การลดปัญหาแกนปูดของเทปพีวีซีโดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา

น.ส.ฐานิดา กาเตชะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Paper core swelling defect reduction of PVC tape by six sigma approach

Miss Thanida Katecha

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดปัญหาแกนปูดของเทปพีวีซีโดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา
โดย	น.ส.ฐานิดา กาเตชะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูเวช ชาญสง่าเวช)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ฐานิดา กาเตชะ : การลดปัญหาแกนปูดของเทปพีวีซีโดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา. (Paper core swelling defect reduction of PVC tape by six sigma approach) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร. ปารเมศ ชุติมา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปพีวีซีสำหรับลดสัดส่วนของเสียประเภทแกนเทปปูดที่มีความสูงเกินค่ามาตรฐานควบคุมที่ 2 มิลลิเมตร โดยนำหลักการและแนวคิดของซิกซ์ ซิกมามาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการภายใต้ 5 ขั้นตอน (DMAIC) เริ่มจากขั้นตอนการนิยามปัญหา โดยทำการศึกษากระบวนการผลิตเพื่อระบุหัวข้อปัญหา กำหนดวัตถุประสงค์และเป้าหมาย ถัดมาเป็นระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา ในการวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อให้มั่นใจได้ว่ามีความถูกต้องแม่นยำในระบบการวัดนี้ รวมถึงมีการระดมสมองจากทีมงานผู้ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนภาพแสดงสาเหตุและผล และใช้ FMEA ในการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาแกนเทปปูด จากนั้นคัดเลือกปัจจัยมาดำเนินการในขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยทำการออกแบบการทดลองแบบ Face-Center Composite Design (CCF) เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อการปูดของแกนเทปอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุงโดยจะนำปัจจัยที่ได้ มาปรับหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม แล้วนำมาทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลในขั้นตอนการควบคุม ทำการกำหนดและติดตามแผนการควบคุมปัจจัยให้เป็นไปตามเป้าหมายต่อไป โดยผลหลังจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทป จะได้ว่ามีสี่ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปูดของแกนเทป ได้แก่ 1.การปรับความหนาของกาวที่ 20 um และ 2.การปรับแรงดัน Nip-pressure ที่ 1 บาร์ นอกจากนี้ในกระบวนการวิเคราะห์ ยังสามารถระบุปัจจัยที่สามารถยับยั้งการปูดของแกนเทปได้โดยการ 3.ปรับอุณหภูมิและ 4.เวลาในขั้นตอนการอบ log roll ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ภายหลังจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ พบว่าความสูงของแกนเทปปูดเฉลี่ยถูกลดระดับลงและอยู่ในค่ามาตรฐานการส่งมอบให้ลูกค้า สามารถลดสัดส่วนของเสียของการเกิดแกนเทปปูดลงได้จาก 40% เป็น 0% ของของเสียในปัจจุบัน ซึ่งให้ผลลัพธ์มากกว่าผลผลิตที่คาดหวัง นอกจากนี้ความสามารถของกระบวนการยังได้รับการปรับปรุงจาก Cp ที่ 1.15 เป็น 2.14 และ Cpk ที่ 0.14 เป็น 1.35 ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับที่ 1.33 ของโรงงาน

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2564 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

6370072121 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORD:

Thanida Katecha : Paper core swelling defect reduction of PVC tape by six sigma approach. Advisor: Prof. PARAMES CHUTIMA, Ph.D.

This research aims to present the approach for improving the production process of PVC tape for reducing the proportion of waste in the tape core slide defect that is higher than the control standard at 2 mm by applying the principles and concepts of Six Sigma under 5 systematic steps (DMAIC). First is the Define phase studies the production process to identify problems, set objectives and goals. Second is the measurement phase, the measurement system was assessed for its precision and accuracy. Then, the potential causes of the problem were brainstormed by using cause and effect diagrams, and then FMEA was used to prioritize the factors affecting the tape core slide problem. Then select 5 factors to perform in the analysis phase, by Face-Center Composite Design (CCF) designing an experiment was applied to prove the factors to analyze the input factors that significantly affect the sliding of the tape core. In addition, the optimal levels of factors are determined in the Improve phase. After that, the optimal setting is adjusted in the process to confirm the expected result in the final of the Control phase to develop a new control plan and standard operating procedure and control the process after the improvement. After the improvement of the tape production process, There are four factors influencing the sliding of the tape core: 1. Adhesive thickness adjustment at 20 um and 2. Nip-pressure adjustment at 1 bar. Moreover, the factors that can inhibit the sliding of the tape core can also be identified by 3. Adjust the temperature and 4. The time for the ageing log roll process was at 85 °C and 2 hours respectively.

After setting the appropriate parameters of various factors It was found that the height of the average sliding of tape core was lowered and was within the standard value of the customer. It can reduce the waste proportion of tape core sliding from 40% to 0% of current waste which produces more results than expected output. Furthermore, the process capability was improved from a Cp of 1.15 to 2.14 and a Cpk of 0.14 to 1.35, meeting the factory acceptance criteria of 1.33.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Industrial Engineering	Student's Signature .....
Academic Year:	2021	Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณความกรุณาและอนุเคราะห์จากบุคคลที่มีความเกี่ยวข้องหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ คำปรึกษาระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี รวมถึงความใส่ใจในการติดตามผลการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชูเวช ชาญสง่าเวช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาช่วยแนะนำ ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณโรงงานกรณีศึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยเข้าไปทำการศึกษาวิจัย รวมทั้งให้การสนับสนุนในการเก็บรวบรวมข้อมูล และขอขอบคุณคณะทำงานที่ให้ความร่วมมือ คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความช่วยเหลือต่างๆเป็นอย่างดีซึ่งถือว่ามีประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมาก

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจ รวมทั้งขอขอบคุณกำลังใจจากเพื่อน พี่ น้อง และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในงานวิจัยทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ด้วย

ฐานิดา กาเตชะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

..... ค

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูปภาพ ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ประวัติความเป็นมาและรายละเอียดของโรงงานกรณีศึกษา 2

1.1.1 ผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตของโรงงานตัวอย่างที่ศึกษา 3

1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 8

1.3 สภาพปัญหาที่พบในปัจจุบัน 10

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 14

1.5 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย 14

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 14

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 14

1.8 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 16

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 17

2.1 ประวัติความเป็นมา 17

2.1.1 ความหมาย 18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.2 แนวความคิดและหลักการ 19
2.1.3 โมเดลของซิกซ์ ซิกมา 20
2.1.3.1 ขั้นตอนการกำหนดปัญหา (Define phase : D) 21
2.1.3.2 ขั้นตอนการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure phase : M) 22
2.1.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา (Analyze phase : A) 25
2.1.3.4 ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ (Improve phase : I) 30
2.1.3.5 ขั้นตอนการติดตามควบคุมกระบวนการ (Control phase : C) 47
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 49
2.2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับวัสดุเทปพันสายไฟ 50
2.2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดเทปปูดหลังจากการตัด 59
2.2.3 การทดสอบการเกิดเทปปูดในโรงงานกรณีศึกษา 61
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 62
บทที่ 3 ระยะนิยามปัญหา (Define phase : D) 65
3.1 ศึกษากระบวนการผลิต (Manufacturing method) 65
3.2 การกำหนดปัญหา 69
3.2.1 การตรวจสอบของเสียที่เกิดจากแกนเทปปูด 71
3.3 การกำหนดเป้าหมายและตัวชี้วัด 73
3.4 การจัดตั้งคณะทำงาน 73
3.5 การสร้างสัญญาโครงการ (Project Charter) 74
3.6 สรุประยะนิยามปัญหา 75
บทที่ 4 ระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure phase : M) 76
4.1 การวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงตรงของระบบเครื่องมือวัด 76
4.1.1 การออกแบบการวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงตรงของระบบการวัด 77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2 การวิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้นของปัญหา 83
4.2.1 แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram) 83
4.2.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) 85
4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis; FMEA) 88
4.3 สรุปขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา 99
บทที่ 5 การวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา (Analyze phase : A) 100
5.1 ปัจจัยนำเข้าที่นำมาทดสอบสมมติฐานของการออกแบบการทดลอง 100
5.2 ตัวแปรตอบสนอง 100
5.3 ตัวแปรควบคุม 101
5.4 การกำหนดระดับปัจจัยนำเข้าในการออกแบบการทดลอง 101
5.4.1 เกณฑ์ในการเลือกระดับของปัจจัยในการนำมาทดสอบสมมติฐาน 102
5.5 การออกแบบการทดลอง 104
5.5.1 ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง 105
5.6 ผลการทดลอง 106
5.7 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง 108
5.7.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (สมมติฐาน 3 ข้อ) 108
5.7.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 111
5.8 สรุประยะการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา 114
บทที่ 6 ระยะการปรับปรุงกระบวนการ (Improve phase : I) 116
6.1 ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ 116
6.2 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัย 116
6.3 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ 119
บทที่ 7 ระยะควบคุมกระบวนการ (Control phase : C) 120

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผล 120
7.1.1 ขั้นตอนในการทดสอบเพื่อยืนยันผล 121
7.1.2 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล 122
7.1.3 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง 124
7.2 ข้อมูลหลังจากการปรับปรุง 125
7.3 แนวทางการควบคุมระดับของปัจจัย 127
7.4 สรุประยะควบคุมกระบวนการ 128
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 129
8.1 บทสรุปของระยะนิยามปัญหา 129
8.2 สรุประยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา 130
8.3 สรุประยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา 131
8.4 สรุประยะปรับปรุงและแก้ไขกระบวนการ 132
8.5 สรุประยะการทดสอบยืนยันผลและตรวจติดตามควบคุมกระบวนการ 133
8.6 ข้อจำกัดของงานวิจัย 134
ภาคผนวก 137
ภาคผนวก ก ค่าความสูงของแกนเทปปูดของเทป C07T ที่ได้จากกระบวนการผลิตเทปในโรงงาน กรณีศึกษาใน Lot การผลิตก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต 138
ภาคผนวก ข ค่าการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา 141
บรรณานุกรม 144
ประวัติผู้เขียน 147

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ปริมาณของเสียจากผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟแต่ละชนิดในระยะเวลา 12 เดือน 9

ตารางที่ 2 จำนวนครั้งการทดลองของการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง 44

ตารางที่ 3 ปริมาณของเสียจากผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟแต่ละชนิดในระยะเวลา 12 เดือน 69

ตารางที่ 4 สัญญาโครงการ (Project Charter) 74

ตารางที่ 5 ขนาดตัวอย่างในการเก็บข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์และประเมินระบบการวัดที่เหมาะสม ... 78

ตารางที่ 6 ผลการวัดความสูงของแกนเทปในชิ้นงานเทปตัวอย่าง จำนวน 10 ชิ้น ที่ได้จาก กระบวนการผลิตเทปต่างล็อตการผลิตกัน ในหน่วยมิลลิเมตร 79

ตารางที่ 7 เกณฑ์การตัดสินใจสำหรับการยอมรับระบบการวัด 82

ตารางที่ 8 เกณฑ์การให้คะแนนการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล 85

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีโอกาสส่งผลถึงผลผลิตที่ได้ 86

ตารางที่ 10 เกณฑ์การประเมินความรุนแรงของผลกระทบ : S (AIAG, 2001) 90

ตารางที่ 11 เกณฑ์การประเมินโอกาสในการเกิดสาเหตุของข้อบกพร่อง : O 91

ตารางที่ 12 เกณฑ์การประเมินการตรวจจับ : D 92

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) 94

ตารางที่ 14 ระดับของปัจจัยในกาทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF) 101

ตารางที่ 15 ผลของการวัดความสูงของแกนเทปที่ปูด ที่ได้จากการออกแบบกาทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF) 106

ตารางที่ 16 ค่าระดับที่เหมาะสมของปัจจัย 119

ตารางที่ 17 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันผลการปรับปรุง 120

ตารางที่ 18 ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงในกระบวนการอบ 124

ตารางที่ 19 ผลเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง 125

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 20 ผลการตรวจสอบค่าแรงเกาะติดภายหลังการปรับปรุง..... 126

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่1 ผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับชุดสายไฟประกอบในรถยนต์ (Wire-hardness structure) 2
รูปที่2 ตำแหน่งการใช้งานของเทปพันสายไฟในรถยนต์ 3
รูปที่3 ลักษณะการพันของเทปพันสายไฟทั้ง 3 รูปแบบ 4
รูปที่4 ลักษณะภายนอกของเทปพันสายไฟ (Appearance) 4
รูปที่5 โครงสร้างของเทปพันสายไฟ 5
รูปที่6 กระบวนการผลิตเทปพันสายไฟของโรงงานกรณีศึกษาก่อนการปรับปรุง 7
รูปที่ 7 กราฟสัดส่วนของดีและของเสียในกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟแต่ละชนิด 9
รูปที่8 ปริมาณของเสียที่เกิดกับเทปชนิด C07T แต่ละประเภท (ซ้าย) 10
รูปที่9 ปริมาณของเสียจำแนกตามประเภท (ขวา) 10
รูปที่10 ลักษณะของเสียประเภทแกนปูด 11
รูปที่11 การใช้เทปพันสายไฟของพนักงานในโรงงานประกอบสายไฟในรถยนต์ 11
รูปที่12 แผนภาพแสดงสาเหตุและผลของปัญหา 13
รูปที่13 แผนภาพวงจรการทำงานของกระบวนการของ DMAIC 21
รูปที่14 แผนภาพกระบวนการทำงานแบบ SIPOC 22
รูปที่15 แผนภาพความแตกต่างระหว่างความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) 24
รูปที่16 รูปแบบของแผนภาพแสดงสาเหตุและผล 26
รูปที่17 รูปแบบทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ 31
รูปที่18 ลักษณะตารางการออกแบบ 32
รูปที่19 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบกรณี 3 ปัจจัย 36
รูปที่20 การออกแบบแฟคทอเรียลกรณีสามปัจจัยที่สองระดับซึ่งมีการทดลองซ้ำสองครั้งและมีลำดับแบบมาตรฐาน 37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่21 การออกแบบแฟคทอเรียลกรณีสามปัจจัยที่สองระดับซึ่งมีการทดลองซ้ำสองครั้งและมีลำดับอย่างสุ่ม..... 38
รูปที่22 ลักษณะสมมติฐานทั้งสามประการ..... 40
รูปที่23 ลักษณะพื้นผิวการตอบสนอง..... 42
รูปที่24 โครงสร้างของแบบการทดลองส่วนประสมกลาง กรณี 2 ปัจจัย..... 43
รูปที่25 โครงสร้างของแบบการทดลองส่วนประสมกลาง กรณี 3 ปัจจัย..... 44
รูปที่ 26โครงสร้างของแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลางแบบ CCF กรณี 3 ปัจจัย..... 45
รูปที่27 ลักษณะการออกแบบแบบส่วนประสมกลาง CCD และ CCF กรณีมี 3 ปัจจัย..... 45
รูปที่28 ภาพเปรียบเทียบโครงสร้างของแบบการทดลองแบบ Box-Behnken (ภาพซ้าย) และโครงสร้างของแบบการทดลองแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (ภาพขวา)..... 46
รูปที่29 ลักษณะแผนภูมิควบคุม (Control chart)..... 49
รูปที่30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียพลาสติดไซเซอร์กับน้ำหนักโมเลกุล..... 54
รูปที่31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียพลาสติกไซเซอร์กับเวลา..... 54
รูปที่32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) กับสัดส่วนน้ำหนักของพลาสติกไซเซอร์ (ซ้าย)..... 55
รูปที่33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแพร่ของพลาสติกไซเซอร์กับอุณหภูมิ (ขวา)..... 55
รูปที่34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงของพลาสติกไซเซอร์ในพีวีซีและอุณหภูมิของกระบวนการ..... 56
รูปที่35 การแพร่ของพลาสติกไซเซอร์จากพีวีซีชีทเข้าไปในชั้นกาวที่เวลาและอุณหภูมิหนึ่งๆ..... 57
รูปที่36 การแพร่ของพลาสติกไซเซอร์ในกาว จนเกิดความเครียดสะสมภายในพีวีซีและดันแกนกระดาษออกมากลายเป็นเทปปูด..... 58
รูปที่37 ผลการวัดแกนปูดของเทปหลังเก็บไว้ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 35 องศา เป็นเวลา 28 วัน (ซ้าย)..... 59
รูปที่38 ปริมาณแกนปูดที่เป็นของเสีย (ขวา)..... 59
รูปที่39 กระบวนการผลิตเทปพันสายไฟที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโรงงานกรณีศึกษา..... 65
รูปที่40 กระบวนการผลิตพีวีซีชีทออกมาเป็นพีวีซีดรัมของโรงงานกรณีศึกษา..... 66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่41 กระบวนการผลิตพีวีซีชีทของโรงงานกรณีศึกษา 67
รูปที่42 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทป Log roll 67
รูปที่43 ลักษณะตู้อบผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทป Log roll ในโรงงานกรณีศึกษา 68
รูปที่44 กระบวนการตัด Log roll เป็นเทป 68
รูปที่45 แผนภูมิแสดงสัดส่วนการผลิตเทปพันสายไฟแต่ละชนิดในโรงงานกรณีศึกษา 70
รูปที่46 ปริมาณของเสียที่เกิดกับเทปชนิด C07T แต่ละประเภท (ซ้าย) 70
รูปที่47 ปริมาณของเสียจำแนกตามประเภท (ขวา) 70
รูปที่48 ความสามารถของกระบวนการของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน 72
รูปที่49 การวัดความสูงของแกนเทปสองตำแหน่งโดยใช้ดิจิตอลเวอร์เนียร์ 77
รูปที่ 50 ผลการทดสอบระบบการวัดความสูงของแกนเทปที่ได้จากโปรแกรม Minitab 80
รูปที่ 51 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab (1) 80
รูปที่ 52 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab (2) 81
รูปที่ 53 แผนภาพแสดงสาเหตุและผลของปัญหา 84
รูปที่ 54 แผนภาพพาเรโตแสดงลำดับคะแนนความเสี่ยง (RPN) ที่มีผลต่อการเกิดแกนเทปปูด 98
รูปที่ 55 แผนผังขั้นตอนการทดลอง 105
รูปที่ 56 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจงแจกแบบปกติ 109
รูปที่ 57 ผลการทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ 110
รูปที่ 58 ผลการทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพค่าความแปรปรวนของข้อมูล 111
รูปที่ 59 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อความสูงของแปนเทปปูด (1) 111
รูปที่ 60 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อความสูงของแปนเทปปูด (2) 112
รูปที่ 61 กราฟ Normal Plot ของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง 113
รูปที่ 62 แผนภูมิพาเรโตของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง 114
รูปที่ 63 ผลหลักของปัจจัยที่มีผลต่อการปูดของแกนเทป 117
รูปที่ 64 ผลของอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีผลต่อการปูดของแกนเทป 117

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 65 ผลการทำ Response Optimization เพื่อหาค่าปรับตั้งที่ดีที่สุดในแต่ละปัจจัย 118

รูปที่ 66 ความสูงของแกนเทปปูดหลังปรับปรุงกระบวนการผลิตเทป 122

รูปที่ 67 ความผันแปรแบบ Box Plot ของผลผลิตเทปที่เกิดแกนปูดภายหลังการปรับปรุงกระบวนการ 122

รูปที่ 68 ความสามารถของกระบวนการด้านผลผลิตที่ได้หลังการปรับปรุง 123

รูปที่ 69 เปรียบเทียบความสูงของแกนเทปปูดที่ได้ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงสภาวะการผลิตเทปพันสายไฟชนิด C07T ในโรงงานกรณีศึกษา 127

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโลก และเป็นอุตสาหกรรมที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง รวมถึงประเทศไทยที่เป็นศูนย์กลางการผลิตรถยนต์ในภูมิภาคเอเชีย (Detroit of Asia) โดยเฉพาะการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เพื่อรองรับการเติบโตของอุตสาหกรรมรถยนต์ และชิ้นส่วนยานยนต์สำคัญที่ทำให้รถยนต์สามารถขับเคลื่อนได้ จำเป็นจะต้องมีสายไฟ (Wire Harness) ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่การทำงานของระบบต่างๆ ให้รถยนต์สามารถขับเคลื่อนได้ ทั้งนี้ สายไฟในรถยนต์จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพได้นั้น จำเป็นจะต้องมีตัวช่วยจับยึด รวมสายไฟ และเชื่อมสายไฟเข้าด้วยกัน นั่นคือ “เทปพันสายไฟ” ที่ต้องมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน (Insulation) สามารถป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า (Short circuit) บริเวณจุดต่อสายไฟได้ มีคุณสมบัติยืดหยุ่น (Flexibility) จากลักษณะการจัดวางสายไฟที่ตำแหน่งต่างๆ เช่น บริเวณประตู (Door blending) เป็นต้น และคุณสมบัติด้านแรงเกาะติด (Adhesion) เพื่อให้สามารถพันสายไฟได้อย่างแนบสนิท ป้องกันไม่ให้น้ำหรือสิ่งเจือปนภายนอกเข้าไปสัมผัสกับสายไฟโดยตรงได้ รวมถึงคุณสมบัติด้านการใช้งานอื่นๆ เช่น การทนต่อความร้อน (Heat resistance) การต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า (volume resistivity) และคุณสมบัติด้านแรงดึง (Tensile strength) ที่มีผลต่อความสามารถในการใช้งาน (Workability) เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

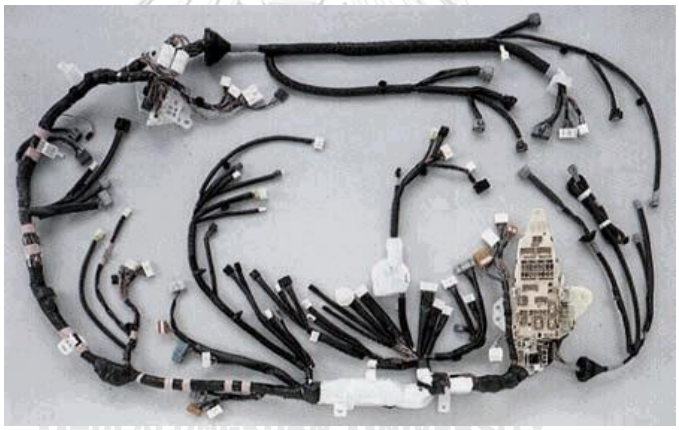
จากคุณสมบัติของเทปพันสายไฟที่จำเป็นต้องมี โรงงานกรณีศึกษาจึงมีความมุ่งมั่นในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญทั้งต่อการแข่งขันในตลาด และการตอบสนองต่อความพึงพอใจของลูกค้า เพื่อให้ธุรกิจสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง และมีการเติบโตในอุตสาหกรรมต่อไปได้ โดยจำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีการซิกซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟที่ใช้ในรถยนต์ เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น จากแนวคิดของซิกซ์ ซิกมาที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลลัพธ์ของกระบวนการ พยายามที่จะระบุสาเหตุของความล้มเหลวและลดความแปรปรวนในกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยส่งผลให้เกิดการเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และบริการ รวมถึงการเพิ่มผลกำไรให้แก่บริษัทอีกด้วย

1.1 ประวัติความเป็นมาและรายละเอียดของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาก่อตั้งตั้งแต่ปี พ.ศ. 2520 เป็นสถานที่ผลิต ผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับชุดสายไฟประกอบในรถยนต์ (Wiring harness) ซึ่งอยู่ในเครือของบริษัทต่างชาติ ที่ดำเนินธุรกิจอยู่ในกลุ่มของผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ที่มีประเทศไทยเป็นสถานที่ผลิตในเครือแห่งแรกและได้มีการก่อตั้งเครือข่ายการพัฒนาการผลิตออกไปทั่วโลกอย่างต่อเนื่อง

สำหรับกลุ่มผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับชุดสายไฟประกอบในรถยนต์ที่ดำเนินการในประเทศไทยแสดงลักษณะผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 1 โดยมีการแยกส่วนการผลิตเป็น 4 โรงงาน ประกอบไปด้วย

- โรงงานประกอบชุดสายไฟในรถยนต์ (Wiring harness assembly)
- โรงงานผลิตสายไฟทองแดง และอลูมิเนียม (Automotive wire)
- โรงงานผลิตอุปกรณ์เชื่อมต่อสายไฟ (Injection)
- โรงงานผลิตเทปพันสายไฟ (Vinyl tape)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่1 ผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับชุดสายไฟประกอบในรถยนต์ (Wire-hardness structure)

โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาในส่วนของโรงงานผลิตเทปพันสายไฟ หรือ Vinyl tape ที่เป็นฐานการผลิตหลักของภูมิภาคเอเชีย และนำส่งต่อไปใช้งานที่โรงงานประกอบชุดสายไฟในรถยนต์ในเครือต่างๆทั่วโลกมากถึง 80% และมีการจัดจำหน่ายให้แก่ลูกค้าภายนอกเครือบริษัทอีกประมาณ 20% ของการผลิตทั้งหมดด้วย ดังนั้นการผลิตเทปพันสายไฟจึงต้องมีการตรวจสอบคุณภาพในทุกขั้นตอนการผลิต กระทั่งได้รับการรับรองมาตรฐานการผลิตในระดับสากล และส่งมอบได้ตรงเวลาเพื่อให้มีความมั่นใจในมาตรฐาน ส่งผลต่อความเชื่อมั่นของลูกค้า รวมถึงเป็นผู้นำด้านการผลิตเทปพันสายไฟในตลาด

1.1.1 ผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตของโรงงานตัวอย่างที่ศึกษา

เทปพันสายไฟที่ผลิตในโรงงานกรณีศึกษาแบ่งออกตามการใช้งานเป็น 2 กลุ่ม ดังรูปที่ 2 คือ

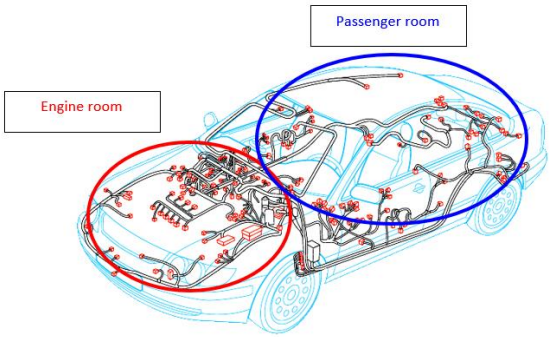
1. เทปพันสายไฟที่ใช้บริเวณห้องเครื่องยนต์ (Engine room type : FR-Tape)

เนื่องจากบริเวณห้องเครื่องยนต์ (Engine room) จะเป็นส่วนที่รวมแหล่งกำเนิดพลังงานในการขับเคลื่อนยานยนต์ ได้แก่ แบตเตอร์รี่ หม้อน้ำ สายพาน สายไฟต่างๆ และชิ้นส่วนอื่นๆ ซึ่งมีอุณหภูมิสูง ดังนั้นเทปพันสายไฟที่ใช้บริเวณนี้จะต้องมีคุณสมบัติทนความร้อนได้สูงในช่วง 80°C ถึง 120°C ทนอุณหภูมิต่ำได้ถึง -40°C (สำหรับพื้นที่การใช้งานที่มีสภาพอากาศหนาวเย็น) มีความยืดหยุ่นของเทปสูงเพื่อรองรับแรงสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ ทนต่อความชื้นและสารละลายต่างๆ เช่น น้ำฝน ได้เป็นต้น

2. เทปพันสายไฟที่ใช้บริเวณห้องผู้โดยสาร (Passenger room : C-Tape)

สำหรับบริเวณห้องผู้โดยสาร (Passenger room) เป็นส่วนที่มีการใช้เทปมากที่สุด โดยจะใช้เทปพันสายไฟที่เหมาะกับอุณภูมิทั่วไป อยู่ในช่วง 40°C ถึง 80°C จำเป็นต้องมีคุณสมบัติตามตำแหน่งที่ใช้งาน ได้แก่ บริเวณประตูรถยนต์ที่มีการเปิดปิด (Door harness blending) ซึ่งต้องใช้เทปพันสายไฟที่มีความยืดหยุ่นสูง, บริเวณจุดรับสัมภาระ (Usage at luggage harness) ที่จะต้องมีการรับแรงกระทำ จึงต้องใช้เทปพันสายไฟที่มีความแข็งแรงสูง และบริเวณแผงควบคุม หรือ คอนโซล (At console harness) ที่จะต้องมีคุณสมบัติต้านทานการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากเป็นบริเวณที่ไวต่อสัญญาณรบกวนภายนอก เป็นต้น

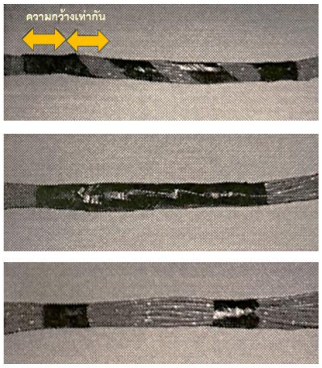
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่2 ตำแหน่งการใช้งานของเทปพันสายไฟในรถยนต์

(แหล่งที่มา : https://www.fujikura.com/solutions/automotive/)

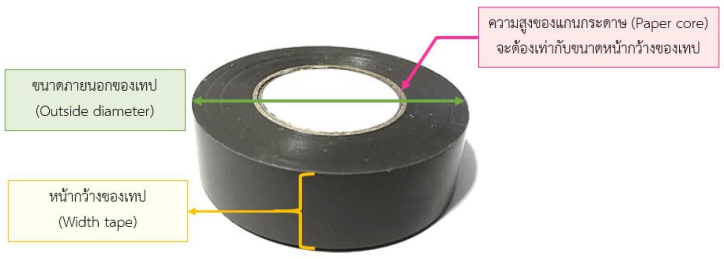
เทปพันสายไฟที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษาแต่ละชนิดจะจะแบ่งตามตำแหน่งการใช้งานต่างๆ โดยการพันสายไฟในโรงงานประกอบของลูกค้าจะใช้พนักงานเป็นผู้พันสายไฟ ซึ่งจะมีลักษณะการพัน 3 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่3 ลักษณะการพันของเทปพันสายไฟทั้ง 3 รูปแบบ
(แหล่งที่มา : ภาพจากบริษัทกรณีศึกษาที่ใช้สำหรับการนำเสนอเท่านั้น)

- **โครงสร้างผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟในรถยนต์ (Vinyl tape Constructions)**

ลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟที่ได้มาตรฐานของโรงงานกรณีศึกษาจะเป็นไปตามรูปที่ 4 โดยจะต้องมีลักษณะภายนอกที่มีหน้ากว้างของเทป (Width tape) ตามมาตรฐานที่ 19 มิลลิเมตร ขนาดภายนอกของเทป (Outside diameter) เท่ากันทั้งสองแกน (เป็นวงกลม) ที่ 65.7 ~ 71.3 มิลลิเมตร และความสูงของแกนเทปจะต้องเท่ากับหน้ากว้าง โดยแกนจะต้องสูงไม่เกินผิวเทป 2 มิลลิเมตร เป็นต้น และนอกจากนี้จะมีการตรวจสอบลักษณะภายนอกอื่นๆ ได้แก่ ความเรียบของผิวชีทต้องไม่มีรอยยับหรือย่น, ไม่มีฟองอากาศภายใน, รอยตัดเรียบทั้งสองด้านของเทป, ไม่มีกาวเหนียวหรือเยิ้มออกมาด้านข้างของเทป และไม่มีสิ่งสกปรกปะปนบนผลิตภัณฑ์ เป็นต้น



รูปที่4 ลักษณะภายนอกของเทปพันสายไฟ (Appearance)
(แหล่งที่มา : ภาพจากบริษัทกรณีศึกษาที่ใช้สำหรับการนำเสนอเท่านั้น)

สำหรับโครงสร้างของเทปพันสายไฟจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ดังรูปที่ 5 โดยแต่ละส่วนสามารถจำแนกส่วนประกอบภายในได้ดังนี้

รูปที่5 โครงสร้างของเทปพันสายไฟ

1. วัสดุหลักของเทปพันสายไฟ (Base material) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วจะเรียกว่า ชีท (Sheet) : ผลิตมาจากวัตถุดิบหลักที่เรียกว่าพีวีซีคอมพาวนด์ (PVC Compound ย่อมาจาก Polyvinyl chloride Resin Compound) ที่ทำมาจากพีวีซีเรซิน (PVC Resin) นำมาผสมกับสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพีวีซีให้สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย รวมถึงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติพีวีซีคอมพาวนด์ให้สามารถนำไปใช้งานได้ดีขึ้น เช่น ความยืดหยุ่น (Elongation), ความแข็งแรง (Strength), การทนความร้อน (Heat resistance), การต้านทานการลามไฟ (Flame Retardant) และความต้านทานการนำไฟฟ้า (Volume resistivity) เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นอกจากพีวีซีคอมพาวนด์แล้ว ในกระบวนการผลิตชีท จะมีการผสมเม็ดสี (Pigment) หรือเรียกว่า มาสเตอร์แบท์ช (Masterbatch) ที่เป็นพลาสติกฟิลเลอร์ (Filler) ชนิดหนึ่ง ผลิตมาจากการผสมกันระหว่างเม็ดพลาสติกกับผงสี (Pigment powder) ความเข้มข้นสูง รวมถึงสารเติมแต่ง (Additive) อื่นๆเข้าด้วยกัน ที่จะช่วยให้เม็ดสีมีคุณสมบัติการกระจายตัวในพีวีซีคอมพาวนด์ได้ดี ให้สีสม่ำเสมอ โดยในโรงงานกรณีศึกษาจะใช้เม็ดสีที่แตกต่างกัน เพื่อแยกประเภทของผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆด้วย

สำหรับวัสดุหลักทั้ง พีวีซีคอมพาวนด์ (PVC compound) และเม็ดสี (Masterbatch) ที่โรงงานกรณีศึกษาใช้ จะเป็นเกรดพิเศษที่มีการออกแบบอัตราส่วนให้

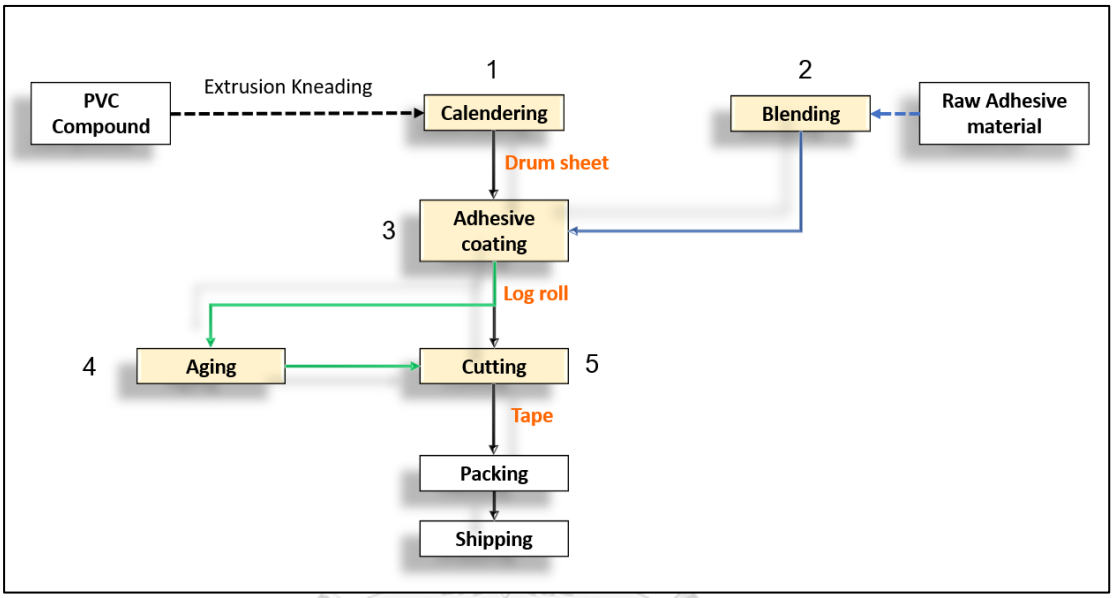
เหมาะสมต่อการนำไปใช้ผลิตเป็นเทปพันสายไฟแต่ละชนิดแตกต่างกันไปตามการใช้งาน โดยสั่งผลิตพิเศษมาจากซัพพลายเออร์ (Supplier) ภายนอกบริษัท

2. ไพรเมอร์ (Primer) : หรือสารเคลือบผิวชั้นต้น เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานระหว่างพลาสติกชีท (Sheet) ที่อยู่ชั้นล่างสุด กับสารกาว (Adhesive) ที่อยู่ชั้นบนสุด ให้มีแรงเกาะติด (Adhesion) ระหว่างกันได้ โดยไพรเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเทปพันสายไฟของโรงงานกรณีศึกษา มีส่วนผสมหลัก ได้แก่ น้ำยาง (Latex) , แอมโมเนีย (Ammonia) และน้ำ (Water)
3. สารยึดติด หรือสารกาว (Adhesive) : เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของเทปพันสายไฟ และใช้เคลือบบนผิวของไพรเมอร์ ทำหน้าที่ในการเกาะติดด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารต่างชนิดกัน ซึ่งในการผลิตเทปพันสายไฟนี้จะใช้เป็นกาวอะครีลิคประเภทที่มีความไวต่อแรงกด (Acrylic Pressure Sensitive Adhesive) ซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดติดสูง (Adhesion) เมื่อผ่านการอบบ่ม แห้งเร็ว กันน้ำได้ ทนต่อสภาพอากาศ การเสื่อมสภาพจากความร้อน และยังลดความเสี่ยงที่จะเกิดการติดไฟได้อีกด้วย โดยกาวที่ใช้ในการผลิตเทปพันสายไฟของโรงงานกรณีศึกษา มีส่วนผสม (Raw material) ได้แก่ สารประกอบอะครีลิค (Acrylic Copolymer Emulsion), น้ำยางธรรมชาติ (Natural latex), แอมโมเนีย (Ammonia), สารเพิ่มความหนืด (Thickening agent) และ น้ำ (Water) สำหรับสารกาว (Raw material) ที่ใช้ในการผลิตเทปพันสายไฟของโรงงานกรณีศึกษาจะมีอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของเทปพันสายไฟ
4. แกนเทป (Core) : ทำมาจากกระดาษแข็งชนิดพิเศษ (Hard paper core) ประกอบไปด้วยชั้นกระดาษ หรือแผ่นกระดาษแข็งที่พันกันอย่างแน่นหนาจนมีรูปร่างที่แข็งแรง และมักจะเป็นทรงกระบอกกลวง ชั้นกระดาษแต่ละชั้นจะเคลือบหรือยึดติดกันโดยใช้กาว ความหนาของผนังแกนจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นที่ห่อพันกันระหว่างการผลิต ซึ่งคุณสมบัติของแกนกระดาษที่ใช้ทำเทปพันสายไฟจะต้องมีความทนทานต่อการกดทับและความแข็งแรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- **กระบวนการผลิต (Manufacturing method)**

กระบวนการผลิตเทปพันสายไฟของโรงงานกรณีศึกษาจะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่ผลิตควบคู่กันคือ กระบวนการผลิตซีท และกระบวนผลิตกาว ทั้งสองกระบวนการจะแยกการผลิตแล้วไปรวมกันที่กระบวนการเคลือบกาว (Adhesive coating process) โดยกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟสามารถแบ่งออกเป็น 5 กระบวนการหลัก ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่6 กระบวนการผลิตเทปพันสายไฟของโรงงานกรณีศึกษาก่อนการปรับปรุง

กระบวนการผลิตเทปพันสายไฟในโรงงานกรณีศึกษาจะเริ่มจากการนำพีวีซีคอมพาวด์มาหลอมเพื่อขึ้นรูปเป็นพีวีซีซีท (1. Calendering process) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้จะเรียกว่าดรัมซีท (Drum sheet) จากนั้นจะถูกส่งไปที่กระบวนการเคลือบกาว (3. Adhesive coating process) โดยในกระบวนการนี้จะมีการนำเข้าทั้งสารกาว (Adhesive) และไพรเมอร์ (Primer) ที่มาจากกระบวนการผสมกาว (2. Blending process) และเมื่อพีวีซีซีทเข้าสู่กระบวนการเคลือบกาวเรียบร้อยแล้วจะมีการเข้าม้วนลงบนแกนกระดาษ (Paper core) ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า Log roll ซึ่งสำหรับเทปบางชนิดจะต้องมีการนำ log roll นี้ไปอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกาวในกระบวนการอบ (4. Aging process) แต่โดยปกติเทปทั่วไปจะไม่มีการอบเพิ่ม จากนั้น Log roll ที่ได้จากทั้งสองกระบวนการ จะถูกนำไปตัดเป็นเทปที่กระบวนการตัด (5. Cutting process) และถูกนำไปบรรจุลงกล่อง (Packing) เพื่อเตรียมส่งมอบให้ลูกค้าต่อไป (Shipping)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากปัญหาเศรษฐกิจที่ถดถอยลง อันเนื่องมาจากการระบาดของไวรัสโควิด-19 ตั้งแต่ปี 2562 เป็นระยะเวลาสองปีมานี้ ส่งผลกระทบต่อทุกภาคส่วนทั่วโลก ไม่เว้นแม้แต่ธุรกิจยานยนต์ ทั้งนี้โรงงานกรณีศึกษาก็ได้รับผลกระทบอย่างมากเช่นกัน ทำให้ต้องมีการปรับนโยบายเพื่อให้ธุรกิจสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง โดยเน้นในเรื่องของการลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับต้นทุนในการผลิต ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพ เป็นหนึ่งในวิธีการที่จะช่วยลดอัตราความสูญเสียของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากของเสียที่เกิดขึ้น ทำให้ต้องมีการใช้ต้นทุนในการผลิตของดีเพิ่มมากขึ้น รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการกำจัด หรือรีไซเคิลผลิตภัณฑ์บางส่วนอีกด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการปรับปรุงเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เพื่อตอบสนองนโยบายของโรงงานกรณีศึกษาทั้งในระยะสั้น และระยะยาว

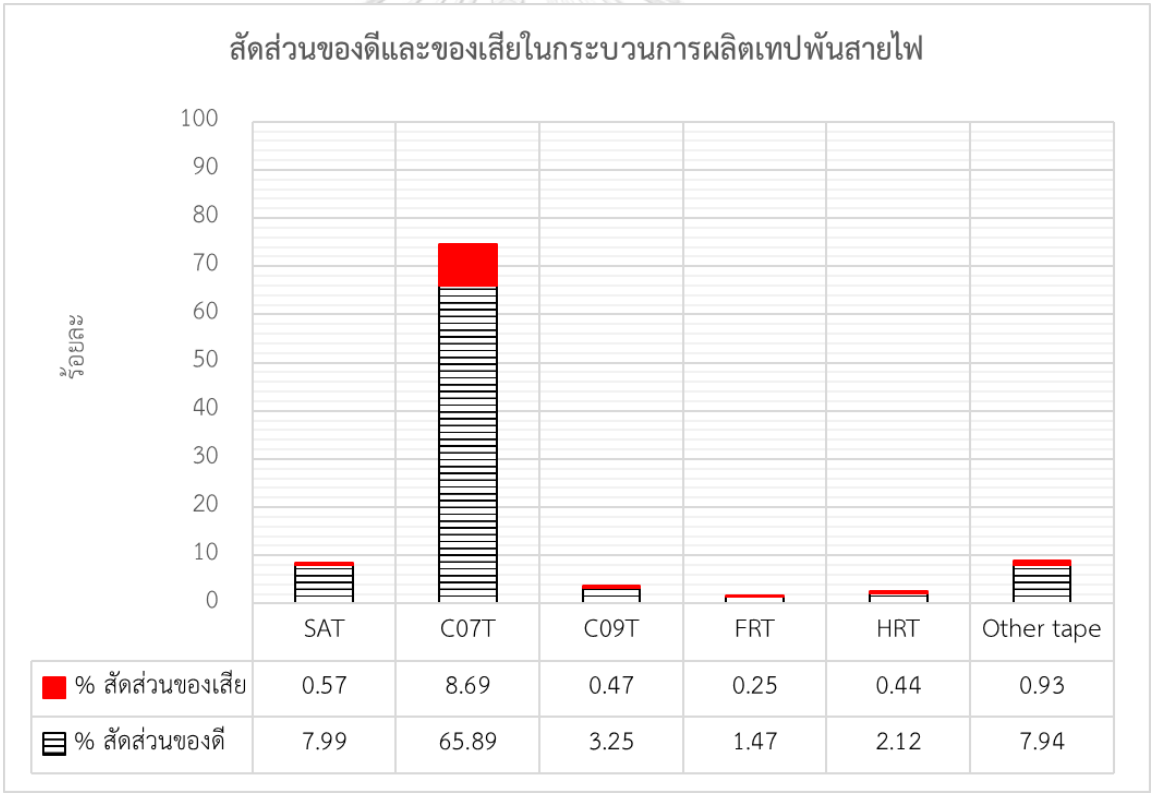
โดยจากการศึกษาข้อมูลการผลิต พบว่าปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษาประสบกับปัญหาผลิตภัณฑ์เกิดของเสีย ทำให้มีผลิตภัณฑ์ดี (Finish good) จำนวนน้อยกว่าที่วางแผนไว้ จึงจำเป็นต้องมีการใช้วัตถุดิบ และเวลาในการผลิตเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อการผลิตไม่เป็นไปตามเป้าหมาย จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียของรายได้หรือกำไรลดลง อีกทั้งการผลิตที่ล่าช้าก็ส่งผลให้การส่งมอบถึงลูกค้าล่าช้าไปด้วย อันมีผลให้ความน่าเชื่อถือจากลูกค้าลดลง และอาจทำให้สูญเสียกำไรในระยะยาวได้

ในการศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตเทปพันสายไฟ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสัดส่วนของเสียที่เกิดกับผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟแต่ละชนิด โดยทำการเก็บข้อมูลการผลิตตั้งแต่ช่วงเดือนพฤษภาคม 2563 ถึงเดือนเมษายน 2564 เป็นเวลา 12 เดือน ดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าจากจำนวนการผลิตเทปพันสายไฟทั้งหมด เทปชนิด C07T มีจำนวนการผลิตสูงที่สุดคิดเป็น 74.58% และจากจำนวนการผลิตที่สูงนี้จึงทำให้พบจำนวนของเสียมากที่สุดด้วย ซึ่งคิดเป็นของเสีย 76.62% ของจำนวนของเสียทั้งหมดในโรงงาน หรือ 11.65% ของจำนวนการผลิตเทปชนิด C07T โดยเมื่อพิจารณาจากราคาต้นทุนของเสียต่อปีร่วมด้วย จะเห็นได้ว่าเทปชนิด C07T มีราคาต้นทุนที่เป็นของเสียคิดเป็น 41.88 ล้านบาท (ราคาต้นทุนของเทปชนิด C07T เท่ากับ 7.55 บาท/ชิ้น) ซึ่งจากการพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการปรับปรุงแล้ว ผู้จัดทำจึงเล็งเห็นว่าควรทำการลดของเสียที่เกิดจากเทปพันสายไฟชนิด C07T เป็นลำดับแรก

ตารางที่ 1 ปริมาณของเสียจากผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟแต่ละชนิดในระยะเวลา 12 เดือน

ชนิดผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟ	จำนวนการผลิตทั้งหมด		จำนวนของเสีย			ราคาต้นทุนของเสีย/ปี
	ชิ้น	% การผลิตเทียบกับผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	ชิ้น	% ของเสียเทียบกับผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	% ของเสียเทียบกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด	(ล้านบาท)
SAT	5,461,160	8.56	361,281	4.99	6.62	2.33
C07T	47,599,500	74.58	5,546,809	76.62	11.65	41.88
C09T	2,372,200	3.72	297,125	4.10	12.53	2.10
FRT	1,095,288	1.72	156,734	2.16	14.31	1.49
HRT	1,634,840	2.56	282,707	3.90	17.29	4.20
TST	5,660,000	8.87	595,160	8.22	10.52	3.72
จำนวนรวม	**63,822,988**	**100.00**	**7,239,815**	**100.00**	**72.91**	**55.72**

เมื่อทำการวิเคราะห์จากแผนภูมิแท่งเพื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของดีและสัดส่วนของเสียที่เกิดในการผลิตเทปแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่าเทปชนิด C07T สามารถแบ่งเป็นสัดส่วนผลิตภัณฑ์ดี 65.89% และมีสัดส่วนของเสีย 8.69% เทียบกับจำนวนการผลิตรวมทั้งหมดใน 12 เดือน ดังรูปที่ 7

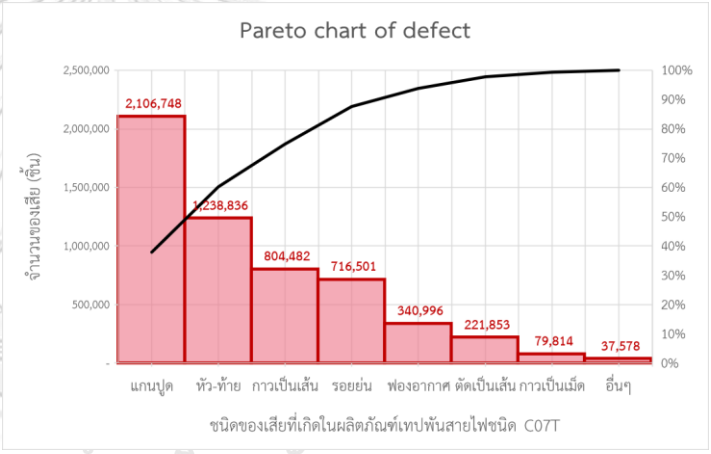


รูปที่ 7 กราฟสัดส่วนของดีและของเสียในกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟแต่ละชนิด

1.3 สภาพปัญหาที่พบในปัจจุบัน

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทปพันสายไฟมักจะเกิดของเสียได้หลายประเภท เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทปพีวีซีนั้น ค่อนข้างจะอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆทั้งภายในและภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีการการควบคุมในทุกขั้นตอนการผลิต รวมถึงการปรับปรุงหน้างานอยู่เสมอ สำหรับเทปพันสายไฟชนิด C07T ที่มีสัดส่วนของเสียเป็นจำนวนมากที่สุดนั้น ในการที่จะดำเนินการปรับปรุงเพื่อลดของเสียที่เกิดกับเทปชนิดนี้ได้ จำเป็นที่จะต้องศึกษาประเภทของของเสียที่เกิดกับเทป C07T เพื่อพิจารณาลำดับในการดำเนินการ รวมถึงหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยจากการเก็บข้อมูลในกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟชนิด C07T ในช่วงเดือนพฤษภาคม 2563 ถึงเดือนเมษายน 2564 เป็นเวลา 12 เดือน สามารถจำแนกประเภทของเสียที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 8 และแผนภาพพาเรโตดังรูปที่ 9

ชนิดของเสีย (Defect type)	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	% ของเสีย
แกนปูด	2,106,748	37.98
รอยย่น	716,501	12.92
ฟองอากาศ	340,996	6.15
กาวเป็นเส้น	804,482	14.50
กาวเป็นเม็ด	79,814	1.44
หัว-ท้าย	1,238,836	22.33
ตัดเป็นเส้น	221,853	4.00
อื่นๆ	37,578	0.68
Total (Pcs)	5,546,809	100



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่8 ปริมาณของเสียที่เกิดกับเทปชนิด C07T แต่ละประเภท (ซ้าย)
รูปที่9 ปริมาณของเสียจำแนกตามประเภท (ขวา)

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าเทปพันสายไฟชนิด C07T เกิดของเสียประเภทแกนปูดมากที่สุด คิดเป็น 37.98% ของจำนวนของเสียทั้งหมด ซึ่งคำนวณเป็นต้นทุนของเสียเท่ากับ 15.9 ล้านบาท ดังนั้นจากการพิจารณาข้อมูลนี้ จึงได้นำมาซึ่งการศึกษากระบวนการผลิตเทปพันสายไฟ เพื่อปรับปรุงแก้ไขในการลดของเสียประเภทแกนปูดในเทปพันสายไฟชนิด C07T โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงตามนโยบายของโรงงานกรณีศึกษาที่ต้องการให้มีอัตราส่วนของเสียแต่ละประเภทไม่เกิน 10%

- **ของเสียประเภทแกนปูด (Paper core slide)**

รูปที่10 ลักษณะของเสียประเภทแกนปูด
(แหล่งที่มา : ภาพจากบริษัทกรณีศึกษาที่ใช้สำหรับการนำเสนอเท่านั้น)

แกนปูด เป็นของเสียที่มีลักษณะแกนกระดาษที่อยู่ด้านในปูดขึ้นมาจากตัวเทปมากกว่า 2 มิลลิเมตร (มาตรฐานของโรงงานกรณีศึกษา) ดังรูปที่ 10 โดยแกนปูดจะส่งผลต่อความสามารถในการใช้งานของลูกค้า (Workability) กล่าวคือ ลักษณะการนำเทปไปใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 11 จะเป็นการนำเทปไปพันรอบสายไฟ โดยพนักงานจะพันเทปด้วยมือในความเร็วตามมาตรฐานที่ประมาณ 10 เมตร/นาที และ 300เมตร/นาที (Speed unwinding) ซึ่งการที่แกนเทปปูดออกมา จะทำให้เกิดความไม่สะดวกต่อการใช้งานของพนักงาน (ลูกค้า) อีกทั้งเทปที่ดึงออกมาจะมีลักษณะโค้งงอ ทำให้การผลิตในกระบวนการประกอบสายไฟไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ส่งผลให้รอบการผลิตช้าลง และมีผลต่อเนื่องไปยังส่วนงานอื่นๆ จึงได้มีการทำข้อกำหนดมาตรฐานความสูงของแกนเทปร่วมกับลูกค้า ในการจัดให้ของเสียประเภทแกนปูดเป็นงานที่ไม่สามารถนำมาขายหรือลดเกรดลงได้ และไม่สามารถนำมารีไซเคิลเนื่องจากแกนที่ปูดออกมานี้ จะทำให้ไม่สามารถนำไปเข้าเครื่องแยกแกนได้ (เรียกว่า เครื่อง Loss ตอกแกน) ทำให้จำเป็นต้องทำลายทิ้ง (Scrap) เท่านั้น

