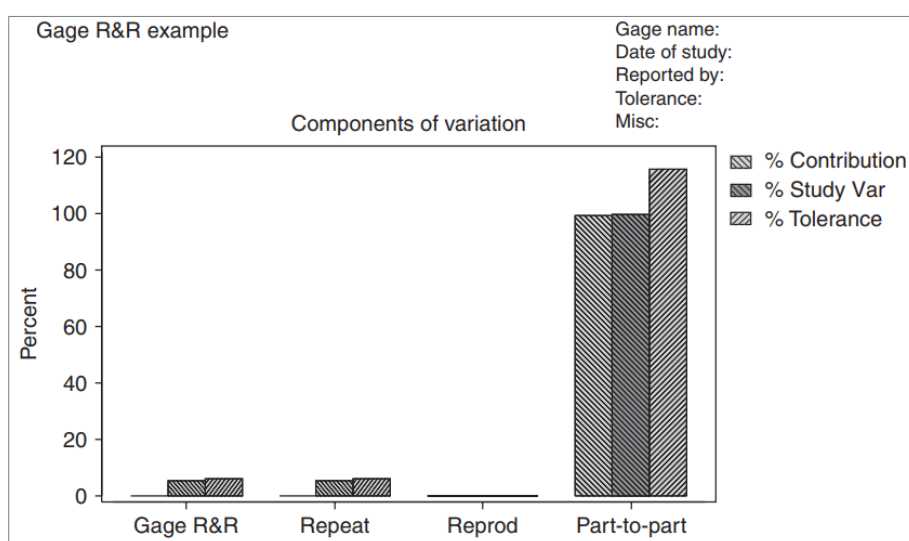
Source	VarComp	% of VarComp
Total gage R&R	0.228	0.28
Repeatability	0.228	0.28
Reproducibility	0	0
Operator	0	0
Part-to-Part	81.267	99.72
Total Variation	81.495	100

รูปที่ 2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Thomas & Paul, 2018)

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล (Analysis of spreads) ดังรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าคอลัมน์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (StdDev) ซึ่งถูกคำนวณจากรากที่ 2 ของคอลัมน์ VarComp ส่วนคอลัมน์ Study Var แสดงถึงการใช้ StdDev ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ส่วนคอลัมน์ %Study Var คือ Study Var ของแต่ละความแปรปรวนหารด้วย Study Var ของความแปรปรวนทั้งหมด (Total variation) และค่าความคลาดเคลื่อนอนุโลม (%Tolerance) หาได้จาก Study Var ของแต่ละความแปรปรวนหารด้วยหารด้วยความคลาดเคลื่อน (Tolerance) โดยมีความน่าสนใจอยู่ตรงที่คอลัมน์ %Tolerance total ถ้ามันหามีค่ามากกว่า 100% แสดงว่ากระบวนการวัดการกระจายที่ได้นั้นมีค่าเกินความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ถึงแม้ว่าไม่ใช่การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ แต่ข้อมูลที่ได้ก็จะแสดงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นได้เช่นกัน ซึ่งข้อมูลดังรูปที่ 2.10 โปรแกรม MINITAB จะนำเสนอออกมาในรูปแบบของกราฟ ดังรูปที่ 2.11

Source	StdDev	Study Var (5.15*SD)	% Study Var (% SV)	% Tolerance (SV/Toler)
Total gage R&R	0.47749	2.4591	5.29	6.15
Repeatability	0.47749	2.4591	5.29	6.15
Reproducibility	0	0	0	0
Operator	0	0	0	0
Part-to-Part	9.0148	46.4262	99.86	116.07
Total variation	9.02743	46.4913	100	116.23

รูปที่ 2.10 การวิเคราะห์การกระจาย (Analysis of spreads) (Thomas & Paul, 2018)



รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์เชิงกราฟของความแปรปรวน (Thomas & Paul, 2018)

2.4.3) การประเมินความเที่ยงของระบบการวัด

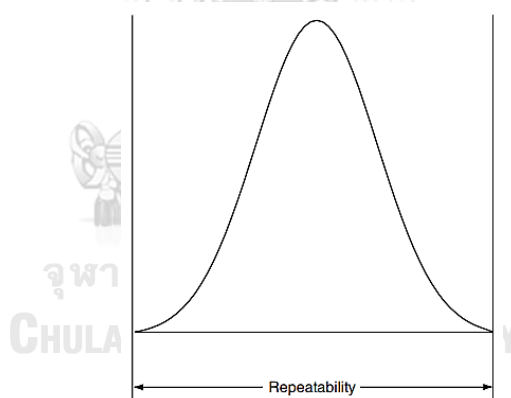
การประเมินผลคุณสมบัติด้านความเที่ยงของระบบการวัด เมื่อได้ข้อมูลจากการวัดมาแล้วจะต้องประเมินค่าความแปรปรวนด้านรีพีทะบิลิตี้ (Repeatability) และค่าความแปรปรวนด้านรีโพรดูซิบิลิตี้ (Reproducibility) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของความแปรปรวนของระบบการวัด โดยมีเกณฑ์การประเมินดังนี้

- 1) ความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับความแปรปรวนของกระบวนการ (%SV หรือ P/TV) และความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอนุโลม (%Tolerance) น้อยกว่า 10% ความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

- 2) ความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับความแปรปรวนของกระบวนการ (%SV หรือP/TV) และความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอนุโลม (%Tolerance) ตั้งแต่ 10% ขึ้นไป แต่ไม่ถึง 30% อาจจะยอมรับได้ โดยอาจจะต้องพิจารณาปัจจัยอื่นๆร่วมด้วย เช่น ค่าใช้จ่าย
- 3) ความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับความแปรปรวนของกระบวนการ (%SV หรือP/TV) หรือความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอนุโลม (%Tolerance) ตั้งแต่ 30% ขึ้นไป ไม่สามารถยอมรับความเที่ยงได้ ต้องหาสาเหตุ และปรับปรุงระบบการวัด

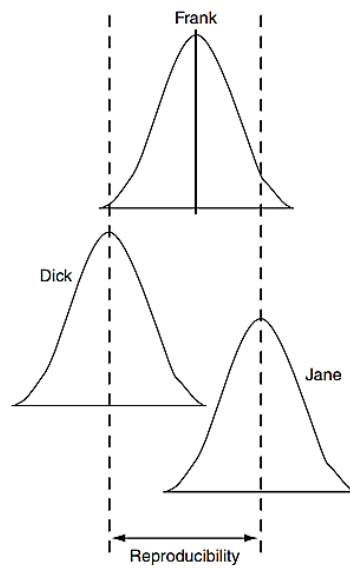
2.4.4) คำนิยามที่เกี่ยวข้อง

- รีพีทหะบิลิตี้ (Repeatability) : กำหนดให้รีพีทหะบิลิตี้แสดงถึงความแปรปรวนของค่าวัดที่ถูกวัดโดยพนักงานวัดคนเดียวกัน โดยการใช้เครื่องมือวัดเดียวกันสำหรับการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขเดียวกัน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รีพีทหะบิลิตี้ (Repeatability) (Thomas & Paul, 2018)

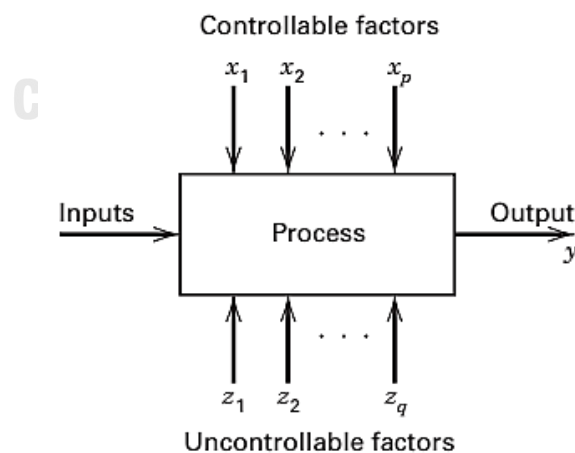
- รีโพรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) แสดงถึงความแปรปรวนของค่าวัดที่ถูกวัดโดยพนักงานวัดคนเดียวกัน โดยเครื่องมือวัดเดียวกันสำหรับการวัดชิ้นงานเดียวกันด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักแสดงถึงความแตกต่างของค่าวัดระหว่างพนักงานวัดต่างคนกัน ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รีโพรดิวซิเบิลิตี (Reproducibility) (Thomas & Paul, 2018)

2.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)

การออกแบบการทดลองหรือมักจะนิยมเรียกกันว่า DOE (Montgomery, 2017) โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระหรือเรียกว่าปัจจัย (Factor) ของกระบวนการใดๆ ซึ่งจะอยู่ในรูปของตัวแปร x แล้วดูผลที่เกิดขึ้นต่อผลผลิต (Output) หรือเรียกว่า ตัวแปรตอบสนอง (Response) ของกระบวนการนั้นๆ ซึ่งจะอยู่ในรูปของตัวแปร y ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีต่อกระบวนการใดๆ (Montgomery, 2017)

โดยทั่วไปแล้วการทดลองจะถูกใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการและระบบต่างๆ ซึ่งกระบวนการหรือระบบจะแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยปกติเราจะเห็นกระบวนการดังกล่าวดำเนินการ

รวมกันกับเครื่องจักร วิธีการ คนและทรัพยากรอื่นๆ ที่เปลี่ยนรูปวัตถุดิบนำเข้า (Input) เป็นผลผลิต (Output) ออกมาอย่างน้อย 1 ชิ้น ตัวแปรและคุณสมบัติบางอย่างของวัตถุดิบเช่น $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (Controllable factors) ส่วน $z_1, z_2, z_3, \dots, z_p$ เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable factors) โดยทั่วไปแล้วตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้จะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และฝุ่น เป็นต้น ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักร และพนักงาน เป็นต้น (Montgomery, 2017) ซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดลองมีดังนี้

- พิจารณาว่าตัวแปรใดที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อตัวแปรตอบสนอง y
- พิจารณาว่าจะตั้งค่า x อย่างไร เพื่อให้ได้ค่า y สูงสุด
- พิจารณาว่าจะตั้งค่า x อย่างไร เพื่อให้ความผันแปรใน y น้อย
- พิจารณาว่าจะตั้งค่า x อย่างไร เพื่อให้ค่า z ส่งผลต่อกระบวนการหรือระบบลดลง

2.5.1) หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองมีหลักการสำคัญอยู่ 3 ข้อ เพื่อที่จะช่วยให้การทดลองมีความถูกต้องเที่ยงตรง และแม่นยำ ได้แก่ การสุ่มตัวอย่าง การทดลองซ้ำ และการบล็อก ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1) การสุ่ม (Randomization)

การสุ่ม คือการจัดลำดับในการทดลองให้เป็นแบบสุ่ม โดยการสุ่มสามารถช่วยลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ ซึ่งการทดลองสุ่มจะช่วยกระจายความผิดพลาดในการทดลองที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ไปสู่ทุกๆ การทดลองซึ่งจะทำให้มีโอกาสและมีขนาดเกิดขึ้นเท่าๆกัน ดังนั้นการสุ่มจะทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง

2) การทดลองซ้ำ (Replication)

การทดลองซ้ำ คือการทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกันมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการทดลองเพิ่มมากขึ้น และยังทำการทดลองเพิ่มมากขึ้นเท่าไร

ก็จะทำให้ได้ข้อมูลจากการทดลองเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งจะเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการทดลอง และยังเพิ่มความเที่ยงตรงให้กับข้อมูลมากยิ่งขึ้น จึงทำให้การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองนั้นมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยการทดลองซ้ำจะมีประโยชน์คือช่วยให้ผู้ทดลองสามารถประมาณค่าความผิดพลาดในการทดลองได้ ดังนั้นสามารถใช้การทดลองซ้ำสำหรับการเปรียบเทียบกับผลของปัจจัยที่สนใจศึกษาได้

3) การบล็อก (Blocking)

การบล็อกเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงแม่นยำ (Precision) ให้กับการทดลอง โดยจะป้องกันการรบกวนจากปัจจัยภายนอก (Noise) และลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการทดลอง โดยที่บล็อกเดียวกันจะหมายถึงการควบคุมสภาพในการทดลองให้มีสภาพใกล้เคียงกันมากที่สุด เช่น วัสดุที่ใช้ทดลองควรมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน ใช้เครื่องจักรเครื่องเดียวกัน ผู้ทดลองคนเดียวกัน ทำการทดลองในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน โดยเปลี่ยนแปลงเฉพาะเงื่อนไขของปัจจัยที่สนใจศึกษาเท่านั้น

2.5.2) การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับเป็นการออกแบบการทดลองในกรณีที่มี k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร พนักงาน และใน 2 ระดับนี้จะแทนด้วยระดับสูง (+) และระดับต่ำ (-) ของปัจจัยหนึ่งๆ ใน 1 การทดลองซ้ำ (Replicate) สำหรับการออกแบบการทดลองแบบนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมด 2^k ข้อมูล ถ้าหากมีปัจจัยที่ต้องการตรวจสอบจำนวนมากจะทำให้ใช้เวลานานในการทดลองนาน ดังนั้นการออกแบบการทดลองเช่นนี้จะช่วยทำให้มีจำนวนการทดลองน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ ซึ่งจะมีประโยชน์มากสำหรับงานทดลองในช่วงเริ่มต้น (Montgomery, 2017)

2.5.3) การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^{k-p} Fractional Factorial Designs)

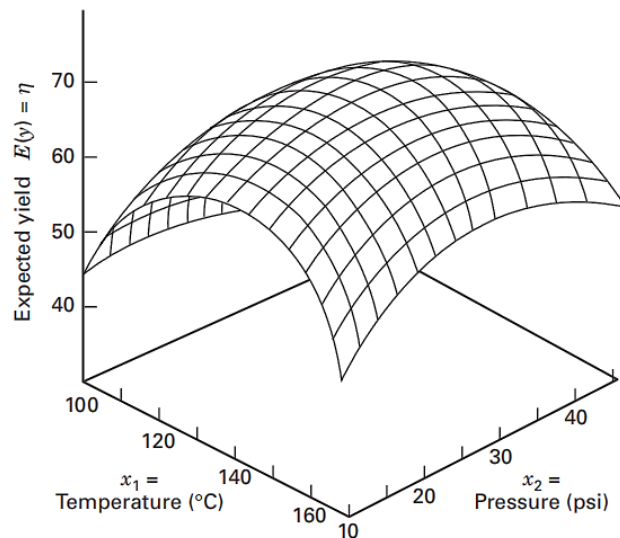
การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับเป็นการออกแบบการทดลองที่ทุกปัจจัยจะมีเพียง 2 ระดับเท่านั้น แต่จะไม่ทำครบทุกการทดลองจะทำการทดลองเพียงบางส่วนเท่านั้น เช่น $\frac{1}{2}$ (One-Half Fraction: 2^{k-1}) หรือ $\frac{1}{4}$ (One-Quarter Fraction: 2^{k-2}) ของการทดลองทั้งหมด การออกแบบการทดลองเช่นนี้จะเหมาะกับการทดลองที่มีจำนวนมากเกินไปจนไม่สามารถทำให้ครบทุกการทดลองได้ เนื่องจากอาจมีข้อจำกัดบางประการ เช่น งบประมาณ หรือระยะเวลาในการทดลองที่จำกัด ดังนั้นหากใช้การออกแบบลักษณะนี้จะช่วยลดค่าใช้จ่ายหรือใช้งบประมาณไม่เยอะ และช่วยให้ระยะเวลาในการทดลองลดลงไปได้เยอะมาก (Montgomery, 2017)

2.6 วิธีการพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface Methodology, RSM)

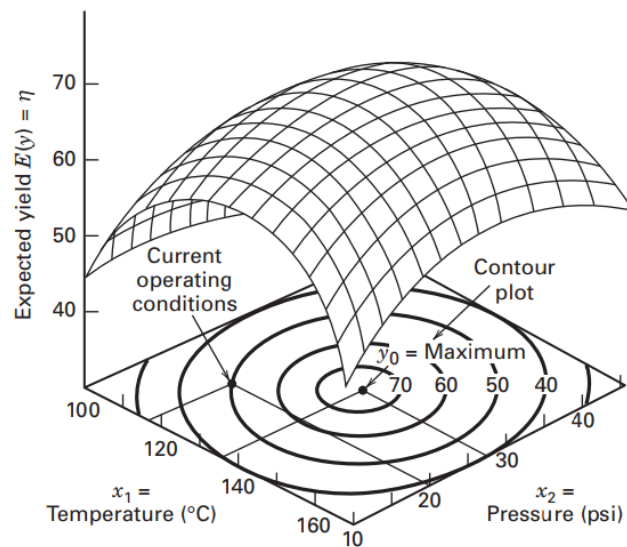
วิธีการพื้นผิวผลตอบแทน (RSM) เป็นการรวบรวมเทคนิคทั้งทางด้านสถิติและคณิตศาสตร์ที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบแทนจะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหรือตัวแปรอิสระหลายตัวและมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะหาระดับของปัจจัยที่ทำให้ผลตอบแทนมีค่าที่เหมาะสมที่สุด (ปารเมศ ชูติมา, 2545) เช่นผลตอบแทน y เป็นฟังก์ชันของปัจจัย x_1 และ x_2 ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ (2.1) ได้ดังนี้

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.1)$$

เมื่อ ε คือ สิ่งรบกวน (Noise หรือ Error) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการและมีผลกระทบต่อผลตอบแทน y โดยที่ค่าคาดหวังของผลตอบแทน (Expected Surface) แทนด้วย $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ เมื่อ $E(y)$ คือ ค่าคาดหวังของผลตอบแทน (Expected Surface) y ดังนั้นพื้นผิวผลตอบแทน (Response Surface) สำหรับระบบที่มีจำนวนปัจจัย 2 ปัจจัยสามารถแทนได้ด้วย $\eta = f(x_1, x_2)$ โดยพื้นผิวผลตอบแทนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งจะเป็นการพล็อตระหว่างค่า η กับแต่ละระดับของปัจจัย x_1 และ x_2 สำหรับการพล็อตเส้นระดับ (Contour) ของพื้นผิวผลตอบแทนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 โดยเส้นระดับที่มีค่าของผลตอบแทนคงที่ จะถูกพล็อตลงในระนาบ x_1 และ x_2 โดยแต่ละเส้นระดับจะสอดคล้องกับความสูงของพื้นผิวผลตอบแทน



รูปที่ 2.15 มิติของพื้นผิวผลตอบสนอง (Montgomery, 2017)



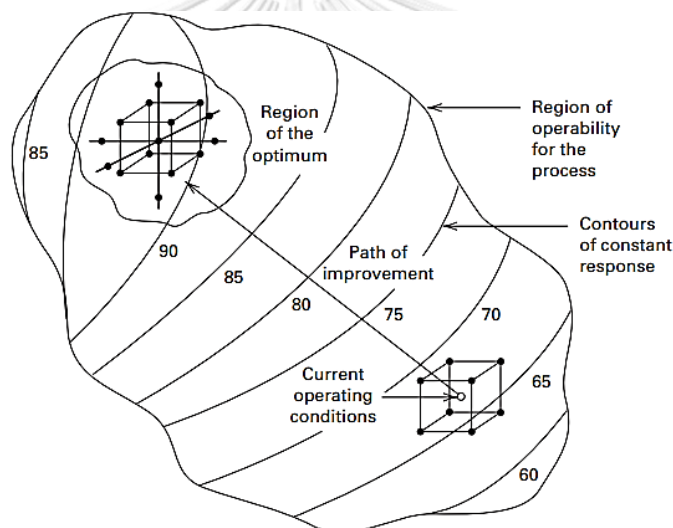
รูปที่ 2.16 เส้นระดับพื้นผิวผลตอบสนอง (Montgomery, 2017)

สำหรับปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนองมักจะไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับปัจจัยต่างๆ เพราะฉะนั้นขั้นตอนแรกในการหาพื้นผิวผลตอบสนองคือ การประมาณความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับปัจจัยต่างๆ โดยทั่วไปจะใช้รูปแบบของสมการอันดับหนึ่ง (First-order model) โดยที่การประมาณความสัมพันธ์จะมีรูปแบบดังสมการ (2.2) และสำหรับกรณีที่พื้นผิวผลตอบสนองมีความโค้ง (Curvature) จะประมาณโดยใช้รูปแบบของสมการอันดับสอง (Second-order model) ซึ่งการประมาณความสัมพันธ์จะมีรูปแบบดังสมการ (2.3)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.2)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.3)$$

สำหรับวิธีการหาพื้นผิวผลตอบสนองเป็นวิธีการที่มีลำดับขั้นตอน (Sequential procedure) ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะแสดงสภาวะการทำงานในปัจจุบันที่อยู่ไกลจากจุดที่เหมาะสมที่สุดของพื้นผิวผลตอบสนอง ดังนั้นการเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่เหมาะสมที่สุดของพื้นผิวผลตอบสนองสามารถใช้รูปแบบของสมการอันดับหนึ่ง ในการประมาณความสัมพันธ์ได้ และเป้าหมายต่อไปคือการเข้าใกล้บริเวณที่เหมาะสมที่สุดของพื้นผิวผลตอบสนองอย่างถูกต้อง ซึ่งเมื่อพบบริเวณที่เหมาะสมที่สุดแล้วสามารถใช้สมการอันดับที่สูงกว่าเข้ามาช่วยในการประมาณความสัมพันธ์ได้ โดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้รูปแบบของสมการอันดับสอง เนื่องจากมีความยุ่งยากน้อยกว่ารูปแบบของสมการอันดับอื่นๆ



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนการหาพื้นผิวผลตอบสนอง (Montgomery, 2017)

2.6.1) การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design)

การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางหรือเรียกโดยย่อว่า CCD การออกแบบประเภทนี้จะสามารถสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นโพลิโนเมียล (Polynomials) กำลังสองซึ่งมีข้อดีคือ สมการความสัมพันธ์มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ค่าจริงได้ดีที่สุด ส่วนข้อเสียคือ เมื่อมีการคำนวณค่า α ออกมาได้แล้วนั้นในการทดลองจริงอาจไม่สามารถปรับระดับของปัจจัยให้เท่ากับระดับ α ที่คำนวณออกมาได้ (Jaksirinont & Osothsilp, 2020)

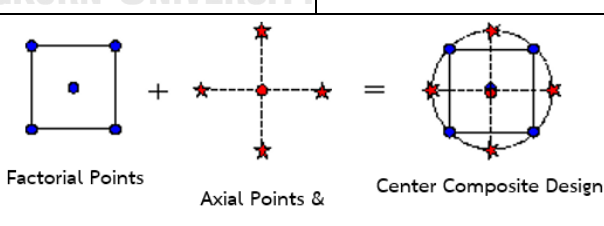
2.6.2) การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF (Face-Centered Central Composite Design)

การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF การออกแบบประเภทนี้มี การพัฒนามาจากการออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCD โดยที่ค่า α ของ CCF จะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งมีข้อดีคือ เมื่อ α มีค่าเท่ากับ 1 การออกแบบประเภทนี้จึงสามารถใช้ในกรณี ที่ปัจจัยใดๆ ปรับได้เพียง 3 ระดับเท่านั้น ทำให้จำนวนการทดลองนั้นมีน้อยกว่าแบบ CCD ซึ่งจะ ช่วยลดทั้งระยะเวลาและค่าใช้จ่ายของการทดลองได้ด้วย ส่วนข้อเสียคือ ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของ สมการจะด้อยกว่าการออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCD (Jaksirinont & Osothsilp, 2020)

2.6.3) การออกแบบการทดลองสำหรับการฟิตแบบจำลองกำลังสอง (Second-Order Model)

การออกแบบการทดลองสำหรับการฟิตแบบจำลองกำลังสองจะนำไปสู่การแปรผลพื้นผิว ผลตอบสนองที่ต้องการศึกษา (สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ & วัลภา เตชะสุข, 2011) โดยหลักการ พื้นฐานของการออกแบบส่วนประสมกลางนั้นเป็นการขยายการออกแบบ 2^k Factorial Design โดยทั่วไปแล้ว CCD และ CCF จะประกอบด้วย 2^k Factorial runs, $2k$ Axial หรือ Star runs และ Center run ดังตารางที่ 2.2 โดยที่ Runs คือจำนวนรอบการทดลอง ส่วน k คือจำนวนปัจจัยที่มีผล ต่อสิ่งที่เราสนใจศึกษา

ตารางที่ 2.2 การออกแบบการทดลองสำหรับการฟิตแบบจำลองกำลังสอง

การออกแบบ	CCD	CCF
การออกแบบการทดลองสำหรับการฟิตแบบจำลองกำลังสอง (Fitting a second-order model)		
การทดลองของแฟคทอเรียลแบบ 2^k (2^k Factorial runs)	โดยที่ Factorial point มีระยะ ± 1 หน่วยจาก Center run	
แนวแกนหรือแนวรูปดาว (2k Axial or Star runs)	โดยที่ Axial points มีระยะ $\pm \alpha$ หน่วยจาก Center run เมื่อ $\alpha = (2^k)^{1/4}$	โดยที่ Axial point มีระยะ ± 1 หน่วยจาก Center run
จุดศูนย์กลาง (Center runs, n_c)	โดยที่ Center runs จะขึ้นอยู่กับ k	

2.7 ผลิตภัณฑ์พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride Product)








ผลิตภัณฑ์พอลิไวนิลคลอไรด์หรือเรียกว่าผลิตภัณฑ์พีวีซี (PVC Product) ถูกจัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งเป็นพลาสติกที่สามารถหลอมแล้วนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ได้ประเภทที่ 3 โดยสัญลักษณ์ของพลาสติกรีไซเคิล (Symbol of recycled plastic) แสดงดังรูปที่ 2.18 สำหรับผลิตภัณฑ์พีวีซีจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) ผลิตภัณฑ์พีวีซีนิ่ม (Soft PVC Product)

ผลิตภัณฑ์พีวีซีนุ่มจะมีพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นส่วนประกอบ เช่น ชิ้นส่วนภายในรถยนต์ (Interior Automotive parts), เบาะรถจักรยานยนต์ (Motorcycle seat cover), เฟอร์นิเจอร์ (Furniture), อุปกรณ์กีฬา (Sport equipment), บรรจุภัณฑ์ หรือภาชนะสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ยา (Pharmaceutical Packaging) และของใช้แฟชั่น (Fashion) เป็นต้น

2) ผลิตภัณฑ์พีวีซีแข็ง (Rigid PVC Production)

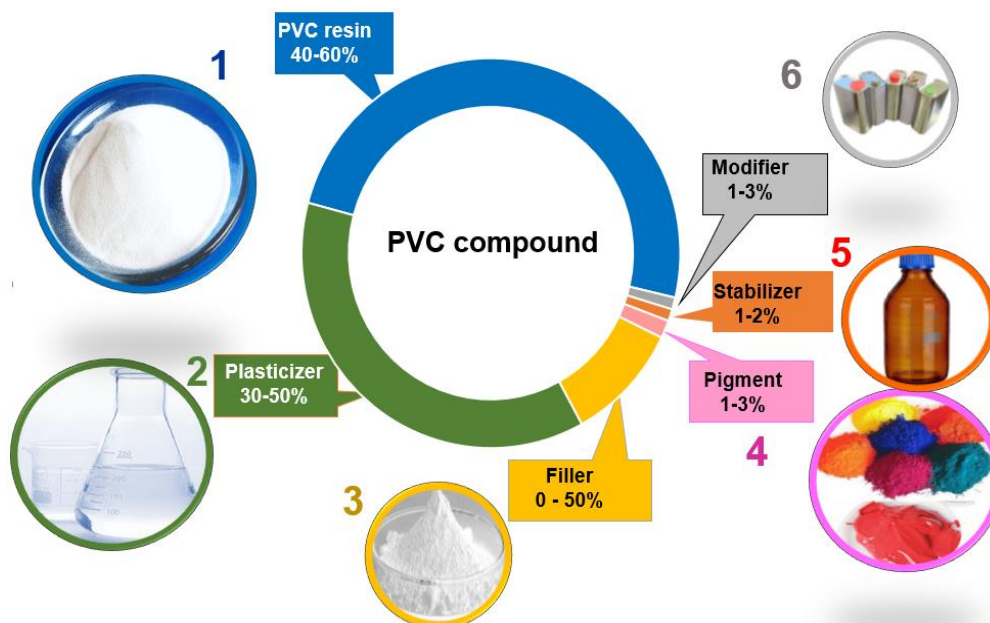
ผลิตภัณฑ์พีวีซีแข็งจะไม่มีพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นส่วนประกอบ ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์เครื่องเขียน, บรรจุภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับอาหาร และต้นคริสต์มาสพลาสติก เป็นต้น

						
PET	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	Other
Polyethylene terephthalate	High-density Polyethylene	Polyvinyl chloride	Low-density Polyethylene	Polypropylene	Polystyrene	Polycarbonate Nylon

รูปที่ 2.18 สัญลักษณ์ของพลาสติกรีไซเคิล (Symbol of recycled plastic)

2.7.1) ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride Product Composition)

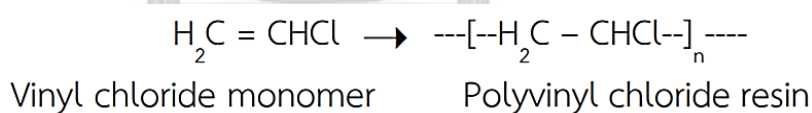
ผลิตภัณฑ์พอลิไวนิลคลอไรด์ หรือผลิตภัณฑ์พีวีซีจะประกอบไปด้วย พอลิไวนิลคลอไรด์เรซิน (Polyvinyl chloride Resin), พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer), ฟิลเลอร์ (Filler) และสารเติมแต่ง (Additive) อื่นๆ (Wilkes, Summers, & Daniels, 2005) ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์พีวีซี

2.7.2) พอลิไวนิลคลอไรด์เรซิน (Polyvinyl Chloride Resin)

พอลิไวนิลคลอไรด์เรซินสังเคราะห์มาจากไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ (Vinyl chloride monomer, VCM) เรียกโดยย่อว่า วีซีเอ็ม มีสูตรทางเคมี คือ C_2H_3Cl เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) จะทำให้ได้พอลิไวนิลคลอไรด์เรซิน ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิไวนิลคลอไรด์เรซิน (กรรณิการ์ บุตรเอก, 2555)

2.7.3) พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

พลาสติไซเซอร์เป็นสารที่ใส่ในพอลิเมอร์ (Polymer) หรือผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อให้พลาสติกมีความอ่อนนุ่มขึ้น โดยจะช่วยลดจุดหลอมเหลว (Melting point) ของพลาสติกทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปในกระบวนการผลิต และยังรักษาความยืดหยุ่นและอ่อนนุ่มไม่ให้เกิดเสียหายได้ง่าย ดังนั้นพลาสติไซเซอร์จึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างมาก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) ซึ่งพลาสติไซเซอร์จะถูกแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 แบบได้แก่

1) พลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (Primary plasticizer)

พลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิจะเป็นพลาสติไซเซอร์ที่สามารถเติมในพีวีซีคอมพาวนด์ (PVC compound) ได้โดยไม่ซึมออกมาในลักษณะที่เป็นของเหลว (Bleeding) และไม่ซึมออกมาในลักษณะที่เป็นของแข็ง (Blooming) ออกจากผลิตภัณฑ์พีวีซีหลังผ่านกระบวนการผลิตแล้ว ยกตัวอย่างเช่น Di-isononyl phthalate (DINP), Di-isodecyl phthalate (DIDP), Trioctyl Trimellitate (TOTM) และ Dioctyl adipate (DOA)

2) พลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer)

พลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิใช้เสริมคุณสมบัติบางประการให้กับพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ เช่น ช่วยให้การหลอมเหลวเร็วขึ้น, ช่วยให้รวมตัวกับ PVC ได้ดี เป็นต้น ซึ่งจะมีราคาถูกมักจะนิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น Epoxidised soybean oil (ESBO)

2.7.3.1 ชนิดของพลาสติไซเซอร์ (Type of plasticizer)

โครงสร้างทางเคมีของพลาสติไซเซอร์หลากหลายมาก และมีลักษณะเป็นของเหลว โดยการแบ่งประเภทของพลาสติไซเซอร์นั้นขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ของพลาสติไซเซอร์ (Oxoplast®, 2016) ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1) โมโนเมอร์พลาสติไซเซอร์ (Monomeric plasticizer)

โมโนเมอร์พลาสติไซเซอร์จะประกอบด้วยสารประกอบประเภทเอสเทอร์ (Ester) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 g/mol เช่น โมโน-เอสเทอร์ (Mono-ester), ได-เอสเทอร์ (Di-ester) และไตร-เอสเทอร์ (Tri-ester) ของกรดหรือเป็นสารประกอบประเภทแอนไฮไดรด์ (Anhydride) เช่น กรดทเรฟทาลิก (Terephthalic acid), กรดพทาลิก (Phthalic acid), กรดอะดิพิก (Adipic acid), กรดซีบาซิก (Sebacic acid), กรดไตรเมลลิติก (Trimellitic acid) และโมโน-แอลกอฮอล์ (Mono-alcohols) เป็นต้น

2) โพลีเมอร์พลาสติไซเซอร์ (Polymeric plasticizer)

มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 500 g/mol ซึ่งจะได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรด 2 ฟังก์ชันคือ กรดอะดิพิก (Adipic acid) หรือกรดซีบาซิก (Sebacic acid) กับ เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) หรือโพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol)

การที่พลาสติกไซเซออร์มีน้ำหนักโมเลกุลมากแสดงว่าโมเลกุลจะมีขนาดใหญ่ ดังนั้นถ้า น้ำหนักโมเลกุลยิ่งมากขนาดของโมเลกุลก็จะยิ่งใหญ่มันจะส่งผลต่อคุณสมบัติที่สำคัญในเรื่อง ของความสามารถในการเคลื่อนที่ (Migration) เพราะฉะนั้นถ้าโมเลกุลมีขนาดใหญ่ก็จะทำให้ เคลื่อนที่ช้ามากในพลาสติกจึงทำให้มีการระเหย (Volatility) ที่ต่ำ เนื่องจากสารเหล่านี้ไม่ได้ เกิดพันธะกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Polymer) โดยตรงแต่จะแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุล ของพอลิเมอร์ และขนาดโมเลกุลที่ใหญ่จะช่วยให้พลาสติกสามารถทนความร้อน (Heat resistant) ได้ดี เนื่องจากขนาดที่ใหญ่จะบ่งบอกถึงการมีโครงสร้างทางเคมีที่แข็งแรง แต่การ ที่พลาสติกไซเซออร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเกินไปก็ไม่ได้ดีอาจส่งผลต่อกระบวนการทำงานที่ยาก ขึ้นตามเนื่องจากโมเลกุลมีขนาดใหญ่จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการเจลหรือการสุกตัว (Gelatinization temperature) ของพลาสติกไซเซออร์ให้เข้ากันกับส่วนผสมอื่นๆที่สูงขึ้น และ/ ใช้เวลาในการเจล (Gelation time) ที่นานขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าหากใช้อุณหภูมิและเวลาในการ เจลที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของคุณสมบัติของพลาสติกไซเซออร์แสดงออกมาได้ อย่างไม่เต็มที่

2.7.4) ฟิลเลอร์ (Filler)

ฟิลเลอร์เป็นสารเพิ่มเนื้อใส่เพื่อช่วยในการลดต้นทุนของการผลิต และสามารถช่วย ปรับปรุงคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ (Physical properties) และทางกล (Mechanical properties) ได้อีกด้วย เช่น ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางความร้อน เพิ่มน้ำหนัก ช่วยการปูเรียบ (Lay flat) ลดการหดตัว (Shrinkage) ทนแรงกระแทกและแรงอัดได้ หากใส่ฟิลเลอร์มาก เกินไปจะส่งผลให้ความแข็งแรง (Tensile strength) และความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) ของผลิตภัณฑ์ลดลงได้ โดยฟิลเลอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ แคลเซียม คาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3)

2.7.5) สารเติมแต่ง (Additive)

สารเติมแต่งเป็นสารที่ใส่เพื่อเพิ่มหรือปรับประสิทธิภาพบางอย่างของผลิตภัณฑ์ พลาสติก เช่น สารให้สี (Pigment) ใส่เพื่อความสวยงาม สเตบิลไลเซอร์ (Stabilizer) ใส่เพื่อ ช่วยป้องกันการเสียดสภาพจากความร้อนในขั้นตอนการขึ้นรูปของกระบวนการผลิต และสาร ดูดกลืนรังสียูวี (UV Absorber) ใส่เพื่อช่วยลดการเสื่อมตัวของผลิตภัณฑ์พลาสติกเนื่องจาก แสงแดด เป็นต้น

2.8 งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้อง

(Pugna, Negrea, & Miclea, 2016) การศึกษาการใช้วิธีซิกซ์ ซิกมาเพื่อปรับปรุงกระบวนการประกอบในบริษัทยานยนต์ ความจำเป็นในการพัฒนาตลาดอย่างถาวร จำเป็นต้องมีการปรับปรุงข้อเสนอของบริษัทอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาและปรับปรุงระบบการจัดการคุณภาพและสิ่งแวดล้อมจะอยู่ในความคาดหวังของการพัฒนาเหล่านี้ ดังนั้นจึงจะตอบสนองต่อความพึงพอใจและความคาดหวังของหุ้นส่วนแต่ละราย (ลูกค้า พนักงาน และผู้มีผลประโยชน์ร่วมอื่นๆ) และรักษาผลประโยชน์ของคู่แข่ง หนึ่งในความเป็นไปได้ที่จะได้รับความเป็นเลิศจากการดำเนินงาน คือการปรับปรุงคุณภาพต่างๆ เช่น การบริหารคุณภาพทั้ง (Total Quality Management) การรองรับ ISO และการผลิตแบบมีความคล่องตัวสูง (Agile & Lean manufacturing) เป็นต้น ในชีวิตจริงแสดงให้เห็นว่าการเริ่มต้นโครงการเหล่านี้ขาดประสิทธิภาพ ดังนั้นการแนะนำและการใช้วิธีการซิกซ์ ซิกมา ได้ถูกพิสูจน์แล้วว่าสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพในการแก้ไขปัญหาได้เป็นอย่างดี โดยใช้ระยะเวลาที่น้อย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการปรับปรุงกระบวนการประกอบของบริษัทรถยนต์ในโรมาเนีย โดยการใช้แนวคิดทางสถิติและวิธีการซิกซ์ ซิกมา DMAIC จากผลการวิจัยพบว่าการใช้แนวคิดทางสถิติ และวิธีการ DMAIC Six Sigma สามารถสรุปกระบวนการได้ดังต่อไปนี้ การออกแบบเครื่องมือถูกปรับปรุงให้มีความราบรื่นขึ้น อุปกรณ์ Poka-Yoke ถูกติดตั้งการส่งสัญญาณเสียงและการมองเห็น เมื่อลดความจำเป็นลงก็สามารถบรรลุเป้าหมาย กระบวนการอยู่ในความควบคุม ความสามารถของกระบวนการถูกปรับปรุงอย่างจริงจังในระยะสั้นและระยะยาว C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.96 เป็น 1.72 ระดับ Sigma ระยะสั้นเพิ่มขึ้นจาก 2.9 เป็น 5.2 ระดับ Sigma ระยะยาวเพิ่มขึ้นจาก 1.4 เป็น 3.7 DPMO (Defects per million opportunities) ลดลงจาก 81,000 เป็น 108 การปรับปรุงกระบวนการนำไปสู่การลดข้อบกพร่องประมาณ 40%, การเลือกซัพพลายเออร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดจะนำไปสู่การลดข้อบกพร่องประมาณ 30%

(Gupta, Jain, Meena, & Dangayach, 2018) การศึกษาการประยุกต์ใช้ ซิกซ์ ซิกมาในบริษัทผลิตรถยนต์ (กรณีศึกษา) เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยี และความต้องการจากการเปลี่ยนแปลงวิธีการทำธุรกิจของลูกค้าในบริษัทต่างๆที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อเอาชนะอุปสรรคเหล่านี้จะใช้วิธีการซิกซ์ ซิกมา DMAIC ซึ่งเป็นที่นิยมและมีประโยชน์มากที่สุด และวิธีนี้จะช่วยลดของเสียและสร้างแนวทางที่เป็นไปได้ในการปรับปรุงกระบวนการและอุตสาหกรรมบริการ ในการวิจัยปัจจุบันใช้วิธีการ DMAIC เพื่อลดความผันแปรของกระบวนการประกอบลูกบิด การวิจัยเริ่มต้นโดยการระบุปัญหาผ่านข้อร้องเรียนของลูกค้า จากนั้นทำการรวบรวมข้อมูลจำเพาะของลูกค้าที่มีอยู่ ตามด้วยขั้นตอน

การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและการปรับปรุง ซึ่งจะประกอบด้วยแผนผังสาเหตุและผล, การควบคุมกระบวนการทางสถิติและการวิเคราะห์ระบบที่มีอยู่อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งถูกนำไปใช้เพื่อการระบุสาเหตุและลดความผันแปรของกระบวนการ โดยแผนภูมิควบคุมกระบวนการจะถูกใช้สำหรับการสังเกตความเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นระบบและใช้สำหรับควบคุมกระบวนการ หลังจากการประยุกต์ใช้วิธี DMAIC พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการลดลงจาก 2.17 เป็น 1.69, ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ (C_p) ได้รับการปรับปรุงจาก 1.65 เป็น 2.95 และ ค่าดัชนีที่วัดความสามารถในการทำงานของกระบวนการ (C_{pk}) ได้รับการปรับปรุงจาก 0.94 เป็น 2.66

(ธัญวรัตน์ สวัสดิ์สุภผล, 2562) การศึกษางานวิทยานิพนธ์การลดของเสียในแผงวงจรรวมแบบไม่สัมผัส งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบการผลิตผลิตภัณฑ์แผงวงจรรวมแบบไม่สัมผัส ซึ่งเป็นชิพที่ใช้เก็บข้อมูลในอีพาสปอร์ต จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลในอดีตพบว่าในกระบวนการผลิตมีของเสียประเภทวีลิมิเตอร์ ซึ่งตรวจพบที่แผนกทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อนำชิ้นงานของเสียมาวิเคราะห์และตรวจสอบพบว่า ชิ้นงานของเสียนั้นมีปัญหารอยแตกร้าวบริเวณหน้าได ซึ่งจำนวนของเสียเมื่อเทียบต่อล้านชิ้นสูงที่สุดที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1661 PPM โดยมีสาเหตุมาจากความผันแปรของเครื่องจักรในกระบวนการหล่อชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้หลักการซิกส์ ซิกมา ในการปรับปรุงกระบวนการโดยการดำเนินการตามหลัก DMAIC ใน ขั้นตอนการระบุปัญหา, ขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบวัด, ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา, ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา, จนกระทั่งถึงขั้นตอนควบคุมกระบวนการ ซึ่งการดำเนินการวิจัยพบว่าสาเหตุของความผันแปรของเครื่องจักรในกระบวนการหล่อชิ้นงานนั้นเกิดจาก แปร่งที่ใช้ทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์เกิดการชำรุดส่งผลให้หน้าแม่พิมพ์ มีความสะอาดไม่เพียงพอมีเศษผงของคอมปาวด์พลาสติก และคราบคอมปาวด์พลาสติก ติดค้างอยู่บริเวณหน้าแม่พิมพ์ซึ่งส่งผลให้ เมื่อชิ้นงานถัดไปเข้าสู่กระบวนการหล่อชิ้นงาน เกิดแรงประทะระหว่างแม่พิมพ์กับเศษผงของคอมปาวด์พลาสติกและกระแทกเข้ากับชิ้นงานบริเวณหน้าได แรงประทะส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวบริเวณหน้าได ทำให้ชิ้นงานไม่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าประเภทวีลิมิเตอร์ ทางผู้วิจัยจึงได้แก้ไขปัญหานี้โดยการเปลี่ยน แปร่งทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์และกำหนดให้มีการทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์ทุกครั้งก่อนเริ่มงานล็อตใหม่ และมีการตรวจเช็คสภาพแปร่งทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์ทุกหนึ่งเดือน ตลอดจนกำหนดอายุการใช้งานที่สามเดือน เปลี่ยนเมื่อหมดอายุการใช้งาน การติดตามผลการปรับปรุงพบว่าจำนวนของเสียเมื่อเทียบต่อล้านประเภทรอยแตกร้าวบริเวณหน้าไดลดลงจาก 1661 PPM เหลือเพียง 902 PPM

(วรรณศีกา ศิริมงคล, 2562) การลดของเสียในกระบวนการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาปูพื้นโดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา งานวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียในกระบวนการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาปูพื้น โดยการแก้ไขการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยประยุกต์ใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา จากการศึกษาพบว่าปริมาณการเกิดของเสียประเภทกระเบื้องผิวหน้าไม่เรียบในกระบวนการขึ้นรูปมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 152,871.16 DPPM (Defect Parts per Million) ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา ทั้ง 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการระบุปัญหา ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหาเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาขั้นตอนการปรับปรุงและแก้ไขกระบวนการและขั้นตอนการควบคุมกระบวนการผลิต การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการศึกษารายละเอียดของกระบวนการผลิตเพื่อค้นหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหากระเบื้องผิวหน้าไม่เรียบต่อมาในขั้นตอนการวัดสภาพปัญหาเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหาจะทำการศึกษาความแม่นยำและความถูกต้องของระบบการวัด การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนภาพแสดงสาเหตุและผล และคัดเลือกตัวแปรนำเข้าไปใช้เทคนิคการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) จากนั้นจึงได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของเสียและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ผลการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม คือรูตะแกรงของเครื่องบดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ขนาดตะแกรงร้อนของเครื่องบดเบอร์ 18 (Mesh No.18) และขนาดตะแกรงร้อนก่อนขึ้นกระพ้อลำเลียงเบอร์ 8 (Mesh No.8) หลังการปรับปรุงกระบวนการพบว่าจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาปูพื้นลดลงเหลือ 34,610 DPPM ซึ่งสามารถลดการเกิดของเสียลงได้ถึง 77% เมื่อเทียบกับจำนวนของเสียก่อนการปรับปรุง

(Supapan & Chutima, 2019) การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฉีดตกแต่งในแม่พิมพ์ วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียจากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฉีดตกแต่งในแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวมเอาชิ้นส่วนตกแต่งไว้บน PET film จากนั้นทำการฉีดพลาสติกชนิด ABS เข้าไปในด้านหลังของ PET film เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีผิวทนทานและสวยงาม และยังเป็นการลดกระบวนการในการเพิ่มการพิมพ์ชิ้นส่วนตกแต่งหลังการฉีดชิ้นงาน จากการศึกษาข้อมูลจากโรงงานกรณีศึกษาจะพบว่า มีของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนตกแต่งในแม่พิมพ์คิดเป็น 11.43% ซึ่งปัญหาหลักๆ เกิดจาก PET Film ไม่ยึดเกาะในระหว่างขั้นตอนของการพิมพ์และชิ้นงานเสียรูปที่ส่งผลกระทบต่อประกอบชิ้นงาน เพื่อทำการลดของเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าว โดยใช้หลักการของ Six Sigma ซึ่งมีทั้งหมด 5 ขั้นตอน ได้แก่ การนิยามปัญหา การวัดเพื่อระบุสาเหตุของปัญหา การวิเคราะห์สาเหตุของ

ปัญหา การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ และการควบคุมกระบวนการ โดยการดำเนินการจะเริ่มจากการศึกษาลำดับขั้นตอนและรายละเอียดของกระบวนการ จากนั้นระบุปัญหา กำหนดวิธีการวัดเพื่อระบุสาเหตุของปัญหา โดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล และคัดเลือกตัวแปรที่จะนำมาทำการศึกษ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) จากนั้นนำเอาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อสาเหตุของปัญหามาทำการประยุกต์การออกแบบการทดลอง โดยใช้ DOE จากนั้นทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อทำการควบคุมกระบวนการต่อไป หลังจากทำการปรับปรุงกระบวนการแล้วพบว่าสัดส่วนของเสียที่เกิดจากชิ้นส่วนตกแต่งในแม่พิมพ์ลดลงจาก 11.43% เหลือ 1.25% ซึ่งสามารถทำการปรับปรุงเพื่อลดของเสียทั้งหมดได้ 89% หลังจากทำการปรับปรุงกระบวนการสามารถลดของเสียประเภท PET Film ไม่ยึดเกาะในระหว่างชั้นของการพิมพ์ได้ 86.6% และสามารถลดของเสียประเภทชิ้นส่วนเสียรูปได้ 97.8%

(กุศลิน กิจพงษ์นิกร, 2560) การลดของเสียในกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยวิธีซิกซ์ ซิกมา งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเพื่อลดปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยมุ่งเน้นลดของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนาบางในแนวขวางเครื่องจักร งานวิจัยนี้ใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา เริ่มจาก 1) ระบุนิยามปัญหา ซึ่งพบว่าของเสียจากการผลิตในกระบวนการเป่าฟิล์มประเภทเจล ยับ และหนาบางมีสัดส่วนที่สูง สำหรับการผลิตถุงพลาสติกขนาด $30 \times (6+2+2)$ นิ้ว ขนาด 80×240 มิลลิเมตร และ 40×24 นิ้ว มีสัดส่วนของเสียประเภทเจล ยับ และหนาบาง ร้อยละ 11.03 1.26 และ 3.60 ของปริมาณการผลิต ตามลำดับ 2) ระบุการวัด ทำการประเมินระบบการตรวจสอบพบว่ามีความแม่นยำและเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ 3) ระบุการหาสาเหตุของปัญหา ในขั้นแรกทำการระดมสมองโดยใช้แผนผังก้างปลาพบว่า มี 22 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนาบาง จากนั้นไปคัดกรองด้วยแผนผังแสดงสาเหตุและผล ทำให้เหลือเพียง 9 ปัจจัย ที่นำไปศึกษาต่อ 4) ระบุการปรับปรุงกระบวนการ ดำเนินการปรับปรุง 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ 4.1) การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยด้วยวิธีการทางสถิติ และหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย พบว่าค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับขนาด $30 \times (6+2+2)$ นิ้ว ได้แก่ อุณหภูมิกระบอบกอบส่วนต้น 220°C อุณหภูมิกระบอบกอบส่วนกลาง 212°C อุณหภูมิกระบอบกอบส่วนท้าย 217°C อุณหภูมิหน้าแปลน 220°C อุณหภูมิหัวตาย 216°C และความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน 50 kW สำหรับขนาด 80×240 มิลลิเมตร ได้แก่ อุณหภูมิกระบอบกอบส่วนต้น 220°C อุณหภูมิหน้าแปลน 224°C อุณหภูมิหัวตาย 216°C และความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน 35 kW และสำหรับขนาด 40×24 นิ้ว ได้แก่ อุณหภูมิหน้าแปลน 224°C อุณหภูมิ

หัวตาย 222 °C และความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน 24 kW 4.2) การสร้างวิธีปฏิบัติงาน และในขั้นตอนสุดท้าย 5) ระยะเวลาควบคุมกระบวนการ ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการปรับปรุงและจัดทำแผนควบคุมเพื่อรักษาคุณภาพหลังการปรับปรุงกระบวนการ ภายหลังการปรับปรุงกระบวนการพบว่าสามารถลดของเสียในกระบวนการเป่าฟิล์มสำหรับข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนาบางของถุงพลาสติก ขนาด 30 x (6+2+2) นิ้ว จากร้อยละ 11.03 เหลือเพียงร้อยละ 0.39 ขนาด 80 x 240 มิลลิเมตร จากร้อยละ 1.26 เหลือเพียงร้อยละ 0.50 ขนาด 40 x 24 นิ้ว จากร้อยละ 3.60 เหลือเพียงร้อยละ 0.42 พบว่ามีมูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ 259,256 บาทต่อปี

(วิระชัย อารีรักษ์, 2560) การหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยวิธีซีกซ์ ซิกมา งานวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จกรณีศึกษาของโรงงานผลิตคอนกรีตตัวอย่าง โดยนำแนวทางซีกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ ซึ่งแนวทางซีกซ์ ซิกมาจะมีระยะการทำงาน 5 ระยะและในงานวิจัยนี้จะดำเนินการตามขั้นตอนตามระยะการทำงาน 5 ระยะ ดังนี้ 1.) ระยะการนิยามปัญหา ทำการพิจารณาการปัญหาคุณภาพคอนกรีตที่ต่ำกว่ามาตรฐานทำให้เพิ่มสัดส่วนเนื้อของปูนซีเมนต์ให้มากขึ้นจากมาตรฐานในการผลิตคอนกรีตประมาณ 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นต้นทุนส่วนเนื้อปูนซีเมนต์จากสูตรมาตรฐานประมาณ 1 ล้านบาทในช่วง 6 เดือน ทางโรงงานมีความต้องการลดส่วนเนื้อปูนซีเมนต์ลงโดยมีความต้องการที่จะนำหินฝุ่นซึ่งเป็นวัสดุทดแทนที่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมกับมวลรวมละเอียด 2.) ระยะตรวจวัด จะเริ่มด้วยการทำการตรวจสอบระบบการวัดซึ่งได้ผลการตรวจสอบผ่านเกณฑ์การยอมรับ จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปัญหาด้วยแผนภูมิแกงปลาจนได้ 17 ปัจจัย และทำการคัดกรองปัจจัยต่าง ๆ ด้วย Cause and Effect Matrix ทำให้เหลือปัจจัย 4 ปัจจัย 3.) ระยะของการวิเคราะห์ปัญหา ทำการวิเคราะห์ปัจจัยทั้ง 4 ด้วยวิธีการทางสถิติ ทำให้สรุปได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อค่ากำลังอัดคอนกรีตอย่างแท้จริง 4.) ระยะการปรับปรุงแก้ไข ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย 5.) ระยะเวลาควบคุม จะดำเนินการโดยนำสัดส่วนหินฝุ่นที่เหมาะสมไปเป็นส่วนผสมในคอนกรีตผสมเสร็จ ภายหลังจากการปรับปรุงได้ทำการเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตระหว่างก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง พบว่าหลังการปรับปรุงส่งผลให้ลดปริมาณส่วนเนื้อปูนซีเมนต์ลงได้ คิดเป็นต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงได้ที่ 67 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