รูปที่11 การใช้เทปพันสายไฟของพนักงานในโรงงานประกอบสายไฟในรถยนต์
(แหล่งที่มา : ภาพจากบริษัทกรณีศึกษาที่ใช้สำหรับการนำเสนอเท่านั้น)

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า ปัญหาแกนเทปปูดส่วนใหญ่ พบได้จากการเคลมของลูกค้าที่ได้รับสินค้าทางเรือขนส่ง (การขนส่งสินค้าไปต่างประเทศที่มีระยะเวลามากกว่า 7 วันขึ้นไป และมีการเดินทางสูงสุด 60 วัน) ซึ่งจากการตรวจสอบเบื้องต้นพบว่า หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ

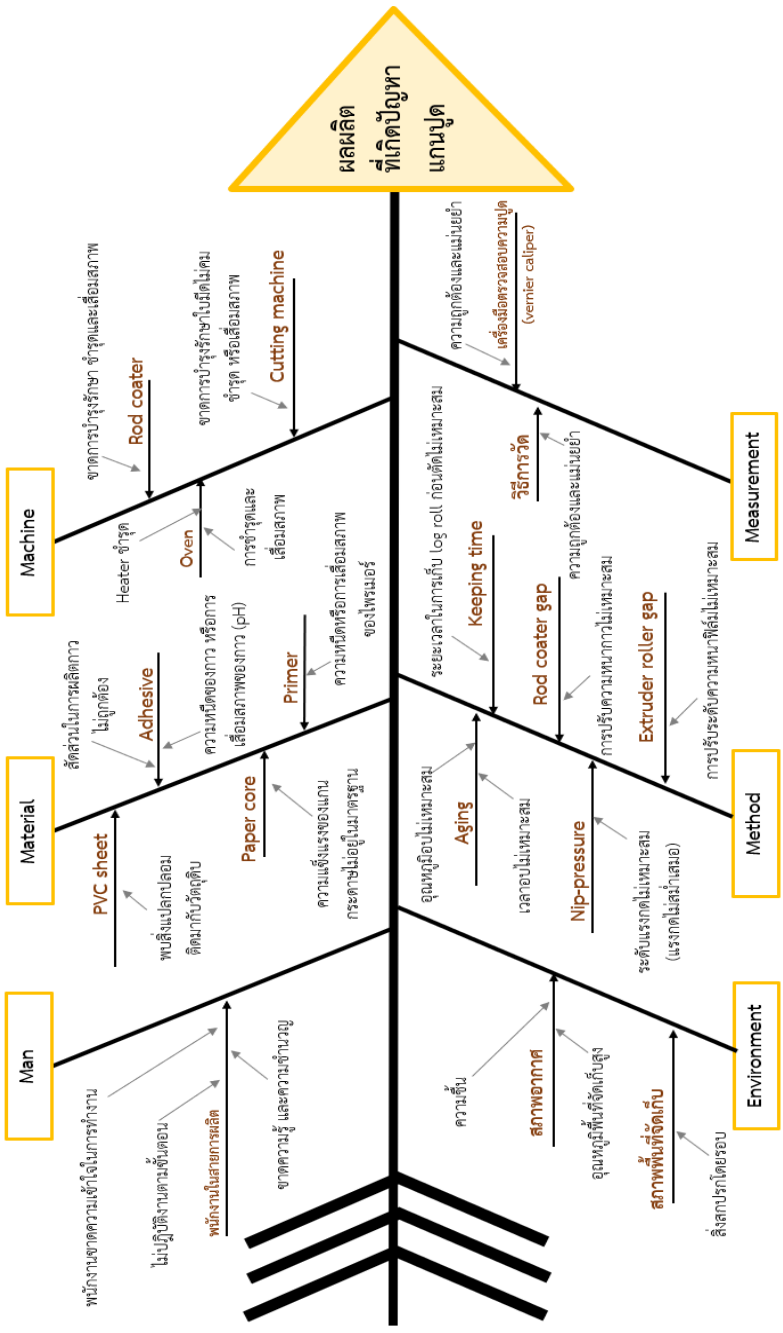
ผลิตในโรงงานและมีการการตรวจสอบคุณภาพของสินค้าเรียบร้อยแล้ว สินค้าจะถูกบรรจุลงตู้คอนเทนเนอร์โดยในระหว่างการขนส่งจะต้องเจอกับสภาพอากาศที่มีสภาวะอุณหภูมิสูงและความชื้นตลอดระยะเวลาในการเดินทาง จนเมื่อสินค้าไปถึงลูกค้าจึงได้พบว่าเทปมีการปูดเกิดขึ้นจำนวนมาก

จากปัญหาที่พบนี้สร้างความเสียหายต่อโรงงานเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีผลต่อลูกค้าโดยตรงที่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ทำให้จำเป็นต้องมีการเคลมกลับมาที่โรงงาน และทางโรงงานจะต้องทำการรับผิดชอบด้วยการส่งผลิตภัณฑ์ดีไปให้ใหม่อีกครั้ง (การขนส่งทางอากาศ) ทำให้เกิดความสูญเสียทั้งเวลา ต้นทุนและรายได้ รวมถึงความเชื่อใจจากลูกค้าที่ลดลงด้วย ดังนั้นปัญหาแกนปูดจึงเป็นสิ่งที่โรงงานกรณีศึกษากังวลมากประเภทหนึ่ง

ในปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษา ได้นำวิธีการตรวจสอบเทปปูดภายหลังการผลิต เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาก่อนถึงมือลูกค้า โดยการใช้วิธีจำลองสภาวะการขนส่งของเทปเมื่อได้รับความร้อนและความชื้นเป็นเวลานาน กล่าวคือ การนำตัวอย่างเทปแต่ละล็อตการผลิตมาอบในตู้อบความชื้นด้วยอุณหภูมิ 80^{o}C x ความชื้น 90%H x เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเร่งให้เกิดการปูด สำหรับลดเวลาในการตรวจสอบ (เงื่อนไขการตรวจสอบเป็นมาตรฐานที่ได้รับมาจากหน่วยงานวิจัยและพัฒนาจากต่างประเทศ) หลังจากนั้นจะทำการวัดส่วนสูงของเทป โดยใช้เวอร์เนียแบบดิจิตอล (Vernier Caliper) ซึ่งมีมาตรฐานในการวัดคือ ความสูงของเทปหลังอบต้องไม่เกิน 2 มิลลิเมตรเทียบกับหน้ากว้างของเทปชนิดนั้นๆ โดยหากเทปปูดเพียงหนึ่งชิ้นจะถือว่าล็อตการผลิตนั้นมีของเสียเกิดขึ้น และจะต้องระงับการส่งออกไปให้ลูกค้าในทันที ซึ่งปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษามีเพียงวิธีการตรวจสอบเทปปูด เพื่อป้องกันไม่ให้ปัญหาหลุดรอดไปถึงลูกค้าได้เท่านั้น ยังไม่มีวิธีการที่สามารถลดการเกิดของเสียประเภทแกนเทปปูดนี้ได้ ทำให้ปัญหานี้ยังคงอยู่ในกระบวนการผลิตต่อเนื่องมายาวนาน และจากปัญหาข้างต้นจะเห็นได้ว่าเทปพันสายไฟประเภท C07T มีผลผลิตที่เป็นของเสียประเภทแกนเทปปูดสูง ทำให้เกิดการสูญเสียต้นทุนรวมถึงผลกำไรที่ลดลงมากกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ อีกทั้งยังเป็นปัญหาที่เกิดมาอย่างต่อเนื่องยาวนาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกที่จะทำการศึกษาและวิเคราะห์หาปัจจัยต่างๆที่จะส่งผลต่อการเกิดปัญหาแกนเทปปูด โดยดำเนินการปรับปรุงตามแนวคิดและหลักการของซิกซ์ ซิกมา เพื่อลดปัญหาแกนปูดของเทปพีวีซี และสามารถเพิ่มผลผลิตของผลิตภัณฑ์ดี ส่งผลต่อการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มผลกำไรในระยะยาว อีกทั้งยังมีความเป็นไปได้ที่จะทำการศึกษาขยายผลการปรับปรุงไปยังเทปชนิดอื่นๆที่อาจเกิดปัญหาแกนเทปปูดได้อีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากปัญหาการเกิดของเสียประเภทแกนเทปปูดในผลิตภัณฑ์ชนิด C07T จึงได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุตามแนวคิดซิกซ์ ซิกมา ตามหลัก 5M1E โดยใช้แผนภูมิแสดงสาเหตุและผลของปัญหา (Cause and Effect analysis) ดังรูปที่ 12



รูปที่12 แผนภาพแสดงสาเหตุและผลของปัญหา

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดจากปัญหาแกนเทปปูดในกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟชนิด C07T ให้เหลือต่ำกว่า 10% ตามนโยบายของโรงงานกรณีศึกษา โดยประเมินจากความสูงของแกนเทปปูดต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของโรงงาน (ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร) ด้วยการประยุกต์แนวทางซิกซ์ ซิกมาใช้ในการปรับปรุง

1.5 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการผลิตเทปพันสายไฟในโรงงานกรณีศึกษาเท่านั้น
2. ศึกษาและปรับปรุงเฉพาะของเสียประเภทแกนเทปปูดที่เกิดในผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟชนิด C07T
3. ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ และโปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ข้อมูล
4. ตัวชี้วัดคือความสูงของแกนเทปปูดไม่เกิน 2 มิลลิเมตร โดยจะนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของเสียเทียบกับกระบวนการผลิตเดิม
5. ไม่พิจารณาในการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของวัตถุดิบ (Material)

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. จำนวนของของเสียประเภทแกนปูดในผลิตภัณฑ์ชนิด C07T ลดลง
2. ทราบปัจจัยที่ทำให้เกิดของเสียประเภทแกนปูดในผลิตภัณฑ์ชนิด C07T
3. เป็นแนวทางในการลดของเสียประเภทแกนปูดสำหรับเทปพันสายไฟชนิดอื่นๆในโรงงานกรณีศึกษา
4. ลดความสูญเสียด้านต้นทุนและเกิดความคุ้มค่าในการปรับปรุง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟ เพื่อลดของเสียประเภทแกนเทปปูดตามเป้าหมาย โดยมีขั้นตอนตามหลักของซิกซ์ ซิกมา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการกำหนดปัญหา (Define phase : D)
   - ศึกษาข้อมูลกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟ และรวบรวมปัญหาที่เกิดขึ้นกับเทปพันสายไฟชนิด C07T
   - ศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปัญหาแกนเทปปูด เพื่อนำมาอ้างอิง หรือเป็นแนวทางในการปรับปรุง

- เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน
- กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ เป้าหมาย ตัวชี้วัด ขอบเขต และระยะเวลาการดำเนินโครงการ

2. ขั้นตอนการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure phase : M)
   - วิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดต่างๆ (Gage Repeatability and Reproducibility, G R&R) ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์
   - รวบรวมข้อมูลต่างๆและระดมความคิดเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยเครื่องมือแผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram), ตารางวิเคราะห์หาสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบต่างๆ (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) เพื่อคัดกรองปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาแกนเทปปูด
3. ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา (Analyze phase : A)
   - นำปัจจัยที่คัดกรองได้มาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางสถิติ ได้แก่ การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)
   - กำหนดปัจจัยและสภาวะในการทดลองเพื่อออกแบบการทดลอง (DOE) ที่เหมาะสม
   - วิเคราะห์เพื่อเลือกแนวทางในการทดลองในห้องปฏิบัติการ
   - กำหนดขั้นตอนการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลและทำการทดลองตามแบบที่วางไว้
   - วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเพื่อเลือกสาเหตุของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากการจัดอันดับความสำคัญ เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุงต่อไป
4. ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ (Improve phase : I)
   - ระดมความคิดเพื่อหาข้อสรุปแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขปัญหา
   - นำข้อมูลจากการทดลองไปหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยโดยการทำ Response Optimuze มาทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการปรับปรุงเป็นไปตามเป้าหมาย
   - เก็บข้อมูลเพื่อวัดผลของข้อมูลหลังกระบวนการปรับปรุงแก้ไข เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง
5. ขั้นตอนการติดตามควบคุมกระบวนการ (Control phase : C)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- พิจารณาเลือกแผนภูมิควบคุมที่เหมาะสมกับตัวแปรที่เลือกใช้
- กำหนดวิธีการวัด พิจารณากลุ่มตัวอย่างและความถี่ในการวัด
- เก็บรวบรวมข้อมูลหลังการปรับปรุง
- สรุปผลการปรับปรุงที่ได้โดยพิจารณาเปรียบเทียบผลจากความสูงของแกนเทปที่ลดลง และนำไปคำนวณสัดส่วนของเสีย
- กำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟ

6. สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.8 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ช่วงเวลาในการดำเนินงานตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2564 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2565

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเพื่อลดของเสียที่เกิดจากแกนเทปปูดของเทปพันสายไฟในรถยนต์นี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยจะมีการนำหลักการและแนวคิดของซิกซ์ ซิกมา มาเป็นพื้นฐานในการปรับปรุงคุณภาพของเทปพันสายไฟ เพื่อแก้ปัญหาได้ถูกต้องตรงตามวัตถุประสงค์ รวมถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุที่เป็นโพลีไวนิลคลอไรด์, แรงเกาะติดของสารกาว และการศึกษางานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำความรู้ที่ได้มาปรับปรุง และประยุกต์ใช้กับงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ประวัติความเป็นมา

ซิกมา σ (Sigma) เป็นพยัญชนะตัวหนึ่งในภาษากรีกที่นักสถิตินำมาใช้แสดงระดับความเชื่อมั่นในกระบวนการ รวมถึงระดับความสามารถของกระบวนการในการผลิตงานให้ครบถ้วนตามข้อกำหนด (specification) โดยผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่ให้เครดิตกับ Walter Shewhart นักฟิสิกส์ วิศวกร และนักสถิติชาวอเมริกัน สำหรับการเป็นผู้เริ่มพิจารณาว่า สิ่งใดที่เบี่ยงเบนไป 3σ จากค่าเฉลี่ยนั้นจำเป็นต้องปรับปรุง

การเริ่มต้นของซิกซ์ ซิกมา มาจากการเป็นแนวคิดในการควบคุมคุณภาพที่พัฒนาขึ้นโดย Dr. Mikel Harry ผู้ได้ชื่อว่าเป็นบิดาของ Six Sigma ร่วมกับ Bill Smith และทีมวิศวกรของบริษัท Motorola ในปี คศ. 1986 (พศ.2533) ซึ่งได้รับการสนับสนุนอย่างเต็มที่จาก Bob Galvin CEO ของ Motorola ในขณะนั้น จึงทำให้งานราบรื่นขึ้น โดย Bill Smith หนึ่งในวิศวกรของ Motorola อธิบายว่าระดับความไม่สมบูรณ์ที่ยอมรับได้สำหรับ Motorola คือ Six Sigma ซึ่งเท่ากับข้อบกพร่อง 3.4 ต่อล้านชิ้น การค้นพบนี้ทำให้ Motorola ต้องประเมินระดับคุณภาพโดยการวัดข้อบกพร่องเป็นจำนวนนับล้านแทนที่จะเป็นพัน ซึ่งเป็นวิธีการแบบเดิม การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้เกิดการปรับปรุงอย่างมากในความสามารถการประเมินและปรับปรุง ระดับคุณภาพ Six Sigma ช่วยให้ Motorola ทำงานได้อย่างคุ้มค่าโดยปราศจากข้อบกพร่องมากกว่า 90% ของเวลาทั้งหมด ส่งผลให้ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่างๆ ของบริษัทจนถึงปี 2005 ได้มากกว่า 17,000 ล้านเหรียญสหรัฐ และประสบความสำเร็จจนหลายบริษัทเริ่มนำทฤษฎี Six Sigma มาใช้ตามกันอย่างแพร่หลายหลังจากนั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หลังจาก Motorola นำวิธีการนี้ไปใช้ทั่วทั้งบริษัท เครื่องมือการจัดการกระบวนการใหม่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าประสบความสำเร็จ ซึ่งทำให้ Motorola ได้รับรางวัล Malcolm Baldrige National Quality Award ในปี 1988 รางวัลนี้ยกย่องค์กรในภาคส่วนต่างๆ ที่ประสบความสำเร็จในการปฏิบัติงานที่เป็นเลิศ และได้มีการจดลิขสิทธิ์เมื่อวันที่ 11 มิถุนายน ค.ศ. 1991 (Contributor, 2021) (Pyzdek & Keller, 2003)

2.1.1 ความหมาย

จากที่ซิกซ์ ซิกมา เป็นแนวคิดที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงได้เกิดคำนิยาม และการให้ความหมายที่หลากหลายจากผู้เชี่ยวชาญ ดังนี้

ซิกซ์ ซิกมา เป็นกลยุทธ์และวิธีการที่อิงตามสถิติ เน้นกระบวนการ ขับเคลื่อนด้วยข้อมูล ควบคู่ไปกับแนวคิดการจัดการและเครื่องมือ ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลลัพธ์ของกระบวนการ พยายามที่จะระบุสาเหตุของความล้มเหลวและลดความแปรปรวนในกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่สำคัญในด้านต่างๆ (Pyzdek & Keller, 2003)

ซิกซ์ ซิกมา เป็นโครงการที่มุ่งเน้นการใช้หลักการทางสถิติมาใช้วิเคราะห์ข้อมูลต่างๆเพื่อปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการหรือระบบที่ทำงานอยู่ และลดความแปรปรวนในกระบวนการหรือระบบการผลิต ซึ่งจุดประสงค์และผลลัพธ์ที่คัญคือ ของเสียในกระบวนการผลิตลดลง จะส่งผลให้เกิดการเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และบริการ รวมถึงการเพิ่มผลกำไรให้แก่บริษัท (ปรียาวดี, 2558)

ซิกซ์ ซิกมา เป็นกลยุทธในการพัฒนาความสามารถให้ทำกำไรสูงสุดกับธุรกิจ โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดของเสีย กำจัดหรือลดความแปรปรวน ลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการผลิต รวมไปถึงเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการตอบสนองความต้องการของลูกค้า โดยใช้เครื่องมือ และเทคนิคทางสถิติมาเป็นตัวช่วยที่สำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ (Coronado & Antony, 2002)

ประสิทธิภาพของแนวทางการบริหารองค์กรในแบบซิกซ์ ซิกมา เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องมือบริหารคุณภาพในรูปแบบอื่นๆ ก็จะยิ่งช่วยให้การบริหารองค์กรเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถบรรลุเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง โดยซิกซ์ ซิกมา สามารถลดจุดอ่อน หรือช่องโหว่ของเครื่องมือบริหารคุณภาพบางอย่างได้เป็นอย่างดี และยังสามารถเป็นตัวเสริมสำหรับเครื่องมือบริหารคุณภาพบางอย่าง เพื่อช่วยให้การบริหารองค์กรมีประสิทธิผลมากยิ่งขึ้น (Park, 2003)

หลักการหรือแนวคิดของซิกซ์ ซิกมา มีพื้นฐานมาจากแนวความคิดในเชิงสถิติ ภายใต้สมมติฐานที่ว่า 1.ทุกสิ่งทุกอย่างคือกระบวนการ 2.ทุกกระบวนการมีความแปรปรวนที่หลากหลายอยู่ตลอดเวลา 3.การนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อให้เกิดความเข้าใจในธรรมชาติของความแปรปรวนที่หลากหลาย จะนำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการให้ดียิ่งขึ้น หัวใจสำคัญของวิธีซิกซ์ ซิกมา ขึ้นอยู่กับสมมติฐานที่ว่า ถ้าเราสามารถนับหรือวัดจำนวนสิ่งที่มีตำหนิ บกพร่อง ผิดพลาด ที่ได้จากกระบวนการ เราก็จะสามารถหาวิธีที่จะขจัดจำนวนของเสียให้น้อยที่สุดเท่าที่จะน้อยได้ (กันยรัตน์, 2547)

2.1.2 แนวความคิดและหลักการ

จากคำนิยามของซิกซ์ ซิกมาที่หลากหลาย จึงเกิดเป็นแนวคิดที่ว่า ซิกซ์ ซิกมาเป็นเครื่องมือเพื่อปรับปรุงคุณภาพความสามารถของกระบวนการทางธุรกิจ ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และลดความแปรปรวนในกระบวนการผลิต โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติมาใช้ได้อย่างเหมาะสม นำไปสู่การลดข้อบกพร่อง และปรับปรุงผลกำไร สร้างขวัญกำลังใจให้พนักงาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือบริการ โดยกระบวนการที่มีคุณภาพระดับซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma Quality) จะใช้ระบุว่ากระบวนการสามารถดำเนินงานได้ดี ภายในขีดจำกัดกระบวนการ ±3 จากเส้นกึ่งกลางในแผนภูมิควบคุม และข้อกำหนดหรือขีดจำกัดความคลาดเคลื่อน ±6 จากเส้นกึ่งกลาง หรืออาจกล่าวได้ว่ากระบวนการที่คาดหมาย จะมีโอกาสเกิดงานที่บกพร่อง ไม่เกิน 3.4 ส่วนต่อล้านส่วน

ความมุ่งหมายของซิกซ์ ซิกมา จะเป็นไปเพื่อลดงานที่บกพร่องและสูญเปล่าในกระบวนการ สร้างความเสถียรภาพให้กับกระบวนการ จากการลดความแปรปรวนที่มีอยู่ในระบบ ทำให้กระบวนการมีองค์ประกอบที่สามารถกำหนดความหมาย, วัด, วิเคราะห์, ปรับปรุง และควบคุมได้ รวมไปถึงทำให้ทุกส่วนในองค์กรตั้งแต่ผู้บริหารระดับสูงจนถึงพนักงานเกิดความร่วมมือกันจนสำเร็จ

นอกจากนี้ แนวคิดหลักและจุดประสงค์ของซิกซ์ ซิกมา เพื่อลดของเสียจากกระบวนการผลิต รวมไปถึงการลดความผันแปรของกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้น อันจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจุดมุ่งหมายของซิกซ์ ซิกมาจะเป็นเครื่องมือและแนวคิดที่ทำให้สามารถลดต้นทุนที่เกิดจากความสูญเปล่าของกระบวนการผลิตลงได้ ซึ่งสามารถสรุปเป็นประเด็นหลักๆได้ดังนี้ (นภัสสวงศ์, 2564)

1. มุ่งเน้นที่จะปรับปรุงกระบวนการและผลิตภัณฑ์เพื่อสามารถเข้าใจในความต้องการของลูกค้า และสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างถูกประเด็น กล่าวคือ

กระบวนการซิกซ์ ซิกมามีส่วนเกี่ยวข้องกับการประเมินความพึงพอใจของลูกค้าเพื่อนำข้อมูลนั้นกลับมาปรับปรุงเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์และบริหารเป็นสำคัญ

2. การปรับปรุงคุณภาพมีการดำเนินงานอย่างเป็นระบบโดยมีการนำเครื่องมือการวิเคราะห์ทางสถิติเข้ามาสนับสนุนการวิเคราะห์ผลเพื่อกำหนดปัญหาและเป้าหมายอย่างชัดเจน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ากระบวนการซิกซ์ ซิกมาเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์บริหารจัดการข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ก่อนส่งถึงมือลูกค้า

3. เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆของกระบวนการ และความสัมพันธ์ของปัจจัยที่สมารถส่งผลถึงปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ หรืออาจเรียกว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง (Key Process Output Variables : KPOVs) หรือ Y และปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variables : KPIVs) หรือ X โดยความสัมพันธ์จองปัจจัย X, Y ส่วนมากจะถูกเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการแสดงความสัมพันธ์ $Y = f(X)$

4. การดำเนินการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้แนวคิดของซิกซ์ ซิกมา ต้องมีการประสานงานระหว่างบุคลากรที่มีความพร้อมที่จะปรับปรุงคุณภาพ โดยต้องมีการดำเนินงานแบบจัดตั้งเป็นโครงการ กล่าวคือ ต้องมีการระบุระยะเวลาในการเริ่มและสิ้นสุดโครงการ รวมถึงความร่วมมือและความสามารถของบุคลากรที่เข้ามาร่วมทีมในตำแหน่งต่างๆ ต้องมีการกำหนดให้ชัดเจน เพื่อการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และบรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการภายในระยะเวลาที่กำหนด

2.1.3 โมเดลของซิกซ์ ซิกมา

วิธีการดำเนินงานของซิกซ์ ซิกมา จะอิงตามการวัดผลการปรับปรุงกระบวนการ เป็นวิธีการที่มุ่งปรับปรุงกระบวนการและเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า (ทั้งภายในและภายนอก) แนวคิดเบื้องหลังวิธีนี้คือ การลดความผันแปรในกระบวนการ ซึ่งการลดลงนี้จะนำไปสู่ผลลัพธ์ที่สม่ำเสมอ และต้องการจากกระบวนการ ดังนั้น การปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่องเพื่อกำจัดข้อบกพร่องต่างๆจึงเป็นเป้าหมายของวิธีนี้

จำแนกระเบียบวิธีปฏิบัติ (methodology) ที่สำคัญเป็น 2 วิธี ได้แก่ DMAIC ที่ใช้กับโครงการที่มุ่งหมายจะปรับปรุงกระบวนการที่มีอยู่ในปัจจุบัน และ DMADV ที่ใช้เพื่อสร้างกระบวนการใหม่และผลิตภัณฑ์หรือบริการใหม่ โดยจากงานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงในกระบวนการปัจจุบัน จึงเลือกใช้เป็นวิธีการ DMAIC ซึ่งประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลักที่สำคัญ แสดงดังรูปที่ 13 ได้แก่ ขั้นตอนการกำหนดปัญหา (Define phase), ขั้นตอนการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา

(Measure phase), ขั้นตอนการวัดวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Analyze phase), ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ (Improve phase) และ ขั้นตอนการติดตามควบคุมกระบวนการ (Control phase) โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังจะนำเสนอ ดังนี้ (De Feo & Barnard, 2003)

รูปที่13 แผนภาพวงจรการทำงานของกระบวนการของ DMAIC
(แหล่งที่มา : https://www.slidesalad.com/product/six-sigma-dmaic-model-powerpoint-templates-diagrams/)

2.1.3.1 ขั้นตอนการกำหนดปัญหา (Define phase : D)

ระยะกำหนดปัญหาเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการเริ่มต้นปรับปรุงกระบวนการ โดยการระบุปัญหาและเป้าหมาย รวมไปถึงการตรวจสอบทรัพยากรที่มีอยู่ และประเมินขอบเขตของโครงการ ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะถูกรวบรวมไว้ในสัญญาโครงการ (Project charter) ตั้งแต่การกำหนดงานวัตถุประสงค์ และการสร้างทีมเพื่อมอบหมายในโครงการ (นภัสสวงศ์, 2564)

1. การสร้างสัญญาโครงการ (Project Charter)

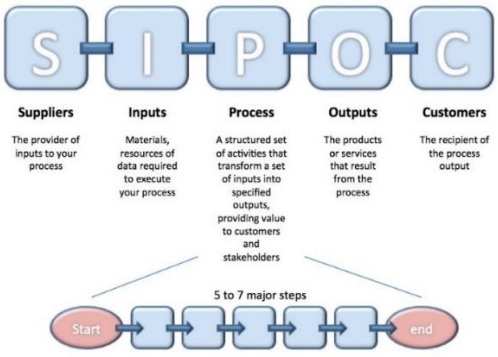
   คือการกำหนดรายละเอียดให้กับหัวข้อต่างๆ ประกอบด้วย ความสำคัญทางธุรกิจ (Business case), คำอธิบายสภาพปัญหา (Problem statement), ตัวชี้วัดในการทำโครงการ (Project metrics), วัตถุประสงค์ของโครงการ (Objective statement), ขอบเขตโครงการ (Project scope), ข้อจำกัดของโครงการ (Project constraints), สมมติฐานของโครงการ (Project assumption), สมาชิกในทีม (Team member) และระยะเวลาในการดำเนินการโครงการ (Timeline) เป็นต้น เพื่อให้เห็นถึงภาพรวมของโครงการ

2. ผังกระบวนการ (Process Mapping)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คือเครื่องมือที่ทำก่อนการเขียนสัญญาโครงการ (Project charter) ทำเพื่อให้ทีมงานและผู้ที่เกี่ยวข้องในการดำเนินโครงการเห็นมุมมองภาพรวมขององค์ประกอบที่สำคัญของกระบวนการ และมีความเข้าใจบริบทของกระบวนการได้ตรงกัน ตัวอย่างเช่น

- Value Stream Map ที่เป็นแผนภาพคำแนะนำทีละขั้นตอนเกี่ยวกับวิธีการที่กระบวนการและข้อมูลไหลไปจนกระทั่งส่งมอบให้กับลูกค้าของผลิตภัณฑ์หรือบริการขั้นสุดท้าย สามารถช่วยทีมระบุสิ่งที่ไม่ได้ให้คุณค่าแก่ลูกค้า การทำแผนที่กระบวนการของกระแสคุณค่าสามารถช่วยทีมค้นหาอุปสรรค ขั้นตอนที่สูญเปล่า และช่วยให้พวกเขาเข้าใจปัญหาได้ดีขึ้น เช่น งานระหว่างทำ เวลานำ รอบเวลา และเวลาเปลี่ยนแผนผัง
- SIPOC แผนผังที่ให้ภาพรวมระดับสูงของกระบวนการ ย่อมาจาก ผู้ส่งมอบ (Suppliers) - ปัจจัยนำเข้า (Input) - กระบวนการ (Process) - ปัจจัยนำออก (Outputs) - ลูกค้า (Customers) ดังรูปที่ 14



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่14 แผนภาพกระบวนการทำงานแบบ SIPOC

(แหล่งที่มา : https://www.marense.com/en/consulting/continuous-improvement/six-sigma-en/sipoc-en/)

2.1.3.2 ขั้นตอนการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure phase : M)

ระยะการวัดจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาเชิงตัวเลข คือการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการประเมินความสามารถของกระบวนการ และใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยระยะนี้จะเน้นที่การตรวจสอบความถูกต้องของระบบการวัด การรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นในการหาสาเหตุที่แท้จริง และดำเนินการวัดด้วยเทคนิคต่างๆ

ขั้นตอนในการเก็บข้อมูลจะเริ่มจากการจัดทำแผนในการรวบรวมข้อมูล สามารถแสดงเป็นแผนผังการไหลของกระบวนการ (Process Flow Diagram) ที่แสดงขั้นตอนการไหลของงาน เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนเก็บข้อมูล ตั้งแต่กำหนดวิธีการเก็บข้อมูล ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล ผู้รับผิดชอบในการรวบรวมข้อมูล เป็นต้น

โดยก่อนจะทำการเก็บข้อมูล ต้องมีการประเมินระบบการวัดว่าแม่นยำและเที่ยงตรงเพียงพอ เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือของข้อมูล โดยสามารถใช้เครื่องมือต่างๆ เช่น Gage Repeatability & Reproducibility (Gage R & R)

หลังจากการรวบรวมข้อมูลแล้ว ข้อมูลจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบลักษณะของข้อมูลผ่านการแจกแจงความถี่ สามารถใช้ฮิสโตแกรมเพื่อทำความเข้าใจการกระจายของข้อมูล และนำไปประเมินความสามารถของกระบวนการ โดยสามารถแสดงได้ด้วยค่าเฉลี่ยของงาน ค่าสัดส่วนของเสีย หรือค่าดัชนีวัดความสามารถของกระบวนการ (Cpk) เป็นต้น

- **การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis หรือ MSA)**

การวิเคราะห์ระบบการวัดเป็นขั้นตอนที่สำคัญ ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจ ตามหลักเหตุผลที่ว่ายิ่งมีข้อผิดพลาดในการวัดมากเท่าใด การตัดสินใจก็จะยิ่งมีข้อผิดพลาดมากขึ้นตามการวัดเหล่านั้น วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ระบบการวัดคือเพื่อให้ระบบการวัดมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการใช้งานโดยการหาปริมาณความแม่นยำ (Accuracy) พิจารณาค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริง, ความเที่ยงตรง (Precision) พิจารณาความใกล้เคียงกันของค่าที่วัดหลายๆครั้งบนชิ้นงานเดียวกัน และความเสถียร (Stability) โดยทั้งนี้การปรับปรุงคุณภาพของระบบการวัด จะมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงทั้งความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ไปพร้อมกัน (De Feo & Barnard, 2003)

ระบบการวัดสามารถกำหนดลักษณะหรืออธิบายได้ 5 วิธี (Characteristic)

- เกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความแม่นของระบบการวัด
  (ค่าที่วัดได้โดยเฉลี่ยเทียบกับค่าจริง)
  - ความเสถียร (Stability) คือ ความสามารถของระบบการวัดเพื่อสร้างค่าเดียวกันเมื่อเวลาผ่านไปเมื่อทำการวัดตัวอย่างเดียวกัน เช่นเดียวกับแผนภูมิควบคุมกระบวนการทางสถิติ

ความเสถียรหมายถึงไม่มี "รูปแบบสาเหตุพิเศษ" เหลือเพียง "รูปแบบสาเหตุทั่วไป" (รูปแบบสุ่ม)

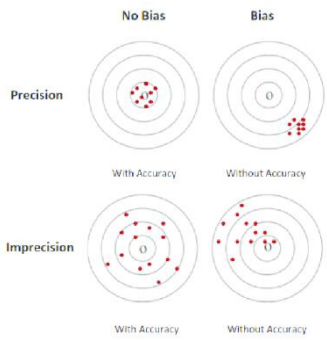
- ไบอัส (Bias) หรือที่เรียกว่าความแม่นยำ คือ การวัดระยะห่างระหว่างค่าเฉลี่ยของการวัดกับค่าจริงของตัวอย่างหรือชิ้นส่วน แสดงดังรูปที่ 15
- Linearity คือ การวัดความสม่ำเสมอของไบอัสในช่วงของอุปกรณ์วัด

■ เกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความเที่ยงของระบบการวัด (การกระจายของค่าการวัด - ความแม่น)

- Repeatability คือ ความสามารถในการทำซ้ำ จะประเมินว่าผู้ประเมินรายเดียวกันสามารถวัดชิ้นส่วนต่อตัวอย่างเดียวกันได้หลายครั้ง ด้วยอุปกรณ์วัดเดียวกันหรือไม่ และได้ผลเป็นค่าเดียวกันหรือไม่
- Reproducibility คือ ความสามารถในการทำซ้ำ จะประเมินว่าผู้ประเมินที่แตกต่างกันสามารถวัดชิ้นส่วน/ตัวอย่างเดียวกันด้วยอุปกรณ์วัดเดียวกันและได้ผลเป็นค่าเดียวกันหรือไม่

ในการวิเคราะห์ระบบการวัด จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Gage repeatability and reproducibility หรือ Gage R&R ที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำของเครื่องมือวัด โดยทำให้แน่ใจว่าการวัดนั้นสามารถทำซ้ำแบบ Repeatability และทำซ้ำแบบ Reproducibility ได้ กระบวนการนี้จะรวมถึงการใช้ชุดการวัดเพื่อรับรองว่าผลที่ได้ออกมา (Output) เป็นค่าเดียวกับค่าที่ป้อนเข้าไป (Input) และการวัดเดียวกันนี้ อยู่ภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกันตลอดระยะเวลาที่กำหนด (Walker et al., 2018)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่15 แผนภาพความแตกต่างระหว่างความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) (แหล่งที่มา : https://www.researchgate.net/publication/255725267_Adoption_of_IFRS_and_the_Properties_of_Analysts%27_Forecasts_The_Brazilian_Case/figures?lo=1)

ข้อกำหนดทั่วไปของความสามารถระบบการวัด

- มีความเสถียรภาพทางสถิติเมื่อเวลาผ่านไป
- ความแปรปรวนน้อยกว่าความแปรปรวนของกระบวนการ
- ความแปรปรวนน้อยเมื่อเทียบกับขีดจำกัดข้อมูลจำเพาะ (Specification limit)
- ความละเอียดหรือการเลือกปฏิบัติของอุปกรณ์วัดต้องมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนของข้อกำหนดเฉพาะ (Specification tolerance) หรือการแพร่กระจายของกระบวนการ (Variation) ที่น้อยกว่า ตามหลักการทั่วไป ระบบการวัดควรมีความละเอียดอย่างน้อย 1 ใน 10 ของค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจำเพาะ หรือการแพร่กระจายของกระบวนการอย่างน้อย 1 ใน 10 หากความละเอียดไม่เพียงพอ ระบบการวัดจะไม่รู้จักความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง

2.1.3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา (Analyze phase : A)

ในระยะนี้เป็นส่วนที่วิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาอย่างละเอียดถี่ถ้วนจากขั้นตอนการวัดและใช้ข้อมูลดังกล่าวเพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลที่เกิดขึ้นรวมถึงรากเหง้าของงานที่บกพร่องได้อย่างชัดเจน ซึ่งจุดประสงค์ของการวิเคราะห์ข้อมูลจะคือเพื่อระบุและขจัดสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่เหมาะสม มีขั้นตอนและเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ค้นหาสาเหตุที่เป็นไปได้ ระบุสิ่งที่อาจก่อให้เกิดปัญหา ทีมงานโครงการไม่ควรแยกแยะสาเหตุที่เป็นไปได้
2. จำกัดรากเหง้าสาเหตุให้แคบลง โดยระบุสาเหตุที่เป็นไปได้มากที่สุดที่จะนำไปสู่ปัญหา
3. ค้นหาสาเหตุที่แท้จริงที่สำคัญ – จุดที่การลดหรือกำจัดสาเหตตุนั้นๆ แล้วทำให้เกิดความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนในทันที ซึ่งสาเหตุหลักที่สำคัญเหล่านี้จะเป็นจุดสำคัญของระยะปรับปรุงต่อไป

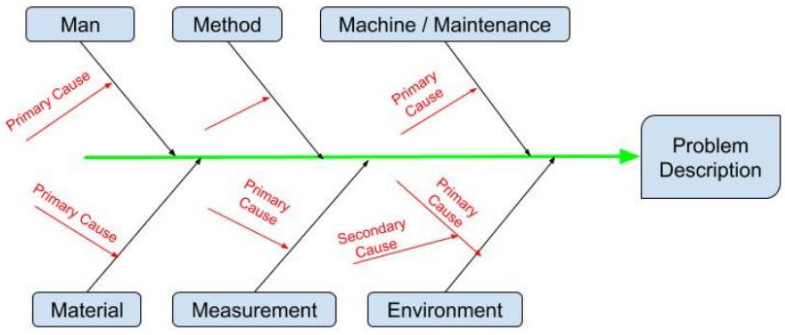
- **เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา**
  - แผนภาพแสดงสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

บางครั้งเรียกว่า แผนภาพก้างปลา (Fishbone Diagram) ตามลักษณะของแผนภาพแสดงดังรูปที่ 16 ซึ่งเครื่องมือนี้ช่วยให้ทีมสามารถระบุสาเหตุของปัญหา ที่ส่งผลกระทบต่องานถัดไป โดย

สาเหตุมักเกี่ยวข้องกับ 5M1E ได้แก่ กำลังคน (Man), วิธีการ (Method), การวัด (Measurement), วัตถุดิบ (Material), เครื่องจักร (Machine) และ สภาพแวดล้อม (Environment)

ขั้นตอนการทำแผนภาพก้างปลา

1. ตั้งหัวข้อปัญหา (problem statement) โดยเขียนไว้ตรงกลางด้านขวาของชาร์ต แล้ววาดลูกศรแนวนอนที่วิ่งเข้าหาปัญหา
2. ระดมความคิดเป็นหมวดหมู่หลักของสาเหตุของปัญหา ได้แก่ 5M1E
3. เขียนประเภทของสาเหตุออกเป็นกิ่งก้านจากลูกศรหลัก
4. ระดมความคิด ในการหาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหา โดยตั้งคำถามว่า "ทำไมสิ่งนี้จึงเกิดขึ้น" เมื่อแต่ละแนวคิดได้รับการยอมรับจากสมาชิก จะเขียนเป็นสาขาจากหมวดหมู่ที่เหมาะสม โดยสาเหตุสามารถเขียนได้หลายตำส่วนหากเกี่ยวข้องกับหลายประเภท
5. เขียนสาเหตุย่อย แยกจากสาเหตุก่อนหน้า โดยตั้งคำถามต่อไปและสร้างสาเหตุในระดับลึกขึ้น ของแต่ละกิ่งก้าน เป็นการบ่งบอกถึงความสัมพันธ์เชิงสาเหตุ
6. เมื่อภายในกลุ่มไม่มีความคิดเห็นเพิ่มเติมแล้ว ให้ตรวจสอบสาเหตุที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุดบนไดอะแกรม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนและความสำคัญของปัญหา ซึ่งอาจรวมถึงการตั้งค่าการตรวจสอบ การสำรวจ และอื่นๆ สิ่งเหล่านี้จะได้รับการออกแบบเพื่อทดสอบว่าสาเหตุที่เป็นไปได้ใดที่ทำให้เกิดปัญหา



รูปที่16 รูปแบบของแผนภาพแสดงสาเหตุและผล

(แหล่งที่มา : https://knowledge-swami.com/ishikawa-fish-bone-cause-and-effect-diagram/)

ก่อนการสรุปปัญหา ควรที่จะให้น้ำหนักหรือคะแนนปัจจัยต่างๆ เพื่อจัดลำดับของผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้มากที่สุด โดยสามารถใช้เกณฑ์การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่อง และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือ FMEA ในขั้นตอนต่อไป

- **การวิเคราะห์ผลกระทบของโหมดความล้มเหลว (Failure Mode and Effects Analysis ,FMEA)**

FMEA เริ่มต้นในทศวรรษที่ 1940 โดยกองทัพสหรัฐฯ การวิเคราะห์ผลกระทบของความล้มเหลวเป็นแนวทางหนึ่งในการระบุความล้มเหลวที่เป็นไปได้ทั้งหมดในการออกแบบกระบวนการผลิต การประกอบ ของผลิตภัณฑ์หรือบริการ หรือเป็นเครื่องมือวิเคราะห์กระบวนการทั่วไป

"Failure Mode" หมายถึงข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องใดๆที่เกิดขึ้นได้จริง หรือมีโอกาสเกิดขึ้น ที่จะสามารถส่งผลกระทบต่อลูกค้าได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลกระทบจึงหมายถึงการศึกษาผลของความล้มเหลวเหล่านั้น โดยความล้มเหลวทั้งหมด จะได้รับการจัดลำดับความสำคัญตามความร้ายแรงของผลที่ตามมา หรือตามความถี่ที่เกิดขึ้น และความสามารถในการตรวจพบได้ง่าย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของ FMEA คือการดำเนินการเพื่อขจัดหรือลดความล้มเหลว โดยเริ่มจากสิ่งที่มีความสำคัญสูงสุด

การวิเคราะห์โหมดความล้มเหลวและผลกระทบยังเป็นการบันทึกความรู้ และการดำเนินการเกี่ยวกับความเสี่ยงที่จะเกิดความล้มเหลว เพื่อใช้ในการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง โดย FMEA จะเริ่มใช้ในช่วงระยะแรกสุดของการออกแบบ และดำเนินการต่อเนื่องไปตลอดอายุของผลิตภัณฑ์หรือบริการเพื่อป้องกันและควบคุมไม่ให้เกิดความล้มเหลวตลอดการดำเนินงาน

การใช้ FMEA จะพิจารณาจากเหตุการณ์ดังนี้

- เมื่อกระบวนการ ผลิตภัณฑ์ หรือบริการได้รับการออกแบบใหม่ หลังจากการปรับใช้ฟังก์ชันคุณภาพ (QFD)
- เมื่อมีการนำกระบวนการ ผลิตภัณฑ์ หรือบริการที่มีอยู่ไปใช้ในรูปแบบใหม่
- ก่อนพัฒนาแผนควบคุม (Control plan) สำหรับกระบวนการใหม่ หรือกระบวนการแก้ไข
- เมื่อมีการวางแผนเป้าหมายการปรับปรุงสำหรับกระบวนการ ผลิตภัณฑ์ หรือบริการที่มีอยู่
- เมื่อวิเคราะห์ความล้มเหลวของกระบวนการ ผลิตภัณฑ์ หรือบริการที่มีอยู่

ขั้นตอน FMEA โดยทั่วไป (Tague, 2005)

1. รวบรวมทีมงานจากสายงานที่มีความรู้หลากหลายเกี่ยวกับกระบวนการ ผลิตภัณฑ์ หรือบริการ และความต้องการของลูกค้า ที่ทำหน้าที่ : การออกแบบ การผลิต คุณภาพ การทดสอบ ความน่าเชื่อถือ การบำรุงรักษา การจัดซื้อ การขาย การตลาด (และลูกค้า) และการบริการลูกค้า
2. ระบุขอบเขตของ FMEA ทั้งแนวคิด ระบบ การออกแบบ กระบวนการ หรือบริการอะไร ขอบเขตคืออะไร ควรละเอียดเพียงใด โดยใช้ผังงานเพื่อระบุขอบเขต และเพื่อให้แน่ใจว่าสมาชิกในทีมทุกคนเข้าใจในรายละเอียดเหมือนกัน
3. ระบุหน้าที่ในขอบเขตของแต่ละหน่วยงาน โดยตั้งคำถามถึงจุดประสงค์ของระบบ การออกแบบ กระบวนการ หรือบริการ ความคาดหวังของลูกค้า โดยจะแบ่งขอบเขตออกเป็นระบบย่อยเป็นชิ้นส่วน การประกอบ หรือขั้นตอนกระบวนการที่แยกกัน และระบุหน้าที่ของแต่ละส่วน
4. สำหรับแต่ละฟังก์ชัน ให้ระบุความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นทั้งหมด
5. สำหรับแต่ละโหมดความล้มเหลว ระบุผลที่ตามมาได้ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในระบบ กระบวนการ ผลิตภัณฑ์ บริการ ลูกค้า หรือระเบียบข้อบังคับ (เขียนสิ่งที่จะเกิดอะไรขึ้นเมื่อความล้มเหลวนี้เกิดขึ้น)
6. กำหนดว่าแต่ละผลกระทบมีความร้ายแรงเพียงใด โดยที่ระดับความรุนแรง หรือ S (Severity) มักถูกจัดในระดับ 1 ถึง 10 โดยที่ 1 ไม่มีนัยสำคัญ และ 10 เป็นระดับความรุนแรงสูงสุด หากโหมดความล้มเหลวมีผลกระทบมากกว่าหนึ่ง ให้เขียนในตาราง FMEA เฉพาะระดับความรุนแรงสูงสุดสำหรับโหมดความล้มเหลวนั้น
7. สำหรับแต่ละโหมดความล้มเหลว ให้ระบุสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์สาเหตุ ตลอดจนความรู้และประสบการณ์จากทีมงาน
8. สำหรับแต่ละสาเหตุ กำหนดระดับโอกาสที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้น หรือ O (Occurrence) การให้คะแนนนี้จะประเมินความน่าจะเป็นของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นจากสาเหตุนั้นในตลอดช่วงขอบเขตของแต่ละส่วนงาน การเกิดขึ้นมักจะได้รับการจัดอันดับในระดับ 1 ถึง 10 โดยที่ 1 คือไม่น่าเป็นไปได้อย่างยิ่ง และ 10 เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้
9. สำหรับแต่ละสาเหตุ ระบุการควบคุมกระบวนการ นั่นคือการทดสอบ ขั้นตอน หรือกลไกที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อป้องกันไม่ให้ความล้มเหลวไปถึงลูกค้า การควบคุมเหล่านี้อาจป้องกันสาเหตุไม่ให้เกิดขึ้น ลดโอกาสที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้น หรืออาจตรวจพบความล้มเหลวหลังจากสาเหตุได้เกิดขึ้นแล้ว แต่จะต้องตรวจพบก่อนที่ลูกค้าจะได้รับผลกระทบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

10. สำหรับการควบคุม ให้กำหนดระดับการตรวจจับสำหรับแต่ละสาเหตุ หรือ D (Detection) การให้คะแนนนี้จะประเมินว่าการควบคุมสามารถตรวจหาสาเหตุหรือโหมดความล้มเหลวได้ดีเพียงใดหลังจากที่เกิดความล้มเหลวขึ้น โดยจะต้องเกิดก่อนที่ลูกค้าจะได้รับผลกระทบ การตรวจจับมักจะได้รับการจัดอันดับในระดับตั้งแต่ 1 ถึง 10 โดยที่ 1 หมายถึงการควบคุมนั้นแน่นอนที่จะตรวจพบปัญหา และ 10 หมายถึงการควบคุมนั้นไม่แน่นอนที่จะตรวจพบปัญหา (หรือไม่มีการควบคุมอยู่)
11. การจัดประเภทสำหรับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ มักจะได้ระบุเป็น Y หรือ N เพื่อแสดงว่าจำเป็นต้องมีการควบคุมพิเศษหรือไม่ โดยปกติ ลักษณะสำคัญจะมีความรุนแรง 9 หรือ 10 และระดับการเกิดขึ้นและการตรวจจับจะอยู่ที่สูงกว่า 3
12. ทำการคำนวณ Risk Priority Number (RPN) ซึ่งเท่ากับ S × O × D คือการคูณอันดับของระดับความรุนแรง เหตุการณ์ และการตรวจจับจะทำให้แต่ละขั้นตอนในกระบวนการมี RPN และคำนวณ Criticality โดยการคูณความรุนแรงตามเหตุการณ์ S × O ตัวเลขเหล่านี้ จะช่วยให้สามารถจัดอันดับความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้น และบอกถึงลำดับสาเหตุที่ควรแก้ไขก่อน จากที่ค่า RPN สูงจะบ่งชี้ถึงช่องโหว่ที่ใหญ่ที่สุดของกระบวนการ และจะใช้เป็นขั้นตอนแรกในการตั้งเป้าหมายเพื่อการปรับปรุง
13. ระบุการดำเนินการแก้ไขโดยการออกแบบ หรือกระบวนการเปลี่ยนแปลงความรุนแรง หรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น อาจเป็นส่วนควบคุมเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงการตรวจจับ รวมไปถึงระบุผู้รับผิดชอบในการดำเนินการ และกำหนดเป้าหมายวันที่เสร็จสิ้น
14. เมื่อดำเนินการเสร็จสิ้น ให้บันทึกผลลัพธ์ นอกจากนี้ให้สังเกตการให้คะแนนของ S, O หรือ D ใหม่ และ RPN ใหม่ด้วยหลังการปรับปรุง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อทีมโครงการประเมินทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตแล้ว จะสามารถค้นพบความล้มเหลวที่เป็นไปได้สูงสุด และยังสามารถประเมินผลกระทบที่ความล้มเหลวที่อาจมีต่อลูกค้าได้อีกด้วย

FMEA มักใช้ในการออกแบบหรือปรับปรุงกระบวนการให้บรรลุผลสำเร็จ กล่าวคือเน้นในเรื่องของประสิทธิผล (Effectiveness) ของกระบวนการเป็นหลัก โดยกระบวนการที่ดีอย่างสมบูรณ์นั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพ (Efficiency) ของกระบวนการร่วมด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมืออื่นๆเพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการ และทำให้ต้นทุนในการดำเนินการตามกระบวนการลดลง

2.1.3.4 ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ (Improve phase : I)

เป็นขั้นตอนที่นำผลการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นตอนที่ 3 (Analyze phase) มาทดสอบ และปรับปรุงกระบวนการปัจจุบัน เพื่อการหาวิธีแก้ปัญหาที่ง่ายที่สุดที่จะขจัดปัญหาและป้องกันไม่ให้เกิดขึ้นอีก โดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น การออกแบบการทดลอง (Design of experiments), วิธีการที่ทำให้เห็นความผิดพลาดทันทีที่เกิด (Poka Yoke), มาตรฐานงานเพื่อสร้างกระบวนการใหม่ในอนาคต จากนั้นจะนำเทคนิคการบริหารงานโครงการและเครื่องมือการวางแผนที่เหมาะสมมาใช้ในการควบคุมโครงการต่อไป (นภัสสวงศ์, 2564)

การปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการเพื่อกำจัดสาเหตุที่แท้จริง เช่น

1. การออกแบบการทดลอง (DOE) เพื่อแก้ปัญหาจากกระบวนการหรือระบบที่ซับซ้อนซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์และไม่สามารถแยกปัจจัยหรือตัวแปรหนึ่งออกจากปัจจัยอื่นได้

2. งาน Kaizen เป็นการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องในการทำงาน โดยจะใช้ความคิดและแรงจูงใจของคนทำงานเป็นหลัก

- **Design of Experiments** (Montgomery, 2013)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments หรือ DOE) เป็นวิธีที่ใช้ในการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการ และหาผลลัพธ์ของกระบวนการนั้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือใช้เพื่อค้นหาความสัมพันธ์ที่เป็นเหตุและผลต่อกัน จำเป็นที่จะต้องจัดการตัวแปรนำเข้า (Input information) ของกระบวนการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลลัพธ์ที่ได้ (Output)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ดังนั้นการทำความเข้าใจเกี่ยวกับ DOE จะต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับเครื่องมือทางสถิติและแนวคิดการทดลอง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่จะเข้าใจแนวคิดพื้นฐานของ DOE เพื่อการใช้งานที่เหมาะสม

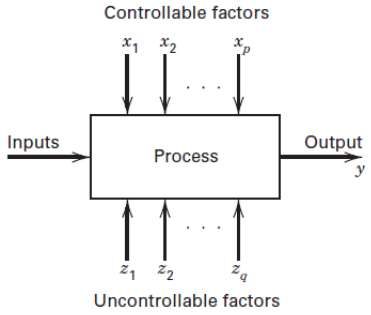
ข้อกำหนดและแนวคิดของ DOE ทั่วไป

คำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง (นภัสสวงศ์, 2564) (Montgomery, 2013)