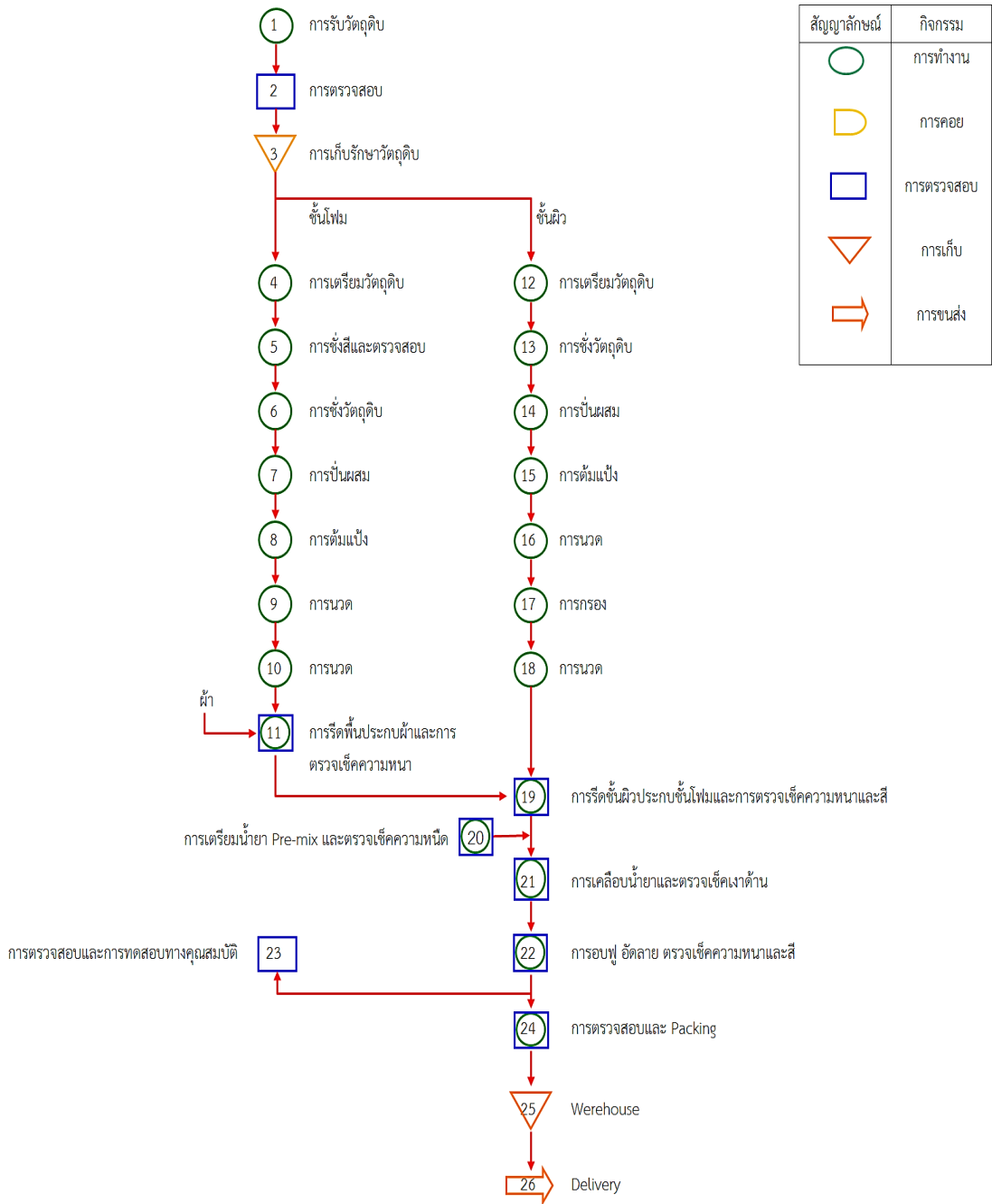
บทที่ 3

ขั้นตอนการระบุปัญหา (Define Phase)

การผลิตหนังเทียมพีวีซีจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะกระทบต่อผลการทดสอบในหัวข้อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ในปี 2018 บริษัทได้รับคำร้องเรียนจากค่ายรถยนต์ (OEM) เนื่องจากทางค่ายรถยนต์พบปัญหาว่าเบาะแตกหลังจากผู้ใช้งานซื้อรถยนต์และนำไปใช้งานซึ่งยังอยู่ในระยะประกันภัย 100,000 กิโลเมตร ดังนั้นถ้าหากผลการทดสอบ %Weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท “PVC Sponge Leather” หรือเรียกโดยย่อว่า LS ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มิลลิเมตร หลังผ่านการทดสอบด้วยความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ซึ่งทำการทดสอบตามวิธีการทดสอบของค่ายรถยนต์แล้วให้ผลการทดสอบเกิน 5% ซึ่งเกินข้อกำหนดของค่ายรถยนต์ (Spec. $\leq 5\%$) จะทำให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็ง กระด้างและงอขึ้นซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้เกิดเบาะแตก เพราะฉะนั้นผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญกับขั้นตอนการระบุปัญหาเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่จะต้องระบุแนวโน้มของปัญหาว่าจะไปในทิศทางใด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเริ่มศึกษาตั้งแต่กระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซี จากนั้นทำการอธิบายสภาพปัญหาให้ชัดเจน และสรุปออกมาเป็นเอกสารที่เรียกว่า สัญญาโครงการ (Project Charter)

3.1 ศึกษากระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซี

ทำการศึกษากระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather (LS) ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. โดยเริ่มจากศึกษามาตรฐานการเดินเครื่องคาเลนเดอร์ และแผนผังการไหลของกระบวนการผลิต (Process flow) เพื่อให้เห็นถึงภาพรวมของกระบวนการทำงานว่าผ่านขั้นตอนใดบ้าง และมีปัจจัยใดบ้างที่อาจเกี่ยวข้องกับปัญหาที่กำลังจะปรับปรุงแก้ไขสามารถศึกษากระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท LS ทุกความหนาได้ดังรูปที่ 3.1 โดยจะมีทั้งหมด 26 ขั้นตอน



รูปที่ 3.1 แผนผังการไหลของกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท LS (Detailed Process Map)

3.2 สร้างสัญญาโครงการ (Project Charter)

จากการศึกษากระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท LS สามารถอธิบายสภาพปัญหา และสรุปออกมาเป็นเอกสารสัญญาโครงการ (Project Charter) ได้ดังนี้

1) คำอธิบายสภาพปัญหา (Problem Statement)

ช่วงเดือนมิถุนายนปี 2018 ทางบริษัทกรณีศึกษาได้รับข้อร้องเรียนจากค่ายรถยนต์ (OEM) เกี่ยวกับปัญหาเบาะรถยนต์แตก ทางบริษัทจึงได้วิเคราะห์และหาสาเหตุจนพบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบด้วยความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 100 ชั่วโมง มีค่าเกินข้อกำหนด (Specification) ของค่ายรถยนต์ที่ 5 % (Spec. $\leq 5\%$) ส่งผลให้ทางค่ายรถยนต์ชะลอการสั่งซื้อสินค้ารุ่น A และทำการสั่งซื้อสินค้าจากผู้ผลิตสำรอง (Second source) แทนไปก่อนเป็นเหตุให้ยอดขายสินค้ารุ่น A ลดลง และต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนของการทดลองเพิ่มอีกด้วย

2) วัตถุประสงค์ของโครงการ (Objective Statement)

ปรับปรุงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังจากผ่านการทดสอบด้วยความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ให้ผ่านตามข้อกำหนด (Specification) ของค่ายรถยนต์คือ ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ($\leq 5\%$)

3) ขอบเขตของโครงการ (Project Scope)

ทำการศึกษาครอบคลุมเฉพาะค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี หลังจากผ่านการทดสอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมงแล้ว ไม่ผ่านข้อกำหนดของค่ายรถยนต์คือ เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ($> 5\%$) เท่านั้น

4) ตัวชี้วัดของโครงการ (Project Metrics)

ตัวชี้วัดของโครงการ มีหลายด้าน ได้แก่

- ตัวชี้วัดทางธุรกิจ (Business metric) คือ ระดับความพึงพอใจของค่ายรถยนต์
- ตัวชี้วัดหลัก (Primary metric) คือ ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการในระยะยาว (Long Term Process Capability, Ppk) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม.

- ตัวชี้วัดรอง (Secondary metric) คือ ระยะเวลาของผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม.
- ตัวชี้วัดสืบเนื่อง (Consequential metric) คือ รอบเวลาการผลิต และต้นทุนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม.
- ตัวชี้วัดทางการเงิน (Financial metric) คือ งบประมาณที่ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม.

5) ข้อจำกัดของโครงการ (Project Constraints)

เครื่องคาลเอนเดอร์ (Calendering machine) ที่เลือกมาใช้สำหรับการทดลอง จะต้องใช้ในการผลิตจริงด้วยจึงต้องทำการวางแผนเวลาให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้กระทบต่อการผลิตอื่นๆ

6) สมาชิกในทีมงานและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง (Team Members, Stakeholders)

สมาชิกในทีมงานและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องจะประกอบไปด้วย

- วิศวกรฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคนิค
- วิศวกรฝ่ายการผลิต
- วิศวกรฝ่ายเครื่องมือและเครื่องจักร
- วิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ
- หัวหน้างานฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคนิค
- หัวหน้างานฝ่ายผลิต
- หัวหน้างานฝ่ายประกันคุณภาพ

7) ระยะเวลาในการดำเนินการโครงการ (Project Schedule)

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ขั้นตอน	ระยะเวลาดำเนินการ
การระบุปัญหา	1 ถึง 30 พ.ค. 2020
การวัดสภาพปัญหา	1 ถึง 30 มิ.ย. 2020
การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา	1 ถึง 30 ก.ค. 2020
การปรับปรุงแก้ไขปัญหา	1 ถึง 30 ส.ค. 2020
การควบคุม	1 ถึง 30 ก.ย. 2020



บทที่ 4

ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา (Measurement Phase)

หลังจากได้ระบุปัญหาจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ไปแล้วดังนั้นก็จะได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มิลลิเมตรที่ถูกผลิตด้วยกระบวนการคาเลนเดอร์มีค่าเกินข้อกำหนดของค่ายรถยนต์ที่ 5% (> 5%) เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงและแก้ไข สำหรับขั้นตอนการวัดสภาพปัญหาจะดำเนินการวิเคราะห์ทั้งหมด 2 ขั้นตอนดังนี้

4.1 วิธีการวัด (Measurement method)

สำหรับงานวิจัยนี้ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีทุกประเภท และทุกความหนา สามารถตรวจสอบได้จากการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง (Analytical balance) ดังรูปที่ 4.1 และนำไปคำนวณตามสมการ (4.1)

$$\text{Weight - loss (\%)} = \frac{\text{Mass before heating (g)} - \text{Mass after heating (g)}}{\text{Mass before heating}} \times 100 \quad (4.1)$$

สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีทุกประเภท และทุกความหนามิดังนี้

- 1) เตรียมผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี 3 ชิ้น ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร และนำชิ้นงานเข้าเครื่องดูดความชื้น (Desiccator) ดังรูปที่ 4.2 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานอีกครั้งในหน่วย กรัม (g)
- 2) นำชิ้นงานที่ชั่งน้ำหนักแล้วเข้าทดสอบด้วยเครื่องอบทดสอบเร่งสภาวะอายุของชิ้นงาน (Geer oven aging tester) ดังรูปที่ 4.3 เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 ± 2 °C
- 3) เมื่อครบเวลาตามข้อที่ 2 แล้ว จะนำชิ้นงานออกจากเครื่องอบทดสอบเร่งสภาวะอายุของชิ้นงาน และนำชิ้นงานเข้าเครื่องดูดความชื้น (Desiccator) อีกครั้ง ทำการตั้งค่าเครื่องดูดความชื้นไว้ที่อุณหภูมิ 20 ± 2 °C และที่ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) $65 \pm 5\%$ สำหรับการตั้งค่าเครื่องดูดความชื้นจะอ้างอิงตามวิธีการทดสอบ (Test method) ของค่ายรถยนต์



รูปที่ 4.1 เครื่องชั่ง (Analytical balance)



รูปที่ 4.2 เครื่องดูดความชื้น (Desiccator)



รูปที่ 4.3 เครื่องอบทดสอบแรงสภาวะอายุของชิ้นงาน (Geer oven aging tester)

4.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA)

การทำการทดลองนั้นสิ่งสำคัญอีกประการที่จะช่วยให้การวิเคราะห์ผลการทดลองให้มีความถูกต้องและแม่นยำและช่วยในการวิเคราะห์ระบบการวัดที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการตรวจสอบที่ได้มาจากการทดลองมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบการวัด ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ผ่านเครื่องมือที่เรียกว่า ความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของกระบวนการวัด (Gauge Repeatability and Reproducibility) หรือเรียกโดยย่อว่า GR&R ซึ่งจะมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ ดังนี้

4.2.1) การเก็บข้อมูล (Data Collection)

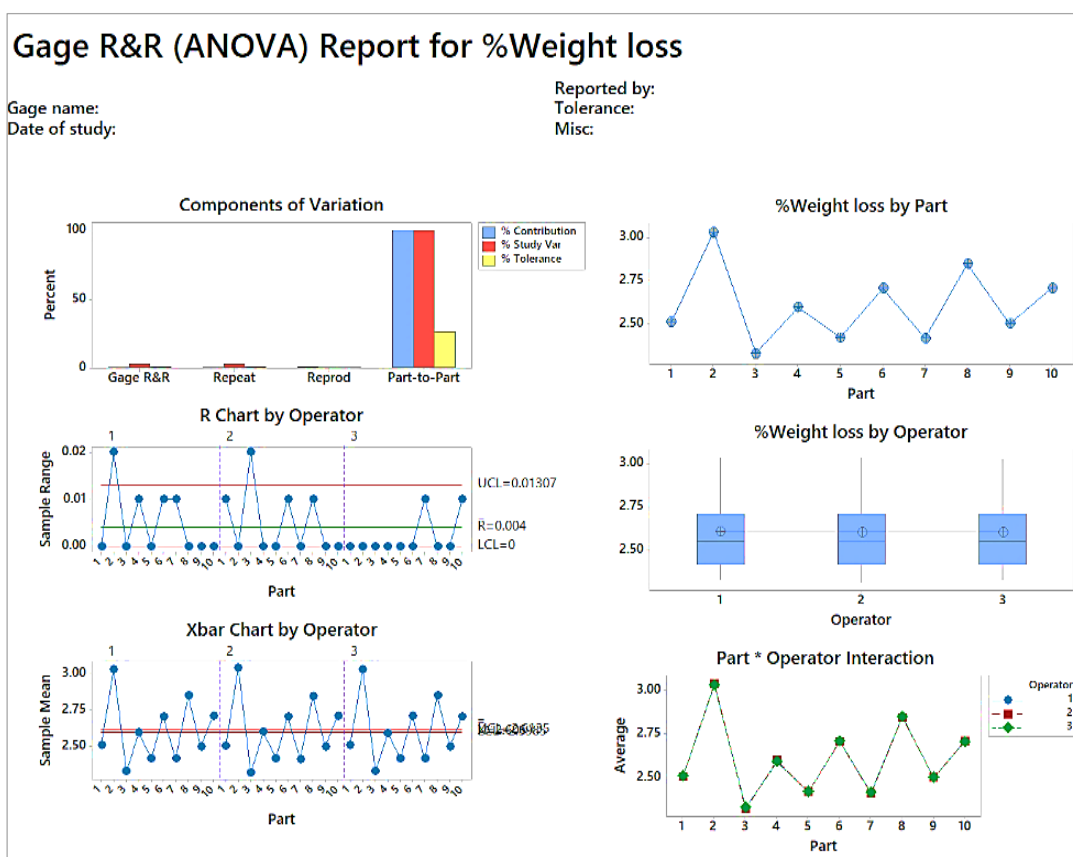
- ตัวอย่างที่นำมาทำ GR&R จำนวน 10 ตัวอย่าง
- พนักงานวัด จำนวน 3 คน โดยมีอุปกรณ์วัดเป็นเครื่องชั่ง จำนวน 1 เครื่อง
- กำหนดให้จำนวนการวัดซ้ำเป็น 2 ครั้ง/ชิ้นงาน
- ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่วางแผนไว้ข้างต้น ซึ่งได้ผลตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลผลการวัดค่า%Weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีหลังจากทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส (°C) เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

No	พนักงานคนที่ 1				พนักงานคนที่ 2				พนักงานคนที่ 3			
	ค่าที่วัดได้ (%)				ค่าที่วัดได้ (%)				ค่าที่วัดได้ (%)			
	ครั้ง 1	ครั้ง 2	\bar{x}	R	ครั้ง 1	ครั้ง 2	\bar{x}	R	ครั้ง 1	ครั้ง 2	\bar{x}	R
1	2.51	2.51	2.51	0.00	2.5	2.51	2.51	0.01	2.51	2.51	2.51	0.00
2	3.04	3.02	3.03	0.02	3.04	3.04	3.04	0.00	3.03	3.03	3.03	0.00
3	2.33	2.33	2.33	0.00	2.33	2.31	2.32	0.02	2.33	2.33	2.33	0.00
4	2.59	2.6	2.59	0.01	2.6	2.6	2.60	0.00	2.59	2.59	2.59	0.00
5	2.42	2.42	2.42	0.00	2.42	2.42	2.42	0.00	2.42	2.42	2.42	0.00
6	2.70	2.71	2.70	0.01	2.71	2.7	2.71	0.01	2.71	2.71	2.71	0.00
7	2.41	2.42	2.42	0.01	2.41	2.41	2.41	0.00	2.41	2.42	2.42	0.01
8	2.85	2.85	2.85	0.00	2.84	2.85	2.85	0.01	2.85	2.85	2.85	0.00
9	2.50	2.5	2.50	0.00	2.5	2.5	2.50	0.00	2.50	2.5	2.50	0.00
10	2.71	2.71	2.71	0.00	2.71	2.71	2.71	0.00	2.70	2.71	2.71	0.01

4.2.2) ประเมินระบบการวัดด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

สำหรับผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.1 จะนำมาพิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือเรียกโดยย่อว่า ANOVA โดยใช้โปรแกรม MINITAB ช่วยในการประเมินระบบการวัด และแสดงผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดออกมาดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด

4.2.3) การวิเคราะห์และสรุปผลความแม่นยำของระบบการวัด

1) แผนภูมิความคุม R

ระบบการวัดที่ดีควรจะมีค่าความละเอียด (Resolution) ที่เพียงพอในการแยกแยะความแตกต่างของชิ้นงาน ซึ่งวิธีที่จะพิจารณาว่าระบบการวัดมีความละเอียดที่เพียงพอหรือไม่ สามารถทำได้โดยพิจารณาค่า R ที่แตกต่างกันในข้อมูลการวัดที่ได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแผนภูมิ R หากระบบการวัดมีความละเอียดเพียงพอควรมีจำนวน

ค่า R ตั้งแต่ 4 ค่าขึ้นไป หากมีจำนวนค่า R เพียง 1 - 3 ค่า แสดงว่าระบบการวัดมีความละเอียดที่ไม่เพียงพอ จากการพิจารณาแผนภูมิควบคุม R ของข้อมูลจากระบบการวัดนี้พบว่า ค่า R มีค่าแตกต่างกัน 3 ค่า จึงสรุปได้ว่าระบบการวัดนี้มีความละเอียดที่ไม่เพียงพอในการแยกแยะความแตกต่างของชิ้นงาน ดังนั้นจะต้องหาเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดที่เพียงพอต่อการแยกแยะความแตกต่างของชิ้นงาน เช่นเปลี่ยนมาใช้เครื่องชั่งที่สามารถวัดค่าทศนิยมที่ 3 ตำแหน่งได้ ซึ่งปัจจุบันใช้เครื่องชั่งที่สามารถบอกความละเอียดของชิ้นงานได้เพียงทศนิยม 2 ตำแหน่งเท่านั้น

2) แผนภูมิควบคุม \bar{x}

การวิเคราะห์ผลของแผนภูมิควบคุม \bar{x} เป็นดังนี้ เนื่องจากความกว้างของแผนภูมิควบคุม \bar{x} ซึ่งแสดงถึงความผันแปรด้านรีพีทะบิลิตี้ (Repeatability) หากระบบการวัดมีความแปรปรวนด้านรีพีทะบิลิตี้ที่ต่ำ จะทำให้แผนภูมิควบคุม \bar{x} แคบ ซึ่งจะทำให้เห็นจำนวนข้อมูลที่ออกนอกขีดจำกัดควบคุมมีเป็นจำนวนมาก หากระบบการวัดมีความแปรปรวนที่น้อย ควรจะเห็นจุดข้อมูลออกนอกขีดจำกัดควบคุมมากกว่า 1 ใน 3 ของจำนวนจุดทั้งหมด ดังนั้นหากพิจารณาจากข้อมูลของระบบการวัดนี้จะเห็นว่า มีจุดออกนอกขีดจำกัดควบคุมมากกว่า 1 ใน 3 แสดงว่าความแปรปรวนของระบบการวัดนี้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความแปรปรวนของกระบวนการ แสดงว่าระบบการวัดนี้สามารถใช้ในการประมาณความแปรปรวนของกระบวนการได้

3) กราฟอิทธิพลร่วมระหว่างชิ้นงานกับพนักงานวัด (Part*Operator Interaction)

จากกราฟ Operator*Part Interaction พบว่าเส้นกราฟค่อนข้างที่จะทับกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า P-value ของอิทธิพลร่วม (Interaction) จากตาราง ANOVA ดังรูปที่ 4.5 มีค่าเท่ากับ 0.406 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสรุปได้ว่า ไม่มีผลกระทบร่วมระหว่างพนักงานวัดกับชิ้นงาน ซึ่งหมายความว่า อิทธิพลของพนักงานวัดที่มีต่อค่าวัดไม่แตกต่างกันระหว่างชิ้นงานต่างๆ

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	2.59551	0.288390	9919.13	0.000
Operator	2	0.00001	0.000005	0.17	0.843
Part * Operator	18	0.00052	0.000029	1.09	0.406
Repeatability	30	0.00080	0.000027		
Total	59	2.59684			

α to remove interaction term = 0.05

รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางกับอิทธิพลร่วม (With Interaction)

4) กราฟของพนักงานวัด (By Operator)

จากกราฟ By Operator พบว่าค่าเฉลี่ยจากการวัดของพนักงานวัดแต่ละคนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า P-value ของพนักงานวัด (Operator) ดังรูปที่ 4.6 มีค่าเท่ากับ 0.835 ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยจากการวัดของพนักงานวัดทั้ง 3 คน มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

5) กราฟของชิ้นงาน (By Part)

จากกราฟ By Part พบว่าบางชิ้นงาน เช่น ชิ้นงานที่ 2 และ 3 มีค่าจากการวัดแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า P-value ของชิ้นงาน (Part) ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.0005 จะพบว่ามีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสรุปได้ว่ามีชิ้นงานอย่างน้อย 1 คู่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	2.59551	0.288390	10460.5	0.000
Operator	2	0.00001	0.000005	0.2	0.835
Repeatability	48	0.00132	0.000028		
Total	59	2.59684			

รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางโดยไม่มีอิทธิพลร่วม (without Interaction)

6) องค์ประกอบของความแปรปรวน (Variance Components)

จากการพิจารณาองค์ประกอบของความแปรปรวน ดังรูปที่ 4.7 เมื่อทำการเปรียบเทียบเป็นค่าร้อยละแล้วพบว่า ความแปรปรวนทั้งหมด (Total Variation) เป็น 100% แบ่งเป็นความแปรปรวนจากกระบวนการผลิต (Part-to-Part) 99.94% และแบ่งเป็นความแปรปรวนจากระบบการวัด (Total Gage R&R) 0.06% โดยที่ความแปรปรวนของระบบการวัดยังสามารถแบ่งออกได้เป็นอีก 2 ส่วนคือ ความแปรปรวนจากสาเหตุรีพีทะบิลิตี (Repeatability) 0.06% และความแปรปรวนจากสาเหตุรีโพรดิวซิบิลิตี (Reproducibility) 0.00%

Variance Components

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.0000276	0.06
Repeatability	0.0000276	0.06
Reproducibility	0.0000000	0.00
Operator	0.0000000	0.00
Part-To-Part	0.0480603	99.94
Total Variation	0.0480879	100.00

รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของความแปรปรวน (Variance Components)

7) ความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับความแปรปรวนของกระบวนการ (%SV หรือP/TV)

เมื่อพิจารณาความผันแปรจากระบบการวัด (Total Gage R&R) เทียบกับความผันแปรของกระบวนการ (Part-to-Part) หรือสามารถดูได้จาก %SV ของ Total Gage R&R ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.39% ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่ 30% จึงสรุปได้ว่าระบบการวัดมีความผันแปรที่ยอมรับได้ โดยเกณฑ์การตัดสินใจเพื่อยอมรับอ้างอิงจาก Automotive Industry Action Group (AIAG) ดังตารางที่ 4.2

8) ความแปรปรวนจากระบบการวัดเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอนุโลม (%Tolerance)

จากความผันแปรจากระบบการวัด (Total Gage R&R) เทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอนุโลม หรือสามารถดูได้จากค่า %Tolerance ของ Total Gage R&R ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.63% ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่ 30% จึงสรุปว่าระบบการวัดมีความผันแปรที่ยอมรับได้ โดยเกณฑ์การตัดสินใจเพื่อยอมรับอ้างอิงจาก Automotive Industry Action Group (AIAG) ดังตารางที่ 4.2 เนื่องจากระบบการวัดมีความผันแปรที่ยอมรับได้ จึงไม่ต้องปรับปรุงระบบการวัดใหม่ ดังนั้นสามารถนำระบบการวัดนี้ไปใช้งานต่อไปได้ และควรทำการประเมินระบบการวัดอย่างสม่ำเสมอ

9) ตัวเลขที่แสดงประเภทของข้อมูลที่แตกต่างกัน (Number of Distinct Categories, ndc)

ตัวเลขที่แสดงประเภทของข้อมูลที่แตกต่างกัน หรือเรียกโดยย่อว่า ndc แสดงถึงจำนวนกลุ่มข้อมูลที่แตกต่างกันที่ถูกจำแนกได้จากระบบการวัด โดยที่ระบบการวัดจะมีความสามารถในการจำแนกข้อมูลที่วัดเมื่อ ndc ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 4 กลุ่ม สำหรับระบบการวัดนี้ผลการคำนวณจาก MINITAB พบว่า ndc มีค่าเท่ากับ 58 ดังรูปที่ 4.8 แสดงว่าระบบการวัดที่ศึกษามีความสามารถในการจำแนกข้อมูลที่วัดได้เป็น 58 กลุ่มที่มีความแตกต่างกัน แสดงว่าระบบการวัดสามารถนำมาใช้ประมาณค่าความผันแปรของกระบวนการได้

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.005251	0.03150	2.39	0.63
Repeatability	0.005251	0.03150	2.39	0.63
Reproducibility	0.000000	0.00000	0.00	0.00
Operator	0.000000	0.00000	0.00	0.00
Part-To-Part	0.219227	1.31536	99.97	26.31
Total Variation	0.219290	1.31574	100.00	26.31

Number of Distinct Categories = 58

รูปที่ 4.8 การประเมินระบบการวัด (Gage Evaluation)

ตารางที่ 4.2 เกณฑ์การตัดสินใจยอมรับอ้างอิงจาก AIAG

ค่า Total Gage R&R	เกณฑ์การยอมรับ
P/T หรือ P/TV หรือ %SV \leq 10%	ยอมรับได้โดยไม่ต้องทำการแก้ไขระบบการวัด
10% < P/T หรือ P/TV หรือ %SV < 30%	อาจยอมรับได้ โดยต้องพิจารณาความเหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวัด
P/T หรือ P/TV หรือ %SV \geq 30%	ไม่สามารถยอมรับระบบการวัดได้ ต้องค้นหาสาเหตุแล้วทำการแก้ไข