- ตัวแปรตอบสนอง (Responses) คือ ผลลัพธ์ที่วัดได้หรือตัวชี้วัดสิ่งที่สนใจจะทำการปรับปรุงซึ่งต้องเป็นตัวแปรที่สามารถวัดค่าได้ สามารถแทนด้วยสัญลักษณ์ Y เช่น อัตราผลผลิตดี (Yield) สัดส่วนของเสีย หรือตัวแปรที่สามารถวัดค่าเป็นตัวเลขได้ เช่น ความหนาของชิ้นงาน
- ตัวแปรนำเข้าหรือปัจจัย (Factors) คือ ตัวแปรที่สามารถควบคุมและกำหนดค่าได้ในการทดลองหรือกระบวนการ (Controllable input factors) ซึ่งสามารถมีได้หลายตัวแปร เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ x (Factor x) ตัวอย่างเช่น ในการหุงข้าว ปัจจัยเหล่านี้รวมถึงปริมาณและคุณภาพของข้าวและปริมาณน้ำที่ใช้ต้ม โดยตัวแปรนำหรือปัจจัยที่เป็นไปได้นี้ สามารถจัดหมวดหมู่ได้โดยเครื่องมือวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา เช่น แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram or Fishbone Diagram) หรือจากการระดมสมอง เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่เรียกว่า ตัวแปรรบกวน (Noise variable) เป็นตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงได้ (Uncontrollable input factors) เช่น จากในตัวอย่างการหุงข้าว ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ได้แก่ อุณหภูมิในครัว ปัจจัยเหล่านี้จำเป็นต้องรับรู้เพื่อทำความเข้าใจว่าอาจจะส่งผลต่อการตอบสนองอย่างไร

ปัจจัยนำเข้าที่ควบคุมได้สามารถปรับเปลี่ยน เพื่อปรับการตอบสนองให้เหมาะสม ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองแสดงในรูปที่ 17



รูปที่17 รูปแบบทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ
(แหล่งที่มา : จากหนังสือ (Montgomery, 2013))

- ระดับของปัจจัย (Level) คือ ค่าที่จะทำการทดสอบปัจจัย โดยสามารถกำหนดระดับของปัจจัยได้สองแบบ คือ 1. หน่วยที่เป็นค่าจริงของปัจจัยนั้นๆ (Uncoded unit) และ 2. หน่วยที่เป็นค่ารหัส (Coded unit) เพื่อทำให้เห็นเป็นระดับปัจจัยที่จะทำการทดลอง โดยทุกปัจจัยจะอยู่ในสเกลเดียวกัน
- สภาวะของการทดลอง (Factor setting) คือ เซ็ตหรือคอมบิเนชั่นของปัจจัยที่ระดับต่างๆ ในการทดลองแต่ละครั้ง
- ครั้งการทดลอง (Run) คือการทดลองที่สภาวะการทดลองใดๆ โดยจำนวนครั้งการทดลองทั้งหมดจะเท่ากับจำนวนสภาวะการทดลองคูณกับจำนวนการทำซ้ำ (Replication) ในแต่ละสภาวะการทดลอง
- แต่หากไม่มีการทำซ้ำ จำนวนครั้งการทดลองทั้งหมดจะเท่ากับจำนวนสภาวะการทดลอง
- แบบการทดลอง (Design) คือ รูปแบบของแผนการทดลองที่กำหนดจำนวนสภาวะการทดลองและจำนวนครั้งการทดลองที่ต้องทำ เช่น แบบการทดลองแผคทอเรียล และแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนอง เป็นต้น
- ตารางการออกแบบ (Design Matrix) คือตารางที่แสดงระดับของปัจจัยต่างๆ ที่ต้องทำทั้งหมด ประกอบด้วยจำนวนครั้งของการทดลองทั้งหมดที่ต้องทำ (Run) และระดับของปัจจัยต่างๆที่จะทดสอบในการทดลองแต่ละครั้ง ซึ่งมักนิยมแสดงระดับของปัจจัยในหน่วยที่เป็นค่ารหัส (Coded unit) เพื่อให้เห็นโครงสร้างของแบบการทดลอง แสดงดังรูปที่ 18

		① Factor Assignment						
		Main Effects			③ Interactions			④
		A	B	C	D (A-B)	E (A-C)	F (B-C)	G (A-B-C)
② Tests	1	−	−	−	+	+	+	−
	2	+	−	−	−	−	+	+
	3	−	+	−	−	+	−	+
	4	+	+	−	+	−	−	−
	5	−	−	+	+	−	−	+
	6	+	−	+	−	+	−	−
	7	−	+	+	−	−	+	−
	8	+	+	+	+	+	+	+

รูปที่18 ลักษณะตารางการออกแบบ

(แหล่งที่มา : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Design_Of_Experiments.png)

- ผลกระทบ (Effect) ของปัจจัยที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง จะถูกวัดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรตอบสนองโดยเฉลี่ยภายใต้การทดสอบปัจจัยที่สองระดับขึ้นไป
- การจัดหมู่ (combination)

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง (นภัสสวงศ์, 2564)

1. เพื่อทดสอบผลกระทบหลักของปัจจัยที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง (Main Effect)
2. เพื่อทดสอบผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (อันตรกิริยา) ที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง (Interaction Effect)
3. เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและตัวแปรตอบสนอง ซึ่งจะใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ
4. เพื่อสนับสนุนการปรับปรุงในเรื่องการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบกระบวนการ การดำเนินงานของกระบวนการ

ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบเชิงทดลองมีความสำคัญขั้นพื้นฐานในกิจกรรมการออกแบบทางวิศวกรรม โดยมีการใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่และปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ รวมถึงมีการประยุกต์ใช้การออกแบบทดลองในการออกแบบทางวิศวกรรมด้วย (Montgomery, 2013)

โดยการออกแบบการทดลองจะช่วยประหยัดจำนวนการทดลอง (Runs) ให้มีเท่าที่จำเป็นในการให้ได้สารสนเทศเพื่อสรุปผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง หรือกล่าวได้ว่า การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการในการวางแผนการศึกษาเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด การวางแผนการทดลองอย่างถูกต้องมีความสำคัญมาก เพื่อให้แน่ใจว่าได้ข้อมูลที่ถูกต้องและมีขนาดตัวอย่างขนาดเพียงพอสำหรับการวิจัยที่สนใจให้มีความชัดเจนและมีประสิทธิภาพมากที่สุด (นภัสสวงศ์, 2564)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประเภทของแบบการออกแบบการทดลอง (นภัสสวงศ์, 2564)

1. การออกแบบการทดลองแบบทีละปัจจัย (One-Factor-at-a-Time : OFAT)

เป็นวิธีที่ทดสอบทีละปัจจัย โดยการทดสอบแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนค่าปัจจัยใดๆ เพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น และคงค่าของปัจจัยอื่นๆ ไว้ที่ค่าๆ หนึ่ง แล้วเปลี่ยนทีละปัจจัยไปเรื่อยๆ ดังนั้นการทดลองแบบนี้จะสามารถสรุปผลได้เพียงทีละปัจจัย โดยที่ไม่สามารถสรุปผลของปัจจัยอื่นๆ ที่ถูกคงค่าไว้ได้ หรือไม่สามารถศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปจจัยได้ อีกทั้งวิธีนี้จะใช้จำนวนการทดลอง และขนาดตัวอย่างมากกว่าการทดลองแบบแปรค่ามากกว่าหนึ่งปัจจัยไปพร้อมกัน ในระดับเดียวกัน

2. การออกแบบการทดลองแบบแปรค่ามากกว่าหนึ่งปัจจัยไปพร้อมกัน (DOE)

เป็นวิธีการทดสอบอย่างน้อยสองระดับ ทำให้สามารถศึกษาถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ทำการศึกษาได้ โดยวิธีนี้จะใช้ขนาดตัวอย่างโดยรวมน้อยกว่าการทดลองแบบทีละปัจจัยที่จะได้คุณภาพของผลสรุปในระดับเดียวกัน โดยการออกแบบวิธรนี้สามารถจัดประเภทได้เป็น 2 ประเภทหลัก ตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ดังนี้

ประเภทที่ 1 สำหรับวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบผลกระทบหลักของปัจจัย (Main Effect) หรือผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) ตัวใดมีต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ (Significant) โดยเพื่อประหยัดจำนวนการทดลอง สามารถทำการทดสอบแต่ละปัจจัยที่สองระดับได้ แต่ก็จะสามารถประมาณความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและตัวแปรตอบสนองในรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงเส้นได้เท่านั้น ซึ่งการทดลองประเภทนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

- แบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial design)
- แบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fraction Factorial design)

ประเภทที่ 2 สำหรับวัตถุประสงค์เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและตัวแปรตอบสนอง ซึ่งจะใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ โดยแต่ละปัจจัยต้องถูกทดสอบที่มากกว่าสองระดับ หรือเรียกว่า แบบการทดลองพื้นผิวตอบสนอง (Response surface design) ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่

- การทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD)
- การทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF (Face Centered Central Composite Design : CCF)
- การทดลองแบบ Box-Behnken

สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial design) กรณีปัจจัยที่สามระดับ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ และการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- **แบบการทดลองแฟคทอเรียล (Factorial design)** (นภัสสวงศ์, 2564) (Montgomery, 2013)

สายชล สินสมบูรณ์, 2546 อธิบายว่า การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล เป็นการสนใจศึกษาอิทธิพลของหลายๆปัจจัยไปพร้อมๆกัน ซึ่งแต่ละปัจจัยอาจมีหลายระดับ การจัดสิ่งทดลอง (Treatment) จะพิจารณาการจัดหมู่ของระดับต่างๆของปัจจัยที่เป็นไปได้ทั้งหมด ดังนั้น การทดลองแบบแฟคทอเรียลจะมีประโยชน์ในการวิจัยที่ยังไม่ทราบระดับที่เหมาะสมหรือระดับที่มีความสำคัญของปัจจัยต่างๆ

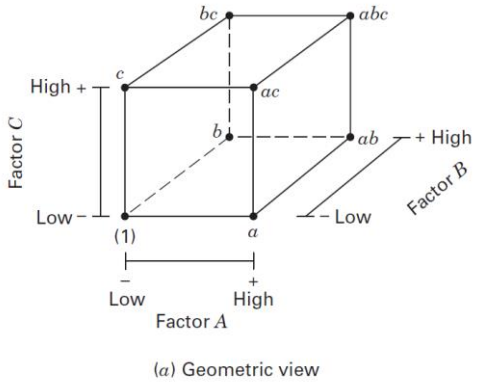
การออกแบบแฟคทอเรียลเป็นการทดลองเพื่อกำหนดผลกระทบผลกระทบหลักของปัจจัย (Main Effect) หรือผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) ตัวใดมีต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ (Significant)

ตัวอย่างเช่น หากผลลัพธ์ในการทดลองคือความหนาของกาวที่จะนำไปใช้กับแผ่นชีท และตัวแปรหลักในกระบวนการนี้คือ ความเร็ว อุณหภูมิ และความหนืดของกาว การออกแบบจะต้องคำนึงว่าควรใช้ความเร็ว อุณหภูมิ และความหนืดรวมกันเท่าใดเพื่อให้ได้ความหนาที่เหมาะสมและสม่ำเสมอบนแผ่นชีทนี้ และด้วยตัวแปรทั้งสามตัวนี้ จะต้องมีการลองจับคู่ปัจจัยหรือผสมปัจจัย (Combination) ที่ไม่ซ้ำกันเป็นชุด เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ทั้งหมด การรวมกันของความเร็ว อุณหภูมิ และความหนืดใดจะทำให้ความหนาของชั้นกาวดีที่สุด โดยการทดสอบที่ใช้ชุดของการผสมปัจจัยที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเรียกว่าการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

สามารถคำนวณจำนวนครั้งในการทดสอบด้วยสูตร (Runs) = 2^k โดยที่ k คือจำนวนตัวแปรหรือปัจจัย และ 2 คือจำนวนระดับ นั่นคือ ค่าระดับสูง (+1 หรือ high : H) และระดับต่ำ (-1 หรือ low : L) เช่น ตัวแปรความหนืดกาว ในตัวอย่างการเคลือบ มีค่าระดับสูง/ต่ำ เป็น 100 rpm/500 รอบต่อนาที ก็จะกำหนดค่าระดับสูง (500 รอบ/นาที) เป็น +1 และค่าระดับต่ำ (100 รอบ/นาที) เป็น -1 เป็นต้น โดยเราจะเรียกการออกแบบกรณีมี 3 ปัจจัย (ความเร็ว อุณหภูมิ และความหนืดของกาว) นี้ว่า แบบแฟคทอเรียล 2 ระดับ 3 ปัจจัย หรือ 2^3 design หรือ two-level factorial design โดยจำนวนการทดสอบ จะคำนวณได้เป็น 2^3 หรือ 2x2x2 ซึ่งเท่ากับจำนวนการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง

และนอกจากนี้ยังมีการออกแบบอื่นๆ ที่สามารถใช้ได้ เช่น การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fraction Factorial design) ซึ่งจะใช้เพียงเศษเสี้ยวของจำนวนการทดลองทั้งหมด โดยเศษส่วนนั้นสามารถเป็นครึ่งหนึ่ง หนึ่งในสี่ หนึ่งในแปด และอื่นๆ ขึ้นอยู่กับจำนวนของปัจจัยหรือตัวแปร

สมมติว่าปัจจัยสามประการคือ A, B และ C ซึ่งอยู่ในสองระดับเป็นที่สนใจ การออกแบบนี้เรียกว่าการออกแบบแฟคทอเรียล 2^3 รูปแบบ (2^3 factorial design) โดยสามารถแสดงการชุดการผสมของปัจจัย (treatment combinations) ทั้ง 8 แบบในเชิงเรขาคณิตเป็นลูกบาศก์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 19 (a) Geometric view และใช้รหัสมุมฉาก (orthogonal coding) เป็น "+ และ -" เพื่อแสดงปัจจัยระดับสูงและระดับต่ำ โดยอาจแสดงรายการจำนวนการทดลองทั้ง 8 ครั้ง ในการออกแบบ 2^3 เป็นตารางการออกแบบ ดังในรูปที่ 19 (b) Design matrix



(a) Geometric view

Run	Factor A	B	C
1	−	−	−
2	+	−	−
3	−	+	−
4	+	+	−
5	−	−	+
6	+	−	+
7	−	+	+
8	+	+	+

(b) Design matrix

รูปที่19 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบกรณี 3 ปัจจัย
(แหล่งที่มา : จากหนังสือ (Montgomery, 2013)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เพื่อให้การออกแบบการทดลองมีความถูกต้อง เที่ยงตรง แม่นยำ และให้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือได้นั้น จำเป็นจะต้องออกแบบโดยใช้หลักสำคัญ 3 ประการ (Three basic principles of experimental design) ได้แก่ (Montgomery, 2013)

1. การทำซ้ำ (Replication) คือ การทำการทดลองซ้ำภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน เพื่อให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้สำหรับการพิจารณาว่าความแตกต่างที่สังเกตุพบในข้อมูลมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ และเพื่อช่วยเพิ่มความแม่นยำ ความถูกต้องของผลการทดลองให้สูงขึ้น โดยหากใช้ค่าเฉลี่ยตัวอย่าง เพื่อประมาณค่าเฉลี่ยการตอบสนองที่แท้จริง สำหรับระดับปัจจัยใดระดับหนึ่งในการทดสอบ โดยการออกแบบจะแสดงดังรูปที่ 20

การทำซ้ำจะช่วยให้ทดลองได้ค่าประมาณที่แม่นยำยิ่งขึ้นในปัจจัยทดลองนั้นๆ ซึ่งการทำซ้ำนี้จะทำให้เกิดความน่าเชื่อถือในการผลการทดลองมากขึ้น โดยที่ความแม่นยำสูง ความคลาดเคลื่อนจะน้อย (ลดการกระจายของข้อมูล) ทั้งนี้ในการทดลองจะมี 2 ส่วนที่ต้องคำนึงคือ ราคาต้นทุน (Cost) และ เวลาที่จำกัด (Time) ที่ผู้ทดลองให้การยอมรับได้ด้วย จึงทำให้บางการทดลองสามารถทำได้เพียงครั้งเดียว เช่น การปล่อยจรวด เนื่องจากมีต้นทุนสูง เป็นต้น

Run order	Standard order	Factor		
		A	*B*	*C*
1	1	-	-	-
2	2	+	-	-
3	3	-	+	-
4	4	+	+	-
5	5	-	-	+
6	6	+	-	+
7	7	-	+	+
8	8	+	+	+
9	9	-	-	-
10	10	+	-	-
11	11	-	+	-
12	12	+	+	-
13	13	-	-	+
14	14	+	-	+
15	15	-	+	+
16	16	+	+	+

รูปที่20 การออกแบบแฟคทอเรียลกรณีสามปัจจัยที่สองระดับซึ่งมีการทดลองซ้ำสองครั้งและมีลำดับแบบมาตรฐาน

(แหล่งที่มา : จากเอกสารประกอบการสอนเรื่องการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา (นภัสสวงศ์, 2564))

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. การสุ่มตัวอย่าง (Randomization) คือ การจัดลำดับการทดลองให้เป็นแบบสุ่ม เพื่อขจัดความลำเอียงและความคลาดเคลื่อนของผลกระทบของตัวแปรที่ไม่รู้ หรือไม่มีการควบคุม โดยความคลาดเคลื่อนจะต้องเกิดจากการสุ่มและเป็นอิสระต่อกัน บางครั้งการทดลองจะมีสถานการณ์ที่การสุ่มตัวอย่างบางแง่มุมของการทดลองทำได้ยาก ตัวอย่างเช่น ในกระบวนการทางเคมี อุณหภูมิอาจเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงได้ยาก เนื่องจากเราอาจต้องการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าที่เราเปลี่ยนระดับของปัจจัยอื่นๆ ในการทดลองประเภทนี้ การสุ่มแบบสมบูรณ์จะเป็นเรื่องยากเพราะจะเพิ่มเวลาและค่าใช้จ่าย จึงต้องมีวิธีการออกแบบทางสถิติสำหรับจัดการกับข้อจำกัดในการสุ่ม โดยการออกแบบจะแสดงดังรูปที่ 21

Run order	Standard order	Factor		
		A	*B*	*C*
1	8	+	+	+
2	15	-	+	+
3	4	+	+	-
4	11	-	+	-
5	5	-	-	+
6	16	+	+	+
7	2	+	-	-
8	13	-	-	+
9	10	+	-	-
10	1	-	-	-
11	9	-	-	-
12	14	+	-	+
13	6	+	-	+
14	3	-	+	-
15	12	+	+	-
16	7	-	+	+

รูปที่21 การออกแบบแฟคทอเรียลกรณีสามปัจจัยที่สองระดับซึ่งมีการทดลองซ้ำสองครั้งและมีลำดับอย่างสุ่ม

(แหล่งที่มา : จากเอกสารประกอบการสอนเรื่องการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา (นภัสสวงศ์, 2564))

3. การบล็อค (Blocking) คือ เทคนิคการออกแบบที่ใช้เพื่อปรับปรุงความแม่นยำโดยเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆ ที่น่าสนใจ มักใช้การบล็อกเพื่อลดหรือขจัดความแปรปรวนที่มาจากปัจจัยรบกวน นั่นคือปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการตอบสนองในการทดลอง แต่เราไม่ได้สนใจโดยตรง หรือใช้เพื่อการกำจัดกระบวนการทดลอง ทำเมื่อมีการสุ่มปัจจัยที่เป็นไปไม่ได้หรือมีค่าใช้จ่ายสูงเกินไป โดยการบล็อกจะช่วยให้สามารถจำกัดการสุ่มตัวแปร และจะทำการทดลองทั้งหมดด้วยการตั้งค่าเพียงปัจจัยเดียว จากนั้นจึงทำการทดลองทั้งหมดด้วยการตั้งค่าอื่น โดยจะไม่ผสมตัวแปรกัน เนื่องจากจะมีความแปรปรวนสูง เช่น พนักงานหญิงทำงานประกอบชิ้นส่วนได้ละเอียดกว่าพนักงานชาย จึงเลือกบล็อคพนักงานหญิงมาทำการทดลองเพียงอย่างเดียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นตอนในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง (นภัสสวงศ์, 2564)

1. ระบุวัตถุประสงค์ของการทำการทดลอง โดยการกำหนดตัวแปรตอบสนองที่สนใจ และปัจจัยที่จะศึกษา โดยสามารถใช้เครื่องมือในการหาสาเหตุของปัญหาในการระบุปัจจัยที่จะศึกษา เช่น แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram) และ (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) และ FMEA และการกำหนดวัตถุประสงค์ที่จะศึกษา
2. กำหนดแบบการทดลองที่จะใช้ โดยพิจารณาจากวัตถุประสงค์ของการศึกษา โดยพิจารณาจำนวนปัจจัย จำนวนครั้งการทดลองที่สามารถทำได้ และคุณภาพขของผลสรุปที่จะได้จากการทดลอง

3. เขียนตารางการออกแบบ (Design matrix) ที่แสดงระดับของปัจจัยในหน่วยที่เป็นค่ารหัส (Coded unit)
4. กำหนดค่าของแต่ละระดับของปัจจัยจากหน่วยที่เป็นค่ารหัส (Coded unit) ให้เป็นค่าที่จะทำการทดสอบแบบหน่วยที่เป็นค่าจริง (Uncoded unit) เพื่อให้ทราบถึงค่าที่จะนำไปทำการทดลองจริง
5. กำหนดตัวแปรอื่นๆ ที่ไม่ได้ศึกษาที่อาจจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อควบคุมตัวแปรเหล่านั้นให้อยู่ที่ค่าคงที่ เพื่อไม่ให้มีผลกระทบกับตัวแปรที่ตั้งใจจะศึกษา
6. กำหนดตัวแปรรบกวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ เพื่อกำหนดลำดับของการทดลองในการลดผลกระทบของตัวแปรรบกวนเหล่านี้
7. ทำการทดลองตามแผนที่ออกแบบไว้ (Run experiments) และบันทึกผลการทดลอง (Yield) เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และตัวแปรตอบสนองต่อไป
8. วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยมีขั้นตอนดังนี้
   8.1 ตรวจสอบสมมติฐานว่าข้อมูลมีลักษณะที่เหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) และการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) หรือไม่ โดยจะกล่าวถึงวิธีในการตรวจสอบสมมติฐานอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป
   8.2 พิจารณากราฟผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย
   8.3 คำนวณค่าผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยและผลกระทบหลักของปัจจัย
   8.4 ทดสอบความมีนัยสำคัญของผลกระทบของปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis testing)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) เป็นวิธีการทางสถิติที่ช่วยทดสอบปัจจัยที่ไม่ทราบค่า โดยในการตั้งสมมติฐานจะกำหนดความเป็นไปได้สองลักษณะ คือ สมมติฐานที่จะทดสอบเรียกว่า สมมติฐานหลัก (Null hypothesis) แทนด้วย H_0 และสมมติฐานที่แย้งกับสมมติฐานหลัก จะเรียกว่า สมมติฐานรอง (Alternative hypothesis) แทนด้วย H_1 โดยสมมติฐานหลักจะถูกต้อง ก็ต่อเมื่อสามารถพิสูจน์ได้ว่าข้อมูลที่ทดสอบอยู่ให้ผลเป็นจริง หรือสมมติฐานรองจะถูกต้องก็ต่อเมื่อข้อมูลที่ทดสอบอยู่ให้ผลเป็นเท็จ แทนด้วย

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

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

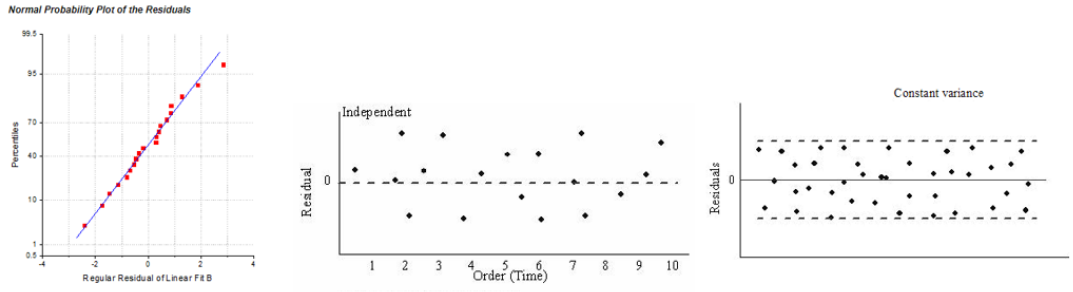
สำหรับการที่จะเชื่อถือผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์การถดถอยได้ จะต้องทดสอบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นเหมาะสมกับข้อมูลจริงในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่ โดยการยอมรับจะต้องเป็นไปตามสมมติฐาน (Assumption) 3 ข้อที่เกี่ยวกับส่วนตกค้าง (Residual) แสดงดังรูปที่ 22 และมีรายละเอียดดังนี้

* Residual คือ ความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้ และค่าทำนาย (Fitted) หรือค่าที่ประมาณได้จากสมการความสัมพันธ์ โดยคำนวณได้จาก ค่าส่วนตกค้าง = ค่าที่สังเกตได้ – ค่าประมาณจากสมการความสัมพันธ์

สมมติฐานที่ 1 : ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และพิจารณาได้จากค่าทางสถิติที่เรียกว่า p-value โดยหากมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ (Confidence Level) ที่เลือกใช้ สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

สมมติฐานที่ 2 : ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent residual) จากการพล็อตค่าส่วนตกค้างในกราฟ แล้วพิจารณาการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง โดยต้องมีการกระจายอย่างสุ่มรอบแนวแกนศูนย์

สมมติฐานที่ 3 : ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ (Variance Constance at Mean = 0)



ส่วนตกค้างมีการแจกแจงปกติ
Residual Normal Probability Plot

ส่วนตกค้างเป็นอิสระต่อกัน
(Residual Independent)

ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่
(Residual variance constant)

รูปที่22 ลักษณะสมมติฐานทั้งสามประการ
(แหล่งที่มา : https://online.stat.psu.edu/stat462/node/121/)

8.5 สร้างแบบจำลองหรือสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และตัวแปรตอบสนอง

8.5.1 สร้างแบบจำลอง (Model Forming) เพื่อแสดงถึงผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อค่าสังเกตแสดงได้ดังสมการ

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

โดยที่ Y_{ijk} คือ ค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองที่ปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j ครั้งการทดลองซ้ำที่ k

μ คือ ค่าเฉลี่ยรวม

τ_i คือ ผลกระทบหลักของปัจจัย A ที่ระดับ i

β_j คือ ผลกระทบหลักของปัจจัย B ที่ระดับ j

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ ผลกระทบหลักระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B

ε_{ijk} คือ ค่าความผิดพลาดแบบสุ่มที่ได้จากการทดลองที่ปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j ครั้งการทดลองซ้ำที่ k

8.5.2 หรือสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และตัวแปรตอบสนองในรูปแบบของเทอมที่แสดงถึงผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ถดถอย (regression equation in uncoded units) ได้ดังสมการ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_k x_k + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{k-1,k} x_1 x_k + \varepsilon$$

8.6 ปรับปรุงแบบจำลองโดยการลดรูปแบบจำลองให้มีเฉพาะเทอมที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และตัวแปรตอบสนองที่มีความกระชับ

8.7 หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization technique)

8.8 สรุปจากผลวิเคราะห์ และให้จัดทำข้อเสนอแนะที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน เพื่อกำหนดเป็นขั้นตอนมาตรฐานในการควบคุมการทำงานต่อไป

- **การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการ**
  - การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

เป็นการออกแบบที่มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าตามที่ต้องการ โดยสามารถใช้ทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง และหาสมการเส้นโค้ง(สมการ 8.5.2) ได้จากผลการทดลองที่ปัจจัยตั้งแต่ 3 ระดับขึ้นไป จากนั้นจะสามารถใช้สมการนี้ในการหาค่าที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้ (นภัสสวงศ์, 2564)

หรืออาจกล่าวเพิ่มเติมได้ว่า การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองเป็นการรวมเทคนิคการออกแบบการทางคณิตศาสตร์หรือการออกแบบขั้นสูง (DOE) และสถิติที่เกี่ยวข้อง เพื่อปรับปรุงแบบจำลองและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่สามารถส่งผลทำให้ค่าของตัวแปรตอบสนองเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ (ปารเมศ, 2545)

ความแตกต่างระหว่างสมการพื้นผิวการตอบสนอง แสดงดังรูปที่ 23 และสมการสำหรับการออกแบบแฟกทอเรียล คือการเพิ่มพจน์กำลังสอง ที่ช่วยให้สามารถจำลองความโค้งในการตอบสนองได้ ทำให้มีประโยชน์ในการทำความเข้าใจหรือทำแผนที่บริเวณพื้นผิวการตอบสนอง สมการพื้นผิวการตอบสนองช่วยจำลองการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่จะส่งผลต่อการตอบสนองที่สนใจ และใช้ในการค้นหาระดับของตัวแปรที่สามารถปรับการตอบสนองให้เหมาะสม

รูปที่23 ลักษณะพื้นผิวการตอบสนอง

(แหล่งที่มา : จาก Minitab18Support (https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/))

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง จะแบ่งออกเป็น 2 วิธีการหลัก ได้แก่

1. หลักการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD)
2. หลักการทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF (Face Centered Central Composite Design : CCF)
3. หลักการทดลองแบบ Box-Behnken

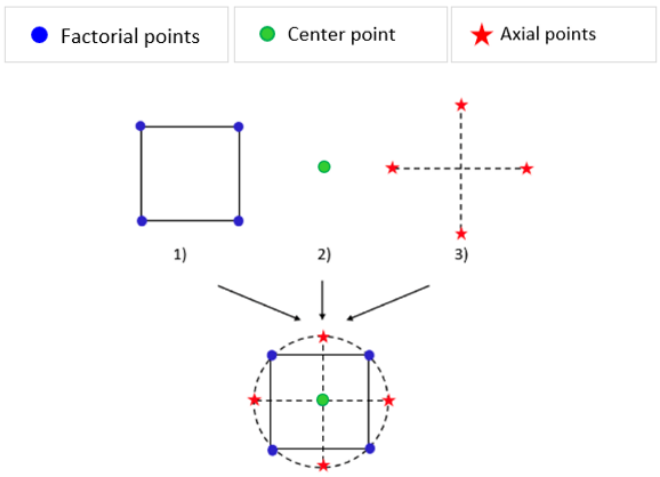
สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง โดยวิธีหลักการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) จะมีการสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นเทอมกำลังสอง (Second order model) หรือความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง เนื่องจากการการเปลี่ยนแปลง

ของตัวแปรอาจมีผลต่อค่าตอบสนองในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งแทน ซึ่งสามารถพบได้ในการทดลอง

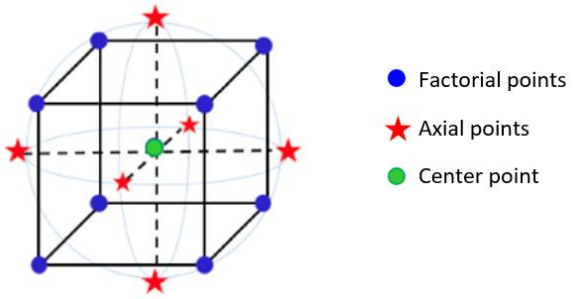
ดังนั้นการทดลองแบบส่วนประสมกลางสามารถทดสอบความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นโค้งได้ ที่ซึ่งสามารถประมาณค่าผลกระทบของเทอมกำลังสองของปัจจัยใดๆ (Quadratic) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลก่อนหน้ามาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง ประกอบกับการเพิ่มส่วนของจุดแนวแกน (Axial Runs) และจุดศูนย์กลาง (Center Runs) ในการวิเคราะห์และหาค่าที่เหมาะสม โดยการออกแบบหลักการทดลองแบบส่วนประสมกลางจะทำการออกแบบระดับปัจจัยได้เป็น 5 ระดับ (Design space : $\pm\alpha \longrightarrow$ ($-\alpha$, -1 , 0 , +1 $+\alpha$,) (นภัสสวงศ์, 2564)

ประกอบด้วยการทดลอง 3 ส่วน แสดงดังรูปที่ 24 และรูปที่ 25 ได้แก่

1. ส่วนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (จำนวนครั้งการทดลอง = 2^k) จะอยู่ที่ระดับ ±1 หรือ แฟคทอเรียลบางส่วน (จำนวนครั้งการทดลอง = 2^{k-p})
2. ส่วนของจุดแกน (Axial Runs/Axial Points/Start Runs) จะอยู่ที่ระดับ $\pm\alpha$; $\alpha = (2^{k-p})^{1/4}$ จำนวนครั้งการทดลอง = 2k (สองเท่าของจำนวนปัจจัย)
3. ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Center Runs) จะอยู่ที่ระดับกึ่งกลางที่ 0 จำนวนครั้งการทดลอง = n_c (ขึ้นอยู่กับ k)



รูปที่24 โครงสร้างของแบบการทดลองส่วนประสมกลาง กรณี 2 ปัจจัย
(แหล่งที่มา : จากเอกสารประกอบการสอนเรื่องการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา (นภัสสวงศ์, 2564))



รูปที่25 โครงสร้างของแบบการทดลองส่วนประสมกลาง กรณี 3 ปัจจัย
(แหล่งที่มา : จากเอกสารประกอบการสอนเรื่องการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา (นภัสสวงศ์, 2564))

เมื่อจุดแฟคทอเรียลและจุดแกนอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางในระยะที่เท่ากัน จะทำให้ทุกจุดใน Design space ที่ทดลองมีคุณภาพการพยากรณ์ดีเท่าเทียมกันในทุกช่วงระดับปัจจัยที่ทำการทดลอง หรือให้ความผิดพลาด (Error) เท่าเทียมกัน โดยที่ α คือ ระยะห่างของจุดแกนกลางจากจุดศูนย์กลาง และสามารถแสดงการคำนวณได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จำนวนครั้งการทดลองของการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง

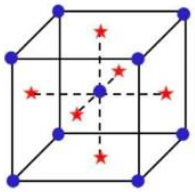
จำนวนปัจจัย (k)	ส่วนการทดลองแฟคทอเรียล (2^{k-p})	$\alpha = (2^{k-p})^{1/4}$
2	2^2	$2^{2/4} = 1.414$
3	2^3	$2^{3/4} = 1.682$
4	2^4	$2^{4/4} = 2.000$
5	2^{5-1}	$2^{(5-1)/4} = 2^{4/4} = 2.000$
5	2^5	$2^{5/4} = 2.378$
6	2^{6-1}	$2^{(6-1)/4} = 2^{5/4} = 2.378$
6	2^6	$2^{6/4} = 2.828$

Fraction Factorial design (p = 1), Full Factorial design (p = 0)

จะเห็นได้ว่าที่จำนวนปัจจัยเท่ากัน การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial design) กับการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fraction Factorial design) จะได้ α ไม่เท่ากัน ดังนั้นค่า α จึงขึ้นอยู่กับการเลือกใช้ชนิดของการออกแบบด้วย (นภัสสวงศ์, 2564)

- **การทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ CCF (Face Centered Central Composite Design : CCF)** (นภัสสวงศ์, 2564)

สำหรับการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่มีข้อจำกัดในทางปฏิบัติสำหรับบางกรณีที่ไม่สามารถปรับตั้งค่าปัจจัยได้ถึง 5 ระดับ (CCD) จึงจำเป็นต้องทดสอบแต่ละปัจจัยเพียง 3 ระดับเท่านั้น ทั้งนี้ผู้ทำการทดลองสามารถใช้โครงสร้างของแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่มี 5 ระดับได้ แต่กำหนดค่า α เป็น 1 ซึ่งจุดแกนจะอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางไม่เท่ากับการที่จุดแฟคทอเรียลอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 26 และตารางการออกแบบของแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง CCF ในกรณีมี 3 ปัจจัยจะเห็นได้ดังรูปที่ 27 ว่าแบบการทดลอง CCD และ CCF จะมีโครงสร้างและจำนวนการทดลองเท่ากัน แตกต่างกันเพียงที่ค่า α เพื่อให้แต่ละปัจจัยถูกทดลองที่ 3 ระดับ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่มีใน CCF เท่านั้น



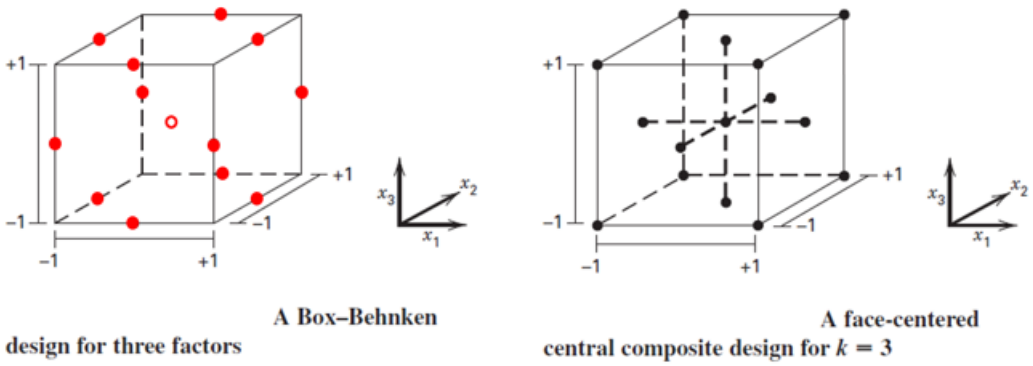
รูปที่ 26โครงสร้างของแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลางแบบ CCF กรณี 3 ปัจจัย
(แหล่งที่มา : จากเอกสารประกอบการสอนเรื่องการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา (นภัสสวงศ์, 2564))

CCD				CCF			
Rep	X1	X2	X3	Rep	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
1	1	1	-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	1	1	-1	1
1	-1	1	1	1	-1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	-1.682	0	0	1	-1	0	0
1	1.682	0	0	1	-1	0	0
1	0	-1.682	0	1	0	-1	0
1	0	1.682	0	1	0	-1	0
1	0	0	-1.682	1	0	0	-1
1	0	0	1.682	1	0	0	-1
6	0	0	0	6	0	0	0
Total Runs = 20				Total Runs = 20			

รูปที่27 ลักษณะการออกแบบแบบส่วนประสมกลาง CCD และ CCF กรณีมี 3 ปัจจัย
(แหล่งที่มา : จากเอกสารประกอบการสอนเรื่องการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา (นภัสสวงศ์, 2564))

○ **การทดลองแบบ Box-Behnken**

การออกแบบ Box-Behnken มักมีจุดการออกแบบน้อยกว่าการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง ดังนั้นจึงมีต้นทุนน้อยกว่าในการใช้งานด้วยปัจจัยจำนวนเท่ากัน การออกแบบ Box-Behnken มักมี 3 ระดับต่อปัจจัย ซึ่งแตกต่างจากการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง ที่สามารถมีได้ถึง 5 ระดับ นอกจากนี้ การออกแบบ Box-Behnken จะไม่รวมปัจจัยที่ตั้งค่าเกินขีดจำกัด แสดงดังรูปที่ 28 โครงสร้างของการออกแบบ Box-Behnken จะประกอบด้วยการทดลองที่จุดกึ่งกลาง (Midpoints) ของแต่ละด้าน และที่จุดศูนย์กลางของตัวแบบ ซึ่งจะไม่พิจารณาที่จุดมุมแบบการทดลองส่วนประสมกลาง จึงอาจทำให้กลายเป็นข้อด้อยของการทดลองแบบนี้



รูปที่28 ภาพเปรียบเทียบโครงสร้างของแบบการทดลองแบบ Box-Behnken (ภาพซ้าย) และโครงสร้างของแบบการทดลองแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (ภาพขวา)
(แหล่งที่มา : จากหนังสือ Douglas C. Montgomery, 2012)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อย่างไรก็ตาม สำหรับการเลือกใช้แบบการทดลองพื้นผิวตอบสนองวิธีการใด ควรจะพิจารณาจากจำนวนครั้งการทดลองร่วมกับคุณภาพของการพยากรณ์ และ Resolution ที่ได้

หลังทำการทดลองตามแผนที่ออกแบบไว้แล้ว จะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งกระทบต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญแล้ว สิ่งที่ต้องทำต่อมาคือการกำหนดวิธีการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการจากพารามิเตอร์ที่ได้ในการทดลอง DOE ดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ เพื่อให้ผลบรรลุตามเป้าหมายของโครงการ โดยทางทีมงานจะต้องกำหนดวิธีการปรับปรุงแก้ไขต่างๆ ดังนี้ (นภัสสวงศ์, 2564)

1. กำหนดทางเลือกที่เป็นไปได้ในการปรับปรุง และการหาทาทางเลือกที่จะนำไปปฏิบัติ
2. นำปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ที่ได้จากการทำการทดลอง ในออกแบบการทดลอง (DOE) มาทดลองเพิ่ม โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Key performance input variable, KPIVs) กับตัวแปรตอบสนอง (Key performance output variable, KPOVs) จากนั้นทำการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง เพื่อปรับค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่จะทำให้ค่าตอบสนองเป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการ
3. หลังจากได้วิธีการปรับปรุงมาแล้ว จะทำการทดลองโดยใช้วิธี Pilot runs ซึ่งเป็นการทดลองก่อนการผลิตจำนวนมาก (PVT) โดยใช้การผลิตระยะสั้นและปริมาณจำกัด (limited production run หรือ pilot run) ซึ่งจะเริ่มจากการทดสอบการผลิตในส่วนเล็กๆก่อน และรับประกันว่า ข้อบกพร่องที่สำคัญใดๆ ได้รับการแก้ไขแล้ว เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดความเสี่ยงของการผลิตจำนวนมาก
4. ทำการประเมินผลที่ได้ในข้อ 3 แล้วปรับปรุงจนกว่าจะได้ผลตามเป้าหมาย
5. เมื่อวิธีการปรับปรุงให้ผลเป็นไปตามเป้าหมาย ให้จัดทำแผนกระบวนการทำงานใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการปรับปรุง
6. ทำการวิเคราะห์และตรวจสอบความคุ้มค่าในการลงทุนสำหรับการปรับปรุงกระบวนการ โดยพิจารณาจาก ต้นทุนในการซ่อมชิ้นงาน จำนวนของเสียที่เกิดขึ้น หรือตัววัดอื่นๆ เป็นต้น

2.1.3.5 ขั้นตอนการติดตามควบคุมกระบวนการ (Control phase : C)

หลังจากนำวิธีการปรับปรุงจากขั้นตอนที่ 4 (Improve phase) ไปใช้แล้ว สิ่งสำคัญในลำดับต่อมาคือการควบคุมกระบวนการ ในการพิจารณาว่าการปรับปรุงที่ทำขึ้นนั้นสามารถใช้ได้จริงและทำการติดตามคุณลักษณะของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ว่าอยู่ภายใต้การควบคุมหรือไม่ โดยจะมีการใช้เครื่องมือต่างๆมาใช้ในการควบคุม เช่น การทำ 5S เพื่อสร้างสถานที่ทำงานที่เหมาะกับการควบคุมด้วยภาพ, การพิสูจน์ข้อผิดพลาด (poka-yoke) เพื่อทำให้ข้อผิดพลาดเป็นไปไม่ได้หรือตรวจพบได้ทันที และเครื่องมือในการควบคุมกระบวนการทางสถิติ (SPC หรือ Statistical Process Control) โดยในที่นี้จะใช้ แผนผังควบคุม (control chart) เป็นหนึ่งในเครื่องมือ Basic QC 7 Tools สำหรับตรวจสอบพฤติกรรมของกระบวนการ

● **แผนควบคุม (Control chart)**

โดยปกติระยะนี้จะเกี่ยวข้องกับการสร้างแผนควบคุม (Control chart) ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจสอบและประเมินผลกระทบของการปรับปรุง และทำการปรับเปลี่ยนเมื่อจำเป็น สิ่งสำคัญอีกอย่างคือการแชร์ผลลัพธ์กับทุกคนที่เกี่ยวข้องในโครงการ เพื่อเพิ่มขวัญกำลังใจของทีม และให้แน่ใจว่าทุกคนในทีมตระหนักถึงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

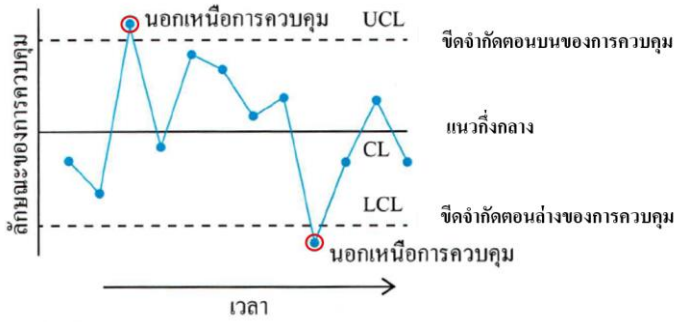
แผนภูมิควบคุมกระบวนการ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการติดตามคุณลักษณะของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ว่าอยู่ภายใต้การควบคุมหรือไม่ โดยแผนภูมิควบคุมจะทำหน้าที่ในการแยกสาเหตุพิเศษ (Special cause) ออกจากสาเหตุปกติ (Common cause) (จากคู่มือประกอบระบบบริหารคุณภาพอุตสาหกรรมยานยนต์ Core Tools For IATF 16949:2016)

แผนภูมิควบคุม (Control chart) คือกราฟเชิงเส้นที่มีเส้นขีดจำกัดของการควบคุมอยู่คู่หนึ่งที่ใช้เพื่อตัดสินความเสถียรของกระบวนการ แสดงดังรูปที่ 29

แผนภูมิควบคุม ประกอบด้วย

- แกนในแนวนอนคือ เวลา
- แกนในแนวตั้ง คือ ลักษณะการควบคุม ซึ่งอาจจะเป็นขนาด, น้ำหนัก หรือจำนวนของผลผลิตที่มีข้อบกพร่อง
- เส้นกึ่งกลาง (Centerline) คือ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ ซึ่งคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยของตัวอย่างที่สุ่มมา
- เส้นขีดจำกัดของการควบคุม คือ คู่ของเส้นที่จะทำการตัดสินความเสถียรของกระบวนการ ได้แก่ ขีดจำกัดตอนบนของการควบคุม (Upper Control Limit, UCL) คือ ขอบเขตความผันแปรปกติที่เป็นค่าสูงสุดของกระบวนการ และขีดจำกัดล่างของการควบคุม (Lower Control Limit, LCL) คือ ขอบเขตความผันแปรปกติที่เป็นค่าต่ำสุดของกระบวนการ
- จุดที่อยู่ในการควบคุม (In-control) และจุดนอกเหนือการควบคุม (Out of control)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่29 ลักษณะแผนภูมิควบคุม (Control chart)

(แหล่งที่มา : จากหนังสือจากคู่มือประกอบระบบบริหารคุณภาพอุตสาหกรรมยานยนต์ Core Tools For IATF 16949:2016)

โดยเมื่อจุดที่พล๊อตออกมาทั้งหมดอยู่ภายในเส้นขีดจำกัดของการควบคุมทั้งสอง (Common cause) และไม่มีการจัดเรียงจุดที่ผิดปกติเกิดขึ้น จะถือว่ากระบวนการมีความเสถียร และหากจุดที่มีอยู่ออกนอกขีดจำกัดของการควบคุม หรือมีการจัดเรียงจุดที่ผิดปกติเกิดขึ้น (Out of control point) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการนั้นไม่เสถียร และควรตรวจสอบสาเหตุบางอย่าง แล้วทำการแก้ไขที่สาเหตุนั้น และทำให้กระบวนการมีความเสถียรต่อไป

แผนภูมิควบคุมมีประโยชน์ในการช่วยควบคุมความผิดปกติที่เกิดในกระบวนการผลิต และสามารถแก้ปัญหาได้ทันเหตุการณ์ ก่อนจะผลิตของเสียออกมาเป็นจำนวนมาก ลดการแก้ไขงาน หรือทำซ้ำ (rework) จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการช่วยเพิ่มผลผลิตได้ รวมไปถึงทำให้ทราบความสามารถของกระบวนการ (Process capability) ซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการประเมินและปรับปรุงกระบวนการผลิตได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เทปพันสายไฟ หรือเทปสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือเทปฉนวนกันความร้อน มีหลากหลายชนิดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน ส่วนใหญ่จะผลิตมาให้ไวต่อแรงกด (Pressure sensitivity adhesive) หน้าที่หลักจะใช้ป้องกันตัวนำไฟฟ้าลัดวงจรและความชื้น หรือเป็นฉนวนห่อหุ้มในจุดต่อสาย โดยเทปที่ดีควรมีความเป็นฉนวนที่ดี อ่อน ยืดหยุ่น และกาวของเทปมีความเหนียวคงทน เมื่อพันสายไฟแล้วแนบกับสายได้ดี มีฟังก์ชันในการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งในปัจจุบันได้มีการผลิตเทปพันสายไฟด้วยไวนิล (PVC) ที่ทนทานต่อความร้อนได้สูงขึ้น เป็นฉนวนกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพ และทนทานต่อการขีดข่วนและทนแรงบีบได้มาก

สำหรับเทปพันสายไฟที่ผลิตในโรงงานกรณีศึกษาจะเป็นเทปที่ใช้กาวชนิดไวต่อแรงกด (Pressure-sensitive adhesive, PSAS) โดยมีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติและการใช้งาน ดังนี้

2.2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับวัสดุเทปพันสายไฟ

- PRESSURE-SENSITIVE ADHESIVES (PSAS) (Ebnesajjad & Landrock, 2014)

สภาเทปไวต่อแรงกด (PSTC) ให้คำจำกัดความว่า เทปไวต่อแรงกดที่ใช้กับผ้า กระดาษ โลหะ หรือพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น สามารถพบได้ในทุกผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่ฉลากอาหาร และบรรจุภัณฑ์ ไปจนถึงผ้าพันแผล และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีความแข็งแรงและทนทานภายใต้สภาวะที่ทนต่อสภาพอากาศและการสัมผัสสารเคมี และทนต่อรังสียูวี โดยกาวที่ไวต่อแรงกดเป็นกาวที่ไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งก่อให้เกิดพันธะเมื่อใช้แรงกดเพื่อยึดติดกาวกับพื้นผิว ไม่ต้องใช้ตัวทำละลาย น้ำ หรือความร้อนในการเปิดใช้งานกาว ปัจจัยพื้นผิว เช่น ความเรียบ พลังงานพื้นผิว และการกำจัดสิ่งปนเปื้อนก็มีความสำคัญต่อการยึดติดที่เหมาะสมเช่นกัน กาวที่ไวต่อแรงกดได้รับการออกแบบมาเพื่อสร้างพันธะและยึดเกาะที่อุณหภูมิห้องอย่างเหมาะสม กาวเหล่านี้มักจะสูญเสียการยึดเกาะที่อุณหภูมิต่ำ และลดความสามารถในการรับแรงเฉือนที่อุณหภูมิสูง

การใช้งานทั่วไปของกาวที่ไวต่อแรงกดที่อยู่ในรูปแบบเทป ในสภาวะที่แห้ง (dry state) กาวจะมีความเหนียวแน่นและยึดติดถาวรที่อุณหภูมิห้อง โดยสามารถยึดติดแน่นกับพื้นผิวต่างๆที่แตกต่างกันได้อย่างแน่นหนา โดยไม่ต้องใช้แรงกดจากนิ้วมือมาก ไม่ต้องการการกระตุ้นด้วยน้ำ ตัวทำละลาย หรือความร้อน เพื่อที่จะออกแรงยึดเกาะที่แข็งแรง กาวชนิดนี้ส่วนใหญ่ใช้ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) โดยยางจะมีแรงยึดเกาะต่ำมาก (low tack) ดังนั้นการยึดเกาะ (adhesion) กับพื้นผิวจึงต้องมีการเติมเรซินยึดเกาะ (tackifying resins) ที่มีพื้นฐานจากโรซิน (rosins) ปิโตรเลียม (petroleum) หรือเทอร์พีน (terpenes) เติมเรซินไฮโดรเจน (Hydrogenated resins) เพื่อเพิ่มการเสื่อมสภาพในระยะยาว กาวที่ใช้อะคริลิกโพลีเมอร์และยางธรรมชาติเป็นกาวชั้นนำ อะคริลิกเหล่านี้มีความคงทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ที่ดี ทนต่อการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และเป็นน้ำสีขาวที่ทนต่อการเหลืองหรือเสื่อมสภาพได้ดี กาวที่ใช้อะคริลิกจะมีคุณสมบัติในการล้าตัวต่ำ (poor creep) เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ อีกทั้งส่วนผสมของยางธรรมชาติและSBR ยังสามารถผลิตกาวที่มีคุณสมบัติดีมากอีกด้วย

จากที่กล่าวถึงกาวข้างต้น ทั้งหมดถูกนำไปใช้ในสารละลายและรูปแบบกาวร้อน (hot-melt) ที่มีความไวต่อแรงกดที่อุณหภูมิห้อง วัสดุเหล่านี้อาจใช้อีวีเอโคพอลิเมอร์ (EVA copolymers) ที่เชื่อมด้วยเรซินและสารปรับความนุ่มต่างๆ (softeners) มีการผลิตกาวที่ค่อนข้างอ่อนนุ่มและมีแรงยึดเกาะต่ำ การใช้งานมีปริมาณน้อย ส่วนใหญ่ใช้ติดฉลาก กาวที่ไวต่อแรงกดมักจะใช้เคลือบบน

พื้นผิว เช่น เทปกระดาษแก้วหรือเทปฉนวนที่ใช้พลาสติกแบบพีวีซีชีท (insulating tapes based on plasticized PVC film) ประกอบด้วยชีท ไพรเมอร์ และกาว หากผลิตภัณฑ์ถูกม้วนเป็นเทป อาจใช้สารเคลือบที่ด้านหลังของชีทเพื่อลดความตึงเครียดของเทปเมื่อคลายตัว (unwind tension) กาวโดยทั่วไปของประเภทที่กล่าวถึงในที่นี้ มักใช้จากตัวทำละลายอินทรีย์ อย่างไรก็ตาม สามารถใช้การกระจายตัวที่เป็นน้ำและรูปแบบกาวร้อนได้ น้ำหนักในการเคลือบมีตั้งแต่ 10 กรัมขึ้นไป แต่โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 20-50 กรัม/ตร.ม. ไพรเมอร์ถูกนำไปใช้ที่น้ำหนักเคลือบ 2-5 กรัม/ตร.ม. จากตัวทำละลายหรือการกระจายตัวของน้ำ ยางไนไตรต์ ยางคลอรีน และอะคริเลตเป็นสีรองพื้นทั่วไป กราฟต์โคพอลิเมอร์ของ MMA และยางธรรมชาติสามารถใช้เป็นสีรองพื้นสำหรับพีวีซีที่เป็นพลาสติกได้

- ชีทและเทปกาว (FILM AND TAPE ADHESIVES)

กาวที่มีโครงสร้างความแข็งแรงสูงจำนวนมากถูกนำไปใช้งานในรูปแบบชีทและเทป แม้ว่าความแข็งแรงของพันธะที่ได้จากทั้งชีทและเทป และส่วนผสมที่มีส่วนประกอบเดียวกันโดยทั่วไปจะคล้ายกัน แต่ก็มีข้อดีหลายประการของการใช้ชีทและเทป ได้แก่ ให้ความหนาของกาวที่สม่ำเสมอและควบคุมได้ ความเร็วและความง่ายในการใช้งาน

- พีวีซีชีท (PVC FILM)

หมวดหมู่โพลิโอเลฟินประกอบด้วยชีทที่ทำจากโพลิโพรพิลีนและโพลิเอทิลีนโคพอลิเมอร์เรซิน เนื่องจากประกอบด้วยชีทโพลีเมอร์ที่แตกต่างกันหรือตัวอย่างที่อัดเข้าด้วยกัน จึงมีลักษณะ เฉพาะจากส่วนประกอบโพลีเมอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พีวีซีชีท คือวัสดุหลักของเทปพันสายไฟ ที่ผลิตมาจากวัตถุดิบหลักที่เรียกว่าพีวีซีคอมพาวนด์ (PVC Compound ย่อมาจาก Polyvinyl chloride Resin Compound) ทำมาจากพีวีซีเรซิน (PVC Resin) นำมาผสมกับสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพีวีซีให้สามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย รวมถึงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติพีวีซีคอมพาวนด์ให้สามารถนำไปใช้งานได้ดีขึ้น เช่น ความยืดหยุ่น (Elongation), ความแข็งแรง (Strength), การทนความร้อน (Heat resistance), การต้านทานการลามไฟ (Flame Retardant) และความต้านทานการนำไฟฟ้า (Volume resistivity) เป็นต้น

- แกนกระดาษ (Paper core)

แกนกระดาษที่โรงงานกรณีศึกษาใช้ในปัจจุบัน ทำมาจากกระดาษคราฟท์ (Kraft Paper) ความหนา 450 gram/mm2 (Inside Diameter 34.30±0.20 mm และ outside Diameter 38.60±0.20 mm) ผลิตมาจากเยื่อเคมี (Chemical Pulp) เป็นการใช้เทคโนโลยีเพื่อแปรสภาพจากเนื้อไม้มาเป็นเยื่อกระดาษไม้ (Wood Pulp) เป็นวิธีการที่ใช้ทั้งสารเคมี และความร้อนเพื่อทำการแยกเยื่อไม้ และเรียกวิธีการนี้ว่าการกระบวนการคราฟท์ (Kraft Process) ซึ่งจะทำให้ได้กระดาษที่มีความแข็งแรง คงทน และมีความเหนียวสูง นอกจากนี้กระดาษคราฟท์ยังมีคุณสมบัติที่ดีกว่ากระดาษชนิดอื่นๆ ในหลายๆด้าน เช่น ความแข็งแรงที่มากกว่า สามารถต้านทานการเปียกจากน้ำได้ดีกว่า ทั้งยังสามารถต้านทานการเสียดสี การเจาะทะลุ เนื้อกระดาษมีความเรียบ ช่วยลดปัญหาด้านมลพิษด้านสภาวะแวดล้อม เป็นวัสดุที่สามารถนำไปรีไซเคิล (recycle) และนำมาใช้ใหม่ได้ ทำให้ไม่ก่อปัญหาขยะส่วนเกินเพิ่ม เหมือนวัสดุชนิดอื่น เช่น พลาสติก โฟมเป็นต้น อีกทั้งยังมีราคาไม่แพง เมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆอีกด้วย

นอกจากนี้การเปลี่ยนวัสดุของแกนเทป ที่มีความแข็งแรงเทียบเท่าแกนกระดาษคราฟท์เช่น พลาสติก หรือกระดาษที่มีความแข็งมากขึ้น ยังคงเกิดปัญหาแกนปูดได้ เนื่องจากการปูดของเทป เกิดจากชั้นของเทปมีการเลื่อนแล้วดันให้แกนปูดออก ดังนั้นการเปลี่ยนวัสดุของแกนจึงไม่มีผลต่อการปูดของเทป อีกทั้งวัสดุอื่นยังมีผลต่อกระบวนการตัดเป็นเทป เนื่องจากความแข็งที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ใบมีดตัดมีการสึกหรอเร็วกว่าปกติ รวมไปถึงผลิตภัณฑ์เทปที่ตัดได้มีลักษณะขอบด้านข้างเป็นชั้นๆ ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ที่ลูกค้ากำหนด นอกจากนั้นราคาของแกนพลาสติกยังมีราคาต้นทุนที่สูงกว่าแกนกระดาษอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>สารเติมแต่งสำคัญ ที่ผสมในพีวีซีคอมพาวด์ สำหรับผลิตเทปพันสายไฟ</u> ได้แก่

- สารทำให้อ่อนตัว (Plasticizer) เป็นสารเติมแต่งที่มีความสำคัญต่อพีวีซีคอมพาวนด์ในการช่วยเพิ่มความอ่อนตัว (Flexible) ทำให้มีความยืดหยุ่นสูง และทนต่ออุณหภูมิสูงขณะขึ้นรูป โดยจะช่วยให้สามารถขึ้นรูปในอุณหภูมิต่ำลงได้

- สารทำให้เสถียร (Stabilizer) เพื่อเพิ่มความเสถียรภาพในการผลิตให้กับพีวีซี เช่น ควบคุมการเกิดออกซิเดชั่น (Oxidation) เพิ่มความเสถียรภาพในการทนความร้อน (heat stability) เป็นต้น

- สารเพิ่มเนื้อ (Filler) เป็นสารที่เติมเพื่อเพิ่มปริมาณวัสดุ เพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิตพีวีซีคอมพาวนด์ และสารที่เติมเพื่อเปลี่ยนสีคอมพาวนด์ (Pigment)

- สารเติมแต่งอื่นๆ (Additive) เช่น สารหล่อลื่น (Lubricant) สารหน่วงไฟ (Flame retardant)

สารเติมแต่งซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) ได้ให้คุณสมบัติของการหดตัวของพีวีซีซีท หากซีทมีอายุมากขึ้น พลาสติไซเซอร์จะอพยพ (เคลื่อนย้าย) ออกไปและซีทจะกลับคืนสภาพที่เปราะบางและเปลี่ยนเป็นสีเหลือง นอกจากนี้ พีวีซียังมีความไวต่อความร้อนและมีแนวโน้มที่จะแตกหักที่อุณหภูมิเย็นจัด และเมื่อซีทถูกอุณหภูมิสูง พีวีซีอาจหดตัว (Shrinkage) และเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ดังนั้นพีวีซีซีทจึงต้องจัดเก็บในคลังสินค้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียสเพื่อรักษาคุณภาพของซีท

- **ผลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อเทปพีวีซี**

• เกี่ยวกับพลาสติกไซเซอร์ (Wypych, 2004)

พลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ทั่วไปมีหลายชนิด จึงได้มีการจำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจในอิทธิพลขององค์ประกอบ โครงสร้าง และคุณสมบัติของพลาสติกไซเซอร์ เช่น esters, phthalates, chlorinated paraffins เป็นต้น ตัวอย่างการจัดกลุ่มเช่น การจัดกลุ่มพาราฟินตามความยาวสายโซ่คาร์บอน และความเข้มข้นของคลอรีนช่วยในการทำความเข้าใจถึงผลกระทบทางนิเวศวิทยา ในทำนองเดียวกัน การศึกษาอัตราการเคลื่อนย้ายของพทาเลตที่มีแอลกอฮอล์ หรือที่มีความสามารถในการละลายต่างกันจะช่วยในการกำหนดผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

พลาสติไซเซอร์มักจะรวมอยู่ในองค์ประกอบที่เป็นตัวช่วยในการประมวลผลเพื่อปรับปรุงความสามารถในการทำงาน ความยืดหยุ่น หรือความสามารถในการขยายตัวของสารยึดเกาะขององค์ประกอบ การปรับปรุงเหล่านี้ทำได้โดย การเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ทางกล เช่น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วหรือความหนืด

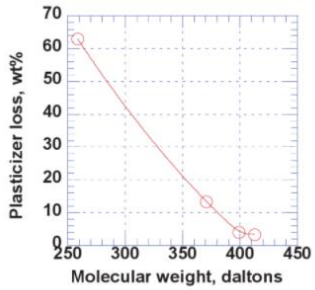
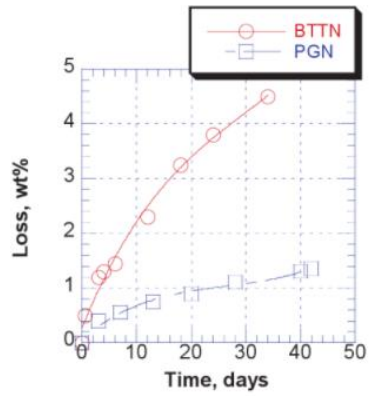


Figure 2.3 Effect of molecular weight of adipates on ...r loss from PVC after 24 h at 87°C. [Data ...rs J K, Darby J R, **The Technology of Plasticizers**, *John Wiley & Sons*, New York 1982.]

รูปที่30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียพลาสติดไซเซอร์กับน้ำหนักโมเลกุล

(แหล่งที่มา : จากหนังสือ Handbook of Plasticizers By (Wypych, 2004))

จากรูปที่ 30 น้ำหนักโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์ที่มากขึ้น จะทำให้การสูญเสียพลาสติกไซเซอร์ในพีวีซีลดลง ภายหลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 87°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เกิดมาจากความสามารถในการละลายหรือความเข้ากันได้ระหว่างพีวีซีและพลาสติกไซเซอร์



Loss of plasticizer under vacuum of 0.2 mm Hg. PGN - poly(glycidyl nitrate), BTTN - 1,2,4-butane triol trinitrate. [Data from Willer R, Stern A G, Day R S, **US Patent** 5,380,777, 1995.]

รูปที่31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียพลาสติกไซเซอร์กับเวลา

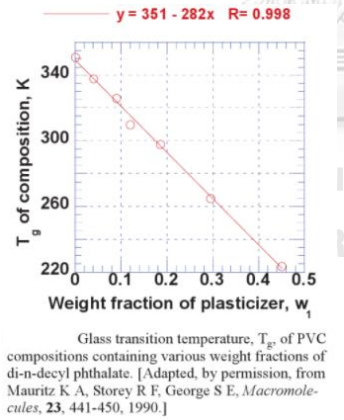
(แหล่งที่มา : จากหนังสือ Handbook of Plasticizers By (Wypych, 2004))

พลาสติกไซเซอร์บางชนิดมีแนวโน้มที่จะออกซิไดซ์และเคลื่อนตัวไปยังพื้นผิววัสดุเมื่อเวลาผ่านไป และบางครั้งอาจมีการระเหิด การย้ายถิ่นของพลาสติกไซเซอร์ทำให้เกิดความผิดปกติในการเผาไหม้ เนื่องจากมีแนวโน้มที่โมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์จะย้ายหรือระเหยออกจากองค์ประกอบของพีวีซีในระหว่างการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงทางเคมีในองค์ประกอบจึงเกิดขึ้น รูปที่ 31 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของพลาสติกไซเซอร์โพลี (ไกลซิดิลไนเตรต) PGN และ 1,2,4-บิ

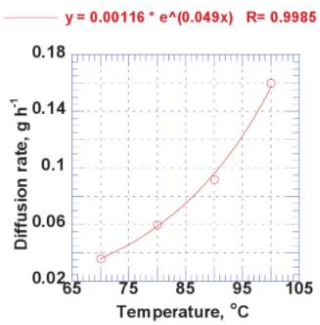
วเทนไตรออลทริไนเตรต BTTN เทียบกับเวลาที่สุญญากาศเฉลี่ย 0.2 มม.ปรอท สูญญากาศนี้เทียบเท่ากับระดับความสูงที่มากกว่า 61,500 เมตร PGN จะสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อย (>2%) ใน 43 วัน ในขณะที่ BTTN ประสบกับการลดลงของน้ำหนักอย่างมากในช่วงเวลาเดียวกัน

การเคลื่อนที่และการแพร่กระจายของพลาสติกไซเซอร์เข้าไปในวัสดุ สามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ขนาดโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์ การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ การหลอมรวมตัวกัน ปฏิกริยาจากความเครียดในวัสดุ ระดับความเข้มข้น ปฏิกิริยาของโมเลกุลโดยรอบ และสภาวะทางกายภาพ (อุณหภูมิ ปริมาณ ปฏิกิริยาภายใน และอื่นๆ) นอกจากนี้ยังมีกระบวนการทางกายภาพหลายอย่างที่เกิดขึ้นได้พร้อมกันกับการแพร่ เช่น การบวม การเปลี่ยนสถานะ การตกผลึก การก่อตัวของความเครียดในยางยืด การสูญเสียวัสดุภายใน เป็นต้น

อุณหภูมิจะมีผลอย่างมากต่อลักษณะการแพร่ เนื่องจากอาจมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุจากสถานะคล้ายแก้ว (Tg) เป็นสถานะคล้ายยาง (Rubbery state) ซึ่งทำให้เข้าใจความเร็วและช้าของกระบวนการแพร่ โมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์จะมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ทำให้การวิเคราะห์เรื่องของปริมาตรการแพร่จะมาจากการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง และใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของพลาสติกไซเซอร์



Glass transition temperature, T_g, of PVC compositions containing various weight fractions of di-n-decyl phthalate. [Adapted, by permission, from Mauritz K A, Storey R F, George S E, *Macromolecules*, **23**, 441-450, 1990.]



Diffusion rate of di-n-octyl phthalate in PVC vs. temperature of incorporation. [Data from Storey R F, Mauritz K A, Cox B D, *Macromolecules*, **22**, 289-294, 1989.]

รูปที่32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) กับสัดส่วนน้ำหนักของพลาสติกไซเซอร์ (ซ้าย)

รูปที่33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแพร่ของพลาสติกไซเซอร์กับอุณหภูมิ (ขวา)

(แหล่งที่มา : จากหนังสือ Handbook of Plasticizers By (Wypych, 2004))

จากรูปที่ 32 แสดงว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นกับสัดส่วนน้ำหนักของพลาสติกไซเซอร์ ความสัมพันธ์เชิงเส้นนี้ช่วยให้ได้ค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพของ

พลาสติกไซเซอร์ที่มีความแม่นยำสูง และจากรูปที่ 33 แสดงว่าอัตราการแพร่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สอดคล้องกับหลักการของทฤษฎีปริมาตรความอิสระ (Principles of free volume theory)

เกี่ยวกับคุณสมบัติทางกล ความต้านแรงดึงเป็นตัวชี้วัดที่ใช้บ่อยที่สุดของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการทำให้เป็นพลาสติก เนื่องจากพลาสติไซเซอร์จะต้องทำให้เป็นพลาสติกโพลีเมอร์ ความคาดหวังคือความต้านทานแรงดึงของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติไซเซอร์ ผลทั่วไปของความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นสำหรับพลาสติไซเซอร์หลายชนิด ความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดีจะถูกบันทึกไว้สำหรับผลของพลาสติกไซเซอร์ทั้งหมดที่มีต่อความต้านทานแรงดึง สมการถดถอยแสดงความแตกต่างเพียงเล็กน้อยระหว่างตัวปรับสภาพพลาสติกต่างๆ (ค่าคงที่ a และ b ของสมการเหล่านี้ใกล้เคียงกันมาก) แต่โครงสร้างทางเคมีก็คล้ายกันมากเช่นกัน โดยน้ำหนักโมเลกุลของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในพลาสติไซเซอร์มีผลต่อความต้านทานแรงดึง

นอกจากนี้ ยังมีการเติมพลาสติไซเซอร์ด้วยสาเหตุอื่นๆ เพื่อลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของวัสดุที่เป็นพลาสติก โดยความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วยิ่งต่ำ อุณหภูมิและความต้านทานแรงดึงสูงจะขึ้น ปริมาณของพลาสติไซเซอร์และค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่าของวัสดุ

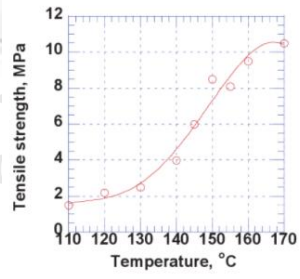


Figure 10.9. Tensile strength of PVC plasticized with 60 phr of Adilene 150 vs. temperature of processing. [Adapted, by permission, from Jimenez A; Lopez J; Iannoni A; Kenny J M, *J. Appl. Polym. Sci.*, **81**, No.8, 1881-90, 2001.]

รูปที่34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงของพลาสติกไซเซอร์ในพีวีซีและอุณหภูมิของกระบวนการ

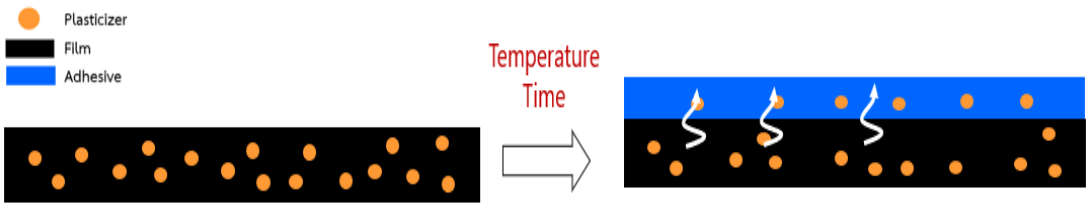
(แหล่งที่มา : จากหนังสือ Handbook of Plasticizers By (Wypych, 2004))

จากรูปที่ 34 เป็นตัวอย่างสภาวะการประมวลผลมีผลต่อคุณสมบัติทางกล นั่นคือความต้านทานแรงดึงของวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกัน

นี้มีให้ในช่วงระยะเวลาของกระบวนการเกิดเจล (Gelation process) ในการศึกษาเชิงทดลองเปรียบเทียบองค์ประกอบต่างๆ ปรากฏการณ์นี้ตีความได้ยาก การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของพลาสติไซเซอร์ส่งผลต่ออุณหภูมิการเกิดเจล (ระบบอุณหภูมิ-เวลา) ดังนั้น การเปรียบเทียบตัวอย่างต่างๆ ที่เตรียมภายใต้สภาวะเดียวกันอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้เนื่องจากการทำให้เกิดเจลไม่เพียงพอหรือการเสื่อมสภาพจากความร้อนในช่วงต้น

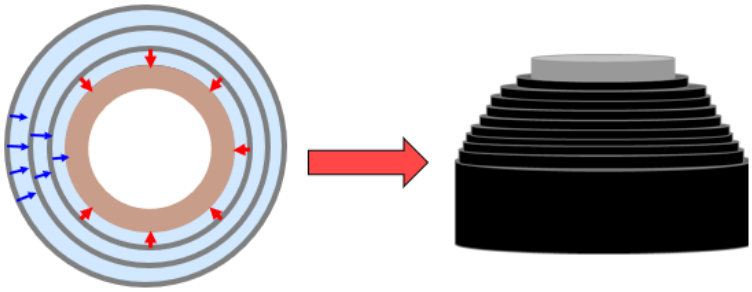
นอกจากนี้มีการศึกษาผลกระทบของพลาสติกไซเซอร์ LDPE และ PET ที่เป็นวัสดุห่อหุ้มในช่วงการอบ PVC ที่เป็นพลาสติก และเลือกกระดาษsilk เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบสถานะของการเสื่อมสภาพของ PVC ถูกตรวจสอบเมื่อเวลาผ่านไปโดยการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาณ และพื้นผิว - เคมี การเปลี่ยนสีที่มีนัยสำคัญและสามารถสังเกตได้เร็ว จากวัสดุที่สัมผัสทั้งสองชนิด โดยเปรียบเทียบกับกระดาษ silk แม้ว่า LDPE จะเคลื่อนที่ช้ากว่าและเห็นได้น้อย ในขณะที่พลาสติไซเซอร์ LDPE เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นของการอบบ่มส่งผลให้พีวีซีย่อยสลายได้เร็วกว่า ซึ่งแสดงถึงการปกป้องที่ดีที่สุดสำหรับวัสดุพีวีซีเมื่อมีการอบบ่ม (Royaux, 2020)

จากทฤษฎีข้างต้น จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ดังรูปที่ 35 ได้ว่า กาวที่ใช้ในเทปพันสายไฟเป็นกาวอะคริลิกที่ไวต่อแรงกด ซึ่งได้รับการออกแบบมาสำหรับยึดติดกับพีวีซีชีท ที่มีความยืดหยุ่นมากมักจะได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนย้ายของพลาสติไซเซอร์จากพีวีซีชีทเข้าไปสู่ชั้นกาวที่มีความหนาแน่นต่ำ โดยปริมาณการเคลื่อนย้ายของพลาสติกไซเซอร์จะขึ้นกับระยะเวลาและอุณหภูมิ กล่าวคืออุณหภูมิมากขึ้น ยิ่งทำให้การเคลื่อนย้ายของพลาสติกไซเซอร์เกิดได้ไวขึ้น โดยเวลาจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการเคลื่อนย้าย ที่เวลายิ่งนาน พลาสติกไซเซอร์ก็จะเคลื่อนตัวเข้าไปได้มากขึ้น โดยจากการที่พลาสติกไซเซอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงทำให้เมื่อแพร่เข้าไปในกาวแล้ว จะไม่สามารถกลับเข้ามาในพีซีซีชีทที่มีความหนาแน่นสูงกว่าได้อีก ทั้งนี้สูตรพีวีซีคอมพาวนด์ที่แตกต่างกันอาจทำให้ทั้งชนิดและปริมาณของพลาสติไซเซอร์แตกต่างกันไปด้วย (Marcilla & Beltran, 1998)



รูปที่35 การแพร่ของพลาสติกไซเซอร์จากพีวีซีชีทเข้าไปในชั้นกาวที่เวลาและอุณหภูมิหนึ่งๆ

จากการที่พลาสติกไซเซอร์แพร่เข้าไปในชั้นกาวได้ จะมีผลทำให้กาวอ่อนตัวลง และสูญเสียความแข็งแรงของพันธะเมื่อเวลาผ่านไป โดยผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทปพันสายไฟ ขนาดหน้ากว้าง 19 มิลลิเมตร จะทำให้ความหนาของกาวค่อยๆเพิ่มขึ้น โดยในระหว่างการแพร่ของพลาสติกไซเซอร์ที่ยังไม่สเถียรนั้น จะทำให้เกิดความเครียดสะสมภายใน และดันแกนกระดาษที่อยู่ภายในให้ปูดออกมาได้ในที่สุด ดังรูปที่ 36



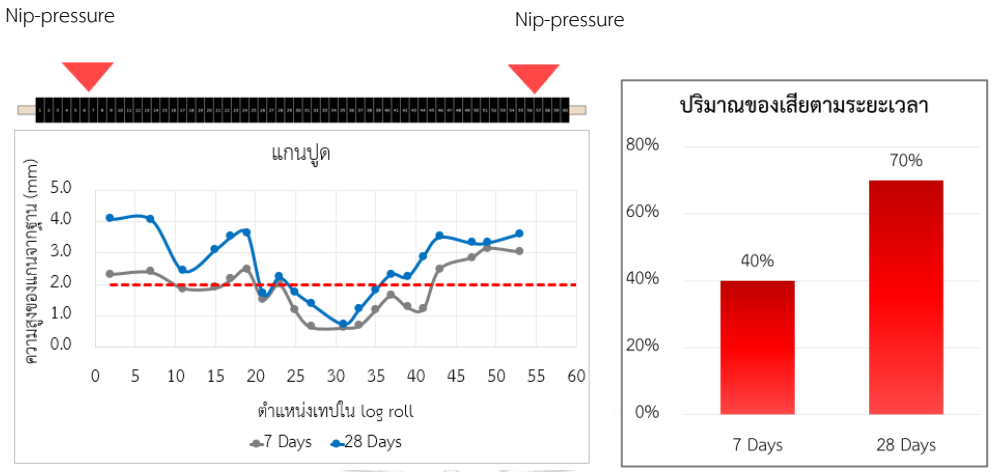
รูปที่36 การแพร่ของพลาสติกไซเซอร์ในกาว จนเกิดความเครียดสะสมภายในพีวีซีและดันแกนกระดาษออกมากลายเป็นเทปปูด

(แหล่งที่มา : จากการตรวจสอบในบริษัทโรงงานกรณีศึกษาของทีมงานพัฒนาและวิจัยผลิตภัณฑ์)

สำหรับผลกระทบที่เป็นไปได้ของการย้ายพลาสติไซเซอร์บนพันธะกาว สามารถทำนายได้โดยการอบเทปเร่งอุณหภูมิและเวลา ที่อุณหภูมิสูง (80°C x 2 hours x 90% humidity) และเนื่องจากความแปรปรวนของสูตรคอมพาวนด์ ดังนั้นจึงควรพิจารณาความเหมาะสมของอุณหภูมิและเวลาของเทปแต่ละชนิดด้วย

ดังนั้นสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า การอบงานที่เป็น log roll ที่มีความยาวของแกนกระดาษ 1,300 มิลลิเมตร เพื่อเร่งให้พลาสติกไซเซอร์เกิดการเคลื่อนที่เข้าไปในกาวได้เร็วขึ้น ที่ระยะเวลาหนึ่งจนเกิดความเสถียรภาพภายในพีวีซี จะมีผลในการขจัดความเครียดออกจากพื้นผิว ซึ่งจะช่วยในการลดแรงดันภายในเทปพีวีซีได้ ทำให้ภายหลังจากการอบพีวีซีที่เป็น log roll จะไม่มีความตึงเครียด (Tension) ที่ทำให้เกิดแรงดันแกนเทปให้ปูดขึ้นมาได้ ทำให้เมื่อนำ log roll ไปตัดเป็นเทป และเก็บไว้เป็นเวลานาน เทปจะไม่เกิดการปูดเพิ่มอีก

- **ผลของแรงดันลมในการกดให้ชีทติดกับแกนเพื่อเข้าม้วน (Nip-pressure)**



รูปที่37 ผลการวัดแกนปูดของเทปหลังเก็บไว้ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 35 องศา เป็นเวลา 28 วัน (ซ้าย)
รูปที่38 ปริมาณแกนปูดที่เป็นของเสีย (ขวา)
(แหล่งที่มา : จากการตรวจสอบในบริษัทโรงงานกรณีศึกษาของทีมงานพัฒนาและวิจัยผลิตภัณฑ์)

รูปที่ 37 เป็นผลการจำลองสถานการณ์ในโรงงานกรณีศึกษาเบื้องต้น โดยการนำเทปไปเก็บที่พื้นที่วางสินค้าภายในโรงงาน (production area) ที่มีการวัดอุณหภูมิเฉลี่ย 35 องศา เป็นเวลา 28 วัน โดยจะทำการตรวจสอบแกนปูดเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน พบว่า แกนปูดขึ้น คิดเป็นของเสีย 40% และเมื่อเวลาผ่านไปครบ 28 วัน พบว่ามีแกนปูดเพิ่มขึ้น เป็น 70% ดังรูปที่ 38 และนอกจากนี้ ยังพบอีกว่า เทปมักจะปูดมากที่บริเวณหัว-ท้ายของ log roll ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่า เป็นจุดที่มีการกดของ Nip-pressure ในขั้นตอนการ winding ของกระบวนการเคลือบกาว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดเทปปูดหลังจากการตัด

เครื่องตัดเทป (tape-slitting machines) เป็นสิ่งที่ช่วยให้สามารถแปลงความกว้างของเทปได้ตามข้อกำหนดและตัววัสดุ หลังจากกระบวนการเคลือบกาว ผลิตภัณฑ์จะถูกส่งไปยังเครื่องตัดที่มีความกว้างตั้งแต่ 60 นิ้วขึ้นไป ในการประมวลผลความกว้างเหล่านี้บนเครื่องตัด ต้องใช้แรงตึง (tension) บางอย่างกับวัสดุเพื่อให้อยู่ภายใต้การควบคุม และสิ่งนี้มีแนวโน้มที่จะทำให้เทปมีการยืดออกเล็กน้อย ความตึง (tension) และการยืด (stretch) จะยังคงอยู่ในเทปในรูปแบบม้วน (roll) หรือคิดในอีกแง่หนึ่ง ในม้วนเทปมีพลังงานเหมือนกับสปริงนาฬิกา แต่มีในระดับเล็กน้อยมาก ระยะการยืดของเทประหว่างการตัดจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ข้อควรระวังต่างๆเพื่อรักษาให้มีการยืดน้อยที่สุด โดยการตั้งค่าอัตโนมัติที่ดึงม้วนเทปผ่านเครื่องตัดและควบคุมความเร็วของเครื่อง โดยการตั้งค่าความตึง

ของเครื่องจักรที่น้อยเกินไปจะทำให้ม้วนเทปอ่อนนุ่มมาก(หลวม) และการตั้งค่านี้มากเกินไปจะส่งผลให้เทปพันแน่นยิ่งขึ้นในธรรมชาติ ที่ใดก็ตามที่มีความเครียด (stress) อย่างต่อเนื่อง วัตถุก็จะเคลื่อนที่เพื่อคลายความเครียดนั้น และด้วยพลังงานที่เกิดขึ้นในม้วนเทป จึงต้องมีการคลายความเครียดนั้นด้วย อย่างไรก็ตาม การเข้าม้วนที่เบามากในอุตสาหกรรมเทปกาวอาจเป็นสาเหตุของปัญหา 2 ประการ คือ มีพลังงานที่ยังอยู่ในม้วนเทปนั้น และม้วนเทปจะค่อยๆปรับสมดุลตัวเองด้วยเวลาเพื่อกระจายพลังงาน ซึ่งอาจใช้เวลาเป็นสัปดาห์หรือเป็นเดือน ในกระบวนการปรับสมดุลช่องว่างสามารถเริ่มปรากฏขึ้นระหว่างชั้น (Layer) และช่องว่างเหล่านั้นจะกระจุกตัวอยู่ในพื้นที่ที่เฉพาะมาก ดังนั้นเราจึงจบลงด้วยปัญหาการเข้าม้วนที่เรียกว่า " gapping" สำหรับปัญหาที่สองก็เช่นกัน ในขณะที่มีการเคลื่อนตัวทีละน้อย เทปจะเริ่มบิดเบี้ยวขึ้น และทำให้ม้วนเทปผิดรูปจนไม่เป็นวงกลมอีก และเมื่อเข้าม้วนเทปแน่นเกินไป ความเค้นในม้วนจะทำให้เกิดแรงเวกเตอร์ที่มุมฉาก และชั้นเทปเริ่มเลื่อนทับกันในทิศทางของความเค้น เทปจะไม่แบนอีกต่อไป และในที่สุดก็เริ่มเป็นรูปคล้ายปิรามิดที่เรียกว่า "เทเลสโคป" (Telescope) (ECHOtape, 2018)

สำหรับการบิดเบี้ยวของเทป และวิธีหลีกเลี่ยง

ยิ่งกาวมีความอ่อนนุ่มมากเท่าใด ความบิดเบี้ยวก็จะยิ่งเด่นชัดมากขึ้นเท่านั้น นอกจากนี้ยังสนับสนุนโดยเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ที่สูงหรือโดยการตัดเทปที่มีหน้ากว้างแคบ เทปไวนิลขนาดความกว้างครึ่งนิ้วพร้อมกาวที่ค่อนข้างอ่อนนุ่มที่พันแน่นเกินไป สามารถเกิดแกนปูดได้ภายในหนึ่งหรือสองนาที แต่ผลกระทบของการเกิดแกนปูดนี้ สามารถเกิดช้าลงได้มากโดยการจัดเก็บเทปในอุณหภูมิที่เย็นจัด อันที่จริง ยิ่งเย็นยิ่งดี เนื่องจากที่อุณหภูมิที่เย็นกว่า กาวจะเกาะตัวแน่นและจำกัดการเคลื่อนไหว ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเป็นการเร่งการเสียรูป

การที่ม้วนเทปกาวเกิดการปูด เป็นผลมาจากระดับความตึงของเทปในการพันเข้าม้วน และการมีอยู่ของกาวซึ่งทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นระหว่างชั้นต่างๆของม้วนเทป จากนั้นแกนจะถูกผลักออกไปด้านข้าง ปรากฏการณ์เหลื่อมชั้นกันนี้ เกิดขึ้นเมื่อชีทถูกพันเข้าม้วนม้วนขนาดใหญ่ในโรงงาน เนื่องจากความเหนียวของชีทเกิดจากสารเติมแต่งที่มีความหนืดสูงและความตึงจะสะสมสูงมากในการเข้าม้วนขนาดใหญ่ (Drum) แกนจึงสามารถเกิดแกนปูดได้ง่าย ซึ่งมักเกิดปัญหานี้ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพอากาศร้อน โดยทั่วไปความหนืดของกาวในเทปจะสูง (แต่ไม่สูงมาก) จนเมื่อเวลาผ่านไปจะถูกขับออกมาด้านข้าง ซึ่งอธิบายได้ว่าเทปที่เก็บไว้เป็นเวลานานๆจะมักเหนียวที่ด้านข้างและมีฝุ่นปกคลุม ปัญหา telescoping นั้นแก้ไขได้ง่ายที่สุด โดยการควบคุมความตึงของการเข้าม้วนอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ระมัดระวัง แต่ยังมีสิ่งที่ต้องพิจารณาร่วมด้วยสำหรับเทปจำนวนมากที่สามารถหดตัวตามเวลาได้ ซึ่งอาจนำไปสู่ความตึงเครียดที่เพิ่มขึ้นและการเหลื่อมทับกันมากขึ้น

สำหรับพีวีซีซีทเป็นวัสดุที่มีความนุ่มและมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการอบให้กาวแห้ง จะทำให้พีวีซีซีทนุ่มและยืดออกได้ง่ายขึ้นจากเดิม อย่างไรก็ตาม พีวีซีซีทที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยกาวแล้วจะต้องมีความตึง (Tension) เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนเข้าม้วนเป็น log roll ดังนั้น การควบคุมแรงกด (Nip pressure) และความเร็วในการเข้าม้วน (Winding speed) จึงมีความสำคัญ (Deng, 2018) โดยเมื่อเข้าม้วนพีวีซีซีทด้วยแรงตึงสูงเกินไป จะมีผลให้เกิด Telescope มากขึ้นหลังจากตัด log roll ออกมาเป็นม้วนเทป ในการแก้ปัญหานี้ สามารถใช้วิธีการอบบ่ม log roll ที่อุณหภูมิระหว่าง72-82 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบบ่มระหว่าง 12-15 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความยาวและความหนาของ log roll (Hsieh, 2017)

2.2.3 การทดสอบการเกิดเทปปูดในโรงงานกรณีศึกษา

การทดสอบจะใช้ 2 วิธีในการวัด คือ

1. มาตรฐานการทดสอบของโรงงาน

   ใช้วิธีนำเทปไปอบที่อุณหภูมิ 80°C x ความชื้น 90% x เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเป็นวิธีที่จำลองมาจากสถานการณ์การได้รับความร้อนเป็นเวลานาน และเพื่อใช้ในการตรวจสอบการเกิดการปูด ในระยะเวลาจำกัด จึงทำการอบเทปในตู้อบด้วยด้วยอุณหภูมิสูงและระยะเวลาอันสั้น ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบมาตรฐานของโรงงานที่ได้รับมาจากการพัฒนาโดยทีมวิจัยต่างประเทศ

2. การเก็บในพื้นที่การผลิต (Stock at storage area)

   จากการผลิตจริงในโรงงาน จะมีการเก็บสต๊อคสินค้าในพื้นที่การผลิตเป็นเวลานาน (นานที่สุดประมาณ 30 วัน) ก่อนจัดส่งไปยังโรงงานประกอบ และแกนเทปปูดมักจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาเก็บดังกล่าว ดังนั้นการวัดอัตราของเสียจากการเก็บตัวอย่างในพื้นที่การผลิตจึงเป็นผลจริงตามสถานการณ์การผลิตในปัจจุบัน ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีนี้ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธัญวรัตน์ สวัสดิ์สุภผล, 2562

การดำเนินการวิจัยโดยประยุกต์ใช้หลักการซิกส์ ซิกม่าตามหลัก DMAIC พบว่าสาเหตุของความผันแปรของเครื่องจักรในกระบวนการห่อหุ้มชิ้นงานนั้นเกิดจาก แปรงที่ใช้ทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์เกิดการชำรุดส่งผลให้หน้าแม่พิมพ์ มีความสะอาดไม่เพียงพอมีเศษผงของคอมปาวด์พลาสติกและคราบคอมปาวด์พลาสติกติดค้างอยู่บริเวณหน้าแม่พิมพ์ซึ่งส่งผลให้ เมื่อชิ้นงานถัดไปเข้าสู่กระบวนการห่อหุ้มชิ้นงาน เกิดแรงประทะระหว่างแม่พิมพ์กับเศษผงของคอมปาวด์พลาสติกและกระแทกเข้ากับชิ้นงานบริเวณหน้าไดแรงประทะส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวบริเวณหน้าได ทำให้ชิ้นงานไม่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าประเภทวีลิมิเตอร์ ผู้วิจัยจึงได้แก้ไขปัญหานี้โดยการเปลี่ยนแปรงทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์และกำหนดให้มีการทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์ทุกครั้งก่อนเริ่มงานล๊อตใหม่ และมีการตรวจเช็คสภาพแปรงทาความสะอาดหน้าแม่พิมพ์ทุกหนึ่งเดือน ตลอดจนกำหนดอายุการใช้งานที่สามเดือน เปลี่ยนเมื่อหมดอายุการใช้งาน การติดตามผลการปรับปรุงพบว่าจำนวนของเสียเมื่อเทียบต่อล้านประเภทรอยแตกร้าวบริเวณหน้าไดลดลงจาก 1661 PPM เหลือเพียง 902 PPM (ธัญวรัตน์, 2562)

ธรภัทร สุวณิชย์, 2554

การนำแนวทางซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับกระบวนการสังเคราะห์สีย้อมผ้า โดยมุ่งเน้นในการปรับปรุงผลผลิตให้เพิ่มขึ้น และการลดความผันแปรของผลผลิตที่ได้ลง โดยการดำเนินงานวิจัยนี้ดำเนินตามขั้นตอนของซิกซ์ ซิกมา ทั้ง 5 ขั้นตอน (DMAIC) เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยและค่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสังเคราะห์สีย้อมผ้ารีแอกทีฟในแต่ละขั้นตอนและทั้งหมดของกระบวนการ ซึ่งผลการปรับปรุงกระบวนการพบว่าค่าความผันแปรของผลผลิตที่ได้มีค่าลดลง รวมถึงค่าเฉลี่ยของผลผลิตที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 97.5% มากกว่าค่าผลผลิตที่คาดหวัง (ธนภัทร, 2554)

นภนิกันติ์ วงศ์ทรัพย์สกุล, 2562

การใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมามาทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสมซึ่งจะสื่อออกมาในรูปของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และทำการปรับปรุงกระบวนการผสม EPDM ที่ไม่ใช่น้ำมันโดยหลังจากการใช้ขั้นตอน DMAIC ซึ่งประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลักที่สำคัญ พบว่าหลังการปรับปรุง ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความหนืดมูนนี่เฉลี่ยมีค่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เข้าใกล้ค่าที่คาดหวังหรือค่าเป้าหมายมากขึ้น และได้สะท้อนไปยังดัชนีความสามารถในกระบวนการที่เพิ่มขึ้น (Cpk) จาก -1.25 ถึง 3.92 นอกจากนี้วิธีออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองให้ผลลัพธ์การตั้งค่าสภาวะการผสมยาง EPDM non-oil มาสเตอร์แบทที่เหมาะสม คือ เวลาผสม 14 นาที, ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip gap) 1.10 มิลลิเมตร และจำนวนรอบของการรีดผ่าน nip gap 9 รอบ ผลวิจัยแสดงให้เห็นว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ลดลงจาก 0.45 เป็น 0.30 (นภนิกันติ์, 2562)

วรรณศิกา ศิริมงคล, 2562

การประยุกต์ใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา ทั้ง 5 ขั้นตอน ในการปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาปูพื้น เพื่อลดการเกิดของเสียกระเบื้องผิวหน้าไม่เรียบ โดยการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนภาพแสดงสาเหตุและผล และคัดเลือกตัวแปรนำเข้าโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ผลการศึกษาพบว่า รูตะแกรงของเครื่องบดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ขนาดตะแกรงร่อน และขนาดตะแกรงร่อนก่อนขึ้นกระพ้อลำเลียงของเครื่องบดเบอร์ 18 (Mesh No.18) หลังการปรับปรุงกระบวนการพบว่าจำนวนของเสียที่เกิดในกระบวนการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาปูพื้นลดลงเหลือ 34,610 DPPM ซึ่งเมื่อเทียบกับจำนวนของเสียก่อนการปรับปรุง สามารถลดได้ถึง 77% (วรรณศิกา, 2562)

วิทยา เจนจิวัฒนกุล, 2554

การนำแนวทางซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ในการลดของเสียจากกระบวนการพิมพ์ โดยยึดหลักในการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติเป็นสำคัญ ซึ่งงานวิจัยนี้ดำเนินการตามขั้นตอน 5 ระยะ จากการที่กระบวนการพิมพ์พลาสติกมีปริมาณของเสียสูงที่สุดในปี 2552 คิดเป็น 11.68% เมื่อทำการวิเคราะห์และคัดกรองปัญหาด้วยแผนภูมิก้างปลา และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FMEA จะได้ 3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียอย่างแท้จริง และเมื่อทำการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการโดยวิธีการ ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยภายหลังการปรับปรุงพบว่าของเสียลดลงเหลือ 1.53% เมื่อเทียบกับของเสียก่อนการปรับปรุงเท่ากับว่าสามารถลดปริมาณของเสียได้ถึง 86.90% (วิทยา, 2554)

ภารินี แก้วสม, 2556

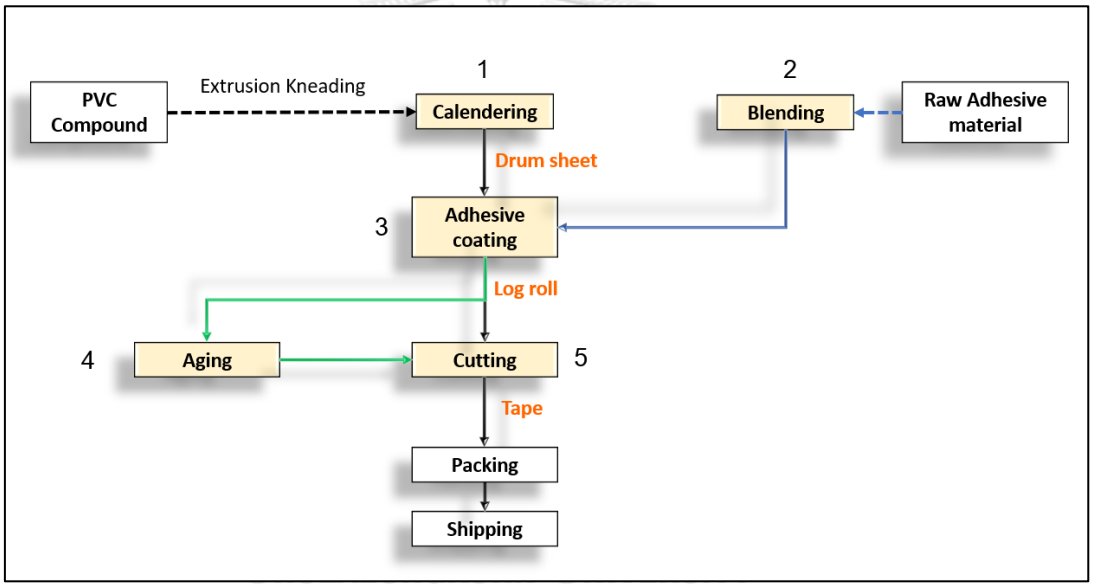
การลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทเส้นด้ายเป็นขนในกระบวนการผลิตดึงยืดเส้นด้าย โดยนำแนวคิดซิกซ์ ซิกม่ามาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการ ซึ่งข้อบกพร่องประเภทเส้นด้ายเป็นขนมีของเสีย 3.35% ของปริมาณการผลิต มีผลทำให้เกิดความสูญเสียเป็นเงิน 585,486 บาทต่อปี การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอนตามแนวคิดของซิกซ์ ซิกม่า ผลหลังจากทำการปรับปรุง พบว่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทเส้นด้ายเป็นขนลดลงจาก 3.35% เหลือ 1.47% หรือลดลงถึง 56.1% คิดเป็นมูลค่าความสูญเสียที่ลดลงได้ 293,632 บาทต่อปี สำหรับเครื่องจักรที่ทำการศึกษา (ภารินี, 2556)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
ระยะนิยามปัญหา (Define phase : D)

ขั้นตอนแรกของการปรับปรุงกระบวนการเพื่อแก้ปัญหาแกนเทปปูดตามแนวคิดซิกส์ซิกมาคือ ระยะนิยามปัญหา ที่เป็นขั้นตอนสำคัญในการกำหนดแนวทางการวิจัย โดยจะเริ่มจากการระดมสมองจากทีมงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการปรับปรุง ในการร่วมกันศึกษากระบวนการที่เกี่ยวข้องกับปัญหา อธิบายสภาพปัญหาให้ชัดเจน รวมทั้งกำหนดปัญหา เป้าหมาย และตัวชี้วัดของการวิจัยนี้ นำไปสู่การเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาในขั้นตอนต่อไป

3.1 ศึกษากระบวนการผลิต (Manufacturing method)

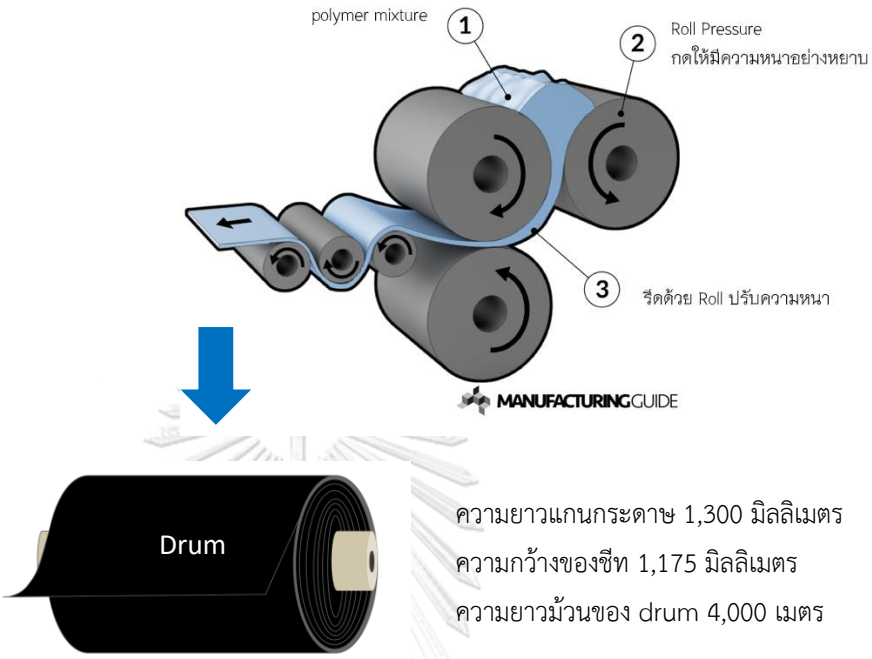


รูปที่39 กระบวนการผลิตเทปพันสายไฟที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโรงงานกรณีศึกษา

สำหรับกระบวนการผลิตหลักของเทปพันสายไฟจะแบ่งออกเป็น 5 กระบวนการ ดังรูปที่ 39 โดยอธิบายรายละเอียดของแต่ละกระบวนการได้ดังนี้

1. กระบวนการผลิตพีวีซีชีท (PVC film molding process) เริ่มจากการนำพีวีซีคอมพาวนด์ (PVC compound) และเม็ดสี (Masterbatch) มาหลอมเข้าด้วยกันผ่านเครื่องนวด (Extrusion kneading) ที่อุณหภูมิหลอมเหลวในช่วง (170-185°C) จากนั้นคอมพาวนด์ที่นวดจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการรีดเป็นแผ่นผ่านลูกรีด (Calendering roll) ขนาดต่างๆ เพื่อปรับระดับความหนาจนได้เป็นชีท

ตามค่ามาตรฐาน โดยจะมีน้ำหล่อเย็น (Cooling water) ไหลผ่านขณะรีด เพื่อลดอุณหภูมิของชีทก่อนส่งออกเข้าม้วนขนาดใหญ่ ที่เรียกว่าดรัม (Drum) ดังรูปที่ 40



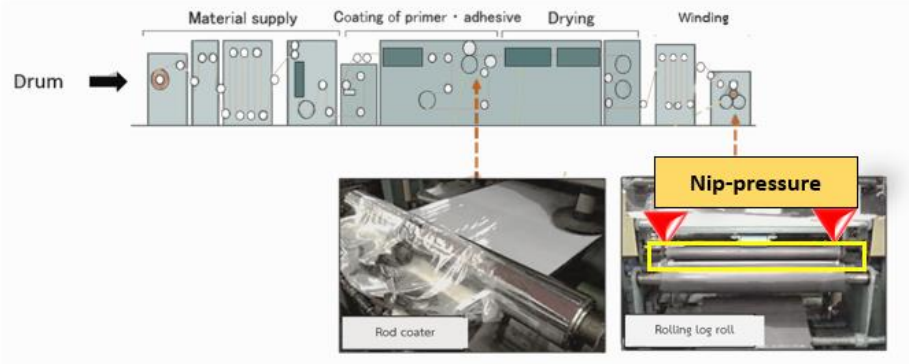
รูปที่40 กระบวนการผลิตพีวีซีชีทออกมาเป็นพีวีซีดรัมของโรงงานกรณีศึกษา

2. กระบวนการผสมกาว (Blending process) เป็นกระบวนการนำสารกาวต่างๆมาผสมกันตามสูตรที่ใช้กับเทปพันสายไฟแต่ละชนิด โดยกระบวนการนี้จะแยกจากไลน์การผลิตออกไป แล้วส่งกาวที่ผสมแล้ว ผ่านท่อนำกาวไปสู่เครื่องทากาวในกระบวนการเคลือสารกาวต่อไป

3. กระบวนการเคลือบสารกาวบนผิวชีท (Coating process) เป็นกระบวนที่นำดรัมชีทจากกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปมาทำการเคลือบด้วยไพรเมอร์ และเข้าตู้อบให้ไพรเมอร์แห้ง ผ่านสายพานลำเลียง (Conveyer) เพื่อให้ส่วนผสมที่เป็นน้ำระเหยออก จากนั้นจะถูกลำเลียงต่อไปที่ขั้นตอนการเคลือบสารกาวผ่าน Rod coater โดยจะมีการปรับความหนาของกาวที่จุดนี้ด้วย (ความหนากาวควบคุมอยู่ที่ 30±5 ไมครอน) จากนั้นชีทที่ผ่านการเคลือบด้วยกาวมาแล้ว จะถูกลำเลียงเข้าตู้อบอีกครั้ง เพื่อให้กาวแห้งและมีแรงเกาะติดเพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติของกาวอะครีลิค จากนั้นจะถูกลำเลียงออกจากตู้อบไปสู่ขั้นตอนการเข้าม้วนแกนยาว (Winding log roll) โดยขั้นตอนนี้จะมีการปรับแรงกดที่เรียกว่า Nip-pressure (เป็นแรงลมที่กดชีทให้ติดกับ

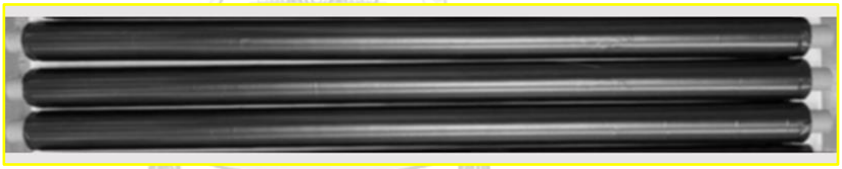
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แกนกระดาษและทำให้ผิวชีทเรียบ) ดังรูปที่ 41 ซึ่งแรงกดนี้จำเป็นที่จะต้องใช้ค่าที่เหมาะสม (กำหนดแรงกดไม่เกิน 2 บาร์) เนื่องจากแรงกดที่ต่ำเกินไปมักจะมีผลต่อการเกิดของเสียที่เป็นฟองอากาศและชีทยับย่นได้ หรือแรงกดที่สูงเกินไปมีผลต่อการเกิดแกนเทปปูด สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ออกจากกระบวนการเคลือบสารกาวนี้ จะเรียกว่า Log roll ที่มีลักษณะดังรูปที่ 42