บทที่ 5

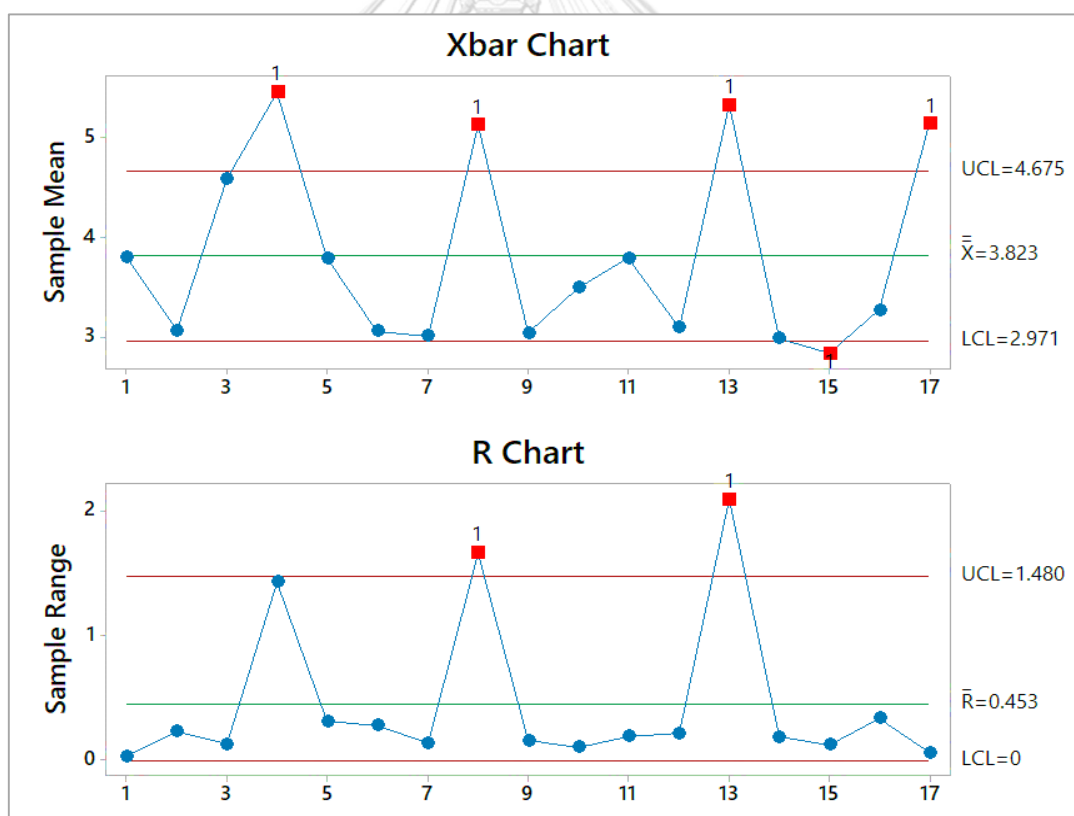
ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase)

สำหรับบทนี้จะเป็นการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังจากผ่านการทดสอบด้วยความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ที่เกินข้อกำหนดของค่ายรถยนต์คือเกิน 5% โดยจะนำข้อมูลจากการสุ่มตรวจสินค้ารุ่น A ในช่วงเดือนกรกฎาคม 2018 ถึง พฤศจิกายน 2018 จำนวน 17 รายการ มาทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือคุณภาพต่างๆ เช่น แผนภูมิควบคุม (Xbar-R Chart), แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagrams) และการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) เป็นต้น ซึ่งผลที่ได้จะเป็นสาเหตุหลักที่จะนำไปแก้ไขปัญหาดังต่อไปนี้

5.1 การวิเคราะห์แผนภูมิควบคุมของกระบวนการ (Xbar - R Chart)

สำหรับการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุมของกระบวนการนั้นทำเพื่อประเมินและวิเคราะห์ความแปรปรวนของกระบวนการที่เกิดขึ้น เพื่อหาทางลดความแปรปรวนที่ทำให้กระบวนการนั้นเปลี่ยนแปลงไป โดยจะเริ่มต้นจากการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบด้วยความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง โดยทำการสุ่มตรวจสินค้ารุ่น A ในช่วงเดือนกรกฎาคม 2018 ถึง พฤศจิกายน 2018 ได้จำนวน 17 รายการ รายการละ 3 ค่า (3 ค่าต่อรายการ) ดังนั้นจะเก็บข้อมูลได้ทั้งหมด 51 ข้อมูล หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อหาความแปรปรวนของกระบวนการ จากการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม MINITAB โดยโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อย (Subgroup) ซึ่งจะได้ว่า 1 Subgroup เท่ากับ 3 ข้อมูล ดังนั้นถ้ามี 51 ข้อมูล จะมีทั้งหมด 17 Subgroup หากพิจารณาที่แผนภูมิควบคุมค่าพิสัย (R Chart) ดังรูปที่ 5.1 จะได้เส้นกึ่งกลางของแผนภูมิควบคุมค่าพิสัย (\bar{R}) เท่ากับ 0.453% ส่วนค่าขีดจำกัดควบคุมขอบบน (UCL) ของแผนภูมิค่าพิสัยเท่ากับ 1.480% และค่าขีดจำกัดควบคุมขอบล่าง (LCL) ของแผนภูมิค่าพิสัยเท่ากับ 0% จากแผนภูมิควบคุมค่าพิสัยพบว่า Subgroup ที่ 8 และ 13 อยู่นอกจุดควบคุมไปทางขอบบนแสดงว่าสินค้ารุ่น A รายการที่ 8 และ 13 มีความแปรปรวนสูง ต่อมาพิจารณาที่แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ย (Xbar

Chart) ดังรูปที่ 5.1 จะได้เส้นกึ่งกลางของแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ย (\bar{x}) เท่ากับ 3.823% ส่วนค่าขีดจำกัดควบคุมขอบบน (UCL) ของแผนภูมิค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.675% และค่าขีดจำกัดควบคุมขอบล่าง (LCL) ของแผนภูมิค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.971% จากแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยพบว่า Subgroup ที่ 4, 8, 13 และ 17 อยู่นอกจุดควบคุมไปทางขอบบนแสดงว่าสินค้ารุ่น A รายการที่ 4, 8, 13 และ 17 มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) สูงกว่ารายการอื่นๆ และส่วน Subgroup ที่ 15 อยู่นอกจุดควบคุมไปทางขอบล่างแสดงว่าสินค้ารุ่น A รายการที่ 15 มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ต่ำกว่ารายการอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงความแปรปรวนของกระบวนการและปรับปรุงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบด้วยความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ให้ดีขึ้น โดยทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ (Parameter) ที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

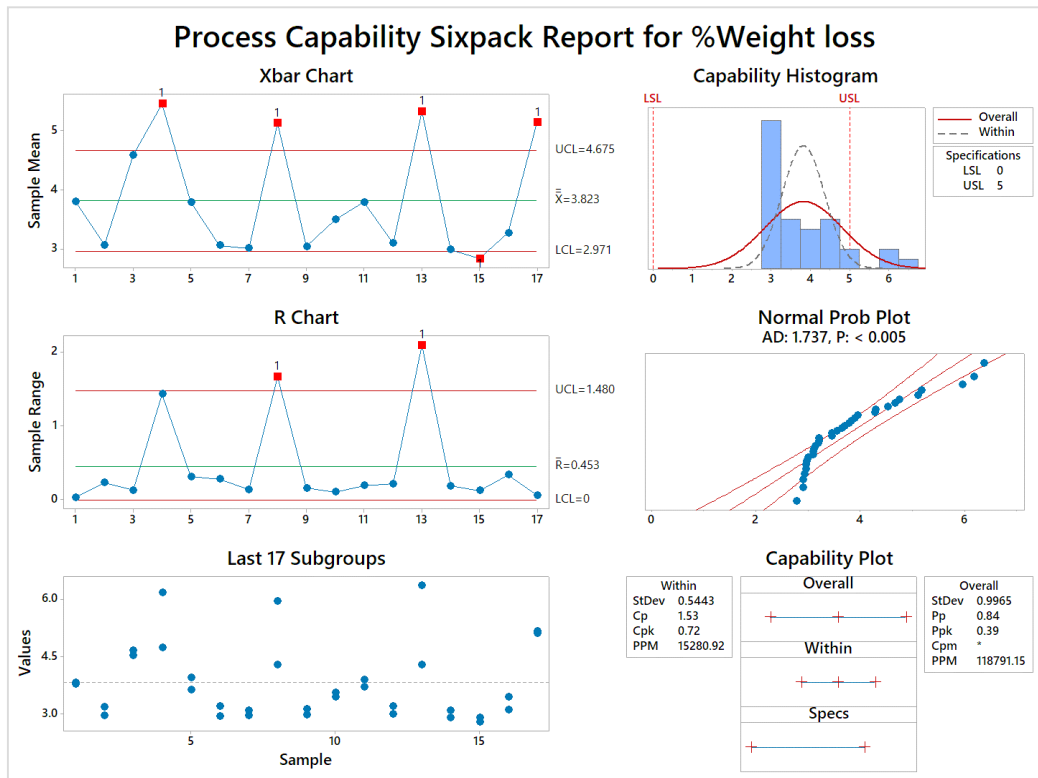


รูปที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุม (Control chart)

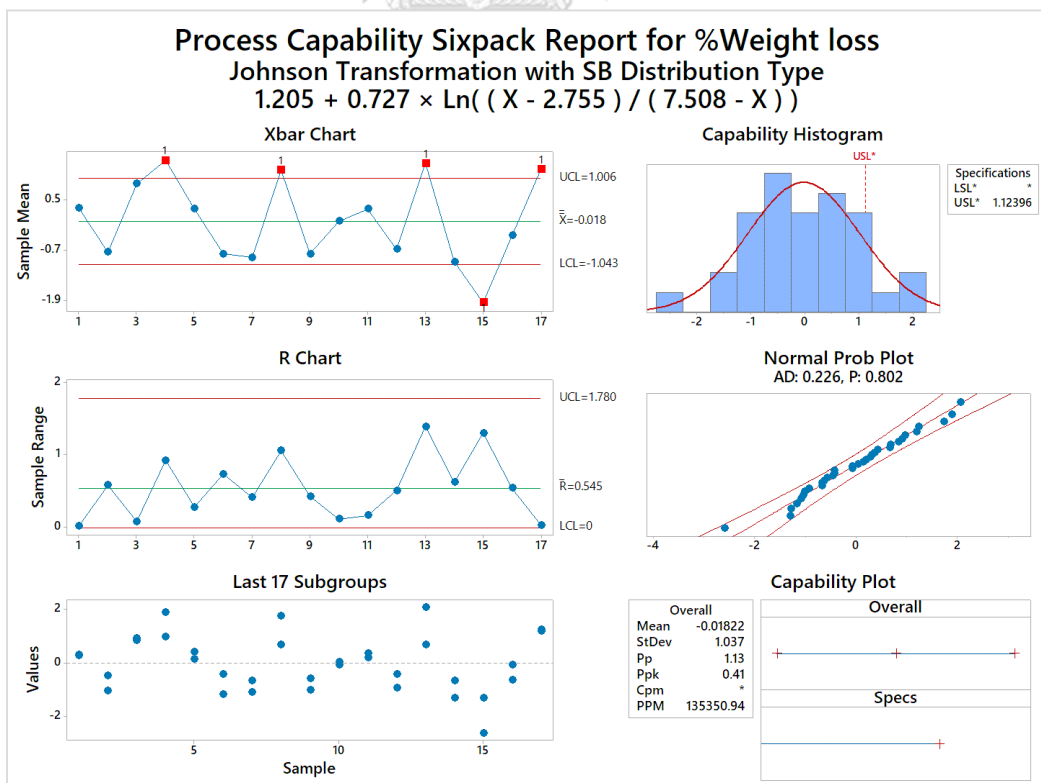
5.2 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis)

สำหรับการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการนั้นทำเพื่อประเมินและวิเคราะห์ความแปรปรวนของกระบวนการที่เกิดขึ้น เพื่อหาทางลดความแปรปรวนที่ทำให้กระบวนการนั้นเปลี่ยนแปลงไป จากการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง โดยทำการสุ่มตรวจสินค้ารุ่น A ในช่วงเดือนกรกฎาคม 2018 ถึง พฤศจิกายน 2018 ได้จำนวน 17 รายการ รายการละ 3 ตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความสามารถของกระบวนการโดยใช้โปรแกรม MINITAB ในการประมวลหาค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการในระยะสั้น (Short-term actual capability) หรือเรียกโดยย่อว่า Cpk และหาค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการในระยะยาว (Long-term actual capability) หรือเรียกโดยย่อว่า Ppk จากข้อมูลที่ได้เก็บมาข้างต้นสามารถวิเคราะห์ออกมาได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งจะได้ค่า Cpk เท่ากับ 0.72 และ Ppk เท่ากับ 0.39 เนื่องจาก P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ จึงไม่สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการได้ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงข้อมูล (Transformation) เพื่อให้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ก่อนที่จะนำไปใช้ในการประมาณค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ

ผู้วิจัยได้ทำการแปลงข้อมูลโดยใช้วิธี Johnson Transformation ที่มีโปรแกรม MNITAB ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งจะได้ค่า P-value มากกว่า 0.05 ดังนั้นข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติแล้วจึงสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการต่อได้ โดยเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของค่า Cpk และ Ppk คือต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.33 เมื่อพิจารณาค่าดัชนีชี้วัดศักยภาพของกระบวนการในระยะยาว (Long-term potential capacity) หรือเรียกโดยย่อว่า Pp มีค่าเท่ากับ 1.13 แสดงว่าไม่สามารถยอมรับระดับความแปรปรวนของกระบวนการได้ เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 1.33 และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการในระยะยาว (Ppk) มีค่าเท่ากับ 0.41 แสดงว่าระดับความแปรปรวนของกระบวนการและการเข้าใกล้เป้าหมายของค่าเฉลี่ยของกระบวนการไม่สามารถยอมรับได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 1.33 ดังนั้นต้องทำการปรับปรุงทั้งระดับความแปรปรวนของกระบวนการและปรับปรุงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ให้ได้ตามเป้าหมายที่ต้องการและให้ได้ตามข้อกำหนด (Specification) ของค่ายรถยนต์



รูปที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ



รูปที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการด้วยวิธี Johnson Transformation

5.3 การวิเคราะห์แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagrams)

5.3.1 การค้นหาปัจจัย

การศึกษาและปรับปรุงค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง โดยแนวทางการออกแบบการทดลองจะกำหนดให้ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีเป็นตัวแปรตอบสนอง (Response) ของการทดลอง ซึ่งการค้นหาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อค่าของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีนั้นผู้วิจัยจะใช้แผนผังสาเหตุและผลมาช่วยในการวิเคราะห์ โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกคือ ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลของการออกแบบผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีดังรูปที่ 5.4 และส่วนที่สองคือ ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลของกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีดังรูปที่ 5.5 โดยสามารถอธิบายปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลได้ดังนี้

5.3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลของการออกแบบผลิตภัณฑ์

1) ปัจจัยด้านพนักงาน (Man)

ปัจจัยด้านพนักงานที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ขนาดความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ได้แก่

- ทักษะของพนักงานขึ้นอยู่กับการศึกษาอบรมและประสบการณ์ในการทำงานของพนักงานแต่ละคน กรณีของพนักงานใหม่ต้องเข้ารับการฝึกอบรมให้ครบหลักสูตร เพื่อให้พนักงานมีความเข้าใจก่อนเริ่มปฏิบัติงานและให้พนักงานปฏิบัติตามขั้นตอนการปฏิบัติงาน (Work Instruction) เพื่อให้ปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง ส่วนประสบการณ์นั้นจะต้องใช้เวลาในการเรียนรู้
- สำหรับการซึ่งอัตราส่วนผสมเป็นปัจจัยที่ต้องให้ความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อผลการทดลอง ดังนั้นก่อนการซึ่งวัตถุดิบทุกครั้งต้องทวนสอบเครื่อง

ซึ่งและอุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นต่อผลการทดลองในอนาคต

2) ปัจจัยด้านวัตถุดิบ (Material)

ปัจจัยด้านวัตถุดิบที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมงคือ การเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากพลาสติกไซเซอร์เป็นวัตถุดิบที่มีสถานะเป็นของเหลว (Liquid) ที่เป็นส่วนผสมหลักที่ใส่ในสูตรการผลิตในปริมาณที่มากจึงมีโอกาสระเหยหรือสลายตัวได้หากเลือกใช้ไม่เหมาะสม

1) ปัจจัยด้านเครื่องจักร (Machine)

ปัจจัยด้านเครื่องจักรที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีคือ เครื่องอัดรีดขนาดจำลอง (Pilot scale) ขึ้นรูปไม่ได้มาตรฐาน เนื่องจากขาดความใส่ใจในเรื่องของการตรวจสอบก่อนเดินเครื่องหรือก่อนการใช้งานในแต่ละครั้ง ยิ่งไปกว่านั้นถ้าหากเครื่องไม่ได้รับการบำรุงรักษาจะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอัดรีดทำงานได้ไม่เต็มที่

2) ปัจจัยด้านวิธีการทำงาน (Method)

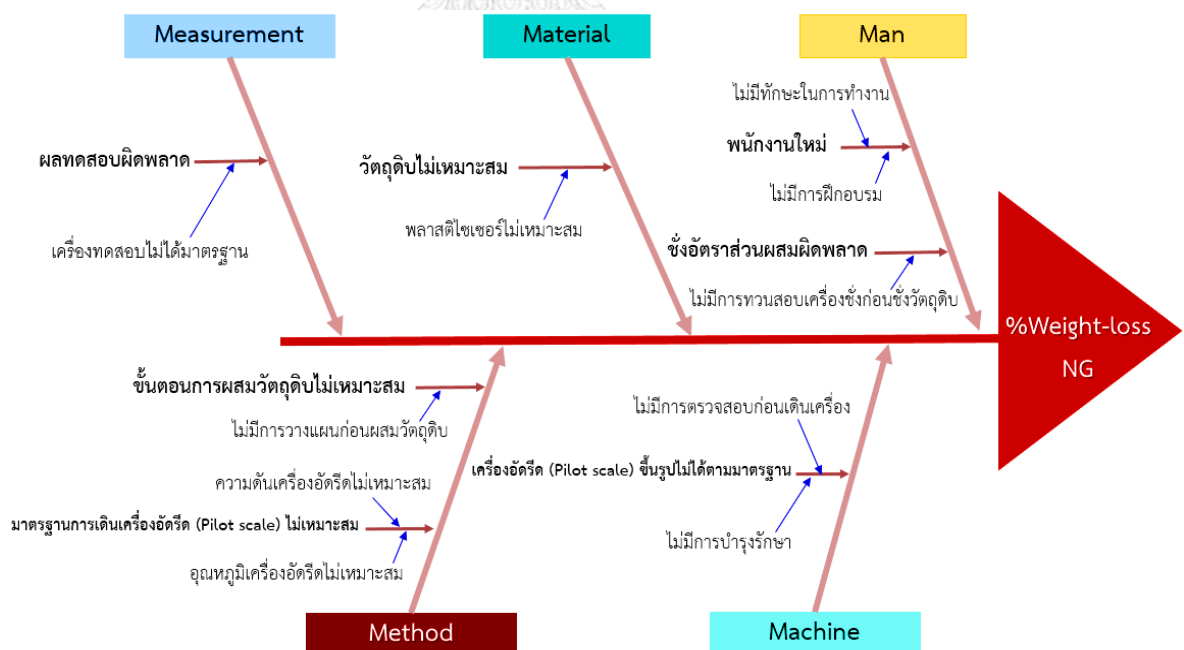
ปัจจัยด้านวิธีการทำงานที่อาจมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีได้แก่

- การผลิตหนังเทียมพีวีซีให้ออกมามีคุณภาพที่ดีนั้นขึ้นอยู่กับการผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกันให้ได้มากที่สุด ซึ่งการจะผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้นต้องได้รับอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่สมบูรณ์ ดังนั้นมาตรฐานการเดินเครื่องอัดรีดขนาดจำลองก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องให้ความสำคัญด้วยเนื่องจากการทดสอบก่อนลงผลิตจริง

- การผลิตหนังเทียมพีวีซีจะให้ความสำคัญกับขั้นตอนการผสม เนื่องจากลำดับการเติมวัตถุดิบอาจมีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมี เพราะฉะนั้นหากไม่มีการวางแผนในการผสมมาก่อนล่วงหน้าในแต่ละครั้ง อาจจะทำให้เกิดปัญหาระหว่างการทำงานได้ หรืออาจจะส่งผลทำให้วัตถุดิบที่เราใส่ลงไปนั้นแสดงประสิทธิภาพออกมาได้ไม่ดีเท่าที่ควร

3) ปัจจัยด้านวิธีการทดสอบ (Measurement)

ปัจจัยด้านวิธีการทดสอบที่อาจมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีคือ การวิเคราะห์ผลการทดสอบผิพลาตเนื่องจากเครื่องอบทดสอบเร่งสภาวะอายุของชิ้นงาน (Geer oven aging tester) ไม่ได้มาตรฐาน โดยตรวจพบว่าอุณหภูมิไม่นิ่ง และอัตราการหมุนเวียนอากาศ (Air change rate) ของเครื่องอบทดสอบเร่งสภาวะอายุของชิ้นงานไม่สามารถปรับตั้งได้ ทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบคลาดเคลื่อนหรือให้ผลการทดสอบที่ผิพลาตได้ เช่น ทดสอบที่บริษัทผ่านแต่เมื่อค่ายรถยนต์เอาไปทดสอบเองผลที่ได้ออกมาคือ ไม่ผ่าน ดังนั้นเครื่องทดสอบที่ใช้ไม่ได้มาตรฐาน



รูปที่ 5.4 แผนผังสาเหตุและผลของการออกแบบผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม.

5.3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลของกระบวนการผลิต

1) ปัจจัยด้านพนักงาน (Man)

ปัจจัยด้านพนักงานที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบความร้อน (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง ได้แก่

- สำหรับทักษะของพนักงานขึ้นอยู่กับการศึกษาอบรมและประสบการณ์ในการทำงานของพนักงานแต่ละคน กรณีของพนักงานใหม่ต้องเข้ารับการฝึกอบรมให้ครบหลักสูตร เพื่อให้พนักงานมีความเข้าใจก่อนเริ่มปฏิบัติงานและให้พนักงานปฏิบัติตามขั้นตอนการปฏิบัติงาน (Work Instruction) เพื่อให้ปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง ส่วนประสบการณ์นั้นจะต้องใช้เวลาในการเรียนรู้
- คุณภาพของผลิตภัณฑ์จะดีหรือไม่ดีนั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานด้วย ถ้าหากพนักงานได้รับมอบหมายงานเยอะจนเกินไปหรือทำงานจนล้นมือ (Overload) อาจทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง

2) ปัจจัยด้านวัตถุดิบ (Material)

ปัจจัยด้านวัตถุดิบที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมงคือ การเลือกใช้วัตถุดิบที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากมีแนวทางการทดสอบวัตถุดิบรับเข้าหรือวัตถุดิบใหม่ไม่ชัดเจน และมีเกณฑ์การตรวจสอบวัตถุดิบรับเข้าไม่ได้มาตรฐาน

3) ปัจจัยด้านเครื่องจักร (Machine)

ปัจจัยด้านเครื่องจักรที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. คือเครื่องคาลเอนเดอร์ (Calendering machine, CA) อัดรีดขึ้นรูปไม่ได้ตามมาตรฐานเนื่องจากไม่มีการตรวจสอบก่อนเดินเครื่องหรือก่อนการใช้งานในแต่ละครั้ง

และเครื่องถ้าหากไม่ได้รับการบำรุงรักษาอาจทำให้เครื่องคาเลนเดอร์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

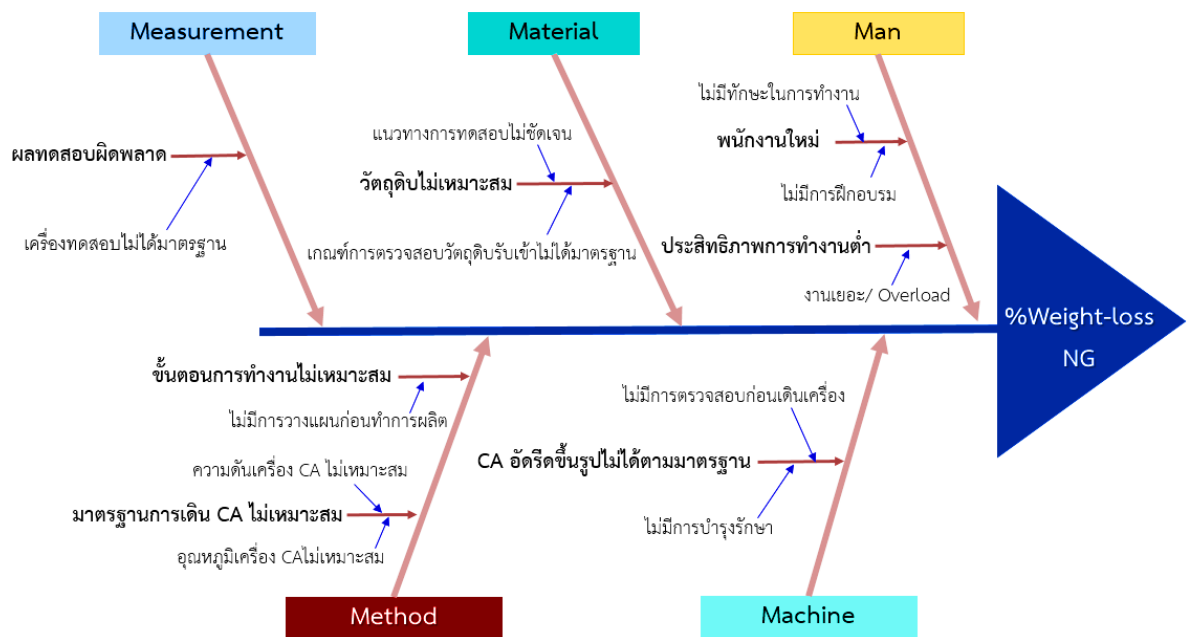
4) ปัจจัยด้านวิธีการทำงาน (Method)

ปัจจัยด้านวิธีการทำงานที่อาจจะมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีได้แก่

- สำหรับการผลิตหนังเทียมพีวีซีสิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ขั้นตอนการทำงานเนื่องจากขั้นตอนการทำงานในแต่ละส่วนต้องให้ความใส่ใจ ถ้าไม่มีการวางแผนก่อนทำการผลิต เมื่อมีปัญหาเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการจะทำให้มีโอกาสที่จะกระทบต่อคุณภาพของหนังเทียมพีวีซีได้
- การผลิตหนังเทียมพีวีซีให้ออกมามีคุณภาพที่ดีนั้นขึ้นอยู่กับ การผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกันให้ได้มากที่สุด ซึ่งการจะผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้นต้องได้รับอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่สมบูรณ์ ดังนั้นมาตรฐานการเดินเครื่องคาเลนเดอร์ (CA) ก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องให้ความสำคัญด้วยเช่นกัน

5) ปัจจัยด้านวิธีการทดสอบ (Measurement)

ปัจจัยด้านวิธีการทดสอบที่อาจจะมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีคือ วิเคราะห์ผลการทดสอบผิวดผลาต เนื่องจากเครื่องอบทดสอบเร่งสภาวะอายุของชิ้นงาน (Geer oven aging tester) ไม่ได้มาตรฐาน โดยตรวจพบว่าอุณหภูมิไม่นิ่ง และอัตราการหมุนเวียนอากาศ (Air change rate) ของเครื่องอบทดสอบเร่งสภาวะอายุของชิ้นงานไม่สามารถปรับตั้งได้ ทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบนั้นคลาดเคลื่อนจากความเป็นหรือให้ผลการทดสอบที่ผิวดผลาตได้



หมายเหตุ; CA คือ เครื่องคาลเ็นเดอร์ (Calender machine)

รูปที่ 5.5 แผนผังสาเหตุและผลของกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม.