รูปที่41 กระบวนการผลิตพีวีซีซีทของโรงงานกรณีศึกษา

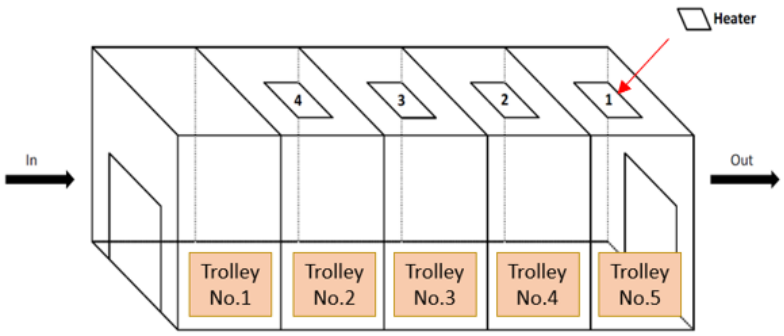
ความยาว log roll 1,300 มิลลิเมตร



รูปที่42 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทป Log roll

4. กระบวนการอบ (Aging Process) ผลิตภัณฑ์ที่เป็น Log roll บางชนิด จะใช้สารกาวชนิดพิเศษที่จำเป็นต้องมีการอบให้ความร้อนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านแรงเกาะติดของกาว ซึ่งกาวแต่ละชนิดจะใช้อุณหภูมิและเวลาในการอบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดสารกาวและปริมาณการบรรจุงานในตู้อบด้วย โดยตู้อบ log roll ที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษาสามารถปรับตั้งอุณหภูมิได้สูงสุด 90 องศาเซลเซียส และสามารถบรรจุงานได้มากที่สุด 5 รถเข็น (Trolley) โดยรถเข็นแต่ละคันจะสามารถบรรจุได้ 64 log rolls ดังรูปที่ 43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่43 ลักษณะตู้อบผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทป Log roll ในโรงงานกรณีศึกษา

5. กระบวนการตัด (Cutting process) ภายหลังจากได้ผลิตภัณฑ์เทป Log roll จากกระบวนการเคลือบกาวหรือผ่านการอบมาแล้ว ชิ้นงานจะถูกส่งไปยังกระบวนการตัดเป็นเทป (Cutting process) โดยเครื่องตัดจะมีลักษณะจับยึดแกนกระดาษที่อยู่ด้านซ้ายของ Log roll เพียงด้านเดียวเพื่อหมุน Log roll ในขณะที่ใบมีดตัดจะเคลื่อนเข้าหา Log roll จากทางซ้ายแล้วขยับไปทางขวา ดังรูปที่ 44 ระยะตามขนาดความกว้างมาตรฐานของเทปที่กำหนดไว้ (กำหนดขนาดหน้ากว้างของเทปที่ 19±1 มิลลิเมตร)

รูปที่44 กระบวนการตัด Log roll เป็นเทป

หลังเสร็จสิ้นกระบวนการตัดเป็นเทป ผลิตภัณฑ์เทปที่ได้จะถูกบรรจุใส่กล่อง เพื่อรอการนำไปส่งให้ลูกค้าต่อไป โดยในระหว่างการบรรจุ (Packaging) จะมีการสุ่มแยกผลิตภัณฑ์เทปเพื่อนำไปตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในทุกๆล็อตการผลิต ก่อนจะนำไปส่งมอบให้ลูกค้า

3.2 การกำหนดปัญหา

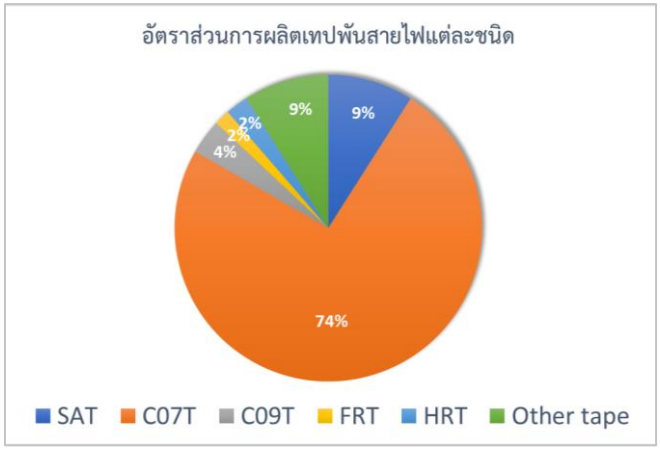
จากการศึกษาข้อมูลการผลิต พบว่าปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษาประสบกับปัญหาผลิตภัณฑ์เกิดของเสียในกระบวนการผลิต ทำให้มีผลิตภัณฑ์ดี (Finish good) จำนวนน้อยกว่าที่วางแผนไว้ จึงจำเป็นต้องมีการใช้วัตถุดิบ และเวลาในการผลิตเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อการผลิตไม่เป็นไปตามเป้าหมายจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียของรายได้หรือกำไรลดลง อีกทั้งการผลิตที่ล่าช้าก็ส่งผลให้การส่งมอบถึงลูกค้าล่าช้าไปด้วย อันมีผลให้ความน่าเชื่อถือจากลูกค้าลดลง และอาจทำให้สูญเสียกำไรในระยะยาวได้

ในการศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตเทปพันสายไฟ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณของเสียที่เกิดกับผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟแต่ละชนิด โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการผลิตตั้งแต่ช่วงเดือนพฤษภาคม 2563 ถึงเดือนเมษายน 2564 เป็นเวลา 12 เดือน ดังตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า จากจำนวนการผลิตเทปพันสายไฟทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 45 เทปชนิด C07T มีจำนวนการผลิตสูงที่สุด คิดเป็น 74.58% และจากจำนวนการผลิตที่สูงนี้จึงทำให้พบจำนวนของเสียมากที่สุดด้วย ซึ่งคิดเป็นของเสีย 76.62% ของจำนวนของเสียทั้งหมดในโรงงาน หรือ 11.65% ของจำนวนการผลิตเทปชนิด C07T โดยเมื่อพิจารณาจากราคาต้นทุนของเสียต่อปีร่วมด้วย จะเห็นได้ว่าเทปชนิด C07T มีราคาต้นทุนที่เป็นของเสียคิดเป็น 41.88 ล้านบาท (ราคาต้นทุนของเทปชนิด C07T เท่ากับ 7.55 บาท/ชิ้น) ซึ่งจากการพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการปรับปรุงแล้ว ผู้จัดทำจึงเล็งเห็นว่าควรทำการลดของเสียที่เกิดจากเทปพันสายไฟชนิด C07T เป็นลำดับแรก

ตารางที่ 3 ปริมาณของเสียจากผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟแต่ละชนิดในระยะเวลา 12 เดือน

ชนิดผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟ	จำนวนการผลิตทั้งหมด		จำนวนของเสีย			ราคาต้นทุนของเสีย/ปี
	ชิ้น	% การผลิตเทียบกับผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	ชิ้น	% ของเสียเทียบกับผลิตภัณฑ์ทั้งหมด	% ของเสียเทียบกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด	(ล้านบาท)
SAT	5,461,160	8.56	361,281	4.99	6.62	2.33
C07T	47,599,500	74.58	5,546,809	76.62	11.65	41.88
C09T	2,372,200	3.72	297,125	4.10	12.53	2.10
FRT	1,095,288	1.72	156,734	2.16	14.31	1.49
HRT	1,634,840	2.56	282,707	3.90	17.29	4.20
TST	5,660,000	8.87	595,160	8.22	10.52	3.72
จำนวนรวม	**63,822,988**	**100.00**	**7,239,815**	**100.00**	**72.91**	**55.72**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

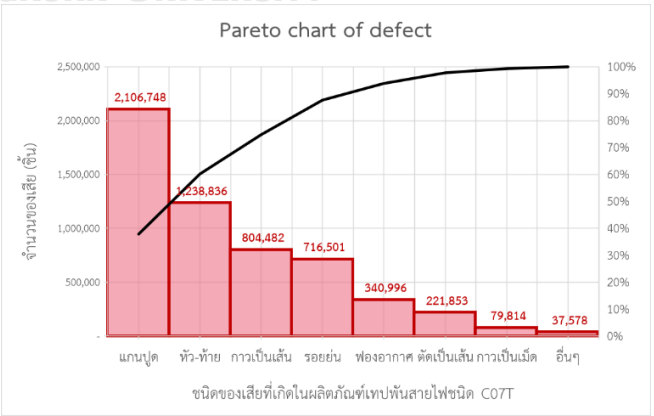


รูปที่45 แผนภูมิแสดงสัดส่วนการผลิตเทปพันสายไฟแต่ละชนิดในโรงงานกรณีศึกษา

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทปพันสายไฟมักจะเกิดของเสียได้หลายประเภท เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทปพีวีซีนั้น ค่อนข้างจะอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆทั้งภายในและภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมในทุกขั้นตอนการผลิต รวมถึงการปรับปรุงหน้างานอยู่เสมอ ซึ่งเทปพันสายไฟชนิด C07T ที่มีสัดส่วนของเสียเป็นจำนวนมากที่สุดนั้น จำเป็นที่จะต้องศึกษาประเภทของของเสียที่เกิดกับเทป C07T เพื่อพิจารณาลำดับในการดำเนินการ รวมถึงหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

โดยจากการเก็บข้อมูลในกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟชนิด C07T ในช่วงเดือนพฤษภาคม 2563 ถึงเดือนเมษายน 2564 เป็นเวลา 12 เดือน สามารถจำแนกประเภทของเสียที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 46 และแผนภาพพาเรโตดังรูปที่ 47

ชนิดของเสีย (Defect type)	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	% ของเสีย
แกนปูด	2,106,748	37.98
รอยย่น	716,501	12.92
ฟองอากาศ	340,996	6.15
กาวเป็นเส้น	804,482	14.50
กาวเป็นเม็ด	79,814	1.44
หัว-ท้าย	1,238,836	22.33
ตัดเป็นเส้น	221,853	4.00
อื่นๆ	37,578	0.68
Total (Pcs)	5,546,809	100



รูปที่46 ปริมาณของเสียที่เกิดกับเทปชนิด C07T แต่ละประเภท (ซ้าย)

รูปที่47 ปริมาณของเสียจำแนกตามประเภท (ขวา)

จากรูปที่ 46 และ รูปที่ 47 จะเห็นได้ว่าเทปพันสายไฟชนิด C07T เกิดของเสียประเภทแกนปูดมากที่สุด คิดเป็น 37.98% ของจำนวนของเสียทั้งหมด ซึ่งคำนวณเป็นต้นทุนของเสีย 15.9 ล้านบาท ดังนั้นจากการพิจารณาข้อมูลนี้ จึงได้นำมาซึ่งการศึกษากระบวนการผลิตเทปพันสายไฟ เพื่อปรับปรุงแก้ไขในการลดของเสียประเภทแกนปูดในเทปพันสายไฟชนิด C07T

3.2.1 การตรวจสอบของเสียที่เกิดจากแกนเทปปูด

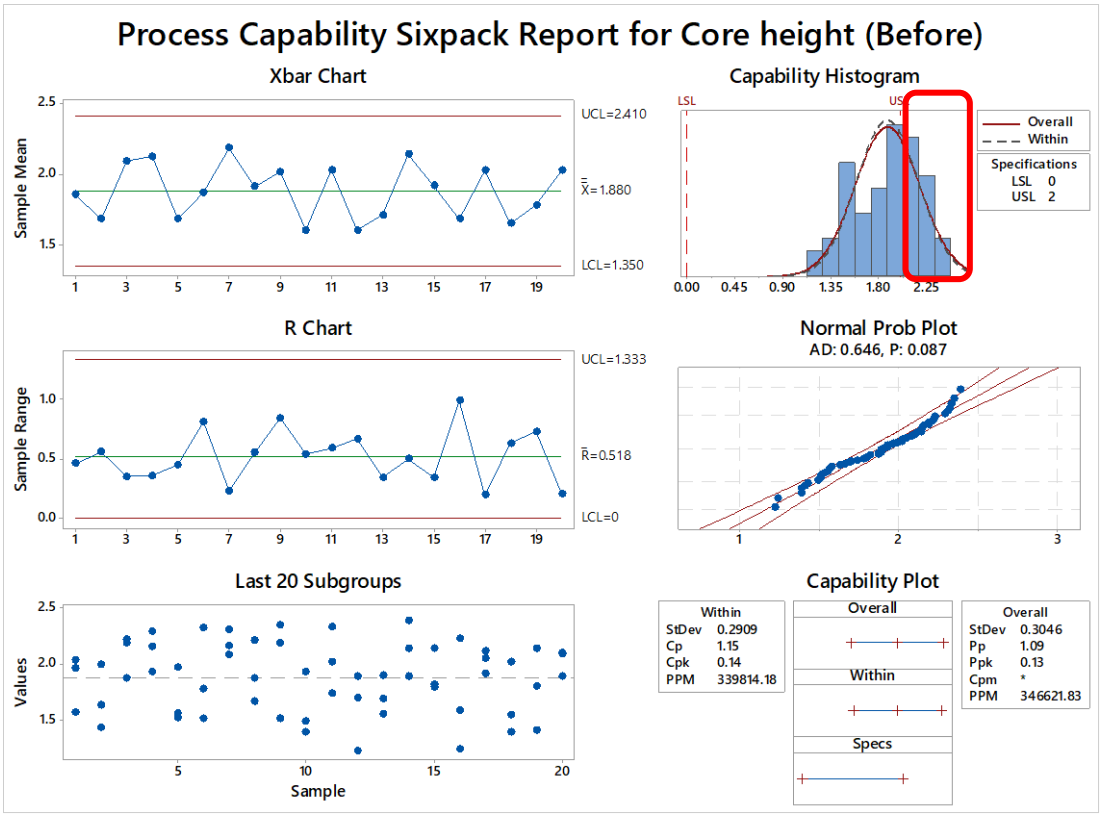
ในปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษา ได้นำวิธีการตรวจสอบเทปปูดภายหลังการผลิต เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาก่อนถึงมือลูกค้า โดยการใช้วิธีจำลองสภาวะการขนส่งของเทปเมื่อได้รับความร้อนและความชื้นเป็นเวลานาน กล่าวคือ การนำตัวอย่างเทปแต่ละล็อตการผลิตมาอบในตู้ (Geer oven) ด้วยอุณหภูมิ 80°C x ความชื้น 90% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเร่งให้เกิดการปูด สำหรับลดเวลาในการตรวจสอบ (เงื่อนไขการอบเป็นมาตรฐานที่ได้รับมาจากหน่วยงานวิจัยและพัฒนาจากต่างประเทศ) หลังจากนั้นจะทำการวัดส่วนสูงของเทป โดยใช้เวอร์เนียแบบดิจิตอล (Vernier Caliper) ซึ่งมีมาตรฐานในการวัดคือ ความสูงของเทปหลังอบต้องไม่เกิน 2 มิลลิเมตรเทียบกับหน้ากว้างของเทปชนิดนั้นๆ โดยหากเทปปูดเพียงหนึ่งชิ้นจะถือว่าล็อตการผลิตนั้นมีของเสียเกิดขึ้น และจะต้องระงับการส่งออกไปให้ลูกค้าในทันที

ปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษามีเพียงวิธีการตรวจสอบเทปปูด เพื่อป้องกันไม่ให้ปัญหาหลุดรอดไปถึงลูกค้าได้เท่านั้น ยังไม่มีวิธีการที่สามารถลดการเกิดของเสียประเภทเทปปูดนี้ได้ ทำให้ปัญหานี้ยังคงอยู่ในกระบวนการผลิตต่อเนื่องมายาวนาน และจากปัญหาข้างต้นจะเห็นได้ว่าเทปพันสายไฟประเภท C07T มีผลผลิตที่เป็นของเสียประเภทเทปปูดสูง ทำให้เกิดการสูญเสียต้นทุนรวมถึงผลกำไรที่ลดลงมากกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ อีกทั้งยังเป็นปัญหาที่เกิดมาอย่างต่อเนื่องยาวนาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกที่จะทำการศึกษาและวิเคราะห์หาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการเกิดปัญหาเทปปูดและทำการปรับปรุงตามแนวคิดและหลักการของซิกซ์ ซิกมา เพื่อลดปัญหาแกนปูดของเทปพีวีซี และสามารถเพิ่มผลผลิตของผลิตภัณฑ์ดี ส่งผลต่อการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มผลกำไรในระยะยาว อีกทั้งยังมีความเป็นไปได้ที่จะทำการศึกษาขยายผลการปรับปรุงไปยังเทปชนิดอื่นๆที่อาจเกิดปัญหาเทปปูดได้อีกด้วย

สำหรับการศึกษาปัญหาแกนเทปปูดในวิจัยนี้ จะทำการปรับปรุงโดยพิจารณาจากค่าความสูงของแกนเทปปูดแทนสัดส่วนของเสีย (โดยค่าความสูงนี้สามารถนำมาคำนวณกลับเป็นสัดส่วนของเสียได้) เนื่องจากทางโรงงานกรณีศึกษาต้องการผลลัพธ์ที่เป็นค่าความสูง (มิลลิเมตร) เพื่อใช้ในการรองรับ

การเปลี่ยนแปลงเกณฑ์ความสูงของแกนเทปปูดของลูกค้าได้ในอนาคต และสามารถนำไปพิจารณาเพื่อปรับปรุงกับเทปขนาดอื่นๆได้อีกด้วย

เมื่อนำผลผลิตที่ได้จากกระบวนการผลิตเทป C07T แต่ละล็อตของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน มาทำการตรวจสอบคุณภาพในการวัดความสูงของแกนเทปปูด โดยใช้มาตรฐานการตรวจสอบของโรงงาน เพื่อนำมาวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) แสดงได้ดังรูปที่ 48



รูปที่48 ความสามารถของกระบวนการของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน

เมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Cpk) เท่ากับ 0.14 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์การยอมรับที่ 1.33 สามารถอธิบายได้ว่าความสามารถของกระบวนการผลิตเทปชนิด C07T ในโรงงานกรณีศึกษาปัจจุบันมีความแตกต่างกันมากระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเป้าหมาย จึงไม่สามารถยอมรับกระบวนการนี้ได้ จำเป็นต้องทำการปรับปรุง โดยความสูงของแกนมีค่าเฉลี่ยที่ 1.88 มิลลิเมตร ซึ่งยังค่อนข้างสูง และพบอีกว่าความสูงของแกนเทปปูดเกินค่ามาตรฐานที่ 2 มิลลิเมตร คิดเป็นสัดส่วนของเสียถึง 40% อีกด้วย ดังนั้นปัญหาเรื่องความสูงของแกนเทปปูดเกินมาตรฐาน จึงถูกนำมาพิจารณาปรับปรุงในงานวิจัยนี้

3.3 การกำหนดเป้าหมายและตัวชี้วัด

เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟโดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา เพื่อลดความสูงของแกนเทปปูดในเทปพันสายไฟชนิด C07T ให้อยู่ในค่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนด คือไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ปริมาณของเสียลดลงได้ โดยมีความคาดหวังภายหลังการปรับปรุง คือผลผลิตของกระบวนการต้องมีค่าเฉลี่ยความสูงของแกนเทปปูดลู่เข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น และคิดเป็นสัดส่วนของเสียไม่เกิน 10% ตามนโนบายของโรงงานกรณีศึกษา โดยพิจารณาได้จากค่า Cpk ของกระบวนการควรมีค่ามากกว่า 1.33 ซึ่งในปัจจุบันให้ค่าเฉลี่ยความสูงแกนเทปปูดอยู่ที่ 1.88 มิลลิเมตร ซึ่งยังมีค่าความสูงของแกนปูดมากกว่า 2 มิลลิเมตรคิดเป็นสัดส่วนของเสียสูงถึง 40% รวมไปถึงค่า Cpk ของกระบวนการปัจจุบันอยู่ที่ 0.14

3.4 การจัดตั้งคณะทำงาน

เพื่อให้กระบวนการปรับปรุงมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ทางผู้วิจัยและโรงงานกรณีศึกษาได้มีการจัดตั้งคณะทำงานจากผู้ที่มีความชำนาญและมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟ ในการร่วมกันศึกษา วิเคราะห์หาสาเหตุหลักของปัญหา และหาแนวทางการปรับปรุงที่เหมาะสมร่วมกันตามเป้าหมายของงานวิจัยนี้ โดยทีมงานประกอบไปด้วย

1. ผู้จัดการฝ่ายควบคุมผลิต (Production control section manager)
2. ผู้จัดการฝ่ายผลิต (Production section manager)
3. หัวหน้าฝ่ายผลิต (Production supervisor)
4. วิศวกรฝ่ายการผลิต (Production engineer)
5. พนักงานฝ่ายผลิต (Production operator)
6. หัวหน้าพนักงานฝ่ายประกันคุณภาพ (Quality Assurance supervisor)
7. ผู้จัดการฝ่ายวิจัยและพัฒนา (Research and Development section manager)
8. ผู้ดำเนินงานวิจัย (Researcher)

นอกจากนี้ยังมีผู้จัดการโรงงานซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษา อำนวยความสะดวก และอนุมัติในการดำเนินงานในขั้นตอนต่างๆ ให้สามารถกระทำได้อย่างราบรื่น โดยภายในทีมงานจะมีหน้าที่นำความรู้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

และประสบการณ์มาใช้ในการระดมสมอง เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปัญหาแกนเทปปูด โดยใช้เครื่องมือต่างๆในการวิเคราะห์ ได้แก่ แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram), ตารางสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) และ FMEA ดังจะกล่าวในบทต่อไป

3.5 การสร้างสัญญาโครงการ (Project Charter)

ตารางที่ 4 สัญญาโครงการ (Project Charter)

Project Title: การลดปัญหาแกนปูดของเทปพีวีซีโดยใช้แนวทางซิกส์ ซิกมา

Business Case:

มีสัดส่วนของเสียประเภทแกนเทปปูดสูง ส่งผลให้ลูกค้ามีความพึงพอใจลดลง อีกทั้งยังมีต้นทุนของเสียเพิ่มสูงขึ้น และผลกำไรของโรงงานลดลง

Problem Statement:

ผลิตภัณฑ์เทปพันสายไฟชนิด C07T พบของเสียประเภทแกนปูด คิดเป็นสัดส่วนของเสียที่ 37.98% ของจำนวนของเสียทั้งหมด ซึ่งคำนวณเป็นต้นทุนของเสียเท่ากับ 15.9 ล้านบาท/ปี

Objective Statement:

ปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปชนิด C07T เพื่อลดความสูงของแกนเทปปูดให้มีความสูงของแกนเทปปูดลู่เข้าใกล้ศูนย์มากขึ้นโดยไม่เกินค่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนด (ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร) และมีสัดส่วนของเสียไม่เกิน 10% ตามนโนบายของโรงงานกรณีศึกษา โดยพิจารณาได้จากความสามารถของกระบวนการ (Cpk) มีค่ามากกว่า 1.33

Project Scope:

ทำการศึกษากระบวนการผลิตเทปพันสายไฟชนิด C07T ในโรงงานกรณีศึกษาเท่านั้น

Project Assumptions:

ได้รับการสนับสนุนจากผู้บริหารในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามเป้าหมายที่กำหนด

Team Members:

1. ผู้จัดการฝ่ายควบคุมผลิต
2. ผู้จัดการฝ่ายผลิต
3. หัวหน้าฝ่ายผลิต
3. วิศวกรฝ่ายการผลิต
4. พนักงานฝ่ายผลิต
5. หัวหน้าพนักงานฝ่ายประกันคุณภาพ
8. ผู้จัดการฝ่ายวิจัยและพัฒนา
8. ผู้ดำเนินงานวิจัย

Project Metrics:

Business Metrics	: ความพึงพอใจของลูกค้า
Primary Metrics	: ความสูงของแกนเทปปูดเกินมาตรฐานโรงงานที่ 2 มิลลิเมตร
Secondary Metrics	: ความสามารถของกระบวนการ (Cpk) มากกว่า 1.33
Consequential Metrics	: การเกิดของเสียอื่นๆ
Financial Metrics	: ต้นทุนการผลิต

Project Timeline:

ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินโครงการ
ตั้งแต่ 10 พฤษภาคม 2564 ถึง 24 ธันวาคม 2564

Phase	Start	Finish
Define	10/พค/2564	31/พค/2564
Measure	01/มิย/2564	30/มิย/2564
Analyze	01/กค/2564	31/สค/2564
Improve	01/กย/2564	30/ตค/2564
Control	01/ตค/2564	24/ธค/2565

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.6 สรุประยะนิยามปัญหา

ในระยะนิยามปัญหาผู้วิจัยได้ทำการศึกษา และเก็บรวบรวมข้อมูลจากกระบวนการผลิตเทปพีวีซีชนิด C07T ในโรงงานกรณีศึกษา เพื่อระบุปัญหาสำคัญที่จำเป็นต้องแก้ไข โดยทำการเก็บข้อมูลการผลิตตั้งแต่ช่วงเดือนพฤษภาคม 2563 ถึงเดือนเมษายน 2564 เป็นเวลา 12 เดือน พบว่าเทปชนิด C07T มีจำนวนการผลิตสูงที่สุด คิดเป็น 74.58% และจากจำนวนการผลิตที่สูงนี้ จึงทำให้พบจำนวนของเสียมากที่สุดด้วย ซึ่งคิดเป็นของเสีย 76.62% ของจำนวนของเสียทั้งหมดในโรงงาน โดยเมื่อพิจารณาจากราคาต้นทุนของเสียต่อปีร่วมด้วย จะเห็นได้ว่าเทปชนิด C07T มีราคาต้นทุนที่เป็นของเสียคิดเป็น 41.88 ล้านบาท/ปี (ราคาต้นทุนของเทปชนิด C07T เท่ากับ 7.55 บาท/ชิ้น) ซึ่งจากการพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการปรับปรุงแล้ว ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าควรทำการลดของเสียที่เกิดจากเทปพันสายไฟชนิด C07T เป็นลำดับแรก โดยจากการศึกษาประเภทของของเสียที่เกิดกับเทป C07T สามารถจำแนกประเภทของเสียที่เกิดขึ้น และพบว่าเกิดของเสียประเภทแกนปูดมากที่สุด คิดเป็น 37.98% ของจำนวนของเสียทั้งหมด ซึ่งคำนวณเป็นต้นทุนของเสีย 15.9 ล้านบาท/ปี และปริมาณการเกิดของเสียนี้ยังมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหากไม่ได้รับการปรับปรุงแก้ไขอย่างถาวร จะทำให้บริษัทต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้น สูญเสียชื่อเสียงเพราะสินค้าไม่ได้คุณภาพ และอาจจะสูญเสียความน่าเชื่อถือจากการส่งมอบสินค้าที่ล่าช้าได้ จึงเป็นเหตุผลสำคัญในการที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นต่อไป โดยมีเป้าหมายในการลดความสูงของแกนเทปปูดในเทปพันสายไฟชนิด C07T ให้อยู่ในค่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนด คือไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ปริมาณของเสียลดลงได้ และมีความคาดหวังภายหลังการปรับปรุง คือผลผลิตของกระบวนการต้องมีค่าเฉลี่ยความสูงของแกนเทปปูดลู่เข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น และคิดเป็นสัดส่วนของเสียไม่เกิน 10% ตามนโนบายของโรงงานกรณีศึกษา โดยพิจารณาได้จากค่า Cpk ของกระบวนการควรมีค่ามากกว่า 1.33 ซึ่งในปัจจุบันให้ค่าเฉลี่ยความสูงแกนเทปปูดอยู่ที่ 1.88 มิลลิเมตร ซึ่งยังมีค่าความสูงของแกนปูดมากกว่า 2 มิลลิเมตรคิดเป็นสัดส่วนของเสีย 40% รวมไปถึงค่า Cpk ของกระบวนการปัจจุบันอยู่ที่ 0.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ระยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา (Measure phase : M)

หลังจากได้หัวข้อปัญหาจากขั้นตอนระยะนิยามปัญหาในบทที่ 3 ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของระบบการวัด (Gauge R&R) อันได้แก่ เครื่องมือวัด พนักงานวัด และชิ้นงานที่นำมาวัด ที่อาจมีองค์ประกอบแตกต่างกันและสามารถส่งผลต่อความผันแปรในระบบการวัดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ความแม่นและความเที่ยงของระบบที่ใช้ในการตรวจวัดระยะความสูงของแกนเทป เพื่อให้มั่นใจว่าเครื่องมือที่นำมาใช้วัดกระบวนการมีประสิทธิภาพเพียงพอ และข้อมูลที่ได้จากการวัดมีความน่าเชื่อถือ อันจะนำไปสู่การค้นหาสาเหตุที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการเกิดปัญหาแกนเทปปูด โดยจะมีการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการประเมินความสามารถของกระบวนการในปัจจุบัน และใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาสาเหตุ จากนั้นทำการระดมสมองจากทีมงานผู้ที่เกี่ยวข้องโดยใช้หลักการวิเคราะห์และเครื่องมือทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์สาเหตุต่างๆ ได้แก่ แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram), ตารางแสดงความสัมพันธ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) และ การวิเคราะห์ลักษณะบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis; FMEA) เพื่อนำไปหาวิธีการแก้ไขปัญหา ปรับปรุงกระบวนการให้เป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ต่อไป

4.1 การวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงตรงของระบบเครื่องมือวัด

การวิเคราะห์ระบบการวัดเป็นวิธีการทดสอบทางสถิติ ในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดในกระบวนการผลิตว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ จากการที่ความแปรปรวนในกระบวนการวัดสามารถส่งผลโดยตรงต่อความแปรปรวนของกระบวนการโดยรวม โดยระบบการวัดที่มีประสิทธิภาพจะสามารถช่วยรับรองได้ว่า ข้อมูลที่รวบรวมมานั้นมีความถูกต้อง (accuracy), ความแม่นยำ (precision), ความเสถียรของระบบ (stability) และข้อมูลมีความเหมาะสมกับกระบวนการ ซึ่งข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือนี้จะช่วยลดเวลา แรงงาน และวัตถุดิบในกระบวนการผลิตได้ กล่าวคือ ระบบการวัดที่ไม่มีประสิทธิภาพสามารถยอมให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสีย ได้รับการยอมรับ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ดีถูกปฏิเสธ ส่งผลให้เกิดของเสียมากเกินไป และทำให้เกิดความไม่พึงพอใจจากลูกค้า ทั้งนี้ การวิเคราะห์ระบบการวัด จะสามารถป้องกันปัญหา และทำให้มั่นใจได้ว่ามีการรวบรวมข้อมูลที่ถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในการวิเคราะห์ระบบการวัดจะประเมินโดยการใช้เครื่องมือเฉพาะ ในที่นี้คือดิจิตอลเวอร์เนียร์ เพื่อตรวจสอบที่มาของการแปรผันที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน (Part to Part Variation), พนักงานวัด (Appraiser Variation) และความผันแปรร่วม (Interaction Variation) โดยผลรวมของทั้งสามนี้ จะแสดงถึงความผันแปรทั้งหมดในระบบการวัดอีกด้วย ซึ่งในการวิเคราะห์ระบบการวัดนี้ จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Gage repeatability and reproducibility หรือ G R&R ที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำของเครื่องมือวัด เพื่อให้เกิดความมั่นใจในผลที่ได้จากระบบวัดจะต้องมีการวิเคราะห์ความแม่นยำ (Precision) และความเที่ยงตรง (Accuracy) โดยการวิเคราะที่เกี่ยวข้องกับความผันแปรที่เกิดขึ้นจากระบบการวัดได้ 2 ด้านดังนี้

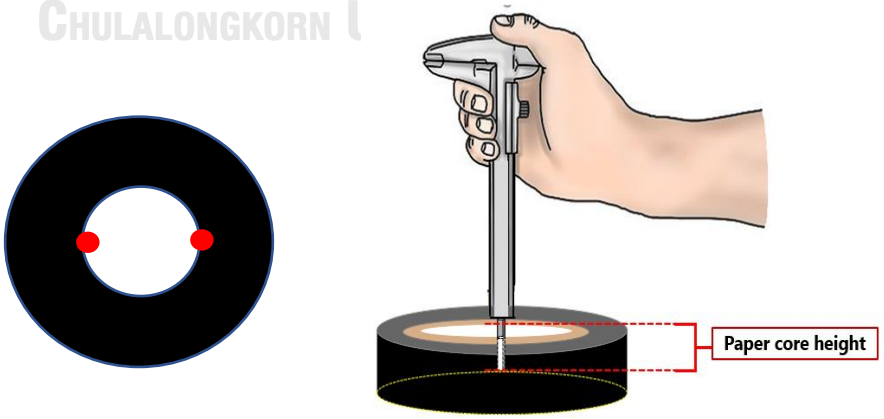
1. Repeatability คือ ความสามารถในการทำซ้ำ จะประเมินว่าผู้ประเมินรายเดียวกันสามารถวัดชิ้นส่วนต่อตัวอย่างเดียวกันได้หลายครั้ง ด้วยอุปกรณ์วัดเดียวกันหรือไม่ และได้ผลเป็นค่าเดียวกันหรือไม่

2. Reproducibility คือ ความสามารถในการทำซ้ำ จะประเมินว่าผู้ประเมินที่แตกต่างกันสามารถวัดชิ้นส่วน/ตัวอย่างเดียวกันด้วยอุปกรณ์วัดเดียวกันและได้ผลเป็นค่าเดียวกันหรือไม่

4.1.1 การออกแบบการวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงตรงของระบบการวัด

ในการผลิตเทปพันสายไฟชนิด C07T จะมีการตรวจวัดคุณภาพเรื่องความสูงของแกนเทป ซึ่งมีค่าเป้าหมายความสูงไม่เกิน 2 มิลลิเมตร โดยในการวัดความสูงของเทป จะวัดด้วยดิจิตอลเวอร์เนียตามตำแหน่งบนชิ้นงาน 2 จุดตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN U



รูปที่49 การวัดความสูงของแกนเทปสองตำแหน่งโดยใช้ดิจิตอลเวอร์เนียร์

ขั้นตอนในการตรวจสอบของเสียที่เกิดจากแกนเทปปูด จะปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้ (การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA))

1. คัดเลือกพนักงานผู้ชำนาญการที่มีประสบการณ์ในด้านการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สามารถแยกแยะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีและเสียออกจากกันได้ มาทำการทดสอบจำนวน 3 คน
2. คัดเลือกชิ้นงานในกระบวนการผลิตที่ต่างล็อตกัน (lot) เพื่อให้แน่ใจถึงคุณภาพของวัตถุดิบที่นำมาทำการทดลอง และยืนยันได้ว่าไม่มีความแตกต่างหรือความผันแปรสำหรับล็อตการผลิตที่แตกต่างกัน

โดยขนาดตัวอย่างชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบ จะอ้างอิงเกณฑ์จากตารางที่ 5 (Fasser and Brettner ,1992) จำนวน 10 ชิ้น ประกอบไปด้วยชิ้นงานดี (ผ่านเกณฑ์การยอมรับ) 6 ชิ้น ชิ้นงานเสีย (ไม่ผ่านเกณฑ์การยอมรับ) 4 ชิ้น

ตารางที่ 5 ขนาดตัวอย่างในการเก็บข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์และประเมินระบบการวัดที่เหมาะสม

จำนวนผู้ทดสอบ	**จำนวนอุปกรณ์วัด**	**จำนวนชิ้นงานอย่างน้อย**	**จำนวนการวัดซ้ำในแต่ละชิ้นงาน**
1	1	10	5
1	2	15	3
2	1	15	3
2	2	10	2
1 หรือ 2	3 หรือมากว่า	10	2
3 หรือมากกว่า	1 หรือ 2	10	2
3 หรือมากว่า	3 หรือมากกว่า	10	2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. ทำการออกแบบลำดับในการวัดชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อให้เกิดการวัดแบบสุ่ม (Randomization) ในการลดความเอนเอียง (Bias) ของระบบการวัด
4. ให้พนักงานคนแรกทำการตรวจสอบ และประเมินชิ้นงานตัวอย่างทุกชิ้นในรอบแรก โดยมีลำดับการวัดอย่างสุ่ม และให้พนักงานคนที่สองวัดเช่นเดียวกันต่อไปเรื่อยๆ จนครบทั้งสามคน จึงเสร็จสิ้นการวัดค่าครั้งแรกของพนักงานทุกคน
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 ให้ครบ 2 รอบตามที่ได้กำหนดไว้
6. บันทึกผลการวัดผ่านคนกลาง เพื่อลดความลำเอียงในการบอกค่าวัดของพนักงานวัดแต่ละคน

7. นำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์ความผันแปรของระบบการวัด โดยใช้เครื่องมือ Gage R&R ที่ได้จากโปรแกรม Minitab

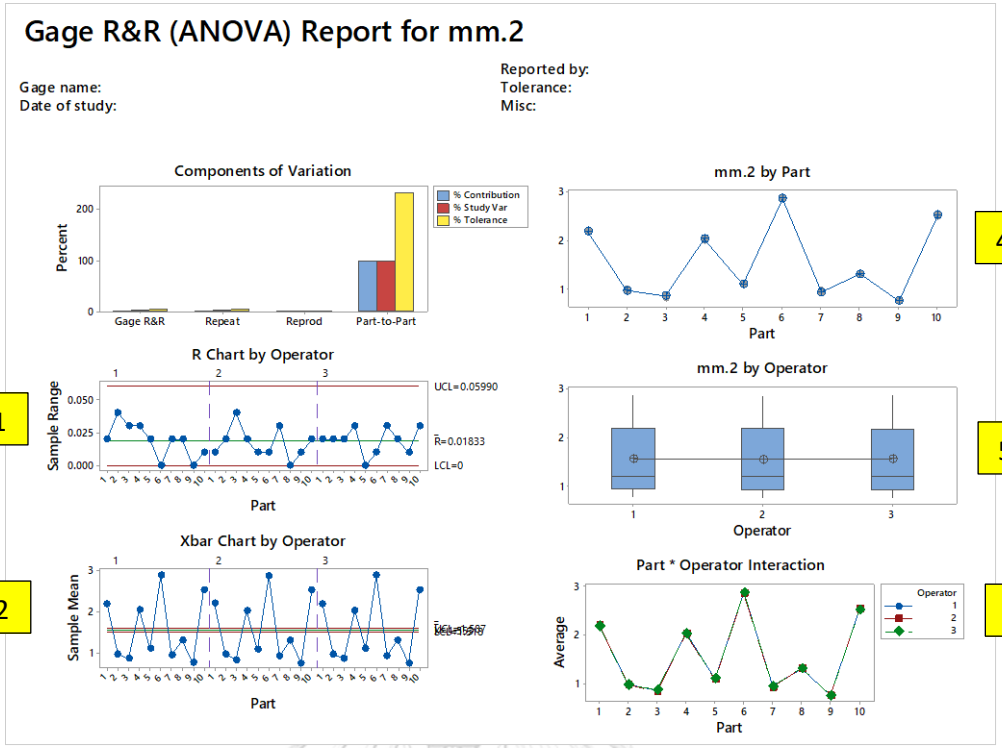
หลังจากการทดสอบตามลำดับวิธีการจากข้างต้น จะดำเนินการวิเคราะห์ความแม่นยำและเที่ยงตรงของระบบการวัดความสูงของแกนเทปในชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการผลิต ด้วยเครื่องมือวัดดิจิตอลเวอร์เนียร์ และได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวัดความสูงของแกนเทปในชิ้นงานเทปตัวอย่าง จำนวน 10 ชิ้น ที่ได้จากกระบวนการผลิตเทปต่างล็อตการผลิตกัน ในหน่วยมิลลิเมตร

No. of machine : 1 vernier caliper							
No.of sample	Sampling tape no.	Operator 1		Operator 2		Operator 3	
		Replication 1	Replication 2	Replication 1	Replication 2	Replication 1	Replication 2
1	NG	2.20	2.18	2.19	2.20	2.19	2.17
2	G	0.95	0.99	0.96	0.98	0.97	0.95
3	G	0.88	0.85	0.85	0.81	0.88	0.86
4	NG	2.06	2.03	2.01	2.03	2.04	2.01
5	G	1.11	1.09	1.08	1.09	1.10	1.10
6	NG	2.88	2.88	2.86	2.85	2.87	2.88
7	G	0.94	0.96	0.91	0.94	0.95	0.92
8	G	1.29	1.31	1.31	1.31	1.32	1.30
9	G	0.76	0.76	0.76	0.75	0.75	0.76
10	NG	2.53	2.52	2.54	2.52	2.53	2.50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลจากการวัดในตารางที่ 6 จะนำมาวิเคราะห์ด้วย Gage R&R ในโปรแกรม Minitab ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดความสูงของแกนเทปด้วยเครื่องดิจิตอลเวอร์เนียร์ (Measurement system analysis : MSA) ดังรูปที่ 50



รูปที่ 50 ผลการทดสอบระบบการวัดความสูงของแกนเทปที่ได้จากโปรแกรม Minitab

Gage R&R Study - ANOVA Method

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	32.5360	3.61511	17184.5	0.000
Operator	2	0.0012	0.00061	2.9	0.082
Part * Operator	18	0.0038	0.00021	0.9	0.562
Repeatability	30	0.0069	0.00023		
Total	59	32.5478			

α to remove interaction term = 0.05

4
5
3

Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	32.5360	3.61511	16313.9	0.000
Operator	2	0.0012	0.00061	2.7	0.075
Repeatability	48	0.0106	0.00022		
Total	59	32.5478			

รูปที่ 51 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab (1)

Gage R&R

Variance Components

7

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.000241	0.04
Repeatability	0.000222	0.04
Reproducibility	0.000019	0.00
Operator	0.000019	0.00
Part-To-Part	0.602481	99.96
Total Variation	0.602722	100.00

Process tolerance = 2

Gage Evaluation

8 9

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.015519	0.09312	2.00	4.66
Repeatability	0.014886	0.08932	1.92	4.47
Reproducibility	0.004388	0.02633	0.57	1.32
Operator	0.004388	0.02633	0.57	1.32
Part-To-Part	0.776196	4.65718	99.98	232.86
Total Variation	0.776352	4.65811	100.00	232.91

Number of Distinct Categories = 70 6

รูปที่ 52 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab (2)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การวิเคราะห์ความเที่ยงของการวัดจากผลการทดลองในรูปที่ 50 และ รูปที่ 51

1. ระบบการวัดที่ดีควรมีความละเอียด (resolution) ที่เพียงพอในการแยกแยะความแตกต่างของชิ้นงาน ทำได้โดยพิจารณาจำนวนค่า R ≥ 4 จะหมายถึงการวัดมีความละเอียดเพียงพอ ดังนั้นระบบการวัดนี้มีความละเอียดที่เพียงพอในการแยกแยะความแตกต่างของชิ้นงาน

2. การวิเคราะห์ผลบนแผนภูมิควบคุม x-bar จุดข้อมูลออกนอกขีดจำกัดควบคุมมากกว่า 1 ใน 3 ของจำนวนจุดทั้งหมด แสดงว่าระบบการวัดนี้มีความผันแปรน้อย

3. กราฟ Part*Operator Interaction พบว่าเส้นกราฟค่อนข้างทับกัน และเมื่อพิจารณาค่า p-value ของ Interaction จาก ANOVA ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.562 จะพบว่า มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05

จึงสรุปได้ว่า ไม่มีผลกระทบร่วมระหว่างพนักงานวัดกับชิ้นงาน หมายความว่า อิทธิพลของพนักงานที่มีต่อค่าวัดไม่แตกต่างกันระหว่างชิ้นงานต่างๆ

4. จากกราฟ By part พบว่าบางชิ้นงานมีค่าจากการวัดแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า p-value ของ part จะมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสรุปได้ว่า มีชิ้นงานอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หมายความว่า ความแตกต่างของลักษณะตัวอย่างมีผลต่อความแปรปรวนของระบบการวัดด้วยเครื่องมือเวอร์เนียร์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5. จากกราฟ By Operator พบว่า ค่าเฉลี่ยจากการวัดของพนักงานวัดแต่ละคนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า p-value ของ Operator ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.075 พบว่ามีค่ามากกว่าระดับนับสำคัญที่ 0.05 จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยจากการวัดของพนักงานทั้ง 3 คน มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

6. ระบบการวัดจะมีความสามารถในการแยกแยะข้อมูลที่วัดเมื่อ Number of Distinct Categories (ndc) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 กลุ่ม โดยจะแสดงถึงจำนวนกลุ่มข้อมูลที่แตกต่างกันที่ถูกแยกแยะได้จากระบบการวัด จากการคำนวณพบว่าค่า ndc = 70 แสดงว่าระบบการวัดที่ศึกษามีความสามารถในการแยกแยะข้อมูลที่วัดได้เป็น 70 กลุ่มที่มีความแตกต่างกัน แสดงว่าระบบการวัดสามารถใช้ประมาณค่าความแปรปรวนของกระบวนการได้

7. จากองค์ประกอบของความแปรปรวน เทียบจากทั้งหมดเป็น 100% จะเป็นความแปรปรวนจากกระบวนการผลิต (ความแตกต่างของลักษณะชิ้นงาน) ถึง 99.96% และความแปรปรวนจากระบบวัด 0.04% ซึ่งเป็นความแปรปรวนจากสาเหตุรีพีททะบิลิตี้ 0.04%

8. ความผันแปรจากระบบการวัดเทียบกับความผันแปรของกระบวนการ (ความแตกต่างของลักษณะตัวอย่าง) (%SV หรือ P/TV) คิดเป็น 2% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับที่ต่ำว่า 10% จึงสรุปได้ว่าระบบการวัดมีความผันแปรอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่ออ้างอิงจากตารางที่ 7 เกณฑ์การตัดสินใจสำหรับการยอมรับระบบการวัด (Automotive Industry Action Group : AIAG, 2002)

ตารางที่ 7 เกณฑ์การตัดสินใจสำหรับการยอมรับระบบการวัด

ค่า Gage R&R	**ความหมายในการตัดสินใจเพื่อยอมรับ**
P/TV และ P/T < 10%	ความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
10% ≤ (P/TV และ P/T) < 30%	อาจจะยอมรับได้ โดยพิจารณาปัจจัยอื่นๆด้วย เช่น ค่าใช้จ่าย
P/TV หรือ P/T ≥ 30%	ไม่สามารถยอมรับความเที่ยงได้ ต้องหาสาเหตุและแก้ไข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

9. ความผันแปรจากกระบวนการวัดเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอนุโลม (%Tolerance) คิดเป็น 4.66% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับที่ต่ำกว่า 10% จึงสรุปว่าระบบการวัดมีความผันแปรอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

10. สรุปผลการวิเคราะห์ระบบการวัด จากผลการวิเคราะห์ระบบการวัดความสูงของแกนเทปด้วยเครื่องมือดิจิตอลเวอร์เนียร์ โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์เชิงสถิติในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลผัพธ์ที่ได้จากการทดสอบตามกระบวนการของ Gage R&R แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดของโรงงานกรณีศึกษานี้ นี้มีอัตราส่วนของความผันแปรของระบบการวัดเทียบกับค่าความผันแปรของกระบวนการ อยู่ในเกณฑ์ที่อาจจะยอมรับได้ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยอื่นๆด้วย และสำหรับอัตราส่วนของความผันแปรของระบบการวัดเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอนุโลมมีความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบการวัดนี้มีความผันแปรที่ยอมรับได้ รวมไปถึงความผันแปรจากสาเหตุรีพีททะบิลิตี้ มีค่าไม่ต่างจากความผันแปรจากสาเหตุรีโปรดิวซิบิลิตี้มากนัก เมื่อได้ค่าตัวชี้วัดในระดับที่ยอมรับได้ จึงสามารถนำระบบการวัดนี้ไปใช้งานต่อในขั้นตอนการหาสาเหตุต่อไปได้

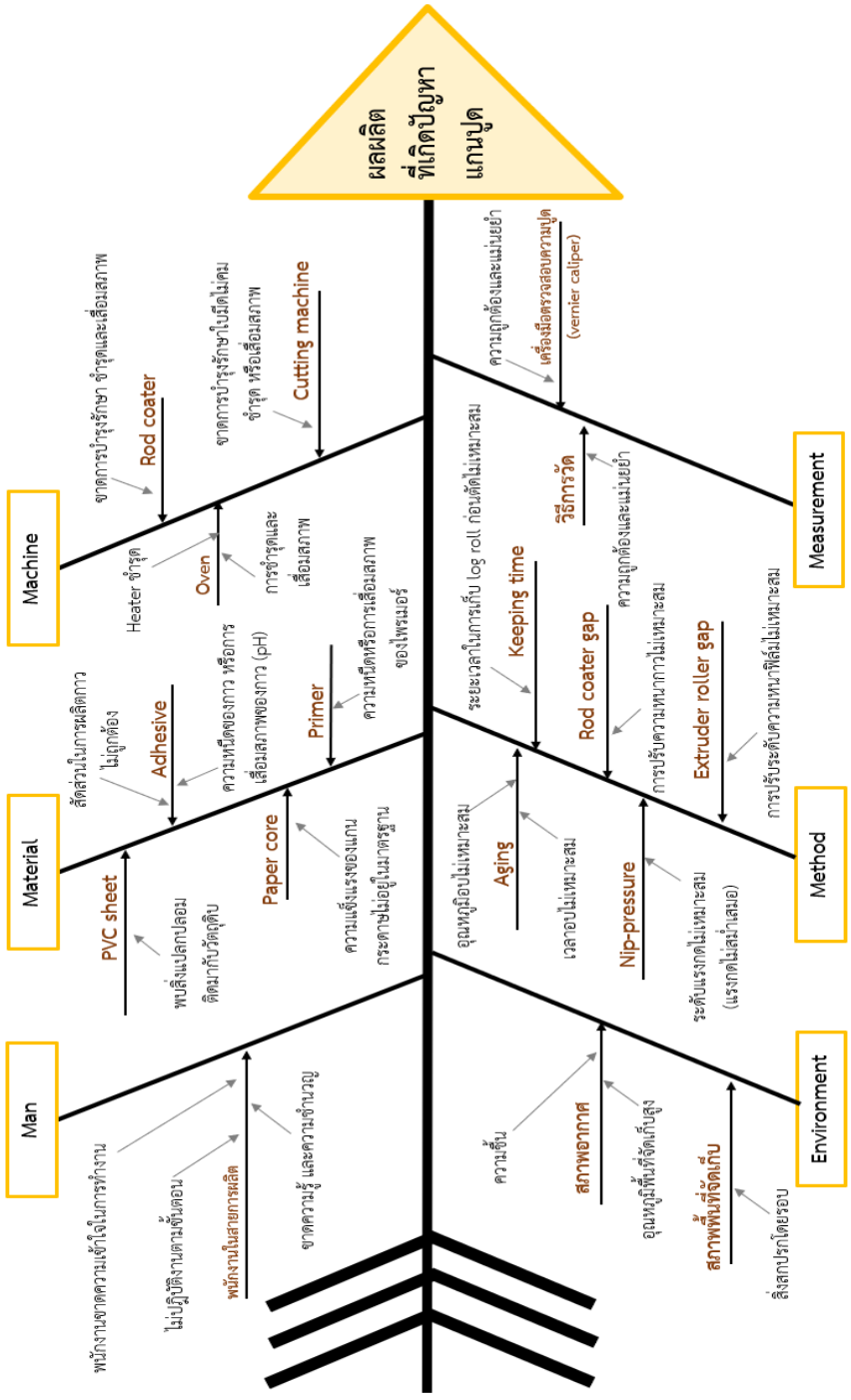
4.2 การวิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้นของปัญหา

เมื่อได้ทำการตรวจสอบระบบการวัดถึงความสามารถในการนำมาใช้วิเคราะห์กระบวนการได้และผ่านเกณฑ์การยอมรับแล้วนั้น ขั้นตอนถัดไปคือการระดมสมองจากทีมงานที่ได้คัดเลือกไว้ในระยะการนิยามปัญหา เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสม อันจะนำไปสู่การวิเคราะห์หาสาเหตุที่คาดว่าจะสามารถส่งผลถึงปัญหาแกนเทปปูดได้ โดยใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ในการหาสาเหตุเบื้องต้น ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.1 แผนภูมิก้างปลา (Cause and Effect Diagram)

แผนภูมิก้างปลาเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการระบุสาเหตุที่เป็นไปได้หลายประการ สำหรับผลกระทบหรือปัญหา สามารถใช้จัดประเภทความคิดหรือปัจจัยเป็นหมวดหมู่ได้ ซึ่งเครื่องมือนี้ช่วยให้ทีมสามารถระบุสาเหตุของปัญหา ที่ส่งผลกระทบต่องานถัดไป โดยสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปัญหาแกนเทปปูดในผลิตภันฑ์ชนิด C07T สามารถแยกออกเป็นหมวดหมู่ตามหลัก 5M1E ได้แก่ กำลังคน (Man), วิธีการ (Method), การวัด (Measurement), วัตถุดิบ (Material), เครื่องจักร (Machine) และ สภาพแวดล้อม (Environment) ดังแสดงในรูปที่ 52



รูปที่ 53 แผนภาพแสดงสาเหตุและผลของปัญหา

ก่อนการสรุปปัญหาที่ได้จากแผนภาพก้างปลานี้ จะต้องมีการให้น้ำหนักหรือคะแนนปัจจัยต่างๆ เพื่อจัดลำดับของผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้มากที่สุด โดยสามารถใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์สาเหตุและผลต่อไป

4.2.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

จากการระดมสมองโดยใช้แผนภาพสาเหตุและผล สามารถระบุสาเหตุที่เป็นไปได้จำนวน 23 ปัจจัย ซึ่งด้วยข้อจำกัดในเรื่องเวลา วัตถุดิบ และค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ จึงไม่สามารถทำการตรวจสอบได้ทุกปัจจัย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการระดมสมองเพื่อให้คะแนน และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อปัญหาแกนเทปปูดมากที่สุดลำดับแรกๆมาทำการตรวจสอบหาสาเหตุที่แท้จริง โดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์สาเหตุและผล ที่จะสามารถช่วยกรองปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variables (KPIV)) ที่มีผลต่อการเกิดปัญหาแกนเทปปูดมากที่สุด ซึ่งได้ทำการกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนระดับความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เกณฑ์การให้คะแนนการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

ระดับความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล		คะแนน
ต่ำมาก	: ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนอง	0
ต่ำ	: มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนองน้อย	1
ปานกลาง	: มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนองปานกลาง	3
สูง	: มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนั้นกับตัวแปรตอบสนองมาก	9

ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ศึกษารายละเอียดของปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้ง 23 ปัจจัย และให้ทีมงานผู้ที่อยู่หน้างานจริง หรือเป็นผู้ที่มีความชำนาญกับกระบวนการผลิตเทป ทำการลงคะแนนประเมินความสัมพันธ์ในทุกปัจจัยตามเกณฑ์ในตารางที่ 8 โดยการให้คะแนนของแต่ละบุคคลในทีมจะเป็นอิสระต่อกันไม่มีการปรึกษา
2. ผู้วิจัยทำการรวบรวมคะแนนที่ได้ทั้งหมด และทำการสรุปผลคะแนนลงในตารางแสดงสาเหตุและผล ดังแสดงในตารางที่ 9
    - สำหรับการพิจารณาคะแนนที่ถูกประเมินมานั้น หากปัจจัยใดมีความสอดคล้องของคะแนนสูงจะกำหนดคะแนนความสัมพันธ์ของปัจจัยนั้นด้วยค่าฐานนิยม หากมีปัจจัยใดมีค่าคะแนนที่ไม่สอดคล้องกันสูงระหว่างบุคคลในทีมงาน จะให้ทีมงานอภิปรายกันอีกครั้งเพื่อตัดสินใจว่าจะให้ปัจจัยนั้นๆ มีคะแนนความสัมพันธ์อยู่ในระดับใด หลังจากนั้นจะนำปัจจัยที่มีผลโดยตรงในระดับสูงไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. นำคะแนนที่ได้มาจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยโดยเรียงลำดับคะแนนจากมากไปน้อยด้วยแผนภาพพาเรโต

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีโอกาสส่งผลถึงผลผลิตที่ได้

ลำดับที่	ปัจจัย (Factors)	รายการสาเหตุและตัวแปรที่เป็นปัจจัยป้อนเข้า		ผลสรุปการให้คะแนน (Mode)
1	Man	Operator	พนักงานไม่ปฏิบัติงานตามขั้นตอน	1
2			พนักงานขาดประสบการณ์ ความรู้ และความชำนาญ	3
3			พนักงานขาดความเข้าใจในการทำงาน	1
4	Measurement	Work inspection	วิธีการวัดความสูงแกนไม่ถูกต้องตามมาตรฐาน	3
5		Equipment : vernier caliper	ความถูกต้องแม่นยำของอุปกรณ์การวัดความสูงของแกน	3
6	Machine	Gear oven	การเสื่อมสภาพและชำรุด	3
7			Heater ในตู้อบชำรุด	9
8		Cutting machine	ขาดการบำรุงรักษาใบมีดไม่คม ชำรุด หรือเสื่อมสภาพ	9
9		Rod coater gap	ขาดการบำรุงรักษา ชำรุดและเสื่อมสภาพ	3
10	Material	PVC compound	พบสิ่งแปลกปลอมติดมากับวัตถุดิบ	1
11		paper core	ความแข็งแรงของแกนกระดาษไม่อยู่ในมาตรฐาน	3
12		Raw adhesive material	อัตราส่วนในการผลิตกาวไม่ถูกต้อง	3
13			ความหนืดของกาว หรือการเสื่อมสภาพของกาว (pH)	9
14		Primer	ความหนืด หรือการเสื่อมสภาพของไพรเมอร์	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ปัจจัย (Factors)	รายการสาเหตุและตัวแปรที่เป็นปัจจัยป้อนเข้า		ผลสรุปการให้คะแนน (Mode)
15	Method	Nip-pressure	ระดับแรงกดไม่เหมาะสม (แรงกดไม่สม่ำเสมอ)	9
16		Aging log roll	การปรับอุณหภูมิอบไม่เหมาะสม	9
17			เวลาในการอบไม่เหมาะสม	9
18		Rod coater gap	การปรับระดับความหนากาวไม่เหมาะสม	9
19		Extruder roller gap	การปรับระดับความหนาฟิล์มไม่เหมาะสม	3
20		Keeping time before cutting	ระยะเวลาในการรอตัด log roll ไม่เหมาะสม	9
21	Environment	Weather	อุณหภูมิแวดล้อมในพื้นที่รอส่ง	9
22			ความชื้น	3
23		Area	สิ่งสกปรกโดยรอบ	1

จากการรวบรวมคะแนนจากตารางแสดงความสัมพันธ์สาเหตุและผลในตาราง 10 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่ทีมงานทุกคนประเมินว่ามีความสำคัญสูงที่ระดับ 9 คะแนน มี 9 ปัจจัย มีดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- Heater ในตู้อบชำรุด
- ขาดการบำรุงรักษาใบมีดไม่คม ชำรุด หรือเสื่อมสภาพ
- ความหนืดของกาว หรือการเสื่อมสภาพของกาว (pH)
- ระดับแรงกดไม่เหมาะสม (แรงกดไม่สม่ำเสมอ)
- การปรับอุณหภูมิอบไม่เหมาะสม
- เวลาในการอบไม่เหมาะสม
- การปรับระดับความหนากาวไม่เหมาะสม
- ระยะเวลาในการรอตัด log roll ไม่เหมาะสม

● อุณหภูมิแวดล้อมในพื้นที่รอส่ง

จากการกรองปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อการการเกิดแกนปูดข้างต้น ขั้นต่อไปจะนำปัจจัยเหล่านี้ไปทำการประเมินระดับความสำคัญโดยละเอียดด้วยเกณฑ์ของการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบต่อไป

4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis; FMEA)

ในขั้นตอนนี้จะนำปัจจัยที่ถูกคัดเลือกจากตารางแสดงความสัมพันธ์สาเหตุและผลทั้ง 9 ปัจจัย มาวิเคราะห์ลักษณะบกพร่องและผลกระทบ เพื่อประเมินระดับความสำคัญโดยละเอียด และจัดลำดับความสำคัญ เพื่อนำสาเหตุที่คัดกรองได้ไปทดสอบความมีนัยสำคัญ และทำการปรับปรุงในขั้นตอนต่อไปตามความเหมาะสม โดยในการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. ระบุปัจจัยนำเข้าที่ได้จากตารางแสดงความสัมพันธ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) โดยการระดมความคิดจากทีมงานเดิมในการระบุความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นทั้งหมดลงในแบบฟอร์ม

2. ประเมินระดับความรุนแรง หรือ S (Severity) ในแต่ละปัจจัย กำหนดระดับ 1 ถึง 10 โดยที่ 1 ไม่มีนัยสำคัญ และ 10 เป็นระดับความรุนแรงสูงสุด หากโหมดความล้มเหลวมีผลกระทบมากกว่าหนึ่ง ให้เขียนในตาราง FMEA เฉพาะระดับความรุนแรงสูงสุดสำหรับโหมดความล้มเหลวนั้น

3. สำหรับแต่ละโหมดความล้มเหลว ให้ระบุสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์สาเหตุตลอดจนความรู้และประสบการณ์จากทีมงาน

4. สำหรับแต่ละสาเหตุ กำหนดระดับโอกาสที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้น หรือ O (Occurrence) การให้คะแนนจะประเมินความน่าจะเป็นของความล้มเหลวที่เกิดขึ้นจากสาเหตุนั้นในตลอดช่วงขอบเขตของแต่ละส่วนงาน จัดอันดับการเกิดขึ้นในระดับ 1 ถึง 10 โดยที่ 1 คือไม่น่าเป็นไปได้อย่างยิ่ง และ 10 เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

5. สำหรับแต่ละสาเหตุ ระบุการควบคุมกระบวนการ นั่นคือการทดสอบ ขั้นตอน หรือกลไกที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อป้องกันไม่ให้ความล้มเหลวไปถึงลูกค้า การควบคุมเหล่านี้อาจป้องกันสาเหตุไม่ให้เกิดขึ้น ลดโอกาสที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้น หรืออาจตรวจพบความล้มเหลวหลังจากสาเหตุได้เกิดขึ้นแล้ว แต่จะต้องตรวจพบก่อนที่ลูกค้าจะได้รับผลกระทบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6. สำหรับการควบคุม ให้กำหนดระดับการตรวจจับสำหรับแต่ละสาเหตุ หรือ D (Detection) การให้คะแนนนี้จะประเมินว่าการควบคุมสามารถตรวจหาสาเหตุหรือโหมดความล้มเหลวได้ดีเพียงใดหลังจากที่เกิดความล้มเหลวขึ้น โดยจะต้องเกิดก่อนที่ลูกค้าจะได้รับผลกระทบ การตรวจจับมักจะได้รับการจัดอันดับในระดับตั้งแต่ 1 ถึง 10 โดยที่ 1 หมายถึงการควบคุมนั้นแน่นอนที่จะตรวจพบปัญหา และ 10 หมายถึงการควบคุมนั้นไม่แน่นอนที่จะตรวจพบปัญหา (หรือไม่มีการควบคุมอยู่)

7. ทำการคำนวณ Risk Priority Number (RPN) ซึ่งมาจาก S × O × D คือการคูณอันดับของระดับความรุนแรง เหตุการณ์ และการตรวจจับจะทำให้แต่ละขั้นตอนในกระบวนการมี RPN และคำนวณ Criticality โดยการคูณความรุนแรงตามเหตุการณ์ S × O ตัวเลขเหล่านี้ จะช่วยให้สามารถจัดอันดับความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้น และบอกถึงลำดับสาเหตุที่ควรแก้ไขก่อน จากที่ค่า RPN สูงจะบ่งชี้ถึงช่องโหว่ที่ใหญ่ที่สุดของกระบวนการ และจะใช้เป็นขั้นตอนแรกในการตั้งเป้าหมายเพื่อการปรับปรุง

8. ระบุการดำเนินการแก้ไขโดยการออกแบบ หรือกระบวนการเปลี่ยนแปลงความรุนแรง หรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น อาจเป็นส่วนควบคุมเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงการตรวจจับ รวมไปถึงระบุผู้รับผิดชอบในการดำเนินการ และกำหนดเป้าหมายวันที่เสร็จสิ้น

9. เมื่อดำเนินการเสร็จสิ้น ให้บันทึกผลลัพธ์ เมื่อทีมโครงการประเมินทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตแล้ว จะสามารถค้นพบความล้มเหลวที่เป็นไปได้สูงสุด และยังสามารถประเมินผลกระทบที่ความล้มเหลวที่อาจมีต่อลูกค้าได้อีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เกณฑ์ในการพิจารณาคะแนนของ Risk Priority Number (RPN) ที่คำนวณได้จากผลคูณของค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

O = Occurrence คือ ระดับความถี่ของการเกิดสาเหตุ ความล้มเหลว หรือความผิดพลาด

S = Severity คือ ระดับความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดปัญหา

D = Detection คือ ระดับความสามารถในการตรวจจับปัญหานั้นก่อนที่จะส่งมอบ

ตารางที่ 10 เกณฑ์การประเมินความรุนแรงของผลกระทบ : S (AIAG, 2001)

ผลกระทบจากข้อบกพร่อง	ความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อผู้ใช้ผลิตภัณฑ์	ความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อกระบวนการภายใน	คะแนน
เกิดอันตรายโดยไม่มีการเตือน	มีผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้หรือขัดต่อกฎหมายโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า	มีผลกระทบต่อการเกิดอันตรายต่อพนักงาน (หรือเครื่องจักร) โดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า	10
เกิดอันตรายโดยไม่มีการเตือน	มีผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้หรือขัดต่อกฎหมายโดยมีการเตือนล่วงหน้า	มีผลกระทบต่อการเกิดอันตรายต่อพนักงาน (หรือเครื่องจักร) โดยมีการเตือนล่วงหน้า	9
ผลกระทบสูงมาก	ผลิตภัณฑ์ไม่สามารถใช้งานได้ (เนื่องจากสูญเสียหน้าที่หลัก)	ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (100%) อาจต้องถูกทำลายหรือส่งเข้าซ่อมแซมที่แผนกซ่อมบำรุงโดยใช้เวลามากกว่า 1 ชั่วโมง	8
ผลกระทบสูง	ผลิตภัณฑ์นำไปใช้งานได้แต่ระดับสมรรถนะลดลงจนทำให้ลูกค้าไม่พอใจมาก	อาจจะมีการตรวจสอบผลิตภัณฑ์แบบคัดเลือก (sorting) และผลิตภัณฑ์บางส่วน (น้อยกว่า 100%) อาจถูกทำลาย หรือส่งเข้าซ่อมแซมที่แผนกซ่อมบำรุงระหว่างครึ่งถึงหนึ่งชั่วโมง	7
ผลกระทบปานกลาง	ผลิตภัณฑ์นำไปใช้งานได้แต่ขาดความสะดวกสบายและทำให้ลูกค้าไม่พอใจ	ผลิตภัณฑ์บางส่วน (น้อยกว่า 100%) อาจถูกทำลายและไม่ต้องตรวจสอบแบบคัดเลือก (sorting) หรือส่งเข้าซ่อมแซมที่แผนกซ่อมบำรุงใช้เวลาต่ำกว่า 1 ชั่วโมง	6
ผลกระทบต่ำ	ผลิตภัณฑ์นำไปใช้งานได้ด้วยความสะดวกสบายแต่ระดับสมรรถนะลดลง	ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (100%) อาจต้องได้รับการรีเวิร์ก หรือได้รับการซ่อมแซมนอกสายการผลิตที่ฝ่ายผลิต	5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลกระทบจากข้อบกพร่อง	ความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อผู้ใช้ผลิตภัณฑ์	ความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อกระบวนการภายใน	คะแนน
ผลกระทบต่ำมาก	ความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์ไม่ดีนัก ลูกค้าส่วนใหญ่ (มากกว่า 75%) สามารถสังเกตุเห็นข้อบกพร่องได้	ผลิตภัณฑ์อาจได้รับการตรวจสอบแบบคัดเลือก (sorting) โดยไม่มีผลิตภัณฑ์ที่ต้องถูกทำลายแต่บางส่วน (ต่ำกว่า 100%) อาจได้รับการรีเวิร์ก	4
ผลกระทบเล็กน้อย	ความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์ไม่ดีนัก ลูกค้าประมาณครึ่งหนึ่ง สามารถสังเกตุเห็นข้อบกพร่องได้	ผลิตภัณฑ์บางส่วน (ต่ำกว่า 100%) อาจต้องได้รับการรีเวิร์คในสายการผลิตแต่นอกจุดปฏิบัติงานที่ต้องถูกทำลาย	3
เกือบไม่มีผลกระทบ	ความเรียบร้อยของผลิตภัณฑ์ไม่ดีนัก ลูกค้าส่วนน้อย (ต่ำกว่า 25%) สามารถสังเกตุเห็นข้อบกพร่องได้	ผลิตภัณฑ์บางส่วน (ต่ำกว่า 100%) อาจต้องได้รับการรีเวิร์คในสายการผลิตที่จุดปฏิบัติงาน โดยไม่มีผลิตภัณฑ์ที่ต้องถูกทำลาย	2
ไม่มีผลกระทบ	ไม่มีผลกระทบที่สังเกตุได้	อาจมีความไม่สะดวกสบายเล็กน้อยต่อการปฏิบัติงานหรือตัวพนักงาน หรือไม่มีผลกระทบใดๆ	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 11 เกณฑ์การประเมินโอกาสในการเกิดสาเหตุของข้อบกพร่อง : O

คะแนน	โอกาสในการเกิดสาเหตุของข้อบกพร่อง		
10	เกิดขึ้นทุกวัน	มากกว่า 50%-100%	5,001 - 10,000 ใน 10,000 ชิ้น
9	เกิดทุกๆ 3-6 วัน/ครั้ง	มากกว่า 20%-50%	2,001 - 5,000 ใน 10,000 ชิ้น
8	เกิดทุกๆ 1-2 สัปดาห์/ครั้ง	มากกว่า 10%-20%	1,001 - 2,000 ใน 10,000 ชิ้น
7	เกิดทุกๆ 3-4 สัปดาห์/ครั้ง	มากกว่า 1%-10%	101 - 1,000 ใน 10,000 ชิ้น
6	เกิดทุกๆ 1-2 เดือน/ครั้ง	มากกว่า 0.5%-1%	51 - 100 ใน 10,000 ชิ้น
5	เกิดทุกๆ 3-6 เดือน/ครั้ง	มากกว่า 0.2%-0.5%	21 - 50 ใน 10,000 ชิ้น

คะแนน	โอกาสในการเกิดสาเหตุของข้อบกพร่อง		
4	เกิดทุกๆ 7-12 เดือน/ครั้ง	มากกว่า 0.1%-0.2%	11 - 20 ใน 10,000 ชิ้น
3	เกิดทุกๆ 1-2 ปี/ครั้ง	มากกว่า 0.05%-0.1%	6 - 10 ใน 10,000 ชิ้น
2	เกิดทุกๆ 3-4 ปี/ครั้ง	มากกว่า 0.01%-0.05%	1 - 5 ใน 10,000 ชิ้น
1	เกิดมากกว่า 4 ปี/ครั้ง	0%-0.01%	0 - 1 ใน 10,000 ชิ้น

ตารางที่ 12 เกณฑ์การประเมินการตรวจจับ : D

คะแนน	**ความสามารถในการตรวจจับของกระบวนการในปัจจุบัน**
10	ไม่มีการตรวจสอบ
9	ตรวจพบความผิดปกติ แต่ไม่สามารถตรวจหาสาเหตุได้
8	มีการตรวจสอบเป็นบางโอกาส/มีความไม่พอใจจากลูกค้า หรือเมื่อเกิดปัญหา
7	มีการสุ่มตรวจเป็นระยะโดยใช้การตัดสินใจของคนในการจำแนกของดี/เสีย แต่ไม่ได้ตรวจสอบทุกเครื่องจักร
6	มีการสุ่มตรวจเป็นระยะโดยใช้การตัดสินใจของคนในการจำแนกของดี/เสีย และทำการตรวจสอบทุกเครื่องจักร 100%
5	มีการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ โดยใช้คนในการตัดสินใจจำแนกของดี/เสีย ด้วยการตรวจสอบโดยสายตา (Visual check) ที่เห็นได้อย่างชัดเจน
4	มีการตรวจสอบด้วยเครื่องมือวัดในการตัดสินใจจำแนกของดี/เสียแทนคน และมีการใช้ระบบ SPC ในการตรวจสอบ และแก้ไขความผิดปกติ เมื่อเกิด Extreme Point
3	มีการตรวจสอบด้วยเครื่องมือวัดในการตัดสินใจจำแนกของดี/เสียแทนคน และมีการใช้ระบบ SPC ในการตรวจสอบ และแก้ไขความผิดปกติ เมื่อเกิดลักษณะตามกฎ Sensitivity
2	มีการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ทุกชิ้น 100% ด้วยระบบอัตโนมัติ แต่อาจมีบางชิ้นที่มีข้อบกพร่องหลุดลอดไปยังลูกค้า
1	ทุกชิ้นที่มีข้อบกพร่องจะถูกตรวจพบและได้รับการแก้ไขทันทีโดยไม่เกิดผลกระทบต่อลูกค้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของปัญหาแกนเทปปูด จะกำหนดการให้คะแนนอยู่ที่ 5 ระดับ เพื่อเป็นการลดความยากของการให้คะแนนของสมาชิกที่ให้คะแนนในระดับที่ใกล้กันเกินไป โดยเกณฑ์ที่กำหนดในการให้คะแนนแต่ละหัวข้อเป็นดังนี้

- **ความรุนแรงของผลกระทบ (Severity: S)**

1 = ไม่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง (ไม่ทำให้เกิดแกนปูด สามารถนำกลับมาใช้ได้)

3 = มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองน้อยมาก (ทำให้เกิดแกนปูด นำกลับมาใช้ได้เป็นส่วนมาก)

5 = มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองปานกลาง (ทำให้เกิดแกนปูด สามารถนำกลับมาใช้ได้ครึ่งๆ)

7 = มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองมาก (ทำให้เกิดแกนปูด สามารถนำกลับมาใช้ได้เป็นส่วนน้อย)

9 = มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองมากที่สุด (ทำให้เกิดแกนปูด ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้เลย)

- **ระดับโอกาสในการเกิดปัญหา (Occurrence: O)**

1 = ความถี่ที่ทำให้เกิดปัญหาน้อยมากหรือแทบไม่เกิด (แทบไม่เกิด)

3 = ความถี่ที่ทำให้เกิดปัญหาน้อย (เกิดน้อย)

5 = ความถี่ที่ทำให้เกิดปัญหาปานกลาง (เกิดบปานกลาง)

7 = ความถี่ที่ทำให้เกิดปัญหามาก (เกิดบ่อย)

9 = ความถี่ที่ทำให้เกิดปัญหามากที่สุด (เกิดบ่อยมาก)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- **ระดับความสามารถในการตรวจจับปัญหา (Detection: D)**

1 = การควบคุมนี้เกือบแน่นอนที่จะป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น (ตรวจสอบป้องกันได้เกือบทั้งหมด)

3 = การควบคุมนี้สูงพอที่จะป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น (ตรวจสอบป้องกันได้ส่วนใหญ่)

5 = การควบคุมนี้พอสมควรที่จะป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น (ตรวจสอบป้องกันได้ครึ่งเดียว)

7 = การควบคุมนี้ค่อนข้างไกลที่จะป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น (ตรวจสอบป้องกันได้ส่วนน้อย)

9 = การควบบคุมนี้ยังห่างไกลมากที่จะป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้น (ตรวจสอบป้องกันเกือบไม่ได้เลย)

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA)

ลำดับ	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของข้อบกพร่อง	S	สาเหตุของข้อบกพร่อง	O	การควบคุมในปัจจุบัน	D	RPN
1	Heater ในตู้อบชำรุด อุณหภูมิที่ set กับอบจริงไม่ตรงกัน	มีผลต่ออุณหภูมิอบไม่คงที่ โดยอุณหภูมิอบจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการแพร่ออกของพลาสติกไซเซอร์ที่อยู่ในชีท โดยพลาสติกไซเซอร์สามารถแพร่เข้าสู่ชั้นกาวได้เมื่อเวลาผ่านไป และทำให้กาวหนาขึ้น จากนั้นจึงดันให้แกนปูดออกมาได้	5	อุณหภูมิที่ใช้ในการอบต่ำเกินไป ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการเคลื่อนตัวของพลาสติกไซเซอร์ออกไปได้หมด ทำให้พลาสติกไซเซอร์ในพีวีซีไม่สามารถเคลื่อนย้ายออกไปได้หมด โดยส่วนที่ตกค้างนี้จะไปทำให้เทปปูดได้เมื่อเวลาผ่านไป	3	- ตรวจสอบและซ่อมบำรุงตามรอบให้ตรงเวลาและสม่ำเสมอ - มีการใช้เครื่อง data logger ในการวัดอุณหภูมิภายในตู้อบก่อนการใช้งานจริง	3	45
2	ใบมีดของเครื่องตัดเทปไม่คมชำรุด	ทำให้เทปเว้า และเป็นจุดเริ่มต้นของการปูดเมื่อเวลาผ่านไป	3	ใบมีดที่ถูกใช้งานเกินรอบที่กำหนด จะเกิดการเสื่อมสภาพ โดยลักษณะใบมีดจะทำให้เทปเว้า และเป็นจุดเริ่มต้นของการปูดได้ในเวลาต่อมา	3	- ตรวจสอบและซ่อมบำรุงตามรอบให้ตรงเวลาและสม่ำเสมอ - เพิ่มความถี่ในการรับมีด	3	27
3	ความหนืดของกาวไม่เหมาะสม หรือการเสื่อมสภาพของกาว (pH)	ความหนืดกาวมีผลต่อการปรับระดับความหนาของกาวที่เคลือบบนผิวชีท ที่เป็นจุดเริ่มต้นของการปูดเมื่อเก็บไว้ในระยะเวลานาน	3	ความหนืดกาวมากกว่ามาตรฐานที่กำหนด ทำให้ระดับความหนากาวไม่สม่ำเสมอ และแรงเกาะติดระกว่างกาวกับชีทที่ต่ำ จึงทำให้แกนเทปสไลด์ออกได้ง่ายเมื่อเจอสิ่งเร้า เช่น อุณหภูมิสูง เวลานาน	3	- กำหนดช่วงความหนืดที่เหมาะสมต่อการเคลือบกาวบนผิวชีท - ตรวจสอบการเสื่อมสภาพของสารกาวก่อนนำมาใช้งาน - ทำการผสมกาวตามมาตรฐาน และวัดความหนืดก่อนการนำมาใช้งาน	5	45

ลำดับ	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของข้อบกพร่อง	S	สาเหตุของข้อบกพร่อง	O	การควบคุมในปัจจุบัน	D	RPN
4	ระดับแรงกด Nip-pressure ไม่เหมาะสม (แรงกดไม่สม่ำเสมอ)	เทปมีความเครียดสะสมมาก ทำให้เกิดแรงดันจากภายในให้แกนปูดออกได้	9	แรงกดในการเข้าม้วนของ log roll ที่มากเกินไป จะทำให้เกิด tension สะสมภายใน log roll และเมื่อตัดออกเป็นเทปที่มีหน้ากว้างเพียง 19 มิลลิเมตร จึงทำให้เกิดการคลายตัวของชีทแต่ละชั้นของเทปและดันให้แกนปูดออก	5	- วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ log roll ที่ผลิตได้ในทุกล็อตการผลิต เพื่อควบคุมว่าอยู่ในค่ามาตรฐานหรือไม่ เนื่องจาก แรงกดที่มากเกินไปจะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเล็กกว่ามาตรฐาน	7	315
5	ระดับอุณหภูมิที่ใช้อบ log roll ไม่เหมาะสม	อุณหภูมิเป็นตัวเร่งให้เกิดการแพร่ออกของพลาสติกไซเซอร์ที่อยู่ในชีท โดยพลาสติกไซเซอร์สามารถแพร่เข้าสู่ชั้นกาวได้เมื่อเวลาผ่านไป และทำให้กาวหนาขึ้น จากนั้นจึงดันให้แกนปูดออกมาได้	9	อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ log roll ไม่เหมาะสม หรือต่ำ ทำให้พลาสติกไซเซอร์ที่อยู่ในชีทไม่สามารถแพร่ออกไปได้หมด เกิดเป็นส่วนที่ตกค้างในชีท ซึ่งเมื่อตัดเป็นเทป และเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน พลาสติกไซเซอร์เหล่านี้จะค่อยๆแพร่เข้าไปในชั้นกาวของเทป และดันให้แกนปูดได้ในเวลาต่อมา	5	ยังไม่สามารถตรวจสอบหรือควบคุมได้ จึงจำเป็นต้องหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแพร่ของพลาสติกไซเซอร์	7	315

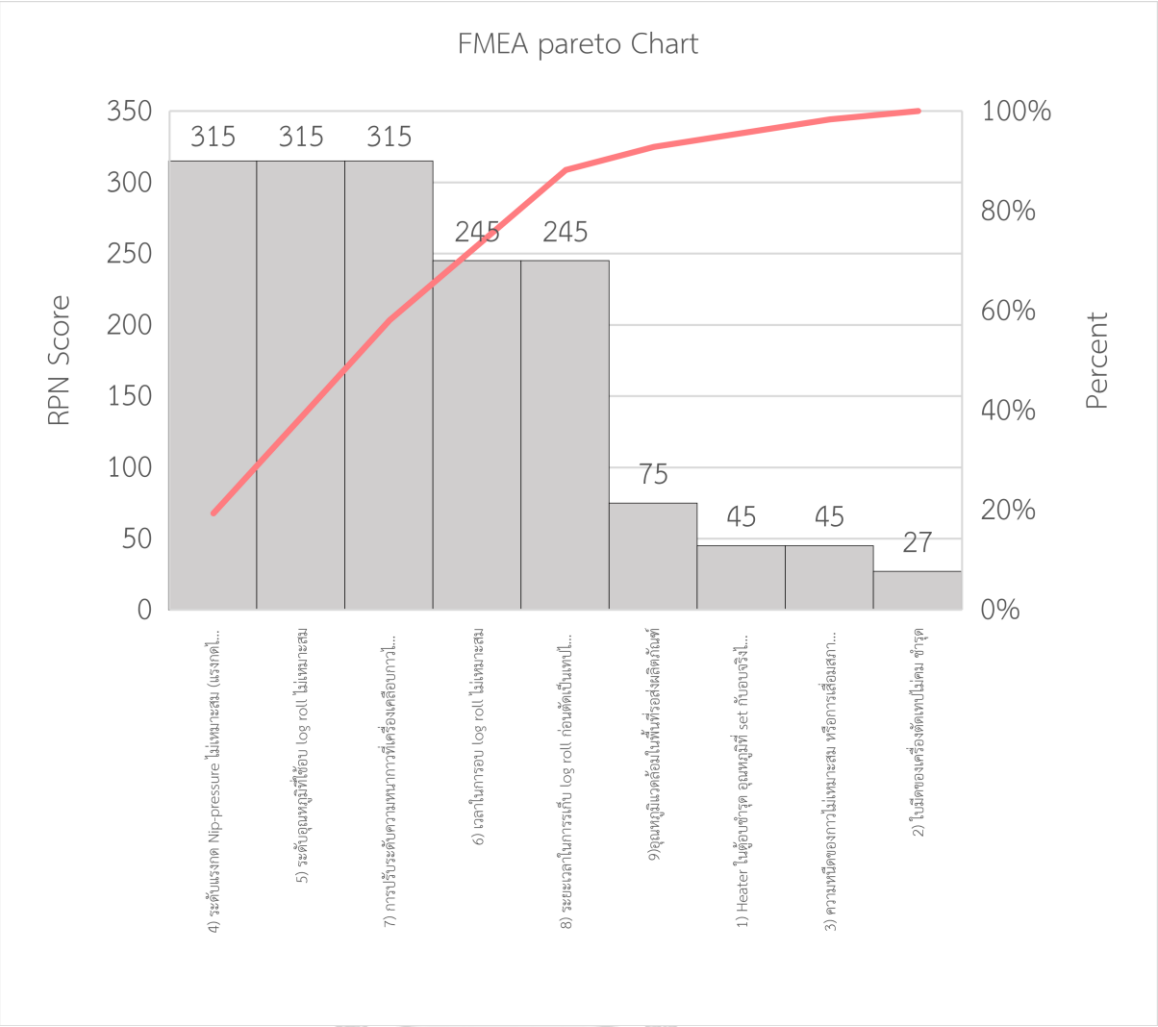
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับ	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของข้อบกพร่อง	S	สาเหตุของข้อบกพร่อง	O	การควบคุมในปัจจุบัน	D	RPN
6	เวลาในการอบ log roll ไม่เหมาะสม	มีผลต่อปริมาณการแพร่ออกของพลาสติกไซเซอร์ที่อยู่ในชีท โดยพลาสติกไซเซอร์สามารถแพร่เข้าสู่ชั้นกาวได้เมื่อเวลาผ่านไป และทำให้กาวหนาขึ้น จากนั้นจึงดันให้แกนปูดออกมาได้	7	เวลาที่ใช้ในการอบ log roll ไม่เหมาะสม หรือน้อยเกินไป ทำให้พลาสติกไซเซอร์ที่อยู่ในชีทไม่สามารถแพร่ออกไปได้หมด เกิดเป็นส่วนที่ตกค้างในชีท ซึ่งเมื่อตัดเป็นเทป และเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน พลาสติกไซเซอร์เหล่านี้จะค่อยๆแพร่เข้าไปในชั้นกาวของเทป และดันให้แกนปูดได้ในเวลาต่อมา	5	ยังไม่สามารถตรวจสอบหรือควบคุมได้ จึงจำเป็นต้องหาเวลาอบที่เหมาะสมต่อปริมาณการแพร่ของพลาสติกไซเซอร์	7	245
7	การปรับระดับความหนากาวที่เครื่องเคลือบกาวไม่เหมาะสม	ความหนากาวมีผลต่อปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ในการแพร่จากชีทสู่ชั้นกาว โดยจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของชั้นกาวในการรองรับการแพร่ของพลาสติกไซเซอร์ ทำให้เกิดการปูดได้มากขึ้น	9	ตั้งค่าระยะ Gab มากเกินไปทำให้กาวหนา ส่งผลให้พื้นที่ในการเคลื่อนย้ายของพลาสติกไซเซอร์จากพีวีซีเข้าไปในชั้นกาวได้มาก	7	- ตรวจสอบความหนากาวหลังม้วน log roll เสร็จในช่วงเริ่มต้นการผลิต เพื่อปรับระดับความหนากาวตั้งต้น จนได้ความหนากาวที่อยู่ในมาตรฐาน จึงเริ่มเก็บผลิตภัณฑ์	5	315

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับ	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบของข้อบกพร่อง	S	สาเหตุของข้อบกพร่อง	O	การควบคุมในปัจจุบัน	D	RPN
8	ระยะเวลาในการรเก็บ log roll ก่อนตัดเป็นเทปไม่เหมาะสม	สำหรับ log roll ที่ผลิตมาแล้วไม่ได้รับการอบเมื่อเก็บไว้ในลักษณะ log roll เป็นเวลานาน ชีทจะเกิดความเค้นและความเครียดสะสมภายใน ทำให้เมื่อยิ่งเก็บไว้นาน การสะสมจะยิ่งมาก และเมื่อนำไปตัดเป็นเทป จึงเกิดการคลายตัวของชีท ทำให้มีแรงดันแกนเทปให้ปูดออกมาได้มาก	7	ระยะเวลาเก็บนานเกินไป เนื่องจากมีการผลิตเทปหลายชนิด และรอบการตัดจะขึ้นอยู่กับยอดการสั่ง ทำให้เมื่อมีผลิตภัณฑ์อื่นที่งานเร่งด่วนกว่าจะถูกนำไปตัดก่อน ทำให้บางครั้งงานที่ผลิตได้ต้องถูกรอในพื้นที่รอตัดไปก่อน	5	- ทำได้เพียงต้องตรวจสอบแผนการผลิตในการประมาณการผลิตสำหรับ stock	7	245
9	อุณหภูมิแวดล้อมในพื้นที่รอส่งผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิเป็นตัวเร่งให้เกิดการแพร่ออกของพลาสติกไซเซอร์ที่อยู่ในชีท โดยพลาสติกไซเซอร์สามารถแพร่เข้าสู่ชั้นกาวได้เมื่อเวลาผ่านไป และทำให้กาวหนาขึ้น จากนั้นจึงดันให้แกนปูดออกมาได้	3	ผลิตภัณฑ์เทปที่ผลิตมาเป็น stock รอขนส่งไปให้ลูกค้า จะถูกนำมาเก็บไว้ในพื้นที่ stock area ซึ่งจะมีอากาศร้อน และหากเก็บไว้เป็นเวลานาน จะยิ่งทำให้พลาสติกไซเซอร์เคลื่อนที่เข้าไปในกาวได้มากขึ้น ชั้นกาวหนาขึ้น แล้วทำให้แกนปูดออกได้	5	- ทำได้เพียงต้องตรวจสอบแผนการผลิตในการประมาณการผลิตสำหรับ stock - ทำให้พื้นที่มีอากาศถ่ายเท	5	75

จากตารางที่ 13 สามารถสรุปผลคะแนน RPN สามารถนำคะแนนที่ได้มาจัดเรียงในแผนภาพพาเรโต้ดังรูปที่ 53 เพื่อพิจารณาลำดับความสำคัญของผลกระทบที่มีต่อปัญหาแกนเทปปูด



รูปที่ 54 แผนภาพพาเรโตแสดงลำดับคะแนนความเสี่ยง (RPN) ที่มีผลต่อการเกิดแกนเทปปูด

จากรูปที่ 53 สามารถวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบจากค่าคะแนน PRN และสรุปผลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาแกนเทปปูดตามลำดับความสำคัญจากมากไปน้อย ซึ่งจะเห็นได้ว่ามี 5 ปัจจัยที่มีคะแนนสูง และแตกต่างจากปัจจัยอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด ดังนี้

1. การปรับระดับแรงกด Nip-pressure
2. ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll
3. การปรับระดับความหนากาว
4. เวลาที่ใช้ในการอบ Log roll
5. ระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนการนำไปตัดเป็นเทป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 สรุปขั้นตอนการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดความสูงของแกนเทปด้วยเครื่องมือดิจิตอลเวอร์เนียร์ แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดของโรงงานกรณีศึกษานี้ มีอัตราส่วนของความผันแปรของระบบการวัดเทียบกับค่าความผันแปรของกระบวนการ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และสำหรับอัตราส่วนของความผันแปรของระบบการวัดเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอนุโลมมีความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบการวัดนี้มีความผันแปรที่ยอมรับได้ รวมไปถึงความผันแปรจากสาเหตุรีพีททะบิลิตี้ มีค่าไม่ต่างจากความผันแปรจากสาเหตุรีโปรดิวซิบิลิตี้มากนัก เมื่อได้ค่าตัวชี้วัดในระดับที่ยอมรับได้ จึงสามารถนำระบบการวัดนี้ไปใช้งานต่อในขั้นตอนการหาสาเหตุต่อไปได้ โดยจากระบบการวัดที่กล่าวมานี้ ทางโรงงานกรณีศึกษาและผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบความถูกต้องแม่นยำของระบบทุกครั้งก่อนการเริ่มกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งเครื่องมือในการสอบเทียบที่ใช้จะเป็นไปตามมาตรฐานการรับรองระบบ ISO 9001 ดังนั้นจึงสามารถรับรองได้ว่าระบบการวัดนี้สามารถให้ค่าการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำและเที่ยงตรงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ภายหลังจากการยอมรับระบบการวัด ได้มีการระดมสมองของทีมงานผู้ที่เกี่ยวข้องในการช่วยกันค้นหาสาเหตุที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดปัญหาแกนเทปปูด โดยใช้เครื่องมือแผนผังแสดงสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ซึ่งได้ปัจจัยที่เป็นไปได้ทั้งหมด 23 ปัจจัย จากนั้นนำมาทำการคัดกรองด้วยตารางแสดงความสัมพันธ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) ในการให้คะแนนความสำคัญของแต่ละปัจจัย ทำให้เหลือปัจจัยที่สำคัญ 9 ปัจจัย เพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ด้วยการให้คะแนนเพื่อคำนวณค่า RPN และสามารถจัดลำดับความสำคัญจากคะแนนมากไปน้อยโดยใช้แผนภาพพาเรโต ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาแกนเทปปูดทั้งหทด 5 ปัจจัย ได้แก่ การปรับระดับแรงกด Nip-pressure, ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll, การปรับระดับความหนากาว, เวลาที่ใช้ในการอบ Log roll และระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนการนำไปตัดเป็นเทป โดยในขั้นตอนต่อไป จะเป็นการนำปัจจัยทั้งห้านี้มาใช้เป็นปัจจัยหลักในการออกแบบการทดลองเพื่อแก้ปัญหาแกนเทปปูดต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
การวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา (Analyze phase : A)

จากปัจจัยที่คัดกรองได้ในบทที่ 4 ระยะการวัดและวิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้น ที่ได้จากการระดมสมองจากทีมงาน และใช้เครื่องมือต่างๆมาวิเคราะห์หาสาเหตุได้ 5 ปัจจัยหลักที่คาดว่ามีผลกระทบต่อการเกิดปัญหาแกนเทปปูด ได้แก่ การปรับระดับแรงกด Nip-pressure, ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll, การปรับระดับความหนากาว, เวลาที่ใช้ในการอบ Log roll และระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนการนำไปตัดเป็นเทป โดยในบทที่ 5 นี้ จะเป็นระยะการวิเคราะห์ปัจจัยทั้งห้าเพื่อหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา โดยการนำแต่ละปัจจัยมาทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยหลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF) เพื่อวิเคราะห์ว่าแต่ละปัจจัยนั้นส่งผลต่อการเกิดปัญหาแกนเทปปูดอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ อันจะนำไปสู่แนวทางการปรับปรุงแก้ไขได้อย่างเหมาะสม

5.1 ปัจจัยนำเข้าที่นำมาทดสอบสมมติฐานของการออกแบบการทดลอง

เมื่อได้วิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของปัจจัย (FMEA) ในบทก่อนหน้านี้แล้ว สามารถสรุปปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปัญหาแกนเทปปูด ที่เกิดจากกระบวนการผลิตเทปที่มีความแปรปรวน ทั้งหมด 5 ปัจจัย ดังนี้

1. การปรับระดับแรงกด Nip-pressure ไม่เหมาะสม
2. ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll ไม่เหมาะสม
3. การปรับระดับความหนากาวไม่เหมาะสม
4. เวลาที่ใช้ในการอบ Log roll ไม่เหมาะสม
5. ระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนการนำไปตัดเป็นเทป ไม่เหมาะสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ตัวแปรตอบสนอง

กำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ที่ทำการศึกษาในการทดลองนี้ คือ ค่าความสูงของแกนเทปปูด ในหน่วยมิลลิเมตร ที่วัดได้จากเครื่องมือดิจิตอลเวอร์เนียร์ (digital vernier caliper) โดยการตรวจสอบปัญหาแกนเทปปูดของโรงงานกรณีศึกษาจะประเมินผลจากค่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนด คือที่ความสูงของแกนเทปปูดต้องไม่เกิน 2 มิลลิเมตรจะตัดสินเป็นของดี หรือยอมรับ และหากความสูงของแกนเทปปูดเกิน 2 มิลลิเมตร จะตัดสินให้เป็นของเสีย หรือปฏิเสธ

5.3 ตัวแปรควบคุม

ในการศึกษาผลของปัจจัยที่กำหนดไว้ จำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมปัจจัยอื่นๆที่อาจมีผลกระทบต่อผลที่ได้จากการทดลองเพิ่มเติม ได้แก่

1. ล็อต (lot) การผลิตจากแหล่งที่มาเดียวกัน (lot by lot) เพื่อให้แน่ใจถึงคุณภาพของวัตถุดิบที่นำมาทำการทดลอง และยืนยันได้ว่าไม่มีความแตกต่างหรือความผันแปรสำหรับล็อตการผลิตที่แตกต่างกัน
2. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของเครื่องจักร กำหนดเป็นปัจจัยควบคุม

5.4 การกำหนดระดับปัจจัยนำเข้าในการออกแบบการทดลอง

ระดับของปัจจัย หรือค่าที่จะทำการทดสอบปัจจัยในการทดลองนี้ สามารถกำหนดตามมาตรฐานการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน โดยการทดลองนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF) เนื่องจากมีจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษาทั้งหมด 5 ปัจจัย การออกแบบนี้จะใช้จำนวนการทดลองไม่มากนัก จากการเลือกบางสภาวะการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ ที่จะมีทั้งเทอมผลกระทบหลัก (Main effect) เทอมอันตรกิริยาร่วม (Interaction effect) และเทอมกำลังสองหรือเส้นโค้งความสัมพันธ์ (Quadratic) และยังสามารถให้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับแบบ Full factorial อีกด้วย สำหรับการทดลองนี้จะมีการกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1), ระดับกลาง (0) และระดับสูง (1) แสดงดังตารางที่ 14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 14 ระดับของปัจจัยในกาทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF)

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า	หน่วย	ระดับปัจจัย		
			ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)
1	ระดับความหนากาว	μm	20	25	30
2	แรงกด Nip pressure	bar	0.5	1.0	1.5
3	อุณหภูมิในการอบ Log roll	°C	70	80	90
4	เวลาในการอบ Log roll	ชั่วโมง	2	3	4
5	ระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนนำไปตัดเป็นเทป	วัน	1	3	5

5.4.1 เกณฑ์ในการเลือกระดับของปัจจัยในการนำมาทดสอบสมมติฐาน

หลักการปรับค่าของแต่ละปัจจัยจะกำหนดจากสภาพการผลิตจริงในปัจจุบันที่โรงงานกรณีศึกษาสามารถทำได้โดยไม่กระทบต่อปริมาณการผลิต โดยจะปรับระดับของแต่ละปัจจัยอ้างอิงตามค่าเดิมที่ใช้อยู่ก่อนหน้านี้เป็นระดับกลาง (0) แล้วทำการเพิ่มระดับสูง และระดับต่ำตามความเหมาะสม หรือลิมิตของเครื่องจักร ที่สามารถครอบคลุมตัวแปรตอบสนอง หรือเป้าหมายที่กำหนดไว้โดยไม่กระทบต่อความสามารถการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นต้องอยู่ในเกณฑ์ที่โรงงานกรณีศึกษายอมรับได้

- **การปรับระดับความหนากาวไม่เหมาะสม**

การปรับระดับความหนากาว จะเป็นการปรับระยะ Gab ของ Rod coater ในกระบวนการเคลือบสารกาวบนผิวชีท (Coating process) โดยในปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษามีการปรับความหนากาวอยู่ที่ 30 ไมโครเมตร ซึ่งค่าควบคุมในโรงงานจะพิจารณากับค่าความคลาดเคลื่อนของ Rod coater อยู่ที่ ±5 ไมโครเมตร ซึ่งความหนากาวของเทปมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติด้านแรงเกาะติดในการใช้งานของเทป โดยระดับความหนากาวต่ำสุดที่ผ่านคุณสมบัติด้านแรงเกาะติดสำหรับการใช้งานอยู่ที่ 20 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงกำหนดระดับต่ำสุดในการทดลองอยู่ที่ 20 ไมโครเมตร ระดับกลางและระดับสูงตั้งค่าตามค่าความคลาดเคลื่อนของ Rod coater จะได้ว่า ระดับต่ำเป็น 20 ไมโครเมตร, ระดับกลางเป็น 25 ไมโครเมตร และระดับสูงเป็น 30 ไมโครเมตร นอกจากนี้ระดับความหนากาวยังมีผลต่อต้นทุนของปริมาณสารกาวที่จะต้องใช้ในการผลิตอีกด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องคำนึงถึงระดับการเพิ่มขึ้นที่เหมาะสมในการปรับปรุงร่วมด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- **การปรับระดับแรงกด Nip-pressure ไม่เหมาะสม**

ปัจจัยของ Nip-pressure หรือแรงที่กดให้ชีท (PVC film) ติดกับแกนกระดาษ (Paper core) และทำให้ผิวชีทเรียบสม่ำเสมอ ไม่ยับหรือย่น อยู่ในขั้นตอนการเข้าม้วนแกนยาว (Winding log roll) ของกระบวนการเคลือบสารกาวบนผิวชีท (Coating process) โดยแรงกดนี้จำเป็นที่จะต้องใช้ค่าที่เหมาะสม (ปัจจุบันใช้ที่ 1 บาร์) เนื่องจากที่แรงกดต่ำมักจะมีผลต่อการเกิดของเสียที่เป็นฟองอากาศและชีทยับย่นได้ หากแรงกดสูงเกินไปมักจะมีผลต่อการเกิดแกนปูดภายหลังได้มากเช่นกัน ดังนั้นระดับการปรับ Nip-pressure จึงใช้ค่าปัจจุบันเป็นค่ากลางที่ 1 บาร์, และจากที่ไม่มีแรงกดเลยที่ 0 บาร์ มักจะทำให้เกิดปัญหาฟองอากาศระหว่างเข้าม้วน ดังนั้นค่าต่ำสุดที่ได้จะเป็น 0.5 บาร์ สำหรับ

ระดับสูงจะปรับค่าเป็น 1.5 บาร์ เนื่องจากค่าควบคุมในกระบวนการที่จะไม่ทำให้เกิดแกนปูดต้องไม่เกิน 2 บาร์

- **ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll ไม่เหมาะสม**

กระบวนการอบ (Aging Process) ผลิตภัณฑ์ที่เป็น Log roll บางชนิด จะใช้สารกาวชนิดพิเศษที่จำเป็นต้องมีการอบให้ความร้อนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านแรงเกาะติดของกาว ซึ่งกาวแต่ละชนิดจะใช้อุณหภูมิและเวลาในการอบที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดสารกาวและปริมาณการบรรจุงานในตู้อบด้วย โดยเทปชนิด C07T ที่จะทำการทดลองนี้ไม่มีการอบ Log roll ในปัจจุบัน

จากสมมุติฐานในเรื่องของการเร่งพลาสติกไซเซอร์ให้เกิดการเคลื่อนที่ออกไปจากพีวีซีชีทเข้าไปสู่ชั้นกาวให้ได้มากที่สุดขณะเป็น Log roll เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่เข้าไปในชั้นกาวขณะเป็นเทปแล้วทำให้ความหนากาวเพิ่มขึ้นจนดันให้แกนปูดออกมาได้นั้น จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากพอในการเร่งพลาสติกไซเซอร์ให้เคลื่อนที่ได้ โดยอุณหภูมิอบที่โรงงานใช้ในปัจจุบันต่ำสุดคือ 60 องศาเซลเซียส และสูงสุดคือที่ 80 องศาเซลเซียส ในขณะที่ตู้อบที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษามีข้อจำกัดที่สามารถตั้งค่าได้สูงสุดที่ 90 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงได้มีการตั้งสมมุติฐานที่จะใช้อุณหภูมิสูงสุดในการเร่งพลาสติกไซเซอร์นี้ จึงได้ตั้งระดับสูงเป็น 90 องศาเซลเซียส เพิ่มระดับต่ำจากปกติให้เป็น 70 องศาสเซลเซียส และระดับกลางเป็น 80 องศาสเซลเซียส เพื่อให้สมมาตรของค่าที่ถูกเพิ่มและลด

- **เวลาที่ใช้ในการอบ Log roll ไม่เหมาะสม**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการอบ จะถูกตั้งค่าในกระบวนการอบ log roll ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ นั่นคือ เวลาอบจะเกี่ยวข้องกับปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่จะสามารถเคลื่อนที่จากพีวีซีชีทเข้าไปในชั้นกาวได้ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิด้วย โดยเกณฑ์การตั้งค่าจะเป็นการใช้เวลาอบให้น้อยที่สุด เพื่อให้ไม่กระทบต่อรอบการผลิต และจากที่ตู้อบจะใช้เวลาในการ pre-heat อยู่ที่ 1 ชม ดังนั้นเวลาน้อยสุดที่สามารถตั้งค่าได้คือ 2 ชั่วโมงให้เป็นระดับต่ำ และระดับสูงจะตั้งค่าตามรอบเวลามากที่สุดที่สามารถทำการอบได้ โดยไม่กระทบต่อรอบการผลิตของเทปชนิดอื่นๆ อยู่ที่ 4 ชั่วโมง ดังนั้นระดับกลางจะใช้เวลาที่ 3 ชั่วโมง เพื่อให้สมมาตรของค่าที่ถูกเพิ่มและลด

- **ระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนการนำไปตัดเป็นเทป ไม่เหมาะสม**

ปัจจัยของระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนนำไปตัดเป็นเทป มีผลเนื่องจากในการผลิตเทปแต่ละชนิด จะมีลำดับการตัดตามความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก และเทปชนิด C07T มีปริมาณ

ความต้องการจากลูกค้ามากที่สุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการผลิตเพื่อเป็น stock ไว้ แต่ทั้งนี้ การผลิตจะไม่สามารถตัดได้ทันที จึงจำเป็นต้องมีการรอในพื้นที่ hold area ระยะเวลาที่เก็บอาจมีความสัมพันธ์กับแรงกด Nip-pressure จากการที่ความเครียดสะสมภายใน ในขั้นตอนการเข้าม้วน โดยเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้เกิดการสะสมมากขึ้น และเมื่อตัดเป็นเทป จะทำให้เกิดการคลายตัวและดันให้แกนปูดได้ในที่สุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดเวลาในการเก็บ log roll ให้เหมาะสม นอกจากนี้เวลาในการเก็บจำเป็นต้องคำนึงถึงรอบการผลิต ดังนั้นจึงไม่ควรเก็บไว้เป็นเวลานานเกินไป ระดับต่ำสุดที่สามารถเก็บได้จะคือ 1 วัน และระดับสูงจะเป็นเวลาที่สามารถเก็บไว้ในพื้นที่มากสุดคือ 5 วัน ดังนั้นระดับกลางจะใช้ที่ 3 วัน เพื่อความสมมาตรของค่าที่ถูกเพิ่มและลด

5.5 การออกแบบการทดลอง

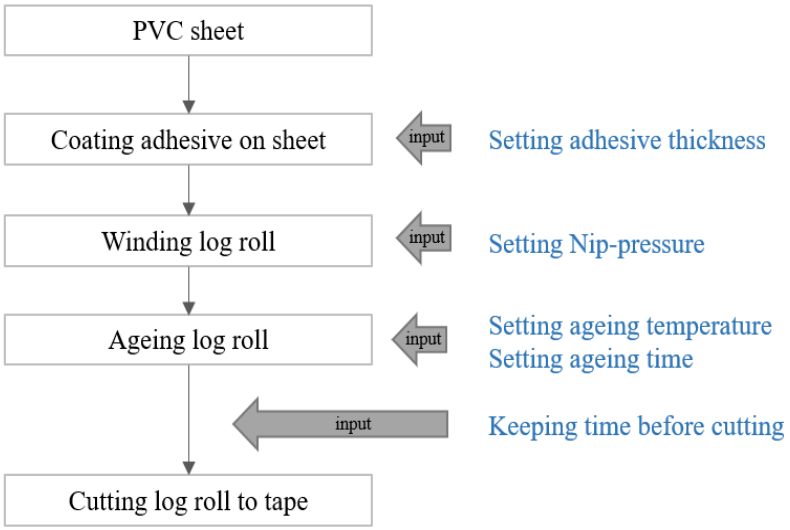
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองโดยใช้ปัจจัยนำเข้าที่ได้จากการระดมสมองและวิเคราะห์ผ่านเครื่องมือวิเคราะห์หาสาเหตุในขั้นตอนก่อนหน้า ซึ่งได้ปัจจัยที่สนใจจะทำการศึกษาทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ (1) การปรับระดับแรงกด Nip-pressure, (2) ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll, (3) การปรับระดับความหนากาว, (4) เวลาที่ใช้ในการอบ Log roll และ (5) ระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนการนำไปตัดเป็นเทป ในการออกแบบการทดลองจะกำหนดให้แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง (Y) คือความสูงของแกนเทปที่ปูด ซึ่งการออกแบบการทดลองสามารถสรุปข้อมูลได้ทั้งความมีนัยยสำคัญของปัจจัย และการมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยในการทดลอง ที่จะช่วยให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. ทำการทดลองโดยตั้งค่าปัจจัย ให้ลำดับขั้นตอนในการทดลองเป็นแบบสุ่ม (Randomization) ที่จะทำให้ผลการทดลองตรงกับข้อกำหนดทางสถิติที่ว่าการทดลองจะต้องมีความเป็นอิสระต่อกัน เพื่อลดผลกระทบของปัจจัยภายนอกที่อาจจะส่งผลต่อการทดลอง ช่วยให้การวิเคราะห์ผลการทดลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยในการออกแบบการทดลองแบบสุ่มนี้จะออกแบบโดยใช้โปรแกรม Minitab ได้จำนวนทั้งสิ้น 32 การทดลอง (Run order)
2. ทำการทดลองมากกว่าหนึ่งครั้ง หรือที่เรียกว่าการทำซ้ำ (Replication) ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งในแต่ละ Treatment Combination เท่ากับ 2 ครั้ง (2 Replication) เพื่อช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้ ทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ ช่วยให้ประหยัดเวลา วัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการทดลอง และลดต้นทุนในการทดลองอีกด้วย