5.3.2 การพิจารณาคัดเลือกปัจจัย

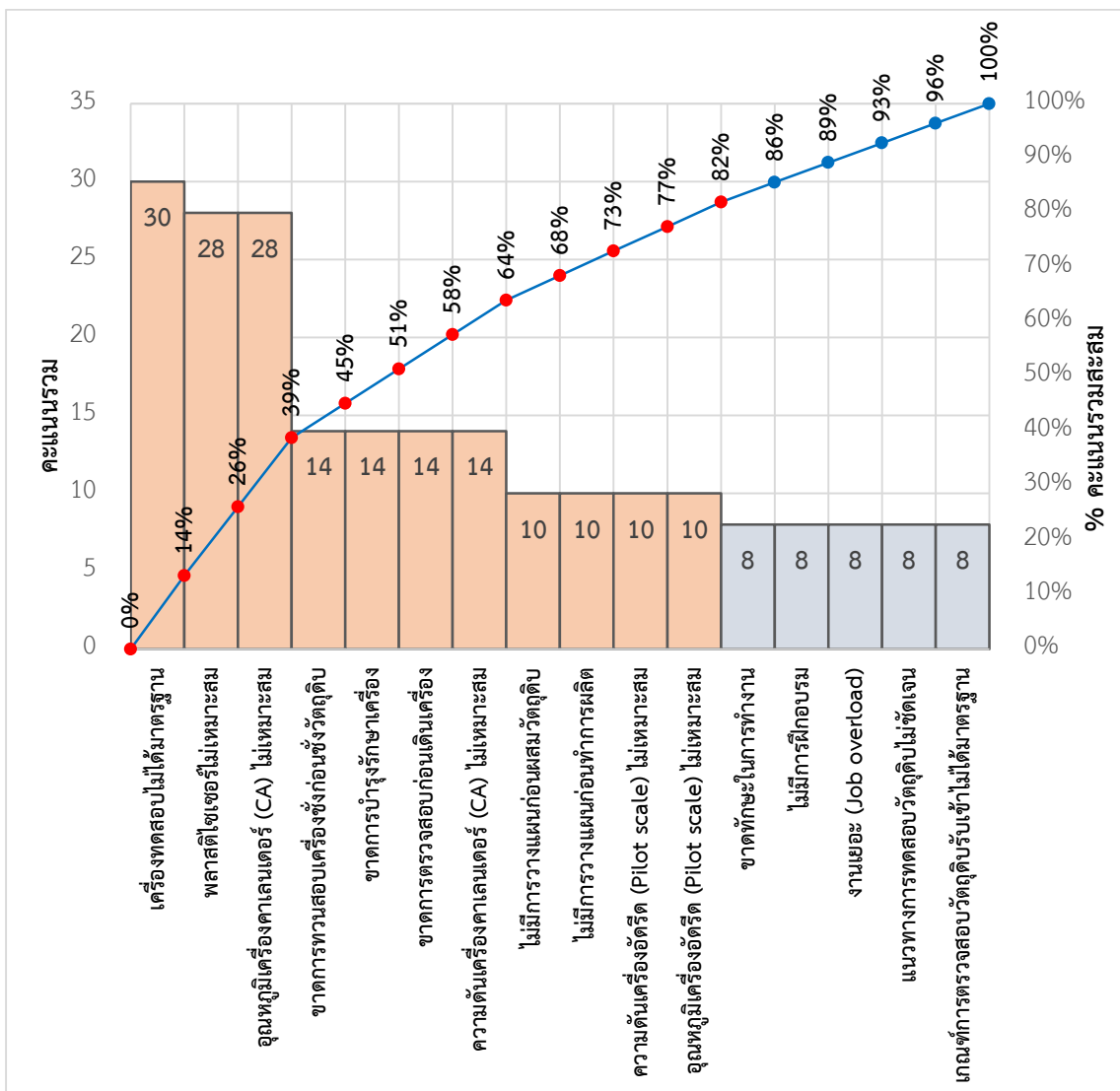
จากแผนผังสาเหตุและผลของการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. จะถูกประเมินออกมาเป็นคะแนนโดยสมาชิกในทีมที่มีประสบการณ์และเชี่ยวชาญสูงเกี่ยวกับการผลิตหนังเทียมพีวีซีด้วยกระบวนการคาลเ็นเดอร์จำนวน 6 คน เพื่อทำการวิเคราะห์เลือกปัจจัย (Factor) ที่มีผลกระทบและเกี่ยวข้องกับค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี หลังผ่านการทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง มากที่สุด โดยสามารถสรุปคะแนนการประเมินสาเหตุและผลของตัวแปรนำเข้า (Input variable) ออกมาได้ดังตารางที่ 5.1 สำหรับเกณฑ์ในการให้คะแนนสาเหตุและผลจะเป็นดังตารางที่ 5.2 จากนั้นทำการจัดอันดับลำดับของตัวแปรนำเข้าโดยใช้แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ดังรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.1 สรุปคะแนนการประเมินสาเหตุและผลของตัวแปรนำเข้า (Input variable)

ปัจจัย (Factor)	No.	ตัวแปรนำเข้า (Input variable)	ขั้นตอน	คะแนนของผู้ประเมิน						คะแนน รวม
				1	2	3	4	5	6	
Man	1	ขาดทักษะในการทำงาน	การออกแบบ & กระบวนการผลิต	L	L	L	L	M	L	8
	2	ไม่มีการฝึกอบรม	การออกแบบ & กระบวนการผลิต	L	L	L	M	L	L	8
	3	งานเยอะ (Job overload)	กระบวนการผลิต	L	L	L	L	M	L	8
	4	ขาดการทวนสอบเครื่องชั่งก่อนชั่งวัตถุดิบ	การออกแบบ	M	M	M	L	L	M	14
Machine	5	ขาดการบำรุงรักษาเครื่อง	การออกแบบ & กระบวนการผลิต	M	M	M	L	L	M	14
	6	ขาดการตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	การออกแบบ & กระบวนการผลิต	M	M	M	L	L	M	14
Material	7	พลาสติกไซเบอร์ไม่เหมาะสม	การออกแบบ	H	H	H	H	H	M	28
	8	แนวทางการทดสอบวัตถุดิบไม่ชัดเจน	กระบวนการผลิต	L	L	L	L	M	L	8
	9	เกณฑ์การตรวจสอบวัตถุดิบรับเข้าไม่ได้มาตรฐาน	กระบวนการผลิต	L	L	L	L	M	L	8
Method	10	ไม่มีการวางแผนก่อนผสมวัตถุดิบ	การออกแบบ	L	L	M	L	L	M	10
	11	ไม่มีการวางแผนก่อนทำการผลิต	กระบวนการผลิต	L	L	M	L	L	M	10
	12	ความดันเครื่องอัดรีด (Pilot scale) ไม่เหมาะสม	การออกแบบ	M	L	L	L	M	L	10
	13	อุณหภูมิเครื่องอัดรีด (Pilot scale) ไม่เหมาะสม	การออกแบบ	M	L	L	L	M	L	10
	14	ความดันเครื่องคาเลนเดอร์ (CA) ไม่เหมาะสม	กระบวนการผลิต	M	M	L	M	M	L	14
	15	อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ (CA) ไม่เหมาะสม	กระบวนการผลิต	H	H	H	H	H	M	28
Measurement	16	เครื่องทดสอบไม่ได้มาตรฐาน	การออกแบบ & กระบวนการผลิต	H	H	H	H	H	H	30

ตารางที่ 5.2 เกณฑ์การประเมินสาเหตุและผล

ระดับ	รายละเอียด	คะแนน
H : สูง (High)	มีผลกระทบและเกี่ยวข้องอย่างมากต่อสาเหตุของปัญหา	5
M : ปานกลาง (Medium)	มีผลกระทบและเกี่ยวข้องปานกลางต่อสาเหตุของปัญหา	3
L : ต่ำ (Low)	มีผลกระทบและเกี่ยวข้องเล็กน้อยต่อสาเหตุของปัญหา	1



รูปที่ 5.6 แผนภูมิพาร์โตของการจัดอันดับลำดับคะแนนการประเมินสาเหตุและผลของตัวแปรนำเข้า

จากการระดมความคิดของสมาชิกในทีมที่มีประสบการณ์และเชี่ยวชาญสูงเกี่ยวกับการผลิตหนังเทียมพีวีซีด้วยกระบวนการคาเลนเดอร์จำนวน 6 คน ได้ทำการประเมินออกมาเป็นคะแนนโดยประยุกต์ใช้กฎ 80/20 ของพาเรโต (Pareto principle) เพื่อที่จะเลือกปัจจัยที่อาจเป็นไปได้มากที่สุด เพื่อนำไปวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) ในขั้นตอนต่อไป ซึ่งการจัดอันดับของตัวแปรนำเข้าตามกฎ 80/20 ของพาเรโต (Pareto principle) แสดงดังตารางที่ 5.3 พบว่าตัวแปรนำเข้าที่มีแนวโน้มมากที่สุดที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีหลังผ่านการทดสอบความร้อนอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง

ตารางที่ 5.3 การจัดอันดับของตัวแปรนำเข้าตามกฎ 80/20 ของพาเรโต (Pareto principle)

No.	ตัวแปรนำเข้า (Input variable)	คะแนนรวม	%คะแนนรวม	%คะแนนรวมสะสม
1	เครื่องทดสอบไม่ได้มาตรฐาน	30	14%	14%
2	พลาสติกไซเซอร์ไม่เหมาะสม	28	13%	26%
3	อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ (CA) ไม่เหมาะสม	28	13%	39%
4	ขาดการทวนสอบเครื่องชั่งก่อนชั่งวัตถุดิบ	14	6%	45%
5	ขาดการบำรุงรักษาเครื่อง	14	6%	51%
6	ขาดการตรวจสอบก่อนเดินเครื่อง	14	6%	58%
7	ความดันเครื่องคาเลนเดอร์ (CA) ไม่เหมาะสม	14	6%	64%
8	ไม่มีการวางแผนก่อนผสมวัตถุดิบ	10	5%	68%
9	ไม่มีการวางแผนก่อนทำการผลิต	10	5%	73%
10	ความดันเครื่องอัดรีด (Pilot scale) ไม่เหมาะสม	10	5%	77%
11	อุณหภูมิเครื่องอัดรีด (Pilot scale) ไม่เหมาะสม	10	5%	82%
12	ขาดทักษะในการทำงาน	8	4%	86%
13	ไม่มีการฝึกอบรม	8	4%	89%
14	งานเยอะ (Job overload)	8	4%	93%
15	แนวทางการทดสอบวัตถุดิบไม่ชัดเจน	8	4%	96%
16	เกณฑ์การตรวจสอบวัตถุดิบรับเข้าไม่ได้มาตรฐาน	8	4%	100%

5.4 การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)

สำหรับการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) จะถูกวิเคราะห์และประเมินออกมาเป็นคะแนนโดยผู้ที่มีประสบการณ์และเชี่ยวชาญด้านการผลิตหนังเทียมพีวีซีในกระบวนการคาเลนเดอร์ทั้ง 6 คน ซึ่งการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบจะถูกนำไปใช้เพื่อระบุและแก้ไขปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นทั้ง 11 ปัจจัยตามที่ได้รับวิเคราะห์ด้วยแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagrams) และการประเมินคะแนนโดยประยุกต์ใช้กฎ 80/20 ของพาเรโตเพื่อทำการปรับปรุงการผลิตหนังเทียมพีวีซีในกระบวนการคาเลนเดอร์ โดยการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของการออกแบบผลิตภัณฑ์ (Design Failure Mode and Effects Analysis, DFMEA) แสดงดังตารางที่ 5.4 และการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบในกระบวนการ (Process Failure Mode and Effects Analysis, PFMEA) จะแสดงตารางที่ 5.6 สำหรับการคำนวณค่าตัวเลขลำดับความเสี่ยง (Risk Priority Number, RPN) จะใช้เกณฑ์ในการประเมินคะแนนสำหรับวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของ DFMEA ดังตารางที่ 5.5 และ PFMEA ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.4 การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของการออกแบบผลิตภัณฑ์ (DFMEA)

หัวข้อ/ หน้าที่	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของข้อบกพร่อง	S	สาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง	O	การควบคุมหน้าที่ปัจจุบัน	D	RPN
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss)	หนังเทียมพีวีซีแข็งกระด้าง และมีน้ำหนักหายไปมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดเมื่อได้รับการอบ (Heat aging) ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 100 hr	ค่า %Weight-loss ของหนังเทียมพีวีซีเกิน 5% (Spec. < 5%)	5	ชนิดของพลาสติกไซเซออร์ไม่เหมาะสม	4	ใช้พลาสติกไซเซออร์ชนิดพทาเลท (Phthalate) ที่ C-10 ขึ้นไป	5	100
การเหนียวติด (Tack free)	หนังเทียมพีวีซีเหนียวติดง่ายเมื่อนำไปใช้งานหรือจัดเก็บในที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลานาน	หนังเทียมพีวีซีเหนียวติดกับสิ่งที่มาสัมผัส	5	ชนิดของพลาสติกไซเซออร์ไม่เหมาะสม	4	ใช้พลาสติกไซเซออร์ชนิดพทาเลท (Phthalate) ที่ C-10 ขึ้นไป	5	100
การทนต่ออุณหภูมิต่ำ (Low temperature resistance)	'หนังเทียมพีวีซีแข็งกระด้างและเกิดรอยแตกเมื่อได้รับแรงกระทำและอยู่ในอุณหภูมิ -25 °C	ชิ้นงานมีรอยแตกที่ผิว	5	ชนิดของพลาสติกไซเซออร์ไม่เหมาะสม	4	ใช้พลาสติกไซเซออร์ชนิดพทาเลท (Phthalate) ที่ C-10 ขึ้นไป	5	100

ตารางที่ 5.5 เกณฑ์ประเมินการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของการออกแบบ (DFMEA)

ระดับ	ความรุนแรง (S)	โอกาสที่จะเกิด (O)	การตรวจพบ (D)
	เกณฑ์ : ระดับความรุนแรงของผลต่อผลิตภัณฑ์	เกณฑ์: โอกาสที่จะเกิดสาเหตุ	เกณฑ์ : โอกาสที่จะตรวจพบโดยการควบคุมการออกแบบ
10	ลักษณะความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นมีผลต่อการขับขีรถอย่างปลอดภัย และ/หรือเกี่ยวข้องกับการฝ่าฝืนระเบียบของทางราชการโดยไม่มี การเตือน	≥ 100 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 10)	ไม่ควบคุมการออกแบบในปัจจุบัน; ไม่วิเคราะห์หรือตรวจไม่พบ
9	ลักษณะความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นมีผลต่อการขับขีรถอย่างปลอดภัย และ/หรือเกี่ยวข้องกับการฝ่าฝืนระเบียบของทางราชการโดยมีการเตือน	50 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 20)	การวิเคราะห์/ตรวจหาในการควบคุมการออกแบบมีขีดความสามารถที่จะตรวจหาค่า; การวิเคราะห์แบบเสมือนไม่สัมพันธ์กับเงื่อนไขการใช้งานจริง
8	สูญเสียหน้าที่หลัก (ขับรถไม่ได้ แต่ไม่มีผลต่อการขับขีรถอย่างปลอดภัย)	20 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 50)	การยืนยัน/รับรองผลิตภัณฑ์หลังจากการออกแบบขั้นต้นและก่อนเอาไปผลิตที่ผ่าน/ไม่ผ่าน การทดสอบ (ทดสอบระบบ/ระบบย่อยด้วยเกณฑ์การยอมรับ เช่น ขับและใช้สอย ประเมินเพื่อส่งมอบ)
7	สูญเสียหน้าที่หลัก (ขับรถได้ แต่ลดระดับสมรรถนะ)	10 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 100)	การยืนยัน/รับรองผลิตภัณฑ์หลังจากการออกแบบขั้นต้นและก่อนเอาไปผลิตที่ทดสอบให้ล้มเหลว (ทดสอบระบบ/ระบบย่อยด้วยเกณฑ์การยอมรับ เช่น ขับและใช้สอย ประเมินเพื่อส่งมอบ)
6	สูญเสียหน้าที่รอง (ขับรถได้ แต่หน้าที่ความสะดวก/สบายไม่ได้สมรรถนะ)	2 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 500)	การยืนยัน/รับรองผลิตภัณฑ์หลังจากการออกแบบขั้นต้นและก่อนเอาไปผลิตที่ทดสอบให้เสื่อม (ทดสอบระบบ/ระบบย่อยด้วยเกณฑ์การยอมรับ เช่น ขับและใช้สอย ประเมินเพื่อส่งมอบ)
5	สูญเสียหน้าที่รอง (ขับรถได้ แต่หน้าที่ความสะดวก/สบายทำงานในระดับสมรรถนะที่ลดลง)	0.5 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 2,000)	การรับรองผลิตภัณฑ์ (ทดสอบความน่าเชื่อถือ พัฒนา/ทดสอบเพื่อรับรอง) ก่อนออกแบบได้ขั้นต้นยังใช้การทดสอบให้ผ่าน/ไม่ผ่าน (เช่น เกณฑ์การยอมรับของสมรรถนะ ตรวจหาหน้าที่)
4	ลักษณะภายนอก เสี่ยง ขับรถได้ หรือรายการความไม่สบายที่ผู้ใช้ส่วนมากสังเกตได้ (ไม่น้อยกว่า 75%)	0.1 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 10,000)	การรับรองผลิตภัณฑ์ (ทดสอบความน่าเชื่อถือ พัฒนา/ทดสอบเพื่อรับรอง) ก่อนออกแบบได้ขั้นต้นยังใช้การทดสอบให้ล้มเหลว (เช่น เกณฑ์การยอมรับของสมรรถนะ ตรวจหาหน้าที่)
3	ลักษณะภายนอก เสี่ยง ขับรถได้ หรือรายการความไม่สบายที่ผู้ใช้ส่วนใหญ่สังเกตได้ (50%)	0.01 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 100,000)	การรับรองผลิตภัณฑ์ (ทดสอบความน่าเชื่อถือ พัฒนา/ทดสอบเพื่อรับรอง) ก่อนออกแบบได้หยุดโดยใช้การทดสอบให้เสื่อม (เช่น เกณฑ์การยอมรับของสมรรถนะ ตรวจหาหน้าที่)
2	ลักษณะภายนอก เสี่ยง ขับรถได้ หรือรายการความไม่สบายที่ผู้ใช้ที่ช่างสังเกตจะรู้ได้ (ไม่มากกว่า 25%)	≤ 0.001 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 1,000,000)	การวิเคราะห์การออกแบบ/ควบคุมโดยการตรวจหาขีดความสามารถตรวจหาได้มาก การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ มีความสัมพันธ์สูงกับเงื่อนไขการใช้งานจริงหรือที่คาดหวังก่อนยังการออกแบบ
1	ไม่มีผลที่สังเกตได้	ไม่มีโอกาสเกิดความล้มเหลวเนื่องจากมีวิธีป้องกัน	ไม่เกิดสาเหตุหรือลักษณะความล้มเหลวเพราะได้ป้องกันอย่างเต็มที่จากการแก้ปัญหาในการออกแบบ (เช่น มาตรฐานการออกแบบที่พิสูจน์แล้วหรือวิธีการปฏิบัติที่ดีที่สุด)

ตารางที่ 5.6 การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของกระบวนการผลิต (PFMEA)

กระบวนการ	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของข้อบกพร่อง	S	สาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง	O	การควบคุมกระบวนการปัจจุบัน	D	RPN
การตรวจรับวัตถุดิบ	คุณสมบัติของวัตถุดิบไม่ตรงตามข้อกำหนด	- ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน	9	พนักงานไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนด	2	- มีการกำหนดให้พนักงานปฏิบัติตามข้อกำหนดในการตรวจสอบตาม WP/WI ของการทดสอบวัตถุดิบ - กำหนดให้มีการอบรมพนักงาน	5	90
การซังวัตถุดิบ	การซังน้ำหนักวัตถุดิบไม่ถูกต้อง	ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน	6	เครื่องซังผิดปกติ	2	- กำหนดให้ทำการทวนสอบด้วยลูกต้อนน้ำหนัก สัปดาห์ละ 1 ครั้ง ก่อนเริ่มทำการผลิต	5	60
การผสม	วัตถุดิบกระจายตัวได้ไม่ดี จับกันเป็นก้อน	ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน	6	พนักงานไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนด	2	- มีการกำหนดให้พนักงานปฏิบัติตามข้อกำหนดตาม WP/WI - กำหนดให้มีการอบรมพนักงาน	5	60
การนวดคลุกเคล้าและการรีดเป็นแผ่น (เครื่องคาลเลนเดอร์)	พีวีซีคอมพาวนด์แข็งร่วนเป็นก้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	- ทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์มีตำหนิไม่เรียบเนียน - ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน	6	อุณหภูมิของเครื่องคาลเลนเดอร์ไม่เหมาะสม	4	ควบคุมอุณหภูมิเครื่องคาลเลนเดอร์ - ลูกกลิ้งบนนอก $173 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - ลูกกลิ้งบน $168 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - ลูกกลิ้งกลาง $158 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - ลูกกลิ้งล่าง $152 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	5	120
การเคลือบน้ำยา	สภาพผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เงาเกินไป	ผิวหน้าเหนียวติดได้ง่าย	7	อัตราส่วนน้ำยาเคลือบชนิดเงามากเกินไป	2	ควบคุมเงาด้าน : 1.2 ± 0.3	5	70
	สภาพผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ด้านเกินไป	ผิวหน้าเป็นรอย/ เกิดคราบได้ง่าย	7	อัตราส่วนน้ำยาเคลือบชนิดด้านมากเกินไป	2		5	70
การอัดลาย	ความหนา มากกว่าความต้องการ	ทำให้ลูกค้ำไม่สามารถนำผลิตภัณฑ์ไปขึ้นเป็นชิ้นส่วน (Part) ได้ เนื่องจากแข็งเกินไปทำให้ขึ้น Part ยาก	7	ความดันลูกอัดลายมากเกินไป	2	กำหนดให้มีการควบคุมความดันลูกอัดลาย $7 \pm 2 \text{ kg/cm}^2$	5	70
	ความหนาน้อยกว่าความต้องการ	ทำให้ลูกค้ำไม่สามารถนำผลิตภัณฑ์ไปขึ้นเป็นชิ้นส่วน (Part) ได้ เนื่องจากบางเกินไปทำให้ฉีกขาดง่าย	7	ความดันลูกอัดลายน้อยเกินไป	2		5	70
การทดสอบคุณสมบัติ	ผลการทดสอบผิดพลาด	รายงานผลการทดสอบ %Weight-loss ผิด	9	เครื่องทดสอบไม่ได้มาตรฐาน	2	- อ้างอิงผลการทดสอบจากค่ายรถยนต์ - กำหนดให้มีการอบรมพนักงาน	6	108

ตารางที่ 5.7 เกณฑ์ประเมินการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของกระบวนการผลิต (PFMEA)

ระดับ	ความรุนแรง (S)	โอกาสที่จะเกิด (O)	การตรวจพบ (D)
	เกณฑ์ : ระดับความรุนแรงของผลต่อผลิตภัณฑ์	เกณฑ์: โอกาสที่จะเกิดข้อบกพร่อง	เกณฑ์ : โอกาสที่จะตรวจพบข้อบกพร่องในกระบวนการ
10	ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ยานยนต์ และ/หรือ เกี่ยวข้องกับการไม่สอดคล้องตามข้อกำหนดของกฎหมาย กฎระเบียบต่างๆ โดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า	≥ 100 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 10)	ไม่มีวิธีการควบคุมกระบวนการในปัจจุบัน ไม่สามารถตรวจพบได้ หรือไม่สามารถวิเคราะห์ได้
9	ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ยานยนต์ และ/หรือ เกี่ยวข้องกับการไม่สอดคล้องตามข้อกำหนดของกฎหมาย กฎระเบียบต่างๆ โดยมีการเตือนล่วงหน้า	50 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 20)	เป็นไปได้ยากที่จะสามารถตรวจพบข้อบกพร่องและ/หรือสาเหตุของข้อบกพร่อง
8	สูญเสียความสามารถในการทำงานของหน้าที่หลัก (ยานยนต์ไม่สามารถทำงานได้ แต่ไม่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของผู้ใช้ยานยนต์)	20 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 50)	มีการตรวจสอบข้อบกพร่องโดยพนักงานภายหลังจากผ่านกระบวนการ ด้วยการตรวจสอบด้วยสายตา/ การสัมผัส/การฟัง
7	ลดความสามารถในการทำงานของหน้าที่หลัก (ยานยนต์สามารถทำงานได้ แต่สมรรถนะในการทำงานลดลง)	10 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 100)	มีการตรวจสอบข้อบกพร่องโดยพนักงานในระหว่างกระบวนการ ด้วยการตรวจสอบโดยสายตา/ การสัมผัส/ การฟัง หรือภายหลังจากผ่านกระบวนการโดยใช้ Attribute Gauging
6	สูญเสียความสามารถในการทำงานของหน้าที่รอง (ยานยนต์สามารถทำงานได้ แต่สมรรถนะในด้านความสะดวกสบายลดลง)	2 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 500)	มีการตรวจสอบข้อบกพร่องโดยพนักงานภายหลังจากผ่านกระบวนการ โดยใช้เครื่องมือการวัด หรือตรวจสอบในระหว่างกระบวนการ ด้วยการตรวจสอบโดยใช้ Attribute Gauging
5	ลดความสามารถในการทำงานของหน้าที่รอง (ยานยนต์สามารถทำงานได้ แต่สมรรถนะในด้านความสะดวกสบายลดลง)	0.5 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 2,000)	มีการตรวจสอบข้อบกพร่องหรือตรวจจับสาเหตุของข้อบกพร่อง โดยพนักงานในระหว่างกระบวนการโดยใช้เครื่องมือวัด หรือมีตัวควบคุมอัตโนมัติในกระบวนการตรวจจับข้อบกพร่อง/สาเหตุของข้อบกพร่องแล้วแจ้งเตือนให้พนักงานทราบ (เช่น ไฟ เสียง) หรือมีการตรวจสอบในขั้นตอนการปรับตั้งค่า (Set up) และตรวจเช็คชิ้นงานชิ้นแรก
4	ทำให้เกิดเสียงดัง เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ ลูกค้ำส่วนมาก (ไม่น้อยกว่า 75%) สามารถสังเกตเห็นความไม่สอดคล้องตามข้อกำหนดได้	0.1 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 10,000)	มีการตรวจสอบข้อบกพร่องภายหลังจากผ่านกระบวนการโดยตัวควบคุมอัตโนมัติโดยตรวจจับข้อบกพร่อง และจะทำการหยุดผลิตเพื่อป้องกันไม่ให้ข้อบกพร่องหลุดไปยังกระบวนการถัดไป
3	ทำให้เกิดเสียงดัง เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ ลูกค้ำส่วนใหญ่ (50%) สามารถสังเกตเห็นความไม่สอดคล้องตามข้อกำหนดได้	0.01 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 100,000)	มีการตรวจสอบข้อบกพร่องในระหว่างกระบวนการ โดยตัวควบคุมอัตโนมัติโดยตรวจจับข้อบกพร่อง และจะทำการหยุดผลิตเพื่อป้องกันไม่ให้ข้อบกพร่องหลุดไปยังกระบวนการถัดไป
2	ทำให้เกิดเสียงดัง เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ ลูกค้ำบางส่วน (ไม่มากกว่า 25%) สามารถสังเกตเห็นความไม่สอดคล้องตามข้อกำหนดได้	≤ 0.001 เหตุการณ์ต่อ 1,000 รายการ (1 ใน 1,000,000)	มีการตรวจจับข้อผิดพลาด (สาเหตุ) ในระหว่างกระบวนการโดยตัวควบคุมอัตโนมัติ ทั้งนี้ตัวควบคุมอัตโนมัติจะตรวจจับข้อผิดพลาดและป้องกันไม่ให้เกิดข้อบกพร่องตั้งแต่เริ่มต้น
1	ไม่มีผลกระทบใด ๆ	ไม่มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากมีวิธีป้องกัน	มีการป้องกันข้อผิดพลาด (สาเหตุ) ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ ชิ้นส่วนทำให้ข้อบกพร่องไม่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากการใช้ระบบป้องกันความผิดพลาด