5.5.1 ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง

ดำเนินการทดลองตามรูปแบบการทดลองในตารางการออกแบบที่กำหนดไว้ข้างต้น มีการควบคุมสภาวะอื่นๆที่เป็นปัจจัยภายนอก หรือนอกเหนือจากตัวแปรที่สนใจ ให้มีค่าตามการผลิตปกติ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เพื่อควบคุมสภาวะ (Condition) ในการทดลองให้เหมือนกัน ลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลอง เนื่องจากต้องการดูผลของการทดลองจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่สนใจเท่านั้น โดยก่อนทำการทดลองได้มีการประชุมอธิบายแผนการทดลองที่ได้ออกแบบกับคณะทำงาน ในการดำเนินการจัดเตรียมวัตถุดิบ และการปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่กำหนดไว้ข้างต้น รายละเอียดขั้นตอนการทดลอง แสดงดังรูปที่ 54 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 55 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

1. จัดเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตจากแหล่งเดียวกันในทุกๆแบชการทดลอง
2. ในกระบวนการเคลือบสารกาวบนผิวชีท จะเริ่มทำการปรับปัจจัยแรกคือ ปรับระดับความหนากาว โดยการปรับระยะของ Rod coater
3. พีวีซีชีทที่เคลือบสารกาวแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนการเข้าม้วนเป็น log roll โดยในขั้นตอนนี้จะทำการปรับปัจจัยที่สองคือ ปรับระดับแรงกด Nip-pressure ขณะเข้าม้วน
4. ทำการวัดระดับความหนากาวของ log roll แรก เพื่อตรวจสอบความหนากาวว่าอยู่ในระดับที่ตั้งค่าไว้หรือไม่ เมื่อได้ความหนากาวที่กำหนด จึงจะเริ่มเก็บชิ้นงาน log roll นั้นๆ ไปเข้ากระบวนการต่อไป
5. นำ log roll ที่ได้ ไปทำการอบที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เป็นปัจจัยที่สาม และปัจจัยที่สี่
6. เมื่อเสร็จขั้นตอนการอบ นำ log roll มาเก็บไว้ในพื้นที่รอการตัดซึ่งเป็นปัจจัยสุดท้าย

7. นำ log roll ไปเข้ากระบวนการตัดเป็นเทป
8. ภายหลังจากการตัดเป็นเทป จะนำชิ้นงานเทปที่ได้จากแต่ละเงื่อนไขมาทำการอบเพื่อจำลองสภาวะการขนส่ง (อุณหภูมิ และความชื้น) ด้วยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C ความชื้น 90% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพของโรงงาน
9. วัดความสูงของแกนเทป ด้วยเครื่องมือวัดดิจิตอลเวิร์เนียร์และบันทึกผล

5.6 ผลการทดลอง

ภายหลังดำเนินการตามขั้นตอนการทดลองตามสภาวะที่กำหนด และเก็บข้อมูลตามลำดับแบบสุ่ม (Random order) มีจำนวนการทดลอง (Run order) ทั้งสิ้น 32 การทดลอง โดยทำการทดลองซ้ำ (Replicates) 2 ครั้ง ได้ผลลัพธ์จากการทดลองในการหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสูงของแกนเทปปูด ของเทปชนิด CO7T แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ผลของการวัดความสูงของแกนเทปที่ปูด ที่ได้จากการออกแบบกาทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF)

Std Order	Run Order	Pt Type	Blocks	Adhesive thickness	Nip pressure	Aging temperature	Aging time	Time before cutting	Y
23	1	-1	1	25	1.0	80	2	3	1.90
2	2	1	1	30	0.5	70	2	1	1.03
1	3	1	1	20	0.5	70	2	5	0.79
14	4	1	1	30	0.5	90	4	1	0.38
13	5	1	1	20	0.5	90	4	5	0.09
22	6	-1	1	25	1.0	90	3	3	0.39
19	7	-1	1	25	0.5	80	3	3	1.21
28	8	0	1	25	1.0	80	3	3	1.43
21	9	-1	1	25	1.0	70	3	3	2.09
17	10	-1	1	20	1.0	80	3	3	0.30
24	11	-1	1	25	1.0	80	4	3	1.02
6	12	1	1	30	0.5	90	2	5	0.88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Std Order	Run Order	Pt Type	Blocks	Adhesive thickness	Nip pressure	Aging temperature	Aging time	Time before cutting	Y
20	13	-1	1	25	1.5	80	3	3	2.11
9	14	1	1	20	0.5	70	4	1	0.85
8	15	1	1	30	1.5	90	2	1	1.49
4	16	1	1	30	1.5	70	2	5	2.64
30	17	0	1	25	1.0	80	3	3	1.63
11	18	1	1	20	1.5	70	4	5	1.03
5	19	1	1	20	0.5	90	2	1	0.30
29	20	0	1	25	1.0	80	3	3	1.64
7	21	1	1	20	1.5	90	2	5	0.40
3	22	1	1	20	1.5	70	2	1	0.91
31	23	0	1	25	1.0	80	3	3	1.50
12	24	1	1	30	1.5	70	4	1	2.90
15	25	1	1	20	1.5	90	4	1	0.30
26	26	-1	1	25	1.0	80	3	5	1.63
18	27	-1	1	30	1.0	80	3	3	2.05
16	28	1	1	30	1.5	90	4	5	0.95
32	29	0	1	25	1.0	80	3	3	1.63
10	30	1	1	30	0.5	70	4	5	2.04
27	31	0	1	25	1.0	80	3	3	1.80
25	32	-1	1	25	1.0	80	3	1	1.63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการทดลองที่ได้จากการปรับตั้งในกระบวนการเคลือบกาวบนผิวชีท กระบวนการอบ และกระบวนการตัดเป็นเทป จากนั้นทำการวัดความสูงของแกนเทปตามมาตรฐานการตรวจสอบของ

โรงงานกรณีศึกษาที่กำหนดไว้ (Specification) ที่ความสูงของแกนเทปปูดไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางมีทั้งผ่านและไม่ผ่านมาตรฐานที่โรงงานกำหนด แสดงให้เห็นว่าสภาวะการทดลองหรือการตั้งค่าปัจจัยที่แตกต่างกันมีผลต่อความสูงของแกนเทป ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (สมมติฐาน 3 ข้อ) และวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปปรับปรุงในขั้นตอนต่อไป

5.7 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

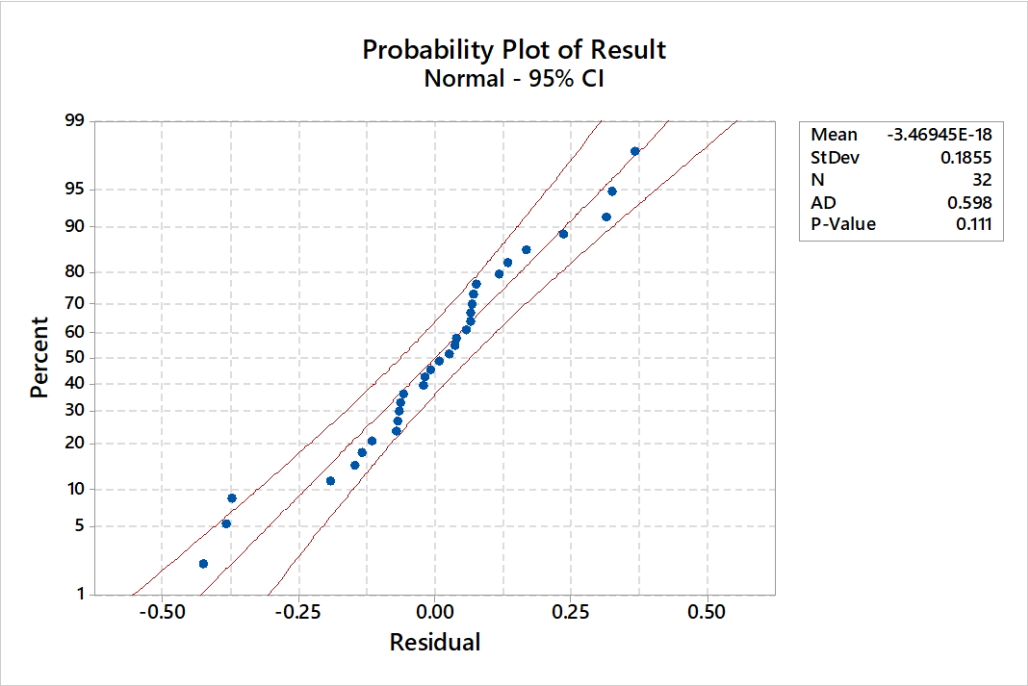
จากผลการทดลอง จะนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาว่าปัจจัยใดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสูงของแกนเทปปูดบ้าง โดยก่อนการวิเคราะห์ผลการทดลองจะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนเป็นลำดับแรก เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้มีการกระจายแบบปกติตามสมมติฐานที่กำหนดหรือไม่ จากนั้นจึงจะนำไปทำการวิเคราะห์ผลเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญเป็นลำดับต่อไป

5.7.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (สมมติฐาน 3 ข้อ)

เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้มีลักษณะเหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติ สามารถที่จะเชื่อถือผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์แบบจำลองได้ จึงต้องทดสอบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมานั้นเหมาะสมกับข้อมูลจริงในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่ โดยนำผลการทดลองที่ได้มาตรวจสอบ Model Adequacy Checking ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งการยอมรับจะต้องเป็นไปตามสมมติฐาน (Assumption) 3 ข้อที่เกี่ยวกับส่วนตกค้าง (Residual) ได้แก่ ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution), ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent residual) และส่วนตกค้างมีเสถียรภาพความแปรปรวนของข้อมูลคงที่ (Variance Constance at Mean = 0) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สมมติฐานที่ 1 : ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)

พิจารณาได้จากผลการพล็อตค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของค่าตัวแปรตอบสนอง (Y) แสดงดังรูปที่ 55 พบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ โดยจะเห็นได้จากข้อมูลในกราฟมีการเรียงตัวในเชิงเส้นตรง 45 องศา โดยไม่มีข้อมูลผิดปกติ (outliers) และจากค่าทางสถิติที่เรียกว่า p-value ของข้อมูลมีค่า 0.111 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ (Confidence Level) ที่ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างของข้อมูลนี้มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)

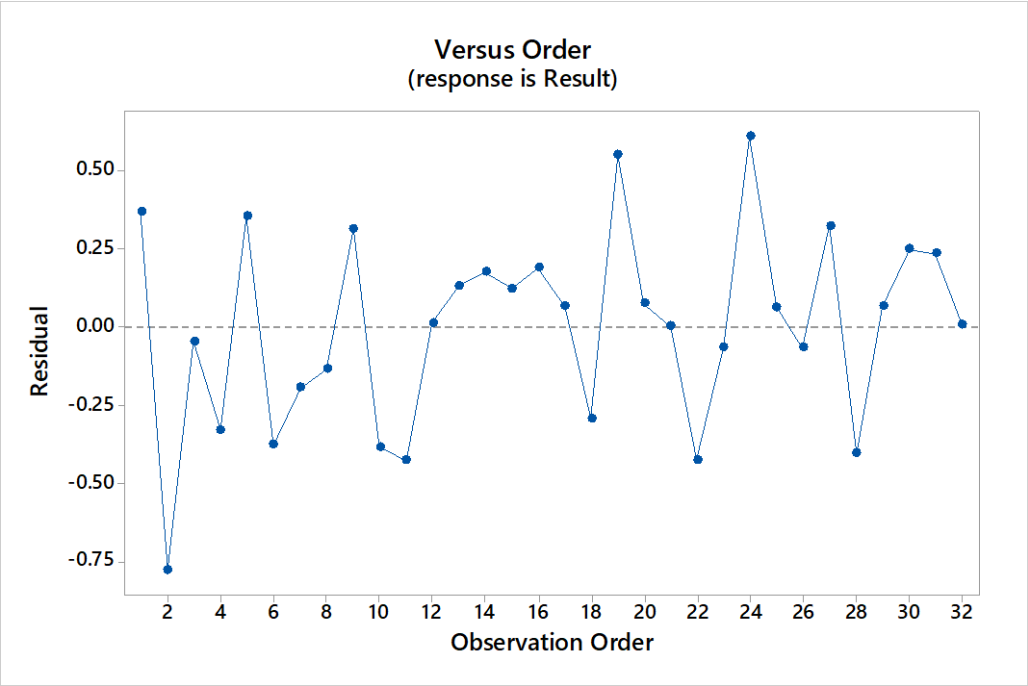


รูปที่ 56 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจงแจกแบบปกติ

สมมติฐานที่ 2 : ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent residual)

เพื่อทดสอบว่าค่าส่วนตกค้างของข้อมูล (Residual) เป็นอิสระต่อกัน (Independent) หรือไม่ โดยจะพิจารณาจากกราฟ ที่เกิดจากการพล็อตลำดับการเก็บข้อมูลในการทดลอง (Order) เทียบกับส่วนตกค้าง (Residual) จะเห็นข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่รอบๆแนวแกนศูนย์ (Mean) กล่าวคือมีข้อมูลที่ไปทางแกน y+ และไปทางแกน y- พอๆกัน โดยไม่มีรูปแบบ (pattern) หรือแนวโน้ม จึงจะสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่สุ่มมามีความเป็นอิสระต่อกัน มีความน่าเชื่อถือ ไม่ไบอัส (Bias) โดยผลของการทดลองนี้ จากรูปที่ 56 พิจารณากราฟการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง พบว่ามีการกระจายอย่างสุ่มรอบแนวแกนศูนย์ และลักษณะของกราฟไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้นี้มีความเป็นอิสระต่อกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

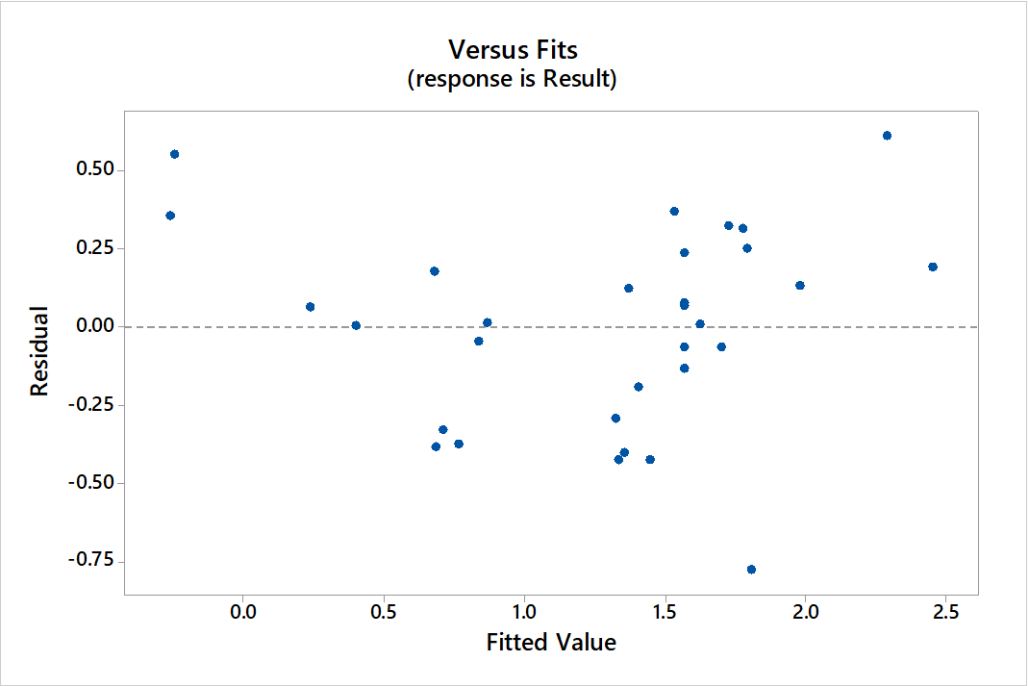


รูปที่ 57 ผลการทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระ

สมมติฐานที่ 3 : ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ (Variance Constance at Mean = 0)

ในส่วนที่สามนี้เป็นสมมติฐานที่พล็อตเพื่อตรวจหาความไม่เชิงเส้น ในการทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance stability) และค่าที่ผิดปกติ โดยการนำค่า Residual ของข้อมูลมาพิจารณาเทียบกับค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย (Fitted Value) โดยข้อมูลจะต้องมีการกระจายรอบแกนศูนย์ อย่างไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้ม จึงจะสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่ากลางเท่ากับศูนย์ หรือมีความแปรปรวนคงที่ ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 57 พบว่าลักษณะการกระจายของ residual ไม่มีรูปแบบหรือไม่มีแนวโน้มแน่ชัด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้ในการทดลองนี้มีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 58 ผลการทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพค่าความแปรปรวนของข้อมูล

เมื่อผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง จากสมมติฐาน (Assumption) ทั้ง 3 ข้อ ผ่านแล้ว สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่เก็บมานี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือตามข้อกำหนด กล่าวคือ ข้อมูลมีการกระจายเป็นแบบปกติ, มีความเป็นอิสะต่อกัน และข้อมูลมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญต่อไป

5.7.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลของค่าความสูงแกนเทปที่ปูดที่ได้จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 15 สามารถนำมาวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

Response Surface Regression:
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	20	15.0148	0.75074	7.75	0.001
Linear	5	11.0362	2.20724	22.77	0.000
Adhesive thickness	1	4.8985	4.89845	50.54	0.000
Nip pressure	1	1.4792	1.47920	15.26	0.002
Aging temperature	1	4.6006	4.60056	47.46	0.000

รูปที่ 59 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อความสูงของแปนเทปปูด (1)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Aging time	1	0.0338	0.03380	0.35	0.567
Time before cutting	1	0.0242	0.02420	0.25	0.627
Square	5	2.0041	0.40082	4.14	0.023
Adhesive thickness*Adhesive thickness	1	0.3179	0.31793	3.28	0.097
Nip pressure*Nip pressure	1	0.0388	0.03879	0.40	0.540
Aging temperature*Aging temperature	1	0.2133	0.21334	2.20	0.166
Aging time*Aging time	1	0.0136	0.01364	0.14	0.715
Time before cutting*Time before cutting	1	0.0225	0.02247	0.23	0.640
2-Way Interaction	10	1.9745	0.19745	2.04	0.129
Adhesive thickness*Nip pressure	1	0.5776	0.57760	5.96	0.033
Adhesive thickness*Aging temperature	1	0.3660	0.36602	3.78	0.078
Adhesive thickness*Aging time	1	0.0081	0.00810	0.08	0.778
Adhesive thickness*Time before cutting	1	0.0361	0.03610	0.37	0.554
Nip pressure*Aging temperature	1	0.1024	0.10240	1.06	0.326
Nip pressure*Aging time	1	0.0240	0.02402	0.25	0.628
Nip pressure*Time before cutting	1	0.2070	0.20702	2.14	0.172
Aging temperature*Aging time	1	0.4900	0.49000	5.06	0.046
Aging temperature*Time before cutting	1	0.0576	0.05760	0.59	0.457
Aging time*Time before cutting	1	0.1056	0.10563	1.09	0.319
Error	11	1.0662	0.09693		
Lack-of-Fit	6	0.9840	0.16401	9.98	0.012
Pure Error	5	0.0822	0.01643		
Total	31	16.0810			

Model Summary

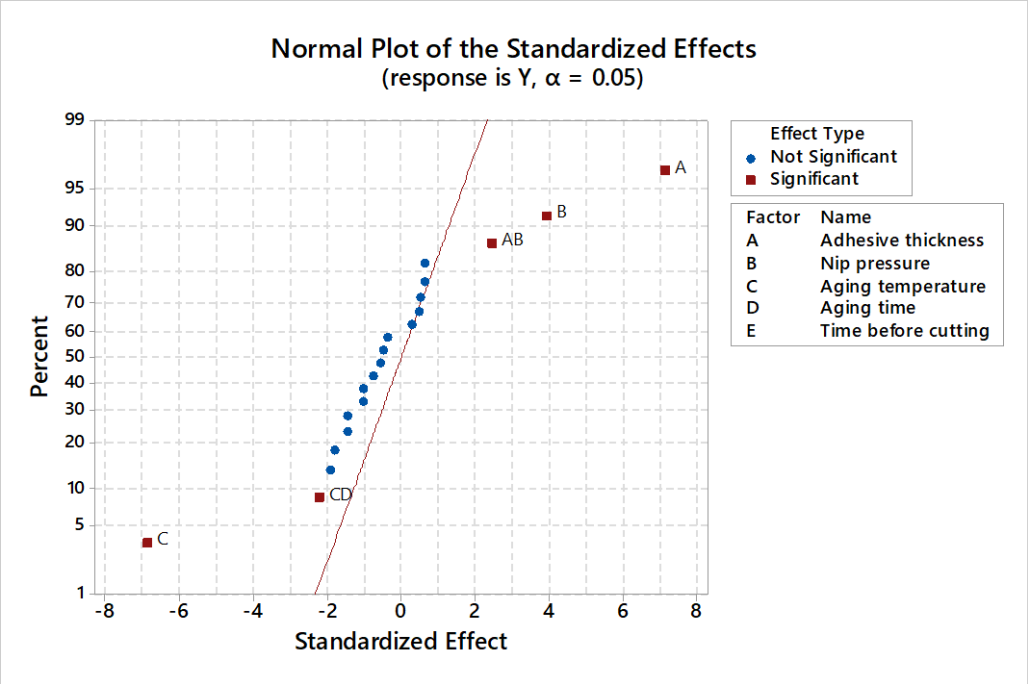
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.311331	93.37%	81.31%	0.00%

รูปที่ 60 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อความสูงของแปนเทปปูด (2)

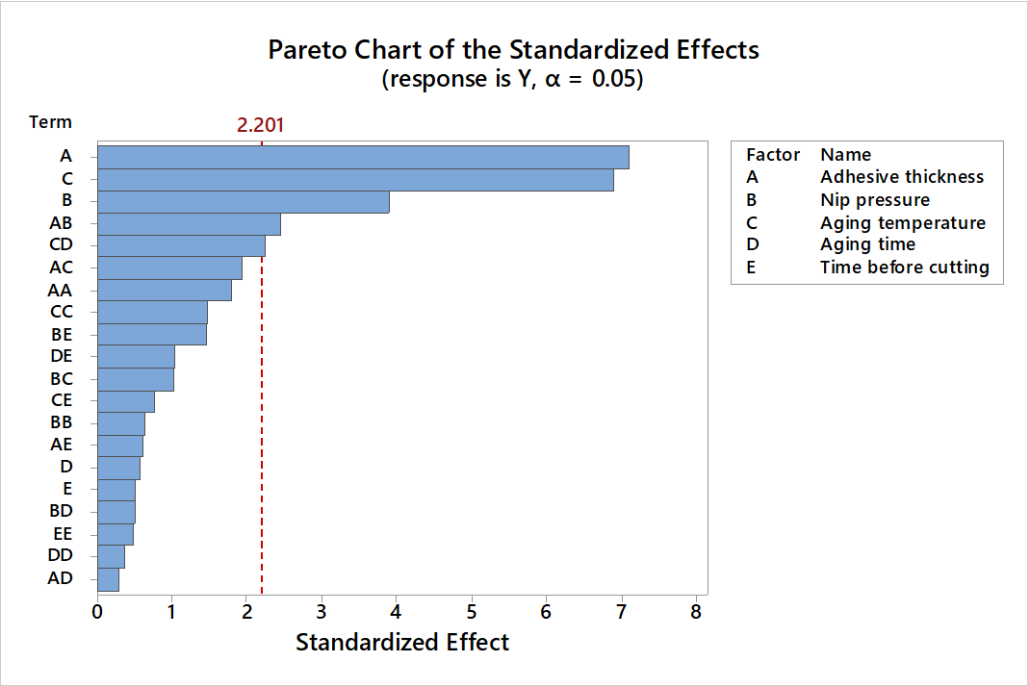
จากการทดลองโดยใช้การออกแบบกาทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF) สามารถทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการออกแบบการทดลองเบื้องต้นจาก Minitab ทั้งในแบบทดสอบเทอมปัจจัยหลัก (Main effect) และเทอมปัจจัยอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย (Interaction effect) แสดงในรูปที่ 58 ซึ่งเมื่อพิจารณาปัจจัยนำเข้าสำคัญที่ส่งผล

ต่อความสูงของแกนเทปปูด พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยผลการวิเคราะห์พบว่า มีปัจจัยหลัก 3 ประการที่มีนัยสำคัญ ได้แก่ ความหนาของกาว, แรงดัน Nip-pressure และอุณหภูมิอบ โดยเทอมปัจจัยอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัยแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาระหว่างความหนาของกาวกับอุณหภูมิการอบ และอุณหภูมิการอบกับเวลาการอบ มีความสำคัญเช่นกัน สำหรับการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของ R-square(adj) หรือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ มีค่าสูงถึง 81.31% สามารถอธิบายได้ว่าปัจจัยต่างๆตอบสนองต่อตัวแปรตอบสนองได้ดี และค่า R-square(adi.) ไม่ต่างจาก R-square (93.37%) มาก แสดงว่าจำนวนการทดลองเหมาะสมสำหรับการทำแบบจำลองการถดถอย (Regression Model)

นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงในรูปกราฟ Normal Plot และแผนภูมิพาเรโต ของปัจจัยหลัก (Main effect) และอันตรกิริยา (Interaction effect) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง ในที่นี้คือความสูงของแกนเทปปูดได้ เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญต่อความสูงของแกนเทปปูด ดังแสดงในรูปที่ 59 และ 60 ตามลำดับ



รูปที่ 61 กราฟ Normal Plot ของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง



รูปที่ 62 แผนภูมิพาเรโตของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

5.8 สรุประยะการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

ระยะการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา และปัจจัยที่ส่งผลต่อความสูงของแกนเทปปูดอย่างมีนัยสำคัญ โดยการนำเข้าปัจจัยที่ได้จากการระดมสมองของทีมงาน และวิเคราะห์ผ่านเครื่องมือต่างๆ ในบทก่อนหน้า ซึ่งได้ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนองมากที่สุดจำนวน 5 ปัจจัย ได้แก่ ระดับแรงกด Nip-pressure, อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll, ความหนากาว, เวลาที่ใช้ในการอบ Log roll และระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนการนำไปตัดเป็นเทป โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาแกนเทปปูด ดำเนินการโดยออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF) เพื่อคัดกรองปัจจัยนำเข้าที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยจะใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าแบบ Full ซึ่งช่วยให้ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง ทำให้การทดลองนี้มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง และมีการกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ที่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1), ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) ทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) โดยจะมีการทำการทดลองซ้ำ (Replication) จำนวน 2 ครั้ง เพื่อความถูกต้อง และลดการไบอัสของข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการทดลอง สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลเชิงสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab โดยทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง พบว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ข้อมูลมีการกระจายเป็นแบบปกติ, มีความเป็นอิสะต่อกัน และข้อมูลมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ (ANOVA) ต่อได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แบ่งออกเป็นเทอมปัจจัยหลัก (Main Effect) ได้แก่ ความหนาของกาว, แรงดัน Nip-pressure และอุณหภูมิอบ สำหรับเทอมปัจจัยอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย (Interaction Effect) ได้แก่ ปฏิกิริยาระหว่างความหนากาวกับอุณหภูมิการอบ และอุณหภูมิการอบกับเวลาการอบ มีผลต่อตัวแปรตอบสนองเช่นกัน ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์นี้ จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดแกนเทปปูดอย่างมีนัยสำคัญเพื่อนำไปปรับปรุงในขั้นตอนถัดไป มีจำนวน 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ระดับแรงกด Nip-pressure, อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll, เวลาที่ใช้ในการอบ log roll และความหนากาว ที่จะถูกนำไปวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมกับค่าเป้าหมายที่ทางโรงงานกรณีศึกษากำหนดไว้ต่อไป

การวิเคราะห์เพิ่มเติมจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่เป็นอุณหภูมิอบ log roll มีผลให้สามารถลดการปูดของแกนเทปได้ เนื่องจากการผลิตปกติในปัจจุบัน การปรับระดับ Nip-pressure, ความหนากาว และเวลาในการรอตัดที่ระดับต่างๆ โดยไม่มีการอบ log roll มักจะเกิดการปูดของแกนเทปอยู่เสมอ แต่เมื่อนำการอบ log roll มาใช้ในกระบวนการผลิต จะเห็นได้ว่าเกือบทุกสภาวะการทดลองมีแกนเทปปูดอยู่ในค่าควบคุมของโรงงานที่ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าอุณหภูมิอบสามารถช่วยลดการปูดของแกนเทปได้ แต่เนื่องจากการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการอาจจะต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตที่อาจเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็นค่าไฟฟ้า เวลาที่ใช้ และจำนวนผลผลิตต่อรอบลดลง จึงจำเป็นจะต้องคำนวณความคุ้มค่าในการปรับปรุงเกี่ยวกับอุณหภูมิอบนี้ด้วย

บทที่ 6
ระยะการปรับปรุงกระบวนการ (Improve phase : I)

จากระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในบทก่อนหน้านี้ สามารถวิเคราะห์สาเหตุที่ส่งผลต่อปัญหาแกนเทปปูดอย่างมีนัยสำคัญจำนวน 4 ปัจจัย ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในระยะการปรับปรุงกระบวนการ โดยการหาค่าที่เหมาะสมในแต่ละปัจจัยด้วยโปรแกรม Minitab (Response Optimizer) จากนั้นจะนำไปทำการทดลองแล้ววัดผลของตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าความสูงของแกนเทปปูด เพื่อยืนยันและสรุปค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตเทปที่จะนำไปสู่การใช้ตั้งเป็นสภาวะในการผลิตจริงต่อไป

6.1 ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF) ที่ได้กระทำไปในการวิเคราะห์หาสาเหตุ จะได้ปัจจัยที่มีผลต่อการปูดของแกนเทปอย่างมีนัยสำคัญ หรือเป็นปัจจัยที่แท้จริงทั้งหมด 4 ปัจจัย โดยในระยะนี้จะนำแต่ละปัจจัยมาหาค่าที่เหมาะสม เพื่อนำค่าที่ได้มากำหนดระดับในการทดลองผลิต เพื่อยืนยันผลการปรับปรุงต่อไป และปัจจัยมีดังนี้

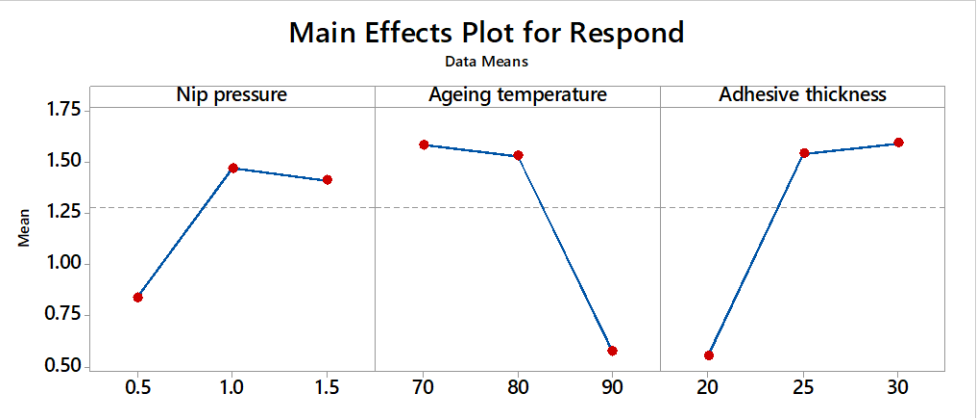
1. การปรับระดับแรงกด Nip-pressure
2. ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll
3. การปรับระดับความหนากาว
4. เวลาที่ใช้ในการอบ Log roll

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.2 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

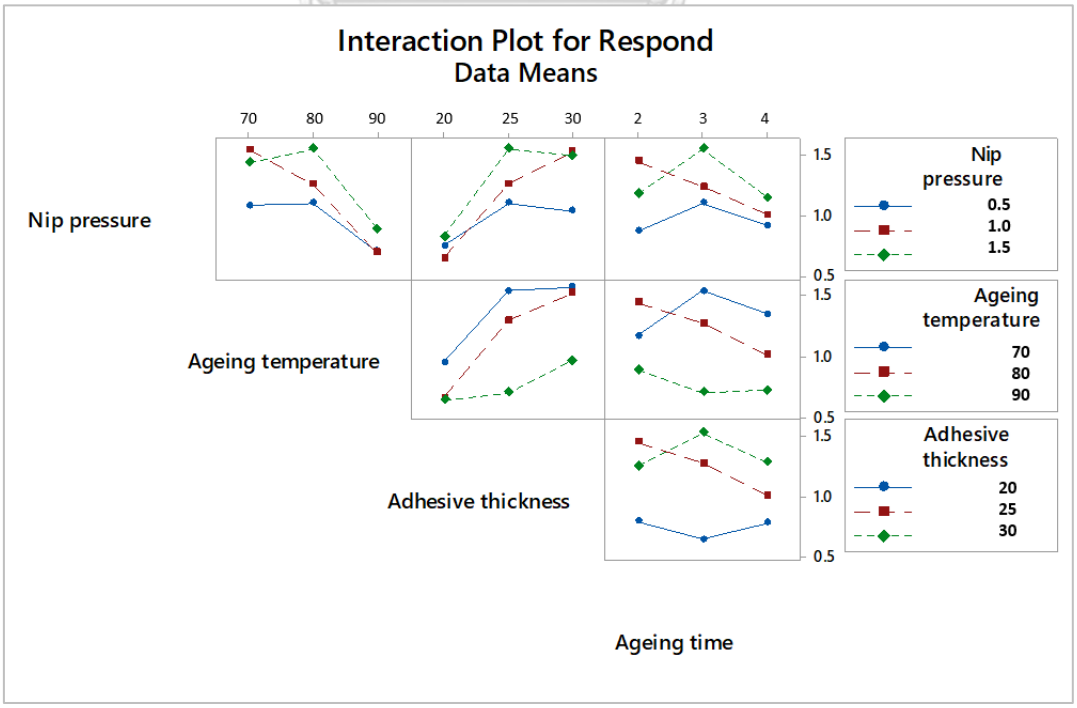
จากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF) ด้วยโปรแกรม Minitab ที่ได้ทำการทดลองไปในขั้นตอนก่อนหน้านั้น สามารถสรุปผลการวิเคราะห์จากค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ได้ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปูดของแกนเทป หรือปัจจัยหลัก (Main effect) มีด้วยกัน 3 ปัจจัย ได้แก่ การปรับระดับแรงกด Nip-pressure, ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll และการปรับระดับความหนากาว ส่วนปัจจัยอันตรกิริยา (Interaction effect) ระหว่างปัจจัย คือ ปฏิกิริยาระหว่างความหนากาวกับอุณหภูมิการอบ และอุณหภูมิการอบกับเวลาการอบ ก็มีผลต่อตัวแปรตอบสนองเช่นกัน โดยผลการวิเคราะห์การออกแบบ

การทดลองด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงผลของปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วม ดังรูปที่ 61 และ 62 ตามลำดับ



รูปที่ 63 ผลหลักของปัจจัยที่มีผลต่อการปูดของแกนเทป

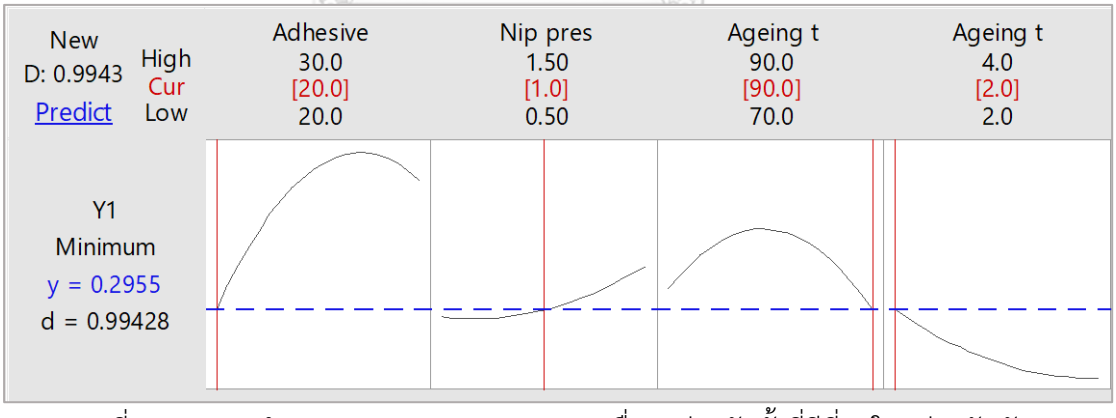
จากการพล็อตผลกระทบหลักในรูปที่ 61 สามารถนำมาใช้พิจารณาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อความสูงของแกนเทปปูด โดยวิเคราะห์ได้ว่าแกนเทปปูดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปรับระดับของแต่ละปัจจัยดังนี้ ความหนาของกาวต่ำ (20 ไมโครเมตร) ที่ความดัน Nip-pressure ต่ำ (0.5 บาร์) และที่อุณหภูมิการอบสูง (90 องศาเซลเซียส) โดยการปรับระดับปัจจัยในทิศทางตรงข้ามนี้จะทำให้การปูดของแกนเทปมีแนวโน้มสูงขึ้น



รูปที่ 64 ผลของอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีผลต่อการปูดของแกนเทป

สำหรับการพล็อตผลของอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีผลต่อการปูดของแกนเทป ดังรูปที่ 62 ใช้เพื่อพิจารณาระหว่างสองปัจจัยที่มีปฏิสัมพันธ์ร่วมกัน ได้มาจากคู่ปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จะถือว่ามีผลต่อการปูดของแกนเทปอย่างมีนัยสำคัญ โดยจากรูปพบว่าความสูงของแกนเทปปูดมีแนวโน้มลดลง จากการปรับอันตรกิริยาที่ 1 คือ อุณหภูมิการอบที่ระดับสูง (90 องศาเซลเซียส) ควบคู่กับระยะเวลาในการอบ log roll ที่ระดับกลาง (3 ชั่วโมง) หรือที่ระดับสูง (4 ชั่วโมง) และอันตรกิริยาที่ 2 คือ แรงกด Nip-pressure ที่ระดับต่ำ (0.5 บาร์) ควบคู่กับความหนากาวระดับต่ำ (20 ไมโครเมตร)

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยที่กล่าวข้างต้นแล้ว ขั้นต่อมาคือการนำแต่ละปัจจัยไปหาระดับที่เหมาะสม (Response Optimizer) โดยใช้โปรแกรม Minitab และกำหนดค่าตัวแปรตอบสนอง (ความสูงของแกนเทปปูด) ให้อยู่ในค่าตามมาตรฐาน (Specification) โดยจะกำหนดค่าเป้าหมายอยู่ที่ค่าต่ำสุด (Minimum) เนื่องจากวัตถุประสงค์สูงสุดของงานวิจัยนี้ คือการทำให้แกนเทปไม่เกิดการปูดเลยนั่นคือใกล้ 0 มิลลิเมตร กล่าวได้ว่ายิ่งสามารถปรับระดับแต่ละปัจจัยให้ความสูงของแกนปูดได้ต่ำ หรือใกล้เคียงศูนย์มากเท่าไหร่ ยิ่งทำให้มีโอกาสน้อยที่เทปจะปูดเกินค่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนด คือ 2 มิลลิเมตร (spec limit) ซึ่งเป็นค่าที่ลูกค้ายืนยันถึงความเหมาะสมในการนำเทปไปใช้งานได้ และการนำไปติดตั้งในเครื่องพันสายไฟอัตโนมัติได้โดยไม่เกิดปัญหาใดๆ ดังนั้นเพื่อหาความเหมาะสมในการปรับระดับแต่ละปัจจัย โดยการเลือกฟังก์ชั่น Response Optimization ที่อยู่ในโปรแกรม Minitab เพื่อให้ความสูงของแกนเทปปูดต่ำที่สุด สามารถแสดงค่าการปรับได้ดังรูปที่ 63



รูปที่ 65 ผลการทำ Response Optimization เพื่อหาค่าปรับตั้งที่ดีที่สุดในแต่ละปัจจัย

จากรูปที่ 63 ผู้วิจัยได้นำค่าที่ได้จากการทำ Response Optimization มาใช้เป็นแนวทางในการกำหนดระดับของปัจจัยในกระบวนการผลิตจริงของโรงงาน (Pilot trial) เพื่อยืนยันว่าค่าระดับความเหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ได้ตรงตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่าระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

กระบวนการ	ปัจจัยนำเข้า	หน่วย	ระดับที่เหมาะสม
กระบวนการเคลือบผิว	ความหนากาว	ไมโครเมตร	20
	Nip-pressure	บาร์	1.0
กระบวนการอบ log roll	อุณหภูมิอบ log roll	°C	90
	เวลาอบ log roll	ชั่วโมง	2

จากเป้าหมายในงานวิจัยนี้คือ การลดความสูงของแกนเทปปูดให้ใกล้ศูนย์และสูงสุดไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ดังนั้นการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงนี้คือ สภาวะการควบคุมความหนากาวเท่ากับ 20 ไมโครเมตร, ระดับแรงกด Nip-pressure เท่ากับ 1.0 บาร์, ควบคุมอุณหภูมิอบ log roll เท่ากับ 90 องศาเซลเซียส และเวลาอบ log roll เท่ากับ 2 ชั่วโมง การปรับปรุงนี้มีความน่าจะเป็นของความสำเร็จ (D) คือ 0.9554 (ยิ่ง D มีค่าเข้าใกล้ 1 ยิ่งใกล้เป้าหมายมากขึ้น)

6.3 สรุประยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเกี่ยวกับผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบจากอันตรกิริยา (Interaction Effect) ที่ส่งผลต่อความสูงของแกนเทปปูด โดยในระยะการปรับปรุงนี้จะทำการกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการลดการปูดของแกนเทป โดยจะเลือกปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญในขั้นตอนก่อนหน้า (ระยะวิเคราะห์และค้นหาสาเหตุของปัญหา) นำมาเข้ากระบวนการปรับปรุงเพื่อออกแบบระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer จากโปรแกรม Minitab โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงคือ เพื่อลดความสูงของเทปปูดให้ใกล้กับ 0 มิลลิเมตรมากที่สุด หรือความสูงของแกนเทปปูดมากที่สุดต้องไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ดังนั้นการตั้งค่าแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงนี้ คือ การตั้งค่าความหนาของกาว เท่ากับ 20 ไมโครเมตร, แรงดัน Nip-pressure เท่ากับ 1.0 บาร์, อุณหภูมิอบ log roll เท่ากับ 90°C และเวลาในการอบ log roll เท่ากับ 2 ชั่วโมง โดยผลลัพธ์นี้มีความน่าจะเป็นที่ประสบความสำเร็จ (D) ที่ 0.9554 จากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลในขั้นตอนถัดไป

บทที่ 7
ระยะควบคุมกระบวนการ (Control phase : C)

หลังจากการหาค่าที่เหมาะสมในแต่ละปัจจัยด้วยโปรแกรม Minitab (Response Optimizer) ในระยะปรับปรุงแก้ไขกระบวนมาแล้ว จากนั้นในระยะควบคุมกระบวนการซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) จะเป็นการยืนยันผลสรุปการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ โดยการนำระดับของปัจจัยที่เหมาะสมไปทำการทดสอบเพื่อยืนยันผล และสรุปค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตเทปที่สามารถลดความสูงของแกนเทปปูดให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้จริง อันจะนำไปสู่การใช้ตั้งเป็นสภาวะในการผลิตจริง พร้อมทั้งจัดทำแผนควบคุม กระบวนการ (Control Plan) ในการปฏิบัติงานให้กระบวนการผลิตเทปชนิด C07T เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่โรงงานกำหนดไว้ และปฏิบัติการแก้ไขเมื่อพบจุดออกนอกค่าควบคุม เพื่อแก้ไขไม่ให้เกิดปัญหาขึ้นซ้ำอีกได้

7.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

จากปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้งหมดที่ได้จากขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ จะถูกนำมาทำการทดสอบยืนยันผลการศึกษาการลดความสูงของแกนเทปปูด โดยมีปัจจัยที่จะนำมาทำการปรับปรุงทั้งหมด 4 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันผลการปรับปรุง

สัญลักษณ์ของปัจจัย	ปัจจัย	ระดับที่เหมาะสม	หน่วย
A	ความหนากาว	20	ไมโครเมตร
B	แรงกด Nip-pressure	1.0	บาร์
C	อุณหภูมิอบ log roll	90	°C
D	เวลาอบ log roll	2	ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7.1.1 ขั้นตอนในการทดสอบเพื่อยืนยันผล

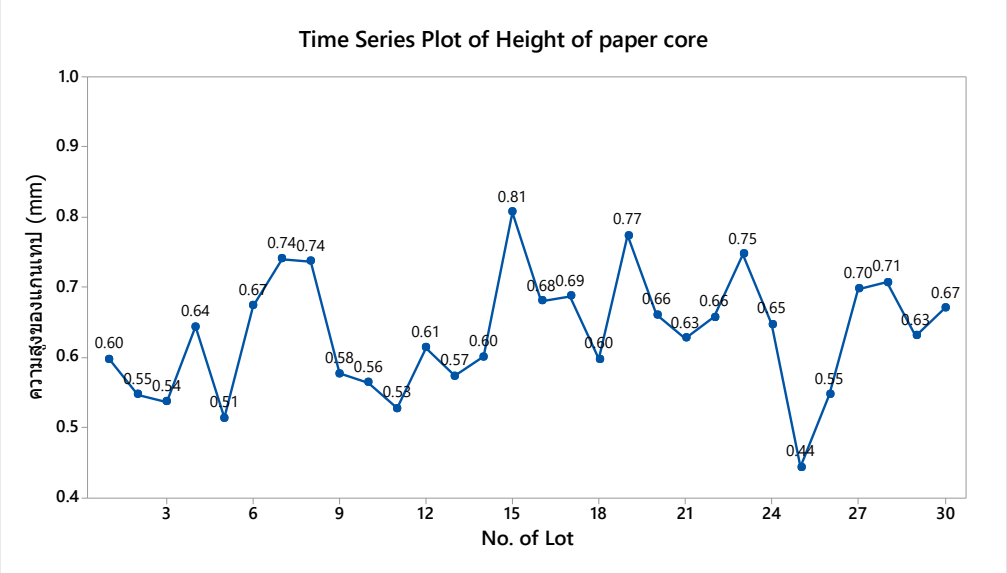
ก่อนการทดสอบในกระบวนการผลิต จำเป็นต้องมีการเตรียมเครื่องจักรและอุปกรณ์การผลิตในกระบวนการเคลือบผิว และกระบวนการอบให้เรียบร้อยก่อนการปฏิบัติงาน และมีการจัดอบรมให้พนักงานแต่ละกระบวนการผลิตให้มีความเข้าใจตรงกัน เพื่อให้ค่าที่ปรับตั้งเป็นไปตามที่กำหนดไว้ โดยในการทดลองนี้จะดำเนินการเก็บข้อมูลจำนวน 30 ล็อตการผลิต และทำการสุ่มวัดความสูงล็อต ละ 3 ชิ้น แบ่งเป็น ต้นล็อต กลางล็อต และท้ายล็อต เพื่อยืนยันความสามารถในการผลิต มีรายละเอียดของขั้นตอนในการทดสอบเป็นดังนี้

1. จัดเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตจากแหล่งเดียวกันในทุกๆแบชการทดลอง
2. ในกระบวนการเคลือบสารกาวบนผิวชีท จะเริ่มทำการปรับปัจจัยแรกคือ ปรับระดับความหนากาว โดยการปรับระยะของ Rod coater
3. นำพีวีซีชีทลำเลียงอัตโนมัติตาม conveyer เข้าไปที่ตำแหน่งเคลือบสารกาว จากนั้นพีวีซีชีทจะเข้าสู่ขั้นตอนการเข้าม้วนเป็น log roll (Winding roll) โดยในขั้นตอนนี้จะทำการปรับปัจจัยที่สองคือ ปรับระดับแรงกด Nip-pressure ขณะเข้าม้วน (1.0 บาร์)
4. ทำการวัดระดับความหนากาวของ log roll แรก เพื่อตรวจสอบความหนากาวว่าอยู่ในระดับที่ตั้งค่าไว้ (20 ไมครอน) เมื่อได้ความหนากาวที่กำหนด จึงจะเริ่มเก็บชิ้นงาน log roll นั้นๆ ไปเข้ากระบวนการต่อไป
5. นำ log roll ที่ได้ ไปทำการอบที่อุณหภูมิ 90°C ในเวลา 2 ชั่วโมง เป็นปัจจัยที่สาม และปัจจัยที่สี่
6. เมื่อเสร็จขั้นตอนการอบแล้วจะนำ log roll มาเก็บไว้ในพื้นที่รอการตัด
7. ภายใน 24 ชั่วโมงจะนำ log roll ไปเข้ากระบวนการตัดเป็นเทป
8. ภายหลังจากการตัดเป็นเทป จะนำชิ้นงานเทปที่ได้จากแต่ละเงื่อนไขมาทำการอบเพื่อจำลองสภาวะการขนส่ง (อุณหภูมิ และความชื้น) ด้วยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C ความชื้น 90% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการตรวจสอบคุณภาพของโรงงาน
9. วัดความสูงของแกนเทป ด้วยเครื่องมือวัดดิจิตอลเวิร์เนียร์และบันทึกผล

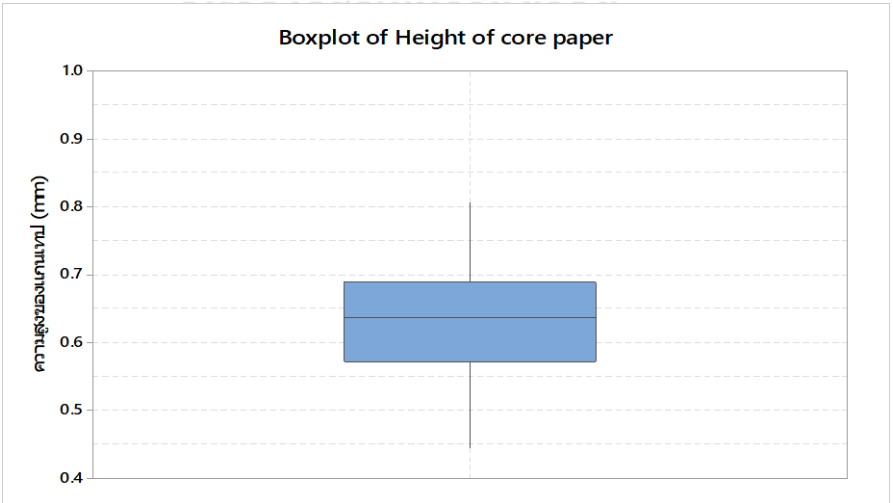
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7.1.2 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล

เมื่อได้สรุปค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย จากนั้นจะนำค่าทั้งหมดที่กล่าวในข้างต้นมาทำการทดลองในกระบวนการผลิตจริงของโรงงานกรณีศึกษา (Pilot trial) เพื่อพิสูจน์ว่าค่าระดับความเหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ได้ มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ปรับปรุงได้กระบวนการผลิตจริง ทั้งนี้มีการเก็บข้อมูลเป็นจำนวน 30 ล็อตการผลิต และทำการสุ่มวัดความสูงล็อตละ 3 ชิ้น แบ่งเป็นต้นล็อต กลางล็อต และท้ายล็อต เพื่อยืนยันความสามารถในการผลิต โดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 66 และรูปที่ 67

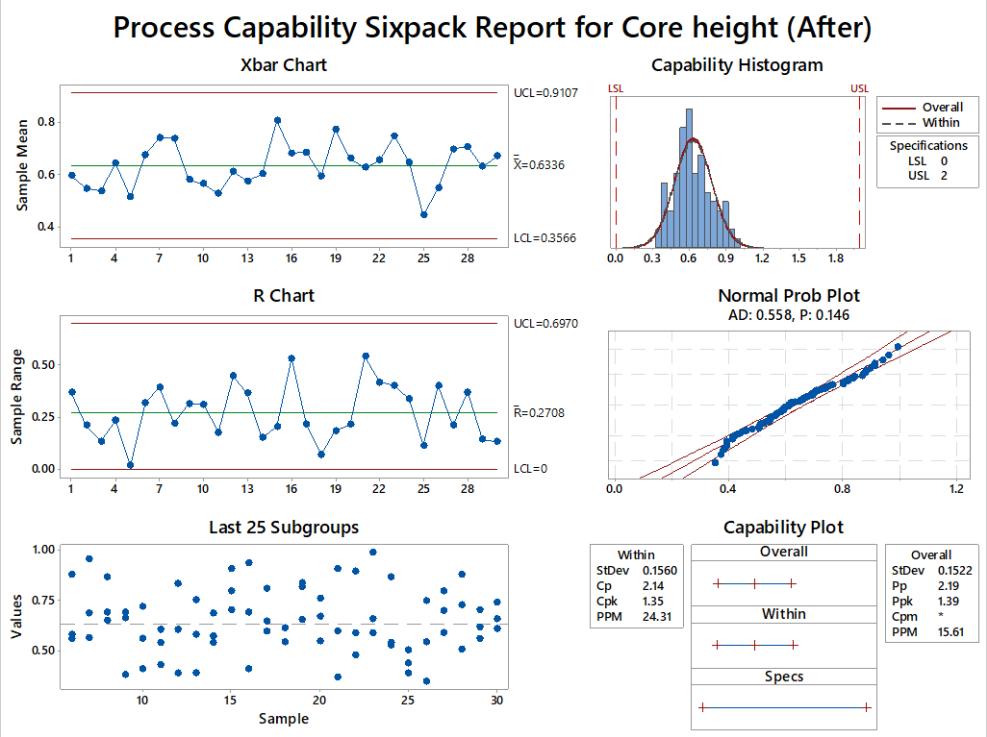


รูปที่ 66 ความสูงของแกนเทปปูดหลังปรับปรุงกระบวนการผลิตเทป



รูปที่ 67 ความผันแปรแบบ Box Plot ของผลผลิตเทปที่เกิดแกนปูดภายหลังการปรับปรุงกระบวนการ