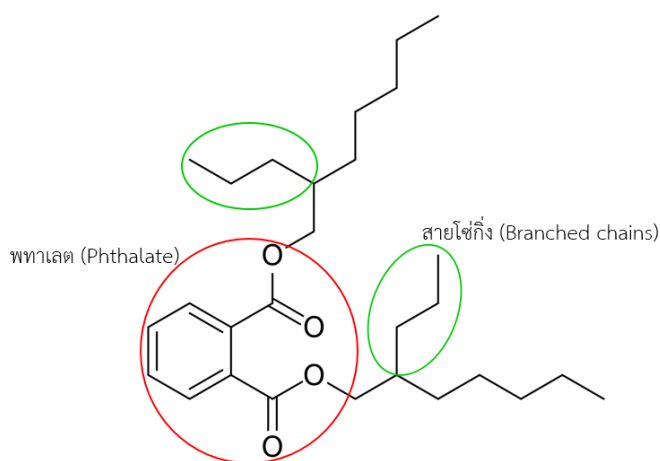
5.5 สรุปปัจจัยที่คัดเลือกมาดำเนินการออกแบบการทดลอง

จากการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของการออกแบบผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี (DFMEA) และการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซี (PFMEA) โดยการเลือกปัจจัยที่จะนำมาดำเนินการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เพื่อนำมาปรับปรุงการออกแบบและกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. เพื่อให้ได้มาซึ่งการผ่านข้อกำหนดของค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี (Spec. $\leq 5\%$) โดยการเลือกปัจจัยจะพิจารณาจากค่า RPN ที่มีค่าตั้งแต่ 100 คะแนนขึ้นไป ซึ่งใน DFMEA จะเห็นว่ายังมีอีก 2 ข้อกำหนดคือการเหนียวติด (Tack free) และการทนต่ออุณหภูมิต่ำ (Low temperature resistance) ที่มีความเกี่ยวข้องกับชนิดพลาสติกไซเซออร์เหมือนกัน ถ้าหากเปลี่ยนชนิดพลาสติกไซเซออร์จะมีผลต่อเกณฑ์ข้อกำหนดของค่าयरदनतหรือมี้นั้นสามารถอธิบายได้จากประสบการณ์ที่ได้ทำการทดลองร่วมกับบริษัทการศึกษา จากที่ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบพลาสติกไซเซออร์มาหลากหลายโครงสร้างทางเคมีพบว่าพลาสติกไซเซออร์ที่มีโครงสร้างเป็นคาร์บอนตั้งแต่ 10 ตัวขึ้นไป (C-10) จะทำผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของค่าयरदनतได้ทั้ง 2 หัวข้อ เนื่องจากมีเกณฑ์และวิธีการทดสอบที่ไม่โหด แต่สำหรับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีนั้นมันค่อนข้างยากเนื่องจากเกณฑ์ที่ทางค่ายरणतเจ้านี้ให้มามันค่อนข้างโหดและวิธีการทดสอบหรืออุณหภูมิที่ใช้ทดสอบมันค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับค่ายरणतเจ้าอื่นๆ และสำหรับเครื่องทดสอบไม่ได้มาตรฐานที่ค่า RPN เท่ากับ 108 คะแนน จะไม่ถูกนำมาทำการออกแบบการทดลองเนื่องจากทางบริษัทการศึกษาได้ปรับปรุงหรือแก้ไขโดยการซื้อเครื่องทดสอบใหม่รุ่นเดียวกับที่ทางค่ายरणตมีอยู่ ดังนั้นปัจจัยที่จะนำมาดำเนินการออกแบบการทดลองมีดังนี้

1) ชนิดของพลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer type)

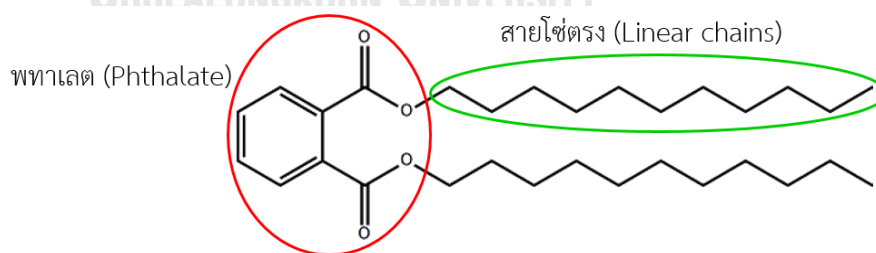
จากการควบคุมหน้าที่ปัจจุบันของการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของการออกแบบผลิตภัณฑ์ (DFMEA) พบว่าการใช้พลาสติกไซเซออร์กลุ่มโมโนเมอร์พลาสติกไซเซออร์ (Monomeric plasticizers) ชนิดฟทาเลต (Phthalate) โดยมีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่กิ่ง (Branched chain) ที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 10 ตัวขึ้นไป (C-10) โดย ยังไม่เหมาะสมต่อสูตรการผลิตจึงต้องได้รับการปรับปรุงเพราะค่า RPN ที่คำนวณออกมาได้เท่ากับ 100 คะแนน ดังนั้นชนิดของพลาสติกไซเซออร์จะถูกนำมาทำการออกแบบการทดลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบผลการทดลอง โดยจะมีทั้งหมด 3 ชนิดซึ่งแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยคาร์บอนตั้งแต่ 10 ตัวขึ้นไป ดังนี้

- ชนิดที่ 1 : กลุ่มโมโนเมอร์พลาสติกไซเซอร์ (Monomeric plasticizers) ชนิดพทาเลต โดยมีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่กิ่ง (Branched chain) โดยทั่วไปมักจะเรียกว่า พทาเลต (Phthalate) ซึ่งสายโซ่กิ่งมักจะไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีหรือหลุดออกจากโครงสร้างหลักก่อนเมื่อได้รับความร้อนไม่เหมาะสมส่งผลให้โครงสร้างของตัวมันเองไม่สมบูรณ์ซึ่งจะกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ ดังรูปที่ 5.7



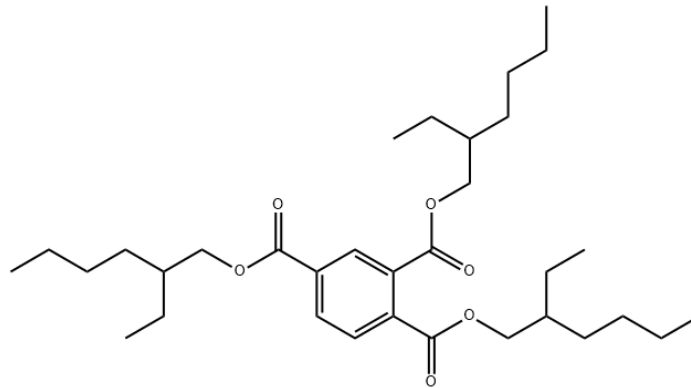
รูปที่ 5.7 พทาเลต (Phthalate)

- ชนิดที่ 2 : กลุ่มโมโนเมอร์พลาสติกไซเซอร์ (Monomeric plasticizers) ชนิดพทาเลต โดยมีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ตรง (Linear chain) ซึ่งจะมีโครงสร้างแข็งแรงกว่าโครงสร้างแบบสายโซ่กิ่ง โดยทั่วไปมักจะเรียกว่า พทาเลตสายโซ่ตรง (Linear phthalate) ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 พทาเลตสายโซ่ตรง (Linear phthalate)

- ชนิดที่ 3 : กลุ่มโพลีเมอร์พลาสติกไซเซอร์ (Polymeric plasticizers) ชนิดไตรเมลลิต (Trimellitate) ดังรูปที่ 5.9 ซึ่งโพลีเมอร์พลาสติกไซเซอร์จะมีโครงสร้างที่ใหญ่กว่าโมโนเมอร์พลาสติกไซเซอร์จึงทำให้แข็งแรงกว่า

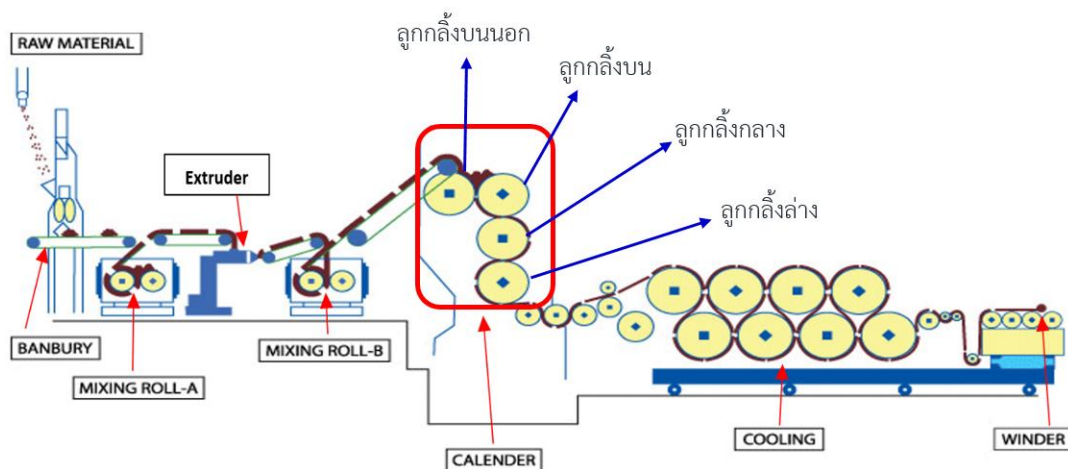


รูปที่ 5.9 ไตรเมลลิตเทต (Trimellitate)

2) อุณหภูมิเครื่องคาลเอนเดอร์

จากการควบคุมกระบวนการปัจจุบันของการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบของกระบวนการผลิต (PFMEA) พบว่าอุณหภูมิของมาตรฐานการเดินเครื่องคาลเอนเดอร์ยังไม่เหมาะสมซึ่งจะเห็นว่าค่า RPN ที่ได้เท่ากับ 120 คะแนน จึงถูกนำมาทำการออกแบบการทดลอง โดยเครื่องคาลเอนเดอร์จะประกอบด้วยลูกกลิ้ง (Roll) 4 ลูก ดังรูปที่ 5.10 ซึ่งแต่ละลูกกลิ้งจะมีอุณหภูมิทั้งหมด 4 จุด โดยจะกำหนดให้อุณหภูมิของแต่ละลูกกลิ้งของเครื่องคาลเอนเดอร์แทนด้วย Temp ต่างๆ ดังนี้

- อุณหภูมิของลูกกลิ้งบนนอกแทนด้วย Temp.1
- อุณหภูมิของลูกกลิ้งบนแทนด้วย Temp.2
- อุณหภูมิของลูกกลิ้งกลางแทนด้วย Temp.3
- อุณหภูมิของลูกกลิ้งล่างแทนด้วย Temp.4



รูปที่ 5.10 ตำแหน่งลูกกลิ้ง (Roll) ของเครื่องคาลเอนเดอร์

บทที่ 6

ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve Phase)

สำหรับการออกแบบการทดลองจะถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหาเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ถูกเลือกจากการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) ในขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหามีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. หลังผ่านการทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงหรือไม่นั้น เพราะฉะนั้นผู้วิจัยจะต้องทำการออกแบบการทดลองเพื่อค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหาและขั้นตอนควบคุมต่อไป

6.1 การเลือกการออกแบบการทดลอง (Design selection)

จากปัจจัยที่ถูกเลือกมาจากการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) ซึ่งจะถูกนำมาทำการออกแบบการทดลอง ได้แก่ ชนิดของพลาสติกไซเซออร์ และอุณหภูมิของเครื่องคาเลนเดอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยอุณหภูมิของลูกกลิ้งบนนอก, อุณหภูมิของลูกกลิ้งบน, อุณหภูมิของลูกกลิ้งกลาง และอุณหภูมิของลูกกลิ้งล่าง ดังนั้นจะมีทั้งหมด 5 ปัจจัย ($k = 5$) แสดงดังตารางที่ 6.1 จากปัจจัยที่ถูกเลือกมาจาก FMEA สามารถปรับได้เพียง 3 ระดับเท่านั้นเนื่องจากมี 1 ปัจจัยที่ไม่สามารถใช้ที่ 5 ระดับได้คือพลาสติกไซเซออร์จึงไม่สามารถใช้การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCD (Central Composite Design) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF (The Face-centered Central Composite design) เนื่องจากมี α เท่ากับ 1 ซึ่งการออกแบบประเภทนี้จึงสามารถใช้ในกรณีที่มีปัจจัยใดๆ สามารถปรับได้เพียง 3 ระดับเท่านั้น โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่มีอยู่ (Available factorial designs) ซึ่งแนะนำโดยโปรแกรม MINITAB โดยจะบอกถึงขนาดตัวอย่าง (Sample size) และบอก รีโซลูชัน (Resolution) ของแต่ละปัจจัยควรจะเป็นเท่าไร ดังรูปที่ 6.1 เพื่อให้การค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเพื่อให้ได้ตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมจึงต้องกำหนดขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบการทดลอง ดังนั้นการออกแบบการทดลองสำหรับการฟิตแบบจำลองกำลังสอง (Fitting a second-order model) ผู้วิจัยจะเลือกทำการทดลองเพียงครึ่งเดียว คือ $\frac{1}{2}$ (One-Half Fraction: 2^{k-1}) เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของงบประมาณและระยะเวลาที่ทำการทดลอง เพราะฉะนั้นขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการทดลองจะมีทั้งหมด 32 runs และมี Resolution

เท่ากับ 5(V) ซึ่งมีความละเอียดเพียงพอที่จะยอมรับได้ เพราะอิทธิพลหลัก (Main effect) และอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (2-factor interactions) จะไม่ปน(confound) กับอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยตัวอื่นๆ โดยสามารถคำนวณขนาดตัวอย่างได้ดังตารางที่ 6.2

เมื่อได้ขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการทดลองคือ 32 runs แล้วจากนั้นต้องลำดับการทดลองแต่ละครั้งให้เป็นแบบสุ่ม (Random) เพื่อไม่ให้ผลการทดลองเกิดการเอนเอียง (Bias) ซึ่งจะได้การออกแบบการทดลองของกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีด้วยเครื่องคาเลนเดอร์ เพื่อปรับปรุงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ได้ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.1 ปัจจัยและระดับของการออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF

ปัจจัย (Factors)		ระดับ (Level)		
		-1	0	1
อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ (°C)	ลูกกลิ้งบนนอก (Temp.1)	168	173	178
	ลูกกลิ้งบน (Temp.2)	163	168	173
	ลูกกลิ้งกลาง (Temp.3)	153	158	163
	ลูกกลิ้งล่าง (Temp.4)	147	152	157
ชนิดของพลาสติกไซต์เซอร์		1	2	3

Design		Factors												
		2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Central Composite full	unblocked	13	20	31	52	90	152							
	blocked	14	20	30	54	90	160							
Central Composite half	unblocked				32	53	88	154						
	blocked				33	54	90	160						
Central composite quarter	unblocked							90	156					
	blocked							90	160					
Central Composite eighth	unblocked													158
	blocked													160
Box-Behnken	unblocked		15	27	46	54	62		130	170				
	blocked			27	46	54	62		130	170				

Available Factorial Designs (with Resolution)															
Run	Factors														
	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	

รูปที่ 6.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่มีอยู่ (Available factorial designs)

ตารางที่ 6.2 ขนาดตัวอย่างและรีโซลูชันของการออกแบบการทดลองสำหรับพีดีแบบจำลองกำลังสอง

แบบการทดลอง	การกำหนดขนาดตัวอย่าง (Sample size)				รีโซลูชัน (Resolution)
	2^k Factorial runs	2k Axial or Star runs	Center runs (n_c)	จำนวนการทดลอง (runs)	
Central Composite Half	$2^{k-1} = 2^{5-1} = 16$	$2k = 2(5) = 10$	$2^5 - 2^{k-1} - 2k = 32 - 16 - 10 = 6$	$16 + 10 + 6 = 32$	5 (V)

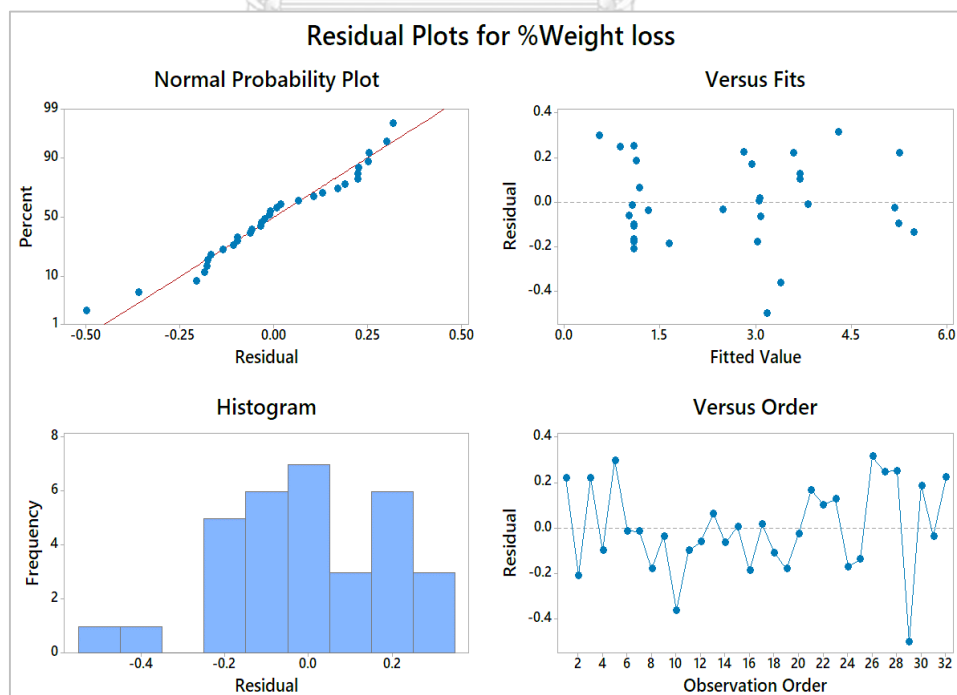
ตารางที่ 6.3 การออกแบบการทดลองของ %Weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Plasticizer type	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4	%Weight loss
27	1	1	1	3	168	173	163	147	5.46
32	2	0	1	2	173	168	158	152	0.88
30	3	1	1	1	168	163	153	157	3.81
15	4	0	1	2	173	168	158	152	0.99
20	5	-1	1	2	178	168	158	152	0.84
31	6	1	1	1	178	163	153	147	3.80
9	7	-1	1	2	173	168	163	152	1.04
17	8	1	1	1	168	173	153	147	2.84
10	9	-1	1	2	173	163	158	152	1.27
24	10	1	1	3	178	173	163	157	3.02
7	11	1	1	3	168	163	163	157	5.13
14	12	-1	1	2	173	168	158	157	0.95
8	13	-1	1	2	173	168	158	147	1.23
18	14	1	1	3	178	173	153	147	3.00
13	15	1	1	1	178	163	163	157	3.05
22	16	-1	1	2	168	168	158	152	1.45
1	17	1	1	3	178	163	153	157	3.07
23	18	0	1	2	173	168	158	152	0.98
26	19	0	1	2	173	168	158	152	0.91
2	20	1	1	3	168	173	153	157	5.14
29	21	1	1	1	178	173	153	157	3.10
12	22	1	1	1	168	163	163	147	3.79
5	23	1	1	3	178	163	163	147	3.81
6	24	0	1	2	173	168	158	152	0.92
3	25	1	1	3	168	163	153	147	5.33
4	26	-1	1	3	173	168	158	152	4.60
19	27	-1	1	2	173	173	158	152	1.12
25	28	0	1	2	173	168	158	152	1.34
11	29	-1	1	1	173	168	158	152	2.67
28	30	-1	1	2	173	168	153	152	1.31
21	31	1	1	1	178	173	163	147	2.44
16	32	1	1	1	168	173	163	157	3.03

6.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

จากการเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ดังตารางที่ 6.3 เพื่อนำไปหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดโดยจะนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม MINITAB ซึ่งให้ผลออกมาเป็นแผนภาพเศษเหลือ (Residual plots) ดังรูปที่ 6.2 และวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ออกมาดังรูปที่ 6.3

จากแผนภาพ Residual plots ของการออกแบบการทดลองดังรูปที่ 6.2 เมื่อพิจารณาแผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) จะเห็นว่าจุด (Point) มีการเบี่ยงเบนจากเส้นเกณฑ์ (Benchmark line) เล็กน้อย และได้กราฟเส้นตรงทำมุม 45° ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distributions) ต่อมาพิจารณาที่แผนภาพค่าประมาณ (Fitted Value) พบว่า Residual มีการกระจายอย่างสุ่มรอบๆ ค่าเฉลี่ยศูนย์และไม่มีรูปแบบ (Pattern) แสดงว่าค่าความแปรปรวน (Variance) ของค่าคาดเคลื่อนมีค่าคงที่ และพิจารณาแผนภาพลำดับของค่าสังเกต (Observation Order) พบว่า Residual เกิดขึ้นอย่างสุ่มรอบๆ ค่าเฉลี่ยศูนย์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่าคาดเคลื่อนเป็นอิสระต่อกัน (Independent)



รูปที่ 6.2 แผนภาพเศษเหลือ (Residual plots) ของการออกแบบการทดลอง

Analysis of Variance

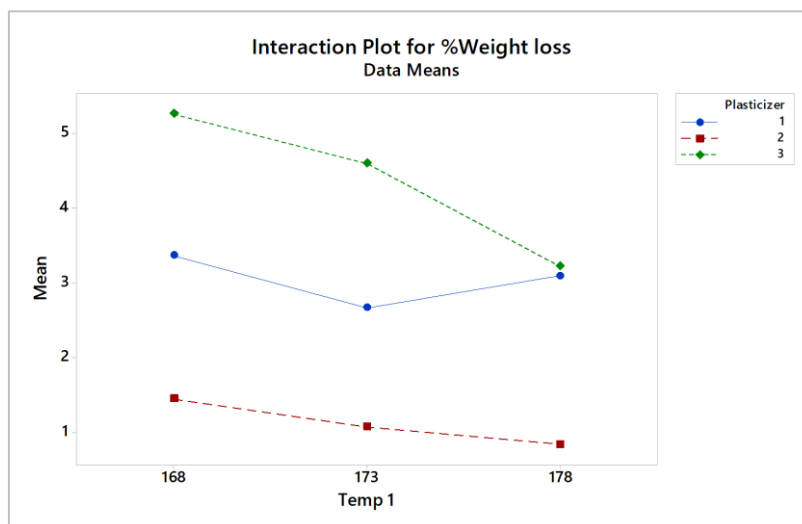
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	70.8768	7.0877	127.37	0.000
Linear	5	11.9594	2.3919	42.98	0.000
Plasticizer	1	5.5889	5.5889	100.43	0.000
Temp 1	1	5.3901	5.3901	96.86	0.000
Temp 2	1	0.8493	0.8493	15.26	0.001
Temp 3	1	0.0220	0.0220	0.40	0.536
Temp 4	1	0.1089	0.1089	1.96	0.176
Square	1	54.8592	54.8592	985.82	0.000
Plasticizer*Plasticizer	1	54.8592	54.8592	985.82	0.000
2-Way Interaction	4	4.0582	1.0146	18.23	0.000
Plasticizer*Temp 1	1	3.1329	3.1329	56.30	0.000
Plasticizer*Temp 2	1	0.3364	0.3364	6.05	0.023
Plasticizer*Temp 3	1	0.2809	0.2809	5.05	0.036
Temp 2*Temp 4	1	0.3080	0.3080	5.54	0.028
Error	21	1.1686	0.0556		
Lack-of-Fit	16	1.0237	0.0640	2.21	0.195
Pure Error	5	0.1449	0.0290		
Total	31	72.0454			

รูปที่ 6.3 ผลการทดลอง ANOVA ของการออกแบบการทดลอง

สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังรูปที่ 6.3 พบว่ามี 3 อิทธิพลหลัก (main effects) ได้แก่ ชนิดของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer), อุณหภูมิเครื่องคาลเลนเดอร์ของลูกกลิ้งบนนอก (Temp.1) และอุณหภูมิเครื่องคาลเลนเดอร์ของลูกกลิ้งบน (Temp.2) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ (Significant) โดยพิจารณาจาก P-value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 สำหรับอิทธิพลร่วมแบบสองทาง (Two-way interaction) พบว่ามีอิทธิพลร่วมอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน โดยจะพิจารณาจาก P-value ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นสามารถอธิบายทิศทางของความสัมพันธ์ได้ด้วยกราฟอิทธิพลร่วมสองทาง และกราฟพื้นผิวผลตอบสนอง (Surface plot) โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมมีดังนี้

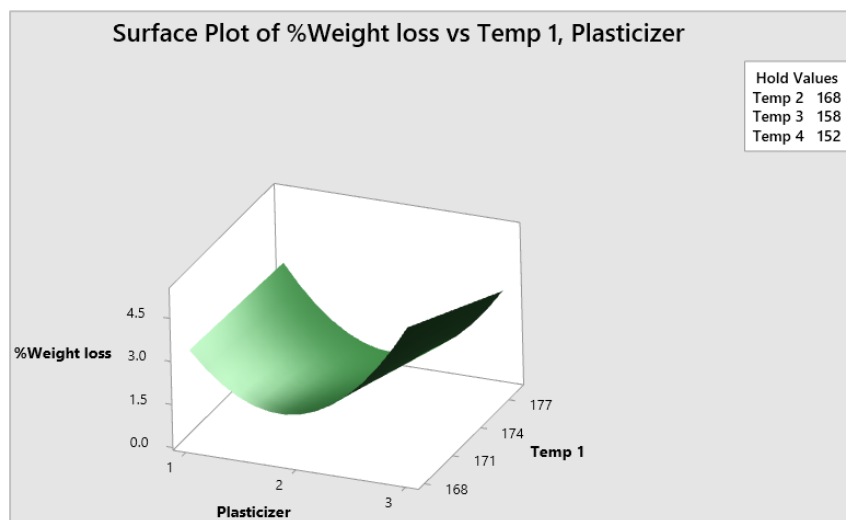
1) อิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.1

สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.1 ดังรูปที่ 6.4 พบว่าเมื่อใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 (กลุ่มโมโนเมอร์พลาสติกไซเซอร์ชนิดพทาเลตหรือเรียกว่า พทาเลตสายโซ่ตรง) จะให้ค่า %Weight-loss น้อยตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 168 °C และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ของลูกกลิ้งบนนอก (Temp.1) ขึ้นไปเรื่อยๆ พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 จะให้ค่า %Weight-loss ลดลงเรื่อยๆ และลดลงต่ำกว่าพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 1 (กลุ่มโมโนเมอร์พลาสติกไซเซอร์ชนิดพทาเลตสายโซ่กึ่งหรือเรียกว่า พทาเลต) และชนิดที่ 3 (กลุ่มโพลีเมอร์พลาสติกไซเซอร์ชนิดไตรเมลลิเทต) ตามลำดับ เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 1 มีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่กึ่งถ้าหากได้รับอุณหภูมิสูงเกินไปโครงสร้างที่เป็นสายโซ่กึ่งจะหลุดออกไปก่อนซึ่งอาจจะทำให้พลาสติกไซเซอร์สลายตัว (Degradation) ได้ มันจึงส่งผลการเจลดั้วรวมกับวัตถุดิบอื่นๆ ได้ไม่ดี แต่จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 173 °C ค่า%Weight-loss ลดลงต่ำกว่า 3% ก่อนที่จะกลับมาเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 3% ที่อุณหภูมิ 178 °C เป็นเพราะว่าธรรมชาติของพลาสติกไซเซอร์ที่ผลิตขึ้นมาโดยไม่มีผู้ผลิตเจ้าไหนสามารถผลิตออกมาเป็นพทาเลตสายโซ่กึ่งได้ 100% หรือชนิดอื่นๆได้ 100% อาจจะมีพทาเลตสายโซ่ตรง หรือสายโซ่กึ่งที่มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่หรือน้อยกว่าปนอยู่แต่ปนในปริมาณที่ไม่มาก โดยการเรียกชื่อว่าเป็นสายโซ่ไหนนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณหรือเปอร์เซ็นต์ของชนิดนั้นมีมากที่สุด โดยที่ปริมาณขึ้นอยู่กับสูตรของผู้ผลิตแต่ละเจ้า เพราะฉะนั้นค่า%Weight-loss ที่ลดลงอาจเป็นผลมาจากมีพทาเลตโครงสร้างอื่นๆที่แข็งแรงและใหญ่กว่าปนอยู่ สำหรับพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 3 เป็นกลุ่มโพลีเมอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ถ้าหากได้รับอุณหภูมิที่ไม่เพียงพอทำให้การเจลดั้วรวมกับวัตถุดิบอื่นๆได้ไม่ดีจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวมันเองแสดงออกมาได้ไม่ดีตาม ดังนั้นพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 จึงเหมาะสมกับสภาวะดังกล่าวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกไซเซอร์ทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากโครงสร้างพทาเลตสายโซ่ตรงจะแข็งแรงกว่าสายโซ่กึ่งและมีขนาดโครงสร้างที่เล็กกว่ากลุ่มโพลีเมอร์พลาสติกไซเซอร์หรืออาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างพทาเลตสายโซ่ตรงมีโครงสร้างอยู่ระหว่างพลาสติกไซเซอร์ทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 6.4 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.1 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss

จากกราฟพื้นผิวผลตอบสนอง (Surface plot) ระหว่าง Plasticizer และ Temp.1 ที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ดังรูปที่ 6.5 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิเครื่องคาลเเนเตอร์ของลูกกลิ้งบนนอก (Temp.1) ที่มีต่อค่า %Weight-loss จะเห็นว่าพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 3 เมื่อเพิ่ม Temp.1 ค่า %Weight-loss จะลดลงเป็นแบบเส้นตรงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ 168 °C และ 177 °C ซึ่งความสัมพันธ์นี้ยังเป็นจริงอยู่หากเปลี่ยนมาใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 และชนิดที่ 1 เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมิ 177 °C จะให้ค่า %Weight-loss น้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 168 °C ของ Temp.1 หากใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 3 จะทำให้ค่า %Weight-loss สูงกว่าพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 และ ชนิดที่ 1 ในลักษณะเป็นเส้นโค้ง และความสัมพันธ์นี้ยังคงเป็นจริงอยู่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจนถึง 177 °C ซึ่งลักษณะที่เป็นเส้นโค้งสามารถพิจารณาได้จากตาราง ANOVA ดังรูปที่...ซึ่งจะเห็นเทอมกำลังสองของพลาสติกไซเซอร์มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจาก P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

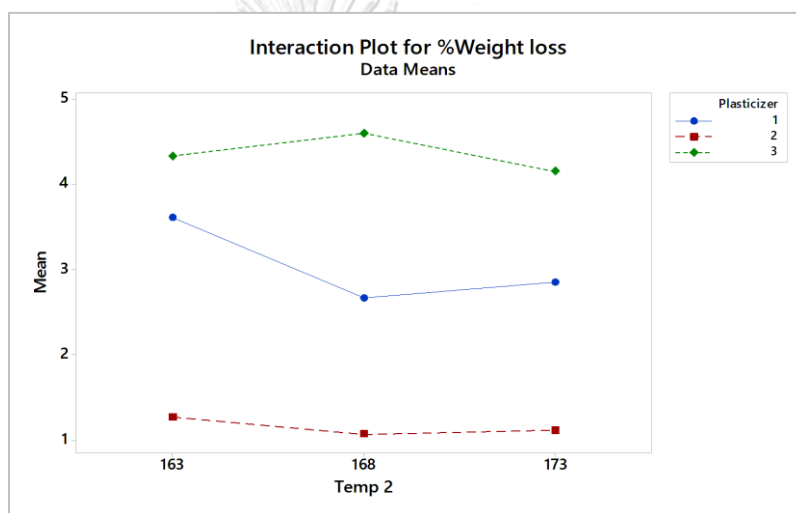


รูปที่ 6.5 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองระหว่าง Plasticizer และ Temp.1 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss

2) อิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.2

สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.2 ดังรูปที่ 6.6 พบว่าเมื่อใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 จะให้ค่า %Weight-loss น้อยตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 163 °C และน้อยกว่าพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 1 และชนิดที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งเหตุผลจะคล้ายกับที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นคือพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 1 มีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่กิ่งถ้าหากได้รับอุณหภูมิสูงเกินไปโครงสร้างที่เป็นสายโซ่กิ่งจะหลุดออกไปก่อนซึ่งอาจจะทำให้พลาสติกไซเซอร์สลายตัว (Degradation) ได้ เพราะฉะนั้นมันจึงส่งผลการเจลดักรวมกับวัตถุดิบอื่นๆ ได้ไม่ดี แต่จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 168 °C ค่า %Weight-loss ลดลงต่ำกว่า 3% ก่อนที่จะกลับมาเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 3% ที่อุณหภูมิ 173 °C เป็นเพราะว่าธรรมชาติของพลาสติกไซเซอร์ที่ผลิตขึ้นมาโดยไม่มีผู้ผลิตเจ้าไหนสามารถผลิตออกมาเป็นพทาเลตสายโซ่กิ่งได้ 100% หรือชนิดอื่นๆ ได้ 100% อาจจะมีพทาเลตสายโซ่ตรง หรือสายโซ่กิ่งที่มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่หรือเล็กกว่าปนอยู่แต่ปนในปริมาณที่ไม่มาก โดยการเรียกชื่อว่าเป็นสายโซ่ไหนนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณหรือเปอร์เซ็นต์ของชนิดนั้นมีมากที่สุด โดยที่ปริมาณขึ้นอยู่กับสูตรของผู้ผลิตแต่ละเจ้า เพราะฉะนั้นค่า %Weight-loss ที่ลดลงอาจเป็นผลมาจากมี พทาเลตโครงสร้างอื่นๆ ที่แข็งแรงและใหญ่กว่าปนอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของ Temp.1 ก่อนหน้านี้จะเห็นว่าอุณหภูมิของ Temp.2 จะน้อยกว่า 5 °C แต่ค่า %Weight-loss ยังคงอยู่ในระดับเดิมหรืออาจเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเท่านั้นอาจเป็นเพราะว่าพีวีซีคอมพาวนด์มีการสะสมความร้อนมาเรื่อยๆ สำหรับพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 3 เป็นกลุ่มโพลีเมอริกซึ่งมีโครงสร้างเป็นโมเลกุลขนาด

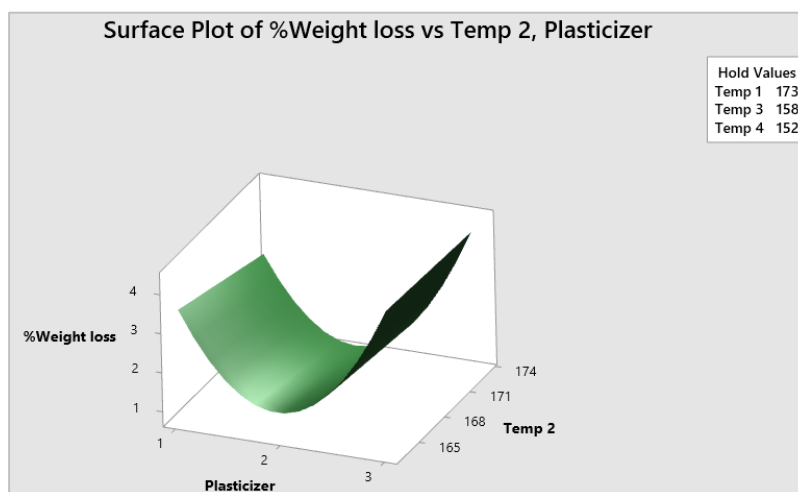
ใหญ่ถ้าหากได้รับอุณหภูมิที่ไม่เพียงพอทำให้การเจลดั้วรวมกับวัตถุบอื่น ๆ ได้ไม่ดีจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวมันเองแสดงออกมาได้ไม่ดีตาม แต่จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 163 °C ค่า%Weight-loss จะมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 168 °C ซึ่งมันสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากอาจมีโครงสร้างอื่นๆ ที่มีขนาดและแข็งแรงน้อยกว่าปนอยู่ ดังนั้นพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 จึงเหมาะสมกับสภาวะดังกล่าวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกไซเซอร์ทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากโครงสร้างพทาเลตสายโซ่ตรงจะแข็งแรงกว่าสายโซ่กิ่งและมีขนาดโครงสร้างที่เล็กกว่ากลุ่มโพลีเมอร์พลาสติกไซเซอร์หรืออาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างพทาเลตสายโซ่ตรงมีโครงสร้างอยู่ระหว่างพลาสติกไซเซอร์ทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 6.6 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.2 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss

จากกราฟพื้นผิวผลตอบสนอง (Surface plot) ระหว่าง Plasticizer และ Temp.2 ที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ดังรูปที่ 6.7 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิเครื่องคาลนเดอร์ของลูกกลิ้งบน (Temp.2) ที่มีต่อค่า %Weight-loss จะเห็นว่าพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 3 เมื่อเพิ่ม Temp.2 ค่า %Weight-loss จะลดลงเป็นแบบเส้นตรงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ 165 °C และ 174 °C ซึ่งความสัมพันธ์นี้ยังเป็นจริงอยู่ถ้าหากเปลี่ยนมาใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 และชนิดที่ 1 เพราะฉะนั้นที่อุณหภูมิ 174 °C จะให้ค่า %Weight-loss น้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 165 °C ของ Temp.2 หากใช้พ

พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 3 จะทำให้ค่า %Weight-loss สูงกว่าพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 และ ชนิดที่ 1 ในลักษณะเป็นเส้นโค้ง และความสัมพันธ์นี้ยังคงเป็นจริงอยู่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปจนถึง 174 °C ซึ่งลักษณะที่เป็นเส้นโค้งสามารถพิจารณาได้จากตาราง ANOVA ดังรูปที่.... โดยจะเห็นเทอมกำลังสองของพลาสติกไซเซอร์มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจาก P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

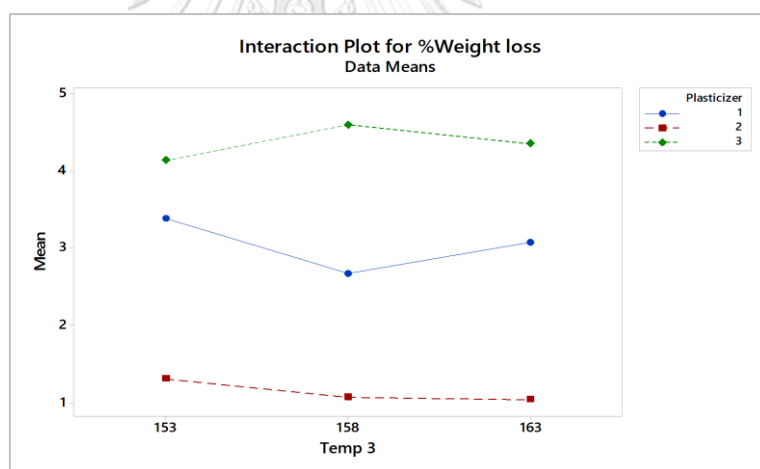


รูปที่ 6.7 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองของระหว่าง Plasticizer และ Temp.2 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss

3) อิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.3

สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.3 ดังรูปที่ 6.8 พบว่าเมื่อใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 จะให้ค่า %Weight-loss น้อยตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 153 °C และน้อยกว่าพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 1 และชนิดที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งเหตุผลจะคล้ายกับที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้คือพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 1 มีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่กิ่งถ้าหากได้รับอุณหภูมิสูงเกินไปโครงสร้างที่เป็นสายโซ่กิ่งจะหลุดออกไปก่อนซึ่งอาจจะทำให้พลาสติกไซเซอร์สลายตัว (Degradation) ได้ มันจึงส่งผลการเจลดั้วรวมกับวัตถุดิบอื่นๆ ได้ไม่ดี แต่จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 158 °C ค่า%Weight-loss ลดลงต่ำกว่า 3% ก่อนที่จะกลับมาเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 3% ที่อุณหภูมิ 163 °C เป็นเพราะว่าธรรมชาติของพลาสติกไซเซอร์ที่ผลิตขึ้นมาโดยไม่มีผู้ผลิตเจ้าไหนสามารถผลิตออกมาเป็นพทาเลตสายโซ่กิ่งได้ 100% หรือชนิดอื่นๆได้ 100% อาจจะมีพทาเลตสายโซ่ตรง หรือสายโซ่กิ่งที่มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่หรือเล็กกว่าปนอยู่แต่ปนในปริมาณที่ไม่มาก โดยการเรียกชื่อว่าเป็นสายโซ่ไหนนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณหรือเปอร์เซ็นต์ของชนิดนั้นมีมากที่สุด โดยที่ปริมาณจะขึ้นอยู่กับสูตรของผู้ผลิตแต่ละเจ้า เพราะฉะนั้นค่า%Weight-loss

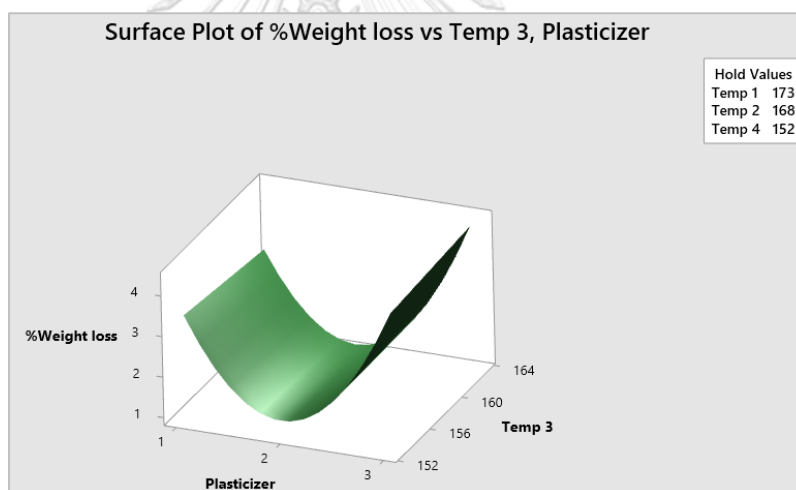
ที่ลดลงอาจเป็นผลมาจากมีพลาทเลตโครงสร้างอื่นๆ ที่แข็งแรงและใหญ่กว่าปนอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของ Temp.1 ก่อนหน้านี้จะเห็นว่าอุณหภูมิของ Temp.2 จะน้อยกว่า 5 °C แต่ค่า %Weight-loss ยังคงอยู่ในระดับเดิมหรืออาจเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเท่านั้น อาจเป็นเพราะว่าพีวีซีคอมพาวนด์มีการสะสมความร้อนมาเรื่อยๆ สำหรับพลาสติกไซเซออร์ชนิดที่ 3 เป็นกลุ่มโพลีเมอริกซึ่งมีโครงสร้างเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ถ้าหากได้รับอุณหภูมิที่ไม่เพียงพอทำให้การเจลดัวรวมกับวัตถุอื่น ๆ ได้ไม่ดีจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวมันเองแสดงออกมาได้ไม่ดีตาม แต่จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 153 °C ค่า %Weight-loss จะมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 158 °C ซึ่งมันสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากอาจมีโครงสร้างอื่นๆ ที่มีขนาดและแข็งแรงน้อยกว่าปนอยู่ ดังนั้นพลาสติกไซเซออร์ชนิดที่ 2 จึงเหมาะสมกับสภาวะดังกล่าวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกไซเซออร์ทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากโครงสร้างพทาเลตสายโซ่ตรงจะแข็งแรงกว่าสายโซ่กิ่งและมีขนาดโครงสร้างที่เล็กกว่ากลุ่มโพลีเมอริกพลาสติกไซเซออร์หรืออาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างพทาเลตสายโซ่ตรงมีโครงสร้างอยู่ระหว่างพลาสติกไซเซออร์ทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 6.8 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่าง Plasticizer และ Temp.3 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss

จากกราฟพื้นผิวผลตอบสนอง (Surface plot) ระหว่าง Plasticizer และ Temp.3 ที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ดังรูปที่ 6.9 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิเครื่องคานเตอร์ของลูกกลิ้งกลาง (Temp.3) ที่มีต่อค่า %Weight-loss จะเห็นว่าพลาสติกไซเซออร์ชนิดที่ 3 เมื่อเพิ่ม Temp.3 ค่า %Weight-loss จะเพิ่มขึ้นเป็นแบบเส้นตรงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ 152 °C และ 164 °C ซึ่งความสัมพันธ์แบบเส้นตรงนี้ยังเป็นจริงอยู่หากเปลี่ยนมาใช้พลาสติกไซเซออร์ชนิดที่ 2 และชนิดที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่ม Temp.3 ค่า

%Weight-loss จะลดลงเป็นแบบเส้นตรงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ 152 °C และ 164 °C เพราะฉะนั้นหากใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 3 ที่อุณหภูมิ 152 °C จะให้ค่า %Weight-loss น้อยที่สุดและหากใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 และชนิดที่ 1 ที่อุณหภูมิ 164 °C จะให้ค่า %Weight-loss น้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาผลของชนิดพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 152 °C ของ Temp.3 หากใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 3 จะทำให้ค่า %Weight-loss สูงกว่าพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2 และ ชนิดที่ 1 ในลักษณะเป็นเส้นโค้ง และความสัมพันธ์นี้ยังคงเป็นจริงอยู่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นไปจนถึง 164 °C ซึ่งลักษณะที่เป็นเส้นโค้งสามารถพิจารณาได้จากตาราง ANOVA ดังรูปที่... โดยจะเห็นทอมกำลังสองของพลาสติกไซเซอร์มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจาก P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05



รูปที่ 6.9 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองระหว่าง Plasticizer และ Temp.3 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss

4) อิทธิพลร่วมระหว่าง Temp.2 และ Temp.4

สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่าง Temp.2 และ Temp.4 ดังรูปที่ 6.10 ถ้าหากอุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ของลูกกลิ้งบน (Temp.2) ที่ 168 °C และอุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งล่าง (Temp.4) ที่ 147 °C พบว่าค่า %Weight-loss มีค่าน้อยตั้งแต่แรกเมื่อเทียบกับ Temp.2 ที่ 173 °C และ 163 °C ตามลำดับ ถ้าหากเพิ่ม Temp.4 ไปที่ 152 °C จะเห็นว่าค่า %Weight-loss กลับเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนัก Temp.2 ที่ 173 °C และ 163 °C ค่า %Weight-loss ที่ได้กลับมีค่าลดลงอย่างมาก และเมื่อเพิ่ม Temp. 4 ขึ้นไปอีกจนถึง 157 °C กลับทำให้

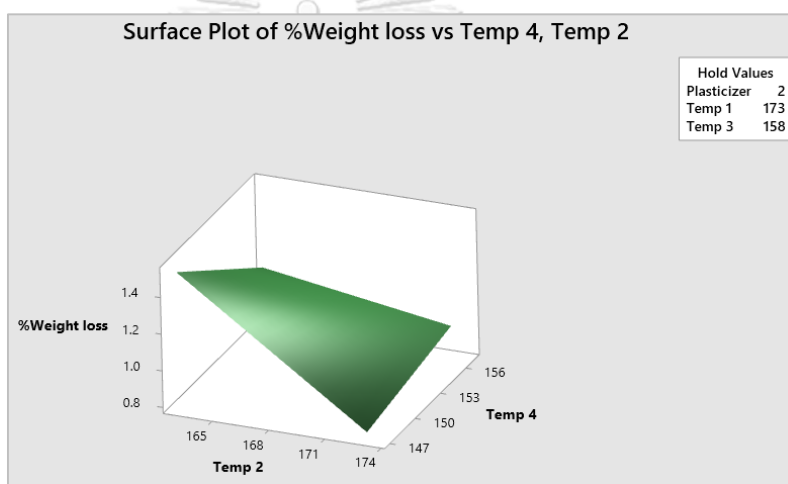
ค่า %Weight-loss ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ Temp.2 ที่ 173 °C และ 163 °C กลับให้ค่า %Weight-loss ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า %Weight-loss ที่ได้มันมีค่าสวนทางกัน จากการกลับไปวิเคราะห์กระบวนการผลิตดังรูปที่ 5.10 จะเห็นว่ากระบวนการผลิตในช่วงแรกจะเป็นการจะเป็นการให้ความร้อนมาตลอดส่วนช่วงหลังจะเป็นการลดอุณหภูมิลงไปเรื่อยๆ ซึ่งกระบวนการผลิตได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 1 หัวข้อที่ 1.1.2 เพราะฉะนั้นการที่ค่า %Weight-loss ที่ได้มันมีค่าสวนทางกันอาจเป็นเพราะกระบวนการช่วงหลังมีการลดอุณหภูมิลงไปเรื่อยๆ เนื่องจากจะเข้าสู่ขั้นตอนการเก็บเข้าม้วน และจะเห็นว่าที่ Temp.4 จะอยู่ใกล้ตำแหน่งของขั้นตอนการหล่อเย็นจึงทำให้มีผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ บริษัทกรณศึกษาได้ติดตั้งมิเตอร์อุณหภูมิเพื่อใช้สำหรับตั้งค่าอุณหภูมิและดูพร้อมกับจับบันทึกข้อมูลการผลิตก็จะพบว่าอุณหภูมิของ Temp.4 มีความแปรปรวนมากกว่าอุณหภูมิอื่นๆ



รูปที่ 6.10 กราฟอิทธิพลร่วมระหว่าง Temp.2 และ Temp.4 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss

จากกราฟพื้นผิวผลตอบสนอง (Surface plot) ระหว่าง Temp.2 และ Temp.4 ที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ดังรูปที่ 6.11 เมื่อพิจารณาผลของ Temp.4 ที่มีต่อค่า %Weight-loss จะเห็นว่า Temp.2 ที่ 174 °C เมื่อเพิ่ม Temp.4 ไปจนถึง 156 °C จะทำให้ค่า %Weight-loss เพิ่มขึ้นเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งความสัมพันธ์แบบเส้นตรงยังเป็นจริงอยู่ หากลด Temp.2 ลงไปจนถึง 165 °C พบว่าค่า %Weight-loss จะลดลง เพราะฉะนั้นถ้าเพิ่ม Temp.2 และลด Temp.4 จะทำให้ค่า %Weight-loss ลดลง เนื่องจากการให้อุณหภูมิสูงตั้งแต่แรกมันจะทำให้พีวีซีคอมพาวนด์สะสมความร้อนไปเรื่อยๆ จึงทำให้ Temp.4 ควรใช้อุณหภูมิที่น้อยลงเพื่อ

ไม่ให้พลาสติกไฮเซอรัสลายตัวและลดระยะทางของกระบวนการหล่อเย็น (Cooling) ให้สั้นลงได้ เมื่อพิจารณาผลของ Temp.2 ที่มีต่อค่า %Weight-loss จะเห็นว่า Temp.4 ที่ 147 °C เมื่อลด Temp.2 ไปจนถึง 165 °C จะทำให้ค่า %Weight-loss เพิ่มขึ้นเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งความสัมพันธ์แบบเส้นตรงยังเป็นจริงอยู่ หากเพิ่ม Temp.4 ไปจนถึง 156 °C พบว่าค่า %Weight-loss จะลดลง เพราะฉะนั้นหากลด Temp.2 แล้วเพิ่ม Temp.4 ก็จะส่งผลให้ %Weight-loss ลดลงเนื่องจากการใช้ Temp.2 ที่น้อยมันก็จะทำให้พีวีซีคอมพาวนด์สะสมความร้อนเช่นกันแต่อาจไม่มากพอที่จะให้การเจลดัวรวมกับวัตถุดิบอื่นๆ ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงต้องไปเพิ่ม Temp.4 แทนเพื่อให้การเจลดัวได้ดียิ่งขึ้น แต่การทำลักษณะเช่นนี้จะทำให้ระยะทางของกระบวนการหล่อเย็น (Cooling) ยาวขึ้น ซึ่งจะทำให้เวลาในการผลิตนานขึ้นและใช้พื้นที่ในการผลิตเยอะขึ้นด้วย



รูปที่ 6.11 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองระหว่าง Temp.2 และ Temp.4 ที่มีผลต่อค่า %Weight-loss

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (The Coefficient of determination) เรียกโดยย่อว่า R-sq จะบ่งบอกถึงความสามารถในการคาดคะเน (Predict) และการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีว่ามีแนวโน้มแม่นยำมากน้อยเพียงใด จากรูปที่ 6.12 พบว่า R-sq มีค่าเท่ากับ 98.38% และจาก Residual plots จะเห็นว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distributions) นั่นแสดงว่าค่าที่คาดคะเนมีความน่าเชื่อถือที่เพียงพอ ดังนั้นรูปแบบค่าคาดคะเนเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีก็สามารถใช้อุณหภูมิเครื่องคาลเลนเดอร์และชนิดของพลาสติกไฮเซอรัอธิบายได้อย่างแม่นยำ ซึ่งการประมาณความสัมพันธ์ (Estimation Relationship) และการคาดคะเนค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญ

หาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีได้จากสมการถดถอย (Regression Equation) ได้ดังสมการในรูปที่ 6.12

Regression Equation

$$\begin{aligned} \%Weight-loss = & 169.5 - 3.75Plasticizer + 0.0676Temp1 - 0.945Temp2 - 0.0600Temp3 \\ & - 0.948Temp4 + 2.6394Plasticizer*Plasticizer - 0.0885Plasticizer*Temp1 \\ & + 0.0290Plasticizer*Temp2 + 0.0265Plasticizer*Temp3 \\ & + 0.00555Temp2*Temp4 \end{aligned}$$

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.235899	98.38%	97.61%	95.46%

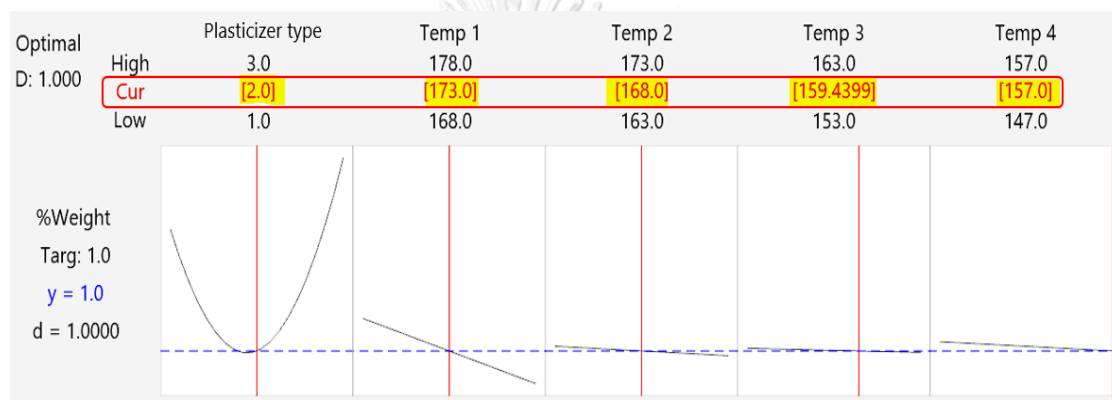
รูปที่ 6.12 สมการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดของค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย

6.3 การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (The optimal parameter setting)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตาราง ANOVA ในรูปที่ 6.3 พบว่ามี 3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ได้แก่ ชนิดพลาสติกไซเซออร์, อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งบนนอก (Temp.1) และอุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งบน (Temp.2) ดังนั้นการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีด้วยเครื่องคาเลนเดอร์เพื่อให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายผ่านตามเกณฑ์ที่ค้ายรถยนต์กำหนดคือไม่เกิน 5% จำเป็นต้องนำอีก 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งกลาง (Temp.3) และอุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งล่าง (Temp.4) เข้ามาร่วมในการทดลองด้วย เนื่องจาก Temp.3 และ Temp.4 พบว่ามีอิทธิพลร่วมแบบสองทางร่วมกับชนิดพลาสติกไซเซออร์ที่ระดับนัยสำคัญ (Significant level) 0.05