สำหรับข้อมูลความสูงของแกนเทปปูดที่ได้หลังจากการปรับปรุงสภาวะกระบวนการผลิตเทปในโรงงานมาวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) แสดงดังรูปที่ 66



รูปที่ 68 ความสามารถของกระบวนการด้านผลผลิตที่ได้หลังการปรับปรุง

การประเมินความสามารถของกระบวนการ (Process capability) หลังการปรับปรุงด้วยการทดลองผลิตเทปจำนวน 30 ล็อตการผลิต และทำการสุ่มวัดความสูงล็อตละ 3 ชิ้น แบ่งเป็น ต้นล็อต กลางล็อต และท้ายล็อต สามารถอธิบายผลการปรับปรุงโดยใช้ Sixpack (Minitab) ได้ดังรูปที่ 68 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อทำการทดสอบสมมติฐานเรื่องการแจกแจงแบบปกติ และกระบวนการการผลิตเทปหลังปรับปรุงการลดแกนเทปปูด พบว่ากระบวนการอยู่ในสภาวะควบคุมได้ จากกราฟแสดงการแจกแจงแบบปกติ (Normal Prob plot) เมื่อพิจารณาค่า p-value จาก normality test ที่มีค่าเท่ากับ 0.146 พบว่ามีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเมื่อพิจารณาแผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ยและพิสัย (X - R Chart) พบว่าทั้งสองชนิดไม่มีข้อมูลนอกเหนือการควบคุม (Out of control data) แสดงว่าความผันแปรหรือความแตกต่างกันของความสูงแกนเทปปูดเฉลี่ยอยู่ในสภาวะที่ควบคุมได้ (in-control) ดังนั้นจากการพิจารณาการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (Normal prob plot) , R-chart และ $\bar{x}$-chart จึงสามารถสรุปได้ว่า หลังการปรับปรุงกระบวนการ พบว่าความสูงของแกนเทปปูดอยู่ในสภาวะที่ควบคุมได้ (in-control)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การประเมินความสามารถของกระบวนการ (Process capability) สำหรับการปรับปรุงความสูงของแกนเทปปูด ให้ค่าความสามารถของกระบวนการที่สัมพันธ์กับค่าเฉลี่ย (Cpk) เท่ากับ 1.35 ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์การยอมรับที่ 1.33 จึงสามารถยอมรับระดับความสามารถของกระบวนการนี้ได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากฮิสโทแกรม (Histogram) ร่วมด้วย จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการอยู่ใกล้กับความคาดหมายคือค่าใกล้ศูนย์ (ไม่เกิดการปูด) อีกด้วย โดยเทปมีความสูงของแกนปูดไม่เกินค่ามาตรฐานของโรงงานที่กำหนดที่เท่ากับ 2 มิลลิเมตร ซึ่งผลการวัดความสูงของแกนเทปปูดยังอยู่ในช่วงการควบคุมที่ตั้งไว้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความสามารถของกระบวนการผลิตเทปหลังการปรับปรุงในการลดความสูงของแกนเทปปูดในครั้งนี้ สามารถยอมรับได้ และถือได้ว่ากระบวนการนี้มีความสามารถเพียงพอที่จะทำให้การผลิตเทปไม่เกิดการปูดซึ่งเป็นไปตามค่าเป้าหมาย

7.1.3 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง

งานวิจัยนี้มีค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงที่เกิดในส่วนของทั้งการทดลอง และค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากการปรับปรุงกระบวนการ เพื่อหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมที่สุดในการลดความสูงของแกนเทปให้อยู่ในค่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนด ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นได้ โดยไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าแรงของพนักงาน เนื่องจากเป็นเวลาทำงานปกติที่ทางโรงงานจัดสรรเวลาและอำนวยความสะดวกในการทำการปรับปรุงได้เลย ซึ่งค่าใช้จ่ายในแต่ละส่วนสามารถประมาณการได้ดังนี้

- ในส่วนของการทำการทดลองมีค่าใช้จ่ายที่เป็นวัตถุดิบ ได้แก่ พีวีซีคอมพาวน์ สารกาว แกนกระดาษ รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการทดลอง รวมเป็นต้นทุนอยู่ที่ประมาณ 20,000 บาท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- ในส่วนของค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการปรับปรุง จะเกิดที่กระบวนการอบ log roll จากเงื่อนไขการปรับปรุงที่ 90°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการคำนวณค่าไฟฟ้าโดยนำค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/วัตต์) คูณกับค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย) จะได้ค่าไฟฟ้าในการอบต่อรอบ เท่ากับ 558 บาท/รอบการอบ โดยในหนึ่งรอบการอบจะสามารถบรรจุได้ 320 log roll (1 log roll สามารถตัดเป็นเทปได้ 60 ชิ้น) ซึ่งสามารถนำมาคิดต้นทุนในการผลิตที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการอบเป็น 0.03 บาท/ชิ้น มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงในกระบวนการอบ

ค่าไฟฟ้า 90°Cx2ชั่วโมง (บาท/รอบการอบ)	จำนวนเทปหลังตัด log roll (ชิ้น/รอบการอบ)	ต้นทุนในการผลิตที่เพิ่มขึ้น (บาท/ชิ้น)
558	19,200	0.0290625 ≈ 0.03

7.2 ข้อมูลหลังจากการปรับปรุง

ภายหลังจากการปรับปรุงและควบคุมกระบวนการ ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลจากกระบวนการผลิตเทป C07T เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ เพื่อให้มีการวนกะการทำงานของพนักงานครบทั้ง 3 กะ ซึ่งจะนำข้อมูลเทปที่เกิดแกนปูดเกิน 2 มิลลิเมตรมาพล็อตในแผนภูมิควบคุม (Control Chart) ดังรูปที่ 68 พบว่าค่าความสูงของแกนเทปในแต่ละล็อตอยู่ในการควบคุม (In control) กล่าวคือมีความสูงของแกนเทปไม่เกินกว่า UCL (Upper Center Line) อีกทั้งยังมีค่าเฉลี่ยต่อล็อตการผลิตเท่ากับ 0.61 มิลลิเมตร จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้หลังการปรับปรุงนี้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนการปรับปรุงกระบวนการ แสดงดังตารางที่ 19 และสรุปได้ดังรูปที่ 69

ตารางที่ 19 ผลเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง

ประเภท	หน่วย	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	ผลต่างระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง
ความหนากาว	ไมโครเมตร	30	20	-
แรงกด Nip-pressure	บาร์	1	1	-
อุณหภูมิอบ log roll	°C	ไม่ระบุ	90	-
เวลาอบ log roll	ชั่วโมง	ไม่ระบุ	2	-
ค่าความสูงแกนปูดสูงสุด	มิลลิเมตร	2.39	0.96	ลดลง 1.43
ค่าความสูงแกนปูดเฉลี่ย	มิลลิเมตร	1.88	0.61	ลดลง 1.27
ค่าความสูงแกนปูดต่ำสุด	มิลลิเมตร	1.22	0.38	ลดลง 0.84
เปอร์เซ็นของเสีย	%	40%	0%	ลดลง 40%
Cpk	-	0.14	0.135	ผ่านเกณฑ์การยอมรับ
ต้นทุนการผลิต	บาท/ชิ้น	7.55	7.58	เพิ่มขึ้น 0.03
	บาท/ปี	359,376,225	360,804,210	เพิ่มขึ้น 1,427,985
มูลค่าของเสีย	บาท/ปี	15,905,947	0	ลดลง 15,905,947
ความคุ้มค่าในการปรับปรุง / ปี				ลดลง 14,477,962

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 19 สามารถสรุปได้ว่าภายหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปด้วยค่าที่เหมาะสม เทปพันสายไฟชนิด C07T มีความสูงของแกนเทปลดลงเฉลี่ยที่ 0.61 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ค่าความสูงของแกนเทปปูดอยู่ในค่าควบคุมของลูกค้า ทำให้ของเสียที่เกิดจากแกนเทปปูดลดลงจาก 40% เป็นไม่เกิดของเสียเลย โดยเมื่อคำนวณในเรื่องค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงในปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในการอบ มีผลให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นต่อชิ้น เท่ากับ 0.03 บาท (สำหรับจำนวนการผลิตทั้งหมด 47.5 ล้านชิ้นต่อปี คิดเป็นต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากการอบ log roll เท่ากับ 1.4 ล้านบาทต่อปี) และเมื่อนำมาคิดเป็นมูลค่าของของเสียโดยรวม จะพบว่าการปรับปรุงนี้สามารถลดมูลค่าของเสียประมาณได้เป็น 14.4 ล้านบาทต่อปี (คำนวณจากปริมาณการเกิดเทปปูดที่ 2,106,756 ชิ้นต่อปี) ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าในการปรับปรุงครั้งนี้

เนื่องจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปในขั้นตอนการอบ log roll มีความกังวลถึงผลกระทบคุณสมัติของเทปในด้านแรงเกาะติด (Adhesion force) ของเทปที่อาจลดลงได้ จึงทำการตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐานของโรงงานพบว่า ค่าแรงเกาะติดยังอยู่ในค่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนด แสดงผลการตรวจสอบดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการตรวจสอบค่าแรงเกาะติดภายหลังการปรับปรุง

ค่าแรงเกาะติดของเทป		
ค่าควบคุมโรงงาน	ค่าที่ตรวจสอบได้	
	ค่าเฉลี่ย (ค่าต่ำสุด - ค่าสูงสุด)	
2.50 นิวตันขึ้นไป	2.83 (2.75 - 3.14)	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปพันสายไฟชนิด C07T โดยใช้แนวคิดซิกส์ ซิกมา ส่งผลให้ผลผลิตมีพัฒนาการที่ดีขึ้นแสดงดังรูปที่ 69 เปรียบเทียบความสูงของแกนเทปปูดก่อน และหลังการปรับปรุงกระบวนการ

รูปที่ 69 เปรียบเทียบความสูงของแกนเทปปูดที่ได้ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงสภาวะการผลิตเทปพันสายไฟชนิด C07T ในโรงงานกรณีศึกษา

7.3 แนวทางการควบคุมระดับของปัจจัย

จากผลการปรับปรุงกระบวนการพบว่า ความสูงของแกนเทปปูดมีค่าลดลงอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของโรงงาน รวมถึงผลผลิตที่ได้มีค่ามากกว่าที่คาดหวัง จึงได้มีการกำหนดแนวทางในการควบคุมระดับปัจจัย อันได้แก่ ความหนากาว, แรงกด Nip-pressure, อุณหภูมิอบ และ เวลาในการอบ ในกระบวนการผลิตเทป เพื่อได้ผลผลิตเป็นไปตามแนวทางที่ศึกษามาแล้ว และเพื่อให้พนักงานทุกคนเข้าใจไปในทิศทางเดียวกันและสามารถปฏิบัติตามขั้นตอนได้อย่างถูกต้อง ผู้วิจัยจึงได้กำหนดแนวทางดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. จัดทำเอกสารการปฏิบัติงาน (Work Instruction)
2. จัดการอบรมให้กับพนักงานควบคุมกระบวนการผลิต เพื่อให้มีความเข้าใจในขั้นตอนต่างๆและตระหนักถึงความสำคัญของการควบคุมการผลิตให้ไปในแนวทางเดียวกันก่อนการเริ่มปฏิบัติงาน
3. พนักงานควบคุมกระบวนการผลิตทำการบันทึกข้อมูลสภาวะควบคุมต่างๆ รวมถึงข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการผลิต เช่น สภาวะที่ผิดปกติ พร้อมทั้งเวลา และชื่อกำกับแต่ละขั้นตอนอย่างชัดเจน

7.4 สรุประยะควบคุมกระบวนการ

ภายหลังจากการปรับปรุงโดยการนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 15 มาใช้เป็นแนวทางในการผลิตเทปจริง และทำการติดตามกระบวนการ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการออกแบบการทดลองแล้วหาค่าที่เหมาะสมมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทป มีผลทำให้ความสูงของแกนเทปปูดลดลง นำไปสู่การลดปริมาณของเสียประเภทแกนปูดที่เกิดขึ้นในโรงงานกรณีศึกษาได้ โดยผลจากการติดตามกระบวนการผลิตเทปโดยการกำหนดค่าที่เหมาะสม จำนวน 30 ล็อตการผลิต และทำการสุ่มวัดความสูงล็อตละ 3 ชิ้น แบ่งเป็น ต้นล็อต กลางล็อต และท้ายล็อต สามารถอธิบายผลการปรับปรุงโดยใช้ Sixpack (Minitab) คำนวณค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (Cpk) มีค่าเท่ากับ 1.35 ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์การยอมรับ ที่ 1.33 จึงสรุปได้ว่า ความสามารถของกระบวนการผลิตเทปหลังการปรับปรุงในการลดความสูงของแกนเทปปูดในครั้งนี้ สามารถยอมรับได้ และถือได้ว่ากระบวนการนี้มีความสามารถเพียงพอที่จะทำให้การผลิตเทปไม่เกิดการปูดซึ่งเป็นไปตามค่าเป้าหมายได้ โดยเทปพันสายไฟชนิด C07T มีความสูงของแกนเทปหลังการปรับปรุงเฉลี่ย 0.61 มิลลิเมตร และค่าความสูง สูงสุด 0.96 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าค่าสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ที่โรงงานกำหนดคือความสูงไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ทำให้ค่าความสูงของแกนเทปปูดอยู่ในค่าควบคุมของลูกค้าด้วย นอกจากนี้สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดจากแกนเทปปูด จากก่อนการปรับปรุงเท่ากับ 40% และหลังการปรับปรุงลดลงเหลือ 0% หรือไม่เกิดของเสียเลย โดยเมื่อคำนวณในเรื่องค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงในปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในการอบ มีผลให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นต่อชิ้น เท่ากับ 0.03 บาท (สำหรับจำนวนการผลิตทั้งหมด 47.5 ล้านชิ้นต่อปี คิดเป็นต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากการอบ log roll เท่ากับ 1.4 ล้านบาทต่อปี) และเมื่อนำมาคิดเป็นมูลค่าของของเสียโดยรวม จะพบว่าการปรับปรุงนี้สามารถลดมูลค่าของเสียประมาณได้เป็น 14.4 ล้านบาทต่อปี (คำนวณจากปริมาณการเกิดเทปปูดที่ 2,106,756 ชิ้นต่อปี) ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าในการปรับปรุงครั้งนี้

ดังนั้นเพื่อให้ปัญหาแกนเทปปูดนี้ลดลงอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมกระบวนการโดยมีการจัดทำแนวทางในการควบคุมโดยใช้เอกสารการปฏิบัติงาน (Work operation) ในแต่ละกระบวนการเพื่อกำหนดค่าปรับตั้งให้ได้ผลลัพธ์ตามเป้าหมาย รวมถึงการจัดอบรมให้พนักงานเกิดความรู้ และเข้าใจจนตระหนักความสำคัญของการผลิตที่ต้องคำนึงถึงผลผลิตที่ดี อันจะนำไปสู่ความพึงพอใจของลูกค้า และสร้างผลกำไรให้แก่บริษัทต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 8
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการนำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้หลักการซิกซ์ ซิกมาในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปพีวีซีชนิด C07T โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดความสูงของแกนเทปปูดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่โรงงานกำหนด เนื่องจากแกนเทปปูดมีผลกระทบต่อการใช้งานของลูกค้าในการนำไปพันสายไฟในอุตสาหกรรมประกอบสายไฟในรถยนต์ โดยในปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษาพบว่าของเสียประเภทแกนปูดมีจำนวนมากที่สุดเมื่อเทียบกับของเสียประเภทอื่นๆ โดยความสูงของแกนเทปปูดอยู่ในช่วง 1.88 (1.22~2.39) มิลลิเมตร คิดเป็นสัดส่วนของเสีย (ความสูงเกินค่ามาตรฐาน) สูงถึง 40% รวมไปถึงค่า Cpk ของกระบวนการปัจจุบันอยู่ที่ 0.14 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์การยอมรับความสามารถของกระบวนการ ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาหาสาเหตุที่แท้จริง และแนวทางขจัดสาเหตุของปัญหาโดยใช้แนวทางการปรับปรุงกระบวนการตามหลักซิกซ์ ซิกมา ประกอบไปด้วย 5 ระยะ คือ ระยะการนิยามปัญหา (Define phase), ระยะการวัดและวิเคราะห์หาสาเหตุเบื้อต้น (Measure phase), ระยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analysis phase), ระยะการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improve phase) และระยะควบคุมกระบวนการ (Control phase) ภายหลังการปรับปรุงกระบวนการพบว่าค่าความสูงของแกนเทปปูดลดลงอยู่ในช่วง 0.61 (0.38~0.96) มิลลิเมตร คิดเป็นสัดส่วนของเสีย 0% รวมไปถึงค่า Cpk ของกระบวนการเท่ากับ 0.135 ผ่านเกณฑ์การยอมรับอีกด้วย ซึ่งบทสรุปของแต่ละระยะสามารถอธิบายดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8.1 บทสรุปของระยะนิยามปัญหา

ในระยะนิยามปัญหาผู้วิจัยได้ทำการศึกษา และเก็บรวบรวมข้อมูลจากกระบวนการผลิตพีวีซีเทปชนิด C07T ในโรงงานกรณีศึกษา เพื่อระบุปัญหาสำคัญที่จำเป็นต้องแก้ไข โดยทำการเก็บข้อมูลการผลิตตั้งแต่ช่วงเดือนพฤษภาคม 2563 ถึงเดือนเมษายน 2564 เป็นเวลา 12 เดือน พบว่าเทปชนิด C07T มีจำนวนการผลิตสูงที่สุด คิดเป็น 74.58% และจากจำนวนการผลิตที่สูงนี้ จึงทำให้พบจำนวนของเสียมากที่สุดด้วย ซึ่งคิดเป็นของเสีย 76.62% ของจำนวนของเสียทั้งหมดในโรงงาน โดยเมื่อพิจารณาจากราคาต้นทุนของเสียต่อปีร่วมด้วย จะเห็นได้ว่าเทปชนิด C07T มีราคาต้นทุนที่เป็นของเสียคิดเป็น 41.88 ล้านบาท/ปี (ราคาต้นทุนของเทปชนิด C07T เท่ากับ 7.55 บาท/ชิ้น) ซึ่งจากการพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการปรับปรุงแล้ว ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าควรทำการลดของเสียที่เกิดจากเทปพันสายไฟชนิด C07T เป็นลำดับแรก โดยจากการศึกษาประเภทของของเสียที่เกิดกับเทป C07T สามารถ

จำแนกประเภทของเสียที่เกิดขึ้น และพบว่าเกิดของเสียประเภทแกนปูดมากที่สุด คิดเป็น 37.98% ของจำนวนของเสียทั้งหมด ซึ่งคำนวณเป็นต้นทุนของเสีย 15.9 ล้านบาท/ปี และปริมาณการเกิดของเสียนี้ยังมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหากไม่ได้รับการปรับปรุงแก้ไขอย่างถาวร จะทำให้บริษัทต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้น สูญเสียชื่อเสียงเพราะสินค้าไม่ได้คุณภาพ และอาจจะสูญเสียความน่าเชื่อถือจากการส่งมอบสินค้าที่ล่าช้าได้ จึงเป็นเหตุผลสำคัญในการที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นต่อไป โดยมีเป้าหมายในการลดความสูงของแกนเทปปูดในเทปพันสายไฟชนิด C07T ให้อยู่ในค่ามาตรฐานที่โรงงานกำหนด คือไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ปริมาณของเสียลดลงได้ และมีความคาดหวังภายหลังการปรับปรุง คือผลผลิตของกระบวนการต้องมีค่าเฉลี่ยความสูงของแกนเทปปูดลู่เข้าใกล้ศูนย์มากขึ้น และคิดเป็นสัดส่วนของเสียไม่เกิน 10% ตามนโนบายของโรงงานกรณีศึกษา โดยพิจารณาได้จากค่า Cpk ของกระบวนการควรมีค่ามากกว่า 1.33 ซึ่งในปัจจุบันให้ค่าเฉลี่ยความสูงแกนเทปปูดอยู่ที่ 1.88 มิลลิเมตร ซึ่งยังมีค่าความสูงของแกนปูดมากกว่า 2 มิลลิเมตรคิดเป็นสัดส่วนของเสีย 40% รวมไปถึงค่า Cpk ของกระบวนการปัจจุบันอยู่ที่ 0.14

8.2 สรุประยะการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา

ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดความสูงของแกนเทปด้วยเครื่องมือดิจิตอลเวอร์เนียร์ แสดงให้เห็นว่าระบบการวัดของโรงงานกรณีศึกษานี้ มีอัตราส่วนของความผันแปรของระบบการวัดเทียบกับค่าความผันแปรของกระบวนการ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และสำหรับอัตราส่วนของความผันแปรของระบบการวัดเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนอนุโลมมีความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบการวัดนี้มีความผันแปรที่ยอมรับได้ รวมไปถึงความผันแปรจากสาเหตุรีพีททะบิลิตี้ มีค่าไม่ต่างจากความผันแปรจากสาเหตุรีโปรดิวซิบิลิตี้มากนัก เมื่อได้ค่าตัวชี้วัดในระดับที่ยอมรับได้ จึงสามารถนำระบบการวัดนี้ไปใช้งานต่อในขั้นตอนการหาสาเหตุต่อไปได้ โดยจากระบบการวัดที่กล่าวมานี้ ทางโรงงานกรณีศึกษาและผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบความถูกต้องแม่นยำของระบบทุกครั้งก่อนการเริ่มกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งเครื่องมือในหารสอบเทียบที่ใช้จะเป็นไปตามมาตรฐานการรับรองระบบ ISO 9001 ดังนั้นจึงสามารถรับรองได้ว่าระบบการวัดนี้สามารถให้ค่าการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำและเที่ยงตรงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ภายหลังจากการยอมรับระบบการวัด ได้มีการระดมสมองของทีมงานผู้ที่เกี่ยวข้องในการช่วยกันค้นหาสาเหตุที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดปัญหาแกนเทปปูด โดยใช้เครื่องมือแผนผังแสดงสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ซึ่งได้ปัจจัยที่เป็นไปได้ทั้งหมด 23 ปัจจัย จากนั้นนำมาทำการคัดกรองด้วยตารางแสดงความสัมพันธ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) ในการให้คะแนน

ความสำคัญของแต่ละปัจจัย ทำให้เหลือปัจจัยที่สำคัญ 9 ปัจจัย เพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ด้วยการให้คะแนนเพื่อคำนวณค่า RPN และสามารถจัดลำดับความสำคัญจากคะแนนมากไปน้อยโดยใช้แผนภาพพาเรโต ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาแกนเทปปูดทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ การปรับระดับแรงกด Nip-pressure, ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll, การปรับระดับความหนากาว, เวลาที่ใช้ในการอบ Log roll และระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนการนำไปตัดเป็นเทป โดยในขั้นตอนต่อไป จะเป็นการนำปัจจัยทั้งห้านี้มาใช้เป็นปัจจัยหลักในการออกแบบการทดลองเพื่อแก้ปัญหาแกนเทปปูดต่อไป

8.3 สรุประยะการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ระยะการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา และปัจจัยที่ส่งผลต่อความสูงของแกนเทปปูดอย่างมีนัยสำคัญ โดยการนำเข้าปัจจัยที่ได้จากการระดมสมองของทีมงาน และวิเคราะห์ผ่านเครื่องมือต่างๆ ในบทก่อนหน้า ซึ่งได้ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนองมากที่สุดจำนวน 5 ปัจจัย ได้แก่ ระดับแรงกด Nip-pressure, อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll, ความหนากาว, เวลาที่ใช้ในการอบ Log roll และระยะเวลาในการเก็บ log roll ก่อนการนำไปตัดเป็นเทป โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาแกนเทปปูด ดำเนินการโดยออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Face-Centered Central Composite Design : CCF) เพื่อคัดกรองปัจจัยนำเข้าที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยจะใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าแบบ Full ซึ่งช่วยให้ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง ทำให้การทดลองนี้มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง และมีการกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ที่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1), ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) ทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) โดยจะมีการทำการทดลองซ้ำ (Replication) จำนวน 2 ครั้ง เพื่อความถูกต้อง และลดการไบอัสของข้อมูล

จากผลการทดลอง สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลเชิงสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab โดยทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง พบว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ข้อมูลมีการกระจายเป็นแบบปกติ, มีความเป็นอิสะต่อกัน และข้อมูลมีความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ (ANOVA) ต่อได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปนตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แบ่งออกเป็นเทอมปัจจัยหลัก (Main Effect) ได้แก่ ความหนาของกาว, แรงดัน Nip-pressure และอุณหภูมิอบ สำหรับเทอมปัจจัยอันตรกิริยาระหว่างสองปัจจัย (Interaction Effect) ได้แก่ ปฏิกิริยาระหว่างความหนากาวกับอุณหภูมิการอบ และอุณหภูมิการอบ

กับเวลาการอบ มีผลต่อตัวแปรตอบสนองเช่นกัน ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์นี้ จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดแกนเทปปูดอย่างมีนัยสำคัญเพื่อนำไปปรับปรุงในขั้นตอนถัดไป มีจำนวน 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ระดับแรงกด Nip-pressure, อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ Log roll, เวลาที่ใช้ในการอบ log roll และความหนากาว ที่จะถูกนำไปวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมกับค่าเป้าหมายที่ทางโรงงานกรณีศึกษากำหนดไว้ต่อไป

การวิเคราะห์เพิ่มเติมจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่เป็นอุณหภูมิอบ log roll มีผลให้สามารถลดการปูดของแกนเทปได้ เนื่องจากการผลิตปกติในปัจจุบัน การปรับระดับ Nip-pressure, ความหนากาว และเวลาในการรอตัดที่ระดับต่างๆ โดยไม่มีการอบ log roll มักจะเกิดการปูดของแกนเทปอยู่เสมอ แต่เมื่อนำการอบ log roll มาใช้ในกระบวนการผลิต จะเห็นได้ว่าเกือบทุกสภาวะการทดลองมีแกนเทปปูดอยู่ในค่าควบคุมของโรงงานที่ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าอุณหภูมิอบสามารถช่วยลดการปูดของแกนเทปได้ แต่เนื่องจากการเพิ่มขั้นตอนในกระบวนการอาจจะต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตที่อาจเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็นค่าไฟฟ้า เวลาที่ใช้ และจำนวนผลผลิตต่อรอบลดลง จึงจำเป็นจะต้องคำนวณความคุ้มค่าในการปรับปรุงเกี่ยวกับอุณหภูมิอบนี้ด้วย

8.4 สรุประยะปรับปรุงและแก้ไขกระบวนการ

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเกี่ยวกับผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบจากอันตรกิริยา (Interaction Effect) ที่ส่งผลต่อความสูงของแกนเทปปูด โดยในระยะการปรับปรุงนี้จะทำการกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการลดการปูดของแกนเทป โดยจะเลือกปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญในขั้นตอนก่อนหน้า (ระยะวิเคราะห์และค้นหาสาเหตุของปัญหา) นำมาเข้ากระบวนการปรับปรุงเพื่อออกแบบระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer จากโปรแกรม Minitab โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงคือ เพื่อลดความสูงของเทปปูดให้ใกล้กับ 0 มิลลิเมตรมากที่สุด หรือความสูงของแกนเทปปูดมากที่สุดต้องไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ดังนั้นการตั้งค่าแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงนี้ คือ การตั้งค่าความหนาของกาว เท่ากับ 20 ไมโครอน, แรงดัน Nip-pressure เท่ากับ 1.0 บาร์, อุณหภูมิอบ log roll เท่ากับ 90°C และเวลาในการอบ log roll เท่ากับ 2 ชั่วโมง โดยผลลัพธ์นี้มีความน่าจะเป็นที่ประสบความสำเร็จ (D) ที่ 0.9554 จากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลในขั้นตอนถัดไป

8.5 สรุประยะการทดสอบยืนยันผลและตรวจติดตามควบคุมกระบวนการ

ภายหลังจากการปรับปรุงโดยการนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากระยะปรับปรุงกระบวนการในบทก่อนหน้า มาใช้เป็นแนวทางในการผลิตเทปจริง และทำการติดตามกระบวนการ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าการออกแบบการทดลองแล้วหาค่าที่เหมาะสมมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทป มีผลทำให้ความสูงของแกนเทปปูดลดลง นำไปสู่การลดปริมาณของเสียประเภทแกนปูดที่เกิดขึ้นในโรงงานกรณีศึกษาได้ โดยผลจากการติดตามกระบวนการผลิตเทปโดยการกำหนดค่าที่เหมาะสม จำนวน 30 ล็อตการผลิต และทำการสุ่มวัดความสูงล็อตละ 3 ชิ้น แบ่งเป็น ต้นล็อต กลางล็อต และท้ายล็อต สามารถอธิบายผลการปรับปรุงโดยใช้ Sixpack (Minitab) คำนวณค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (Cpk) มีค่าเท่ากับ 1.35 ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์การยอมรับ ที่ 1.33 จึงสรุปได้ว่าความสามารถของกระบวนการผลิตเทปหลังการปรับปรุงในการลดความสูงของแกนเทปปูดในครั้งนี้สามารถยอมรับได้ และถือได้ว่ากระบวนการนี้มีความสามารถเพียงพอที่จะทำให้การผลิตเทปไม่เกิดการปูดซึ่งเป็นไปตามค่าเป้าหมายได้ โดยเทปพันสายไฟชนิด C07T มีความสูงของแกนเทปหลังการปรับปรุงเฉลี่ย 0.61 มิลลิเมตร และค่าความสูง สูงสุด 0.96 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าค่าสูงสุดอยู่ในเกณฑ์ที่โรงงานกำหนดคือความสูงไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ทำให้ค่าความสูงของแกนเทปปูดอยู่ในค่าควบคุมของลูกค้าด้วย นอกจากนี้สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดจากแกนเทปปูด จากก่อนการปรับปรุงเท่ากับ 40% และหลังการปรับปรุงลดลงเหลือ 0% หรือไม่เกิดของเสียเลย โดยเมื่อคำนวณในเรื่องค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงในปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในการอบ มีผลให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นต่อชิ้น เท่ากับ 0.03 บาท (สำหรับจำนวนการผลิตทั้งหมด 47.5 ล้านชิ้นต่อปี คิดเป็นต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากการอบ log roll เท่ากับ 1.4 ล้านบาทต่อปี) และเมื่อนำมาคิดเป็นมูลค่าของของเสียโดยรวม จะพบว่าการปรับปรุงนี้สามารถลดมูลค่าของเสียประมาณได้เป็น 14.4 ล้านบาทต่อปี (คำนวณจากปริมาณการเกิดเทปปูดที่ 2,106,756 ชิ้นต่อปี) ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าในการปรับปรุงครั้งนี้

ดังนั้นเพื่อให้ปัญหาแกนเทปปูดนี้ลดลงอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมกระบวนการโดยมีการจัดทำแนวทางในการควบคุมโดยใช้เอกสารการปฏิบัติงาน (Work operation) ในแต่ละกระบวนการเพื่อกำหนดค่าปรับตั้งให้ได้ผลลัพธ์ตามเป้าหมาย รวมถึงการจัดอบรมให้พนักงานเกิดความรู้ และเข้าใจจนตระหนักความสำคัญของการผลิตที่ต้องคำนึงถึงผลผลิตที่ดี อันจะนำไปสู่ความพึงพอใจของลูกค้า และสร้างผลกำไรให้แก่บริษัทต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8.6 ข้อจำกัดของงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยและคณะทีมงานได้พบข้อจำกัดและอุปสรรคในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. จากระยะเวลาในการดำเนินโครงการที่จำกัด ทำให้ต้องมีการออกแบบการทดลองที่ต้องคำนึงถึงระยะเวลาและจำนวนการทดลอง เพื่อให้สามารถทำการทดลองได้เร็วที่สุด และเกิดของเสียน้อยที่สุด แต่ยังคงได้ข้อมูลที่มีคุณภาพเพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ผลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ
2. ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปด้วยการเพิ่มขั้นตอนการอบ log roll นั้น หากพิจารณาชนิดของเสียใดลักษณะหนึ่ง ในการทดลองอาจจะเจอของเสียประเภทอื่นๆแทรกขึ้นมาได้ และอาจกระทบต่อสิ่งที่กำลังศึกษา เช่น อารอบอาจทำให้คุณสมบัติด้านแรงเกาะติดของเทปลดลงเป็นปัญหาแทรกขึ้นมาได้ หรือการปรับ Nip-pressure ก็อาจจะมีผลต่อของเสียประเภอฟองอากาศเช่นกัน ดังนั้นจึงควรมีความรอบคอบในการพิจารณาตั้งแต่แรกถึงโอกาสที่จะเกิดปัญหาอื่นๆตามมาได้
3. ข้อจำกัดในด้านขีดจำกัดในการปรับตั้งเครื่องจักร เช่น ระดับ Gap ของ Rod coater สามารถปรับความหนากาวได้ต่ำสุดเพียง 8 ไมโครเมตร หรือเพื่อให้ยังคงคุณสมบัติของแรงเกาะติด จำเป็นต้องจำกัดความหนากาวตั้งแต่ 20 ขึ้นไป เป็นต้น อีกทั้งอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถปรับได้ในตู้อบคือ 90 องศาเซลเซียสเท่านั้น ซึ่งอาจจะทำให้การได้มาซึ่งสภาวะที่ดีที่สุดที่จะทำให้แกนปูดเป็น 0 มิลลิเมตร เป็นไปได้น้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8.7 ข้อเสนอแนะ

1. การนำผลของการปรับปรุงกระบวนการผลิตเทปพีวีซีชนิด C07T ในงานวิจัยนี้ ไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆในกระบวนการผลิตเดียวกัน จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงความแตกต่างของลักษณะผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดด้วย เช่น ชนิดของพีวีซีคอมพาวนด์ ชนิดกาว ความหนาชีท ความหนากาว ขนาดหน้ากว้างเทป หรือคุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งอาจจะมีส่วนที่ทำให้บางปัจจัยไม่สามารถใช้ระดับเช่นเดียวกับประเภท C07T ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องทำการทดลองด้วยวิธีการออกแบบซ้ำเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย จึงจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์เทปพีวีซีชนิดอื่นๆได้

2. ผลการวัดความสำเร็จของการปรับปรุงด้วยความสูงของแกนเทปปูด สามารถนำไปพิจารณาเกณฑ์ของลูกค้าที่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในอนาคตได้ เช่นเกณฑ์ความสูงกำหนดให้ไม่เกิน 1 มิลลิเมตร จะสามารถนำผลผลิตที่ผ่านการปรับปรุงนี้ไปใช้กับลูกค้าต่อไปได้

3. การพิจารณาปัจจัยนำเข้าต่างๆที่มีผลกระทบต่อการเกิดแกนเทปปูด ควรทำการวิเคราะห์อย่างรอบคอบถึงผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับลักษณะของเสียประเภทอื่นๆขึ้นพร้อมๆกันกับที่กำลังพิจารณาอยู่ได้ ซึ่งจะส่งผลต่อการวิเคราะห์และทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

4. การควบคุมกระบวนการที่กำหนดมานั้น สามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับการควบคุมกระบวนการภายหลังจากนี้ได้ เนื่องจากการมีเครื่องมือที่เหมาะสมกว่าจะช่วยทำให้การปรับปรุงแผนการควบคุมเดิมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้

5. การนำหลักการซิกซ์ ซิกมา มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการ ควรที่จะต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการดำเนินงานด้วย เนื่องจากซิกซ์ ซิกมามีขั้นตอนที่ใช้เวลาในการรวบรวมข้อมูล ระดมสมอง และวิเคราะห์ ตลอดจนการทำการทดลอง ซึ่งหากเป็นการปรับปรุงที่มีระยะเวลาจำกัด ควรที่จะใช้วิธีการปรับปรุงอื่นที่เหมาะสม

ในการดำเนินงานวิจัยโดยใช้ซิกซ์ ซิกมา มาปรับปรุงกระบวนการผลิตเทป เพื่อลดปัญหาแกนเทปพีวีซีปูดในโรงงานกรณีศึกษานี้นั้น ทำให้สามารถเรียนรู้วิธีการแก้ปัญหาได้อย่างเป็นระบบ มีขั้นตอนการทำงานที่ชัดเจนในแต่ละระยะ สามารถบริหารจัดการและปรับปรุงโดยใช้ข้อมูลจริง มีการใช้หลักการทางสถิติมาวิเคราะห์ เพื่อให้เกิดความถูกต้องและน่าเชื่อถือของข้อมูล อีกทั้งตลอดการดำเนินงานผู้วิจัยได้จัดการสร้างทีมงานให้กับองค์กรโดยประสานความร่วมมือของพนักงานแต่ละส่วนกับฝ่ายบริหาร ช่วยในการพัฒนาบุคลากรให้มีศักยภาพสูงขึ้น และปรับองค์กรให้เป็นองค์กรแห่งการเรียนรู้ ตลอดจนสามารถเพิ่มผลประกอบการโดยลดต้นทุน และเพิ่มผลกำไรจากการพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีคุณภาพ

สำหรับข้อจำกัดของการทำซิกซ์ ซิกมา เนื่องจากมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน DMIAC ที่สำคัญหลายส่วน โดยเฉพาะขั้นตอนเริ่มแรก การนิยามปัญหา (Define phase) โดยหากมีการกำหนดขอบเขตของการวิจัย (Project charter) ผิดตั้งแต่แรก อาจทำให้การดำเนินงานผิดพลาด และเกิดการสูญเสียแรงงาน ต้นทุน และเวลาได้ อีกทั้งผู้ที่ได้รับเชิญให้เข้ามามีส่วนร่วมในการปรับปรุง อันได้แก่ ผู้บริหารฝ่ายต่างๆ รวมไปถึงพนักงาน มาทำการการระดมสมอง ร่วมกันวิเคราะห์ รวมไปถึงการ

ทดลองในโรงงาน มักจะต้องใช้เวลาในการนัดประชุมร่วมกัน เนื่องจากพนักงานไม่สามารถทำงานแบบเต็มเวลาได้ (ทำงานเป็นกะ) ดังนั้นจึงต้องมีการวางแผนการดำเนินงาน จำนวนทรัพยากรณ์ที่ต้องจัดสรร เช่น คน เวลา และต้นทุน เพื่อให้ปรับปรุงได้ตามที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ ในส่วนของผู้วิจัยที่เป็นผู้ควบคุมการดำเนินงานทั้งหมด จากที่ไม่มีประสบการณ์ในการทำซิกซ์ ซิกมามาก่อน จึงทำให้เกิดความล่าช้าในการรวบรวมข้อมูล ติดต่อประสานงานกับผู้มีส่วนเกี่ยวข้องให้มาประชุมร่วมกัน แต่ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านในการให้ความร่วมมือ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ได้ผลลัพธ์ตามที่คาดการณ์ไว้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก ค่าความสูงของแกนเทปปูดของเทป C07T ที่ได้จากกระบวนการผลิตเทปในโรงงานกรณีศึกษาใน Lot การผลิตก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต

ตาราง ก.1 ข้อมูลค่าความสูงของแกนเทปปูดที่ได้จากกระบวนการผลิตเทป C07T ใน Lot การผลิตก่อนการปรับปรุงกระบวนการโดยใช้หลักการซิกซ์ ซิกมา

No.	ความสูงของแกนเทป (ก่อนการปรับปรุง)	No.	ความสูงของแกนเทป (ก่อนการปรับปรุง)	No.	ความสูงของแกนเทป (ก่อนการปรับปรุง)
1	2.03	21	2.16	41	2.14
2	1.57	22	1.87	42	1.89
3	1.96	23	1.66	43	1.82
4	1.99	24	2.21	44	1.79
5	1.43	25	2.35	45	2.14
6	1.63	26	1.51	46	1.58
7	2.19	27	2.19	47	2.23
8	2.22	28	1.49	48	1.24
9	1.87	29	1.39	49	1.91
10	2.29	30	1.93	50	2.05
11	1.93	31	1.74	51	2.11
12	2.15	32	2.02	52	1.39
13	1.52	33	2.33	53	1.54
14	1.97	34	1.7	54	2.02
15	1.56	35	1.89	55	1.8
16	1.78	36	1.22	56	1.41
17	2.32	37	1.69	57	2.14
18	1.51	38	1.55	58	1.89
19	2.31	39	1.9	59	2.1
20	2.08	40	2.39	60	2.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ก.2 ข้อมูลค่าความสูงของแกนเทปปูดที่ได้จากกระบวนการผลิตเทป C07T ใน Lot การผลิต หลังการปรับปรุงกระบวนการโดยใช้หลักการซิกซ์ ซิกมา

No.	ความสูงของแกนเทป (หลังการปรับปรุง)	No.	ความสูงของแกนเทป (หลังการปรับปรุง)	No.	ความสูงของแกนเทป (หลังการปรับปรุง)
1	0.45	31	0.43	61	0.6
2	0.82	32	0.61	62	0.91
3	0.52	33	0.54	63	0.37
4	0.63	34	0.84	64	0.59
5	0.59	35	0.39	65	0.48
6	0.42	36	0.61	66	0.9
7	0.46	37	0.75	67	0.66
8	0.56	38	0.58	68	0.99
9	0.59	39	0.39	69	0.59
10	0.68	40	0.54	70	0.54
11	0.74	41	0.57	71	0.87
12	0.51	42	0.69	72	0.53
13	0.51	43	0.8	73	0.5
14	0.52	44	0.71	74	0.44
15	0.51	45	0.91	75	0.39
16	0.58	46	0.69	76	0.54
17	0.88	47	0.94	77	0.75
18	0.56	48	0.41	78	0.35
19	0.69	49	0.6	79	0.7
20	0.57	50	0.81	80	0.59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

No.	ความสูงของแกนเทป (หลังการปรับปรุง)	No.	ความสูงของแกนเทป (หลังการปรับปรุง)	No.	ความสูงของแกนเทป (หลังการปรับปรุง)
21	0.96	51	0.65	81	0.8
22	0.65	52	0.62	82	0.51
23	0.87	53	0.62	83	0.73
24	0.69	54	0.55	84	0.88
25	0.66	55	0.84	85	0.71
26	0.38	56	0.82	86	0.56
27	0.69	57	0.66	87	0.62
28	0.41	58	0.67	88	0.61
29	0.56	59	0.55	89	0.74
30	0.72	60	0.76	90	0.66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข ค่าการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

ตาราง ข.1 6 ผลการให้คะแนนตารางแสดงสาเหตุและผล (Cause and Effect matrix)

ลำดับที่	ปัจจัย (Factors)	รายการสาเหตุและตัวแปรที่เป็นปัจจัยป้อนเข้า		การให้คะแนน							ผลสรุปการให้คะแนน (Mode)
				ผู้จัดการฝ่ายผลิต	วิศวกรฝ่ายผลิต	พนักงานฝ่ายผลิต	ผู้จัดการฝ่ายควบคุมคุณภาพ	หัวหน้าฝ่ายควบคุมคุณภาพ	พนักงานควบคุมคุณภาพ	นักพัฒนาและวิจัยผลิตภัณฑ์	
1	Man	Operator	พนักงานไม่ปฏิบัติงานตามขั้นตอน	3	1	1	1	1	1	1	1
2			พนักงานขาดประสบการณ์ ความรู้ และความชำนาญ	3	3	3	3	3	3	5	3
3			พนักงานขาดความเข้าใจในการทำงาน	3	1	1	3	1	1	3	1
4	Measurement	Work inspection	วิธีการวัดความสูงแกนไม่ถูกต้องตามมาตรฐาน	3	3	3	3	3	3	3	3
5		Equipment : vernier caliper	ความถูกต้องแม่นยำของอุปกรณ์การวัดความสูงของแกน	3	3	3	3	3	3	3	3
6	Machine	Gear oven	การเสื่อมสภาพและชำรุด	5	3	3	3	5	3	9	3
7			Heater ในตู้อบชำรุด	9	9	9	9	9	9	9	9
8		Cutting machine	ขาดการบำรุงรักษาใบมีดไม่คม ชำรุดหรือเสื่อมสภาพ	9	9	9	9	9	9	9	9
9		Rod coater gap	ขาดการบำรุงรักษา ชำรุดและเสื่อมสภาพ	1	3	3	3	3	3	3	3
10	Material	PVC compound	พบสิ่งแปลกปลอมติดมากับวัตถุดิบ	1	1	1	3	3	1	1	1
11		paper core	ความแข็งแรงของแกนกระดาษไม่อยู่ในมาตรฐาน	3	5	3	3	3	3	5	3
12		Raw adhesive material	อัตราส่วนในการผลิตกาวไม่ถูกต้อง	5	5	3	3	3	3	3	3
13			ความหนืดของกาว หรือการเสื่อมสภาพของกาว (pH)	9	5	9	9	9	9	9	9
14		Primer	ความหนืด หรือการเสื่อมสภาพของไพรเมอร์	1	1	1	1	1	1	1	1
15	Method	Nip-pressure	ระดับแรงกดไม่เหมาะสม (แรงกดไม่สม่ำเสมอ)	9	9	9	9	9	9	9	9
16		Aging log roll	การปรับอุณหภูมิอบไม่เหมาะสม	9	9	9	9	9	5	9	9
17			เวลาในการอบไม่เหมาะสม	9	9	9	9	9	5	9	9
18		Rod coater gap	การปรับระดับความหนากาวไม่เหมาะสม	9	9	9	9	9	9	9	9
19		Extruder roller gap	การปรับระดับความหนาฟิล์มไม่เหมาะสม	3	3	5	3	3	1	3	3
20		Keeping time before cutting	ระยะเวลาในการรอตัด log roll ไม่เหมาะสม	5	9	9	5	9	9	9	9
21	Environment	Weather	อุณหภูมิแวดล้อมในพื้นที่รอส่ง	9	9	9	9	9	9	9	9
22			ความชื้น	3	3	3	3	3	3	3	3
23		Area	สิ่งสกปรกโดยรอบ	1	1	1	1	1	1	1	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง ข.2 ประวัติการทำงานของคณะทำงาน

ลำดับที่	ตำแหน่ง	ประสบการณ์ทำงาน	หน้าที่
1	ผู้จัดการฝ่ายผลิต	มีประสบการณ์ทำงานในโรงงานผลิตเทปพันสายไฟในรถยนต์ 15 ปี	เป็นผู้วางแผนการใช้ทรัพยากรการผลิต ทำการตรวจสอบและปรับปรุงกระบวนการผลิต เป็นที่ปรึกษาในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต กำหนดมาตรฐานคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ติดต่อประสานงานกับฝ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และควบคุมดูแลสายการผลิตในโรงงาน ให้เป็นไปตามเป้าหมายและนโยบายที่กำหนดไว้
2	หัวหน้าฝ่ายผลิต	มีประสบการณ์ทำงานในโรงงานผลิตเทปพันสายไฟในรถยนต์ 12 ปี	มีหน้าที่ในการกำกับดูแลการทำงานของพนักงานให้เป็นไปตามแผนการผลิต วางแผนพัฒนาพนักงาน ติดต่อประสานงานกับฝ่ายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง แก้ไขปัญหาเบื้องต้น เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดปัญหาในกระบวนการผลิต และสรุปผลการทำงานรายงานต่อผู้บริหาร
3	พนักงานฝ่ายผลิต	มีประสบการณ์ทำงานในโรงงานผลิตเทปพันสายไฟในรถยนต์ 9 ปี	ทำหน้าที่ในการผลิตงานตาม order ที่ได้รับมอบหมาย ปฏิบัติงานตามเงื่อไขที่กำหนด ทำการควบคุมปัจจัยต่างๆและรับผิดชอบดูแลเครื่องจักรให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์เรียบร้อยตลอดเวลา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ตำแหน่ง	ประสบการณ์ทำงาน	หน้าที่
4	ผู้จัดการฝ่ายควบคุมคุณภาพ	มีประสบการณ์ทำงานในโรงงานผลิตเทปพันสายไฟในรถยนต์ 17 ปี	มีหน้าที่ในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และวัตถุดิบก่อนทำไปแปรรูปเพื่อควบคุมให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตรงตามมาตรฐานที่โรงงานและลูกค้ากำหนด รวมไปถึงการติดต่อประสานงานกับฝ่ายอื่นๆที่เกี่ยวข้องเช่น ฝ่ายการผลิต และจัดซื้อ ตลอดจนการวางแผนในการเพิ่มความสามารถในการส่งมอบผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อน่าถือให้กับลูกค้าอีกด้วย
5	หัวหน้าฝ่ายควบคุมคุณภาพ	มีประสบการณ์ทำงานในโรงงานผลิตเทปพันสายไฟในรถยนต์ 8 ปี	ทำหน้าที่ตรวจสอบคุณภาพหน้างาน เป็นผู้ติดตามและประสานงานระหว่างพนักงานควบคุมคุณภาพและผู้จัดการฝ่าย รวมถึงการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าเบื้องต้นในหน้างานจริง
6	พนักงานควบคุมคุณภาพ	มีประสบการณ์ทำงานในโรงงานผลิตเทปพันสายไฟในรถยนต์ 10 ปี	ปฏิบัติงานตามระเบียบคู่มือของระบบควบคุมคุณภาพได้ถูกต้อง ครบถ้วน ชัดเจน สามารถใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ได้อย่างดี มีความเข้าใจในผลการทดสอบและปฏิบัติงานด้วยความปลอดภัย
7	นักพัฒนาและวิจัยผลิตภัณฑ์ (ผู้วิจัย)	มีประสบการณ์ทำงานในโรงงานผลิตเทปพันสายไฟในรถยนต์ 7 ปี	เป็นผู้ทำการศึกษา ค้นคว้า และเรียนรู้สิ่งต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการนำมาปรับใช้ในโรงงาน เพื่อปรับปรุงผลิตภัณฑ์ และพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เดิม และผลิตภัณฑ์ใหม่ ให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น สามารถแข่งขันในตลาดได้ และสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

ภาษาอังกฤษ

[1]. Contributor, S. (2021, 12 February 2021). A Brief History of Six Sigma. https://www.shmula.com/a-brief-history-of-six-sigma/32695/

[2]. Coronado, R. B., & Antony, J. (2002). Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organisations. The TQM Magazine.

[3]. De Feo, J. A., & Barnard, W. (2003). Juran Institute's six sigma: breakthrough and beyond: quality performance breakthrough methods. McGraw-Hill Professional

[4]. Deng, B., Shi, Y., Yu, T., Kang, C., & Zhao, P. (2018). Multi-response parameter interval sensitivity and optimization for the composite tape winding process. Materials, 11(2), 220. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma11020220

[5]. Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2014). Adhesives technology handbook. William Andrew.

[6]. ECHOtape. (2018). Common Adhesive Tape Winding Problems. https://www.echotape.com/blog/common-adhesive-tape-winding-problems/

[7]. Hsieh, A. (2017). Why PVC tape was telescope after sliced? https://www.alextape.com/why-pvc-tape-was-telescope-after-sliced/

[8]. Marcilla, A., & Beltran, M. (1998). Effect of the plasticizer concentration and heating rate on the thermal decomposition behaviour of PVC plastisols. Kinetic analysis. Polymer Degradation and Stability, 60(1), 1-10. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-3910(96)00124-3

[9]. Montgomery, D. C. (2013). Design and analysis of experiments (8th ed.). Wiley.

[10]. Park, S. H. (2003). Six Sigma for quality and productivity promotion. Asian Productivity Organization Tokyo.

[11]. Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2003). A complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels. In: New York: McGraw-Hill.

[12]. Royaux, A., Apchain, E., Fabre-Francke, I., Balcar, N., Barabant, G., Bollard, C., ... & Cantin, S. (2020). Conservation of plasticized PVC artifacts in museums:

Influence of wrapping materials. Journal of Cultural Heritage, 46, 131-139. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.07.002

[13]. Tague, N. R. (2005). The Quality Toolbox (2nd ed.). ASQ Quality Press.

[14]. Walker, H. F., Benbow, D. W., & Elshennawy, A. K. (2018). The Certified Quality Technician Handbook. Quality Press.

[15]. Wypych, G. (2004). Handbook of plasticizers. ChemTec Publishing.

ภาษาไทย

[16]. กันยรัตน์ คมวัชระ. (2547). การนำซิกซ์ ซิกม่า มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพสถาบันอุดมศึกษา. วารสารประกันคุณภาพ.

[17]. ธนภัทร สุวณิชย์. (2554). การปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์สีย้อมผ้ารีแอกทีฟโดยใช้หลักการ ซิกซ์ซิกมา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].

[18]. ธัญวรัตน์ สวัสดิ์สุภผล. (2562). การลดของเสียในแผงวงจรรวมแบบไม่สัมผัส จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].

[19]. นภนิกันติ์ วงศ์ทรัพย์สกุล. (2562). การปรับปรุงกระบวนการผสมยางมาสเตอร์แบท EPDM ไม่มีน้ำมันโดยใช้หลักการซิกซ์ ซิกมา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].

[20]. นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์. (2564). เอกสารประกอบการเรียนวิชา Quality Improvement. In. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[21]. ปรียาวดี ผลเอนก. (2558). การจัดการคุณภาพ. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[22]. ปารเมศ ชุติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (Vol. 1). สานักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[23]. ภารินี แก้วสม. (2556). การลดของเสียจากข้อบกพร่องเส้นด้ายเป็นขนในกระบวนการดึงยืดเส้นด้าย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].

[24]. วรรณศิกา ศิริมงคล. (2562). การลดของเสียในกระบวนการขึ้นรูปกระเบื้องดินเผาปูพื้นโดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].

[25]. วิทยา เจนจิวัฒนกุล. (2554). การลดของเสียในกระบวนการพิมพ์พลาสติกโดยแนวทางซิกซ์ ซิกมา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Thanida Katecha
วัน เดือน ปี เกิด	08 December 1991
สถานที่เกิด	Lampang
วุฒิการศึกษา	Bachelor degree in Tools and Material Engineering at King Mongkut's University of Technology Thonburi

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University