จากผลการทดลองที่ถูกระบุทางสถิติด้วยโปรแกรม MINITAB ทางผู้วิจัยได้กำหนดเป้าหมาย (Target) ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ไว้ที่ 1% ซึ่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ค่า %Weight-loss ได้ค่าตรงตามเป้าหมาย แสดงดังรูปที่ 6.13 ซึ่งจะเห็นว่าที่อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งกลาง (Temp.3) มีค่าที่เหมาะสมเท่ากับ 159.4399 °C แต่กระบวนการผลิตจริงไม่

สามารถตั้งอุณหภูมิที่ระดับจุดเทคนิคดังกล่าวได้ เพราะฉะนั้นจึงต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้
 ง่ายต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิต สำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์นั้นต้องพิจารณาที่ค่าคาดหวัง
 (Desirability, D) หากปรับค่าพารามิเตอร์แล้วได้ค่าคาดหวังเข้าใกล้ 1 แสดงว่าค่า %Weight-loss ก็
 จะเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ถูกตั้งไว้ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้วิจัยต้องการและค่าที่ได้จากการปรับแสดงดังตารางที่
 6.4 โดยผู้วิจัยจะเลือกใช้พารามิเตอร์ที่ปรับค่า-1 คือ ใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดที่ 2, อุณหภูมิเครื่องค
 เสนเดอร์ลูกกลิ้งบนนอก (Temp.1) ที่ 173 °C, อุณหภูมิเครื่องคเอนเดอร์ลูกกลิ้งบน (Temp.2) ที่
 168 °C, อุณหภูมิเครื่องคเอนเดอร์ลูกกลิ้งกลาง (Temp.3) ที่ 159 °C และอุณหภูมิเครื่องคเอน
 เดอร์ลูกกลิ้งล่าง (Temp.4) ที่ 157 °C เนื่องจากให้ค่าคาดหวังเข้าใกล้ 1 มากที่สุด



รูปที่ 6.13 การตั้งค่าที่เหมาะสมสำหรับ %weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีที่น้อยที่สุด

ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับพารามิเตอร์ปรับค่า

หัวข้อ	Plasticizer type	อุณหภูมิเครื่องคเอนเดอร์				%Weight-loss	ค่าคาดหวัง (D)
		Temp.1	Temp.2	Temp.3	Temp.4		
พารามิเตอร์ที่เหมาะสม	2	173	168	159.4399	157	1	1
พารามิเตอร์ที่ปรับค่า-1	2	173	168	159	157	1.0031	0.99923
พารามิเตอร์ที่ปรับค่า-2	2	173	168	160	157	0.9961	0.99608

บทที่ 7

ขั้นตอนการควบคุม (Control Phase)

สำหรับขั้นตอนการควบคุมจะถูกดำเนินการตามเงื่อนไขของพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้จากขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา โดยทำการปรับค่ามาตรฐานการเดินเครื่องคาเลนเดอร์สำหรับผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. เพื่อให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ผ่านตามเกณฑ์ที่ค้ายรถยนต์กำหนดคือไม่เกิน 5% และอบรมผู้ปฏิบัติงานจนแน่ใจแล้วว่าสามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดีและทำการติดตามผลเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบการทดลองต่อไป

7.1 ประสิทธิภาพหลังการปรับปรุง

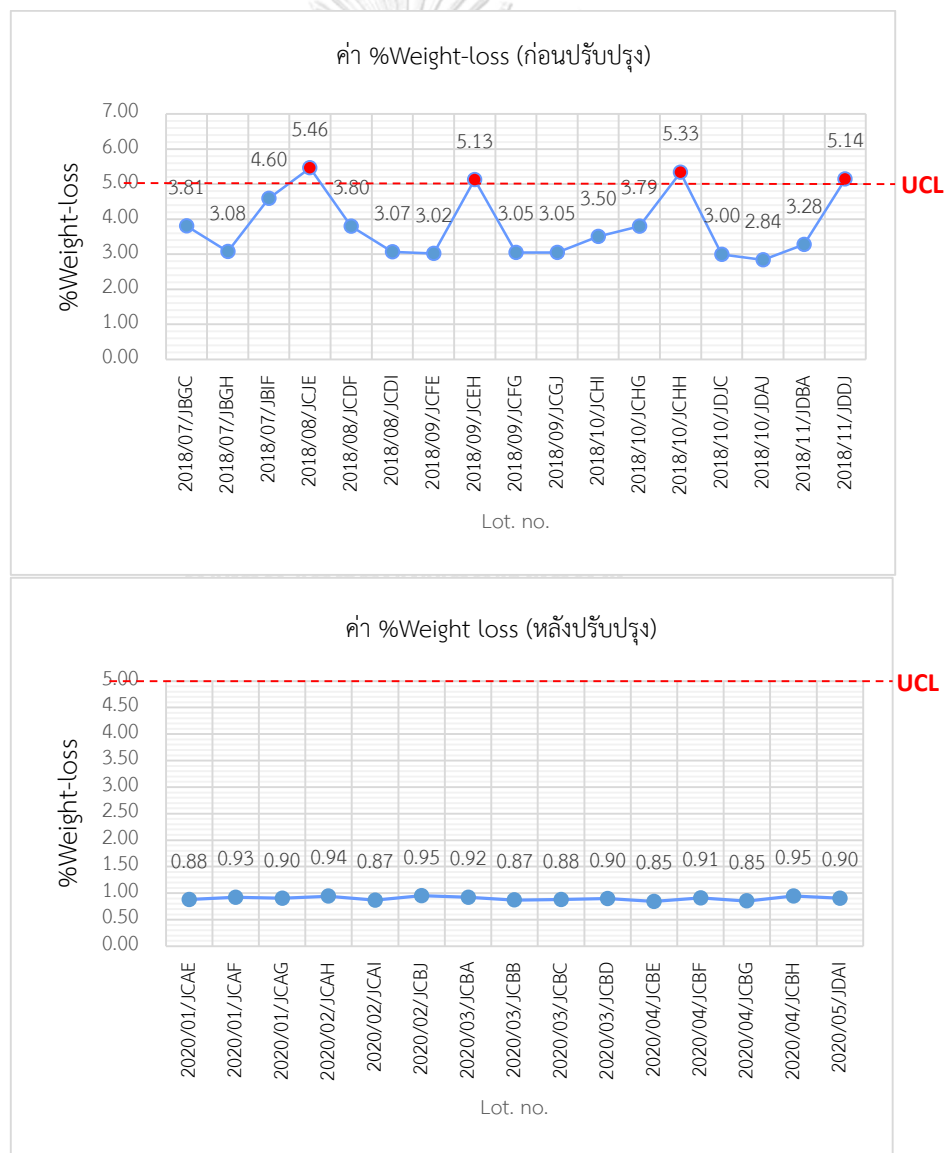
จากการติดตามผลเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีที่ประเภท PVC Sponge Leather ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ที่ผลิตถูกด้วยเครื่องคาเลนเดอร์ระหว่างก่อนและหลังปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ ดังรูปที่ 7.1 เมื่อพิจารณาที่ค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการในระยะยาว (Long Term Process Capability, Ppk) จะเห็นว่าค่า Ppk เพิ่มขึ้นจาก 0.41 เป็น 6.52 ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือ 1.33 จึงส่งผลให้ความผันแปรของกระบวนการลดลงจาก 99.6% เหลือเพียง 4.6% เท่านั้น เมื่อความผันแปรของกระบวนการลดลงจะแสดงถึงค่าเฉลี่ยจะเบี่ยงเบนเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากขึ้นและเมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีที่ประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยลดลงจาก 3.823% เหลือเพียง 0.901% เท่านั้น



รูปที่ 7.1 เปรียบเทียบความสามารถของกระบวนการ (Ppk) ก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ

7.2 การติดตามผลการทดลอง

จากการติดตามผลการทดลองของผลิตภัณฑ์หลังการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม.ผลิตด้วยเครื่องคาเลนเดอ์นั้นมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบค่า %Weight-loss ระหว่างก่อนและหลังปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีจะเห็นว่าก่อนปรับปรุงค่าพารามิเตอร์จะมีผลิตภัณฑ์บางล็อตที่ค่า %Weight-loss เกินข้อกำหนดของค่ายรถยนต์และหลังปรับปรุงค่าพารามิเตอร์พบว่าผลิตภัณฑ์ผ่านข้อกำหนดของค่ายรถยนต์คือไม่เกิน 5% ทุกล็อต (Lot.) ของการผลิต ดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 เปรียบเทียบการติดตามผลการทดลองก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

สืบเนื่องจากบริษัทกรณีศึกษาได้รับการร้องเรียนจากทางค่ายรถยนต์เกี่ยวกับเบาะรถยนต์แตก (Seat crack) หลังจากการใช้งานในระยะไม่เกิน 100,000 กิโลเมตร โดยทางค่ายรถยนต์ทำการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น ถ้าหากไม่สามารถหาสาเหตุและแก้ไขปัญหาได้จะหยุดการสั่งซื้อสินค้ารุ่น A ทันที โดยระหว่างการวิเคราะห์หาสาเหตุและแก้ไขปัญหาค่ายรถยนต์ได้ชะลอการสั่งซื้อสินค้ารุ่น A และดำเนินการและสั่งซื้อสินค้ารุ่น A จากผู้ผลิตสำรอง (Second source) แทน โดยสินค้ารุ่น A คือผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่มีความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ถูกผลิตด้วยเครื่องคาเลนเดอร์ (Calendering machine) หลังจากดำเนินการตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังพบว่าสินค้ารุ่น A มีบางค่าในหัวข้อเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ไม่ผ่านตามข้อกำหนด (Specification) ของค่ายรถยนต์ ดังนั้นบริษัทกรณีศึกษาจึงได้ประยุกต์ใช้เทคนิคซิกมา ซิกมา เข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีที่ไม่ผ่านข้อกำหนดของค่ายรถยนต์ โดยเริ่มจากขั้นตอนการระบุปัญหา (Define Phase), ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา (Measure Phase), ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase), ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve Phase) และขั้นตอนการควบคุม (Control Phase) โดยขั้นตอนที่ได้กล่าวข้างต้นเรียกโดยย่อว่า DMAIC ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้จะช่วยปรับปรุงค่า %weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซี, ช่วยเพิ่มความสามารถของกระบวนการ และลดความผันแปรของกระบวนการได้ โดยสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังนี้

8.1 ขั้นตอนการระบุปัญหา (Define Phase)

ขั้นตอนการระบุปัญหาเป็นขั้นตอนแรกของเทคนิคซิกมา ซิกมา ซึ่งเป็นขั้นตอนที่อธิบายถึงปัญหา, ผลกระทบต่อความสำคัญทางธุรกิจ (Business case) และประโยชน์หลังจากการปรับปรุงเพื่อระบุขอบเขตของโครงการ (Project scope) ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ โดยทำการศึกษาตั้งแต่แผนผังการไหลของกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซี (Process flow chart) ด้วยเครื่องคาเลนเดอร์ และทำการเก็บรวบรวมข้อมูลย้อนหลัง จากนั้นทำการสรุปออกมาเป็นสัญญาโครงการ (Project charter) จากข้อมูลย้อนหลังของค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่มีความหนา 1.00 ± 0.02 มม. (สินค้ารุ่น A) ที่ถูกผลิตด้วย

เครื่องคาเลนเดอร์ในช่วงเดือนกันยายน 2018 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2018 พบว่าผลการทดสอบค่า %Weight-loss มีค่าสูงเกินข้อกำหนดของค่าयरถยนต์ที่ 5% ทำให้ค่าयरถยนต์ชะลอการสั่งซื้อสินค้ารุ่น A และทำการสั่งซื้อสินค้ารุ่น A จากผู้ผลิตสำรองแทน เพราะฉะนั้นทางบริษัทกรณีศึกษาต้องดำเนินการแก้ไขปัญหาและปรับปรุงค่า %weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีอย่างเร่งด่วน

8.2 ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหา (Measure Phase)

ขั้นตอนการวัดสภาพปัญหาเป็นตอนที่ใช้สำหรับวัดประสิทธิภาพของกระบวนการในปัจจุบัน โดยจะดำเนินการตามแผนการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักคือ การกำหนดวิธีการวัด (Measurement method) และการวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement system analysis) ดังนี้

8.2.1 วิธีการวัด (Measurement method)

หลังจากที่ระบุปัญหาแล้วค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่มีความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ถูกผลิตด้วยเครื่องคาเลนเดอร์จะต้องได้รับการปรับปรุงในงานวิจัยนี้ ซึ่งค่า %weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีสามารถหาได้จากการชั่งน้ำหนักและคำนวณตามเอกสารวิธีการทดสอบของค่าयरถยนต์ให้มา

8.2.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis, MSA)

จากการวิเคราะห์ระบบการวัด จะเห็นว่าระบบการวัดมีความแม่นยำ (Accuracy) และมีความน่าเชื่อถือพอสมควร ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วจากการวิเคราะห์ผ่านเครื่องมือที่เรียกว่า GR&R (Gauge Repeatability and Reproducibility) โดยพบว่า 100% ของความแปรปรวนทั้งหมดจะประกอบความแปรปรวนของกระบวนการผลิต (Part-To-Part) อยู่ที่ 99.4% และความแปรปรวนของระบบการวัด (Total Gage R&R) อยู่ที่ 0.06% จึงสรุปได้ว่าสามารถยอมรับระบบการวัดแบบเดิมได้ แต่สิ่งที่ต้องปรับปรุงคือความแปรปรวนของกระบวนการผลิต

8.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase)

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหามีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่เป็นต้นเหตุของปัญหาที่แท้จริง (Root cause) ที่ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่มีความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ผลิตด้วยเครื่องคาเลนเดอร์เกินข้อกำหนดของค่าयरถยนต์ที่ 5% โดยทางผู้วิจัยได้เริ่มจากการวิเคราะห์หา

ปัจจัยที่อาจเป็นไปได้ โดยทำการระดมความคิดร่วมกับผู้ที่มีประสบการณ์และเชี่ยวชาญด้านการผลิต หนึ่งเหลี่ยมพีวีซีด้วยเครื่องคาเลนเดอร์ โดยใช้แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect diagram) เป็นเครื่องมือในการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหานี้ทั้งหมดให้ออกมาในรูปแบบของกราฟแล้วทำการเมินสาเหตุออกมาเป็นคะแนนและเรียงลำดับสาเหตุเพื่อดูว่าสาเหตุใดมีผลกระทบต่อปัญหา จากมากไปน้อยโดยใช้กฎ 80/20 ของพาเรโต (Pareto) ในการเลือกสาเหตุมาเป็นปัจจัยนำเข้ามา จากนั้นนำปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อ %Weight-loss มาทำการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) เพื่อหาว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อค่า %weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนึ่งเหลี่ยมมากที่สุด โดยทำการประเมินออกมาเป็นคะแนนที่เรียกว่า ค่าตัวเลขลำดับความเสี่ยง (Risk Priority Number, RPN) ซึ่งจะมีเงื่อนไขอยู่ว่าถ้า RPN มีค่าตั้งแต่ 100 คะแนนขึ้นไปต้องได้รับการแก้ไขและปรับปรุง จากการวิเคราะห์ด้วย FMEA พบว่ามีทั้งหมด 5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดได้แก่ อุณหภูมิของเครื่องคาเลนเดอร์ (ลูกกลิ้งบนนอก, ลูกกลิ้งนอก, ลูกกลิ้งกลาง และลูกกลิ้งล่าง) และชนิดของพลาสติกไซเซออร์

8.4 ขั้นตอนการปรับปรุง (Improve Phase)

จากปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (FMEA) จะถูกนำมาดำเนินการออกแบบการทดลองในขั้นตอนนี้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตหนึ่งเหลี่ยมพีวีซีด้วยเครื่องคาเลนเดอร์ โดยเริ่มจากการเลือกการออกแบบการทดลองซึ่งผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้การออกแบบพื้นผิวผลตอบสนองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF (The Face-centered Central Composite design, CCF) เข้ามาช่วยในการออกแบบ เนื่องจากการออกแบบประเภทนี้สามารถใช้ทดสอบที่ 3 ระดับได้ โดยการออกแบบการทดลองขนาดตัวอย่าง (Sample size) ที่เหมาะสมสำหรับการทำการทดลอง ซึ่ง CCF จะถูกพิจารณาด้วยตัวแบบกำลังสอง (Second order model) ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) แต่สำหรับงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของงบประมาณและเวลาที่ใช้สำหรับทำการทดลองจึงทำการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^{k-1} (One-Half Factorial of the 2^k Design) ซึ่งจะไม่ทำการทดลอง จะทำการทดลองเพียงครั้งเดียวเท่านั้น เพราะฉะนั้นหากมี 5 ปัจจัยก็จะได้ว่า 2^{5-1} เท่ากับการทดลองทั้งหมด 16 runs และมีรีโซลูชัน (Resolution) เท่ากับ 5(V) ซึ่งละเอียดเพียงพอที่จะยอมรับได้ ต่อมาพิจารณาส่วนของจุดในแนวแกนหรือแนวรูปดาว (2^k Axial or star run) จะได้ว่า $2^k = 2^5 = 10$ runs และกำหนดจำนวนจุดศูนย์กลางของแผนแบบ (Center run) จะได้ว่า $2^5 - 2^{k-1} - 2^k$ Axial = $32 - 16 - 10 = 6$ runs ดังนั้นขนาดตัวอย่างสำหรับการออกแบบ

การทดลองจะมีทั้งหมด $16+10+6 = 32$ runs จากนั้นทำการลำดับการทดลองแต่ละครั้งให้เป็นแบบสุ่ม (Random) เพื่อไม่ให้ผลการทดลองเกิดการเอนเอียง (Bias)

จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม MINITAB เมื่อพิจารณาแผนภาพเศษเหลือ (Residual plots) ซึ่งจะประกอบด้วยแผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) พบว่า Residuals มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distributions) ส่วนแผนภาพค่าประมาณ (Fitted Value) พบว่าค่าความแปรปรวน (Variance) ของ Residuals มีค่าคงที่ และแผนภาพลำดับของค่าสังเกต (Observation Order) พบว่า Residuals เป็นอิสระต่อกัน (Independent) เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) พบว่ามี 3 ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า %weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีที่ผลิตด้วยเครื่องคาเลนเดอร์ได้แก่ ชนิดพลาสติกไซเซออร์, อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งบนนอก (Temp.1) และอุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งบน (Temp.2) แต่เพื่อให้การค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่มีความหนา 1.00 ± 0.02 มม. ด้วยเครื่องคาเลนเดอร์และให้ค่า %weight-loss ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีผ่านข้อกำหนดของค่ารถยนต์คือไม่เกิน 5% จำเป็นต้องนำอีก 2 ปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งกลาง (Temp.3) และอุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งล่าง (Temp.4) เข้ามาร่วมในการออกแบบการทดลองด้วย เนื่องจากทั้ง 2 ปัจจัยพบว่ามีอิทธิพลร่วมแบบสองทางร่วมกับชนิดพลาสติกไซเซออร์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากผลการทดลองที่ถูกวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม MINITAB ทางผู้วิจัยได้นำมาปรับค่าเพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการผลิตซึ่งจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตหนังเทียมพีวีซีด้วยเครื่องคาเลนเดอร์คือ ใช้พลาสติกไซเซออร์ชนิดที่ 2, อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งบนนอก (Temp.1) ที่ 173°C , อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งบน (Temp.2) ที่ 168°C , อุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งกลาง (Temp.3) ที่ 159°C และอุณหภูมิเครื่องคาเลนเดอร์ลูกกลิ้งล่าง (Temp.4) ที่ 157°C

8.5 ขั้นตอนการควบคุม (Control Phase)

สำหรับขั้นตอนการควบคุมจะถูกดำเนินการตามเงื่อนไขพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้จากขั้นตอนการปรับปรุง โดยเริ่มจากการปรับค่ามาตรฐานการเดินเครื่องคาเลนเดอร์สำหรับผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่ความหนา 1.00 ± 0.02 มม. และจัดฝึกอบรมผู้ปฏิบัติงานเพื่อให้สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี จากการติดตามผลเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของ

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบการทดลองพบว่าค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการในระยะยาว (Long Term Process Capability, Ppk) เพิ่มขึ้นจากเป็น 6.52 ซึ่งมีความมากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือ 1.33 จึงส่งผลให้ความผันแปรของกระบวนการลดลงเหลือเพียง 4.6% เมื่อความผันแปรของกระบวนการลดลงแสดงว่าค่าเฉลี่ยจะเบี่ยงเบนเข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากขึ้นจึงทำให้ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ลดลงเหลือเพียง 0.901% จากการติดตามผลการทดลองของผลิตภัณฑ์หลังการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหาย (%Weight-loss) ของผลิตภัณฑ์หนังเทียมพีวีซีประเภท PVC Sponge Leather ที่มีความหนา 1.00 ± 0.02 มม.ผลิตด้วยเครื่องคาเลนเดอร์ผ่านข้อกำหนดของค่าयरदनंतคือไม่เกิน 5% ทุกล็อต (Lot.)

4.6 ข้อเสนอแนะ

- 1) วิธีที่ได้จากการศึกษาและการทำงานวิจัยในครั้งนี้ สามารถนำไปเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาหรือปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปหนังเทียมพีวีซีแบบการหล่อได้ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการหล่อ (Casting process)
- 2) สามารถนำเทคนิคซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้กับการทดลองผสมพลาสติกไซเซอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดเข้าไปในสูตรเพื่อหาแนวทางการลดต้นทุนด้านวัตถุดิบต่อไป
- 3) การปรับปรุงกระบวนการโดยใช้เทคนิคซิกซ์ ซิกมา จะมีลักษณะการดำเนินงานเป็นขั้นตอน ทำให้การปรับปรุงดำเนินไปอย่างเป็นระบบ ซึ่งจะช่วยให้หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาได้เพื่อนำไปสู่การหาแนวทางการแก้ไขปัญหา ตลอดจนปรับปรุงกระบวนการได้อย่างยั่งยืน และเทคนิคซิกซ์ ซิกมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่นๆได้หลากหลาย
- 4) การแก้ไขปัญหาหรือปรับปรุงกระบวนการทำงาน สิ่งที่สำคัญที่มีผลต่อความสำเร็จในการบรรลุเป้าหมายนั้น คือการให้ความร่วมมือจากหน่วยงานทุกฝ่าย

บรรณานุกรม

- Automotive Industry Action Group. (2010). Measurement Systems Analysis (MSA) Reference Manual Fourth Edition (4th ed.). Southfield, Michigan.
- Bluvband, Z., & Grabov, P. (2009). Failure analysis of FMEA. Paper presented at the 2009 Annual Reliability and Maintainability Symposium.
- Gupta, V., Jain, R., Meena, M., & Dangayach, G. (2018). Six-sigma application in tire-manufacturing company: a case study. *Journal of Industrial Engineering International*, 14(3), 511-520.
- Jaksirinont, P., & Osothsilp, N. (2020). Defective Reduction from Crack Defects in Cement Paving Tiles. *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 30(1), 16-25.
- Magar, V. M., & Shinde, V. B. (2014). Application of 7 quality control (7 QC) tools for continuous improvement of manufacturing processes. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2(4), 364-371.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.): John Wiley & sons.
- Morris, M. A. (2011). *Failure Mode and Effects Analysis based on FMEA 4th Edition*. Retrieved from <http://www.asq-auto.org/s/FMEA-Webinar-core-tools.pdf>
- Oxoplast®, S. (2016). Classification of plasticizers. Retrieved from <https://oxoplast.com/en/classification-of-plasticizers/>
- Pugna, A., Negrea, R., & Miclea, S. (2016). Using six sigma methodology to improve the

assembly process in an automotive company. International Journal of Procedia-Social Behavioral Sciences, 221(Supplement C), 308-316.

Shankar, R. (2009). Process improvement using six sigma: a DMAIC guide: Quality Press.

Supapan, J., & Chutima, P. (2019). Defect Reduction in the Manufacturing Process of In-Mould Decoration of Injection Moulded Components. Paper presented at the Materials Science Forum.

Thai Nam Plastic (Public) Co., L. (2017). Main Process: Calendering Machine. Retrieved from <http://www.thainam.com/cam.html>

Thomas, P., & Paul, K. (2018). Six Sigma Handbook (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

Wilkes, C. E., Summers, J. W., & Daniels, C. A. (2005). PVC handbook (Vol. 184): Hanser Munich.

กรรณิการ์ บุตรเอก. (2555). มารูจักไว้นิลคลอไรต์มอนอเมอร์กันเถอะ. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 60(189), 20-21.

กุศลิน กิจพงษ์นิกร. (2560). การลดของเสียในกระบวนการเป่าฟิล์มโดยวิธีซิกซ์ ซิกมา. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฉัญวรัตน์ สวัสดิ์สุภผล. (2562). การลดของเสียในแผงวงจรรวมแบบไม่สัมผัส. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

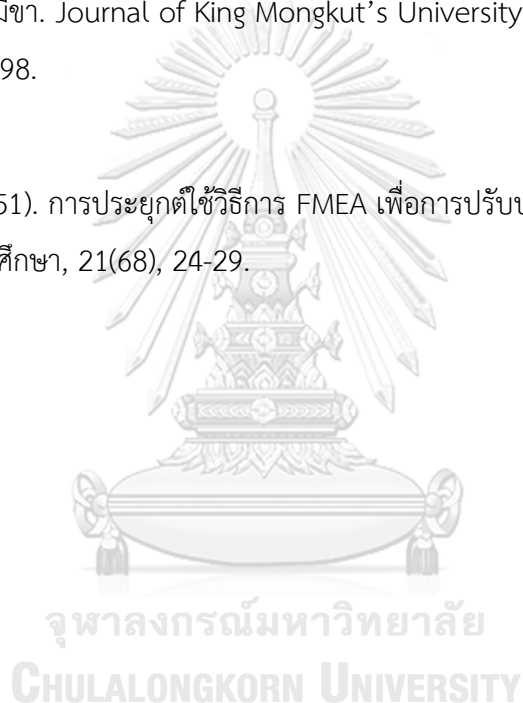
ปารเมศ ชุตินา. (2545). การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร.

วรรณศิกา ศิริมงคล. (2562). การลดของเสียในกระบวนการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาปูพื้นโดยใช้
แนวทางซิกซ์ ซิกมา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วีระชัย อารีรักษ์. (2560). การหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมในการผลิต
คอนกรีตผสมเสร็จโดยวิธีซิกซ์ ซิกมา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย

สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, & วัลภา เตชะสุข. (2011). การปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปในอุตสาหกรรม
เซมิคอนดักเตอร์ชนิดมีชา. Journal of King Mongkut's University of Technology North
Bangkok, 21(1), 88-98.

สมภพ ตลับแก้ว. (2551). การประยุกต์ใช้วิธีการ FMEA เพื่อการปรับปรุงความพึงพอใจของลูกค้า.
วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา, 21(68), 24-29.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	รัตนาพร เล่ห์รักษ์
วัน เดือน ปี เกิด	11 ธันวาคม 2535
สถานที่เกิด	จังหวัดลำปาง
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ที่อยู่ปัจจุบัน	จังหวัดสมุทรสาคร
ผลงานตีพิมพ์	1) Bed expansion characteristics in sound assisted fluidization of Geldart's group A powder 2) Influence of standing wave characteristics on hydrodynamic behaviours in sound-assisted fluidization of Geldart group A powder